

3-25-2020

Emergency Evacuation Simulation for Dense Passenger Flow in a Rail Transit Transfer Station

Xu Hui

School of Economics and Management, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

Tian Cheng

School of Economics and Management, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

Wang Yong

School of Economics and Management, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Emergency Evacuation Simulation for Dense Passenger Flow in a Rail Transit Transfer Station

Abstract

Abstract: The rail transit is one of the important modes of the public transportation, and its safety operation is crucial. Based on the passenger volume and structure features that have been obtained through the field investigation in Chongqing Lianglukou railway station in China, a multi-level rail transit transfer station simulation model is built to analyze the evacuation process of pedestrians in the consideration of explosion and other emergencies by the software AnyLogic. The evacuation routes and evacuation time of passengers during emergency evacuation in a rail transit transfer station are studied. The research aims at verifying the emergency evacuation capacity of the station, and obtaining the results that could be used for reference in the emergency evacuation design. The simulation result demonstrates that the whole evacuation time is 338 s in the study case, which complies with the '6 min' principle in the 'Code for design of metro'. Besides, the proposed evacuation routes could be the useful reference for the practical management.

Keywords

rail transit transfer station, emergency evacuation, evacuation time, evacuation route, simulation

Recommended Citation

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.

轨道交通换乘站密集客流应急疏散仿真研究

许慧, 田铖, 王永

(重庆邮电大学 经济管理学院, 重庆 400065)

摘要: 轨道交通作为城市重要的公共交通方式之一, 其安全运营至关重要。以重庆两路口轨道交通换乘站为例, 根据实地调研获取的人员流量数据及空间结构特征, 构建多层次轨道交通换乘站仿真模型, 针对火灾、爆炸等突发事件, 使用 AnyLogic 软件对站内人员的疏散过程进行仿真研究, 包括疏散路线和疏散时间。研究目的是检验轨道交通换乘站应急疏散能力, 并为其应急疏散策略制定提供有效借鉴。结果表明, 案例中人员疏散到安全区总用时 338 s, 符合《地铁设计规范》“6 min”疏散时间要求, 所提出应急疏散策略对实际管理工作具有借鉴意义。

关键词: 轨道交通换乘站; 应急疏散; 疏散时间; 疏散路线; 模拟仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 03-0492-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0255

Emergency Evacuation Simulation for Dense Passenger Flow
in a Rail Transit Transfer Station

Xu Hui, Tian Cheng, Wang Yong

(School of Economics and Management, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The rail transit is one of the important modes of the public transportation, and its safety operation is crucial. Based on the passenger volume and structure features that have been obtained through the field investigation in Chongqing Lianglukou railway station in China, a multi-level rail transit transfer station simulation model is built to analyze the evacuation process of pedestrians in the consideration of explosion and other emergencies by the software AnyLogic. The evacuation routes and evacuation time of passengers during emergency evacuation in a rail transit transfer station are studied. The research aims at verifying the emergency evacuation capacity of the station, and obtaining the results that could be used for reference in the emergency evacuation design. The simulation result demonstrates that the whole evacuation time is 338 s in the study case, which complies with the ‘6 min’ principle in the ‘Code for design of metro’. Besides, the proposed evacuation routes could be the useful reference for the practical management.

Keywords: rail transit transfer station; emergency evacuation; evacuation time; evacuation route; simulation

引言

轨道交通作为城市重要的公共交通方式之一,

正在承担日益重要的大型客流运输任务。按照《“十三五”现代综合交通运输体系发展规划》, 到 2020 年全国城市轨道交通运营总里程预计达到 6000 公里。随着我国开通运营城市不断增多、新增运营里程迅速增加以及线网规模持续扩大, 轨道交通安全运行的压力和挑战也日益加大。

轨道交通换乘站作为城市运输体系的关键节



收稿日期: 2018-05-03 修回日期: 2018-09-18;
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金
(71801026), 教育部人文社会科学研究青年基金
(17YJC630189), 重庆市科委基础科学与前沿技术研究
专项(cstc2017jcyjAX0359);
作者简介: 许慧(1988-), 女, 河南商丘, 博士, 副
教授, 研究方向为项目风险管理、风险模拟仿真。

<http://www.china-simulation.com>

点和中心环节,是多种交通方式的汇集点和各类客流的集散地。随着客流量持续快速增长,在高峰时段,许多轨道交通车站的实际运输量远超出设计的最大长期客流量。加之环境密闭、换乘关系复杂等因素,轨道交通换乘站安全问题逐渐暴露,成为突发事件的高发地带。例如,2011-09-27,上海地铁 10 号线两列车发生追尾事故,造成 284 人受伤;2017-02-10,香港尖沙咀站火灾事故造成至少 18 人受伤等。突发事件发生后,轨道交通换乘站空间内人员的应急疏散逃生的重要性凸显,值得关注和研究。

系统仿真方法已成为研究密集客流在火灾、爆炸等突发事件下应急疏散特征和过程的有效工具。Wang 等^[1]通过调查研究,分析旅客在紧急情况下疏散行为特征与恐慌的相关性。Hong 等^[2]研究基于波纹扩散原理的疏散模型,模拟发生突发事件时恐慌信息的获取和传播。Li 等^[3]通过仿真模型研究发现火灾对应急疏散的影响体现在增加疏散时间、限制行人移动范围和改变行人疏散路线。Shi 等^[4]基于行人反应时间、疏散通道和出口应急疏散需要的时间,提出了地铁内人员疏散时间计算的公式。杨建芳等^[5]构建多层建筑物疏散模型,运用动态网络流确定每层楼每条疏散路径的动态流量,从而合理分配流量形成疏散方案。Li 等^[6]将仿真软件 pathfinder 运用于地铁站疏散案例,对人员疏散过程进行仿真分析并找出其瓶颈。隋杰等^[7]结合社会力模型与高斯烟团扩散模型,模拟地铁站应急疏散过程,提出准确评估经过各疏散出口的行人数量、提高疏散效率是制定疏散方案的重点。Kallianiotis 等^[8]使用 pathfinder 仿真软件模拟地铁站疏散过程,研究行人疏散速度和出口路线选择对于疏散时间的影响。杨森炎等^[9]使用 AnyLogic 仿真软件构建地铁通道客流仿真模型,研究不同客流情况下地铁隔离通道设置的条件及合理形式。Jiang 等^[10]通过 EXODUS 软件模拟疏散过程,并研究高峰时间段站台楼梯的拥挤特征。

根据对已有研究的综述,可知目前应急疏散仿真研究多数是针对单层、双层级轨道交通站进行研究,而对多层次的大型轨道交通换乘站应急疏散仿真的相关探究则较少。目前,随着城市公共交通需求的不断提升及工程技术的持续创新,空间上多层次整合的大型轨道交通换乘站在多个城市建成,这对日常运营中的管理提出严峻挑战。在对其安全运营问题的研究中,由于大型多层次轨道交通换乘站涵盖多个要素,要素与要素之间存在复杂的非线性关系,系统复杂性凸显,因此可将其看作一个复杂系统开展研究。针对此类复杂系统开展应急疏散研究,与单层、双层级轨道交通换乘站相比,需要考虑系统内要素之间的相互联系与影响,诸如应急逃生人群的跨多层次逃生问题(包括应急逃生路线设置、多层次之间的逃生衔接、多种逃生可能性的探讨等)、应急疏散的多层次引导问题(工作人员引导、指示方向引导等)等,均凸显出复杂系统应急疏散的特殊特征。因此,可将此总结为科学问题“考虑复杂系统特征的轨道交通换乘站应急疏散模拟仿真”问题。本研究迎合现实管理需求,运用 AnyLogic 多方法仿真软件进行仿真建模,对多层次轨道交通换乘站密集客流应急疏散开展研究,研究内容包括应急疏散特征总结、疏散速度设定及疏散路线设计,探讨站台区列车发生突发事件时应急疏散时间的计算方法,为行人疏散设计合理有效的应急疏散路线,并检验所制定的客流应急疏散策略是否符合《地铁设计规范》^[11]的时间要求。

1 轨道交通换乘站密集客流应急疏散特征

应急疏散特征指发生火灾、爆炸等突发事件时,行人体现的特定行为方式,涵盖疏散行为特征、疏散速度和疏散路线。

1.1 疏散行为特征

疏散行为特征指在应急疏散过程中,行人由于

本能现象或其他因素驱使(恐慌、从众心理等)表现出来的行为特征,如图 1 所示。

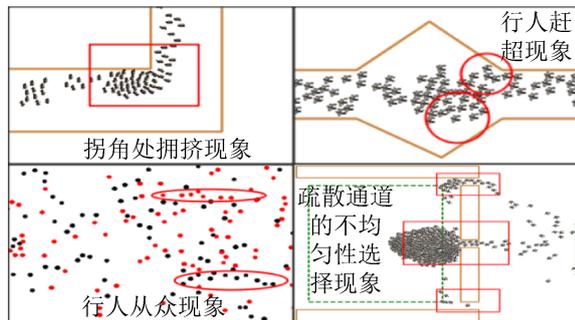


图 1 疏散行为特征

Fig. 1 Evacuation behavioral characteristics

1.1.1 拐角处拥挤现象

在应急情况下,行人通过疏散通道拐角处,由于视线遮挡等原因,人群会产生拥挤堵塞。在设计过程中,可以考虑将拐角设置为平滑拐角以提高行人在拐弯处的通行能力。

1.1.2 行人赶超现象

轨道交通换乘站中,换乘通道通常为径直的通道,在通道中当疏散空间区域突然变宽阔时,会出现后方的行人赶超前方行人的现象,称为行人赶超现象。

1.1.3 行人从众现象

在行人移动过程中,如果出现强烈的对冲人流,比如大型商场、汽车站、轨道交通换乘站进出口等,行人会由于同向吸引力的作用出现小队列的直线跟从现象。当出现突发情况时,因为站台和站厅层人数数量大且较为集中,大部分行人会跟随人流的主要涌动方向疏散逃生,表现出从众现象。

1.1.4 疏散通道的不均匀性选择现象

应急疏散中,行人会本能地选择最近的疏散通道,造成出口处阻塞,因为此情形下大部分行人无法充分了解可逃生通道的情况,而聚集在一个通道,使出口形成拱形人流。不平衡的集中在一个通道会导致疏散时间的增加,在计算疏散时间时应把

此情况考虑进来。

1.2 疏散速度

1.2.1 水平面步行速度

步行速度是行人基本的微观特征之一,与行人的性别、年龄、出行目的、心理等因素都有关系。已有学者根据大量实践调研结果对此开展相关研究,Pauls^[12]在办公大楼的实证研究中假设行人步行速度为 1.25 m/s; Nelson 和 Mowrer^[12]根据研究成果将行人平均步行速度设定为 1.19 m/s; Ando 等^[12]研究地铁站的行人,发现不受阻碍的步行速度随年龄和性别而变化,男性和女性都在 20 岁左右达到峰值,分别为 1.6 m/s 和 1.3 m/s。通常情况下,行人在不受阻碍影响的平均步行速度为 1.2 m/s^[12]。本文设置行人在水平步行的最大速度为 1.6 m/s。

1.2.2 非水平面行进速度

Ando 等^[12]提出行人不受阻碍等因素影响下以 0.8m/s 的速度在楼梯上向下移动,以 0.7 m/s 的速度向上移动。Nelson 和 Mowrer^[12]根据 4 种不同高度的楼梯设计,得出了行人以 0.85 m/s~1.05 m/s 之间的速度在楼梯上移动。结合应急疏散条件和重庆市轨道交通 3 号线南延伸段工程施工设计要求^[13],本文设置自动扶梯运行速度为 0.65 m/s,最大通过能力为 9 600 人/h。行人在楼梯上向上行进的速度为 0.7 m/s,最大通过能力为 5 000 人/h。

1.3 疏散路线

轨道交通换乘站发生火灾、爆炸等突发事件时,行人应急疏散的主要通道包括车门、屏蔽门(安全门)、自动扶梯和楼梯、检票闸机和进出口通道。在应急疏散时这些通道进入应急疏散状态。

屏蔽门(安全门)开启策略:在应急疏散期间,站台层屏蔽门应该完全打开,以便乘客疏散;当列车车门所停位置与屏蔽门不吻合时,应打开站台屏蔽门的紧急出口以利于疏散。

自动扶梯运行策略:地铁自动扶梯应有可靠的供电电源。作为事故疏散用的自动扶梯按一级负荷

供电, 其他扶梯按二级负荷供电^[13]。在应急疏散时, 从站台到站厅的所有上行扶梯应当继续保持上行状态, 下行扶梯可选择两种应急策略: 一种是停止下行扶梯的运行, 并将其作为固定的楼梯来使用; 另一种是调整下行扶梯的运行方向, 使它作为一个运行中的上行自动扶梯^[4]。本文案例研究中采用后一种自动扶梯应急策略。

检票闸机运行策略: 在应急疏散情况下, 所有检票闸机都应开启以便于进行乘客疏散, 包括出入口闸机以及员工通道(侧门)。

进出口通道疏散策略: 如果在进出口通道发生火灾, 则该通道不能用于疏散。进出口自动扶梯的紧急状态应与平台和大厅自动扶梯的紧急状态相同。

轨道交通换乘站发生火灾、爆炸等突发事件, 发生地点包括列车内、站台层和站厅层, 不同突发事件发生地点的应急疏散路线如表 1 所示, 其中列车内发生突发事件时应急疏散路线最长。

表 1 突发事件发生地点及应急疏散路线

Tab. 1 Emergency location and emergency evacuation route

突发事件发生地点	应急疏散路线
列车内	车门→屏蔽门→站台层→自动扶梯/楼梯→站厅层→通道→检票闸机→安全区域
站台层	自动扶梯/楼梯→站厅层→通道→检票闸机→安全区域
站厅层	通道→检票闸机→安全区域

2 疏散时间计算公式

《地铁设计规范》GB50157-2013 第 28.2.11 条规定: “疏散公式 6 min 是指反应时间 1 min, 余下时间按最不利情况下, 站台轨道区列车上最后一名乘客能疏散到安全区的时间必须满足 6 min 内。”^[11]

在多时段实地调查中, 进行实验观察和大量的数值模拟研究, 通过分析应急疏散过程中行人从事事故区域逃脱至安全区域的行人行为特征, 借鉴已有研究成果^[4], 总结出疏散时间包括以下 5 个方面:

(1) 反应时间

反应时间是从紧急事故发生到逃避行动实施的时间。反应时间通常被考虑为 1 min。

$$t_1 = 1 \text{ min} \quad (1)$$

(2) 到达自动扶梯和楼梯的时间

$$t_2 = L_s / v \quad (2)$$

式中: L_s 为在一个区域最远的点到达自动扶梯和楼梯的距离; v 为行人的平均移动速度。

(3) 通过自动扶梯和楼梯的时间

$$t_3 = (N_t + N_p) / c \quad (3)$$

式中: N_t 为在列车里的行人数量; N_p 为站台层的行人数量, 包括了乘客和工作人员; c 为自动扶梯和楼梯的通行能力。

(4) 通过疏散通道到达安全区域的时间

$$t_4 = L_p / v \quad (4)$$

式中: L_p 为从自动扶梯和楼梯到达安全区域的疏散通道长度; v 为行人的平均移动速度。

(5) 通道不均匀选择偏差时间

在应急疏散过程中, 行人疏散通道的不均匀性选择现象会增加疏散总时间, 疏散时间也随着通道之间距离的增加而增加。根据排队论, 不平衡聚集引起的最大时间偏差可由 L_d/v 决定。

$$t_5 = L_d / v \quad (5)$$

式中: L_d 为乘客可以到达的 2 个不同通道之间的距离。

(6) 人员应急疏散总时间

$$t_{\text{总}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 \quad (6)$$

3 实例模拟仿真—以重庆两路口轨道交通换乘站为例

本文以重庆两路口轨道交通换乘站为例展开研究, 其立体示意图如图 2 所示, 站内共有 4 层, 从上至下依次是 B2 出口层、B3 站厅层、B4 站台层和 B5 站台层。据统计, 重庆市轨道交通中最繁忙的当属两路口轨道交通换乘站, 日均换乘量 19.3 万人次^[14], 客流密集是该站的一个显著特点。根据轨道交通换乘站发生突发事件的位置考虑, 将该站的 B3, B4, B5 层分别划分为 3 个区域, 编码

为 Bx Ax，例如 B5 层第 1 个区域编码为 B5 A1。通过实地调查，自动扶梯和楼梯处是乘客聚集节点，自动扶梯和楼梯的编码为 ExSx，例如 B5 层的 3 号自动扶梯和楼梯编码为 B5 E3S3。紧急疏散路线的终点设置为车站的安全出口，共有 6 个安全出口正常使用，分别为 Exit1，Exit2，Exit3，Exit4，Exit5 和 Exit7，其中 Exit1 至 Exit4 在 B2 层，Exit5 和 Exit7 在 B3 层。

使用 AnyLogic 多方法仿真软件开展研究。AnyLogic 是一种可以支持系统动力学、离散事件、多智能体和混合系统建模与仿真的工具，采用 AnyLogic 行人库仿真建模是基于社会力模型的不消耗物理资源的虚拟仿真建模方法，用于模拟“真实”环境中行人的行为特征以及建筑设施特征。仿真模拟的对比图如图 2 所示。

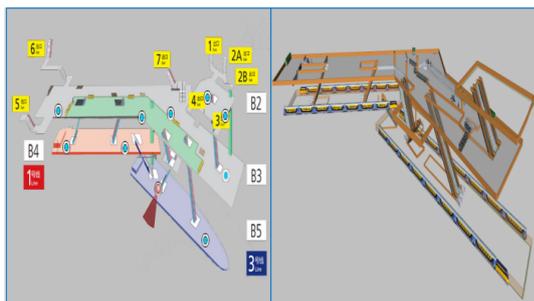


图 2 重庆两路口轨道交通换乘站立体及仿真对比图
Fig. 2 Schematic diagram and simulation model of Chongqing Lianglukou rail transit transfer station

3.1 疏散路线设计和疏散时间计算

根据 1.3 小节所述，突发事件发生在轨道交通列车内时，乘客应急疏散路线最长，因此以此种情形为例，开展站内应急疏散模拟研究。基于上述探讨，并结合实地调研得到的数据，每个区域行人的应急疏散路线方案和疏散时间如表 2 所示。

对表中疏散路线的含义进行说明，以 B4 A1：B4 E3S3-B3 E1S1-Exit5 为例，表示 B4 站台层 A1 区域的行人乘坐同层的 B4 E3S3 自动扶梯或楼梯到达站厅层 B3 E1S1 处自动扶梯或电梯，然后通过站厅层的通道到达安全出口 Exit5，该条应急疏散路线的总疏散时间为 210.8 s。

表 2 不同应急疏散地点的疏散路线方案和疏散时间
Tab. 2 Evacuation route strategies and evacuation time of different emergency evacuation locations

疏散路线方案	总疏散时间 $t_{\text{总}}/s$
B3 层(站厅层)	
B3 A1 — Exit5	84.3
B3 A1 — Exit7	109.0
B3 A2 — Exit7	85.2
B3 A3 — Exit7	87.8
B3 A3 — B2 E1S1 — Exit1-4	96.2
B4 层(站台层)	
B4 A1: B4 E3S3 — B3 E1S1 — Exit5	210.8
B4 A1: B4 E2S2 — B3 E2S2 — Exit7	248.8
B4 A2: B4 E3S3 — B3 E1S1 — Exit5	217.4
B4 A2: B4 E2S2 — B3 E2S2 — Exit7	225.8
B4 A3: B4 E3S3 — B3 E1S1 — Exit5	238.6
B4 A3: B4 E2S2 — B3 E2S2 — Exit7	226.3
B5 层(站台层)	
B5 A1: B5 E3S3—B4 E1S1—B4 E2S2—B3 E2S2—Exit7	260.7
B5 A1: B5 E3S3 — B4 E1S1 — B4 E3S3 — B3 E1S1 — Exit5	272.6
B5 A1: B5 E2S2 — B3 E3S3 — Exit5	246.6
B5 A1: B5 E1S1 — B3 E4S4 — Exit7	249.2
B5 A1: B5 E1S1 — B3 E4S4 — B3 E5S5 — B2 E1S1 — Exit1-4	291.5
B5 A2: B5 E3S3 — B4 E1S1 — B4 E2S2 — B3 E2S2 — Exit7	286.3
B5 A2: B5 E3S3 — B4 E1S1 — B4 E3S3 — B3 E1S1 — Exit5	298.2
B5 A2: B5 E2S2 — B3 E3S3 — Exit5	261.2
B5 A2: B5 E1S1 — B3 E4S4 — Exit7	227.6
B5 A2: B5 E1S1 — B3 E4S4 — B2 E1S1 — Exit1-4	269.8
B5 A3: B5 E1S1 — B3 E4S4 — Exit7	217.0
B5 A3: B5 E1S1 — B3 E4S4 — B2 E1S1 — Exit1-4	259.2

注：总疏散时间由式(6)所得。

3.2 应急疏散仿真结果

根据重庆两路口轨道交通换乘站客流量实地调研数据，B5 站台层每侧有 16 个门，每个门到站客流约为 20~30 人，到站时刻层内容流约为 400 人。当发生突发事件时，按照最不利的情况考虑，即假设列车发生突发事件时，两侧列车同时到达，空间内需要疏散的客流达到最大值，即 800 人。整

个疏散模拟仿真过程存在 3 个关键节点, 分别在疏散时间为 30 s, 78 s 和 195 s 时, 对应急疏散过程和疏散特征进行论述。

如图 3 所示, 疏散时间为 30 s 时, 自动扶梯和楼梯入口形成拱形密集人流, 造成严重拥挤现象, 极端大客流情况下易引发拥挤踩踏事故。列车到站后行人因恐慌等因素集聚, 并且行人倾向于选择最近的疏散通道, 出现行人从众现象和疏散通道的不均匀性选择现象, 出口形成拱形人流, 部分行人出现迂回运动。

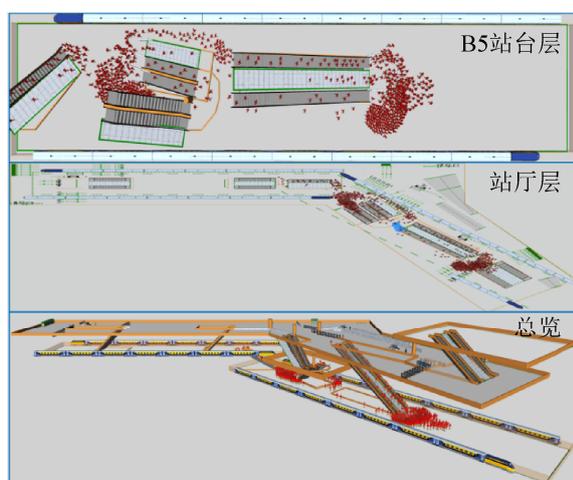


图 3 应急疏散时间 30 s 时行人的分布情况
Fig. 3 Distribution of pedestrians in emergency evacuation time of 30 s

如图 4 所示, 疏散时间为 78 s 时, 第一位乘客通过检票闸机撤离到安全出口 Exit7, 所有的疏散通道都进入应急疏散状态, 检票闸机全部打开便于行人的通过。应急疏散特征包括:

- (1) 从站台层通过自动扶梯和楼梯疏散至站厅层时, 突然宽阔的逃生空间内出现行人赶超现象;
- (2) 行人通过站台层和站厅层的疏散通道拐角处, 由于金属栅栏阻碍和拐角视线遮挡等原因, 该区域乘客密度高, 平均行走速度明显减慢, 出现拐角处拥挤现象。

如图 5 所示, 疏散时间为 195 s 时, 所有站台层的乘客已经疏散至站厅层, 陆续通过检票闸机到达安全出口, 此时疏散客流已经集中到站厅层, 在

高密度客流量疏散过程中, 不同的行人个体组成一个整体, 大部分乘客会跟随行人的主要涌动方向疏散逃脱至安全区域, 表现出从众现象。

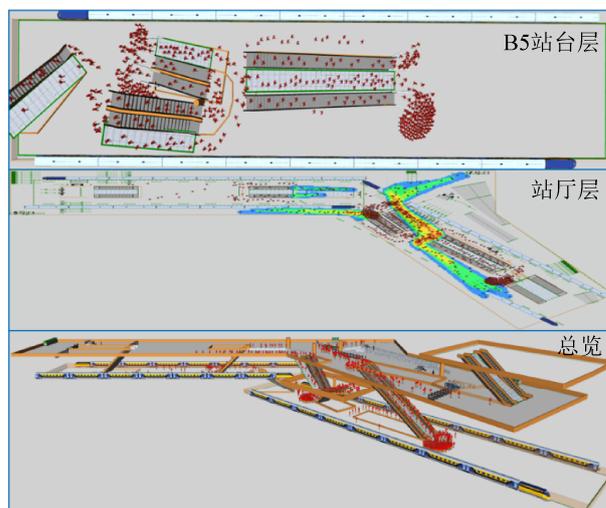


图 4 应急疏散时间 78 s 时行人的分布情况
Fig. 4 Distribution of pedestrians in emergency evacuation time of 78 s

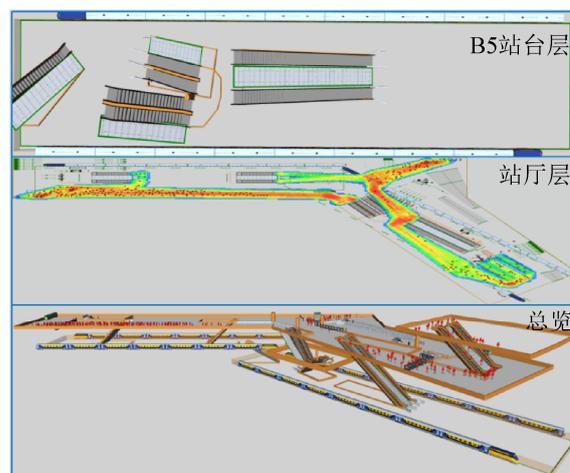


图 5 应急疏散时间 195 s 时行人的分布情况
Fig. 5 Distribution of pedestrians in emergency evacuation time of 195 s

滞留乘客的数量如表 3 所示。从整个疏散过程来看, 800 名乘客从轨道交通换乘站列车应急疏散, 278 s 时, 最后一位乘客通过疏散通道到达安全出口。考虑到人员的反应时间为 1 min, 因此总疏散时间为 338 s, 满足《地铁设计规范》^[1]疏散时间要求, 即站台轨道区列车上最后一位乘客疏散到安全区的时间低于 6 min。

表 3 滞留乘客数量
Tab. 3 Number of passenger stranded

疏散时间(未考虑反应时间)/s	滞留乘客数量/人
30	800
78	798
195	340
278	0

3.3 应急疏散仿真结果分析

3.3.1 通过自动扶梯和楼梯的人数分析

考虑轨道交通换乘站列车发生突发事件，以 B5 站台层疏散为例，模拟极端大客流 800 名乘客应急疏散过程，根据行人通过自动扶梯和楼梯人数与时间的关系，利用线性回归得出 B5 站台层不同自动扶梯和楼梯行人数量的动态曲线，如图 6 所示。由于每个自动扶梯和楼梯的拥挤堵塞程度不同，其通过率也略有不同，发生突发事件时，列车中行人的疏散路径为车门→屏蔽门→站台层→自动扶梯/楼梯→站厅层→通道→检票闸机→安全区域，并且行人趋向选择最近的应急疏散通道，B5 E1S1 可以直接疏散至站厅层，而 B5 E2S2 和 B5 E3S3 需要通行两次自动扶梯或楼梯才能疏散至站厅层，导致疏散时间的增加，因此，大部分乘客首先选择 B5 E1S1 作为疏散路线，其次选择 B5 E2S2 和 B5 E3S3，模拟仿真时 B5 E1S1 入口处拥挤堵塞现象最严重。

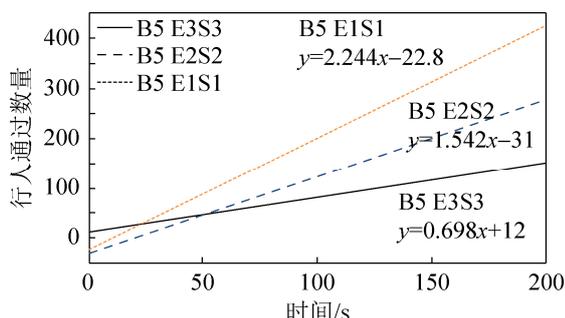


图 6 B5 站台层通过自动扶梯和楼梯的人数

Fig. 6 Number of people through escalators and staircases in B5 floor

3.3.2 滞留乘客数量变化分析

图 7 显示地铁车站总滞留乘客数量变化。疏散

时间达到 65 s 时，B5 层疏散通道拐角处排队等待进入自动扶梯和楼梯的行人开始逐步减少，乘客陆续抵达站厅层最近的检票闸机。当疏散时间达到 78 s 时，滞留乘客数量的动态曲线稳步下降，已有乘客撤离到安全区域，整个乘客应急疏散过程有序进行。但是，也存在大量乘客聚集在车站通道、自动扶梯和楼梯以及出入口等区域，形成新的风险隐患。疏散开始后，疏散通道拐角处拥挤和不均匀选择等瓶颈阻碍了行人的有效疏散，减缓疏散速度。当疏散时间到 110 s 时，随着行人逐步通过自动扶梯和楼梯到达站厅层，疏散速度开始加快，此时疏散速度为 5 人/s。

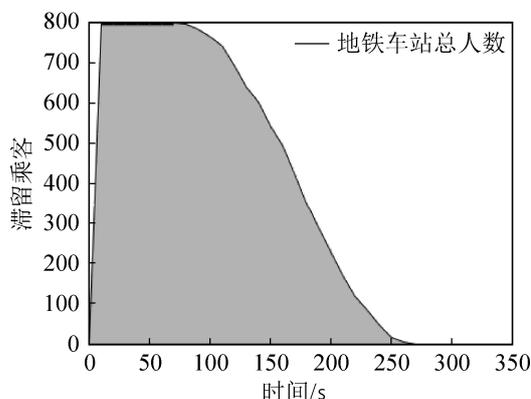


图 7 地铁车站总滞留乘客数量变化

Fig. 7 Change of stranded crowd number in station

3.3.3 仿真时间大于计算时间的原因说明

仿真建模结果显示，仿真模拟的应急疏散总时间比计算公式得到的疏散时间长，主要原因为为在应急疏散过程中，自动扶梯和楼梯的入口、疏散通道的拐角处以及检票闸机入口狭窄，成为疏散的瓶颈，实际疏散过程中，行人会在一定时间内集聚滞留，疏散时间因此会增加。由表 2 计算结果可知，当事故发生在 B5 层，不同疏散路径下应急疏散最短时间为 217.0 s，最长疏散时间为 298.2 s，综合疏散时间为 338 s。因此可计算出行人在各疏散瓶颈处的滞留时间范围为 39.8~121.0 s (338.0-298.2=39.8 s; 338.0-217.0=121.0 s)。

3.4 对应急疏散决策的建议

(1) 应急疏散时, 由于行人从众现象和疏散通道的不均匀性选择现象, 出口形成拱形人流。如果不能对密集人群进行及时有效地引导疏散, 很容易导致拥挤和踩踏等恶性事件的发生。要处理好客流堵塞现象, 应增加引导疏散的工作人员数量, 进行高效疏散。

(2) 疏散通道拐角处由于金属栅栏阻碍和拐角视线遮挡等原因, 形成高密度客流量, 要避免通道内有妨碍疏散的设备装置, 提高拥堵区域的乘客平均行走速度, 降低发生拥挤踩踏事故的风险。

(3) 应急状态下, 由窄变宽的空间应有逃生引导, 避免出现行人赶超现象; 疏散通道内的金属围栏应快速撤除, 防止成为逃生障碍; 拐角处应设置悬挂反光镜, 解决视线遮挡而造成逃生拥堵现象。

(4) 在极端大客流情况下, 盲目从众会导致局部拥堵现象的产生。此时疏散组织和现场管理人员应发布有利于提高人群疏散效率的信息, 例如安全出口的位置、危险源的位置、疏散路线的使用情况等, 以指导人群进行有序疏散。另外, 部分迫切希望逃生却没有足够信息的人员, 也可能通过询问周围人群的方式, 来获取更多的有效信息^[15]。

4 结论

本文对多层次轨道交通换乘站开展应急疏散模拟仿真研究, 研究内容包括行人疏散行为特征、疏散速度和疏散路线。在对疏散时间的计算公式和应急疏散路径的理论设定的基础上, 构建研究框架。根据在重庆两路口轨道交通换乘站实地调研得到的行人流量数据及空间结构特征, 通过 AnyLogic 多方法仿真软件进行应急疏散建模分析, 得出如下结论:

(1) 疏散过程中, 自动扶梯和楼梯的入口、疏散通道的拐角处以及检票闸机入口狭窄, 成为疏散的瓶颈, 行人会在一定时间内集聚滞留, 增加疏散时间;

(2) 发生火灾、爆炸等突发事件, 有效的引导措施可以提高人群的疏散效率;

(3) 使用 AnyLogic 软件能够将仿真模型表现为 2D 或 3D 画面, 并动态的展示行人的疏散过程, 因此可对关键节点和数据结果进行精确的分析;

(4) 按照制定的疏散策略实施, 重庆两路口轨道交通换乘站列车发生突发事件时, 考虑最大可能数量乘客的应急疏散时间为 338 s, 满足《地铁设计规范》^[11]“6 min 原则”的疏散时间要求。

本文的实验数据分析建立在仿真模拟的基础上, 研究得出的乘客疏散路线和疏散时间的计算方法可应用于其他轨道交通换乘站, 并可供轨道交通运营公司应急疏散策略制定以及政府管理中安全防控体系建设借鉴。后续研究将会对不同突发事件发生点进行仿真模拟, 并针对疏散瓶颈处进行优化和改进。

参考文献:

- [1] Wang J, Yan W, Zhi Y, et al. Investigation of the Panic Psychology and Behaviors of Evacuation Crowds in Subway Emergencies[J]. Procedia Engineering (S1877-7058), 2016, 135: 128-137.
- [2] Hong L, Gao J, Zhu W. Self-evacuation Modelling and Simulation of Passengers in Metro Stations[J]. Safety Science (S0925-7535), 2018. In Press.
- [3] Li Y, Wang H, Wang C, et al. Personnel Evacuation Research of Subway Transfer Station Based on Fire Environment[J]. Procedia Engineering (S1877-7058), 2017, 205: 431-437.
- [4] Shi C, Zhong M, Nong X, et al. Modeling and Safety Strategy of Passenger Evacuation in a Metro Station in China[J]. Safety Science (S0925-7535), 2012, 50(5): 1319-1332.
- [5] 杨建芳, 高岩, 王宏杰. 多层建筑物应急疏散模型和算法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(2): 267-273.
Yang Jianfang, Gao Yan, Wang Hongjie. Multi-storied Building Emergency Evacuation Model and Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(2): 267-273.
- [6] Li Z, Tang M, Liang D, et al. Numerical Simulation of Evacuation in a Subway Station[J]. Procedia Engineering (S1877-7058), 2016, 135: 616-621.
- [7] 隋杰, 龙圣杰. 生化恐怖袭击下行人应急引导疏散仿

- 真研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(4): 767-774, 783.
- Sui Jie, Long Shengjie. Research on Simulation of Emergency Evacuation Guidance under Biochemical Terror Attacks[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(4): 767-774, 783.
- [8] Kallianiotis A, Papakonstantinou D, Arvelaki V, et al. Evacuation Method Evaluation in Underground Metro Station[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction (S2212-4209), 2018, 31: 526-534..
- [9] 杨森炎, 吴建平, 徐彬, 等. 地铁通道客流组织措施的仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(10): 2492-2496.
- Yang Senyan, Wu Jianping, Xu Bin, et al. Simulation Study of Passenger Flow Organization Effects for Different Isolation Measures in Subway Passageway[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(10): 2492-2496.
- [10] Jiang C S, Deng Y F, Hu C, et al. Crowding in Platform Staircases of a Subway Station in China during Rush Hours[J]. Safety Science (S0925-7535), 2009, 47(7): 931-938.
- [11] GB50157-2013 地铁设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- GB 50157-2013 Code for design of Metro[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [12] PD 7974-6-2004 The Application of Fire Safety Engineering Principles to Fire Safety Design of Buildings--Part 6: Human Factors: Life Safety Strategies--Occupant Evacuation, Behavior and Condition (Sub-system 6)[S]. London: British Standards Institution, 2004.
- [13] 重庆市轨道交通设计研究院. 重庆市轨道交通 3 号线南延伸段工程施工设计设计要求[R]. 重庆: 重庆轨道交通有限公司, 2015.
- Chongqing Rail Transit Design and Research Institute. Construction design requirements for the south extension section of Chongqing rail transit line 3[R]. Chongqing: Chongqing Rail Transit Co., LTD, 2015.
- [14] 重庆市交通规划研究院. 2016 年重庆市主城区交通发展年度报告[R]. 重庆: 重庆市规划局, 2017.
- Chongqing Transport Planning and Research Institute. 2016 annual report on traffic development in Chongqing city[R]. Chongqing: Chongqing Urban Planning Bureau, 2017.
- [15] Chen H T, Zhang L H, Yang P, et al. Studies on the Evacuation Model for Limited Visibility and Evacuation Optimization in an Emergency[J]. Information Technology Journal (S1812-5638), 2013, 12(18): 4768-4775.