

地铁车站地下空间疏散问题 研究进展

洪小春^{1,2}, 陈炼¹, 孙萍^{2,3}, 董杰^{2,3}

(1. 扬州大学土木与交通学院, 江苏扬州 225127; 2. 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室, 山东青岛 266101; 3. 青岛地质工程勘察院(青岛地质调查开发局), 山东青岛 266101)

摘要: 针对地铁车站地下空间日益复杂带来的突发事件疏散难题, 在梳理国内外相关文献的基础上, 首先分析不同类型地铁车站地下空间的疏散特性与共性, 探讨灾害情境下的疏散场景、行人行为特征和疏散分析方法, 并总结各类车站的疏散行为特征。其次, 从实体实验、模拟实验到疏散仿真技术, 深入剖析疏散实验的最新动态, 包括主流模拟平台的核心算法、仿真流程及其局限性, 归纳空间特征对仿真实验的影响和研究热点。最后, 围绕疏散布局与路径优化, 阐述相关方法论及应用实践。在此基础上, 指出现有研究主要集中于理论模拟和定量分析, 缺乏实地验证, 制约实际应用效果, 且在人群行为心理和社会动态等跨学科整合上有所欠缺, 导致疏散策略在应急实践中存在局限性。为此, 建议深化模型真实性, 借助虚拟现实、大数据和人工智能技术, 提高仿真精确性; 加强心理学、社会学和安全工程等跨学科合作, 全面分析不同类型地铁车站地下空间突发事件中的人群疏散行为, 为后续研究提供理论支撑和实践参考。

关键词: 地铁车站; 地下空间; 应急疏散; 疏散仿真; 路径优化

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)01-0034-13

Research Progress on Evacuation Issues in Underground Spaces of Subway Stations

HONG Xiaochun^{1,2}, CHEN Lian¹, SUN Ping^{2,3}, DONG Jie^{2,3}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, 225127; 2. Key Laboratory of Geological Safety of Coastal Urban Underground Space, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong, 266101; 3. Qingdao Geo-Engineering surveying Institute (Qingdao Geological Exploration Development Bureau), Qingdao, Shandong 266101)

Abstract: In view of the difficulties in emergency evacuation caused by the increasing complexity of underground spaces in subway stations, and based on an extensive review of domestic and international literature, this paper first analyzes the evacuation

收稿日期: 2025-01-10 修回日期: 2025-10-27

第一作者: 洪小春, 男, 博士, 讲师, 从事城市地下空间规划与地下建筑设计理论与方法、整合的建筑设计理论与方法等研究, hongxc@yzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(52508041); 2024年度自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室开放基金课题(BHKF2024Z02); 2025年度江苏省基础研究计划(江苏省自然科学基金青年项目)(BK20250902); 2025年度江苏省高校哲学社会科学研究项目(2025SJYB1534); 2024年度江苏省科协青年科技人才托举工程(JSTJ-2024-240); 2024年度江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(24KJB560025); 2024年度扬州大学人文社会科学研究基金项目(xjj2024-35); 2023年江苏省产学研合作项目(BY20231316); 江苏建筑节能与建造技术协同创新中心重大研究基金计划项目课题(SJXTZD21051); 国家重点研发项目子课题(2018YFC0704903-03)

引用格式: 洪小春, 陈炼, 孙萍, 等. 地铁车站地下空间疏散问题研究进展[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(1): 34-46.

HONG Xiaochun, CHEN Lian, SUN Ping, et al. Research progress on evacuation issues in underground spaces of subway stations[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(1): 34-46.

characteristics and common features of different types of underground spaces, It examines evacuation scenarios, pedestrian behavior, and evacuation analysis methods in disaster contexts, and summarizes the evacuation behavior traits across station types. Secondly, the study delves into recent advancements in evacuation experiments and simulation technologies, covering physical and simulated experiments, including core algorithms, simulation processes, and inherent limitations of mainstream simulation platforms. It also highlights the impact of spatial features on simulation experiments and identifies current research hotspots. Finally, focusing on layout and path optimization for evacuation, the paper explores related methodologies and practical applications. On this basis, it points out that existing research is predominantly centered on theoretical modeling and quantitative analysis, with a lack of field validation that limits practical effectiveness. There is also a deficiency in interdisciplinary integration, especially concerning psychological and social dynamics of crowd behavior, which constrains the effectiveness of evacuation strategies in emergency practice. Therefore, the study suggests enhancing model realism through virtual reality, big data, and artificial intelligence technologies to improve simulation accuracy; and encourages interdisciplinary collaboration among psychology, sociology, urban planning, and safety engineering to comprehensively analyze crowd evacuation behaviors in different types of underground spaces in subway stations during emergencies, thereby providing a solid theoretical foundation and practical reference for future research.

Keywords: subway station; underground space; emergency evacuation; evacuation simulation; path optimization

随着地铁枢纽站和换乘站等功能复合型站点的建设, 地铁车站地下空间的结构日益复杂。地铁车站地下空间的封闭性、层次化和人员密集性, 使其在突发情境下的疏散问题成为亟待研究的重点课题。在地铁系统的设计和运营中, 车站的疏散问题关系到公共安全、出行效率和乘客的舒适体验^[1]。目前学界普遍认为地铁车站地下空间突发事件具有易发性、突发性、不确定性、公共性等特点^[2], 这些特点共同影响了事件的发展进程和应急响应的效率, 如地铁由于高密度的人流和复杂的技术环境, 容易引发各类安全事故, 这些事件往往在没有明显预警的情况下迅速发生, 且事故后果难以预测。乘客作为地铁车站地下空间的主要群体, 发生事故时, 易造成心理恐慌, 加大拥堵和拱桥现象的产生, 倘若处理不当将产生更大、更广的安全事故, 使应急响应和安全管理面临极大挑战^[2-3]。因此, 为了科学开展地铁车站地下空间疏散研究, 就不同类型地铁车站地下空间特征、疏散的潜在问题、疏散人群行为特征、疏散实验、仿真、疏散布局及路径优化等的研究进行系统综述和总结。

1 地铁车站类型及其地下空间疏散问题特征

在地铁系统中, 车站类型的多样性直接影响车站设计与疏散方案的复杂性。尤其是在高密度、高流量的城市环境中, 地铁车站地下空间的疏散问题成为公共安全与城市交通管理的关键环节。根据车站的功能、布局以及乘客流量, 地铁车站大致可以分为普通车站、换乘车站、枢纽车站等几种主要类型, 每类车站在疏散问题上的挑战和设计需求有所不同。

1.1 地铁车站类型及其特征

普通车站地下空间通常服务于单一地铁线路, 其结构较为简单, 主要承载日常通勤和出行的乘客; 虽然客流量相比换乘站或枢纽站少, 但在工作日的早晚高峰时段, 仍需处理大量的上下车乘客。换乘车站地下空间则是多条地铁线路交会而成, 客流密度大; 需要在不同线路之间换乘, 乘客流线交织且在不同层级间流动, 因此空间布局更为复杂, 设计时需要精确考虑乘客的流动路径和换乘时间。枢纽车站地下空间通常是城市交通系统的核心节点, 不仅服务地铁乘客, 还需要与公交、出租车、长途客运等其他交通方式有效衔接, 因此乘客流动方向更加多元, 车站地下空间的设计需要协调各个流线, 以避免交叉拥堵^[4]。综合交通枢纽站地下空间通常位于重要的交通节点, 承载地铁、公交、长途客运等多种交通工具的功能, 不仅客流量极为庞大, 且结构复杂、功能多样, 服务的交通系统也繁杂。在这些地铁车站地下空间中, 乘客流线的交汇和疏散问题更为复杂, 设计时必须充分考虑不同流线之间的有效衔接以及高密度客流下的疏散能力。

1.2 不同类型地铁车站地下空间疏散问题特征

对于普通车站, 由于客流量相对较小, 疏散问题较为简单, 但在高峰期或紧急情况下, 楼梯和出口区域可能发生拥堵。此外, 普通车站的出入口数量通常较少, 无法应对高密度的乘客流量, 疏散效率受到影响。换乘车站由于多条线路交会, 乘客流线错综复杂^[5]。换乘流线与疏散流线的交叉可能导致人员滞留, 乘客常难以快速定位疏散通道, 甚至可能出现方向混乱。枢纽车站作为地铁与其他交通方式交汇的关键节点, 涉及多种交通流线的交织, 存在明显的短时集中效应, 其

建设规模庞大,疏散时面临的路径选择也更为复杂,且由于不同交通方式的客流相互干扰、人员决策困难等问题极大影响整体的疏散时间。综合交通枢纽站因结构多层化、功能复合化,其空间规模往往更为庞大,且跨区域携带行李的旅客较多。疏散时,应急通道内多方人流交会,换乘通道、垂直楼梯等交通设施在大客流冲击下,难以承载瞬时激增的疏散压力,拥堵风险大幅攀升。如何平衡不同交通工具乘客的疏散需求,确保快速疏散,是亟待解决的难题。

1.3 地铁车站地下空间疏散的共性问题

尽管不同类型的车站 in 功能和客流量上有所区别,但它们在疏散设计和实际操作中常常面临一些共性挑战。这些问题主要体现在乘客流线设计、疏散通道配置、应急响应机制等方面^[6]。首先,高峰期的客流量急剧增加,乘客流线交叉混乱,导致疏散压力增大。其次,疏散通道设计上的不足,常常在应急情况下成为疏散瓶颈,影响乘客的快速流动^[7]。此外,车站内公共空间的应急响应和引导系统缺乏有效且统一的标准,以及实时信息传递和有效的疏散指引,乘客在紧急情况下容易迷失方向^[8]。最后,设计与运营阶段的脱节也是地铁车站地下空间疏散问题的共性挑战,设计阶段未能充分考虑实际运营中的疏散需求,导致在紧急情况下的疏散应急预案不足。综合来看,现阶段地铁车站地下空间的疏散问题主要体现在设计、运营、技术、管理等多个方面,通过优化空间布局、增加疏散通道、完善引导系统和设备配置等措施,提高疏散效率,确保乘客在突发事件中的安全。

既有研究在开展疏散体系效率提升研究时,不仅从时间角度进行考虑,还根据站内空间形态特征、疏散路径的复杂程度、可能拥挤程度、路径的安全性等特点进行综合考量^[9],而空间的几何形状及平面布局等方面呈现出的形态,关乎行人逃生路径的疏散效率^[10]。目前国内外学者针对地铁车站地下空间的研究主要包含个体及群体行人的行为特征、疏散实验、疏散仿真平台、疏散布局及路径优化5方面,基于此本文将对既有文献的研究成果进行系统梳理、总结与分析,探讨目前研究存在的问题与不足,为从事本领域的研究人员提供参考借鉴。

2 地铁车站地下空间疏散行为

2.1 疏散场景与疏散分析方法

2.1.1 问卷调查

问卷调查是收集疏散行为数据的一种常用方法,

研究者可以详细了解乘客在不同紧急情况下的疏散倾向、行为动机以及对疏散指示的响应等。问卷通常包括基本人口信息、历史疏散经验、对安全措施的认识,以及在特定疏散场景下可能采取的行动^[11]。此外,问卷调查可以结合实地模拟演练,对比实际观察数据与自报数据的差异,以提高研究的准确性和深度^[12]。如张洪杰等^[13]基于问卷调查的结果构建地铁乘客帮助行为结构方程模型,分析人员各类特性与帮助行为的作用关系;PAN等^[14]基于问卷调查的结果总结出乘客的疏散效率受自身行为特征的影响。但这种分析方法也存在一定局限性,受试者在理性状态下的选择与真实疏散环境中受恐慌心理影响的选择存在差异。詹新等^[12]通过对同一批次的受试者在疏散前后进行两次问卷,其结果表明突发事件下受试者理性选择的比例下降了32%。

2.1.2 计算机模拟实验

基于车站的结构布局、出口位置等信息,并结合人员行为的基本假设和规则,可在计算机环境中实现人员疏散过程的动态模拟,且数据输出简单、直观^[15]。目前计算机模拟主要有宏观和微观模型,宏观模型将空间内部人员假设为一个整体,综合考虑人群特性变化、密度和速度并取平均,便于理清突发事件下影响行人疏散效率的具体因素,但不能描述个体及群体行为^[16],微观模型虽然计算量相对较大,但模型从个体行为特征出发,能够描述行人多因素影响下的运动模式,更符合现实疏散场景。因此,目前所做研究大多采用微观模型展开。

典型的微观模型主要有社会力模型、元胞自动机、Agent模型等以及它们的组合形式。社会力模型具备人员空间、疏散人数以及疏散速度3个基本参数^[17],能很好地反映行人间的互动和运动动机,但同时存在行人重叠问题以及缺乏行人行为特征的考虑。元胞自动机模型计算规则相对简单,能较为真实模拟复杂场景行人的疏散过程,但行人的路径选择只能沿“米”字形且缺乏对障碍物影响的考虑,自由度上有所局限^[15],模型常规运算流程如图1所示。相较于传统社会力模型和元胞自动机模型,Agent模型能够对所有个体进行单独设置,呈现出个体的完全异质性,使仿真的效果更加精准^[15]。同时,Agent模型与社会力模型结合使用,可以模仿实际场景中行人的各类行为,以及个体与障碍物或其他个体的碰撞情形^[18]。此外,原有微观模型所存在的局限性,可通过与其他模型的结合使用

以进一步强化突发事件下疏散行为特征的精准性。如YANG等^[19]将社会力模型与最小成本模型进行耦合，再现了地铁车站地下空间乘客的运动规律和路径选择行为。

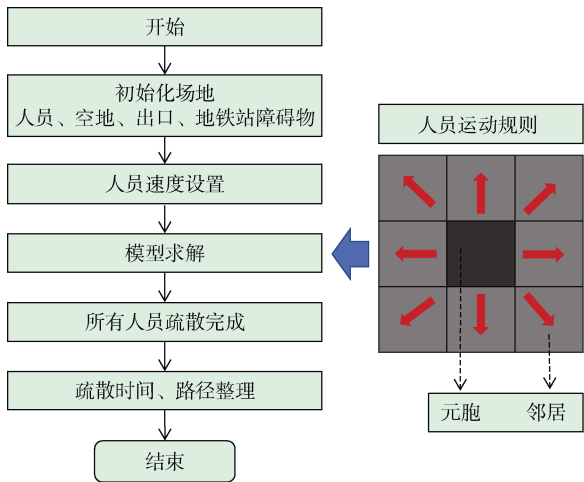


图1 元胞自动机模型求解流程
Figure 1 Solution process of cellular automata model

2.1.3 行为观察

行为观察方法通过视频监控、现场观察或演练等方式，直接记录乘客在突发事件中疏散人员的行为规律、速度、人员密度、总疏散时间，能较准确捕获行人在疏散过程中路径和出口选择的应急反应和习惯^[15]。行为观察可分为常态下和灾后，常态环境下，通过在多路径交汇处和楼梯口处进行观测，根据观测内容分析行人通行的路径选择偏好、拥堵地段以及速度变化规律^[20]，而灾后则是对实际案例保存的视频数据进行分析，获取行人灾时的应急反应。如房志明等^[21]以监控数据分析行人的疏散时间和速度等参数，发现梯段的拥堵节点对整体疏散效率影响显著。

上述三种疏散行为分析方法，在一定程度上为研究人员获取人员行为特征提供了便捷途径。其中，问卷调查适用于对灾害场景下人员的疏散行为进行预测，判断其逃生路径和突发事件中的真实想法，但由于部分回答者受到社会期望影响或对常态下的疏散行为进行设想，无法反映出真实疏散场景；计算机模拟是目前学界广为采取的研究手段，针对复杂的建筑场景，尤其对多因素耦合下的疏散行为分析具有独特优势，但其结果过度依赖输入数据的准确性和完整性，对实际场景做出过于理想化的模型假设，缺乏人群本具有的多样性和随机性，依靠有限的难以准确描述；行为观察分析方法可直接观察并记录人员在演练或紧

急事件中的行为，获取最真实的疏散行为数据，对于总结行人一般性的行为模式和规律具有直观效果，但在复现真实事件中存在诸多限制且场景数量有限，难以涵盖所有可能，导致结果的适用性和准确性都有局限性。

2.2 疏散行为特征

受突发事件影响，地铁疏散行人在寻觅出口的过程中表现出一系列典型性和规律性的行为特征，这些特征将会对个人以及整个疏散群体的疏散效率造成影响。学者们总结出地铁车站地下空间突发事件行人的基本行为特征主要有从众行为^[22-23]、折返行为^[24]、路径及出口选择行为^[25-26]、帮助行为^[13]等(见表1)。相关行为的驱动因素可归结为心理恐慌，且在一定程度上，心理恐慌还可能引发如推搡等其他极端行为^[27]。此外，在突发事件下疏散行人急于逃离危险源，因而常伴随着拥挤和踩踏现象的发生，这一现象若没有得到有效疏导易发生拱形效应和瓶颈现象使出口发生堵塞^[28]。

表1 典型疏散行为特征

Table 1 Characteristics of typical evacuation behaviors			
类型	特点	类型	特点
从众行为	自身失去判断能力，选择与多数人一致的逃生路径 ^[22]	折返行为	因顾及财物或同伴疏散途中，进而反向疏散 ^[24]
路径选择行为	考虑疏散时间最短的原则，经过决策选择路径最短的道路逃离险区 ^[25]	出口选择行为	当险区所在空间设有多个出口，将根据出口的远近进行选择 ^[26]
帮助行为	疏散时社会性强的行人则会对如老人、伤残人士等受困行人提供帮助，有利于整体疏散 ^[13]	小群体行为	趋向于靠近群体伙伴而非立即离开事件源，易成为其他个体疏散的“障碍” ^[29]

地铁车站地下空间的疏散行为是多样且复杂的，主要受突发事件的影响及个体或群体心理状态驱动^[30]。现有研究通过问卷调查、行为观察、计算机模拟等方法能深入分析地铁车站地下空间的疏散行为，但均有其优点和部分局限^[31]。问卷调查能够提供乘客在理性状态下的预期行为，但往往与实际疏散行为存在差异，特别是在高压恐慌情况下；行为观察实验的参数设定和场景复现仍难以完全贴合现实情况；计算机模拟实验则提供了更接近实际的疏散数据，但模型参数的精准度还应当在今后的研究中不断优化与改进，如引入决策行为、互动行为、恐慌心理等多种参数。

3 地铁车站地下空间疏散实验

3.1 实体实验

实体实验是在实际地铁站或类似环境中进行，通

过邀请不同受试者参与演练进行疏散任务, 获得的结果相比问卷调查的分析方法更加真实可靠, 同时较能反映乘客在实际环境中的出口和路径选择, 实验流程如图 2 所示。如王一等^[32], 探究在能见度较低场景下地下公共建筑中个体及小群体在上行楼梯时的疏散特征, 发现低能见度下楼梯段速度受影响程度相对平台更大; YOON^[33]等邀请不同类型乘客参加突发事件下的疏散实验, 以探讨疏散行为受各类因素的影响程度及其与疏散效率的关系; JEON^[34]研究出口标志和疏散效率之间的相关性, 实验采用半透明眼罩模拟火灾中的烟雾环境, 结果表明出口标志周围空间条件的变化影响被测试者的疏散速度。

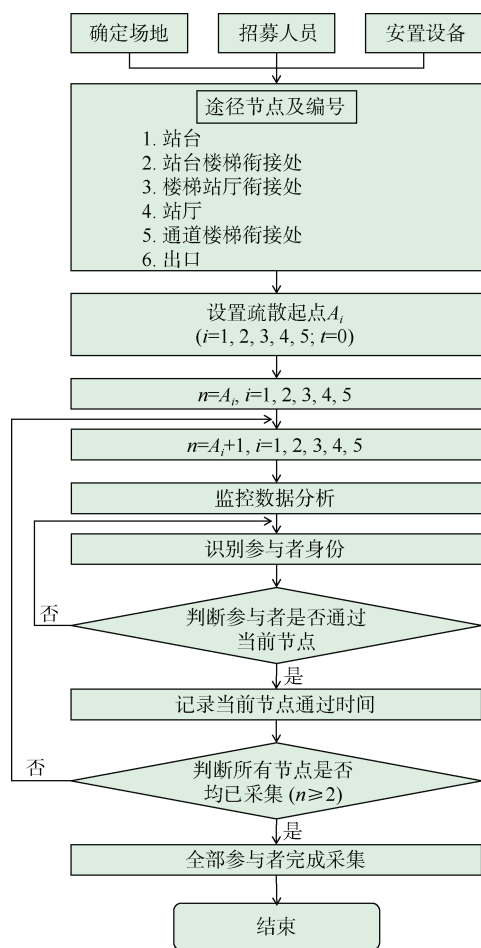


图 2 地铁站地下空间实体疏散实验流程

Figure 2 Process of physical evacuation in underground space of subway station

3.2 模拟地铁站地下空间环境的疏散实验

模拟地铁站地下空间环境的疏散实验是在地下停车场或其他开放空间对地铁站地下空间真实场景进行仿造, 控制环境中重现地铁站地下空间的特定

部分, 并增设障碍物、引导标识等设施, 也有采用室内虚拟现实仿真技术^[35], 设计通常包括场景构建和行为脚本编写以模拟多种紧急情况的人员反应和疏散动态, 使其有效模拟地铁车站地下空间的疏散过程, 实验流程如图 3 所示。如徐建等^[36]通过跑步机加虚拟眼镜的方式模拟地铁车站地下空间的真实环境, 研究揭示了视觉感知与空间行为的关系。CHEN 等^[37]运用 VR 和眼动追踪(ET)技术, 探究疏散标识的颜色对行人疏散效率的影响, 发现在疏散逃生绩效、眼动指标和生理指标三方面“红-黑”组合的标识配色均表现出最佳的引导效果。LIN^[35]等为分析空间知识完整性和人群流动模式如何影响疏散行为, 基于 HTC Vive 头戴式显示器模拟北京某地铁站的 3D 场景, 研究发现空间知识的完整性关乎行人疏散路径的选择倾向。

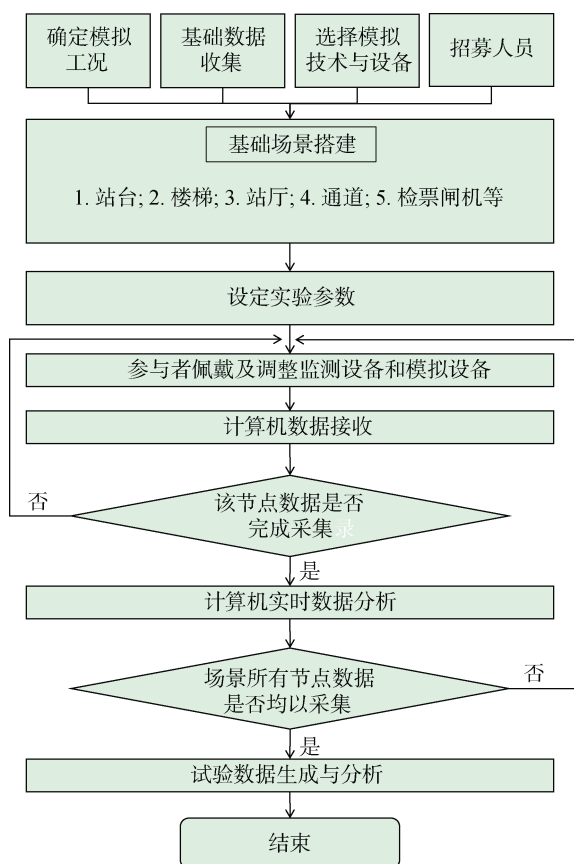


图 3 地铁站地下空间模拟疏散实验流程

Figure 3 Process of simulated evacuation experiments in underground spaces of subway stations

地铁站地下空间的狭小和曲折特性, 以及复杂的站台、换乘通道、楼扶梯等设施, 要求实验能够还原这一结构特点。实体实验能够直接观察和记录乘客在真实环境中的反应, 但由于地铁站地下空间的复

杂性和人流密集性，这些动态环境在实验中往往难以复现^[35]。而虚拟现实(VR)和计算机模拟等技术用于疏散研究，能够更为真实地构建地铁车站的结构和流线，成为补充传统实体实验的重要手段。其局限在于，还原车站规模感和复杂环境时，模拟的准确性受到计算机模型和输入数据的限制，且由于缺乏真正的“物理”限制和紧急情况下的心理反应，难以呈现地铁车站地下空间的尺度感和疏散人员的真实行为模式。因此，将虚拟现实技术与实体实验结合，并使用虚拟眼镜模拟现场环境、利用跑步机模拟行人运动等复杂技术，成为提高实验的真实性和可靠性的重要举措。

4 地铁车站地下空间疏散仿真

4.1 仿真疏散平台

计算机仿真疏散平台作为疏散相关研究的典型手段，在地铁车站地下空间疏散研究中具有诸多优势，对于复杂的地铁车站地下空间结构能够做到精准还原^[38]。目前常用的疏散平台多由国外公司所研发，虽然近几年我国部分研究团队自主参与部分仿真软件设计，但在功能、适用场景、运算结果方面与国外还有一定差

距，未能得到广泛应用^[39]。

目前常用的疏散平台主要有 Steps、Legion、AnyLogic、Pathfinder 等(见表 2)。Steps 算法以元胞自动机模型为核心^[39]，支持常态与应急疏散两种模式，可通过 CAD 文件快速建模。该模型允许自由设定人员参数，能实现最短路径规划与动态避障^[40]。然而，模型通过网格划分空间的方式虽降低了计算复杂度，却难以精确还原复杂不规则建筑结构。Legion 算法基于元胞自动机模型构建，由 Model Builder、Simulator、Analyser 三大模块组成，可对建筑空间利用率、人员流量、疏散方案等核心指标进行系统性评估^[28]，仿真流程见图 4。该平台能够精准模拟行人疏散运动特征，通过引入个体间及与障碍物的相互作用机制，真实还原复杂场景下的人员动态行为^[41]。但在应用中这两款软件行人的运动方向受限，对复杂场景的模拟精度还不够高，因此并未被广泛采用。在地铁站疏散研究领域，AnyLogic 仿真平台的运用较为成熟，其算法核心基于社会力模型，兼具对离散、连续及混合系统的建模仿真能力^[42]，可通过 Java 编程灵活设置场景与行人参数，精准还原疏散场地细节^[38]，仿真流程见图 5。其二次开发功能

表 2 地铁车站地下空间典型疏散仿真平台

Table 2 Typical evacuation simulation platforms for underground spaces e in subway stations

平台名称	算法核心	拓展性	优势	缺陷
AnyLogic	社会力模型	支持计算机辅助设计和 java 编程；可修改场景和行人参数；支持二次开发；支持混合仿真	支持多种建模范式及混合；内置丰富素材库，可构建复杂的仿真场景，适用于路径优化、疏散、物流运输等领域；可搭配云计算和人工智能	模型资源消耗大，可视化单一
Pathfinder	智能体模型	支持 CAD、Revit 等二维、三维图形导入；支持二次开发；支持混合仿真	能精确模拟疏散时人员的连续运动；可定制行人外观和个人属性；仿真模式可选择；可视化效果出色	人员行为假设存在局限性
Steps	元胞自动机	支持 CAD 场景文件导入	能精准模拟人群在正常或紧急状态下的行为；具备丰富的场景适配能力；支持三维动态演示	人员行为设置部分脱离实际，不支持二次开发和混合仿真
Legion	元胞自动机	支持 CAD 场景文件读取，支持混合仿真	多核心模块还原人员疏散的可视化全过程；平台提供多种分析功能；擅长处理多模式交互	三维可视化与细节表现不足、不支持二次开发

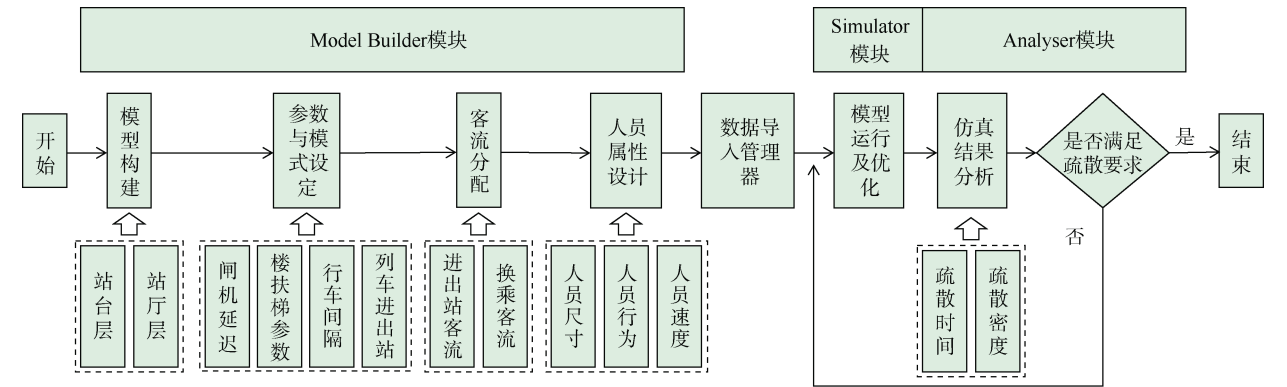


图 4 Legion 疏散仿真流程

Figure 4 Legion evacuation simulation process

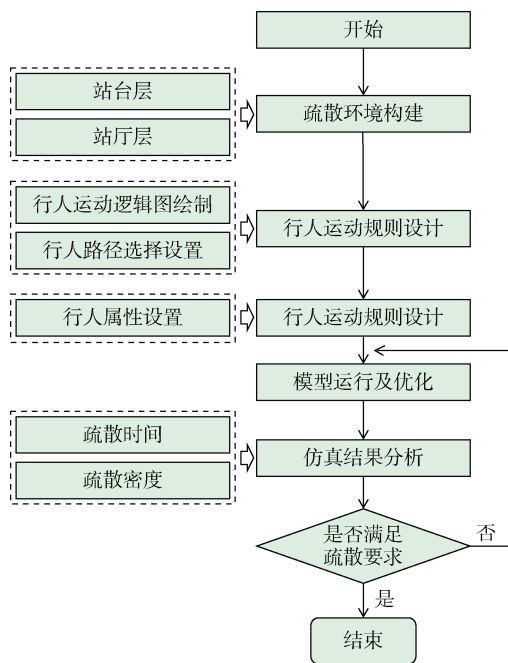


图5 AnyLogic 疏散仿真流程

Figure 5 AnyLogic evacuation simulation process

支持与计算机语言编写的算法协同工作,极大提升了模型的扩展性,但对于大规模空间的建立行人逻辑过于复杂,且不支持其他3D模型导入,限制了复杂场景的应用。Pathfinder算法核心基于智能体模型,平台自身提供了SFPE和Steering两种运动模式^[28],行人的各项参数和行为均可单独设置,仿真流程见图6。相对AnyLogic,该平台自带丰富的建模功能^[41,43],同时支持BIM三维模型导入,提升了平台的建模效率^[44]。因此,以该平台为支撑的相关研究较多。

4.2 仿真疏散典型工况

工况的选择与设计对应实际可能发生的疏散场景,包括平时与应急两种状态。为此,不少学者在设定研究工况时提出“平急两用”理念,常态下人员流动管理经验可以为灾害时的紧急疏散提供基础,而灾时的疏散要求也能反哺平时的设施优化。

常态高峰客流下,其核心目标是保障效率与秩序,通过合理组织交通流线,避免人员集中拥堵。因此有不少学者通过调整闸机开放数量、优化站台候车区划分等工况设计,以缩短客流高峰期的停滞时间^[9]。同时,高峰期地铁车站地下空间的人员数量也是研究焦点,部分学者通过不同的行为和年龄差异的人群验证地铁站的通行能力,也有学者依据地铁站安全疏散规范,在6 min的时间阈值下,判断地铁站在高峰期内所能容纳的最高人流量。而突发灾害时的工况设计

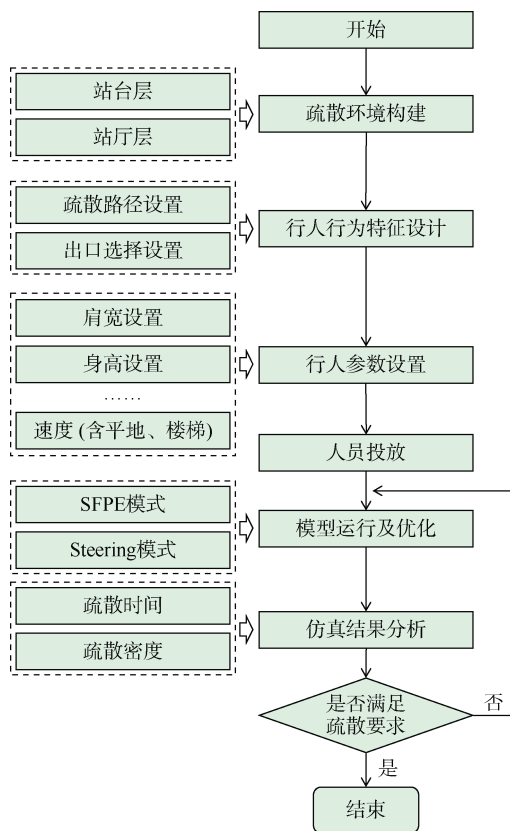


图6 Pathfinder 疏散仿真流程

Figure 6 Pathfinder evacuation simulation flow

相对复杂,既要兼顾常态下的通行需求,也要满足应急时的要求,让同一方案能适应两种截然不同的场景。灾时应急疏散的核心目标是为了让人员能够以时间更短通行更安全地通往出口。然而,灾害的发展具有多样性和不可预测性,且地铁车站地下空间内人流密度和特征在不同时间段也存在差异^[45],因此更加考验实验人员的工况设计。既有研究为验证地铁站突发事件下的疏散能力,通过对路径及出口使用条件限制^[45-46]、起火点的位置^[47]、人流密度^[48]、特殊灾种等不同工况判断地铁车站地下空间疏散效果。如李丹辰等^[49]对地铁车站地下空间站台层进行不同垂直交通设施的失效状态进行仿真模拟,其结果表明出入口故障为影响人员疏散效率的关键。此外,不同的灾害环境下人员的疏散行为也有所差异,因此基准工况的创建也不尽相同,学者们通过对地铁车站地下空间涉及灾种进行精细化建模,以进一步还原真实疏散环境,从而制定相应的应急疏散优化策略(见表3)。

4.3 仿真疏散热点

地铁车站地下空间研究的切入点在不断变化和深入,如何提高仿真模型的准确性和可靠性成为探讨的

表 3 不同灾害场景模型特征

Table 3 Model characteristics of different disaster scenarios

灾种	作者	年份	研究对象	模型方法	模型的灾害特征
火灾	张立茂等 ^[50]	2018	车站综合体	FDS 与 Pathfinder 仿真平台结合	设定三种不同火源位置,对疏散人员数量和火源功率进行多次调整
洪水	周天忠等 ^[51]	2023	车站综合体	Volume of Fluid 模型	设定洪水随时间的侵袭高度
洪水	CAO Shuchao 等 ^[52]	2024	车站站台层	扩展的元胞自动机模型和 Floor Field 模型结合	量化了水深、流速和流向对地铁站行人移动和行为特征的影响
地震	XU Hui 等 ^[53]	2024	车站综合体	Pathfinder 仿真平台	纳入地震引发的障碍物对路径的阻碍效应,考虑人员受伤对疏散行为的影响
毒气泄漏	FENG Jianrui 等 ^[7]	2021	车站综合体	Fluent 软件与 Pathfinder 仿真平台结合	设置不同泄漏源位置,模拟通风系统对毒气扩散的影响
毒气泄漏	隋杰等 ^[54]	2017	车站站厅层	社会力模型与高斯烟团模型结合	纳入人员吸入毒气后伤亡情况的考量

热议话题。早期的研究重点多集中于站内人流密度、疏散设施优化、疏散模拟与验证方面,如 QIN 等^[48]、周百灵等^[55]研究早晚高峰以及节假日等最不利条件下地铁车站地下空间的疏散能力;杨鑫刚等^[56]研究疏散楼梯宽度对行人通行效率的影响;许慧等^[57]基于 AnyLogic 疏散平台验证重庆两路口地铁站的应急疏散能力。随着疏散研究的推进,学者发现单纯优化物理结构和路径优化算法只能保障理想状态下的疏散。但在实际疏散过程中,由于个体行为的复杂性与不确定性,人员未必遵循既定路线行径,导致疏散效果难以达到预期。因此,针对人员行为特征的研究成为当今热点,如恐慌状态下行为特征和传播机制^[58-59]、个体之间的相互作用力^[13]对疏散速度的影响等。同时,多因素耦合作用对疏散影响的关注度近年来也在上升,如突发事件与地铁车站地下空间结构或其他次生灾害耦合,目前较多研究针对火灾^[2]、水灾^[51, 60]背景下的枢纽车站地下空间展开疏散模拟^[49]。随着研究视角的延伸,以火灾安全疏散为主要研究方向的学者开始聚焦地铁站隧道区间的突发灾害。这类研究常借助 FDS 等火灾模拟软件,探究火灾烟气的蔓延规律及通风系统的运行效能等问题。如李宇辉等^[61]将火灾仿真与人员疏散模拟相结合,分析疏散门间距及疏散通道宽度对人员疏散效率的影响,进而确定了疏散门间距与疏散平台宽度的最优参数。在应对地铁地下空间洪涝灾害的疏散研究中,智能化模型通过融合多源灾害数据与行人行为机制,实现动态路径优化与风险预判。多场耦合的元胞自动机模型作为基础框架,综合静态场(出口距离梯度)、动态水深场、流速场及物理支撑场,计算行人转移概率^[62]。为进一步提升精度,多智能体(Multi-Agent)模型引入群体异质性参数(年龄、体力、恐慌程度),结合社会力模型模拟推挤行为,

揭示了出口拥堵的自组织临界现象^[63]。其局限在于多物理场实时交互建模不足(如湍流-人群互馈机制仍需 LES 模型深化),且跨系统协同存在数据壁垒(排水系统、地铁信号网络独立运维)。此外, AI 技术在仿真疏散中的应用也是研究的热点话题,基于人工智能来实现更精准的人员行为预测和疏散路径规划的研究也慢慢兴起,如梁裕卿等^[64]提出了一个由深度 Q 学习算法与 A*算法结合的混合算法,开发出一种基于该算法的 BIM 消防疏散路径绘制与检查平台,输出结果可靠且速度快,目前已在多个正式项目中运用。

上述各平台能模拟复杂地铁站的结构和疏散行为,提高疏散中对堵塞和拥挤路段的可视化和优化能力,且在处理离散和连续系统建模方面有较高灵活性和扩展性。然而,研究有明显不足:首先,仿真技术虽理论上具有高度可控性和复现性,但模型准确性受输入数据真实性和参数设定限制,模拟结果可能与真实情况有偏差;其次,现有研究多侧重技术和模型应用,较少关注模型假设和参数的实地验证,可能导致仿真研究与实际应急疏散需求脱节,影响研究成果实际应用效果。此外,目前国内仿真平台也逐渐崭露头角,但在功能、适用性和用户友好度方面与国际成熟平台仍有差距。

5 地铁车站地下空间疏散优化

综合国内外相关文献可知,地铁车站地下空间疏散优化研究总体呈现出“模型仿真深化、空间布局精细化、路径规划智能化”的发展特征。既有研究普遍认为,在安全约束前提下实现疏散效率最优化是地铁空间防灾设计的核心目标,且空间布局与路径组织是影响疏散效率的关键变量。从研究特点来看,空间布局优化方面多聚焦于站台、站厅、通道、楼梯、扶梯

及闸机等关键节点的配置关系,通过社会力模型、智能体模型等手段揭示结构参数对疏散效率的敏感性规律,形成了较为系统的量化分析体系。路径优化研究则呈现出算法化与智能化趋势,主要采用A*、Dijkstra、遗传算法等智能规划方法,结合疏散仿真平台实现最短路径与最优路径的动态匹配,有效提升了复杂地铁枢纽内疏散路线的决策效率与安全性。此外,部分学者将仿真模型与乘客行为心理、实时监测系统相结合,推动了数据驱动型动态疏散管理的探索。

然而,既有研究仍存在显著不足。其一,仿真模型多依赖理想化参数设定,真实地铁场景中乘客的非理性行为、恐慌心理与社会互动尚难以充分反映,导致模型结果与实际疏散过程存在偏差。其二,研究多集中于单一灾害情景(如火灾或洪水),缺乏针对复合灾害与多源风险的系统性疏散策略研究。其三,疏散优化研究大多以单一车站为样本,横向比较与分类型研究不足,尚未形成适用于不同规模、结构及客流特征车站的普适性设计标准。其四,现有研究成果多停留在仿真与理论层面,缺乏与实际工程决策、应急演练体系及智能监控技术的深度融合,未能构建可落地的动态调度与实时优化机制。因此,未来研究亟须在多灾耦合背景下构建高精度仿真模型,结合BIM、GIS与AI算法开展全流程数据驱动的疏散模拟与优化,形成集预测、决策与反馈为一体的韧性化疏散体系,以实现地铁车站地下空间防灾能力的智能化与系统化提升。

6 结论

本文系统综述了地铁车站地下空间疏散问题的国内外研究现状,包括站点类型及空间特征、疏散行为、仿真技术及空间布局与疏散路径优化策略。地铁车站地下空间封闭复杂、人流密度高,乘客疏散行为受心理状态、环境条件等因素影响,尤其恐慌心理易致非理性行为,增加疏散难度。社会力模型、元胞自动机等数学模型为疏散行为研究提供了有力工具,助力研究者优化路径和策略评估。研究结论如下:

1) 科学的空间布局和合理的疏散路径设计对提升疏散效率至关重要,如调整出口位置、增宽通道、改善布局等可有效减少疏散时间,而疏散标识的优化设计与合理布置能够在疏散时有效引导疏散人员逃离险区,尤其对不熟悉场地流线的人群的疏散效率具有重大影响。

2) 既有地铁车站地下空间疏散研究虽成果颇丰,

但仍存在亟待突破的技术壁垒与理论瓶颈。首先,现有的数学模型及仿真技术在参数设定和场景还原难以完全契合复杂多变的现实环境,从而限制了模型预测的准确性与可靠性。其次,多数研究着重于理论模拟和定量分析,缺乏实际灾害情境下的实地验证,致使研究结果的实用性和推广性受限。

3) 现有研究对不同地铁站类型的空间布局差异关注较少,未能细化不同类型站点的疏散需求,难以全面适应不同地铁站类型的特殊疏散要求,影响了疏散策略的全面性和效果。

需要说明的是本研究在梳理现有研究成果时也存在一定的局限:一方面在于对地铁站案例的实地调研不足,难以诠释地铁车站地下空间疏散的复杂面貌;另一方面,囿于篇幅限制,对疏散模型的解析多停留在对模型输出结果的归纳层面,未能深入拆解不同模型在模拟突发事件时人员疏散行为的微观差异,尤其是多灾耦合层面,缺乏系统性梳理。

因此,基于现有研究及本文梳理过程中暴露的不足,未来研究应继续深化地铁车站地下空间疏散研究,引入VR、大数据分析和AI等先进技术,提高疏散仿真的准确性和可靠性,以更精确地预测人群行为和优化疏散路径。同时,加强心理学、社会学、城市规划和安全工程等多学科的交叉合作,全面考虑疏散行为的多方面因素,开发出更全面有效的疏散模型和策略。扩大实地模拟实验的规模和深度,将理论与实际应用相结合,验证疏散策略在实际环境中的效果,以期在真实突发事件中更好地保障公共安全。

参考文献

- [1] MANDAL T, RAMACHANDRA RAO K, TIWARI G. Evacuation of metro stations: a review[J]. Tunnelling and underground space technology, 2023, 140: 105304.
- [2] 董杰, 孙萍, 张鹏, 等. 青岛市地下空间开发建设: 进展与展望[J]. 华东地质, 2024, 45(3): 264-280.
DONG Jie, SUN Ping, ZHANG Peng, et al. The progress and prospects of underground space development and construction in Qingdao[J]. East China geology, 2024, 45(3): 264-280.
- [3] LIU Xinyu, LIU Hongjun, DONG Jie, et al. Land-sea integrated suitability evaluation of underground space based on Pythagorean fuzzy Bayesian network[J]. Underground space, 2025, 24: 197-215.
- [4] XIA Xiaolu, CHEN Jieyu, ZHANG Jin, et al. How the strength

- of social relationship affects pedestrian evacuation behavior: a multi-participant fire evacuation experiment in a virtual metro station[J]. *Transportation research part C: emerging technologies*, 2024, 167: 104805.
- [5] HUANG Lin, LI Wenhong, GONG Jianhua. Simulation of the emergency evacuation about social groups in a complex subway station[J]. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2024, 637: 129535.
- [6] WEI Junjie, DENG Qigen, ZHANG Lixin. Study on emergency evacuation in underground urban complexes[J]. *PLoS one*, 2022, 17(12): e0278521.
- [7] FENG Jian rui, GAI Wenmei, YAN Yabin. Emergency evacuation risk assessment and mitigation strategy for a toxic gas leak in an underground space: The case of a subway station in Guangzhou, China[J]. *Safety science*, 2021, 134: 105039.
- [8] XU Hui, TIAN Cheng, LI Yang. Emergency evacuation simulation and optimization for a complex rail transit station: a perspective of promoting transportation safety[J]. *Journal of advanced transportation*, 2020, 2020(1): 8791503.
- [9] 左松涛, 毛占利, 范传刚, 等. 基于地铁站场景的改进型 Dijkstra 算法疏散路径规划研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(5): 1624-1635.
ZUO Songtao, MAO Zhanli, FAN Chuangang, et al. Evacuation path planning based on improved Dijkstra algorithm in metro station scene[J]. *Journal of railway science and engineering*, 2023, 20(5): 1624-1635.
- [10] 朱涛, 胡建华, 陆愈实, 等. 基于 Pathfinder 的地铁站应急疏散仿真及优化[J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(S2): 987-996.
ZHU Tao, HU Jianhua, LU Yushi, et al. Simulation and optimization of subway station emergency evacuation based on pathfinder[J]. *Chinese journal of underground space and engineering*, 2023, 19(S2): 987-996.
- [11] 何理, 蒋仲安, 穆娜娜. 地铁乘客特性与疏散行为特征相关性分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(9): 94-100.
HE Li, JIANG Zhongan, MU Nana. Correlation analysis on properties and evacuation behavioral characteristics of subway passengers[J]. *Journal of safety science and technology*, 2015, 11(9): 94-100.
- [12] 詹新, 饶平, 朱孔金, 等. 疏散试验前后高校学生疏散行为与心理特征对比分析[J]. *安全与环境学报*, 2011, 11(5): 255-258.
ZHAN Xin, RAO Ping, ZHU Kongjin, et al. Comparative investigation of evacuation behavior and psycho-analysis of the college students before and after evacuation test[J]. *Journal of safety and environment*, 2011, 11(5): 255-258.
- [13] 张洪杰, 王慧敏, 聂俊杰, 等. 地铁乘客疏散帮助行为及其影响因素的 SEM 模型[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(4): 147-153.
ZHANG Hongjie, WANG Huimin, NIE Junjie, et al. Structural equation model (SEM) of passengers helping behavior and its influencing factors in metro evacuation[J]. *Journal of safety science and technology*, 2023, 19(4): 147-153.
- [14] PAN Fuquan, ZHANG Lixia, QI Rongjie, et al. Analysis of psychologies and behaviors of subway crowds under special events based on survey[J]. *Journal of transportation safety & security*, 2021, 13(4): 460-475.
- [15] 钟光淳, 翟国方, 葛懿夫. 突发灾害事件情境下人群疏散研究进展[J]. *灾害学*, 2021, 36(4): 221-227.
ZHONG Guangchun, ZHAI Guofang, GE Yifu. Research progress and prospects of crowd evacuation under sudden disasters[J]. *Journal of catastrophology*, 2021, 36(4): 221-227.
- [16] 曹自强, 赛斌, 吕欣. 行人跟踪算法及应用综述[J]. *物理学报*, 2020, 69(8): 41-58.
CAO Ziqiang, SAI Bin, LU Xin. Review of pedestrian tracking: algorithms and applications[J]. *Acta physica sinica*, 2020, 69(8): 41-58.
- [17] 王勇, 张锦彬, 朱军, 等. 基于改进社会力模型的地铁站火灾应急疏散 VR 模拟方法[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(5): 194-201.
WANG Yong, ZHANG Jinbin, ZHU Jun, et al. VR simulation method for emergency evacuation in subway station fire based on improved social force model[J]. *Journal of safety science and technology*, 2023, 19(5): 194-201.
- [18] 张鑫龙, 陈秀万, 李怀瑜, 等. 一种改进元胞自动机的人员疏散模型[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(9): 1330-1336.
ZHANG Xinlong, CHEN Xiuwan, LI Huaiyu, et al. An improved cellular automata model for simulating pedestrian evacuation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(9): 1330-1336.
- [19] YANG Xiaoxia, ZHANG Rui, PAN Fuquan, et al. Stochastic user equilibrium path planning for crowd evacuation at subway station based on social force model[J]. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2022, 594: 127033.
- [20] YANG Lizhong, RAO Ping, ZHU Kongjin, et al. Observation study of pedestrian flow on staircases with different dimensions under normal and emergency conditions[J]. *Safety science*, 2012, 50(5): 1173-1179.
- [21] 房志明, 许清风, 宋伟宁, 等. 超高层建筑人员步行疏散试验研究[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(3): 185-190.
FANG Zhiming, XU Qingfeng, SONG Weining, et al.

- Experiment study on super high-rise building evacuation[J]. China safety science journal, 2018, 28(3): 185-190.
- [22] CHEN Y X, SONG Y H, HUO F Z. Simulation of crowd evacuation behaviours at subway stations under panic emotion[J]. International journal of simulation modelling, 2023, 22(4): 667-678.
- [23] 杜鹏飞, 刘晓斐, 刘贞堂, 等. 基于元胞自动机的极端降雨下地铁疏散模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(12): 5-11.
DU Pengfei, LIU Xiaofei, LIU Zhentang, et al. Simulation of subway evacuation under extreme rainfall based on cellular automata[J]. Journal of safety science and technology, 2022, 18(12): 5-11.
- [24] 聂子睿, 丁元春. 灾难认知视角下火灾中人员非适应性疏散行为预测[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(4): 136-142.
NIE Zirui, DING Yuanchun. Prediction on non-adaptive evacuation behavior of personnel in fire from perspective of disaster cognition[J]. Journal of safety science and technology, 2024, 20(4): 136-142.
- [25] 姚加林, 龙舜. 基于元胞自动机的地铁车站行人疏散仿真[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(11): 2897-2902.
YAO Jialin, LONG Shun. Pedestrian evacuation simulation in metro station based on cellular automata[J]. Journal of railway science and engineering, 2019, 16(11): 2897-2902.
- [26] ZHANG Rui, YANG Xiaoxia, ZHOU Meiqi, et al. Stair/escalator/elevator selection behavior of passengers in subway stations based on the fuzzy logic theory[J]. Simulation, 2023, 99(7): 755-772.
- [27] 李天贝, 肖梅玲, 徐子祺, 等. 基于社会力模型的教室内地震疏散仿真[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(3): 281-286.
LI Tianbei, XIAO Meiling, XU Ziqi, et al. Earthquake evacuation simulation in a classroom based on social force model[J]. Science technology and engineering, 2019, 19(3): 281-286.
- [28] KALLIANIOTIS A, PAPAKONSTANTINO D, ARVELAKI V, et al. Evaluation of evacuation methods in underground metro stations[J]. International journal of disaster risk reduction, 2018, 31: 526-534.
- [29] 郑霞忠, 向蕾蕾, 陈艳. 小群体行为作用下的地铁站疏散模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(11): 127-132.
ZHENG Xiazhong, XIANG Leilei, CHEN Yan. Study on evacuation model of subway station considering small group behavior[J]. Journal of safety science and technology, 2018, 14(11): 127-132.
- [30] SHIWAKOTI N, TAY R, STASINOPOULOS P, et al. Likely behaviours of passengers under emergency evacuation in train station[J]. Safety science, 2017, 91: 40-48.
- [31] HUANG Ping, CHEN Ming, CHEN Kexin, et al. Study on an emergency evacuation model considering information transfer and rerouting: Taking a simplified H-shape metro station hall as an example[J]. Tunnelling and underground space technology, 2022, 124: 104485.
- [32] 王一, 叶锐, 朱曼, 等. 能见度降低条件下楼梯上行疏散实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(3): 183-188.
WANG Yi, YE Rui, ZHU Man, et al. Experimental study on upward evacuation of stairs in reduced visibility conditions[J]. Journal of safety science and technology, 2023, 19(3): 183-188.
- [33] YOON S H, LEE M J, YEE J J. An experimental study on evacuation times in a subway station using evacuation parameters[J]. Journal of Asian architecture and building engineering, 2013, 12(1): 93-100.
- [34] JEON G Y, NA W J, HONG W H, et al. Influence of design and installation of emergency exit signs on evacuation speed[J]. Journal of Asian architecture and building engineering, 2019, 18(2): 104-111.
- [35] LIN Jing, CAO Lijun, LI Nan. How the completeness of spatial knowledge influences the evacuation behavior of passengers in metro stations: a VR-based experimental study[J]. Automation in construction, 2020, 113: 103136.
- [36] 徐建, 朱小雷, 王朔. 基于现场眼动实测及虚拟场景的地铁站路径选择实验: 以三个广州地铁站为例[J]. 新建筑, 2019(4): 26-32.
XU Jian, ZHU Xiaolei, WANG Shuo. An experimental study on route choice of metro station based on field measurement of eye movement and virtual scene: case studies of three metro stations in Guangzhou[J]. New architecture, 2019(4): 26-32.
- [37] CHEN Na, ZHAO Ming, GAO Kun, et al. The physiological experimental study on the effect of different color of safety signs on a virtual subway fire escape-an exploratory case study of Zijing Mountain subway station[J]. International journal of environmental research and public health, 2020, 17(16): 5903.
- [38] 江锦成. 面向重大突发灾害事故的应急疏散研究综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1498-1518.
JIANG Jincheng. A review on emergency evacuation methods for major sudden disasters and accidents[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1498-1518.

- 1498-1518.
- [39] 林志阳, 刘正, 房志明, 等. 行人和交通疏散仿真软件研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(9): 100-110.
LIN Zhiyang, LIU Zheng, FANG Zhiming, et al. Review of pedestrian and traffic evacuation simulation software[J]. China safety science journal, 2022, 32(9): 100-110.
- [40] 谢添. 轨道交通地下深埋车站人员疏散的模拟计算分析[J]. 建筑与文化, 2016(11): 108-111.
XIE Tian. Simulation analysis of personnel evacuation in deeply buried metro stations[J]. Architecture & culture, 2016(11): 108-111.
- [41] 杜长宝, 朱国庆, 李俊毅. 疏散模拟软件 STEPS 与 Pathfinder 对比研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(4): 456-460.
DU Changbao, ZHU Guoqing, LI Junyi. Comparative study on evacuation simulation software STEPS and Pathfinder[J]. Fire science and technology, 2015, 34(4): 456-460.
- [42] 谭家磊, 刘海力, 陈云飞, 等. 基于 Anylogic 的某高铁客运站人群疏散设施优化研究[J]. 安全, 2021, 42(8): 13-19.
TAN Jialei, LIU Haili, CHEN Yunfei, et al. Research on crowd evacuation facilities improving of a high-speed railway passenger station based on anylogic simulation[J]. Safety & security, 2021, 42(8): 13-19.
- [43] 耿康顺, 张晓涛. 基于室内定位的地下商业综合体疏散引导策略研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 7-13.
GENG Kangshun, ZHANG Xiaotao. Study on guiding strategy in evacuation of underground commercial complex based on indoor positioning[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2020, 16(1): 7-13.
- [44] EDRISI A, LAHOORPOOR B, LOVREGGIO R. Simulating metro station evacuation using three agent-based exit choice models[J]. Case studies on transport policy, 2021, 9(3): 1261-1272.
- [45] 刘朝峰, 许强, 齐钦, 等. 高层住宅建筑火灾应急疏散模拟与策略研究[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 174-181.
LIU Chaofeng, XU Qiang, QI Qin, et al. Study on simulation and strategy of fire emergency evacuation in high-rise residential buildings[J]. Journal of catastrophology, 2022, 37(2): 174-181.
- [46] WEI Xiaoge, LOU Zhen, SONG Huaitao, et al. Exploring the impacts of exit structures on evacuation efficiency[J]. Fire, 2023, 6(12): 462.
- [47] 吴佳梦, 朱顺兵, 郝雪彤, 等. 地铁换乘站高峰期火灾及人员疏散模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(6): 875-879.
WU Jiameng, ZHU Shunbing, HAO Xuotong, et al. Research on fire and evacuation simulation of subway transfer station during peak period[J]. Fire science and technology, 2021, 40(6): 875-879.
- [48] QIN Jiawen, LIU Changcheng, HUANG Que. Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinder[J]. Case studies in thermal engineering, 2020, 21: 100677.
- [49] 李丹辰, 刘畅, 周志杰, 等. 地铁四线换乘枢纽高峰客流火灾疏散模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(9): 12-19.
LI Danchen, LIU Chang, ZHOU Zhijie, et al. Study on fire evacuation simulation of peak passenger flow at four-line transfer hub metro station[J]. Journal of safety science and technology, 2019, 15(9): 12-19.
- [50] 张立茂, 吴贤国, 李博文, 等. 基于火灾模拟器和 Pathfinder 的地铁车站人员疏散[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 203-209.
ZHANG Limao, WU Xianguo, LI Bowen, et al. Fire evacuation of subway station based on fire dynamics simulator and pathfinder[J]. Science technology and engineering, 2018, 18(4): 203-209.
- [51] 周天忠, 钟有信, 林治宇, 等. 复杂地铁车站多工况洪水入侵规律与人员疏散路径分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(7): 27-35.
ZHOU Tianzhong, ZHONG Youxin, LIN Zhiyu, et al. Analysis of flood intrusion law and personnel evacuation route of complex metro station under multi-conditions[J]. Water resources and hydropower engineering, 2023, 54(7): 27-35.
- [52] CAO Shuchao, WANG Miaomiao, ZENG Guang, et al. Simulation of crowd evacuation in subway stations under flood disasters[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2024, 25(9): 11858-11867.
- [53] XU Hui, WEI Yuxi, TAN Yongtao. Optimization of emergency evacuation in complex rail transit station[J]. Journal of building engineering, 2024, 95: 110321.
- [54] 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.
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.
- [55] 周百灵, 徐亮, 毛前军. 突发性客流地铁站点的疏散设计优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(10): 189-193.
ZHOU Bailing, XU Liang, MAO Qianjun. Study on optimization of evacuation design for subway station with

- sudden passenger flow[J]. Journal of safety science and technology, 2022, 18(10): 189-193.
- [56] 杨鑫刚, 单彩虹, 陈学哲. 地铁站应急疏散数值模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(1): 250-256.
YANG Xingang, SHAN Caihong, CHEN Xuezhe. Numerical simulation study of emergency evacuation in subway stations[J]. Journal of safety and environment, 2024, 24(1): 250-256.
- [57] 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.
- [58] 李华, 范帅超, 张茹梦. 基于 AnyLogic 仿真的恐慌情景行人疏散研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(3): 356-361.
LI Hua, FAN Shuaichao, ZHANG Rumeng. Research on pedestrian evacuation in panic scenarios based on AnyLogic simulation[J]. Fire science and technology, 2024, 43(3): 356-361.
- [59] 孙金龙, 王爽, 陈文瑛. 基于人群恐慌的地铁应急疏散仿真研究[J]. 安全, 2017, 38(3): 8-11.
SUN Jinlong, WANG Shuang, CHEN Wenyong. Simulation research on subway emergency evacuation based on crowd panic[J]. Safety, 2017, 38(3): 8-11.
- [60] 黄聪, 苏栋, 杨磊, 等. 考虑洪水漫延过程的地铁车站人员疏散研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(11): 2865-2872.
HUANG Cong, SU Dong, YANG Lei, et al. Study of pedestrian evacuation in subway station considering the process of flood spreading[J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(11): 2865-2872.
- [61] 李宇辉, 费瑞振. 地铁隧道火灾烟气蔓延和人员疏散效率研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(9): 2776-2784.
LI Yuhui, FEI Ruizhen. Study on smoke spreading and evacuation efficiency in subway tunnel fire[J]. Journal of railway science and engineering, 2022, 19(9): 2776-2784.
- [62] 曹淑超, 王苗苗, 倪捷, 等. 洪涝灾害下地铁站人群运动特性及疏散建模研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(12): 4802-4810.
CAO Shuchao, WANG Miaomiao, NI Jie, et al. Research on crowd movement characteristics and evacuation modeling in subway stations under flood disaster[J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20(12): 4802-4810.
- [63] 刘曙光, 郑伟强, 周正正, 等. 极端暴雨下城市地下空间洪涝风险及灾害防控[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(2): 22-29.
LIU Shuguang, ZHENG Weiqiang, ZHOU Zhengzheng, et al. Flood risk and control in urban underground spaces with extreme rainfall[J]. Journal of Zhengzhou University (engineering science), 2023, 44(2): 22-29.
- [64] 梁裕卿, 吉久茂, 杨佳蕾, 等. 基于人工智能的 BIM 疏散设计自动化方法[J]. 图学学报, 2021, 42(2): 299-306.
LIANG Yuqing, JI Jiumao, YANG Jialei, et al. BIM evacuation design automation based on artificial intelligence[J]. Journal of graphics, 2021, 42(2): 299-306.

(编辑: 王艳菊)

(上接第18页)

- [9] 侯秀芳, 梅建萍, 左超. 2021 中国内地年城轨交通线路概况[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 12-16.
HOU Xiufang, MEI Jianping, ZUO Chao. An overview of urban rail transit lines in the Chinese mainland in 2021[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 12-16.
- [10] 侯秀芳, 梅建萍, 左超, 等. 2020 年城轨交通线路统计分析[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(3): 1-11.
HOU Xiufang, MEI Jianping, ZUO Chao, et al. Statistics and analysis of urban rail transit in 2019[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(3): 1-11.
- [11] 中国城市轨道交通协会. T/CAMET 00001-2020. 城市轨道交通分类[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.
China Association of Metros T/CAMET 00001-2020. Classification of urban rail transit[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2020.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 44413-2024. 城市轨道交通分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China GB/T44413-2024. Classification of urban rail transit[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [13] 交通运输部. JT/T 1185-2018. 城市轨道交通行车组织规则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JT/T 1185-2018 Regulations for traffic organization of urban rail transit[S]. Beijing: People's Communications Press, 2018.

(编辑: 王艳菊)