

城市轨道交通车站运营人员行为对乘客应急疏散 路径选择干预的虚拟现实仿真建模方法^{*}

余 亮¹ 陈 峰^{2,3} 王子甲^{2,3}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所, 100081, 北京; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 100044, 北京; 3. 北京交通大学北京市轨道线路安全与防灾工程技术研究中心, 100044, 北京)

摘 要 [目的] 为有效反映城市轨道交通车站运营人员行为对疏散的实时影响, 解决目前 VR (虚拟现实) 环境中疏散路径规划采用预定义的静态路径法, 而无法揭示乘客疏散对运营人员即时行为动态响应机理的问题, 提出一种运营人员行为对乘客应急疏散路径选择干预的 VR 仿真建模方法。

[方法] 介绍了将车站物理空间描绘为路径算法可识别的抽象空间的环境建模方法, 定义了能感知外部信息和自主决策的乘客智能体模型, 制定了基于 A* 算法的出口选择规则; 在此基础上, 考虑运营人员行为对环境的动态改变, 综合实时的疏散路线长度、疏散时间和行人密度等因素, 构建了动态路径规划模型; 开发了 VR 仿真系统, 以某大型综合枢纽车站为例进行仿真分析。[结果及结论] 仿真分析结果表明, 疏散仿真开始时, 乘客智能体根据出口选择制定全局路线, 过程中能自主根据运营人员引起的动态障碍物状态变化进行实时的局部路径规划, 并且随着场景内乘客数量的增加仍保持较高的响应性。说明所提方法能有效且高效地捕捉虚拟环境中的动态变化, 并将其反映到乘客疏散的过程中, 能为开展紧急疏散 VR 试验提供技术支持。

关键词 城市轨道交通车站; 紧急疏散; 动态路径规划; 运营人员; 虚拟现实

中图分类号 U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.060

VR Simulation Modeling for Intervention of Urban Rail Transit Station Staff Behavior on Passenger Emergency Evacuation Path Choice

YU Liang¹, CHEN Feng^{2,3}, WANG Zijia^{2,3}

(1. Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., 100081, Beijing, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China; 3. Beijing Engineering and Technology Research Center of Rail Transit Line Safety and Disaster Prevention, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China)

Abstract [Objective] To effectively reflect the real-time impact of urban rail transit station staff behavior on evacuation, and to solve the problem that the adoption of predefined static path method for evacuation route planning in VR (virtual reality) environment cannot reveal the dynamic response mechanism of passenger evacuation to station staff immediate behavior, a VR simulation modeling method is proposed to model the intervention of station staff behavior on passenger emergency evacuation path choice. [Method] The environment modeling method that depicts station physical space as an abstract space recognizable by path algorithm is introduced. The passenger intelligent agent model that can perceive external information and make decisions autonomously is defined, and the exit selection rules based on A* algorithm are formulated. On this basis, a dynamic path planning model is constructed by considering the dynamic change of station staff behavior to the environment and integrating the real-time evacuation route length, the evacuation process time, and the density of pedestrians. A VR simulation system is developed to carry out simulation and analysis using a large-scale comprehensive hub station as example. [Result & Conclusion] Simulation analysis results show that at the beginning of evacuation simulation, the passenger intelligent agent can formulate global routes based on exist selection. During the process, it can autonomously perform real-time local path planning based on dynamic obstacle state changes caused by station staff, and maintain high responsiveness as the number of passengers in the scenario increases. It indicates that the proposed method can effectively and efficiently capture the dynamic changes in virtual environment and reflect them in the process of passenger evacuation, thereby providing technical support for conducting emergency evacuation VR experiments.

Key words urban rail transit station; emergency evacuation; dynamic path planning; station staff; virtual reality

^{*} 北京经纬信息技术有限公司科研项目 (DZYF23-17)

城市轨道交通车站环境复杂、封闭,且人流量大,一旦发生紧急事故,则乘客疏散困难。其中,火灾事故率高、救援困难并且伴随次生灾害,极易造成严重的生命财产损失和社会影响。因此,面对紧急疏散时如何快速、有效地将乘客疏散至安全位置,是城市轨道交通车站消防工作的重大难题。运营人员作为车站突发事件应急预案的直接实施者,及时准确传达逃生信息对避免或减少乘客伤亡起着至关重要的作用。运营人员、乘客、环境之间非线性的相互作用凸显了城市轨道交通车站疏散的复杂性,因而研究运营人员对疏散的干预和控制是非常重要的。

对于运营人员的疏散研究,存在环境-疏散者-被疏散者之间复杂的相互作用,因此大多数研究都是关注于设备设施规模布局干预对疏散效率的影响。文献[1]对导流栏杆的布局方式及其长度设置进行数值分析,以探究对人群疏散的影响机理。闸机作为疏散过程中的直接安全出口,文献[2-3]通过疏散模拟和试验证明了其形式、位置、状态和数量都对疏散时间有明显影响。对于作为疏散瓶颈的楼梯,文献[4]通过开展试验探讨了疏散时楼梯通道的人群生理限制,为车站楼梯布局提供参考;文献[5]研究了楼梯上行人的最大速度和行人使用楼梯的平均最小宽度两个参数,并对疏散性能进行评估。也有研究将运营人员对疏散的影响简化为一种领导或信息传递,如文献[6]加入引导行为模型来丰富介观模型,表明引导员能有效减小行人群体的恐慌程度,进而降低拥挤和避障行为;文献[7]建立了扩散模型模拟工作人员影响下的疏散过程,对工作人员的数量设置进行了讨论。根据上述研究,在疏散过程中设置运营人员及改变环境行为进行疏散干预是非常有必要的。但是由于缺乏运营人员行为刻画模型以及乘客响应互动模型,难以研究运营人员行为对疏散的动态影响。

近来,VR(虚拟现实)技术通过最大程度的场景建模及沉浸式体验,能够真实再现如火灾等紧急情况下的压力环境,这种虚拟的压力环境可以唤起相应情况下的心理和行为反应,越来越多地被用于构建与紧急情况相关的行为研究。

但是由于VR的特性,对帧率要求很高,传统的仿真模型如社会力模型,虽然能有效反映行人疏散中的复杂状况,但存在模型参数繁杂、计算量大等问题^[8],难以适应VR环境的强实时性。对于VR

环境中的路径规划方法,疏散对象使用的基本都是静态的,即预设起终点,较少考虑期间的环境变化特别是运营人员的干预。而在真实疏散中,乘客的疏散路线是根据运营人员的行动及动态环境改变做出的,例如,运营人员可以打开或关闭自动扶梯或检票口。这些选择不能在疏散开始时在模型中预先定义,而在传统的行人模拟中,疏散路径是在模型运行之前确定的,不能捕捉到这种动态特性。

因此,针对运营人员对乘客的路线选择干预难以模拟的问题,本文结合疏散路线长度、疏散过程时间和行人密度等因素,提出一种VR交互式动态仿真方法;运营人员在高还原度的三维场景中,通过VR表达设备操作场景中的设施,乘客模型能感知环境变化进行实时路径规划,体现运营人员对疏散的实时交互控制,并搭建了基于大型枢纽车站的仿真系统,进行仿真试验证明其有效性。

1 模型

1.1 环境建模

环境建模是将车站物理空间描绘为路径算法可识别的抽象空间,标记障碍物的位置,进而进行路径规划以实现乘客的自主移动。城市轨道交通车站环境复杂、物理设施繁多,按其状态是否会受运营人员行为而改变,可将障碍物分为静态与动态两种。静态障碍物包括墙壁、立柱、垂直电梯等;移动铁马、楼扶梯通道、闸机通道等则标定为动态障碍物。作为感知环境的乘客,其状态集(如身体半径、可越过最大高度、可行走最大坡度等)是可行走区域划分的重要依据。由于凸多边形其任意两个顶点连成的直线都含在凸多边形内,这一特性在寻路上表现出强大的优势,本方法的环境空间建模将连续空间抽象切割为可行走的凸多边形集合,相应产生的顶点就是空间中的寻路节点。

根据障碍物和乘客的状态集检测可行走区域轮廓,进行简化处理得到简单多边形,进而分割得到凸多边形网络,最后三角化获取高度细节,形成乘客可感知的环境信息。

1.2 动态路径规划

本文假设乘客按最短路径疏散,除非被运营人员干预。基于此,本文提出的动态路径规划模型分为两层,以体现乘客对动态环境的实时反馈。因智能体具有由相关的属性集组成的状态,能分析所感测的数据以产生适当的动作和决定,本文将行人抽

象为智能体,其定义为式(1):

$$\text{Agent} = \{v(v_o, \vec{v}_{\text{dir}}), L, \theta, p, d, \vec{x}\} \quad (1)$$

式中:

Agent——1 个智能体;

v ——智能体速度;

v_o ——智能体的期望速度,按照《地铁安全疏散规范》,乘客的期望走行速度从 0.76 m/s 到 1.25 m/s 不等;

\vec{v}_{dir} ——实际走行速度;

p ——视场范围内的智能体乘客数量;

d ——智能体的直径,取 0.4 m;

\vec{x} ——智能体的当前位置。

智能体视场示意图见图 1 所示,其长度 $L = 6$ m,角度 $\theta = 120^\circ$ 。

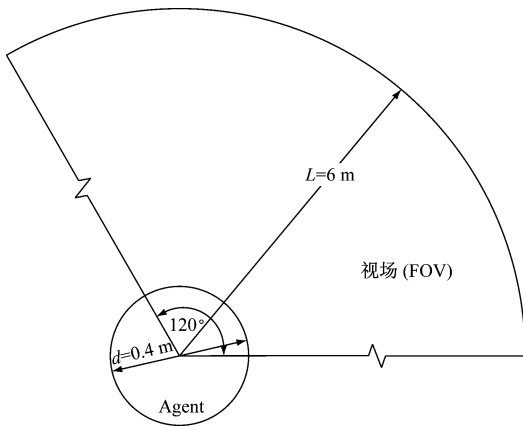


图 1 智能体视场示意图

Fig. 1 Diagram of intelligent agent field of view

1.2.1 出口选择

针对已知环境空间, A* 算法采用启发式搜索,往往能在静态环境中有效快速地求解出最优路径。A* 算法启发中的估价通过一个估价函数表示(如式(2)所示),以确定搜索方向。

$$f(n) = g(n) + \lambda h(n) \quad (2)$$

式中:

$f(n)$ ——乘客从疏散起始位置经由节点 n 到达安全出口的估价函数;

$g(n)$ ——疏散起始位置到节点 n 的实际代价;

$h(n)$ ——节点 n 到达安全出口的估计代价;

λ ——估计代价在函数中的权重。

两节点 n_1 、 n_2 间的代价用欧几里得距离 l 衡量:

$$l = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中:

(x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) ——节点 n_1 、 n_2 的空间坐标。

城市轨道交通车站存在多个安全出口,对出口进行编号,乘客在执行疏散前通过 A* 算法计算当前位置到所有出口的代价,将代价最小的路径 R_o 作为全局路径进行疏散。

$$R_o = \min_{1 \leq j \leq N} (f(j)) \quad (4)$$

式中:

$f(j)$ ——从当前位置到第 j 个出口的代价。

由于网格的划分, R_o 是一条包含若干节点的路径;为提高算法效率,对路径 R_o 上的路径点 N_i ,若 N_i 的上一个路径点 N_{i-1} 和下一个路径点 N_{i+1} 之间的连线上没有障碍物,则 N_i 不是关键点,将其删除;遍历路径上的所有点得到只有关键点的路径 $R_{o,k}$ 。

1.2.2 动态路径规划

既有研究表明,疏散的效率主要由疏散路线长度、疏散过程时间和行人密度这 3 个因素所决定^[9],在路线抉择时倾向于根据如队列长度等动态时间,是依赖信息而不是仅靠路径的物理长短。因此,本文采用时间作为局部动态路径规划的主要依据,假定乘客选择时间最短的路径进行疏散,如式(5)所示:

$$t_i = \sum \frac{w(i, j)}{v(i, j)} \quad (5)$$

式中:

t_i ——预测乘客在第 i 条局部路径上的疏散时间;

$w(i, j)$ ——把路径 i 分为若干段,其中段 j 的长度;

$v(i, j)$ ——在段 j 上的速度。

行人的速度很大程度上受到客流密度的影响,移动速度与人员拥挤密度呈对数关系;基于地铁集散区速度与密度的关系^[10],对拥挤状态下的乘客速度 v_p 按式(6)进行修正:

$$v_p = -0.436 \ln \rho + 0.712 \quad (6)$$

$$\rho = \frac{2p}{L^2 \theta} \quad (7)$$

式中:

ρ ——路段的行人密度,由视场内的行人数量通过式(7)计算得到。

在每一个全局路径关键点上,乘客智能体以当前位置为起点,下一个关键点为终点,路段通过时间为权值;由于路段实际代价用时间衡量,用欧几

里得距离的估计代价大于实际代价,得到的路段可能不是最优^[11],因此更改估值函数的权值 λ ,执行 A^* 算法进行搜索。

运营人员执行应急疏散章程是一种动态变化过程,乘客既定的疏散路径可能不反映适应这种动态变化。因此,本文建立动态路径选择模型以揭示运营人员诱导行为下乘客疏散群集动力学特性。定义运营人员的行为集如式(8):

$$S = \{s_1(a, t), s_2(a, t), \dots, s_m(a, t)\} \quad (8)$$

式中:

S ——运营人员的行为集;

s_i ——运营人员的行为构成单元, $i = 1, 2, \dots, m$;

a ——行为,包括使用或复制移动铁马、关闭或开启楼扶梯通道、关闭或开启闸机通道;

t ——当前行为执行的时刻。

在环境地图中,动态障碍物的环境信息实时变更,进而会影响乘客的路径选择,即 S 中子行为被执行,在 t 时刻同步更新网格;为避免乘客动态避障时与障碍物产生碰撞,对动态障碍物进行膨胀处理。本文设置膨胀域宽度为乘客身体宽度尺寸的一半,图2展示了移动铁马的膨胀域。

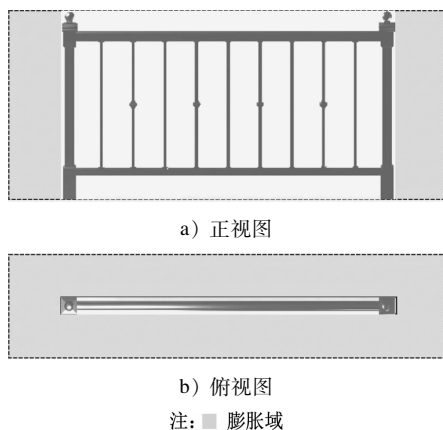


图2 动态障碍物移动铁马的膨胀域

Fig. 2 Expansion domain of dynamic obstacle division fence

乘客智能体逐一向 $R_{0,K}$ 上的节点行进,当视域内出现导流栏或电梯状态变更,则判断原路径节点是否落在动态障碍物划分的不可行走区域内,若原有路径点没有落在更新后的不可行走区域,认为该障碍物对乘客没有影响;反之,则以乘客智能体的当前位置为局部路径的起点,下一个路径关键点为终点进行二次局部路径规划。

算法流程如图3所示。

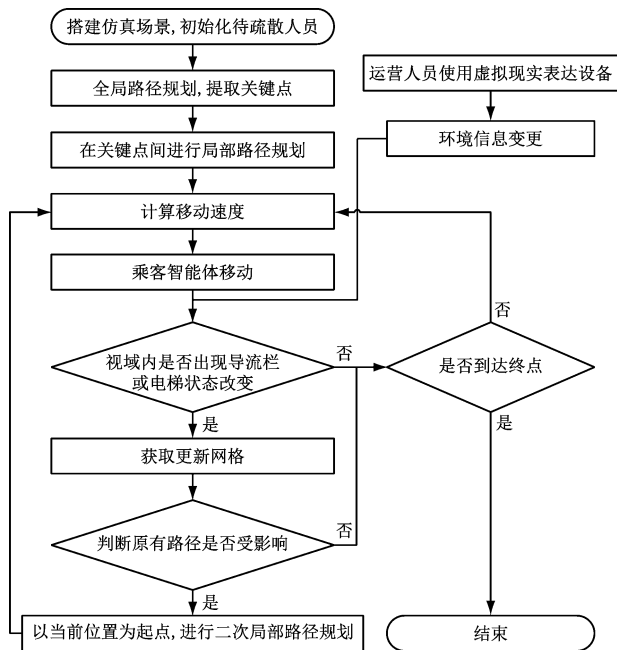


图3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the algorithm

2 仿真试验

2.1 仿真环境

为验证动态路径规划模型的有效性,以某城市轨道交通大型枢纽车站为仿真试验的工程案例。该车站为侧式站台车站,站厅长度为109.10 m,宽度为83.73 m;站台公共区长度为79.40 m,侧式站台宽度为13.65 m。站厅与站台之间设置4组楼扶梯,站厅层设置6组闸机,在疏散时均可作为安全出口使用。

利用3DMAX、Unity等软件对车站进行1:1建模并渲染,根据现场实际调研对站内移动铁马、消防设备等进行位置还原。

基于C#语言搭建乘客动态路径规划模型,融入仿真系统。仿真系统硬件配置如表1所示。

表1 仿真系统硬件配置

Tab. 1 Simulation system hardware configuration		
类型	配置	详细信息
图形工作站	操作系统	Windows 10(64 位)
	内存	16 GB
	处理器	Intel(R) Core(TM) i7-10750H
	显卡	Nvidia RTX2060
VR 表达设备	头显设备	HTC VIVE
	走行设备	Omni VR 万向跑步机

2.2 试验分析

2.2.1 虚拟环境搭建

根据环境空间建模方法,对障碍物进行标定进而划分乘客的可行走区域;乘客在执行出口选择路径规划时会绕过障碍物,疏散至站厅层的安全出口处。图4展示了环境空间建模结果。

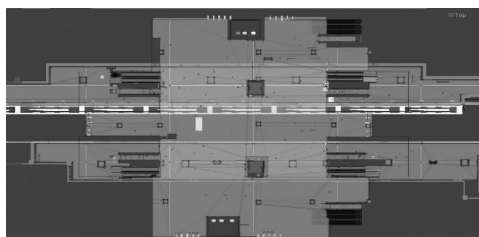


图4 环境空间建模

Fig.4 Environmental space modeling

本文基于VR技术搭建车站火灾虚拟场景(如图5所示),参与者可通过仿真系统实现应急预案中涉及到的设施控制、设备交互。图6显示了参与者使用移动铁马的情形,乘客会根据交互式动态仿真模型感知相应环境变化进而实时规划路线,体现运营人员对疏散的实时交互控制。烟雾、火焰使用粒子系统创建,以增强参与者的浸入感。



图5 用户视觉效果

Fig.5 User visual effect

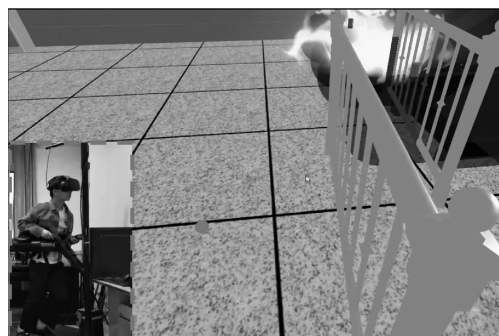


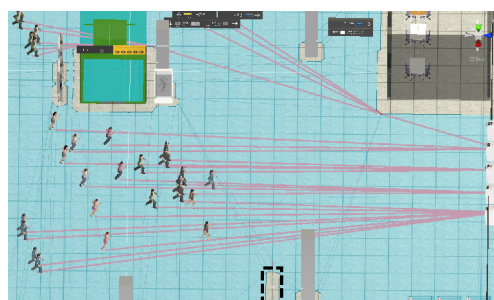
图6 参与者使用场景中的设施

Fig.6 Participant using equipment in the scene

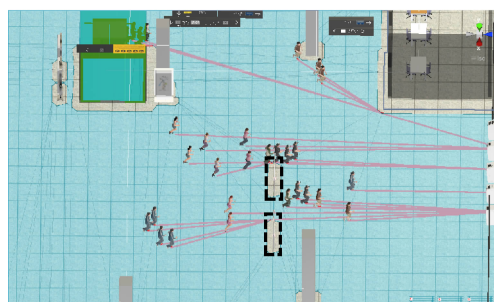
2.2.2 动态路径规划结果

在构建的虚拟场景中,车站运营人员通过仿真

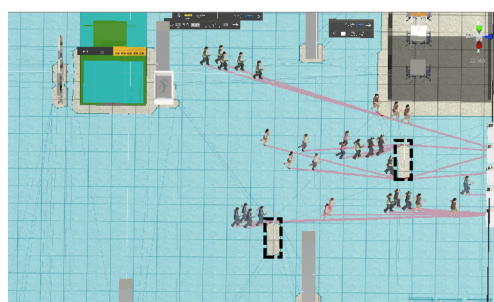
系统的交互手柄移动铁马的位置等措施,这种动态变化会导致环境信息的实时变更;基于动态障碍物动态更新网格,结合时间预测信息实现乘客的局部动态路径规划。图7展示了虚拟场景中动态障碍物不同状态下乘客的路线选择情况。



a) 动态障碍物状态1下不阻碍乘客原本路线时乘客的路线选择



b) 动态障碍物状态2下乘客的路线选择



c) 动态障碍物状态3下乘客的路线选择

乘客 路线 动态障碍物边框

图7 动态路径规划

Fig.7 Dynamic path planning

如图7a)所示,当动态障碍物不阻碍乘客原本路线时,乘客将继续按照原本路线进行疏散逃生;图7b)、7c)展示不同动态障碍物下不同时刻乘客的位置情况,由于障碍物位置的移动,可行走区域随之发生了变化,乘客动态避障,选择新的有效路径进行安全疏散。试验结果表明,本文提出的方法能有效根据参与者实施措施导致的环境信息变更进行动态路径规划。

2.2.3 动态路径规划效率分析

为验证算法的效率,将试验分为三组,在场景中分别设置乘客 200、500、1 000 人;分析工具使用 Unity Profiler 分析器,运行情况如表 2 所示。

表 2 场景运行结果

Tab. 2 Running results of the scene

乘客数量/人	处理时间/ms	
	全局路线搜索	局部路径搜索(平均)
200	170.16	1.15
500	388.40	1.35
1 000	773.24	1.80

由于乘客起始位置不同,疏散开始时需要遍历所有安全出口,找到最短的出口作为逃生目标点,过程中会对整个环境空间进行图搜索,因此随着虚拟场景中乘客数量的增加,出口路线搜索的时间也会随之增加。而局部路线规划是以动态障碍物为核心,避免了全图的重复搜索,时延低,极端情况也不会超过 10 ms。试验证明了本文方法的高效性。并且动态障碍物导致的环境信息变更只会影响其周围的乘客,与环境中的总人数相关性不大,因此仿真系统的处理时间也基本一致。

3 结语

1) 本文构建了高效的动态路径规划模型,基于环境信息,疏散开始时乘客根据出口选择制定全局路线,过程中根据运营人员引起的动态障碍物状态变化进行实时的局部路径规划,有效反映了乘客对环境的动态感知和反馈。随着场景内乘客数量的增加,本方法仍保持较高的响应性。

2) 结合 VR 技术将本模型应用于虚拟场景中,满足 VR 对运行性能的高要求,并开发了疏散系统。该系统可以实现车站实施的疏散流程和疏散流线设计的有效性检验,能为高效疏散方案的制定提供辅助决策;并且可以通过本系统发挥虚拟环境对参与者应急反应行为的有效激发,进而分析运营人员及乘客在紧急状况下的行为、运动、心理特点,为突破地铁疏散研究瓶颈提供参考。

参考文献

- [1] 穆娜娜,史聪灵,胥旋,等. 地铁站台导流栏杆对人员疏散的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(12): 175.
MU Nana, SHI Congling, XU Xuan, et al. Study on influence of diversion railings on personnel evacuation of subway platform[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(12): 175.
- [2] 柳泽原,彭宏勤. 基于 Anylogic 的地铁车站闸机口通过能力

仿真研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(增刊1): 110.

- LIU Zeyuan, PENG Hongqin. Simulation research on passing capacity of subway station gate based on Anylogic[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(S1): 110.
- [3] 李涛,陈娟,马剑,等. 地铁站旅客紧急疏散效率实验研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(3): 228.
LI Tao, CHEN Juan, MA Jian, et al. Experimental study of passenger evacuation efficiency in a metro station[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(3): 228.
- [4] HALDER A, KUKLANE K, MILLER M, et al. Physiological capacity during simulated stair climbing evacuation at maximum speed until exhaustion[J]. Fire Technology, 2021, 57(2): 767.
- [5] JIANG C S, YUAN F, CHOW W K. Effect of varying two key parameters in simulating evacuation for subway stations in China[J]. Safety Science, 2010, 48(4): 445.
- [6] 魏心泉,王坚. 基于熵的火灾场景介观人群疏散模型[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(10): 2473.
WEI Xinquan, WANG Jian. A mesoscopic evacuation model based on multi-agent and entropy with leading behavior under fire conditions[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(10): 2473.
- [7] WANG X, ZHENG X, CHENG Y. Evacuation assistants: an extended model for determining effective locations and optimal numbers[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2012, 391(6): 2245.
- [8] 杨晓霞. 基于社会力模型的地铁枢纽站行人流动态特性与疏散研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
YANG Xiaoxia. Study on dynamic characteristics and evacuation of pedestrian flow in subway hub station based on social force model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [9] ZHANG L, LIU M, WU X, et al. Simulation-based route planning for pedestrian evacuation in metro stations: a case study[J]. Automation in Construction, 2016, 71: 430.
- [10] 李三兵,陈峰,李程垒. 对地铁站台集散区客流密度与行进速度的关系探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(12): 34.
LI Sanbing, CHEN Feng, LI Chenglei. Passages' density and travel speed at subway stations[J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(12): 34.
- [11] ZHOU C, HUANG B, FRÄNTI P. A review of motion planning algorithms for intelligent robots[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022, 33(2): 387.

· 收稿日期:2022-01-13 修回日期:2022-02-23 出版日期:2024-07-10
Received:2022-01-13 Revised:2022-02-23 Published:2024-07-10
· 第一作者:余亮,研究实习生,carsmoon@163.com
通信作者:王子甲,教授,zjwang@bjtu.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license