

【交通物流 / Transportation Logistics】

超深地铁换乘枢纽超长自动扶梯故障的客流疏散

廖文康^{1,2}, 楼晓雷³, 胡明伟^{1,2,4,5}, 杨文杰¹

1) 深圳大学极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 广东深圳 518060; 2) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 3) 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 311122; 4) 深圳大学滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东深圳 518060; 5) 深圳大学未来地下城市研究院, 广东深圳 518060

摘要: 在存量城市空间紧约束的背景下, 地铁车站站房建设逐渐深层化, 站内自动扶梯呈现穿越层数多、提升高度大的趋势。地铁换乘枢纽站客流大, 一旦发生紧急情况, 极易造成人群拥堵, 甚至踩踏等伤亡事故, 其中, 超长自动扶梯成为重点关注部位。根据超深地铁换乘枢纽地下空间面积大、层数多及内部结构复杂等特点, 利用Revit组合MassMotion的建模仿真方法, 以中国成都市4线地铁换乘枢纽骡马市站为例, 模拟枢纽内超长自动扶梯故障对乘客出行造成的影响。通过设置超长自动扶梯故障场景, 从微观角度模拟分析拥堵原因, 制定限制方向和客流引导等疏散方案, 减少乘客出行决策判断时间, 优先保证更多乘客正常完成出行, 缓解超长自动扶梯故障造成的客流拥堵。通过定量评估退出模拟用时与起讫点社会模拟成本等指标, 发现虽然部分方向乘客的走行和候车成本增加, 但整体出行用时降低。该方法可为地铁运营部门制定疏散预案提供参考。

关键词: 交通运输工程; 地铁; 超深换乘枢纽; 穿越多层超长自动扶梯; 突发自动扶梯故障; 应急疏散
中图分类号: U491; TP391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3724/SP.J.1249.2024.06703

Passenger evacuation for ultra-long escalator malfunctions under high passenger flow in multi-level ultra-deep metro interchange hubs

LIAO Wenkang^{1,2}, LOU Xiaolei³, HU Mingwei^{1,2,4,5}, and YANG Wenjie¹

- 1) State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China
2) College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China
3) PowerChina Huadong Engineering Co. Ltd., Hangzhou 311122, Zhejiang Province, P. R. China
4) Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities of Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China
5) Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: In cities with limited existing space, the construction of new metro stations increasingly focuses on efficient and intensive land use, with station designs trending towards deeper and more complex structures. Station

Received: 2023-12-23; **Accepted:** 2024-05-20; **Online (CNKI):** 2024-07-20

Foundation: Major Research Plan of PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited (KY2021-JT-02-07-01-2023); Guangdong Consulting and Research Project for China's Engineering Science and Technology Development Strategy (2023-GD-12)

Corresponding author: Professor HU Mingwei (humw@szu.edu.cn)

Citation: LIAO Wenkang, LOU Xiaolei, HU Mingwei, et al. Passenger evacuation for ultra-long escalator malfunctions under high passenger flow in multi-level ultra-deep metro interchange hubs [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(6): 703-711. (in Chinese)



escalators are now designed to span multiple levels and greater heights. High passenger flow in metro transfer hubs increases the risk of crowd congestion and stampede accidents during emergencies, making extra-long escalators a focal point of concern. Using Chengdu's Luomashi Station, a metro hub where four metro lines intersect, as a case study, we propose an integrated modeling method using Revit and MassMotion to account for the extensive underground space, multiple levels, and complex internal structure of ultra-deep transfer hubs. We simulate the impact of long escalator malfunctions on passengers within these hubs. By setting up scenarios of escalator failures and analyzing congestion causes from a micro perspective, we propose evacuation strategies such as directional restrictions and passenger flow guidance to reduce decision-making time, prioritize safe travel for more passengers, and alleviate congestion caused by escalator malfunctions. Quantitative evaluations of exit times and origin destination (OD) social simulation costs reveal that while the walking and waiting costs may increase for passengers in certain directions, overall travel time decreases. This research provides valuable references for metro operators in formulating contingency evacuation plans.

Key words: transportation engineering; metro; ultra-deep interchange hub; multi-level extra-long escalators; sudden escalator malfunctions; emergency evacuation

随着中国城市化进程的加快,城市轨道交通发展迅速,截止2023年底,共有59个城市开通轨道交通,运营线路达338条,线路运营里程达到11 224.54 km,当年新增加的运营线路长度为866.65 km^[1].轨道交通运营里程增加,各城市轨道交通网络“成网”发展,城市中心区土地开发强度高,地铁换乘车站也愈发增多.截至2023年底,全国城轨交通累计投运车站总计6 239座,其中,换乘车站856座,同比增长30.7%.拥有换乘站的城市达到43个,占已开通城轨交通运营城市的72.88%;拥有4条及以上运营线路,且换乘站 ≥ 3 座的城市共计27个,占已开通城轨交通运营城市总数的45.76%.超大城市中心区土地开发强度高,国内陆续出现4条地铁线路交汇的多线换乘枢纽,具有埋深大的特点.为节约市民出行时间,提升换乘效率,地铁内自动扶梯也呈现穿越层数多、提升高度大的趋势,但现行规范及标准对超深地铁车站的疏散并未提出明确标准导则.按照我国《地铁设计规范》(GB 50157—2013)^[2]规定,扶梯的上行通行能力为121人/min,是楼梯疏散能力的2倍,在城市轨道交通乘客事故中,常见由乘客失误造成事故或扶梯本身故障导致的扶梯停运,因此,基于安全疏散的地铁车站客流调控^[3],对确保乘客安全出行,维持地铁系统运营具有重要作用.

目前针对地铁车站的应急事件客流疏散已有一定研究,在应急疏散整体研究方面,HU等^[4-5]采用微观仿真模型评估了地铁站的客流组织和管理;钟茂华等^[6]使用基于元胞自动机模型开发的building-EXODUS软件进行建模,对某大型整体式站厅枢纽

换乘车站人员疏散过程进行数值模拟,分析大型地铁枢纽车站人员疏散通过能力、疏散瓶颈位置和车站疏散策略优化方案.在特定场景应急疏散研究方面,许慧等^[7]对轨道交通换乘站的密集客流疏散路线与疏散时间进行仿真研究,以检验在火灾和爆炸等突发事件下的车站应急疏散能力,为制定应急疏散策略提供有效借鉴;胡明伟等^[8]使用基于社会力模型的AnyLogic行人仿真平台构建地铁枢纽水侵疏散仿真模型,研究水侵条件下应急疏散策略对疏散效率的影响,该研究设计水侵下自动扶梯故障的场景,为本研究自动扶梯故障疏散设计与运营管理提供参考.在模型评估分析方面,CHENG等^[9]通过分析影响地铁车站应急疏散的关键因素,建立并评价地铁车站关键疏散设施的应急疏散能力模型,基于人流量理论,建立地铁车站应急疏散能力模型;杨晓霞等^[10]采用MassMotion仿真软件搭建楼梯场景,模拟乘客沿楼梯上行疏散行为,获取疏散时间基础数据,并利用基础数据训练和测试随机森林模型,实现乘客沿楼梯上行疏散时间的预测.

以上研究主要通过仿真模拟车站内部的疏散过程,建立新型分析评价模型,鲜有在空间面积大、层数多及内部结构复杂的超深地下换乘枢纽背景下,针对穿越多层超长自动扶梯突发故障时的客流疏散进行研究.本研究选取可以详细描述个体行为细节与符合实际情况的社会力模型.考虑到超深换乘枢纽空间大、结构复杂及建模步骤繁杂,选取能准确反映建筑信息的建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术搭建枢纽结构模型,提出Revit组合MassMotion的建模仿真方法,构建超

深地铁换乘枢纽中,穿越多层长自动扶梯设备发生故障时的客流疏散模型.以中国成都市骡马市地铁枢纽站作为案例,构建客流疏散模型,制定客流疏散方案,以期超深地铁换乘站制定应急处置措施提供参考建议.

1 超深地铁换乘枢纽内穿越多层自动扶梯情景

1.1 超深地铁换乘枢纽

超深地铁换乘枢纽是指地铁隧道深度接近或超过50 m的地铁换乘站.王凯等^[11]将地下空间分为浅层(地面至地下10 m)、中层(地下10~50 m)及深层(地下深度超过50 m).浅层地下空间作为地上空间的延伸,优先布置包括地铁、地下商业、小型市政以及地下停车等主要功能设施.从1934至2000年,日本地铁区间隧道的埋深从地下16 m逐渐发展至49 m^[11].

1.2 穿越多层超长自动扶梯

随着枢纽站房建设向深层化和复杂化发展,为节约市民出行时间,提升换乘效率,站房内自动扶梯呈现穿越层数多、提升高度大的趋势.一般换乘站的自动扶梯提升高度可达15 m,长度超过30 m^[12].因此,穿越多层超长自动扶梯指提升高度超过15 m、穿越楼层数量≥3层及长度>30 m的自动扶梯.

1.3 自动扶梯故障因素与疏散方式

自动扶梯应急事故的致因可分为人为因素、设备因素、环境因素和管理因素^[12].自动扶梯故障具有以下疏散难点:①自动扶梯入口处客流集中、通道狭窄;②疏散过程中乘客易出现恐慌心理;③穿越多层超长自动扶梯停止运行,加大乘客出行路径选择判断时间,易造成换乘枢纽多股客流交织,形成滞留与拥堵^[13].

因此,当自动扶梯发生故障需要疏散客流时,影响疏散安全和效率的因素可以分为:枢纽空间通行效率、设施服务能力以及组织管理能力^[14-15],如图1.根据这些影响因素,枢纽运营方可采用以下调控措施:①限流,控制站内客流量,降低特定时间段内客流运输压力;②撤离指引,有序指引客流进行撤离,减轻站内承载压力;③设置隔离,通过导流栏等对出行路线进行约束;④路径选择限制,改变其他自动扶梯运行方向或直梯停靠楼层,适应客流疏散方向.

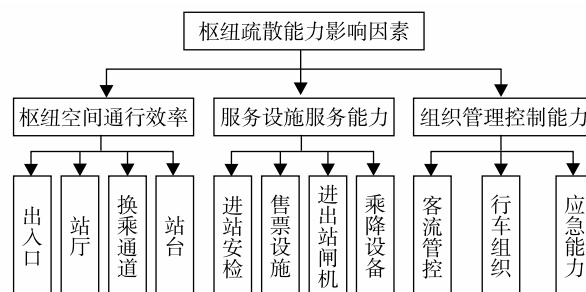


图1 枢纽疏散能力影响因素

Fig. 1 Factors affecting transfer hub evacuation capacity.

2 Revit 组合 MassMotion 客流疏散仿真

2.1 仿真方法

超深地铁枢纽埋深大,平面布局和竖向结构多样化,内部客流流线纷繁复杂,结构部件数量多,设计图纸繁复,建模流程冗杂.Revit可构建建筑信息模型,有效解决超深地铁复杂枢纽的结构模型搭建,并输出相适应格式的文件模型. MassMotion是一种基于社会力模型的行人模拟和人群分析仿真软件,可提供有关设施中拥挤、使用模式和乘员安全的清晰信息,能够在准确的三维模型中模拟乘客实际出行情况.因此,本研究采用Revit组合MassMotion的建模方法,搭建超深地铁换乘枢纽穿越多层超长自动扶梯故障客流疏散模型,探讨枢纽内超长自动扶梯故障对乘客出行造成的影响.

2.2 仿真流程

本研究构建枢纽自动扶梯故障仿真模型,设计多种情景仿真,根据仿真结果辨识问题节点,制定相应的疏散策略,并对比疏散前后效率的变化,仿真流程如图2.主要步骤为:

1) 数据收集与整理.结合行人疏散理论,收集相关规划资料及文献,并梳理建模仿真思路.

2) Revit组合MassMotion建模.通过分析计算机辅助设计(computer aided design, CAD)图纸,使用Revit构建超深地铁换乘枢纽基础模型,并对楼梯、自动扶梯、直梯、结构柱及墙等主要模块进行定义编号,便于仿真模型搭建.将枢纽基础模型导入MassMotion中,将结构部件逐个转换为仿真构件,并结合软件特点进行细部调整,保证模型顺利运行.结合相关资料及现场探勘,设置乘客年龄结构,调整客流行为路线,使模型更符合现实情况.

3) 模型参数设置与仿真.结合穿越多层自动

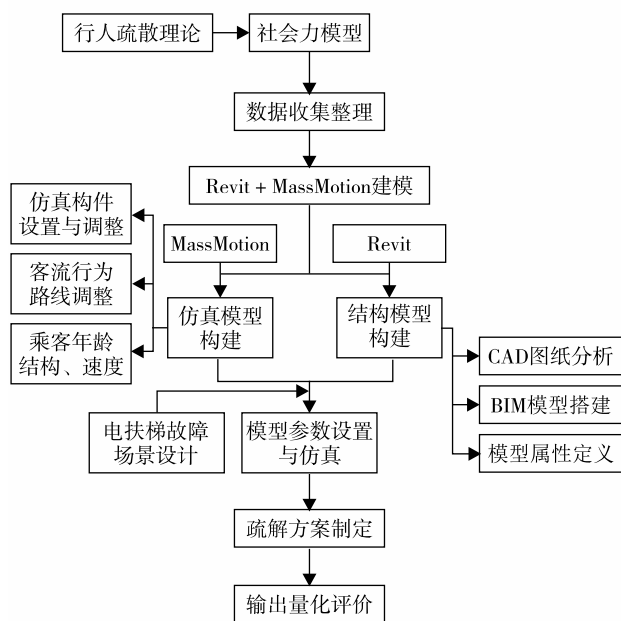


图2 运用 Revit 组合 MassMotion 建立自动扶梯故障的客流仿真模型流程

Fig. 2 Passenger flow simulation flowchart for escalator malfunctions by using Revit and MassMotion.

扶梯所在位置, 设置不同自动扶梯故障情形, 通过仿真找出自动扶梯故障对客流出行影响的关键节点.

4) 疏散方案制定. 通过制定自动扶梯故障场景下的疏散方案, 解决拥堵关键节点, 降低自动扶梯故障带来的客流出行影响.

5) 输出及量化评价. 通过对比仿真过程流畅程度及行程时间等变化, 评价疏散方案, 为超深地铁换乘站运营管理方案制定应急处置措施提供参考建议.

2.3 客流疏散评价指标

本研究主要从个体退出模拟用时、个体平均旅行退出时间及平均模拟起讫点(origin destination, OD)社会成本等3个维度评价客流疏散指标.

2.3.1 个体退出模拟用时

个体退出模拟用时指显示每位乘客从模型上退出模拟的时间. 在退出模拟过程中, 模拟出口附近的点具有较小的持续时间值, 而远离出口的点具有更大的持续时间值, 数据区段直接显示在模型上, 以个体退出模拟用时图直观的反映优化前后行程时间的对比, 具体可扫描论文末页二维码查看补充材料图S1.

2.3.2 个体平均旅行退出时间

个体平均旅行退出时间用于确定乘客完成某一

行程所花费的时间, 可找出行程时间受影响严重的乘客, 分析乘客平均旅行退出时间, 对比优化前后相关乘客的行程时间变化.

2.3.3 模拟OD社会成本

OD社会成本指起点至目的地社会成本. 每个乘客行程的相关信息以加权时间或成本值表示. 一般而言, 将乘客行程分成在不同活动(如行走、等待或爬楼梯)上所花费的时间, 权重因子适用于这些活动中的每一个, 加权活动的总和称为广义行程时间. 当乘客正在行走或等待时, 会根据加权计算额外成本. 额外成本和广义行程时间的总和用于计算总成本, 拥挤度因子的具体取值见表1.

表1 拥挤度因子

Table 1 Congestion factor

密度 $P/$ (人·m ⁻²)	拥挤度因子	
	行走	等待
$P \leq 0.5$	0	0
$0.5 < P < 2.0$	1.5	$0.667 \times (P - 0.5)^2$
$P \geq 2.0$	0.5×1.5	$0.5 \times 0.667 \times (P - 0.5)^2$

3 案例分析

3.1 模型数据

骡马市地铁站位于成都市青羊区, 地处成都市中心地区, 详情可扫描论文末页二维码查看补充材料图S2. 骡马市地铁站是现运营1号线和4号线的换乘站, 同时有10号线和18号线在建, 未来将建设成为4线换乘的枢纽站点, 站点深度将达到地下40 m以下. 其中, 18号线站台在4线站台中最深处, 位于负6层, 如图3. 在18号线建成初期, 高峰小时客流预计可达到 1×10^4 人次/h以上. 枢纽具有地下空间面积大、层数多、客流量大及客流组织流线复杂等特点. 站内同时建有3座越4层的超长自动扶梯, 扶梯长度可达45 m, 提升高度达23 m.

3.1.1 建筑方案分析

骡马市地铁枢纽共6层, 平均层高约6.3 m, 站体长约190 m, 宽约50 m. 负1层为有1、4号线站厅及10、18号线换乘厅; 负2层为10、18号线站厅, 10、18号线可通过两组楼扶梯到达负1层换乘1、4号线; 负3层为18号线预留层, 并预留打开条件; 负4层为10、18号线设备层, 主要为10号线变电所夹层及其他两线设备管理用房; 负5层

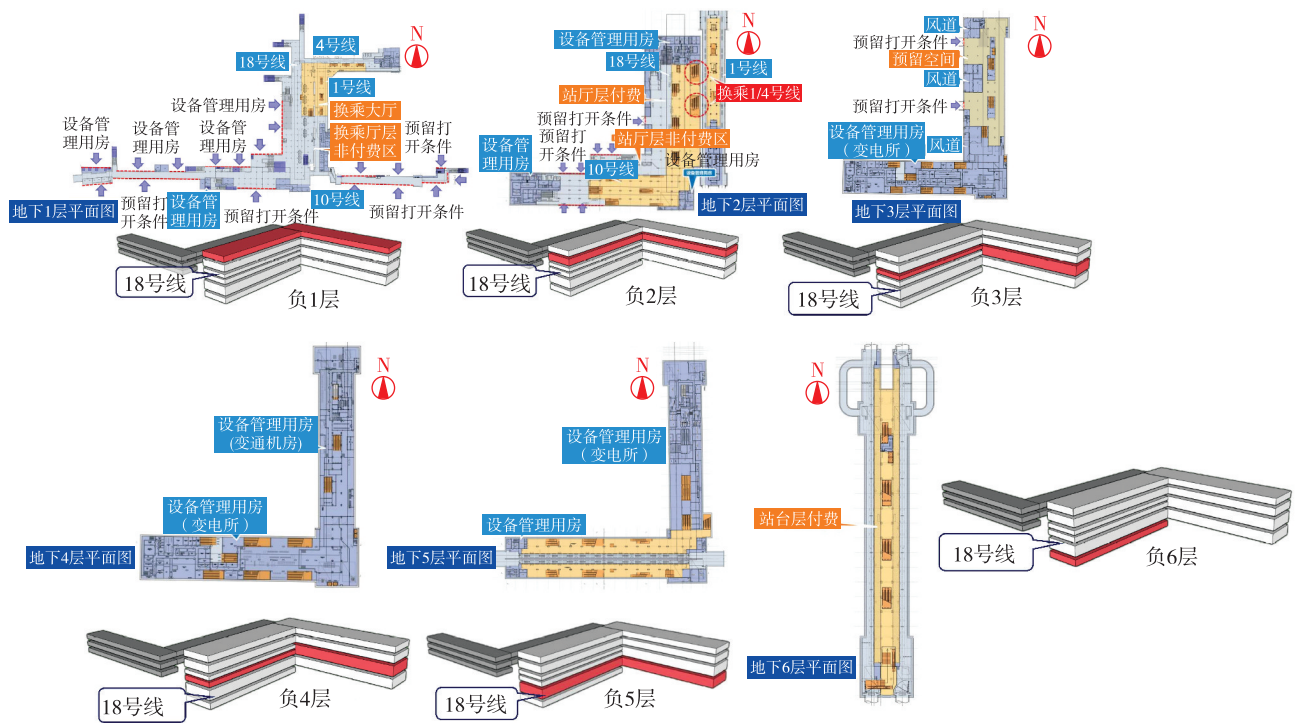


图3 骡马市地铁换乘建筑方案平面示意

Fig. 3 (Color online) Building plan schematic diagram of Luomashi metro interchange hubs.

为18号线变电所及其他设备层,10、18号线通过端头扶梯换乘;负6层为18号线站台层,设换乘扶梯直达负五层换乘10号线.

3.1.2 参数设置

通过调研枢纽客流量数据及实地调查估算,得到仿真模型主要输入数据,模型主要参数设置如下.

1) 行人的年龄分段和行走速度.不同城市使用地铁出行的乘客年龄结构不同,参考成都及相近类型城市的行人年龄分段及行走速度,设定本次仿真的性别和年龄比例,并对应相应的行走速度,具体如表2.

2) 客流参数设置.参考骡马市18号线工程项目可行性研究报告,取2032年的预测客流作为仿真的客流规模,以期为枢纽运营提供经验参考,客流取值见表3与表4.

3) 设施设备属性.参数站内出口通道宽度为4~6 m,自动扶梯宽为1.0 m,楼梯宽为2.0 m;

表2 行人特征参数与仿真客流比例

Table 2 Pedestrian characteristic parameters and simulation passenger flow ratio

行人类型	占仿真比例/%	身高/m	平均行走速度/(m·s ⁻¹)
成年男性	41	1.75	1.58
成年女性	32	1.65	1.43
老人	12	1.60	1.17
小孩	15	1.20	1.17

18号线站台层列车沿南、北两方向的轨道驶入,采用A型车,是载客量最大和使用最广泛的地铁车型.每节车厢长22.3 m,宽3 m,车厢每侧有5个门,每个门宽为2 m,工作日高峰期列车的到站间隔为4 min,每个站点停靠20 s供行人上下车.穿越多层超长自动扶梯共有3组,主要连接枢纽负6层与负2层,长度约45 m,提升高度约23 m,平均每部自动扶梯宽度约1.9 m.

4) 客流路线18号线与既有1、4号线在负1层

表3 客流仿真取值

Table 3 Passenger flow simulation values

年份	上行:火车北站—机场北站			下行:机场北站—火车北站			合计	高峰小时客流
	上车	下车	断面	上车	下车	断面		
2032	4 409	849	4 263	1 911	5 245	10 881	12 414	15 580

表4 换乘高峰小时客流仿真取值

Table 4 Transfer passenger flow simulation values 人次·h⁻¹

换乘方向	早高峰	晚高峰
18—1	621	1 227
1—18	1 372	590
18—10	2 752	1 187
10—18	1 278	2 398
18—4	1 414	2 500
4—18	3 047	1 206

换乘,与10号线分别在负5层与负2层换乘,1层设有两个出入口与负1层相连,乘客主要依托这两个出入口进出18号线。

5) 行人疏散场景设计围绕本次研究内容,从基础到极端设计了4种自动扶梯故障场景,分别为中间、两侧、全部超长自动扶梯停用以及全部超长自动扶梯停用但仍当楼梯使用。

3.2 原始情景

原始情景指正常情景下高峰期枢纽运营情况,按照预期客流水平、行人结构比例及高峰期发车间隔进行模拟,自动扶梯与直梯正常运行,仿真结果显示行人换乘、进出枢纽流畅,工程项目可行性研究报告内容通过仿真方法验证,枢纽能够保证在正常运营情景下的客流集散。

3.3 不同自动扶梯故障场景模拟

通过模拟4种自动扶梯故障场景,其中,情景1、情景2及情景3的问题主要集中在:①直梯周边,上下车乘客在此区域有较大客流交织,如图4;②最右侧负6层连接负5层的扶梯,原进出站、换

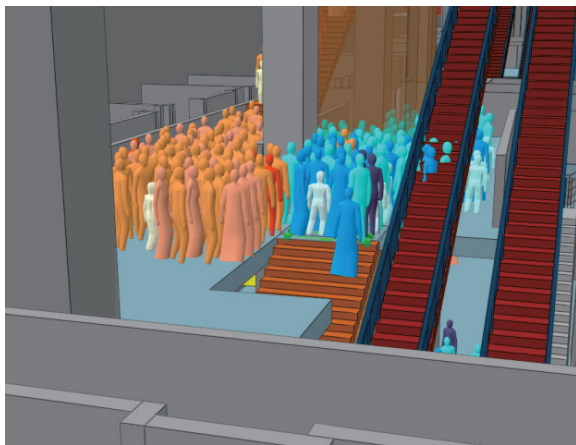


图4 直梯处拥堵示意

Fig. 4 (Color online) Congestion schematic diagram at the elevator area.

乘1、4号线客流与换乘10号线客流存在交织,形成拥挤。而超长自动扶梯停运后用作楼梯使用的场景,模拟显示对出行整体无较大影响,因此,本研究主要针对情景1~3进行疏散优化。

3.4 穿越多层自动扶梯故障场景的疏散策略制定

通过模拟分析,辨识出各个情景下均有共性的拥堵点位,针对情景1~3采取同样的叠加式疏散策略,观察不同疏散策略对客流仿真流畅程度的影响,最终判定出适宜的疏散策略,具体策略如表5。

表5 自动扶梯故障优化策略

Table 5 Escalator malfunction optimization strategy

策略	方式	具体策略	优化问题
1	限制方向	直梯直连负6与负2,限制楼层停靠	减少模型中市民至其他楼层乘坐直梯,简化客流流线
2	限制方向	限制直梯处楼梯通行方向	减少进出站乘客交织导致楼梯拥挤
3	限制方向	负5层至负2层自动扶梯调整运行方向	提升出站效率
4	客流引导	调整上车客流分配比例,提升损坏自动扶梯周边的上车使用比例	减少仍在使用的自动扶梯周边大客流拥挤
5	客流引导	设置导流栏,规范自动扶梯周边的使用秩序	减少乘客不文明使用所造成的效率影响

3.5 自动扶梯故障拥挤场景下的疏散效果分析

3.5.1 个体退出模拟用时对比

根据上述疏散策略进行模型仿真后,原拥挤客流点位得到疏散。选取负6层及负5层进行乘客退出模拟用时分析,乘客从拥堵点位转移至车辆候车区域,表明采取疏散策略使乘客可继续完成出行,乘客退出模拟时间花费从拥堵点位转移至候车区域,如图5。通过统计正常运营情景乘客退出模拟用时,大于5 min的乘客退出模拟时间占比最少,因此,统计自动扶梯故障场景优化前后退出时间大于5 min的乘客数量。平均各个场景中原本大于5 min退出模拟的乘客减少了约77%,具体各情景结果如表6。

3.5.2 个体旅行退出时间与OD社会成本分析

分析各情景个体退出时间及出行成本,将优化前后的整体出行用时、已完成出行的成本及未完成出行的成本以柱状图进行对比,结果见图6和图7。

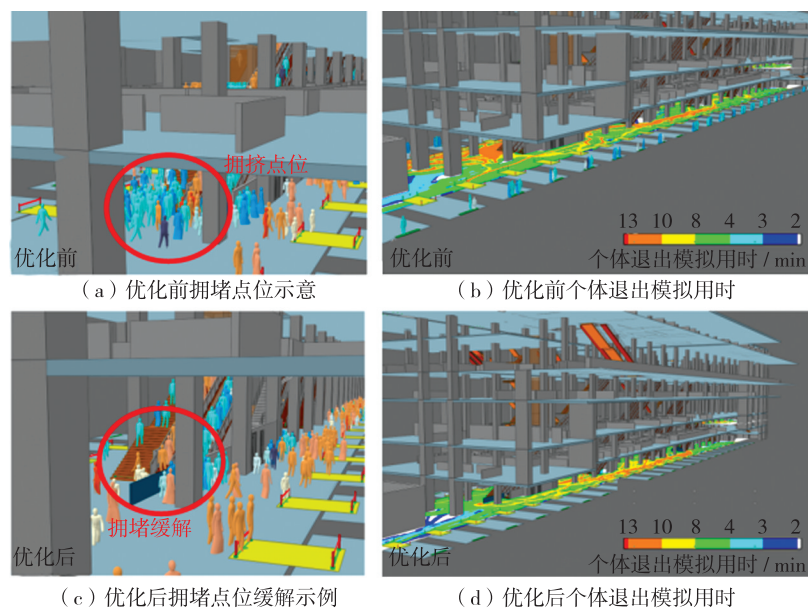


图 5 优化前后仿真效果对比

Fig. 5 (Color online) Simulation effects comparison before and after optimization. (a) Example of congestion points before optimization, (b) individual exit simulation time before optimization, (c) example of congestion point alleviation after optimization, and (d) individual exit simulation time after optimization.

表6 优化前后乘客退出模拟时间大于5 min的数量对比
Table 6 Comparison of passenger exit simulation times greater than 5 minutes before and after optimization 人

情景	优化前	优化后
1	74	56
2	81	62
3	56	45

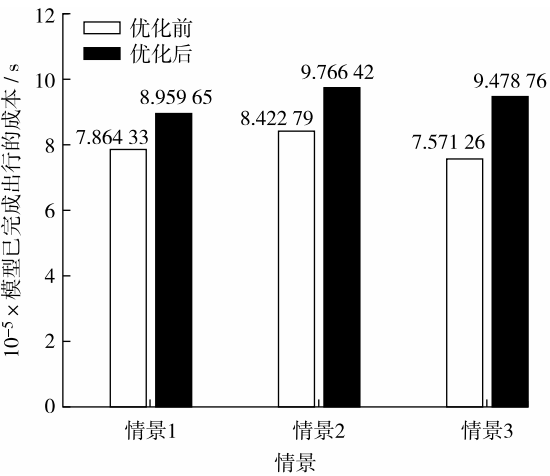


图 6 优化前后模型已完成出行的成本变化

Fig. 6 Trip costs upon completion of the model before (hollow column) and after (solid column) optimization.

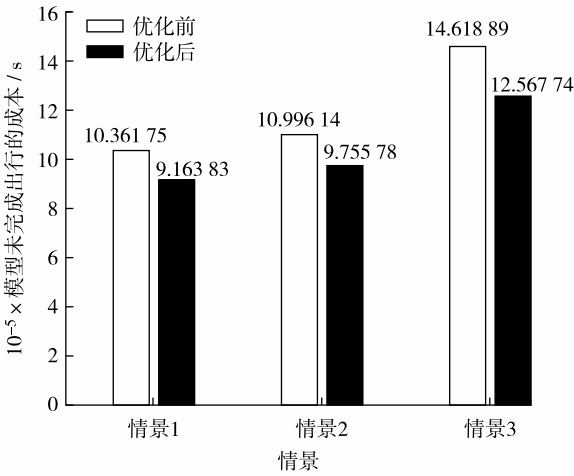


图 7 优化前后模型未完成出行的成本变化

Fig. 7 Uncompleted trip costs of the model before (hollow column) and after (solid column) optimization.

优化后的模型完成出行的耗时平均下降约 22 s，具体见表 7。由图 6 和图 7 可知，优化后已完成出行的成本平均增加 18.3%，未完成出行的成本平均下降 12.3%，表明通过采取疏散方案，在 15 min 的有限模拟时间内，可完成出行的人群数量得到增加。但部分方向乘客在行走、上下扶梯及候车时的成本略有增加，如在情景 1 中，火车北站方向客流换乘 1、4 号线方向的成本下降 24 688 s，而机场北站方向客流换乘 1、4 号线方向的成本增加 103 391 s。

表7 优化前后模型用时变化

Table 7 Model time usage variation before and after optimization

情景	优化前	优化后
1	572	543
2	580	561
3	580	562

4 结 论

本研究针对内部结构与客流组织流线均复杂的超深换乘枢纽，基于社会力模型，提出 Revit 组合 MassMotion 的建模仿真方法，以成都市骡马市枢纽为案例，研究超深地铁换乘枢纽穿越多层超长自动扶梯故障客流疏散。通过多场景模拟、优化客流拥堵核心节点，对仿真数据结果进行量化分析与评价等方式，指出超长自动扶梯故障场景的隐患及科学疏散措施的有效性，得到如下研究结论。

1) 针对超深换乘枢纽空间大、建筑结构复杂等特点，选取能准确反应建筑信息的 BIM 技术，精准快速化搭建枢纽结构模型。基于更加符合现实情况的社会力模型，采用 Revit 组合 MassMotion 建模仿真的方法，研究超深换乘枢纽穿越多层超长自动扶梯故障大客流疏散，可为在建超深 4 线换乘枢纽解决极端情景的模拟演练问题提供技术手段，向其他超深地铁换乘枢纽应急疏散提供有利参考。

2) 通过聚焦乘客用时及模型整体用时，重点优化疏散拥堵节点，优先保障乘客完成出行，可为地铁站有关应急预案的制定提供参考。

3) 在制定疏散策略时，通过限制方向和客流引导，减少乘客出行决策判断时间，优先保证更多乘客正常完成出行。虽部分方向乘客的走行和候车成本有所增加，但模型的出行用时整体降低了，这表明合理引导市民出行是地铁客流疏散管控的重要手段。

基金项目：中电建华东院重点科研基金资助项目(KY2021-JT-02-07-01-2023)；中国工程科技发展战略广东研究院咨询研究资助项目(2023-GD-12)

作者简介：廖文康(lwkshuai@outlook.com)，深圳大学助理工程师。研究方向：交通系统建模与仿真、智慧交通。

引 文：廖文康，楼晓雷，胡明伟，等. 超深地铁换乘枢纽超长自动扶梯故障的客流疏散[J]. 深圳大学学报理工版，2024，41(6)：703-711.

参考文献 / References:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告[EB/OL]. (2024-03-29)[2024-05-20]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/14894>.
China Association of Metros. 2023 Statistical and analysis report on urban rail transit [EB/OL]. (2024-03-29) [2024-05-20]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/14894>. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [3] 李微微, 楼晓雷, 杨文杰, 等. 大客流场景下地铁电扶梯故障的乘客疏散[J]. 深圳大学学报理工版, 2024, 41(1): 83-91.
LI Weiwei, LOU Xiaolei, YANG Wenjie, et al. Passenger evacuation during subway escalator malfunction under mass passenger flow [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(1): 83-91. (in Chinese)
- [4] HU Mingwei. A high-fidelity three-dimensional simulation method for evaluating passenger flow organization and facility layout at metro stations [J]. SIMULATION, 2017, 93(10): 841-851.
- [5] 胡明伟, 黄文柯. 行人交通仿真方法与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 194-216.
HU Mingwei, HUANG Wenke. Pedestrian traffic simulation methods and technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 194-216. (in Chinese)
- [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(7): 5-11.
ZHONG Maohua, CHEN Junfeng, LIU Xiaoqing, et al. Study on evacuation performance evaluation and strategy optimization of large passenger flow in metro interchange hub station [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(7): 5-11. (in Chinese)
- [7] 许慧, 田铖, 王永. 轨道交通换乘站密集客流应急疏散仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(3): 492-500.
XU Hui, TIAN Cheng, WANG Yong. Emergency evacuation simulation for dense passenger flow in a rail transit transfer station [J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(3): 492-500. (in Chinese)

- [8] 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.
- HU Mingwei, TANG Jingyan, HE Guoqing. Simulation study on emergency evacuation due to water invasion in subway stations [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(2): 159-167. (in Chinese)
- [9] CHENG Huan, YANG Xiaokuan. Emergency evacuation capacity of subway stations [J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012, 43: 339-348.
- [10] 杨晓霞, 蒋海龙, 李永行, 等. 地铁站乘客沿楼梯上行疏散时间预测及安全性评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 168-173.
- YANG Xiaoxia, JIANG Hailong, LI Yongxing, et al. Prediction of evacuation time and safety evaluation for passengers ascending stairs in subway stations [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(5): 168-173. (in Chinese)
- [11] 王凯, 黄云艺, 陈卫忠, 等. 城市地下分层空间功能定位和形态演变探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 652-659.
- WANG Kai, HUANG Yunyi, CHEN Weizhong, et al. Discussion on functional orientation and morphological evolution of urban underground stratification space [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 652-659. (in Chinese)
- [12] 邓子江. 浅谈地铁电梯事故原因及预防措施[J]. 特种设备安全技术, 2019(3): 42-43.
- DENG Zijiang. A brief discussion on the causes of subway elevator accidents and preventive measures [J]. Safety Technology of Special Equipment, 2019(3): 42-43. (in Chinese)
- [13] 李嘉陶. 地铁车站楼梯扶梯上行疏散效率研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- LI Jiatao. A study on the evacuation efficiency of stairs and escalators in subway station [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [14] 冯树民, 陈勇, 辛梦薇. 突发大客流下地铁协调限流优化模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(2): 179-185.
- FENG Shumin, CHEN Yong, XIN Mengwei. Coordination passenger flow control model for metro under sudden large passenger flow [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(2): 179-185. (in Chinese)
- [15] 马宝成, 张伟. 应急管理蓝皮书: 中国应急管理发展报告(2021)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2021.
- MA Baocheng, ZHANG Wei. Blue book of emergency management: annual report on emergency management in China (2021) [M]. Beijing: Social Science Academic Press, 2021. (in Chinese)
- [16] ZHOU Ru, CUI Yinkai, WANG Yan, et al. A modified social force model with different categories of pedestrians for subway station evacuation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110: 103837.
- [17] LONG Shengjie, ZHANG Dezhi, LI Shuangyan, et al. Simulation-based model of emergency evacuation guidance in the metro stations of China [J]. IEEE Access, 2020, 8: 62670-62688.
- 【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】



补充材料