

紧急情况下商圈地铁站的行人疏散建模及策略研究

马闪闪, 李兴莉, 郑杰, 温莎莎

太原科技大学应用科学学院, 山西 太原

收稿日期: 2022年5月1日; 录用日期: 2022年5月24日; 发布日期: 2022年5月31日

摘要

大型商业圈人员密集程度高, 行人流与交通流的组成复杂, 紧急情况下的行人疏散成为保障人民生命财产安全的重要问题。为研究现有商业圈附近地铁站疏散策略的优劣, 降低疏散后人群对地面商业的影响, 以太原某地铁站为原型, 进行实地调查, 基于现有文献与相关文件确定模拟参数, 利用Pathfinder软件进行不同人员密度的模拟仿真, 对仿真得到的数据进行分析与处理, 发现现有疏散过程的瓶颈, 可对实际疏散情况进行预警。并针对现有疏散策略进行优化, 通过再次模拟, 可以发现优化后策略解决了地铁站现有疏散策略不足, 降低了疏散人群对商圈的影响。

关键词

行人疏散, 商圈地铁, 疏散策略, Pathfinder, 出口选择

Modeling and Strategies for Pedestrian Evacuation from Subway Stations in Commercial Areas under Emergency Situation

Shanshan Ma, Xingli Li, Jie Zheng, Shasha Wen

School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

Received: May 1st, 2022; accepted: May 24th, 2022; published: May 31st, 2022

Abstract

There is a high degree of personnel density in the large commercial district, with the complex pe-

文章引用: 马闪闪, 李兴莉, 郑杰, 温莎莎. 紧急情况下商圈地铁站的行人疏散建模及策略研究[J]. 建模与仿真, 2022, 11(3): 895-901. DOI: 10.12677/mos.2022.113083

pedestrian flow and traffic flow. Consequently, pedestrian evacuation under emergencies has become an important issue to ensure the safety of people's lives and property. In order to study the advantages and disadvantages of evacuation strategies of existing subway stations near commercial areas, reduce the impact of pedestrians' choice of evacuation exit on ground-level business during the evacuation, and improve evacuation efficiency. This paper takes a newly completed subway station in Taiyuan as a prototype, obtains pedestrian gender, age, speed, and exit selection through a field survey, then determines train and station related simulation parameters based on existing literature and related documents, simulates different personnel densities using Pathfinder software, analyzes and processes the data obtained from the simulation, finds bottlenecks in the existing evacuation process, and provides early warning of the actual evacuation conditions based on the existence of bottlenecks. The data obtained from the simulation are analyzed and processed to find the bottlenecks in the existing evacuation process, and the actual evacuation conditions are warned based on the existence of bottlenecks. And the existing evacuation strategy is optimized. Through the simulation again, it can be found that the optimized strategy solves the shortage of the existing evacuation strategy of the metro station and reduces the impact of the evacuated crowd on the business area.

Keywords

Pedestrian Evacuation, Commercial Area Subway, Evacuation Strategies, Pathfinder, Exit Selection

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市化进程使得公共交通日益发达，其中城市轨道交通因其污染小、载客量大、单位距离运费低等优点，更是成为发展迅速的城市交通项目[1]。在这种环境下，紧急情况下地铁站的行人疏散更是成为保障人民生命财产安全的关键问题。

针对地铁站内的疏散，国内外学者已进行了大量工作。对于火灾[2] [3]、车站进水[4] [5]等紧急情况均有涉及。秦华礼等[6]利用 Pathfinder 研究了 T 形地铁站列车载荷对疏散的影响。赵金龙等人[7]针对旅游景区附近地铁站进行研究。Li 等人[8]讨论了火灾情况下男女分布及行走速度对疏散的影响。Zhao [9]对于地铁疏散中人的行为特性进行了实地试验。

对于商业化地铁站，也有学者开展了研究。王瑞[10]利用 Pathfinder 研究了地铁域商业空间的疏散影响因素。许胜[11]利用 Pathfinder 分析了地铁共用出口的地下商场火灾疏散路径。闫红方[12]等对地铁商业开发的消防疏散设计进行了研究。

综上，已有研究多针对单一情况或典型车站，未考虑疏散出口选取对商业圈的影响。因此，本次研究以某商圈附近地铁站为研究对象，通过实地调查，利用 pathfinder 软件进行模拟，分析现有疏散策略瓶颈点，以及人群疏散出站后对地上商圈的影响。研究成果可为解决现有疏散隐患，减少疏散后对商业圈的影响，提高疏散效率提供参考依据。

2. 构建模型

模型根据某城市主干路交叉口附近地铁站为原型，周边分布多处人员密集区域。A2 出口附近为新华书店(原外交书店)，C 出口为柳巷商业街。D 出口为鼓楼广场、山西省眼科医院，柳巷北出口。

模型参数

太原地铁是服务于中国山西省太原市及太原都市圈各地区的城市轨道交通系统，其第一条线路(2 号线)于 2020 年 12 月 26 日开通运营。



Figure 1. Subway station floor plan

图 1. 地铁站平面图

图 1 为车站布局图，可见车站目前开放三出口，每出口配置为两侧为自动扶梯中间为行走步梯。车站整体为地下建筑，分别为：地下一层售票服务层，地下二层车辆到达出发层。售票服务层核心服务区有三组闸机出入口，分别为西北侧出口闸机、东南侧出口闸机及中心段两组出入闸机。地下一层与地下二层有三处步梯，其中南北两侧步梯均处于自动扶梯之间。太原地铁采用 6 节编组 A 型鼓型列车，根据自 2014 年 3 月 1 日起实施的《地铁设计规范》(GB50157-2013) [13]，结合实地调查结果及太原地铁公布文件数据，确定列车基本情况及车站布局。设定客用楼梯倾角 $26^{\circ}34'$ ，自动扶梯速度 0.65 m/s，每节车厢 5 对车门，其余模型内相关设定如表 1，建模结果如图 2。

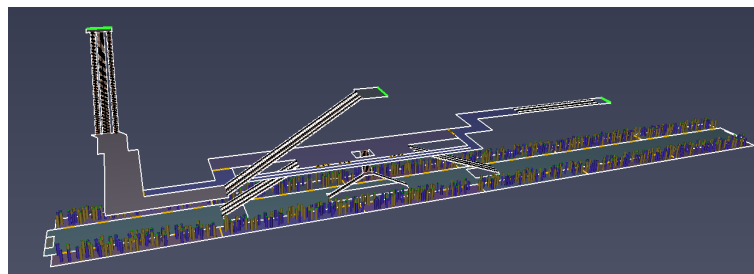


Figure 2. Pathfinder modeling actual diagram

图 2. Pathfinder 建模实际图

Table 1. Model setting parameter

表 1. 模型设置参数

参数名称	设置(mm)	参数名称	设置(mm)
客用楼梯踏步净宽	300	车厢基本宽度	3000
客用楼梯踏步净高	155	列车总长度	140,000
自动扶梯宽度	1200	车厢车门宽度	1400

根据日前公布数据：太原市地铁日均载客 10.15 万人次，每日载客列次 258 列，投入运营的列车均为六节编组。疏散分低、中、高三种密度，对应车厢人数分别为 65 人，90 人，115 人。分别对应目前非高峰时段，目前高峰时段，未来换乘站建成后平均密度三类情况。经采访工作人员与查阅相关资料，现有疏散策略分两种：A. 紧急情况未造成停电状况下，旅客使用步梯和同向扶梯；B. 紧急情况如火灾或进水等造成停电状况，旅客使用步梯和静止扶梯(视为步梯)。三种密度与两种疏散策略共构成六种原始仿真情况。

王春雪等[14]人研究发现一列车到站与两列列车同时到站的情况最为普遍。经过实地观察，发现同时到达车辆前后开门时间存在差值，故两对向车次开门时间设置五秒差值。通过为期一周(包含五工作日和二休息日)的实地调查，每天在早、中、晚三个时间段，分别持续观察一小时，通过实际记录和视频回看的方法确定性别分布与步速。调查发现，无论工作日还是休息日，男女分布均接近 1:1，不同年龄步速相差不多，但大体符合正态分布，故设计期望相同，方差不同。根据调查结果，结合人口普查报告设定仿真行人性别、年龄分布及其它特性如表 2。

Table 2. Passenger setting parameter normal distribution expectation table
表 2. 乘客设置参数正态分布期望表

类型	年龄(岁)	比例(%)	速度(m/s)	肩宽(cm)
女性	≤30	30	1.2	40
女性	>30 且≤50	15	1.2	42
女性	>50	25	1.2	44
男性	≤30	20	1.2	45
男性	>30 且≤50	25	1.2	46
男性	>50	5	1.2	48

3. 疏散模拟

3.1. 原始仿真情况

对上文提到六种原始仿真情况进行仿真模拟，每种情况均进行了数次重复模拟以及与视频对照，尽可能保证计算结果的精准，模拟结果见表 3。

仿真发现，目前仅在低密度情况下，已出现持续时间达 250 秒以上的高密度拥挤情况，即人群有长达四分钟时间可能处于高度拥挤状态。根据现有对地铁服务水平的要求，说明需要对现有疏散策略进行优化。除此之外，邻近楼梯口车厢门处出现高密度聚集点，在实际生活中意味着存在发生推搡、踩踏的风险。在到达层楼梯口处，出现长时间、大面积拥堵，行人对于步梯和扶梯的选择存在纠结情况，更大程度上加重了危险的发生概率。且前方选择步梯的人，会阻碍后方选择扶梯人员的行走路线，这一点与实际情况也是相符的。售票服务层至地面的楼梯口处易发生小规模人群拥堵。且随着密度的增大，售票服务层南侧通道会成为新的瓶颈点，D 出口的选择比例明显增加。

三种密度下，将疏散策略由 A 改换至 B 可分别缩短离开大厅的时间 1.84%、38.33%、40.63%，优化整体疏散完成时间 20.42%、40.06%、41.76%。乘客在紧急情况下往往有选择最短路径的趋势，更换策略使得可利用通道宽度变大，且使得行人的行走速度得到最大程度发挥，故对疏散时间有大幅减小。

Table 3. Comparison of the evacuation results of A and B strategies
表 3. A、B 策略疏散结果对比

仿真情况	低密度(s)	中密度(s)	高密度(s)
A-完成疏散	472.5	640.3	765
A-离开大厅	330.9	522	641.7
B-完成疏散	376	383.8	445.5
B-离开大厅	337	321.9	381

3.2. 优化策略后仿真情况

现有策略都会在楼梯口及走廊转角处诱发高密度拥堵，即瓶颈点。且大厅始终存在一定人员，不利于逃生安全。为尽快疏散，有约三分之一人员选择商圈出口(D 出口)进行疏散。而地铁站行人疏散人群聚集位置对疏散风险有影响[15]。

现有疏散设施重新改造可能性较小，故从疏散策略方向提出优化。有学者证明不同形状的瓶颈通道对自由运动的单向行人流通行能力的影响不大[16]，故而这里不对瓶颈形状进行进一步的讨论。主要优化方向为：在 B 策略，即乘客使用步梯和静止扶梯(视为步梯)的基础上，C. 更改现有闸机开放设置；D. 在 C 的基础上同时加入位置吸引引导，疏散乘客至非商圈出口。三种密度不同疏散结果见表 4。

Table 4. Comparison of the evacuation results of C and D strategies
表 4. C、D 策略疏散结果对比

仿真情况	低密度(s)	中密度(s)	高密度(s)
B-完成疏散	376	383.8	445.5
B-离开大厅	337	321.9	381
C-完成疏散	379	386.5	447
C-离开大厅	338	311.5	370.7
D-完成疏散	356.3	443.3	505.8
D-离开大厅	317	404	449

C 策略可减少低密度疏散时间 2%，对于中高密度疏散时间影响不大。说明闸机并不是制约行人速度和疏散时间的关口，也印证了人群会选择最短路径进行逃生，故而会选择已有两出站方向闸机。况且低密度情况下整体疏散时间相对较短，故调整闸机开放设置依旧会对疏散效率有一定帮助。

D 策略对于低密度情况可降低疏散时间 18.2%，明显降低了 D 出口人员的选择，由此可推断在加入位置吸引的情况下，可以人为干预乘客出口选择进而降低对商圈的影响。该策略通过对不同车厢的人定向引导走不通的楼梯和闸机，来改善现有大范围拥堵情况，以及通过人为设置吸引点的方法改变人们最短路径的选择，以此来仿真加入引导后的情况。D 策略对于中高密度会增加疏散时间，也说明自组织排队情况下高秩序并不适合人群堆积出口[17]，但通过观察仿真过程中热力图发现，D 策略对于三种密度均有效缓解了拥堵程度和拥堵持续时间，一定程度上降低了踩踏事故发生的概率。

3.3. 大厅占有率分析

一般情况下，地铁到达层及售票大厅人员密集程度相较于其他地方更高，发生紧急情况时更易出现

大面积拥堵,故将大厅存在人数作为疏散效果的一项评估指标。根据仿真数据,低密度情况下改变策略对大厅占有率的影响相对较小。考虑到该车站为换乘车站,在后续列车贯通后,车站的整体人员密度及大厅的乘客密度会进一步增大,故着重对中高密度的大厅占有率进行比较,见图3、图4。

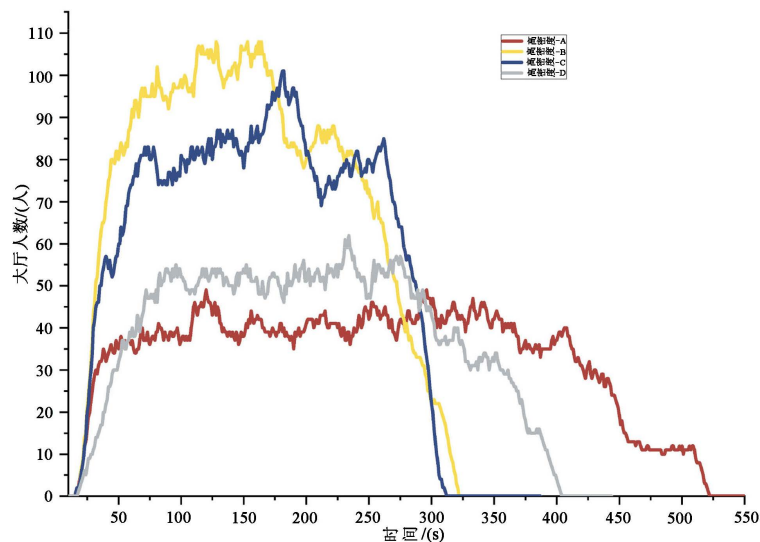


Figure 3. Hall occupancy analysis of four strategies in medium density conditions
图3. 四种策略在中密度条件下的大厅占有率分析

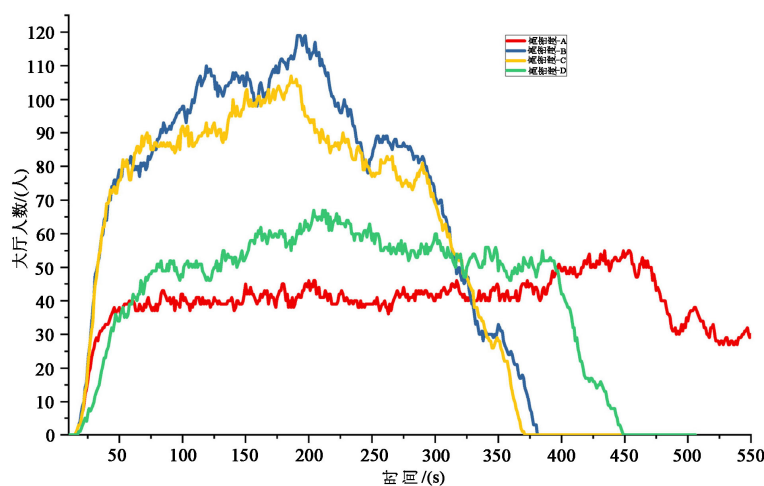


Figure 4. Hall occupancy analysis of the four strategies under high-density conditions
图4. 四种策略在高密度条件下的大厅占有率分析

由图中可以看出,优化后的D策略可明显缩短大厅高占有人数的时间,也就是说D策略可以更快将人群疏散至相对安全的区域,降低紧急情况下可能的人员损伤。同时D策略相较于B、C策略明显降低了大厅同时存在的人员数量,即同一时刻大厅人员更加稀疏,也可说明疏散效率更高。基于最短路径情况下,现有仿真可证明优化后的策略对于缓解现有疏散策略不足有明显作用。

4. 结论

- 1) 若不进行疏散策略优化,随着人群密度升高,发生拥挤踩踏事故的风险将大幅增大。

- 2) C 策略可有效缩短行人疏散时间, D 策略可有效降低出口二次踩踏的风险。
- 3) 中、高密度情况下, B 策略可缩短疏散时间, 降低瓶颈部分人员密度及拥堵持续时间。
- 4) 中、高密度情况下, 更改疏散策略可使得正对商圈的 D 出口地面影响变低, 使用率变小。

致 谢

感谢我的导师和同组师姐、师弟的帮助。

基金项目

本论文获山西省自然科学基金(201901D111255)资助。

参考文献

- [1] 2020 年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2021(6): 92-97.
- [2] 张克诚, 宋辉. 地铁火灾扩散时人员安全疏散路径模拟寻优[J]. 信息技术, 2021, 45(10): 61-64+69.
- [3] 李宇辉, 费瑞振. 地铁隧道火灾烟气蔓延和人员疏散效率研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 2022: 1-10. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20211253>, 2022-05-26.
- [4] 黄聪, 苏栋, 杨磊, 等. 考虑洪水漫延过程的地铁车站人员疏散研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(11): 2865-2872.
- [5] 胡明伟, 汤静妍, 何国庆. 地铁车站水侵应急疏散仿真研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2022, 39(2): 159-167.
- [6] 秦华礼, 武韬. 沈阳地铁特殊站点突发事件对疏散的影响因素研究[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(5): 16-21.
- [7] 赵金龙, 孙博阳, 王善生, 等. 基于 Pathfinder 的特殊地铁站点人群紧急疏散模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(1): 146-150.
- [8] Li, Z., Tang, M., Liang, D., et al. (2016) Numerical Simulation of Evacuation in a Subway Station. *Procedia Engineering*, 135, 616-621. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.126>
- [9] Zhao, C. (2021) Subway Evacuation Simulation Based on Pathfinder. *International Core Journal of Engineering*, 7, 331.
- [10] 王瑞. 基于疏散问题的地铁域地下商业空间优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [11] 许胜. 与地铁共用出口的地下商场火灾疏散路径研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- [12] 闫红方, 闫继龙, 周坤哲. 地铁商业开发消防疏散设计研究——以郑州轨道交通中兴路站为例[J]. 安徽建筑, 2019, 26(2): 43-44.
- [13] 北京市规划委员会. GB 50157-2013, 地铁设计规范(附条文说明) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [14] 王春雪, 吕淑然, 索晓. 基于不同时段人群特征的地铁疏散仿真研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(9): 101-107.
- [15] Cheng, Z., Lu, J. and Zhao, Y. (2020) Pedestrian Evacuation Risk Assessment of Subway Station under Large-Scale Sport Activity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 3844. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113844>
- [16] 杨晓霞. 基于社会力模型的地铁枢纽站行人流动态特性与疏散研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [17] Zhuang, Y., Liu, Z., Schadschneider, A., et al. (2021) Exploring the Behavior of Self-Organized Queuing for Pedestrian Flow through a Non-Service Bottleneck. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 562, Article ID: 125186. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125186>