

【交通物流 / Transportation Logistics】

大客流场景下地铁电扶梯故障的乘客疏散

李微微¹, 楼晓雷², 杨文杰¹, 胡明伟^{1,3,4,5}, 邓莹¹

1) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 2) 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 311122;
3) 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; 4) 深圳大学未来地下城市研究院,
广东深圳 518060; 5) 深圳大学深圳市地铁地下车站绿色高效智能建造重点实验室, 广东深圳 518060

摘要: 地铁车站客流量大、疏散路线复杂、地下空间有限, 一旦发生突发事件而乘客未得到及时疏导, 易造成人员恐慌, 引发严重安全事故和财产损失. 因此, 基于安全疏散的地铁车站客流调控, 对确保乘客安全出行, 维持地铁系统运营具有重要作用. 基于社会力模型, 以深圳地铁1号线车公庙站为例, 运用仿真软件AnyLogic建立地铁车站大客流场景下的疏散模型, 从微观角度模拟分析了叠加电扶梯故障突发事件对客流疏散的影响, 对比实际调查的高峰期站台容纳量数据, 突出大客流场景研究的重要性. 通过仿真实验证明突发事件发生时平均分配疏散客流措施效果更佳, 将原目的地为拥挤处电扶梯的乘客引导至其他电扶梯虽然会造成部分乘客走行距离的增加, 但疏散速率会提升, 高峰时期能够提升46.51%, 大客流场景下能够提升93.26%. 在大客流疏散背景下, 叠加不同位置的电扶梯故障假设情景, 分类讨论具体的客流平均分配方案, 通过仿真实验定量确定各情景下的最佳客流分配方案, 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; 地铁车站; 大客流; 突发电扶梯故障; 客流疏散; 微观仿真

中图分类号: U491; TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2024.01083

Passenger evacuation during subway escalator malfunction under mass passenger flow

LI Weiwei¹, LOU Xiaolei², YANG Wenjie¹, HU Mingwei^{1,3,4,5}, and DENG Xuan¹

1) College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, Zhejiang Province, P. R. China

3) Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities of Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

4) Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

5) Shenzhen Key Laboratory of Green, Efficient and Intelligent Construction of Underground Metro Station, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Subway stations are characterized by mass passenger flow, complex evacuation routes and limited underground space. Failure to evacuate passengers in a timely manner during emergency situations may lead to panic, serious safety accidents and property loss. Therefore, subway station passenger flow control based on safety evacuation plays a crucial role in ensuring the safe travel of passengers and maintaining the efficient operation of the

Received: 2023-04-19; **Accepted:** 2023-07-05; **Online (CNKI):** 2024-01-04

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52090084); Major Research Plan of PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited (KY2021-JT-02-01-2023); 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: 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)



subway system. Based on the social force model, this research studies the Chegongmiao station of Shenzhen Metro Line 1 as an example, and establishes an evacuation model under mass passenger flow in subway stations through a simulation software AnyLogic. The impact of escalator malfunction accidents under mass passenger flow evacuation is analyzed in a microcosmic perspective, and compared with real world platform capacity in peak period, which highlighting the significance of studying mass passenger flow. Simulation results indicate that average distribution of passenger flow during accidents is more effective. Although guiding passengers who aim at the crowded escalator to other escalators may increase walking distance, it improves evacuation velocity, which can be 46.51% in peak period and 93.26% under mass passenger flow. Then, under mass passenger flow, considering various hypothetical scenarios of escalator malfunctions at different locations, a systematic discussion is conducted to classify and analyze specific passenger flow distribution plans. Through quantitative determination in simulation, the optimal passenger flow distribution plan is identified for each scenario, providing reference for the metro operating departments to formulate evacuation plans.

Key words: transportation engineering; metro stations; mass passenger flow; emergency escalator malfunction; passenger flow evacuation; microscopic simulation

地铁作为中国城市轨道交通的主要形式, 具有车站客流量大、客流流线复杂及地下活动空间受限等特点. 尤其在早晚高峰和节假日, 短时间内常常有大量乘客涌入地铁站, 造成各通行设施处(如电扶梯、安检及闸机等)客流密度增大. 在此情形下, 一旦有突发事件且客流未得到及时有效疏导, 易发生踩踏和人员伤亡等事故, 并伴随财产损失. 电扶梯是影响车站客流运输效率的关键设备, 按照中国《地铁设计规范》(GB 50157—2013)^[1]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, 常见由乘客失误或扶梯本身故障导致扶梯停运报道. 研究大客流叠加电扶梯设备通行能力限制背景下的安全疏散, 对确保乘客安全和地铁车站高效安全运营具有重要作用.

目前针对地铁站的客流疏散已有一定研究, 如胡明伟等^[2-3]采用微观仿真模型评估地铁站的客流组织和管理; 张国奥等^[4]研究疏散总时间与进站客流量的关系与作用机理; 也有研究评估洪涝灾害和火灾烟气事故背景下的地铁站疏散^[5-6]. 此外, LI 等^[7]提出地铁站的疏散风险指数和最大安全疏散能力指标, 研究不同应急响应时间对客流疏散的影响; ZOU 等^[8]探究关键参数对客流疏散时间延迟的影响, 为地铁站设计和应急方面的改进提供参考; WAN 等^[9]通过设计地铁站动态安检通道优化提高安检效率, 缓解车站大厅拥挤; CHEN 等^[10]研究火灾发生情况下地铁站拥挤人群的疏散过程, 提出通过优化出口位置和增加出口宽度来缓解拥堵.

以上研究主要通过计算仿真模拟车站内部的疏

散过程, 鲜有在大客流背景下电扶梯突发故障时的客流疏散细分方向的研究. 因此, 本研究基于社会力模型, 以中国深圳地铁 1 号线车公庙站作为案例, 使用 AnyLogic 软件构建大客流背景下地铁站电扶梯设备发生故障时的客流疏散模型, 并考虑在不同情景下的安全疏散情形, 对比分析客流疏散结果, 评估预设的客流分配方案, 以期对地铁站运营管理方案应急处置措施制定提供参考.

1 大客流叠加电扶梯故障情景

1.1 大客流描述

大客流是指当列车到达时, 地铁车站聚集大量乘客, 而车站服务设施不能在短时间内将乘客疏散出去, 导致车站内客流严重堆积. 依据《地铁设计规范》(GB 50157—2013)^[1], 0.4 m^2 是平均每位乘客占据的最小空间面积, 如果低于该值, 可能出现客流移动缓慢甚至拥挤. 本研究将站内容纳量^[11-12]作为大客流的辨识特征, 如图 1. 其中, C 为站台的有效面积区域容纳量; C_{\max} 为站台最大容纳量. 记占比系数 α 为站台人数与 C 之比, 当 $\alpha > 0.7$ 可判断为大客流发生. 仿真模型依据客流密度值计算出站台的容纳量, 设置触发大客流疏散的客流量.

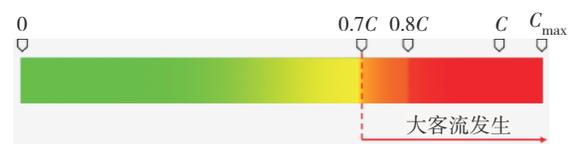


图 1 大客流发生的辨识示意

Fig. 1 Illustration of identifying mass passenger flow event.

1.2 电扶梯故障因素

导致电扶梯发生故障的因素包括: ① 电扶梯的机械故障, 如轴承故障, 因为轴承故障特征演化慢, 早期的轻微故障现象容易被检修人员忽略, 而当部件发生较严重磨损又未及时更换时, 就容易造成设备故障; ② 日常运维不周, 电扶梯运行期间需要定期进行检修维护, 漏检少检可能导致故障; ③ 乘客使用不当, 由于部分乘客安全意识淡薄, 乘坐电扶梯时可能会低头浏览手机等电子设备而不抓扶手, 一旦发生安全事故就要停运扶梯, 且易导致恐慌情绪蔓延。

1.3 大客流叠加电扶梯故障的疏散方式

大客流叠加电扶梯故障具有客流集中、疏散效率低以及电扶梯区域拥堵的疏散难点^[13]。当电扶梯发生故障需要疏散大客流时, 影响疏散安全和效率的因素包括: 车站空间通行效率、设施服务能力及组织管理能力^[14], 具体影响因素分类可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S1。因此, 车站运营方可采用的调控措施包括: 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 加强引导, 有序指引客流进行撤离, 减轻站内承载力; ③ 改变流线, 设置栏杆对流线进行控制。

2 大客流叠加电扶梯故障的客流疏散仿真

2.1 仿真概述

本研究基于 AnyLogic 软件中的社会力模型进行客流疏散仿真分析。社会力模型是由 HELBING 等^[16]提出的考虑行人自身内在驱动力的模型, 并扩展该模型用以模拟恐慌状态下的行人运动^[17]。社会力模型考虑不同个体之间、以及个体与障碍物之间的相互作用关系, 其加速度满足^[18]

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_i^0 + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_w f_{iw} + \zeta \quad (1)$$

其中, 等号左侧表示运动过程中行人 i 在 t 时刻所受到的合力; m_i 为行人 i 的质量; v_i 为 i 的速度; f_i^0 为 i 的自身驱动力; f_{ij} 为两个不同个体 (i, j) 之间的相互作用力 (接触力和排斥力); f_{iw} 为个体 i 与障碍物 w 之间的作用力 (接触力和排斥力); ζ 为个体行为的干扰因素。

对模拟仿真过程进行以下假设: ① 如不设置特定疏散策略, 行人倾向于选择自认为距离最近的

扶梯和疏散出口路径进行疏散^[19]; ② 选择电扶梯疏散的概率远大于楼梯^[20]。

2.2 模型构建

考虑电扶梯故障下的大客流安全疏散模型构建流程如图 2, 模型构建步骤如下。

步骤 1 环境模型构建。 根据整理的基础数据, 使用行人库模块描绘出仿真行人空间环境的障碍物、楼扶梯、排队、候车区域及闸机等要素, 并设置各模块属性与参数, 如各个扶梯的通过速度、进出站闸机的服务率及排队队列等。

步骤 2 客流疏散逻辑图构建。 分别构建对应客流流线属性的进站及出站客流逻辑, 站内行人通过观察及站内广播, 会改变正常的行为和进出站流程, 因此, 模拟中需要动态修改模型中的相关参数, 如疏散人数、走行速度及疏散路线的选择方式等。客流疏散路径是指智能体初始位置到其被分配的扶梯, 然后按照条件引导到出口的路线。

步骤 3 运行仿真。 在考虑大客流的背景下, 模拟不同位置电扶梯发生故障时对客流安全疏散的影响。由于特定的疏散流程以及行人特性, 构建模型时需要对不同方案的参数进行设置。先正常运行模型, 模拟乘客的上下车过程, 当站台区域达到大客流设定密度阈值触发疏散行为, 并同时记录疏散时间。站内所有乘客均停止当前服务流程, 按照提前设置的出口选择方式进行疏散, 并同时限制进站乘客不再进入地铁车站等。

步骤 4 输出数据分析和评价。

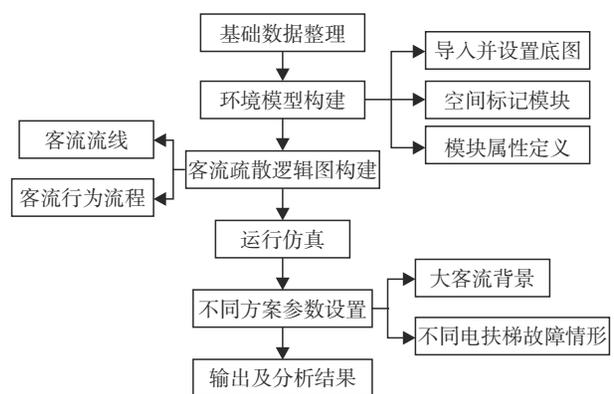


图 2 大客流下电扶梯故障的客流仿真步骤

Fig. 2 Roadmap of escalator malfunction simulation under mass passenger flow.

2.3 客流疏散评价指标

2.3.1 疏散人数

在仿真模型中设置事件, 并写入代码, 每秒统

计 1 次站台区域的客流量，并将输出结果导出到 Excel 表格，得到不同时刻下的疏散人数，具体参数设置可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S2.

2.3.2 平均停留时间

平均停留时间是指疏散开始后客流在站台的停留时间. 将站台区域触发疏散后的客流在站台的停留时间，按照每一个进入站台的行人进行 1 次统计，并将结果导出到 Excel 表格，平均停留时间参数设置可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S3.

2.3.3 疏散速率

疏散速率指在地铁大客流背景下，电扶梯突发事故时，全体疏散人员从地下到地面的疏散速率，定义为单位时间的可疏散人数，单位：人/s. 疏散速率体现了站内的疏散能力，疏散速率越大，客流

疏散方案越优.

3 案例分析

3.1 模型数据

深圳地铁 1 号线车公庙站是深圳市第 1 个 4 线换乘的综合车站，位于福田区车公庙片区的中心地带，为地下 3 层站. 深南大道和香蜜湖路口西南地块考虑以物业综合体的形式开发，并在地下站厅层部分与地铁枢纽连通，站厅层示意如图 3. 其中，1/11 号线通过站厅换乘；7/9 号通过站台和地下 2 层换乘；1/11 与 7/9 号线通过换乘大厅换乘. 1 号线站厅及站台计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 示意图如图 4 和图 5，图中已对电扶梯标号.

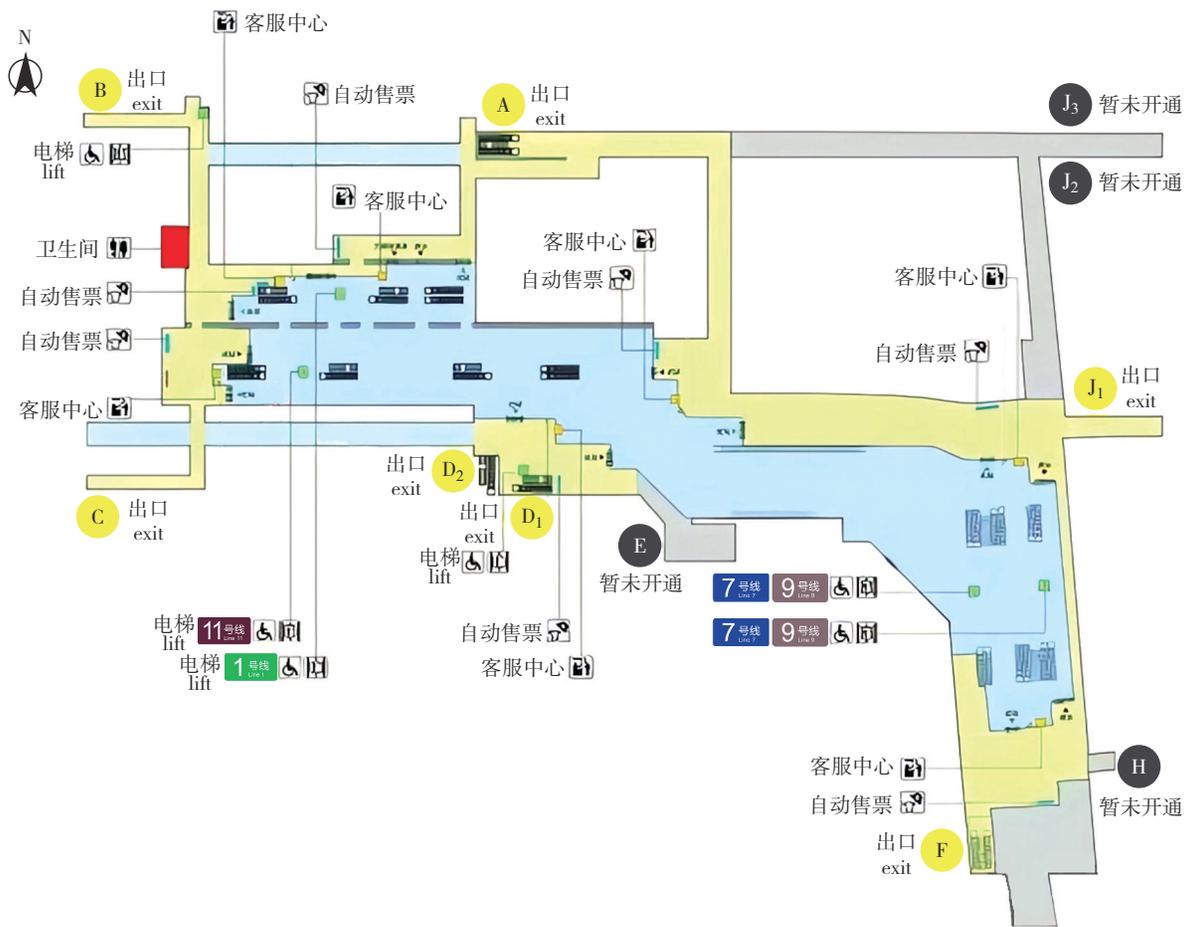


图 3 深圳地铁车公庙站厅层平面图

Fig. 3 Plane figure of Chegongmiao station hall of Shenzhen Metro.

构造考虑安全疏散的深圳地铁 1 号线车公庙站客流模型逻辑图如图 6. 车公庙站正常运营时，4

部电扶梯均为上行扶梯，楼梯主要负责下行至站厅层的客流，实地观测表明极少有上行乘客放弃电

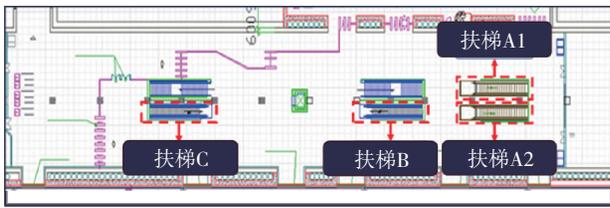


图 4 深圳地铁 1 号线车公庙站站厅 CAD 图

Fig. 4 CAD of Chegongmiao station hall of Shenzhen Metro Line 1.

梯选择步行离开站台层, 因此, 采用人工计数法统

计电扶梯通过人数(站台输出)与楼梯通过人数(站台输入). 本研究团队于 2023 年 3 月某工作日开展站台乘客容纳量调查, 通过统计站台层乘客到达数量估计站台内的乘客数量, 并计算站内容纳量. 当天观测结果表明, 晚高峰期间(17:30—18:30)站台容纳乘客量较多, 每班列车到达之间的乘客数量峰值达到 1 063 人, 未出现因列车客满导致乘客二次排队的情况. 实地观测示意图可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S4.

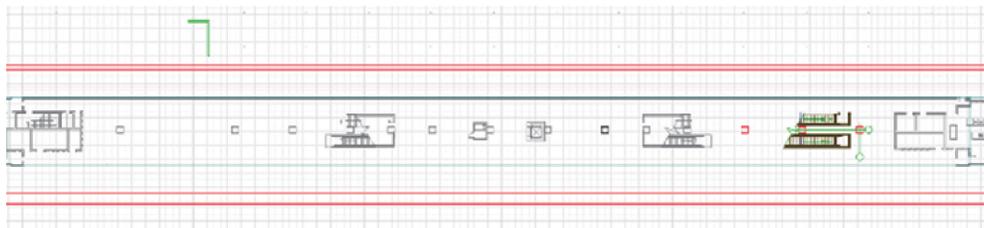


图 5 深圳地铁 1 号线车公庙站站台 CAD 图

Fig. 5 CAD of Chegongmiao station platform of Shenzhen Metro Line 1.

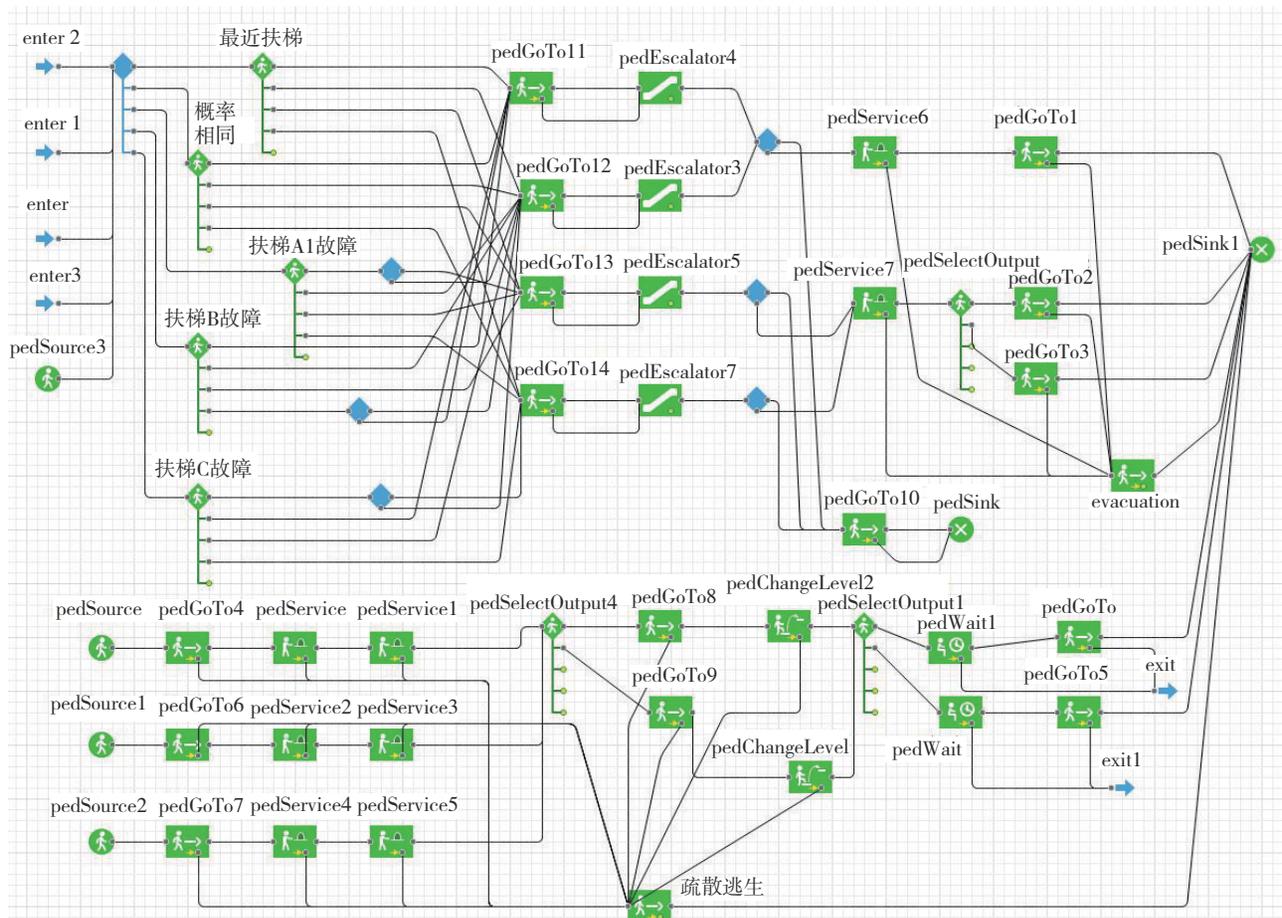


图 6 深圳地铁 1 号线车公庙站逻辑图

Fig. 6 Logic figure of Chegongmiao station of Shenzhen Metro Line 1.

《地铁设计规范》指出 0.4 m^2 是平均每位乘客占据的最小空间面积, 换算为站台密度为 $2.5 \text{ 人}/\text{m}^2$, 本研究设置站台的安全密度为 $2.0 \text{ 人}/\text{m}^2$. 考虑到站台面积为 906.8 m^2 , 因此, 站台容纳量为 1 814 人. 大客流背景下取 $\alpha = 70.0\%$, 可得模型中触发疏导的大客流阈值为 1 270 人. 在实地观测中, 列车到达间隔期间站台层人数峰值为 1 063 人, $\alpha = 58.60\%$, 未达到大客流阈值. 下车客流随着列车到达后产生, 站台一侧有 30 个车门, 设定列车每个车门的乘客到达数量服从均匀分布 $U(5, 10)$. 为使站台乘客量积累, 触发开始疏散的乘客数量阈值, 设定换乘客流到达速率为 $9\ 000 \text{ 人}/\text{h}$, 模拟分析不同分配方案对客流疏散的影响. 模型中的具体参数设置如表 1.

表 1 行人参数及环境参数设置

Table 1 Passenger parameters and environment parameters setting

参数	取值	参数	取值
步行速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$U(1.10, 1.55)$	乘客肩宽/m	$U(0.4, 0.5)$
初始速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1	列车编组	6 节 (5 车门/节)
列车到达 间隔/min	2	进站闸机 数量/台	8
进站、出站闸机 服务时间/s	$U(2, 3)$	出站闸机 数量/台	11
电扶梯运行 速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.5	电扶梯 数量/部	4
楼梯数量/部	2	楼梯方向	单向 (仅考虑下行)
电扶梯宽度/m	1	楼梯宽度/m	1.8
站台面积/ m^2	906.8	进出口数量/个	3

3.2 大客流疏散仿真分析

3.2.1 电扶梯分配策略的比较

以下分析客流分配策略对客流疏散的影响, 仿真实验分为晚高峰和大客流两种场景, 根据仿真场景中到达相应的占比系数触发疏散事件, 触发客流疏散的占比系数分为取实际观测值(58.6%)和大客流发生定义值(70.0%). 触发疏散事件后, 针对两种场景均进行两种客流分配策略研究, 即就近分配策略与平均分配策略: 电扶梯客流按就近分配策略通过二次开发计算站内乘客起点到 4 部电扶梯的距离, 选出距离最小的电扶梯作为目标终点进行移

动; 平均分配策略则是将选择每部电扶梯的概率设置为 0.25, 4 种仿真情形的分类逻辑构建见图 7. 分别运行 4 种情形的模型, 站台热力图如图 8.

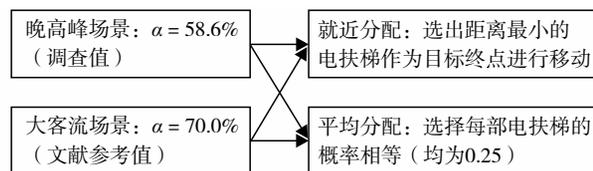


图 7 仿真情形构建

Fig. 7 Simulation situation setting.

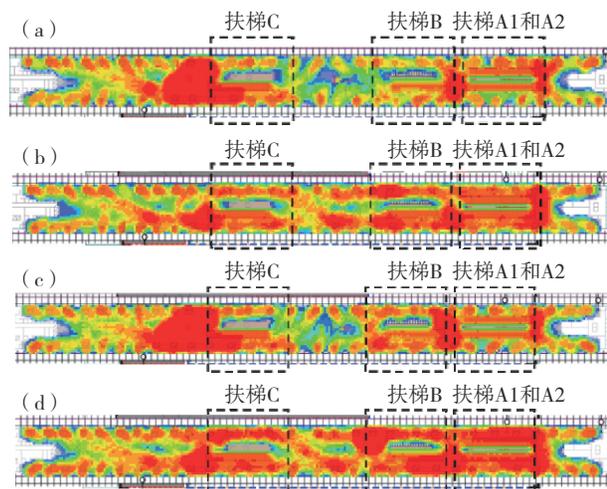


图 8 (a)晚高峰场景、就近分配策略, (b)晚高峰场景、平均分配策略, (c)大客流场景、就近分配策略及(d)大客流场景、平均分配策略下的热力图

Fig. 8 Heat map of (a) distribution to nearest floor of passenger flow situation in evening peak period, (b) average distribution of passenger flow situation in evening peak period, (c) distribution to nearest floor of passenger flow situation under mass passenger flow, (d) average distribution of passenger flow situation under mass passenger flow.

由图 8 可见, 对比相同疏散策略下不同场景的疏散客流, 由于晚高峰场景下触发疏散的占比系数低, 乘客能够更早地开始疏散, 因此, 站台层拥堵程度相对大客流场景更低; 对比相同场景下不同疏散策略的客流, 平均分配策略下的客流分布更均匀, 其中, 电扶梯 B 与电扶梯 C 中间间隔的客流密度也随着客流根据指引去往不同电扶梯处而增加, 但左侧电扶梯 C 的客流密度有明显减少, 右侧电扶梯 A1 和 A2 的利用率有所提高. 两种场景下两种疏散策略的仿真结果见表 2.

由表 2 可见, 对比相同疏散策略下不同场景的乘客疏散指标, 就近分配策略下, 大客流相较于晚高峰场景, 平均停留时间增加 16 s (21.05%), 疏散

表2 两种场景下两种疏散策略仿真结果对比

Table 2 Comparison of simulation result in two kinds of situation in two evacuation strategies

场景	客流分配方案	平均停留时间/s	疏散时间/s	疏散人数/人	疏散速率/(人·s ⁻¹)
晚高峰	就近分配	76	383	1 591	4.15
	平均分配	66	251	1 526	6.08
大客流	就近分配	92	509	2 264	4.45
	平均分配	84	262	2 254	8.60

速率提升 0.3 人/s (7.23%); 在平均分配策略下, 大客流相较于晚高峰场景, 平均停留时间增加 18 s (27.27%), 疏散速率提高 2.52 人/s (41.45%)。对比相同场景下不同疏散策略的乘客疏散指标, 晚高峰场景下, 平均分配相较于就近分配, 乘客的平均停留时间降低 10 s (13.16%), 疏散速率提升了 1.93 人/s (46.51%); 大客流场景下, 平均分配相较于就近分配, 乘客平均停留时间降低 8 s (8.70%), 疏散速率提升 4.15 人/s (93.26%)。

基于以上数据分析认为, 对比相同疏散策略下不同场景, 由于大客流场景的客流量比晚高峰场景高, 且站台滞留乘客数多, 因此, 就近分配策略下, 大客流场景乘客平均停留时间增多, 而疏散速率受限于电扶梯的运载能力变化不大; 平均分配策略下, 大客流场景乘客平均停留时间增多且增幅与就近分配策略的增幅相近, 疏散速率仍有所提升, 表明平均分配策略在大客流场景下的效果更为显著。对比相同场景下不同疏散策略, 客流平均分配策略极大提高电扶梯利用率, 使疏散速率得到显著提升, 因此, 选择各电扶梯客流平均分配方案较优。在后续考虑大客流场景下电扶梯故障的客流分配研究中, 均采用平均分配的方法, 将故障电扶梯处的客流分配到其他正常运行的电扶梯上。

3.2.2 考虑电扶梯故障的客流仿真分析

1 号线车公庙站连接站厅及站台的电扶梯共有 4 部, 假设其中 3 部电扶梯中的 1 部发生故障, 导致的客流重分配按照 3 选 2 的组合方式, 分别得出 3 种疏散引导方案, 每种方案分别运行 5 次, 取平均值进行统计。其中, 电扶梯 A 处存在两部电扶梯, 由于现实中同时发生故障的可能性较小, 所以, 在仿真平台上仅模拟电扶梯 A1 处发生故障。每部电扶梯故障对应的疏散引导方案如图 9。

如电扶梯 C 发生故障进行客流重分配, 3 种分配方案触发疏散下的热力图如图 10。可见, c1 和

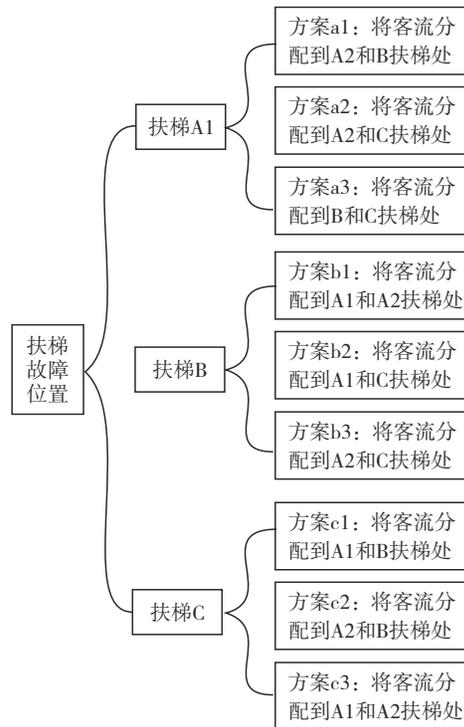


图9 客流分配方案

Fig. 9 Passenger flow assignment schemes.

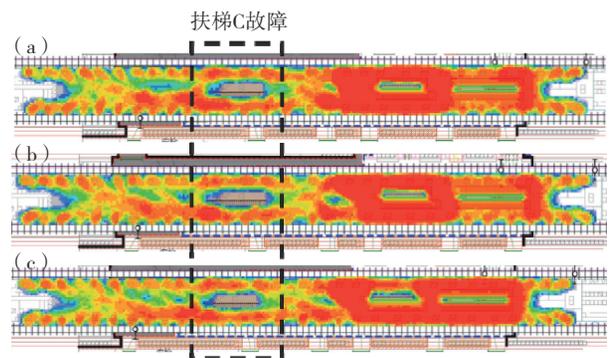


图10 电扶梯 C 发生故障后, 采用分配方案(a)c1、(b)c2 及 (c)c3 的客流重分配的热力图

Fig. 10 Heat maps of passenger flow redistribution under scheme (a) c1, (b) c2 and (c) c3 when escalator C failure.

c2 方案都会导致电扶梯处 B 比 A1/A2 处拥挤; c3 方案中, 由于到 A1/A2 电扶梯必经过电扶梯 B, 按照“在应急疏散时, 行人通常会选择路线长度最短的路径”的假设, 因此, 电扶梯 B 处拥挤程度并没有缓解。电扶梯 A1、B 及 C 发生故障后的客流重分配分析结果如表 3。由表 3 及图 10 可见, 选择疏散速率作为评价指标时, ① 当电扶梯 A1 发生故障, 最优的客流分配方案是 a3, 即将客流分配给电扶梯 B 及 C; ② 当电扶梯 B 故障, 最优的客流分配方案是

b2, 即将客流分配给 A1 及电扶梯 C; ③ 当电扶梯 C 故障, 最优的客流分配方案是 c2, 即将客流分配给 A2 及电扶梯 B.

表3 客流分配方案结果对比

Table 3 Results comparison of passenger flow assignment schemes

客流分配方案	平均停留时间/s	疏散时间/s	疏散人数	疏散速率/(人·s ⁻¹)
a1	154	443	1 438	3.24
a2	97	294	1 171	3.98
a3	101	295	1 189	4.04
b1	150	443	1 400	3.16
b2	144	412	1 435	3.48
b3	149	424	1 446	3.41
c1	155	418	1 402	3.35
c2	148	420	1 506	3.58
c3	152	446	1 392	3.12

将每部电扶梯故障的 3 种客流分配方案按照疏散速率评价指标分别绘制柱状图, 能够直观对比疏散方案速率, 可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S5.

4 结 论

本研究基于社会力模型, 以深圳地铁 1 号线车公庙站作为案例, 仿真研究大客流场景下电扶梯设备出现故障时的客流疏散过程, 完善现有地铁应急疏散场景研究. 通过对比实地调查的高峰期数据及仿真结果, 突出大客流场景的隐患及科学疏散措施的有效性, 并对仿真数据结果进行量化分析, 得到如下结论:

1) 与实地调查的工作日晚高峰数据对比, 认为站台层承载人数尚未到达大客流定义的阈值, 实地试验具有局限性. 因此, 基于社会力模型, 使用建模仿真方法研究大客流叠加电扶梯故障的地铁车站客流应急疏散, 为解决极端情况的模拟演练问题提供解决方案.

2) 当电扶梯发生故障时, 按照疏散速率评价指标选择客流疏散策略, 结果表明, 通过科学设置重新分配疏散策略, 能够合理减少客流密度, 提高疏散效率. 为地铁站有关应急预案的制定提供参考, 落实应急预案“预防为主”的思想.

3) 平均分配方案使客流平均分布于站台内各个电扶梯, 虽然会增加部分乘客的行走距离, 但总体疏散时间有所减少, 提高了疏散效率. 因此, 合理引导乘客是地铁客流管控的重要手段.

本研究还存在一定不足, 如未考虑楼梯承担客流能力对于疏散大客流的影响等. 因此, 后续研究将通过智能化手段得到详实的客流数据, 更加精准地完成客流行为模拟.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52090084); 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基金资助项目(2023-GD-12)

作者简介: 李微微(liweiwei2018@email.szu.edu.cn), 深圳大学硕士研究生. 研究方向: 交通系统建模与仿真, 智能交通系统.

引 文: 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.

参考文献 / References:

- [1] 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. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 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.
- [4] 张国奥, 马骊, 王琳. 地下两层标准车站疏散时间灵敏度仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8): 1989-1996.
ZHANG Guoao, MA Si, WANG Lin. Passenger flow sensitivity analysis of evacuation time for standard subway station [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(8): 1989-1996. (in Chinese)
- [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.
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)
- [6] 周美琦, 杨晓霞, 张纪会, 等. 基于改进元胞自动机模型的地铁车厢乘客疏散模拟[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2021, 18(3): 35-44.
ZHOU Meiqi, YANG Xiaoxia, ZHANG Jihui, et al. Simulation of passenger evacuation in the metro carriage based on an improved cellular automata model [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2021, 18(3): 35-44. (in Chinese)
- [7] LI Haiquan, WANG Yan, JIANG Juncheng, et al. Metro station evacuation safety assessment considering emergency response [J]. *Simulation*, 2022, 98(10): 919-931.
- [8] ZOU Qiling, FERNANDES D S, CHEN Suren. Agent-based evacuation simulation from subway train and platform [J]. *Journal of Transportation Safety & Security*, 2021, 13(3): 318-339.
- [9] WAN Ming, CHEN Zhifang, GUO Junhua, et al. Optimization of security check efficiency in subway station based on Anylogic: a case study of Nanchang Metro [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, 41(4): 5035-5043.
- [10] CHEN Yameng, WANG Chen, HUI Y J B, et al. Emergency evacuation simulation at starting connection of cross-sea bridge: case study on Haicang Avenue Subway Station in Xiamen Rail Transit Line [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 29: 101163.
- [11] 赖艺欢. 基于仿真技术的城市轨道交通突发大客流应急组织方案研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
LAI Yihuan. Study on contingency plan for sudden peaks in passenger demand in urban rail transit using simulation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [12] 李凌燕. 城市轨道交通网络突发大客流传播机理及组织优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
LI Lingyan. Sudden passenger flow propagation mechanism analysis and organizational optimization in urban rail transit network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (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版)[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] HELBING D, FARKAS I, VICSEK T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487-490.
- [17] HELBING D, MOLNÁR P. Social force model for pedestrian dynamics [J]. *Physical Review E*, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [18] 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.
- [19] 王文璇. 基于AnyLogic的地铁换乘站行人行为特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
WANG Wenxuan. Study on behavior characteristics of passengers in subway transfer station based on AnyLogic [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [20] ZHANG Limao, LIU Mengjie, WU Xianguo, et al. Simulation-based route planning for pedestrian evacuation in metro stations: a case study [J]. *Automation in Construction*, 2016, 71: 430-442.

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】



补充材料