

DOI: 10.13715/j.issn.2096-644X.20250616.0001

引用格式:何叶荣,张晓娜.基于改进社会力模型的地铁站人群疏散仿真研究[J].湘潭大学学报(自然科学版),2026,48(2):117-127.

Citation: HE Yerong, ZHANG Xiaona. Simulation research on crowd evacuation in subway station based on improved social force model[J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2026, 48(2): 117-127.

基于改进社会力模型的地铁站人群疏散仿真研究*

何叶荣, 张晓娜

(安徽建筑大学 经济与管理学院, 安徽 合肥 230000)

摘要:【目的】地铁站作为城市交通枢纽,具有客流量大、空间相对封闭、出入口有限等特点,一旦发生火灾、恐怖袭击等突发事件,极易造成人员恐慌和拥堵,给应急疏散带来严峻挑战.为有效缓解地铁站的应急疏散压力,提升突发事件下的人员疏散效率.【方法】该文提出了一种优化行人出口选择策略的改进社会力模型,并基于 AnyLogic 仿真平台构建地铁站物理环境与行人流模型,对改进前后的疏散过程进行对比模拟,重点分析行人密度时空分布与整体疏散时间 2 个关键指标.【结果】仿真结果表明:改进后的模型能够有效降低行人总疏散时间,引导疏散人员在各出口实现更均衡的分布,显著缓解了出口处的拥堵排队现象,避免了因局部拥挤导致的疏散瓶颈.【结论】该研究为深入理解地铁站行人疏散动力学行为提供了新的视角,也为地铁运营管理部门制定科学有效的应急疏散预案、优化站内引导设施布局、提升整体应急响应能力提供了有效的理论依据和实践参考.

关键词: 地铁站; 人群疏散; AnyLogic 仿真; 社会力模型

中图分类号: u298

文献标志码: A

文章编号: 2096-644X(2026)02-0117-11

Simulation research on crowd evacuation in subway station based on improved social force model

HE Yerong, ZHANG Xiaona

(School of Economics and Management, Anhui jianzhu University, Hefei 230000, China)

Abstract: 【Objective】 As a hub of urban public transportation, subway stations are characterized by high passenger flow, relatively enclosed spaces, and limited entrances and exits. In the event of emergencies such as fires or terrorist attacks, these factors can easily lead to passenger panic and congestion, posing severe challenges to emergency evacuation. This study aims to effectively alleviate the pressure of emergency evacuation in subway stations and improve evacuation efficiency during such incidents. 【Method】 This paper proposes an improved social force model that optimizes the pedestrian exit selection strategy. Based on the AnyLogic simulation platform, a physical environment and pedestrian flow model of a subway station was constructed. Comparative simulations of the evacuation process were conducted before and after the model improvement, with a focus on analyzing two key indicators: the spatiotemporal distribution of pedestrian density and the overall evacuation time. 【Result】 The simulation results indicate that the improved model can effectively reduce the total pedestrian evacuation time, facilitate a more balanced distribution of evacuees among different exits, and significantly alleviate queuing and congestion at

* 收稿日期: 2025-06-16

基金项目: 安徽省自然科学基金(2108085MG241); 教育部规划基金(21YJA630027)

通信作者: 张晓娜(2001-), 女, 安徽亳州人. E-mail: m19165517898@163.com

exits, thereby avoiding evacuation bottlenecks caused by local crowding. **【Conclusion】** This study provides a new perspective for understanding the dynamic behavior of pedestrian evacuation in subway stations. It also offers a valuable theoretical basis and practical reference for subway operation management departments to formulate scientific and effective emergency evacuation plans, optimize the layout of guidance facilities within stations, and enhance overall emergency response capabilities.

Key words: subway station; crowd evacuation; AnyLogic simulation; social forces model

0 引言

随着城市化进程的加速,地铁凭借运输量大、高效等优势,成为城市交通的重要支柱。然而,地铁也面临客流量偏大、空间相对封闭、疏散通道繁杂等挑战,在疏散环节中,这些因素易引发踩踏事故。加上突发事件的不可预测性,疏散难度将会进一步增加。因此,深入开展针对地铁站内人群疏散问题的研究,对于保障城市安全具有重要意义。

目前,人群疏散的影响因素研究主要聚焦在心理因素^[1-2]、疏散环境^[3]、人群属性^[4-5]、安全疏散氛围^[6-7]等。疏散模型可根据行人运动的时空差异以及动作的持续性,划分为离散型模型和连续性模型^[8]。常见的模型有社会力模型、元胞自动机模型^[9]、流体力学模型、格子气模型和 Agent 模型^[10],其中社会力模型采用动力学微分方程描述行人疏散行为,能够最大限度地模拟行人流的绕行行为现象、自我减速机制、自组织行为现象^[11],目前已得到广泛应用。如 Cornes 等^[12]基于社会力模型,通过分析行人的焦虑程度对疏散能力的影响;Dubroca 等^[13]则是将其应用于火车站的行人运动模拟和评估中。在研究方法上,计算机仿真模拟是主要的技术手段,因此林静等^[14]和姚远等^[15]利用 AnyLogic 软件对地铁站进行多维度、多视角仿真实验,得出影响地铁站应急疏散能力的因素。

在社会力模型的改进方面,郭海湘等^[16]和毛清华等^[17]在模型中分别引入意识程度、速度调节因子来改进期望速度;Tang 等^[18]改进了社会力模型中行人与障碍物之间的作用力,以减少障碍物的迭代规模;王勇等^[19]则是探究环境作用与感知影响因子对原始模型的影响;Ren 等^[20]在模型中引入恐慌因子,以探究恐慌情绪给行人疏散造成的影响。现有研究对行人疏散过程中的心理与物理机制已有较多探讨,但较少关注动态场景中行人依据实时信息进行自适应决策的机制。尤其在多出口、高密度地铁环境中,行人如何根据实时拥堵状态做出有效出口选择,仍需深入研究。

本文在以上学者的研究基础上,借助 AnyLogic 仿真平台改进社会力模型的行人出口选择方式,并还原真实疏散场景、设计疏散评价指标,通过对行人密度和疏散时间的对比分析,探究改进后的社会力模型对人群疏散效率的影响,为优化地铁站应急疏散方案提供了重要的理论支撑。

1 改进社会力模型

社会力模型通过模拟行人自驱动力、排斥力及环境作用力,描述行人运动行为。本文针对初始模型在疏散场景中的不足,提出行人出口选择策略:初期行人选择最近出口,随着疏散压力增大,转而选择拥堵程度低的出口,以此提升整体疏散效率。

1.1 社会力模型的原理

AnyLogic 以社会力模型为底层逻辑建立行人仿真库,能够作用于系统仿真与建模,可以

精确地模拟人与人之间、人与环境之间的相互作用力。该模型认为：行人的运动是多种力共同作用的结果，如自驱动力为行人想要达到某个目标而产生的力；人际排斥力为行人之间距离过近时，会产生一种相互排斥的力，以避免碰撞；环境作用力为行人与周围障碍物（如墙壁、栏杆等）之间的相互作用，当行人靠近障碍物时，会感受到一个远离障碍物的力，以确保不会撞到障碍物。通过这些力的矢量叠加，可以计算出每个行人所受到的合力，进而确定其运动方向和速度，可用以下公式表示：

$$m_A \frac{d v_A}{dt} = \mathbf{F}_A(t) + \boldsymbol{\varepsilon},$$

$$\mathbf{F}_A(t) = \mathbf{f}_A(t) + \mathbf{f}_{AB}(t) + \mathbf{f}_{AC}(t),$$

式中： m_A 为行人的质量； v_A 为行人的期望速度； $\mathbf{F}_A(t)$ 为行人所受到的合力； $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为随机变量，代表行人的随机行为； \mathbf{f}_A 为自驱动力； \mathbf{f}_{AB} 为行人之间的吸引力和排斥力； \mathbf{f}_{AC} 为行人与障碍物之间的作用力。

1.2 社会力模型的改进过程

在初始社会力模型中，与实际情况不同的是，行人的运动通常设定为单一路径选择模式，其运动速度也为恒定值，这给疏散场景的还原带来一定的难度，因此本文提出基于改进社会力模型的行人疏散方式。

其具体思路为：当地铁发生应急事件时，处在站台层的行人需要进入到站厅层，再从各个安全出口疏散。开始疏散时，各出口的疏散压力较低，因此站厅层行人选择最近安全出口疏散方式。当疏散继续进行，各出口的疏散压力不断增加，尤其是从站台层进入站厅层的乘客，数量急剧增加，此时若再选择最近安全出口的方式，那么将会加重各出口的拥堵程度，因此选择疏散压力最小的出口进行疏散撤离最佳。

基于此，本文建立优化出口选择模型，在疏散启动阶段，站厅层中拥堵程度相对较低位置的行人，会依据自身所处位置，选择距离最近的安全出口实施撤离行动。而处于站台层的行人，在顺利进入站厅层后，会转而选择疏散压力最小的安全出口，从而完成整个疏散流程。经过改进后的模型具体表达式为：

$$\begin{cases} \exp[-k_A d_{AK}(t) k_p(t)] \eta(k_p(t)), & \text{行人 A 位于站厅层,} \\ \exp[-k_A d_{AK}(t) k_p(t)] (1 - \sigma) \eta(k_p(t)), & \text{行人 A 位于站台层,} \end{cases}$$

式中： $d_{AK}(t)$ 为行人与出口之间的空间距离； k_A 为疏散压力较小时的距离变量； $k_p(t)$ 为应急事件时行人的危机系数； $\eta(k_p(t))$ 为行人的个体环境感知能力受危机系数的影响。

2 基于 AnyLogic 的建模与仿真

本文基于 AnyLogic 平台，以合肥市南屏路地铁站为对象，构建包含物理结构、行人参数及行为逻辑的仿真环境，并设计行人密度与疏散时间等疏散能力评价指标。

2.1 构建仿真环境

本文使用 AnyLogic 8.7 版本的行人库构建地铁站的仿真环境，涵盖物理结构、行人参数及行为逻辑。依据实地数据与国家标准，设定行人性别、肩宽和分级速度参数，建立乘客的行为路径与逻辑流程，为疏散仿真提供模型基础。

2.1.1 物理建模

本文以合肥市轨道交通四号线南屏路地铁站为研究对象，该站点位于合肥市包河区南屏路与祁门路交叉口，是一种常见的地下二层岛式地铁站，共有 3 个出口。地铁站处于住宅商业密

集区, 周边有住宅、商场、学校, 具有稳定客流量、上下班和节假日期间客流量激增等特点, 具有一定的代表性和典型性. 本文使用 AnyLogic 8.7 版本的行人库, 依照 1 m 对应 10 像素的比例开展建模仿真.

通过收集现场数据, 对车站的位置进行标定, 并依据空间布局, 在 AnyLogic 仿真平台构建出地铁站的物理模型, 包括站内换乘设施(步梯、扶梯、直梯)、排队区(售票机、闸机)和行走区域, 如图 1 所示.

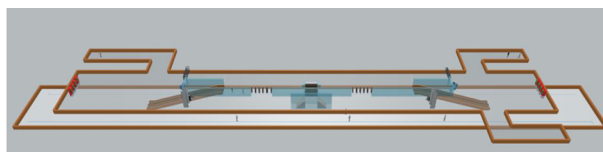


图 1 地铁站物理模型

Fig. 1 Physical model of the subway station

2.1.2 参数设定

在 AnyLogic 仿真中, 将使用统一的智能体类型代表行人, 并通过参数设置智能体行人的基本特征, 可以提高仿真结果的真实性和可靠性, 现将行人的基本参数规定如下:

1) 行人基本属性: 基于第七次全国人口普查公报(第四号)^[21], 在全国人口中, 男性人口为 723 339 956 人, 占 51.24%; 女性人口为 688 438 768 人, 占 48.76%, 其中安徽省的人口性别结构为: 男性占比 50.97%、女性占比 49.03%, 因此设定地铁 4 号线南屏路站的乘客中男、女乘客的性别观测值分别为 0.509 7 和 0.490 3.

行人的身体尺寸存在差异, 尤其是肩宽的不同, 对地铁站内行人的疏散效率具有一定程度的影响, 特别是在扶梯和进、出口闸机等易发生踩踏、拥挤的区域, 因此, 根据国家最新颁布的中国成年人人体尺寸肩最大宽统计数据^[22], 在 AnyLogic 中的 PedSource 模块, 将行人的肩宽数据进行规范设置: 男性肩宽为 44.9 cm, 女性肩宽为 40.9 cm.

2) 行人的运动速度: 在地铁的应急疏散场景中, 应急疏散时间的把控和疏散效率的提高, 高度依赖于行人的运动速度这一关键变量. 根据第七次全国人口普查公报(第五号)^[23], 安徽省人口年龄构成情况为 [0, 14] 岁人口占比 19.24%, [15, 59] 岁人口占比 61.96%, 60 岁及以上人口占比 18.79%. 考虑到地铁乘客年龄特点, 在仿真模拟中行人流的年龄设定为: 未成年人和老年群体(0~14 岁, 60 岁以上), 青壮年男性、女性(14~40 岁), 中年阶段男性、女性(40~60 岁). 如表 1 所示, 参考尹志飞^[10]在地铁仿真实验中的行人疏散行走速度统计表, 为了使得此次疏散模拟仿真实验顺利开展, 本文参照表 1 的行人运动速度统计信息, 合理设置此次仿真实验中的平均行人疏散速度如表 2 所示.

表 1 行人运动速度统计表

Tab. 1 Pedestrian movement speed statistics

类别	儿童与老人	男性青年	女性青年	男性中年	女性中年
行走速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	[1, 1.06]	[1.37, 1.51]	[1.24, 1.47]	[1.22, 1.39]	[1.16, 1.24]

表 2 行人平均运动速度统计表

Tab. 2 Statistical table of average pedestrian movement speed

类别	儿童与老人	成年男性	成年女性
行走速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.03	1.4	1.35

2.1.3 行为建模

一般情况下, 地铁站内行人的运动路径包括进站路径、出站路径两种, 进站路径: 行人从入口 A、入口 B、入口 C 进入站厅层, 完成购票后再接受地铁安检, 之后通过进站闸机, 再通过下行的直梯、步梯、扶梯进入站台层, 作候车准备. 出站路径: 行人走出列车, 通过步梯、扶梯、直梯等通道进入站厅层, 根据需求选择合适的出口, 通过闸机出站. 具体行人进出站路径如图 2 所示.

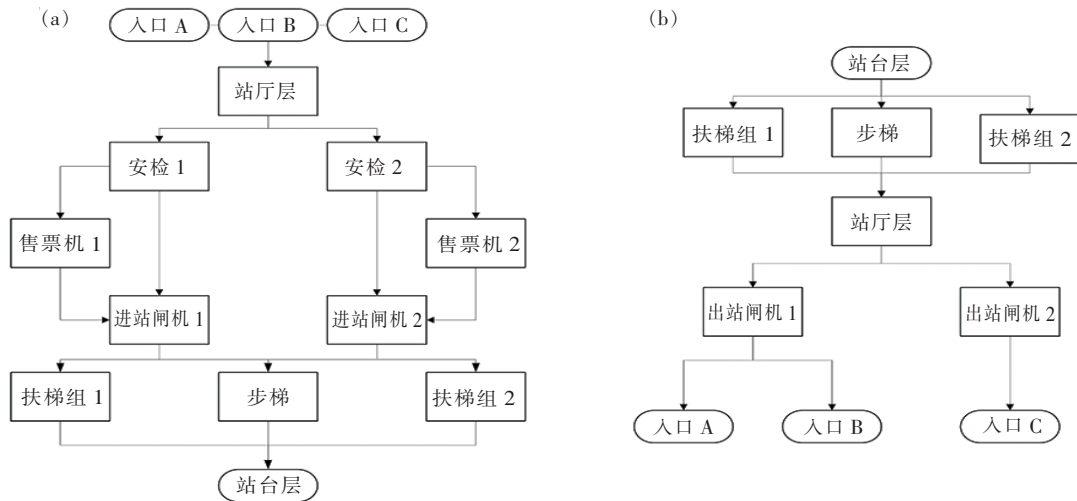


图 2 (a) 行人进站路径图; (b) 行人出站路径图

Fig. 2 (a) Pedestrian entry route diagram; (b) Pedestrian out route diagram

当地铁站内发生应急事件时, 行人按照一定的路线进行疏散, 从站台层进入到站厅层, 再选择安全出口进行撤离. 行人疏散路径如图 3 所示.

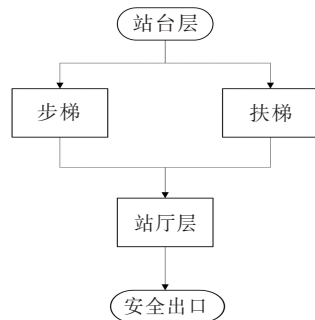


图 3 行人疏散路径图

Fig. 3 Pedestrian evacuation route map

2.1.4 逻辑建模

以行人进站流程图和行人出站流程图为基础，分析行人在进、出站时的运动路径，研究站内各类服务设施与行人运动路径之间的相互关系，依照其运行逻辑，在 AnyLogic 仿真平台中使用相关功能模块，构建地铁站行人进、出站行为逻辑，如图 4 和图 5 所示。

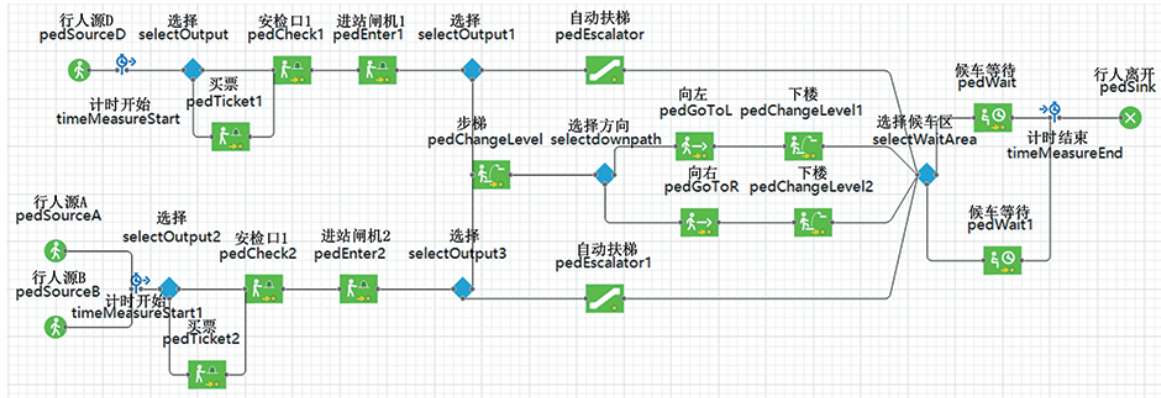


图 4 行人入站逻辑图

Fig. 4 Pedestrian inbound logic diagram

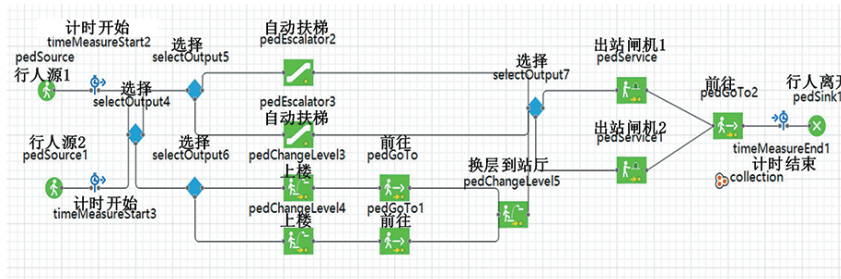


图 5 行人出站逻辑图

Fig. 5 Pedestrian outbound logic diagram

当地铁站内发生突发事件，应急疏散开始之后，位于地铁站内部的所有行人立即从当前的模块撤离，进入疏散模式，同时停止列车到站事件，切断进站客流量。疏散按钮开启后，各个流程模块按照设置好的疏散逻辑运行，直至所有行人完成疏散，疏散逻辑如图 6 所示。

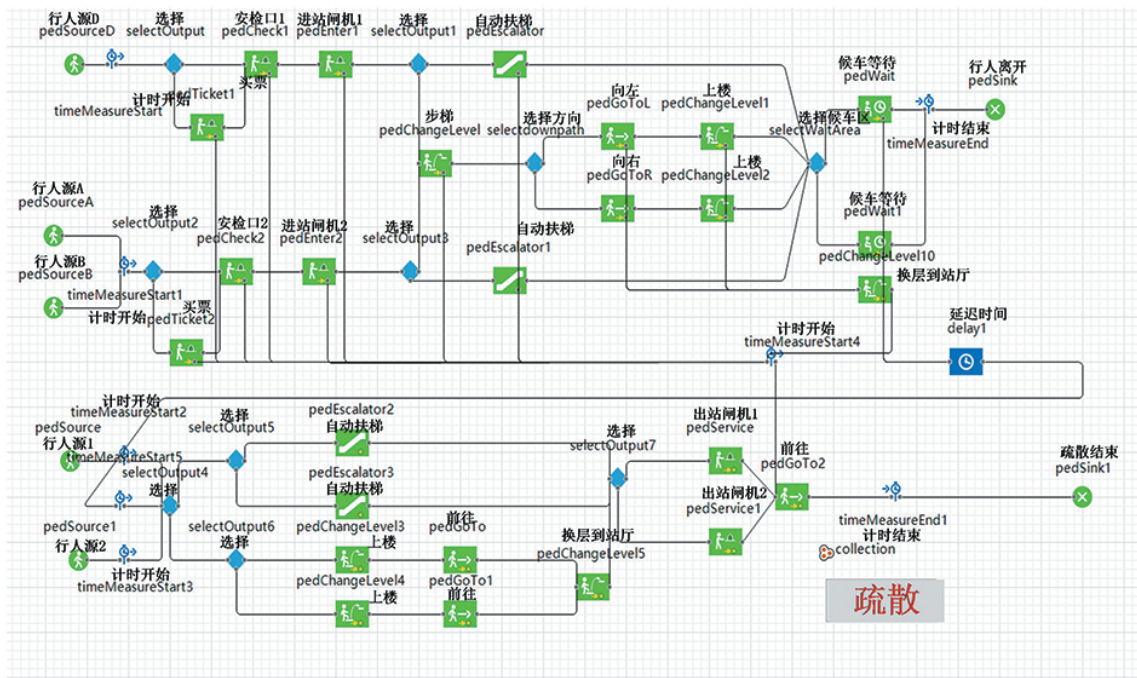


图 6 行人疏散逻辑图

Fig. 6 Pedestrian evacuation logic diagram

2.2 疏散场景设计

地铁站应急疏散的核心目标是将站内行人迅速引导至各安全出口，而影响疏散效率的重要因素包括行人与安全出口的距离，距离越短，疏散难度越低。因此初始社会力模型中的行人疏散方式为最近安全出口疏散，其模型为：

$$dis U_{AK}(t) = \exp[-k_A d_{AK}(t) k_p(t)] \eta(k_p(t)) ,$$

式中： $dis U_{AK}$ 为行人对出口的距离效用； $d_{AK}(t)$ 为行人与出口之间的空间距离； k_A 为疏散压力较小时的距离变量； $k_p(t)$ 为应急事件时行人的危机系数； $\eta(k_p(t))$ 为行人对出口的个体环境感知能力受危机系数的影响。

2.3 疏散能力评价指标设计

地铁站的行人应急疏散过程与整体执行效率，需要以明晰易辨的方式呈现。在进行疏散能力评价时，既需要识别出拥堵区域，又需要量化分析行人疏散效率，因此评价指标设计如下：

1) 行人密度 D_{ped} ：行人密度 D_{ped} 指的是地铁站内应急疏散过程中，每单位面积的行人数量 ($人 \cdot m^{-2}$)，包括站台和站厅区域，用于衡量站内的行人数量集中程度和拥挤程度，是评估疏散效率、识别瓶颈区域、优化流动设计的重要指标。行人密度通常以密度图的方式直观呈现，行人密度图各部分区域越接近红色，说明该区域的行人数量越多、密度越大、拥堵程度越高。

2) 行人疏散时间 T ：行人疏散时间 T 是评估疏散效率的关键性指标，是指在紧急疏散启动后，地铁站内所有行人在规定条件下，从疏散开始到全部撤离至安全位置所需的总时间，能够反映人员疏散过程中的流动速度与顺畅程度。实际情况下，在《地铁设计规范》(GB50157—2013)^[25]中，规定地铁站的行人疏散时间 T 不能超过 6 min，具体表达式如下：

$$T = 1 + \frac{Q_1 + Q_2}{0.9[(N-1)A_1 + BA_2]} \leq 6 \text{ min},$$

式中: Q_1 为一列地铁最多乘客流量, 单位人; Q_2 为站台最多等车乘客数量, 单位人; A_1 为每台扶梯的载客数量, 单位人 $\cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; A_2 为步梯的载客数量, 单位人 $\cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; N 为扶梯数量, 单位个; B 为步梯、扶梯的总宽度, 单位 m.

利用 AnyLogic 仿真平台, 基于改进前后的模型, 分别对地铁站的应急疏散情况进行模拟仿真, 再通过行人密度 D_{ped} 、疏散时间 T 仿真评价指标, 对比分析改进前后的疏散情况和疏散效率. 为控制其他实验变量对结果的影响, 两次仿真模拟的行人个体特征和总体规模数量均维持一致性标准.

3 仿真结果分析

对初始与改进社会力模型下的疏散过程进行仿真对比, 重点分析行人密度分布与整体疏散时间的差异. 通过在相同初始条件下比较 2 种模型的动态疏散表现, 评估优化策略的实际效果.

3.1 行人密度 D_{ped} 对比分析

在地铁站内, 行人的主要活动轨迹通常集中在进站、出站区域, 而不会遍布整个站厅. 因此, 在发生紧急疏散情况时, 假设行人在站内均匀分布并不符合实际情况. 所以在模型的构建过程中, 为了使疏散模拟更贴近现实, 首先对地铁站在正常运营状态下的客流进行仿真模拟, 待系统达到稳定状态后, 再开展紧急疏散情形下的人员疏散模拟. 在正常运营仿真过程中, 地铁站内的总客流量呈现出明显的波动趋势: 随着列车的到达, 站内人员数量显著增加, 之后逐渐减少, 直到下一班列车到来. 通过对客流变化的分析 (如图 7 所示), 在仿真开始后的 3 min 内, 站内行人数目变动趋于平稳. 因此, 选择在仿真开始后的第 4 min 启动紧急疏散模拟, 并基于此时的行人密度情况, 开始进行疏散过程. 图 8 展示了疏散开始时的行人分布情况.

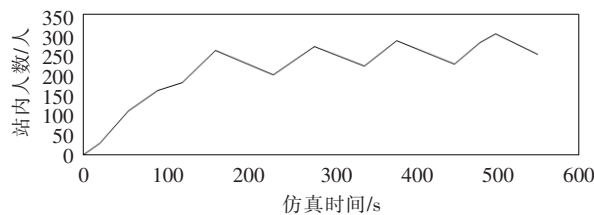


图 7 站内行人总数变化折线图

Fig. 7 Line chart of changes in the total number of pedestrians in the station

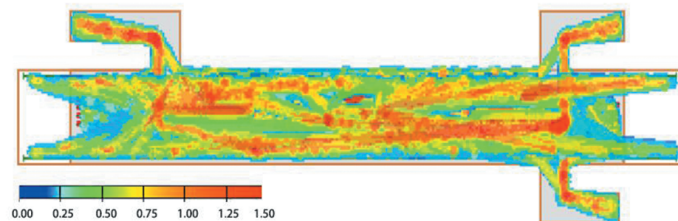


图 8 开始疏散时人群密度图

Fig. 8 Crowd density map at the start of the evacuation

3.1.1 初始社会力模型的行人疏散仿真

在疏散初期, 由于初始社会力模型只规定了行人向目标出口的移动、行人之间的相互排斥力以及障碍回避行为, 且大量的乘客都朝着最近安全出口进行疏散, 因此, 行人撤离期间会出现行人疏散路线的重叠, 导致疏散过程中形成了高度拥堵的、无序的乘客流。在疏散进行到 200 s 时, 初始社会力模型下的人群密度如图 9 所示。

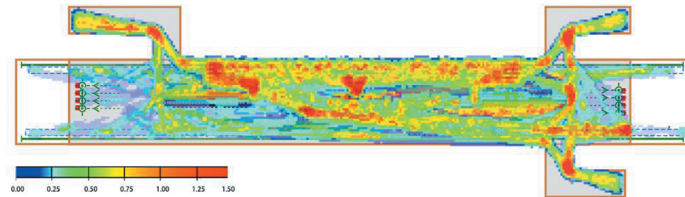


图 9 改进前模型人群密度图 (200 s)

Fig. 9 Population density map of the model before improvement (200 s)

3.1.2 改进社会力模型的行人疏散仿真

经过改进后的社会力模型, 针对出口选择策略进行了优化, 使得行人能够更快速地找到最优的疏散出口, 从而有效避免了冗长且不必要的疏散路径。改进后的模型使得乘客群体能够在区域内自然地形成单向疏散通道, 减少了在狭窄空间和高密度客流条件下的路径交叉情况。这种优化有助于避免对向行人流之间相互干扰, 确保疏散过程中的流动更加顺畅、高效。疏散进行到 200 s 行人密度如图 10 所示。

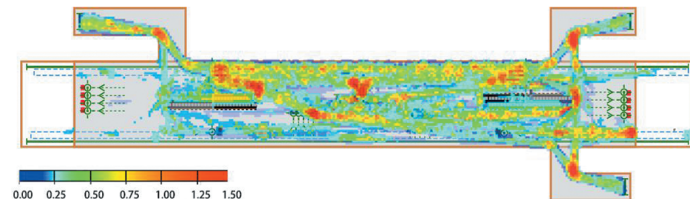


图 10 改进后模型人群密度图 (200 s)

Fig. 10 Population density of the improved model (200 s)

如图 9 和图 10 所示, 行人密度图中的红色区域表示该处的行人数量和密度较高, 且拥堵程度较大。通过对比两种模型的行人密度图, 可以明显看出, 改进后的社会力模型在相同时间和客流量条件下, 能够更有效地引导人员疏散, 显著提高了地铁站在紧急情况下的疏散效率。

3.2 疏散时间 T_{Eva} 对比分析

如图 11 所示, 分别设置不同的疏散人数, 进行多次仿真实验, 观察两种疏散方式所需的疏散时间, 在初始疏散方式下, 由于行人都是选取最近安全出口的疏散方式, 因此产生了拥堵、滞留的现象, 导致疏散时间较长, 共设置 6 次不同客流下的疏散仿真, 其平均疏散时间为 242.5 s; 改进后的疏散方式下, 行人根据实际情况, 选择最近安全出口或者拥堵程度最低出口, 一定程度上提高了疏散效率, 平均疏散时间为 234.5 s。结果表明, 通过对 2 种疏散方式的对比, 改进后的模型总体疏散时间减少了 3.29%。

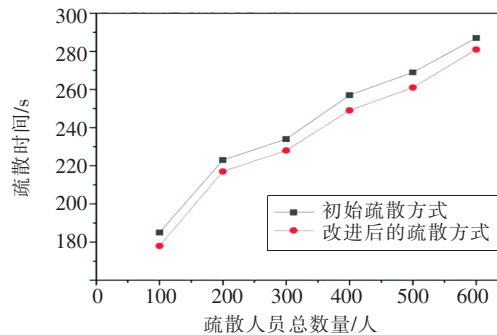


图 11 疏散时间对比图

Fig. 11 Comparison of evacuation times

4 结论

本文通过 AnyLogic 仿真软件, 在原始社会力模型的基础上, 对行人的出口选择方式进行改进和优化, 并还原真实的疏散场景、设计疏散评价指标, 通过对行人密度和疏散时间的对比分析, 得出的结论如下:

1) 在疏散过程中, 行人的出口选择方式会影响人群疏散效率, 由于最近安全出口选择策略过于单一化, 而改进后的出口选择方式则使得行人能够最有效地选择最利于逃生的出口. 基于改进后的社会力模型, 行人应急疏散效率有所提高, 其疏散时间相比于改进前降低了 3.29%, 行人在疏散过程中的分布更加合理、均匀, 疏散阻塞点的拥堵情况得到一定的改善, 证明了此改进方法的有效性, 同时也为地铁站行人的疏散策略提供了重要的思路.

2) 为了使研究结果能够更有效地指导地铁疏散效率的提升, 本文提出了以下几项建议. 为了进一步提升疏散路径的顺畅性, 首先, 地铁站应合理调整与优化指导性设施, 加强对指导性设施的管理与维护, 使乘客在判断路径时的时间消耗最小化. 其次, 还应重点优化易拥堵区域周围的导向标识, 避免所有乘客集中通过同一通道, 从而实现各个通道的均衡使用, 减少人员聚集和拥堵现象, 提升疏散效率.

参 考 文 献

- [1] 刘延东, 黄高翔, 陈文. 基于增强心理行为异质性的改进社会力模型[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(5): 1120-1130.
- [2] 王立晓, 盖筱培, 郝闲熙. 考虑行人心理异质性的地铁站应急疏散仿真研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3333-3341.
- [3] LI Y F, LIN X X, FENG X, et al. Life Safety Evacuation for Cross Interchange Subway Station fire[J]. Procedia Engineering, 2012, 45: 741-747.
- [4] SAEED RA, RECUPERO D R, REMAGNINO P. Simulating crowd behaviour combining both microscopic and macroscopic rules[J]. Information Sciences, 2022, 583: 137-158.
- [5] ZHANG X W, ZHANG P H, ZHONG M H. A dual adaptive cellular automaton model based on a composite field and pedestrian heterogeneity[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2021, 583: 126334.
- [6] 谢科范, 康丽文, 宋钰. 安全氛围对人群应急疏散行为的影响机制研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3): 145-150.

- [7] BHANDARI S, HALLOWELL M R. Influence of safety climate on risk tolerance and risk-taking behavior: A cross-cultural examination[J]. *Safety Science*, 2022, 146:105559.
- [8] 刘晓栋,王耀庆. 基于 Agent 模型的高校公寓楼人群疏散仿真研究[J]. *中国人民公安大学学报(自然科学版)*, 2023, 29 (1): 102-108.
- [9] BLUE V J, ADLER J L. Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways[J]. *Transportation Research Part B*, 2001, 35 (3): 293-312.
- [10] 尹志飞. 基于优化社会力模型的地铁站行人应急疏散仿真研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2023.
- [11] 郭海湘,卢仪帆,李旭泽,等. 基于社会力模型的煤矿井下分区域应急疏散优化研究[J]. *安全与环境工程*, 2023, 30(5):121-132,165.
- [12] CORNES F E, FRANK G A, DORSO C O. Microscopic dynamics of the evacuation phenomena in the context of the Social Force Model[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, 568:1257744.
- [13] DUBROCA-VOISIN M, KABALAN B, LEURENT F. On pedestrian traffic management in railway stations: simulation needs and model assessment[J]. *Transportation Research Procedia*, 2019, 37:3-10.
- [14] 林静,魏振宇,胡盛斌,等. 基于改进社会力模型的地铁大客流疏散能力研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(7): 207-212.
- [15] 姚远,管涛,卢树华. 基于社会力模型的地铁站人群疏散仿真研究[J]. *中国人民公安大学学报(自然科学版)*, 2021, 27 (2): 74-81.
- [16] 郭海湘,曾杨,陈卫明. 基于社会力模型的多出口室内应急疏散仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33 (3): 721-731.
- [17] 毛清华,余荣付,毛承成. 基于改进蝴蝶算法和社会力模型的多出口疏散模型研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(07): 12-18.
- [18] TANG Z H, YANG L C, HU J, et al. An improved social force model for improving pedestrian avoidance by reducing search size[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2024, 643: 129766.
- [19] 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.
- [20] REN J X, MAO Z L, GONG M L, et al. Modified social force model considering emotional contagion for crowd evacuation simulation[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 96:103902.
- [21] 国家统计局,国务院第七次全国人口普查领导小组办公室. 第七次全国人口普查公报(第四号)[N]. *中国信息报*, 2021-05-12 (002).
- [22] 全国人类工效学标准化技术委员会(SAC/TC 7). 中国成年人人体尺寸: GB/T 10000—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [23] 国家统计局,国务院第七次全国人口普查领导小组办公室. 第七次全国人口普查公报(第五号)[N]. *中国信息报*, 2021-05-12 (002).
- [24] 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, 2013.

(责任编辑:夏金玉 朱碧云)