

基于 Pathfinder 的地铁站大客流组织优化

熊 飞^{1,3} 王孝东^{2*} 李敬全³

1.昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650093

2.昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093

3.昆明地铁运营有限公司, 云南 昆明 650032

[摘要]针对地铁站大客流突发拥堵情况下,如何在短时间内进行大客流进出站组织和疏导,以确保乘客的安全、舒适,是地铁运营亟须解决的问题。利用仿真软件构建地铁站客流仿真模型,通过数据收集、环境建模、人员参数设定、行为流程建模及仿真运行,模拟地铁车站运营一个小时内的人员流动情况。分析仿真客流拥堵的原因,并从空间、设备、管理三个方面提出优化方案。对比优化前后的人员密度、拥堵点分布、进出站效率等指标,验证优化方案的有效性,为地铁站发生大客流情况后应急管理提供参考。通过运营辅助设备在非付费区设置回形走行线路可以提高站厅空间利用率,以减少客流交叉;增加安检口及启用双向闸机,客流量得到了明显提升,每增加一个安检口,客流量增加了约 23%;同时,将大客流出入口进站速度维持在 1 人/s 能较好保证车站内外的客流平衡。

[关键词]地铁站;大客流;Pathfinder 仿真;优化方案

DOI: 10.33142/sca.v8i8.17610

中图分类号: U231

文献标识码: A

Optimization of Large Passenger Flow Organization in Metro Stations Based on Pathfinder

XIONG Fei^{1,3}, WANG Xiaodong^{2*}, LI Jingquan³

1. School of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, 650093, China

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, 650093, China

3. Kunming Metro Operation Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650032, China

Abstract: In response to the sudden congestion of large passenger flow in subway stations, how to organize and guide the entry and exit of large passenger flow in a short period of time to ensure the safety and comfort of passengers is an urgent problem that needs to be solved in subway operations. Using simulation software to construct a subway station passenger flow simulation model, through data collection, environmental modeling, personnel parameter setting, behavior process modeling, and simulation operation, simulate the personnel flow situation within one hour of subway station operation. Analyze the reasons for simulated passenger flow congestion and propose optimization solutions from three aspects: space, equipment, and management. Compare the personnel density, congestion point distribution, and entry and exit efficiency indicators before and after optimization to verify the effectiveness of the optimization plan and provide reference for emergency management in the event of a large passenger flow situation at the subway station. Setting up loop routes in non paid areas through operational auxiliary equipment can improve the utilization of station hall space and reduce passenger flow intersections; The addition of security checkpoints and the use of two-way turnstiles have significantly increased passenger flow, with an increase of approximately 23% for each additional security checkpoint; At the same time, maintaining a speed of 1 person/s at the entrance and exit of large passenger trains can ensure a good balance of passenger flow inside and outside the station.

Keywords: metro station; large passenger flow; Pathfinder simulation; optimization plan

随着城市化进程的加速,城市公共交通迅速发展,各城市地铁线网逐步形成规模,地铁客运量日益增多^[1]。地铁运营在早晚高峰时段、节假日以及大型活动举办期间,人员拥挤、运动速度缓慢、客流交叉干扰严重等情况时有发生^[2-3]。在地铁站这种有限空间内,大客流非常容易导致站厅、通道、闸机等节点拥堵,肢体接触概率激增,存在踩踏风险,乘客体验恶化。严重时可能造成运营瘫痪,地铁公司应急能力下降,大客流相关投诉量增多,社交媒体负面评价增长,损害城市形象,给乘客

和地铁线路运营都带来极大的安全隐患。因此,研究地铁站突发大客流的影响因素,通过优化客流组织,对突发大客流后提出有效的建议措施,进而提升运营效率,改善乘客出行体验,降低运营风险具有十分重要的意义。

米根锁等^[4]采用精细化的确定型模型约束允许进站客流量,鲁棒模型来调节客流需求的波动区间,降低客流聚集风险。陈一洲等^[5]在疏散模拟过程中观察得出楼梯口人员易出现拱形集群堵塞现象且最占用疏散时间。潘科^[6]等对地铁站在发生火灾后人群的疏散情况进行了

分析, 楼梯, 闸机和屏蔽门为疏散过程中的重点位置, 改进闸机口的宽度可以有效提高疏散效率。Li^[7]等通过疏散仿真模拟, 分析得出楼梯、大门是疏散过程的出口瓶颈。冯茜^[8]等通过仿真探究突发大客流情况下地铁站楼梯宽度及闸机设施数量对人员疏散效率的影响。刘晓静^[9]等通过仿真探究突发大客流情况下优化进站流线、调整闸机布局等方案, 改善车站拥堵状况。樊笑笑^[10]等通过限制部分入口的客流量或引导乘客分批进入, 出口进行设计优化, 以减少站内的拥挤程度。朱涛^[11]等以武汉市某地铁站为例展开模拟分析, 确定了应急疏散能力薄弱的關鍵位置, 确定增设出口尺寸的最优值。

综上所述, 目前关于地铁站大客流的研究颇为广泛, 但深入探讨地铁站客流人员进出流动情况及站内组织对提高客流效率的研究相对较少。本研究选取昆明地铁某交通枢纽站作为研究对象, 通过调查统计该交通枢纽站人群的数量、年龄、性别等参数, 利用 Pathfinder 软件建立模型, 进行仿真模拟分析, 并从空间、设备、管理三个方面提出优化方案, 为地铁站等公共场所的应急工作提供理论依据和实践指导。

1 仿真模型构建及分析

1.1 地铁站仿真模型建立

Pathfinder 是一个基于人员进出和运动的模拟软件, 它将强大的仿真引擎与人群移动的灵活控制相结合, 能够模拟出人员逃生时可能出现的各种状况^[12-14]。为更加真实的模拟地铁大客流人员流动情况, 本研究以昆明地铁 1 号线某地铁站为背景, 通过 Pathfinder 构建的地铁站 3D 模型如图 1 所示。



图 1 Pathfinder 构建的地铁站 3D 模型

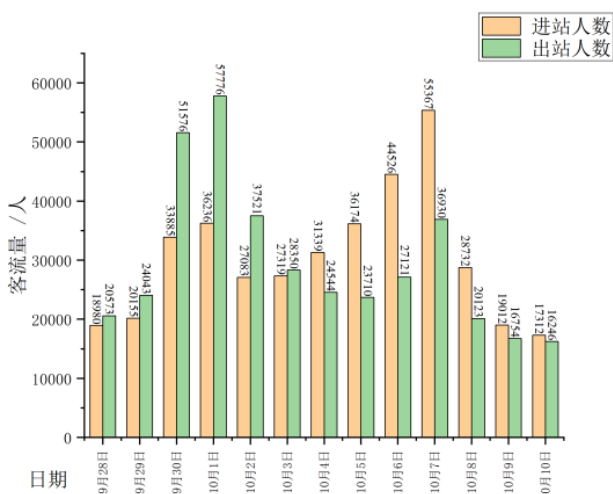


图 2 2024 年国庆节前后该车站客流情况

1.2 人员参数设定

该地铁站作为与火车站连接的重要交通枢纽, 引起其站点大客流的主要原因在于节假日(如五一、国庆)或旅游旺季(如暑期)时, 大量旅客通过铁路抵达后换乘地铁, 及假期期间务工人员、学生往返形成周期性高峰等。图 2 为该站 2024 年国庆节前后自动售检票系统(AFC)统计的客流数据, 呈现出显著的“节前离城、节后返城”双向高峰特征。

地铁站内的人员组成和人员流动速度具有一定的规律性, 且受到多种因素的影响^[15], 本研究根据现场实际调研情况确定了应急情况下人员特性的具体参数, 如表 1 所示。

表 1 地铁乘客分类参数

分类	身高范围/cm	肩宽范围/cm	速度 m/s	构成比/%
儿童	100~145	28~35	0.6~1.2	8%
少年	150~170	35~42	1.0~1.5	12%
青年男性	165~185	40~48	1.2~1.7	25%
青年女性	155~175	36~43	1.1~1.6	22%
中年男性	160~178	42~47	1.0~1.4	15%
中年女性	150~165	38~44	0.9~1.3	12%
老年人	150~170	35~43	0.5~1.0	6%

1.3 大客流人数及人员路径设定

由自动售检票系统(AFC)统计的该车站 2024 年 10 月 7 日每小时客运量情况(图 3), 可以发现早晨乘客出城较多, 出站量高于进站量。随着时间推移, 12 点以后返程高峰, 乘客大量返岗, 进站量明显高于出站量。

选取图 3 当日 16:00~17:00 进站客运量来计算仿真模型的人数。该地铁站 2024 年国庆收假日 16:00~17:00 进站客运量为 4930 人, 可以计算进站高峰期的每秒到达人数(即行人生成速率):

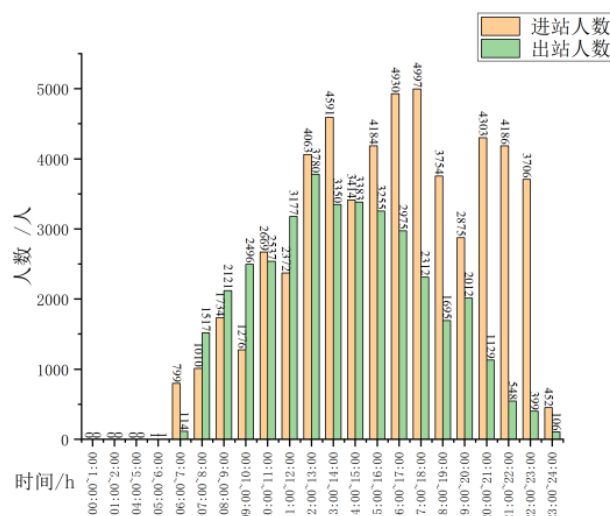


图 3 该车站 2024 年 10 月 7 日 24 小时客流情况

$$\text{每秒进站人数} = \frac{\text{小时进站人数}}{\text{时长}} \approx 1.4 \text{ 人/秒} \quad (1)$$

则进站人员设置:因大部分进站乘客为火车转地铁人员,人员主要集中在A口,设置A口行人生成速率为1.1人/s,B口行人生成速率为0.15人/s,C口行人生成速率为0.15人/s,站厅层非付费区进站人员随机分布100人。

根据图3中该地铁站2024年国庆收假日16:00~17:00出站客运量为2975人,站台双向列车间隔7分钟同时到站,可以计算每辆列车下站人数。从16:00开始,列车到站时间点分别为:16:00、16:07、16:14、16:21、16:28、16:35、16:42、16:49、16:56,共9个到站时间点,双向同时到站(上行和下行各1列),因此总到站列车数为18列,每列车平均下站人数:

$$\text{每列车平均下站人数} = \frac{\text{小时出站人数}}{\text{到站列车数}} \approx 165 \text{ 人/列} \quad (2)$$

则出站人员设置:设置站台双向列车间隔7分钟同时到站,每辆列车每隔7分钟生成165人;站台层出站人员随机分布100人,站厅层付费区出站人员随机分布100人;80%人员选择A口出站,10%人员选择B口出站,10%人员选择C口出站。

2 客流仿真运行分析

2.1 仿真概况分析

由于Pathfinder软件所导出的仿真结果图以3人/m²为人群密度的最大值,以3人/m²作为拥堵区域识别的依据,拥堵区域面积越大,说明拥堵程度越大^[11]。为使仿真结果真实有效,清晰反应地铁运营的客流情况,仿真时长选取1h,对站厅层安检口、闸机处、出口处人群拥堵密度、全过程人员路径等信息进行分析,不同时刻人员密度图如图4所示。

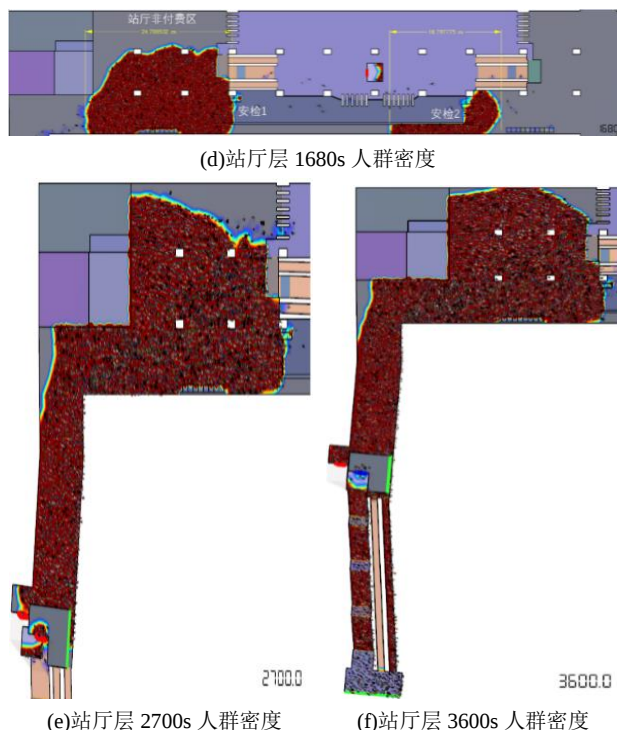
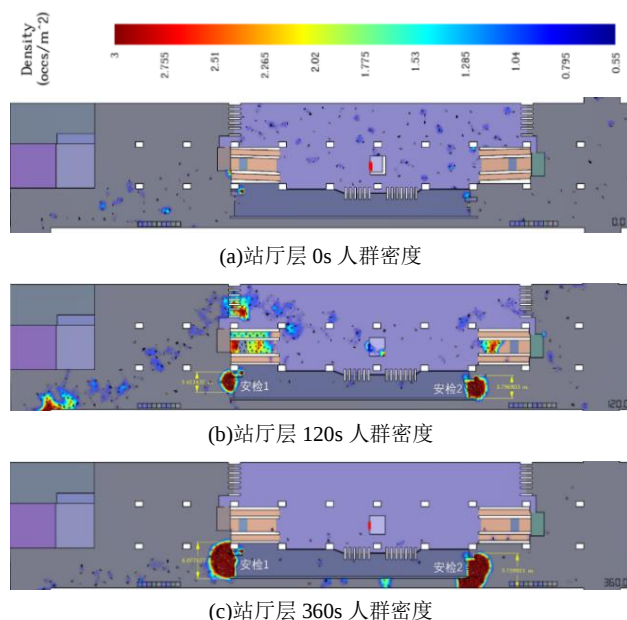


图4 站厅人员密度图

运行开始阶段,软件自动生成的人员分布情况如图4(a)所示。在120s时因为安检口客流排队进站,两端安检口发生了拥挤情况,利用“测量工具”测得两端安检口处拥堵区域近似于直径分别为3.4m、3.8m的半椭圆区域(图4(b));360s时两端安检口拥挤情况进一步发展,达到了6m,连接非付费区两端的联络通道被堵死(图4(c));随着时间推移,通往A出入口的区域人员逐渐拥堵,1680s时通往A出入口的通道被进站人员彻底堵死,出站人员无法出站(图4(d));2700s时拥堵情况已蔓延到站厅A口楼梯口处(图4(e));而到了3600s时,A出入口人员已彻底无法进入(图4(f))。

2.2 仿真人数统计分析

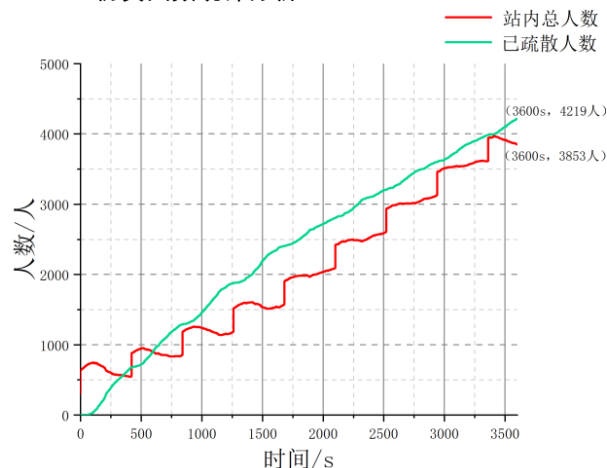


图5 站内总人数及已疏散人数统计

通过统计各时间段站内总人数及已疏散人数(图5),从中可以看到,出站人员随时间疏散至站外,疏散的总人数随时间呈线性增加,在3600s时共疏散了4219人。站内人数则随着各地铁口乘客不断进站而增加,并且列车每隔7分钟到达车站,站内人数隔7min突增330人,到模拟结束3600s时,站内人数已经达到了3853人,站内人员密度已到达最大值,造成了严重拥堵的情况。因此,如何提高大客流人员流动效率,降低拥堵将是后续研究的关键。

3 客流组织优化方案及分析

3.1 空间优化

站厅客流组织以减少客流交叉为原则,在车站客流堵点安排人员进行引导,同时通过合理运用运营辅助设备(活动围挡、一米栏、五米栏、伸缩围挡、警戒带)在非付费区设置回形行走线路的方式进行客流管控,同时通过增加乘客进站行走距离,提高站厅空间利用率,延缓乘客进站速度,以减少客流交叉和对流,确保流线畅通。为此,在仿真模型两端非付费区分别利用围栏设置回形行走线路,设置具体情况如图6所示。

(图6(a))可以看到,利用围栏设置回形行走线路后,人员均依次通过回形行走线路进入安检区;900s时(图6(b)),进站人员排队约20m,大大提高了站厅的空间利用率。但随着客流的增加,只是对站内空间进行调整无法最终解决拥堵状况;1320s时(图6(c)),因为排队人员逐渐增加,通往A出入口的区域被进站人员堵死,出站人员无法出站。所以单纯设置回形行走线路不能彻底缓解拥堵情况。

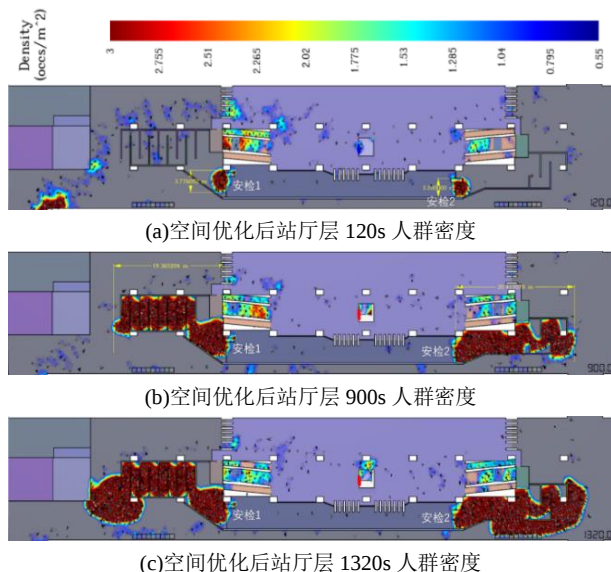


图6 空间优化后人员密度图

3.2 设备优化

在客流高峰期间,安检设备通过率不足经常引发乘客

滞留,难以满足高峰时段的通行需求。模型在设置回形行走线路的前提下,增加安检设备,调整双向闸机的方向来实现客流精细化管控。增加一台安检设备仿真模型设置具体情况如图7所示,乘客选择分别从三个安检口进入来降低拥堵情况。对人员流动情况进行分析,在第900s时,每个安检口排队长度约为8~10m,与图6(b)比较减少了约一半,但在1440s时进站人员排队堵塞了A出入口,导致出站人员流速缓慢。

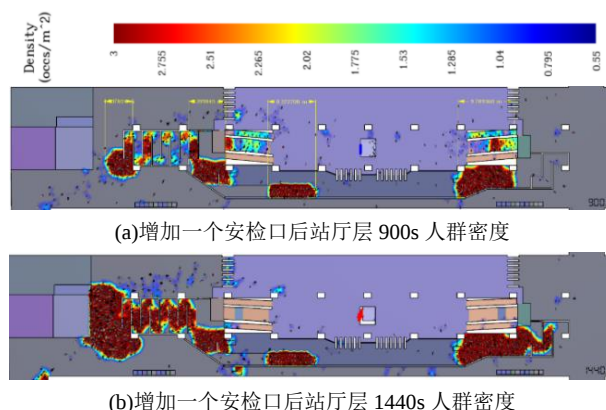


图7 增加一个安检口后人员密度图

为此,模型在另一端站厅空间内再增设一段回形走形线路,并增加一台安检设备,将4号闸机组其中3台双向闸机的方向由出站改为进站,仿真模型设置具体情况如图8所示。可以看到进站人员分别从四个安检口进入,在第900s时,每个安检口排队长度约为5~7m。在模拟结束3600s时,A出入口排队人员较多,阻挡了A出入口出站人员的空间。

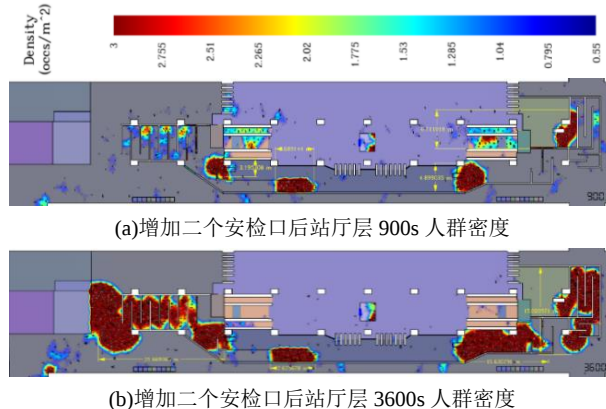


图8 增加两个安检口后人员密度图

3.3 管理优化

车站A出入口连接火车站南广场,为人流量最大的进出站口,大部分进站乘客为火车转地铁人员,客流组织压力较大,应根据现场客流情况,及时采取限流管控措施。模型中分别设置A出入口进站客流为1人/s、0.9人/s。客流设置为1人/s时,3600s时人员分布情况如图

9(a)所示,与客流为 1.1 人/s 比较(图 8(b)),进站人员分布在回形隔离栏内等待进站,没有出现人员在隔离栏外的情况,说明客流得到了进一步控制。而若限制 A 出入口进站客流降低至 0.9 人/s 时,在 3600s 时回形隔离栏内仅有少部分人员,回形隔离栏的作用几乎失效(图 9(b)),所以将大客流出入口进站客流维持在 1 人/s 能保证站内外的客流平衡。

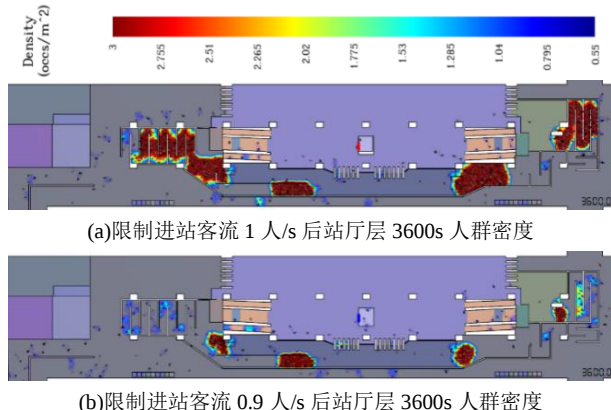
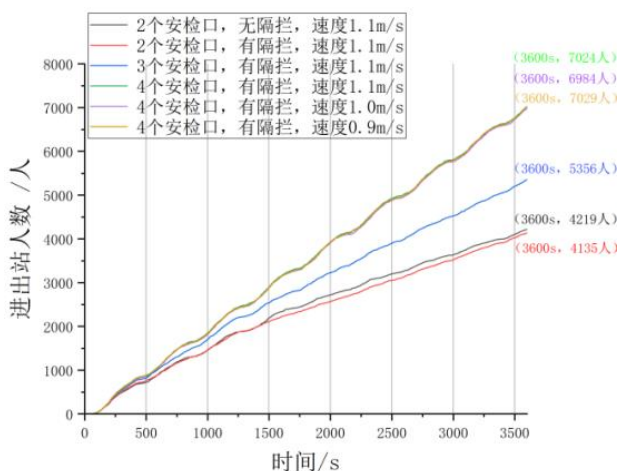


图 9 限制进站客流后人员密度图

3.4 优化后仿真对比

由模型计算出的不同情况下进出站人数数据对比(图 10)可见,单纯通过运营辅助设备在非付费区设置回形走行线路的方式客流量未发生明显改变,但可以增加乘客进站的走行距离,提高站厅空间利用率。通过对比不同数量安检口的人数,可以看到随着增设安检口,启用双向闸机进行客流调控,客流量得到了明显提升,每增加一个安检口,客流量增加了约 23%。通过限制出入口乘客的进站速度,可以降低车站站厅的拥堵密度,但同样带来的是乘客将被限制在站外,出入口排队延长,可能导致车站外乘客大量聚集,形成新的安全隐患,所以将大客流出入口进站速度率维持在 1 人/s 能维持站内外客流平衡。



4 结束语

(1) 本研究基于 Pathfinder 仿真平台,构建了 1:1 精细化地铁站模型,通过实地采集客流密度、年龄结构、性别比例等多维参数,创新性地模拟了节假日期间地铁站双向大客流的动态交互特征,识别出大客流条件下易发拥堵的关键区域,并据此从空间、设备、管理三个方面提出优化策略。

(2) 地铁站厅层通过合理配置运营辅助设备,在非付费区采用回形走行线路优化进站路径,一方面可以显著提升站厅的空间利用率,有效调节了客流速度,另一方面可以科学分离进出站人流,减少交叉对流现象,确保了客流组织有序畅通。

(3) 增加安检口及启用双向闸机,客流量得到了明显提升,每增加一个安检口,客流量增加了约 23%。

(4) 限制大客流出入口人员的进站速度对人员组织具有一定的作用,通过仿真分析,将出入口进站速度控制在 1 人/s 能较好保证车站内外客流平衡。

(5) 不足及展望:文中优化方案效果主要通过仿真分析验证,研究场景具有一定局限性,后续可开展优化方案实地验证,进一步研究多方案组合的协同效应。

【参考文献】

- [1]袁江,彭磊.广州地铁运营客流分布特征研究与应用[J].都市快轨交通,2018,31(4):63-68.
- [2]雷强.适应网络化运营的新建城市轨道交通线路运营组织方案设计研究[J].现代城市轨道交通,2024(7):115-118.
- [3]禹丹丹,陈文,韩庆龙,等.北京地铁节假日客流特点和运营组织方法分析[J].现代城市轨道交通,2019(4):58-66.
- [4]陈一洲,陈文涛,张无敌,等.复杂建筑人员密集区域疏散模型[J].中国安全科学学报,2019(5):14-18.
- [5]潘科,修顺延.突发环境下地铁大客流疏散数值模拟[J].大连交通大学学报,2017(4):142-146.
- [6]Li Z Y,Tang M B,Liang D,et al.Numerical simulation of evacuation in a subway station[J].Procedia Engineering,2016(135):616-621.
- [7]冯茜,贺亚宁,龙冬花.地铁站突发大客流情况下人员应急疏散仿真研究[J].科技与创新,2025(5):49-51.
- [8]刘晓静,张晨熙.基于 AnyLogic 的地铁车站可预见性大客流组织优化方案[J].黑龙江交通科技,2024(12):167-170.
- [9]樊笑笑,郭勇男,刘桢渝,等.基于 Pathfinder 的多出口地铁站疏散效率优化研究[J].科技创新与应用,2024(36):27-31.
- [10]朱涛,胡建华,陆愈实,等.基于 Pathfinder 的地铁站应急疏散仿真及优化[J].地下空间与工程学报,2023(2):987-996.
- [11]李成龙,李元洲,孙焕,等.不同形状出口处的人员拥挤研究[J].安全与环境学报,2014(1):137-141.

[12]王芳.基于多智能体的地铁火灾和疏散仿真研究[D].北京:北京交通大学,2023.

[13]于洋,常卉,唐杰.基于 Pathfinder 的分离岛车站平面布置客流适应性研究——以西安地铁钟楼站为例[J].绿色建筑与智能建筑,2023(8):85-88.

[14]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.

[15]罗凤霞,王光辉,杜帅楠,等.地铁站人群规律及特征研究——以广州地铁为例[J].铁路计算机应用,2012(5):11-16.

作者简介:熊飞(1993—),男,硕士研究生,研究方向:城市轨道交通工程应急管理;*通讯作者:王孝东(1977—),男,博士,副教授,研究方向:矿业通风与安全工程、矿山数字化技术等领域。