

基于Pathfinder的地铁站安全疏散模拟与优化研究

——以某市某地铁站“三岛式”换乘枢纽为例

郑梓怡¹, 赖伟², 蒋存清², 李晓恋^{3*}, 房志明¹

¹上海理工大学管理学院, 上海

²福州市公安局地铁分局, 福建 福州

³福建警察学院, 福建 福州

收稿日期: 2025年8月5日; 录用日期: 2025年8月29日; 发布日期: 2025年9月5日

摘要

为提升某市某地铁站“三岛式”换乘枢纽地铁站的安全疏散能力, 本文以该站为研究对象, 利用Pathfinder软件构建全尺寸疏散模型, 采用Steering模式模拟满负荷状态下的人员疏散过程。研究中考虑了不同年龄、性别、步速的疏散人群特性, 结合车站实际客流数据计算疏散人数, 并通过仿真分析安全疏散时间、识别疏散瓶颈。结果显示, 该站总疏散时间为578.3秒, 站台层疏散时间294秒, 满足安全标准, 但存在2号线站台楼梯口拥堵、站厅层闸机附近人流交叉等瓶颈问题。针对这些问题, 提出设置动态标识引导分流、增设应急出口、分时段控制闸机开放等优化策略, 有效缩短了疏散时间。研究成果为“三岛式”地铁换乘枢纽的疏散设计与应急管理提供了参考。

关键词

Pathfinder仿真, 地铁疏散, 三岛式站台, 疏散优化策略

Study on Simulation and Optimization of Subway Station Safety Evacuation Based on Pathfinder

—Taking the “Three-Island” Transfer Hub of a Certain Subway Station in a Certain City as an Example

Ziyi Zheng¹, Wei Lai², Cunqing Jiang², Xiaolian Li^{3*}, Zhiming Fang¹

*通讯作者。

文章引用: 郑梓怡, 赖伟, 蒋存清, 李晓恋, 房志明. 基于 Pathfinder 的地铁站安全疏散模拟与优化研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(9): 105-117. DOI: 10.12677/mos.2025.149588

¹School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai²Metro Branch of Fuzhou Municipal Public Security Bureau, Fuzhou Fujian³Fujian Police College, Fuzhou FujianReceived: Aug. 5th, 2025; accepted: Aug. 29th, 2025; published: Sep. 5th, 2025

Abstract

To enhance the safety evacuation capacity of the “three-island” transfer hub at a metro station in a certain city, this study takes the station as the research object, constructs a full-scale evacuation model using Pathfinder software, and employs the Steering mode to simulate the crowd evacuation process under full-load conditions. In the research, the characteristics of evacuees, including different ages, genders, and walking speeds, are considered. The number of evacuees is calculated by integrating the station’s actual passenger flow data, while safety evacuation time is analyzed through simulation to identify evacuation bottlenecks. The results indicate that the total evacuation time of the station is 578.3 seconds, with the platform layer evacuation time being 294 seconds, both meeting the safety standards. However, there exist bottleneck issues such as congestion at the staircase entrance of the Line 2 platform and pedestrian flow conflicts near the turnstiles on the concourse level. To address these problems, optimization strategies are proposed, including setting up dynamic signs for guidance and diversion, adding emergency exits, and controlling the opening of turnstiles in different time periods, which effectively reduce the evacuation time. The research findings provide a reference for the evacuation design and emergency management of “three-island” metro transfer hubs.

Keywords

Pathfinder Simulation, Metro Evacuation, Three-Island Platform, Evacuation Optimization Strategies

Copyright © 2025 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

某市某地铁站为 1 号线与 2 号线三岛式换乘枢纽，毗邻商业广场，其“站台－换乘站厅－站厅”多层立体结构在高峰时段易形成疏散瓶颈。在早晚高峰时段，该站客流量会急剧增大。站台层、换乘站厅及站厅层内人流拥挤现象明显。此时若发生火灾、设备故障等突发情况，容易引发拥堵，严重时还可能导致踩踏等安全事故。某市某地铁站“三岛式”三层换乘枢纽地铁站的安全疏散能力提升及换乘性能优化，始终是备受关注的研究方向。针对地铁安全疏散模拟这一具体问题，国内外学者已形成系统性研究成果，为本研究奠定了理论基础。

国内研究集中于疏散路径与模型构建领域。田杰等[1]基于高峰时段特征优化引导策略，提出提升疏散效率的路径调整机制。徐枫[2]从理论层面阐释人员行为模式、疏散速度与环境参数的耦合关系，证实模型精度决定模拟可靠性。王仲等[3]运用 Building EXODUS 软件证明科学设置疏散通道可显著提升效率。张克诚等[4]针对火灾场景研发动态路径优化算法。陈娜等[5]通过紫荆山站案例验证疏散方案优化路径。这些成果构建了覆盖行为建模、路径优化及应急响应的研究体系。国外研究在方法论层面具有显著

优势。Jeong 等[6]采用网络分析法识别疏散瓶颈区域。Wu 等[7]揭示火灾烟气扩散与建筑遮挡率的定量关联。Abdulaziz 等[8]整合多利益相关者视角建立地铁风险混合评估模型。Kim 等[9]通过模型对比证实精细模型在高密度换乘站的必要性。Jin 等[10]基于多灾种耦合理论提出动态路径冗余机制。现有研究对亚洲高密度轨交枢纽站的适配性仍显不足。

从地铁换乘站应急疏散的模拟到换乘枢纽性能优化方向，国内外研究已有一定的进展，但国际模型对亚洲高密度轨交枢纽站的动态响应机制研究薄弱，国内案例仍存在缺乏立体换乘枢纽精细化参数库的问题。本文以某市某地铁站地铁换乘站为例，利用 Pathfinder 软件还原构建了包括运行列车、站台层、站厅层和换乘站厅在内的 3D 模型，使用 Steering 模式模拟车站在有一辆列车进站时的满负荷应急疏散过程，通过安全疏散时间的量化计算，定位疏散瓶颈部位，深入探究换乘岛式站台、楼梯等设施与疏散性能间的影响规律，提出基于“三岛式”换乘枢纽特性的疏散优化策略，为地铁系统应急疏散提供参考。

2. 疏散模型构建

2.1. 车站概况

某市某地铁换乘站承担着当地 1、2 号线换乘功能，为典型“三岛式”布局的换乘枢纽点。该地铁 1、2 号线运营时间长，换乘作用大，也最为拥挤。1、2 号线使用的都是地铁 B 型列车，车体最大宽度 2.8 米，最大高度 3.47 米，单节车基本车长 19 米。地铁站为地下三层岛式车站。地下一层为站厅层，站厅层公共区由栏杆及进出站闸机分隔成付费区、非付费区两部分；地下二层为 1 号线站台层及 2 号线设备层，1 号线车站主体结构长度为 488.2 米，宽度约为 22.2 米，标准段基坑开挖深度约 16 米；地下三层为 2 号线站台层，2 号线车站主体结构长度为 211 米，宽度为 26.3 米，基坑开挖深度约 24.1 米；两条线路均为岛式站台，站厅层与站台层通过扶梯与直梯相连。两站台共享进出站大厅，设有 12 个出入口。车站采取组合换乘方式：1 号线换乘 2 号线通过上行到站厅层，步行 50 米通过换乘梯下楼到地下二层换乘大厅，再下楼到地下三层 2 号线站台乘车，2 号线换乘 1 号线则反之。其车站空间示意图如图 1 所示。

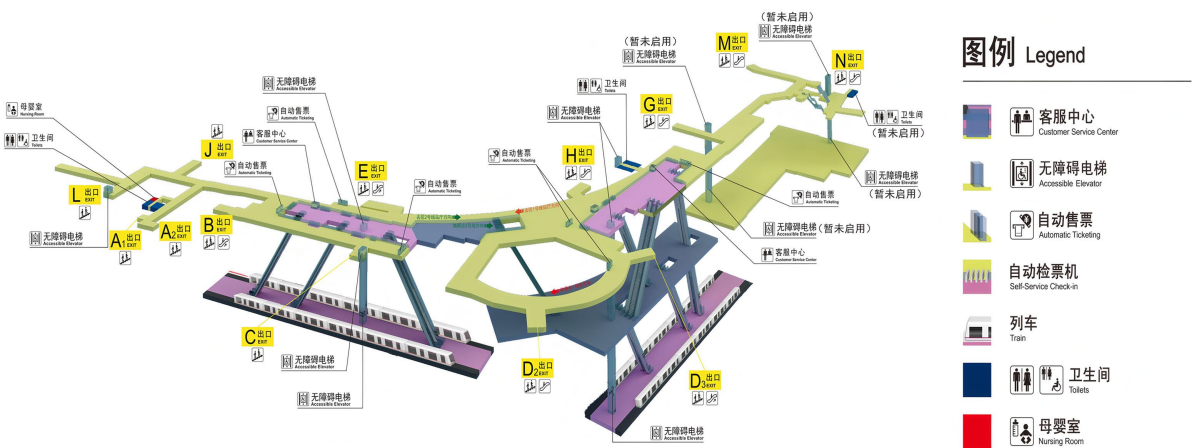


Figure 1. Station spatial layout diagram
图 1. 车站空间示意图

2.2. 疏散模型构建

根据 CAD 工程图纸中已知的尺寸参数，在 Pathfinder 软件构建车站 3D 层级图，如图 2 所示。

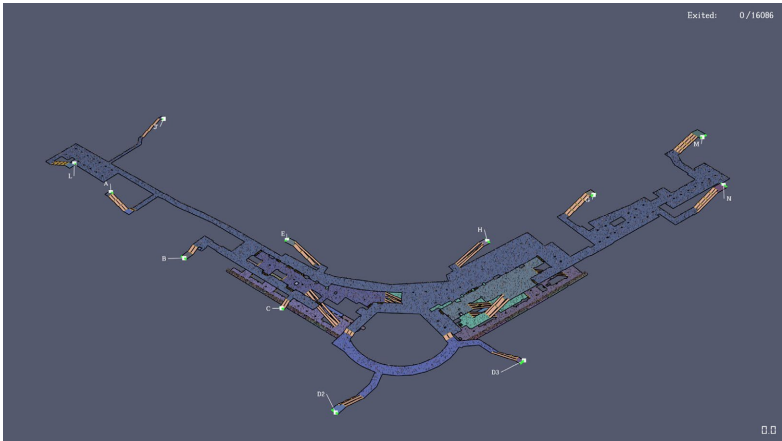


Figure 2. Pathfinder model diagram of Nanmendou station
图 2. 某市某地铁站 Pathfinder 模型图

2.3. 疏散人员设定

2.3.1. 疏散人群特性设定

某地铁站作为职住混合型车站[11]，其核心特征是早晚高峰进出站客流均衡，因此进出站客流比例采用 45%~55%的相对比例，保证模拟符合站点实际客流交互规律。根据 GB 50157-2013《地铁设计规范》[12]以及相关的人员疏散研究中，反应时间一般被设置为恒定值 60 秒。考虑到地铁客流复杂，有熟悉地铁结构的通勤和居住人群，也有游客或者前来附近就医的患者人群对该地铁站熟悉程度较低，因此反应时间设定为最小 30 秒最大 90 秒之间随机分布，此外地铁车厢内人流密度大不考虑反应时间。

为了使仿真结果更符合实际情况，本文在仿真过程中着重考虑了人员个体特征对疏散效率的潜在影响。该地铁站的疏散人员涵盖了各个年龄段和不同身体状况的人群，根据《某省第五次国民体质监测公报》和文献[13]分析及实地监控调研，按照年龄分布将疏散人员进行分类，12 岁以下的为儿童，13~18 岁的为少年，19~60 岁的为中青年，60 岁以上的为老年，进一步将人员组成比例较大且受性别影响的群体进行细分，并根据实地调查具体将疏散人员分为 4 个类别，详见表 1。

Table 1. Evacuation population characteristics design
表 1. 疏散人群特性设计

类别	平均步速/(m·s ⁻¹)	肩宽/m	比例/%
儿童	1.00	0.30	2.02
少年	1.35	0.32	3.03
中青年男性	1.53	0.40	45.07
中青年女性	1.45	0.37	45.87
老年人	1.10	0.40	4.01

2.3.2. 车厢和车站人数的设定

我国 B 型地铁列车的最大载客量为 2062 人[14]，某市将列车满载率限制在不超过 70%，因此核定单列列车载客为 1443 人。

根据地铁人员密度舒适范围可知，人员密度在 0.65 人/m² [15]时，符合正常地铁人员流通标准。为尽可能模拟最大负荷地铁站疏散情况，通过式(1)计算得到高峰期各区域预测人数，具体结果见表 2。

$$S \times \rho = \hat{y}$$

(1)

S 为车站在扣除其中包含的设备用房等面积后得到的车站内供行人通行的有效疏散面积。 ρ 为人员密度, 在该式中恒等于 0.65 人/m^2 。 $\hat{y}$ 为各区域的客流量预测值。

Table 2. Evacuation population quantity design (Unit: person)
表 2. 疏散人群数量设计(单位: 人)

车厢		站台		站厅	换乘站台	总计
1 号线	2 号线	1 号线	2 号线			
1443	1443	778	834	10062	1526	16086

2.3.3. 疏散场景条件设定

依据《地铁设计规范》(GB50157-2013) [12] 等规定, 模拟中选取最不利情况来设置疏散人数, 假定为灾害发生时两条线路各有 1 辆列车进站停靠且处于极限状态, 无法继续行驶。

根据《地铁安全疏散规范》(GB/T33668-2017) [16], 垂直电梯不计入事故疏散通道, 因此在模拟中将垂直电梯视为障碍物。应急疏散时, 站内全部闸机设置为开启状态, 所有扶梯停止运行并作为楼梯使用。在建模时, 根据 B 型地铁车型 [14], 将每节地铁列车简化为一个 $19 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$ 的房间, 总面积约为 53.2 m^2 , 每辆列车通过 6 个车门与站台相联接。

假设乘客无摔倒、踩踏等二次事故, 不考虑异常行为人员影响, 疏散过程无其他因素干扰。

2.4. 疏散模拟结果与分析

2.4.1. 疏散模拟结果

仿真开始时站台内客流情况如图 3 所示。

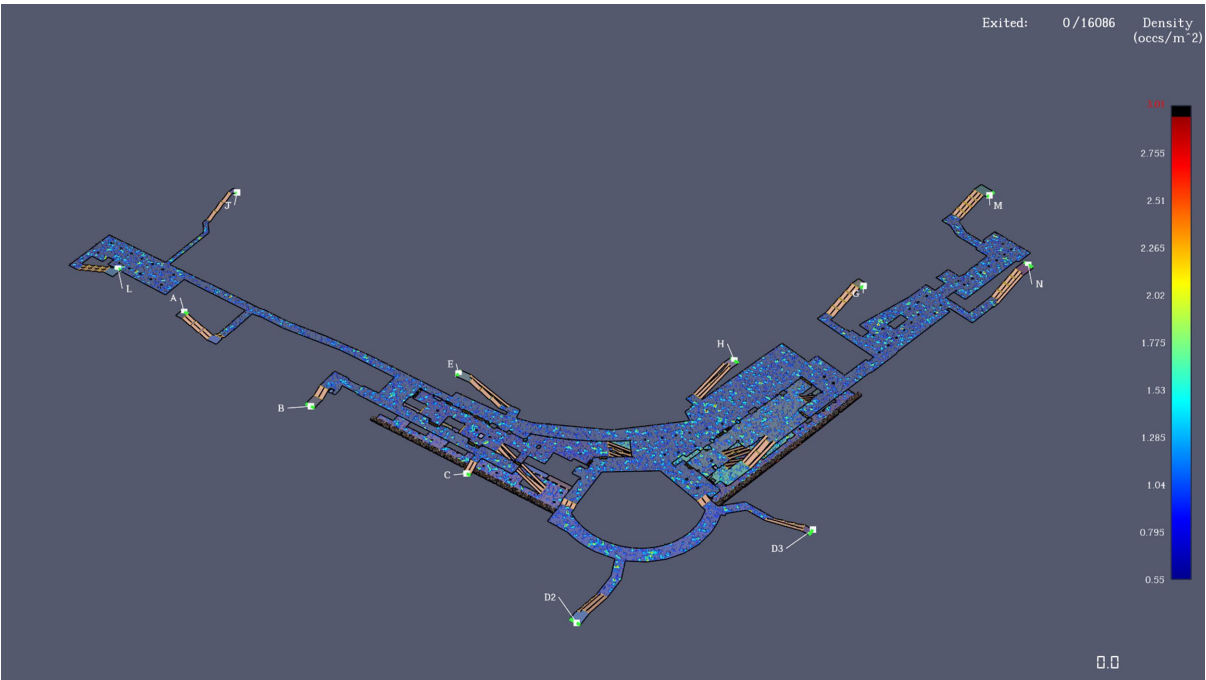


Figure 3. Diagram of evacuation simulation crowd density
图 3. 疏散仿真人群密度图

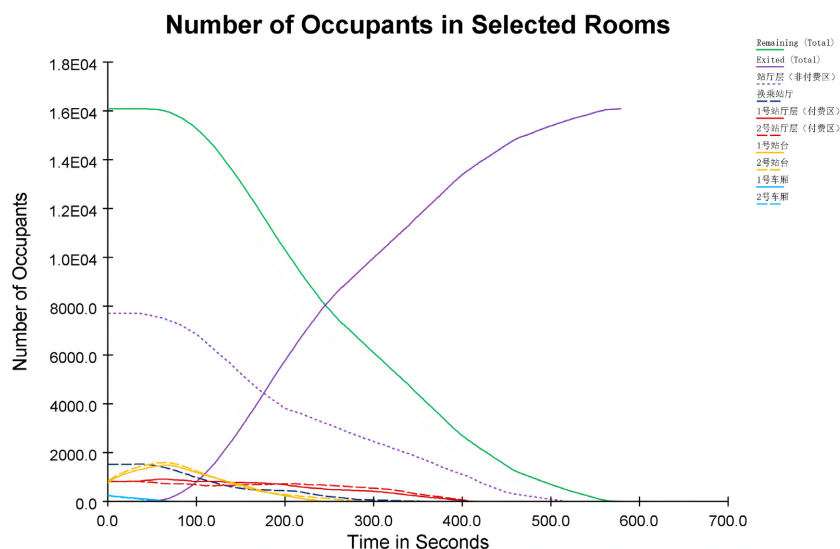


Figure 4. Diagram of the number of staying people in each area
图 4. 各区域人数随时间变化图

根据我国《地铁设计规范》(GB50157-2013) [12]的规定,车站设计中关于疏散通道、疏散出口以及楼梯宽度等要素,必须确保列车乘客与站台滞留人员及工作人员能在 6 分钟内完成撤离。实例中,针对某市“三岛式”地铁站开展的应急疏散仿真研究,该 6 分钟时限被设定为人员疏散完成的基准指标。由图 4 显示数据可见,当 12 个出入口均正常启用时,全体乘客抵达安全出口的总耗时为 578.3 秒,其中站台区疏散仅耗费 294 秒,显著优于 360 秒的最佳逃生时限要求。第 246 秒时,疏散人数曲线与滞留人数曲线相交,此时已疏散人数与滞留人数基本持平,标志着疏散进程进入后半段,瓶颈效应导致的滞留现象开始主导疏散效率。

2.4.2. 站台层疏散过程分析

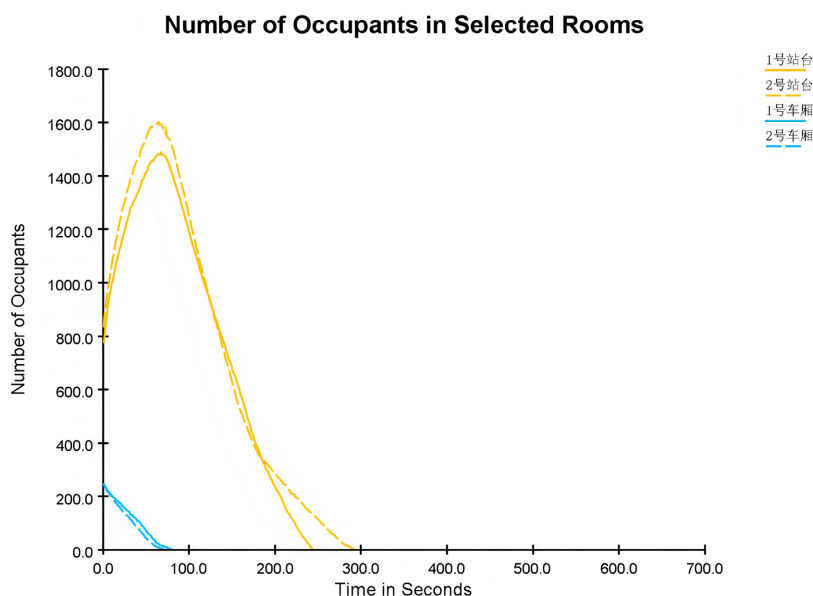


Figure 5. Diagram of the number of people in platform layer areas over time
图 5. 站台层区域的人数随时间的变化情况图

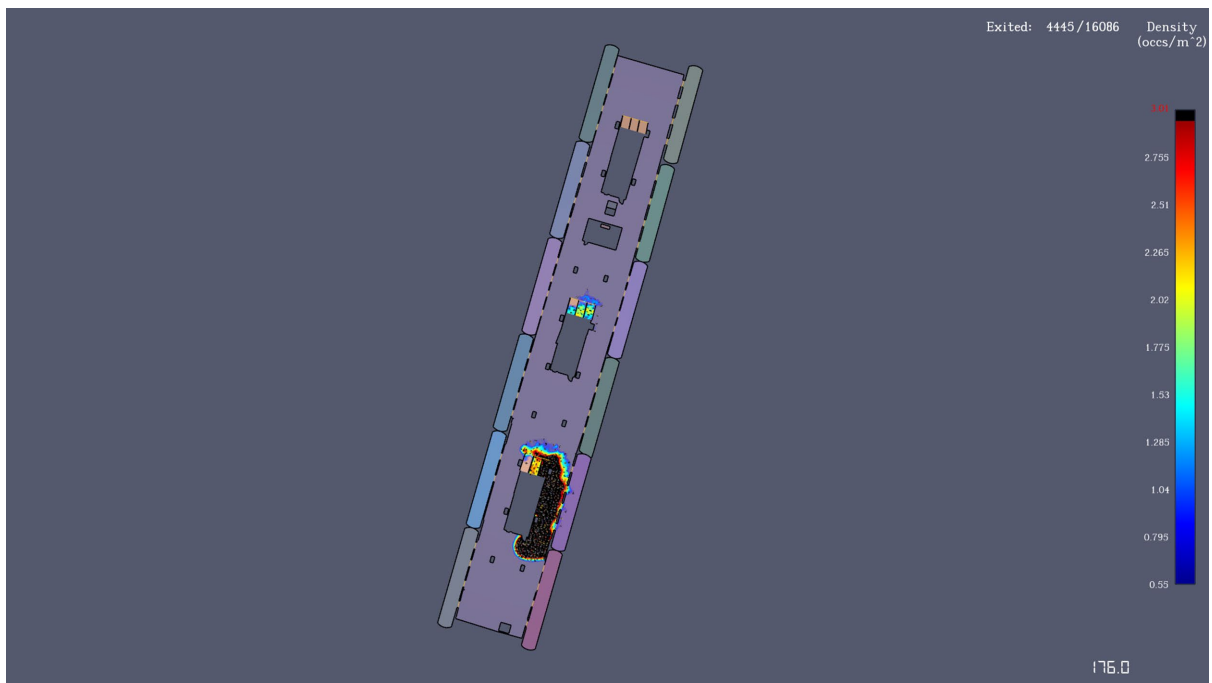


Figure 6. Diagram of crowd density at line 2 platform at 176 s

图 6. 176 秒时 2 号线站台的人群密度图

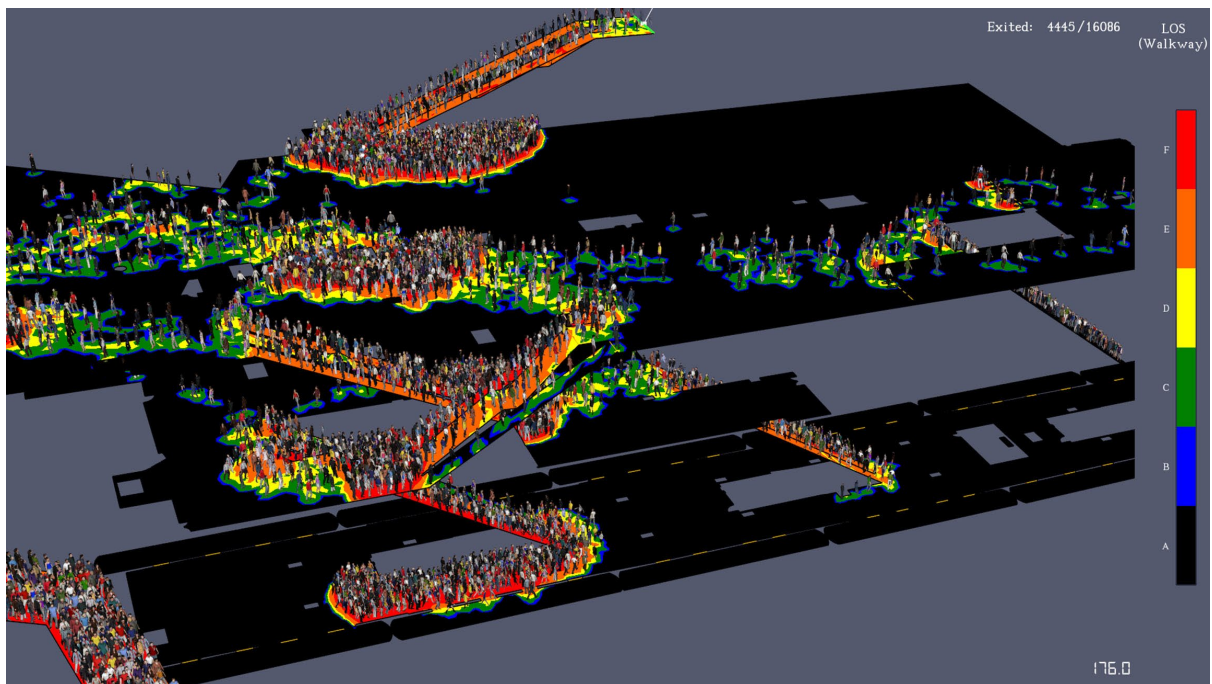


Figure 7. Diagram of service level at partial staircase at 176 s

图 7. 176 秒时局部楼梯口服务水平图

由图 5 可知, 1 号线站台疏散人数先增加后减少, 在约 64 秒时站台乘客数量达到最大值约 1482 人, 该时刻车厢内所有乘客已完成向站台的转移; 在 64 秒后滞留人数曲线呈现相对稳定的递减趋势, 表明此阶段楼梯向站厅的输送能力与站台乘客到达楼梯口的速率基本匹配, 未发生严重拥堵。在约 245 秒时,

1 号线站台人员全部撤离至站厅层。同时, 2 号线站台疏散人数先增加后减少再缓慢减少, 在约 64 秒时站台乘客达到最大值约 1601 人, 此时车厢内乘客已经全部疏散至站台; 在约 176 秒时, 疏散曲线斜率开始减少, 滞留人数的下降速率低于 1 号线同阶段, 表明楼梯口处出现了严重的拥堵, 导致疏散效率下降。

由图 6 可知, 通往站厅层的首个换乘楼梯口区域呈现异常高密度聚集现象, 与曲线斜率变化所反映的拥堵点相匹配。由图 7 分析表明, 在 2 号线站台客流达到峰值后, 乘客倾向于集中选择距离最近的首个换乘楼梯进行疏散。本研究以 Fruin 人员密度服务水平等级的研究为依据(见表 3), 2 号线首个换乘楼梯口区域在 176 秒时人员密度最高超过 3.01 人/m², 人流移动速度显著低于 0.5 m/s, 达到服务水平最糟糕的水平 F 级, 根据文献[17]分析可知, 此时步梯开放踏板空间极其局促, 极易引发局部失稳和恐慌, 增加踩踏风险。

Table 3. Table of Fruin’s personnel density service level grading standards
表 3. Fruin 人员密度服务水平分级标准表

服务水平	A	B	C	D	E	F
客流密度(人/m ²)	≤0.6	0.6~0.9	0.9~1.1	1.1~1.6	1.6~2.4	>2.4

由于乘客路径选择的集中性, 导致该楼梯口的瞬时客流负荷远超其设计通行能力阈值, 成为限制 2 号线站台整体疏散效率的核心瓶颈区域。从而得出结论: 在站台客流峰值时, 乘客倾向选最近首个换乘楼梯疏散, 易使该楼梯客流过载, 可见距离最近的首个换乘楼梯疏散风险高, 因此需借动态标识[18]实时显示各楼梯当前人流密度, 能够及时引导人流向负荷较低的楼梯进行分散, 从而均衡分配乘客至其他利用率较低的楼梯或换乘路径, 从而避免单一节点过载。

2.4.3. 站厅层疏散过程分析

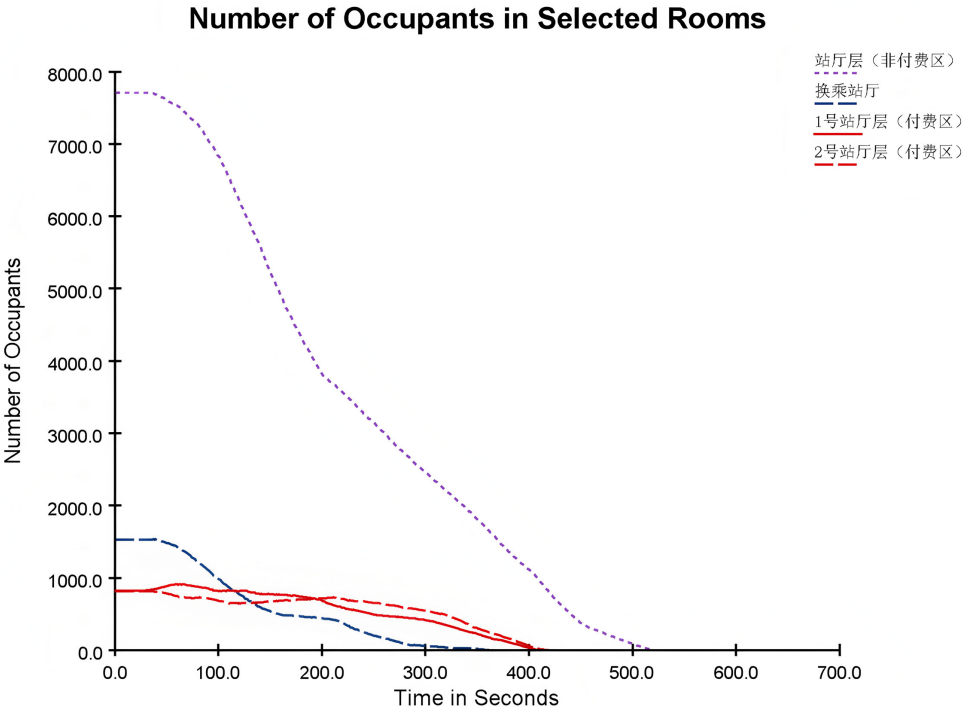


Figure 8. Diagram of the number of people in concourse layer areas over time
图 8. 站厅层区域的人数随时间的变化情况图

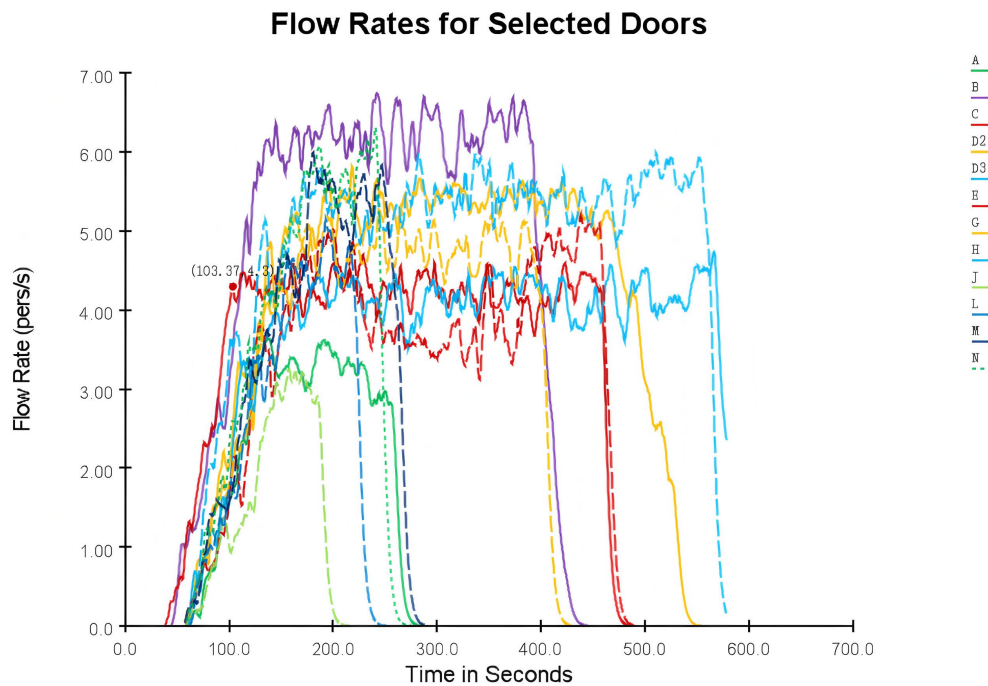


Figure 9. Diagram of the number of people passing through exits

图 9. 出口的通行人数图

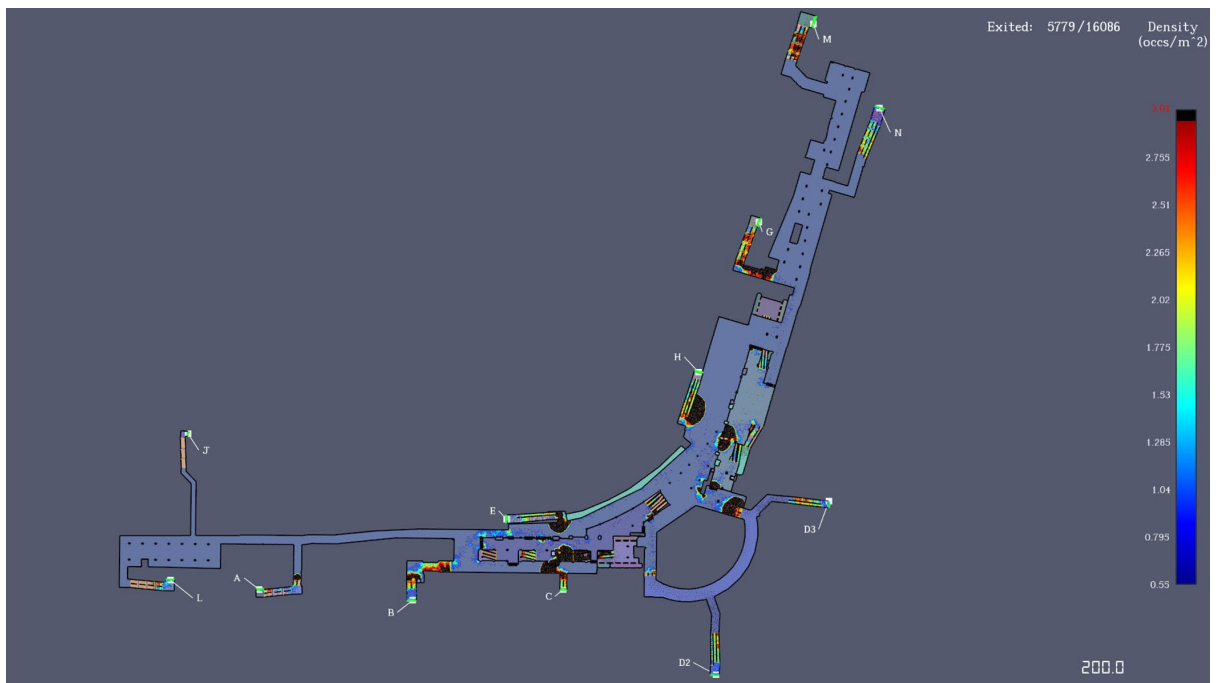


Figure 10. Diagram of crowd density at concourse layer during evacuation at 200 s

图 10. 疏散 200 秒时站厅层人群密度图

由图 8 和图 9 可知, 站厅层(非付费区)作为客流核心起点, 在疏散过程中快速下降, 说明非付费区的疏散效率较高, 人员快速向其他区域或出口流动, 并且站厅层(非付费区)呈现斜率逐渐降低的三个阶段, 在 0~200 秒区间, 疏散曲线的斜率最大, 滞留人数呈现高速率下降。此阶段, 远离付费区的 L/J/A/M/N 出

口主要疏散站厅层初始人员，人群密度低(图 10)，人员疏散相对顺畅。并且在此区间内站厅层靠近 L/J/A/M/N 出口的站厅层(非付费区)人群基本疏散完毕。



Figure 11. Diagram of crowd density at concourse layer during evacuation at 450 s

图 11. 疏散 450 秒时站厅层人群密度图

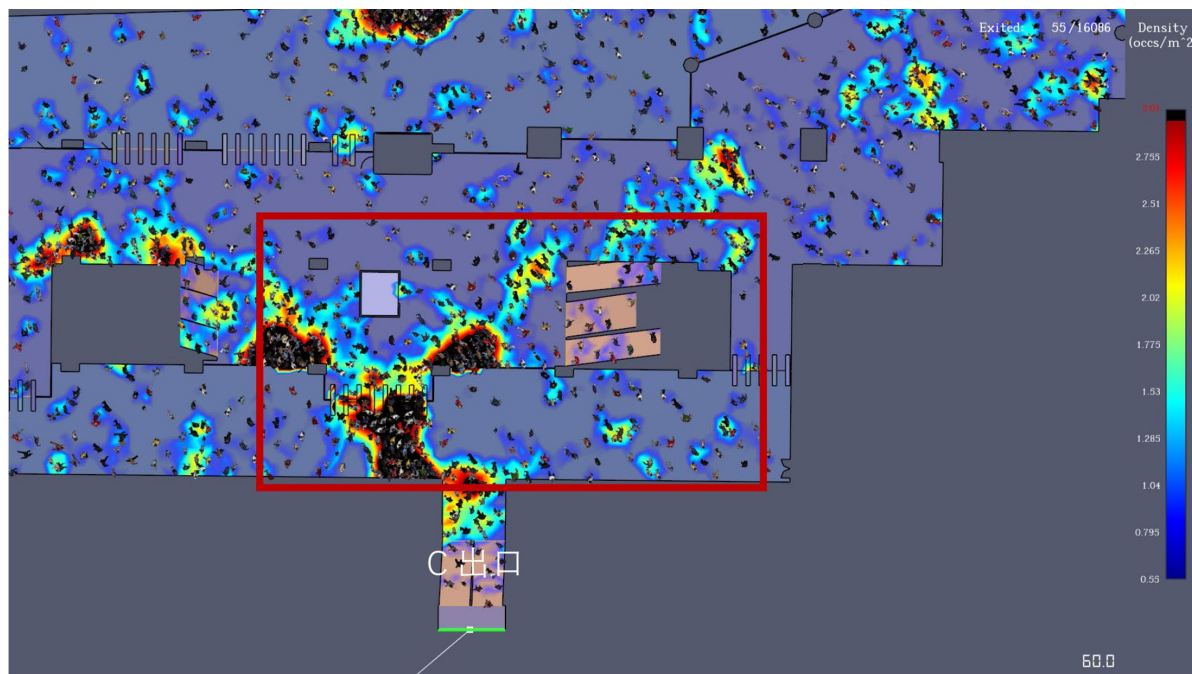


Figure 12. Crowd density in the non-paid area of line 1 concourse layer at 60 s of evacuation

图 12. 疏散 60 秒时 1 号线站厅层(非付费区)人群密度图

在 200~450 秒区间，疏散曲线的斜率减小，滞留人数下降速率明显减缓。此阶段，靠近付费区的

B/C/E/G 出口成为主要疏散口,其客流来源逐渐由站厅层初始人员转变成站台层涌上来的大量乘客,特别是 1 号线的乘客居多,此阶段在约 420 秒左右付费区人员完全疏散完毕。图 10 显示了 200 秒时刻站厅层的高密度区域开始形成,特别是在付费区闸机口附近及通往 B/C/E/G 出口的通道上,高密度人群导致移动速度下降,是效率降低的主要原因。楼梯口与闸机间缓冲区域过小,引发站台涌入客流与站厅初始人群的路径交叉。因此解决方案需重构空间布局,扩大闸机口前集散区,设置物理分隔导流带,实现站台层和站厅层双股客流的有序分离。

在 450~500 秒区间,疏散曲线的斜率降至最低,此阶段站厅层的 D2、D3 和 H 口仍未疏散完毕(图 11),其客流主要来自于 2 号线,其主要原因来源于前期拥堵以及疏散路程较长。对于前期拥堵问题,2 号线站台层动态标识的设定能够有效改善。对于疏散路径较长问题,在 2 号站台层列车停靠侧增设了与站厅层结构相似的应急出口装置。当车站警报系统激活时该应急出口可实现自动开启功能。此时进行疏散模拟,总疏散时间为 510.5 秒,较原始方案减少了 68.8 秒。因此,增设的应急出口有效缓解了 2 号站台层的人员聚集程度,显著降低了站台层楼梯口区域的拥挤状况,全面提升整体疏散效率。

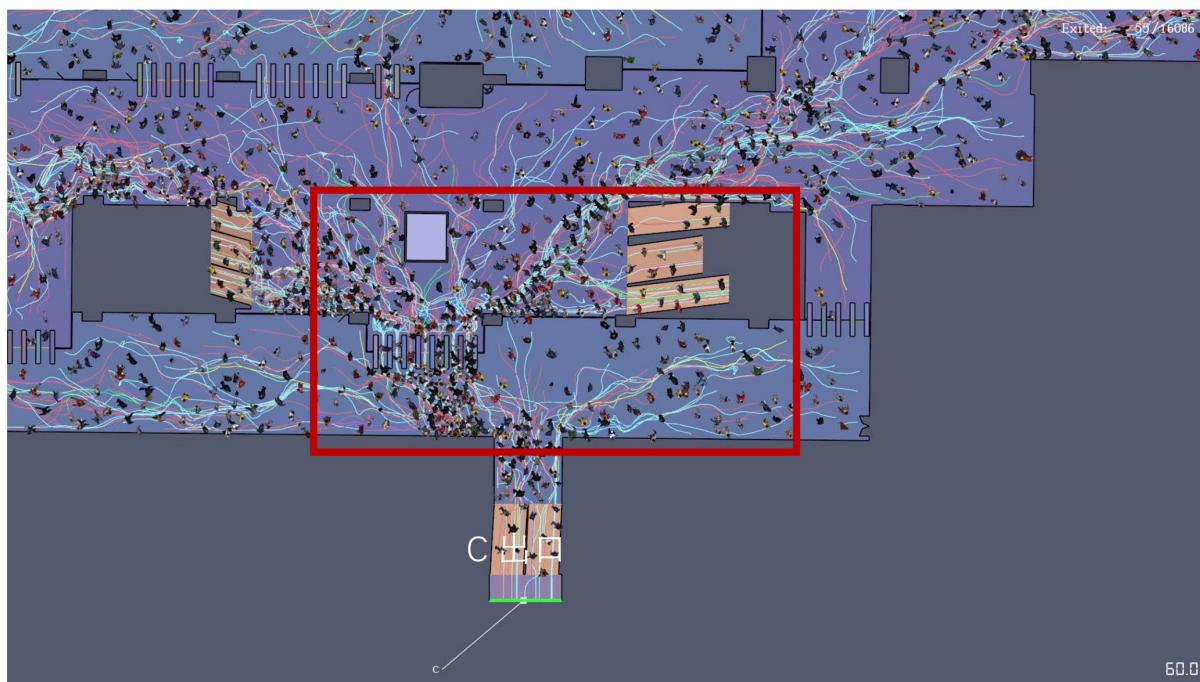


Figure 13. Crowd paths in the non-paid area of line 1 concourse layer at 60 s of evacuation

图 13. 疏散 60 秒时 1 号线站厅层(非付费区)人群路径图

由图 8 可知,1 号线站厅(付费区)的疏散曲线呈现先增加后逐渐减少的趋势,在约 60 秒达到峰值 913 人,由图 12 和图 13 红框处分析可知,由于此时还有原本站厅层人群未开始疏散,1 号线通往站厅层的楼梯口已经聚集了大量的疏散人员,排队程度逐步加重,靠近 C 出口的闸机开始出现拥堵情况,说明闸机与楼梯口的空间衔接不足,初期疏散流线冲突。同时非付费区的人群也涌向 C 出口,C 出口相较于其他出口较窄,疏散能力较低,又离闸机口较近,因此闸机口外也出现拥堵现象。在日常运营时,闸机只允许单向通行,而在应急疏散时,闸机允许双向通行,因此凸显了“三岛式”换乘枢纽在协调“日常运营流线”与“紧急疏散流线”在空间上的矛盾,现有布局未能为疏散模式下的流线冲突提供足够的空间冗余。

针对此现象本文限制站厅层疏散人群从 C 口疏散,将靠近 C 口的人群提前疏散到其他出口,把疏散

压力分摊给其余出口,平衡各出口客流压力,减少初期流线交叉冲突。此外,经模拟观测,在100秒时闸机口开始出现拥挤现象,高密度人群范围开始扩散,因此在第100秒时关闭靠近C口的闸机口,将付费区人流引导到其他数量较多缓冲空间更大的闸机口。此时进行疏散模拟,1号线的站厅层(非付费区)疏散时间减少了约70秒。因此,站厅层的客流分流方式能有效减轻靠近C口的闸机人员汇流产生的拥挤现象,大大加快了整个疏散过程,保证了人员的安全疏散。

此外,2号线站厅(付费区)的疏散曲线先减少后增加再减少,是由于“三岛式”设计需要2号线大部分乘客先到换乘站厅,再疏散到2号线站厅层(付费区),导致客流二次汇聚、疏散路径绕行,从而人群密度再次上升,疏散效率降低,反映空间布局对疏散节奏的“强制引导”——付费区和换乘区的客流交互,拉长了付费区疏散周期。在2号线站台增设的应急出口,其核心价值在于为部分乘客提供了绕过换乘站厅的“直达”路径,直接减少了绕行距离和二次汇聚点,有效解耦了换乘流线与疏散流线。因此,针对“三岛式”换乘枢纽,疏散设计必须特别关注换乘核心区(如换乘站厅、连接通道)在紧急状况下作为潜在瓶颈的风险。应尽可能提供替代的、直达的疏散路径,以分流或短接换乘客流,避免所有疏散压力都集中在固有的换乘设施上。

3. 结论

本研究通过Pathfinder软件对某市某地铁站“三岛式”换乘枢纽进行全尺寸满负荷疏散模拟,模拟结果显示,该站总疏散时间为578.3秒,其中站台层疏散耗时294秒,均满足我国《地铁设计规范》(GB 50157-2013) [12]中6分钟内完成站台疏散的安全标准。并从“三岛式”多层立体结构的本质特征出发,结合站内具体疏散瓶颈与优化效果,提炼出此类复杂换乘枢纽在疏散设计中应遵循的一般性原则,为同类结构的安全优化提供实践依据。

在模拟中,2号线站台在176秒时,首个换乘楼梯口因乘客集中选择,人员密度达3.01人/m²以上,处于F级服务水平,成为制约整体疏散效率的核心瓶颈。通过设置动态标识引导客流向负荷较低的楼梯分流后,该区域拥堵能够得到缓解。因此,在“三岛式”复杂换乘地铁站的应急疏散中不仅需要静态布局优化,更需要通过动态引导来平衡路径的负荷,静态层面需保证楼梯口等关键节点的空间冗余与均匀分布,动态层面需依托实时监测和动态标识引导客流分散,均衡各楼梯负荷。

“三岛式”枢纽的换乘功能与疏散路径深度绑定,易导致疏散流线被换乘节点“强制延长”。文中2号线乘客需经换乘站厅二次汇聚后再疏散,造成路径绕行与人群密度二次上升;而在2号线站台增设应急出口后,总疏散时间缩短68.8秒,直接验证了“短接路径”的有效性。因此,“三岛式”复杂换乘结构地铁站需主动破解换乘和疏散的功能绑定,通过增设应急出口等方式,减少换乘站厅等中间节点的客流汇聚,从根源上缩短疏散距离与周期。

在模拟实验中,站厅层的付费区与非付费区客流在闸机口形成交叉冲突,尤其C出口附近因通道狭窄、闸机与楼梯口的空间衔接不足,导致200~450秒区间疏散速率明显下降。因此本文对站厅层人群采取分流策略,将站厅层乘客限制禁止从C口疏散,同时限制闸机开启时间,从而将疏散压力分给其余疏散口,模拟中1号线站厅层(付费区)疏散时间减少了约70秒,有效减轻了靠近C口的闸机人员汇流产生的拥挤现象。因此,对于“三岛式”复杂换乘结构地铁站需强化其站厅与站台层、付费区与非付费区的衔接空间的缓冲能力,扩大闸机口前集散区、设置物理导流带分离付费区与非付费区客流,并通过分时段调控设施状态从而避免因空间衔接不足而引发的流线冲突。

综上所述,“三岛式”地铁换乘枢纽的疏散设计存在三类核心问题:一是换乘流线与疏散流线的叠加干扰,二是因换乘功能与疏散路径深度绑定所致的疏散流线延长,三是付费区与非付费区客流的时空交织。通过路径均衡、功能分解与动态调控的协同应用,能够有效消解多层立体结构特有的疏散瓶颈,

为同类枢纽的安全设计及应急管理提供可操作的实施框架。

基金项目

2023 年福建省财政厅科技项目补助专项“城市轨道交通异质客流群集演化与设施设备耦合机制研究”闽财指(2023) 891 号。

参考文献

- [1] 田杰, 苏宇鹏, 吴桐, 等. 基于疏散引导的高峰时段地铁站应急疏散方案优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2025, 44(1): 96-103+126.
- [2] 徐枫. 地铁站安全疏散理论分析及应用[J]. 中国消防, 2023(10): 58-61.
- [3] 王仲, 周庆, 杨艳, 等. 基于 Building EXODUS 的地铁站疏散仿真模拟及优化设计[J]. 城市建筑, 2023, 20(1): 63-66+126.
- [4] 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(10): 61-64+69.
- [5] 陈娜, 沈祥辉, 朱荣跃, 等. 紫荆山地铁站应急疏散计算分析与安全评估[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(4): 514-518.
- [6] Jeong, J., Lee, I., Oh, Y., Park, J. and Ahn, S. (2025) Assessment of Impact of Bottlenecks on Evacuation in Subway Stations Using Network Analysis. *Developments in the Built Environment*, **21**, Article 100632. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100632>
- [7] Wu, J., Lin, L. and Li, D. (2024) Characteristics of Smoke Movement in Subway Evacuation Corridor under Different Blockage Ratios. *Building Services Engineering Research and Technology*, **45**, 123-133. <https://doi.org/10.1177/01436244231223048>
- [8] Ahmad, A., Wang, W., Qiu, S., Wang, W., Wang, T., Aliyu, B.U., et al. (2025) A Hybrid Approach for Modelling Safety Hazards in China Subways: Multi-Stakeholders' Perspective. *Engineering Computations*, **42**, 358-387. <https://doi.org/10.1108/ec-12-2023-0963>
- [9] Kim, H., Lee, S. and Lee, J. (2024) Efficiency Comparison between Simplified and Advanced Evacuation Analysis Models: A Case Study of Guryong Station, Republic of Korea. *Buildings*, **14**, Article 2859. <https://doi.org/10.3390/buildings14092859>
- [10] Jin, B., Wang, J., Wang, Y., Gu, Y. and Wang, Z. (2020) Temporal and Spatial Distribution of Pedestrians in Subway Evacuation under Node Failure by Multi-Hazards. *Safety Science*, **127**, Article 104695. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104695>
- [11] 蓝文海. 基于 AFC 数据的福州地铁客流特征与车站分类研究[J]. 人民公交, 2025(11): 105-108.
- [12] 周庆瑞. 新版 GB 50157-2013《地铁设计规范》获国家批准[J]. 都市快轨交通, 2013, 26(5): 29.
- [13] 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.
- [14] 任天浩. B 型地铁列车车门等间距布置方案[J]. 铁路技术创新, 2014(4): 72-75.
- [15] 邵志国, 王昕鸿, 于德湖. 基于 Revit 和 Pathfinder 的地铁车站安全疏散模拟研究[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(4): 143-148.
- [16] 国家标准《地铁安全疏散规范》发布[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(6): 149.
- [17] 杨茜. 基于仿真实验的城市地铁站内楼梯宽度设置研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
- [18] 赵佳璐. 动态标识在地铁导视系统中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.