

基于社会力模型的多支路行人应急疏散建模与策略优化研究

魏宇腾¹, 李兴莉^{2*}, 马敏敏², 朱子琳², 王田楠², 郭庆华²

¹太原科技大学应用科学学院, 山西 太原

²太原科技大学安全与应急管理工程学院, 山西 太原

收稿日期: 2025年5月11日; 录用日期: 2025年6月3日; 发布日期: 2025年6月11日

摘要

随着经济的快速发展及城镇化进程的推进, 公共场所的人群聚集现象越发普遍, 当道路为汇流结构时, 多个方向的行人汇合成一条行人流, 这会导致人群的移动效率大大降低, 不利于危险情况下的紧急逃生。本文以多支路汇流场景的行人疏散为研究对象, 模拟多支路汇流时行人的相互作用, 改进原始社会力模型中行人的期望速度, 并引入跟随力和超越力。数值模拟验证了模型的有效性, 并探讨了汇流角度、支路宽度、支路间距以及支路方位等因素对行人流的影响。研究表明: 汇流角度越大, 行人疏散效率越高; 增大支路宽度并不能明显提高整体的疏散效率; 支路间距越大, 行人的拥挤程度越小, 通过的所需时间越少; 支路在异侧时相对同侧增加了运动和汇流的复杂程度, 使得行人速度减缓, 降低了通过效率。本文研究结果为多支路汇流场景的安全疏散设计与优化提供了理论依据。

关键词

多支路汇流, 社会力模型, 跟随行为, 超越行为, 疏散效率

Research on Modeling and Strategy Optimization of Multi-Branch Pedestrian Emergency Merging Based on Social Force Model

Yuteng Wei¹, Xingli Li^{2*}, Minmin Ma², Zilin Zhu², Tiannan Wang², Qinghua Guo²

¹School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

²School of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

*通讯作者。

文章引用: 魏宇腾, 李兴莉, 马敏敏, 朱子琳, 王田楠, 郭庆华. 基于社会力模型的多支路行人应急疏散建模与策略优化研究[J]. 安防技术, 2025, 13(2): 40-55. DOI: 10.12677/jsst.2025.132005

Abstract

With the rapid economic development and urbanization process, population gathering phenomena in public spaces have become increasingly prevalent. When the road has a merging structure, pedestrians from multiple directions converge into a single pedestrian flow, which will greatly reduce the movement efficiency of the crowd and is not conducive to emergency evacuation in dangerous situations. This paper takes the pedestrian evacuation in the scenario of multi-branch merging as the research object, simulates the interaction among pedestrians during multi-branch merging, improves the desired speed of pedestrians in the original social force model, and introduces the following force and overtaking force. The model's validity was verified through numerical simulations, while the impacts of merging angles, branch widths, branch distance, and branch directions on pedestrian flows were systematically investigated. The research results show that the larger the merging angle is, the higher the pedestrian evacuation efficiency will be. Increasing the width of the branch roads cannot significantly improve the overall evacuation efficiency. Greater branch distance reduces pedestrian congestion and shortens passing time. When branches are positioned on opposite sides, the increased complexity of movement and merging dynamics leads to reduced pedestrian velocities and lower passing efficiency. The findings of this study provide a theoretical basis for the design and optimization of safe evacuation in multi-branch confluence scenarios.

Keywords

Multi-Branch Merging, Social Force Model, Following Behavior, Overtaking Behavior, Evacuation Efficiency

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

开展汇流结构中的行人流动力学的建模仿真和策略优化的研究, 对于防止拥挤踩踏事故的发生具有重大价值。在公共场所中, 由于建筑结构和路线复杂, 多条支路的汇流现象普遍存在, 安全事故时有发生, 对多支路汇流的研究意义重大。

行人汇流行为是一种非常常见的行人动力学现象。Yu 等人[1]进行了 39 组对照实验研究 3 个不同人流量情况下障碍物位置对人群汇流过程的影响, 发现特定的几何约束会显著降低交通效率, 为提高地铁站汇流结构的效率和安全性水平提供了一种可行的途径; 最近, Yu 等人[2]研究了宽度不对称和位置不对称的合并结构中行人疏散过程的运动特征, 发现宽度不对称的合流结构会降低通道内的秩序化程度, 影响整体通行效率, 增加合流区的密度, 在疏散过程中引发安全事故的可能性更高。通过各类汇流实验[3]发现行人的跟随和超越行为在多支路结构的运动中更为明显, 所以在构建新的社会力模型时应着重关注行人的这两个行为特征。孔令争等[4]将社会力模型中的自驱力优化为前进力、换道力和边际力组成的合力, 可以清晰地表现行人超越行为的完整过程。Shi 等人[5]通过观察地铁站行人在拐角、交叉口以及合并交叉口获得的行为特征, 改进原始社会力模型模拟了行人在汇流中的跟随与超越行为; 曹宁博等人[6]研究了行人的跟随行为特性, 并考虑人行横道和信号灯对行人的作用力和冲突避让力, 提出了改进的行人

过街社会力模型，表明在模型中加入跟随力可以更真实地匹配人群的过街速度。

本章研究以社会力模型为理论基础，构建多支路汇流场景的精细化仿真框架，旨在揭示行人在多支路汇流中的微观决策与时空演化机理。结合行人的跟随与超越行为，改进传统模型对行人预判行为的表征能力；通过量化汇流角度、通道宽度、支路间距以及支路方位等参数，解析这些因素对人群疏散效率的影响，为交通设施容纳能力评估与疏散通道优化设计提供理论依据。研究结果深化对行人流机制的理解，发挥了微观仿真模型在多支路人群汇流场景管控中的价值。

2. 多支路通道内人群行为特性分析

多支路汇流的道路情况如图 1 所示，根据行人汇流实验[3]中的结论可以得知，相较于单支路的汇流，行人在多支路的汇流中发生了明显的跟随和超越行为。所以本章依据实验情况和单支路汇流的行为特征，对行人在多支路汇流情景下的跟随和超越行为进行更深入地分析。

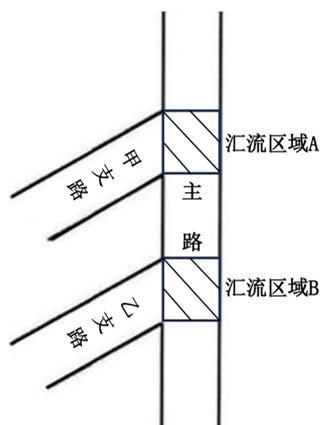


Figure 1. Diagram of the multi-branch traffic merging scenario
图 1. 多支路汇流场景示意图

本章的研究条件是中等密度及以上的人群，如图 2 所示。在这种条件下，行人更容易受到感知范围内的其他行人影响，并产生追从与自己期望方向和速度大小相近行人的意愿。行人与其前方行人的距离越近，跟随现象就越显著，而且更加倾向跟随密度较大的群体。



Figure 2. Multi-branch pedestrian merging experiment [3]
图 2. 多支路的行人汇流实验[3]

当行人同向运动时，行人会根据不同的行走意愿选择跟随或超越目光所及范围内的其他行人。对于上述两种行为的发生，主要由行人自身的期望速度与其他行人的实时速度的对比关系，以及两人的相对距离等因素决定。一般情况下，行人出于安全考虑会倾向选择跟随行为，由于路况的复杂程度以及个人

需求空间的压缩,部分行人会在条件允许时实行超越行为以获得更佳的行走位置。为更好地描述行人的超越行为,本章将其划分成行走轨迹偏移、超越以及结束超越三个阶段。

3. 模型建立

3.1. 考虑行人兴奋度的期望速度改进

在处于人群密度较大的行走环境中时,行人的兴奋度不仅由自己的心理状态决定,还会受到周围行人运动状况和环境因素的影响。Helbing 等[7]提出了行人的兴奋度与行人的实际速度与期望速度之间的差距有关,差距越大,行人渴望加快行走速度达到期望值,导致兴奋度越大;Lakoba 等人[8]的研究发现行人的期望速度会受到周围行人速度和环境的影响,周围行人的平均速度越大会越激励该行人适当增加自己的速度。根据以上研究,提出“激励因子”参数 $s_i(t)$,如式(1)所示,改进原始社会力模型,表现出行人的期望速度的变化。

$$s_i(t) = \phi_1 \cdot k \left[1 - \frac{v_{id}(t)}{v_i^0(t)} \right] + \phi_2 \cdot k \left[1 - \frac{v_i(t)}{v_i^s(t)} \right] + \phi_3 \cdot \xi(t) \quad (1)$$

式中, ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 为大小在 0 到 1 之间的影响系数,且 $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$; $k(x)$ 为分段函数,当 $x < 0$ 时, $k(x) = 0$, $x \geq 0$ 时, $k(x) = x$; $v_{id}(t)$ 为行人 i 在 t 时刻的实时速度在期望方向的分速度; $v_i^s(t)$ 为行人 i 感应范围内行人的平均速度; $\xi(t)$ 为反应周围环境影响的参数,设定为行人感应范围内的拥挤度系数,大小为 $[0, 1]$,此系数在行人经过汇流区域时达到最大。

行人 i 改进后的期望速度 $v_m^0(t)$,如下所示:

$$v_m^0(t) = (1 - s_i(t))v_i^0 + s_i(t)v_i^{\max} \quad (2)$$

式中, v_i^{\max} 为行人 i 的最大期望速度,设定值为 2.4 m/s [9]。

行人 i 改进后的自驱力 \vec{f}_{will}^n ,如下所示:

$$\vec{f}_{\text{will}}^n = m_i \frac{v_m^0(t)\vec{e}_i - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} \quad (3)$$

3.2. 跟随力与超越力

(1) 跟随力

跟随行为和超越行为属于行人之间的互动行为。通过实地观察和调研,得知:上述两种行为在行人的视野搜索范围(如图 3 所示)内存在其他同向运动行人的情况时更容易发生。

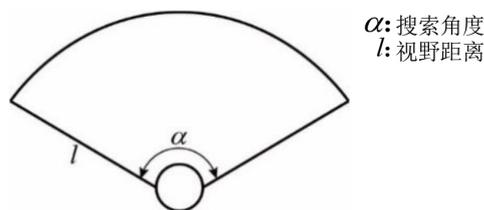


Figure 3. Pedestrian vision search area
图 3. 行人视野搜索范围

原始社会力模型中行人的排斥力影响范围过大且生硬,不利于模拟两个行人间的跟随和超越行为。依据行人在自己的避碰视野范围内的不同角度不同距离具有不同的排斥敏感程度,本章在行人之间的排

斥力加入反映行人各向异性的状态因子，如下所示：

$$P_{ij} = \lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 - \cos \theta_{ij}}{2} \quad (4)$$

式中， λ_i 为体现行人视野各向异性的系数，取值为[0, 1]，该值越大说明对行人的前进影响越严重； θ_{ij} 为行人 i 的运动方向与受到行人 j 的排斥力方向的夹角。

改进后的行人间的排斥力公式如下所示：

$$\vec{f}_{ij}^r = A_i \exp\left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{B_i}\right] \vec{n}_{ij} P_{ij} \quad (5)$$

为判断行人 j 是否可以被行人 i 选定为跟随目标，设定距离参数 β_1 和角度参数 β_2 ，公式如下所示：

$$\beta_1 = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq l_i \\ 0, & d_{ij} > l_i \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta_2 = \begin{cases} 1, & \frac{\vec{e}_i \cdot \vec{d}_{ij}}{|\vec{e}_i| \cdot |\vec{d}_{ij}|} > \cos \frac{\pi}{3} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

式中， d_{ij} 表示行人 i 与行人 j 之间的距离； l_i 表示行人的目光搜索半径； \vec{e}_i 表示行人 i 当前的速度方向； \vec{d}_{ij} 表示行人 i 指向行人 j 的方向向量，当 \vec{e}_i 与 \vec{d}_{ij} 的夹角小于 60° 时，行人 j 处于行人 i 的跟随搜索角度范围内。

考虑到行人更倾向跟随在横向上距离自己更近的目标，设定横向距离参数 β_3 对实时位置的坐标进行判定，如下所示：

$$\beta_3 = \begin{cases} 1, & |X_i' - X_j'| \leq h \\ 0, & |X_i' - X_j'| > h \end{cases} \quad (8)$$

式中， X_i' 和 X_j' 为行人 i 和行人 j 的实时位置横坐标； h 表示行人可以为跟随行为发生横向移动的最舒适距离，大小设定为 1 m。

假定行人 j 在行人 i 的视野搜索范围以内，行人 i 同时受到来自行人 j 的排斥力和吸引力。当两个行人之间距离足够远时，行人 i 受到的吸引力大于自身对行人 j 的排斥力，会产生跟随行人 j 运动的意愿 [10]，如图 4 所示。

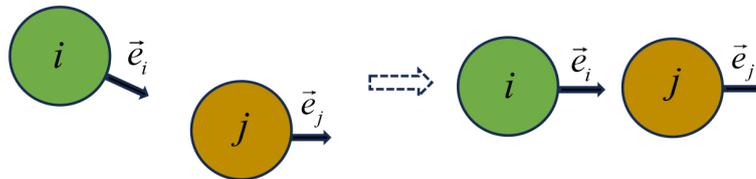


Figure 4. The following behavior of pedestrians in the same direction
图 4. 同方向行人的跟随行为

行人的跟随与被跟随行为还与行人的速度有关。当行人 j 的实时速度大于或等于行人 i 的期望速度时，此时行人 i 受到的跟随吸引力达到最大，但随着两人距离的增大，行人 j 可能会离开行人 i 的视野搜索范围，导致跟随行为结束；当行人 j 的实时速度小于行人 i 的期望速度但大于行人 i 的实际速度时，两人始终会保持一个合适的跟随距离，跟随时间也会更长；当行人 j 的实时速度同时小于行人 i 的期望速度

和实时速度，两人就有可能在某个时间点距离减小到发生碰撞，此时行人*i*会选择放弃跟随行为，增加自身的速度，转变成超越行为，但是也有可能出现行人*i*受到其他行人或障碍物的减速影响或行人*j*加速导致不能完成超越过程，则会重新进行跟随行为。为表现上述所示的速度关系对跟随行为的影响，引入参数公式如下所示：

$$\beta_4 = \begin{cases} 1, & |\bar{v}_j(t)| \geq |\bar{v}_i^0| \\ \frac{|\bar{v}_j(t)|}{|\bar{v}_i^0|}, & |\bar{v}_j(t)| < |\bar{v}_i^0| \end{cases} \quad (9)$$

对于跟随力 \bar{f}_{fw} 的大小可以依据行人之间作用力的量纲，公式如下所示：

$$\bar{f}_{fw} = C_i \exp\left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{D_i}\right] \bar{e}_j \quad (10)$$

式中， C_i 和 D_i 是需要校准的位置系数； \bar{e}_j 为行人*j*的运动方向。

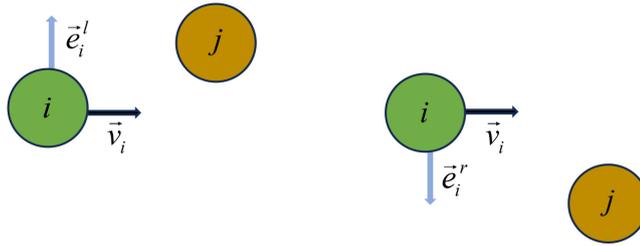


Figure 5. Pedestrian lateral tracking position adjustment
图 5. 行人横向跟踪位置调整

考虑到行人*j*的左右横向移动，为便于行人*i*的追踪，在跟随力 \bar{f}_{fw} 中加入横向相对位置的影响，如图 5 所示，并建模成线性关系，公式如下所示：

$$\bar{f}_{fw} = C_i \exp\left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{D_i}\right] \bar{e}_j + E_i \exp\left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{F_i}\right] \bar{e}_i^{L \text{ or } R} \quad (11)$$

式中， E_i 和 F_i 是需要校准的位置系数； $\bar{e}_i^{L \text{ or } R}$ 表示垂直于行人*i*的速度矢量的向左或向右的单位方向矢量，根据相对位移，无论行人*j*位于行人*i*运动方向的左侧还是右侧，该吸引力都会引导行人*i*转向并跟随运动。

最终加入上述 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 影响跟随行为的参数，可以得到跟随力公式如下所示：

$$\bar{f}_{fw} = \left\{ C_i \exp\left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{D_i}\right] \bar{e}_j + E_i \exp\left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{F_i}\right] \bar{e}_i^{L \text{ or } R} \right\} \times \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \quad (12)$$

(2) 超越力

行人因个人步速差异或目的地紧迫性，常会选择超越前方行走较慢的行人。这种超越通常表现为一侧加速通过，同时保持与对方的安全距离，以避免碰撞或造成不便。在通道较为宽敞时，超越行为较为顺畅，而在狭窄或拥挤的通道中，则可能需要考虑更多的条件。在模拟人群移动过程中的超越行为时，需要考虑两个主要因素：(1) 超越的方向；(2) 超越的程度即超越力的大小。

行人采取向左或向右的超越意图，取决于周围其他行人或障碍物对其排斥力的情况。设定来自左方和右方行人对采取超越行人的排斥力之和分别为 $\sum f_L^{\text{ex}}(t)$ 和 $\sum f_R^{\text{ex}}(t)$ ，来自左方和右方道路边界对超越行人的排斥力分别为 $f_L^{\text{w}}(t)$ 和 $f_R^{\text{w}}(t)$ 。若行人从前方左侧超越，则 $\bar{e}_i^{\text{ov}}(t) = \bar{e}_i^{\text{L}}$ ；若行人从前方右侧超越，则 $\bar{e}_i^{\text{ov}}(t) = \bar{e}_i^{\text{R}}$ 。国内行人的行走习惯一般是靠右行驶，从左超越，所以当行人的左右方向超越条件相同

时, 优先选择从左手方向实行超越[11]。描述超越力方向如下所示:

$$\vec{e}_i^{ov}(t) = \begin{cases} \vec{e}_i^L, & [\sum f_L^{ex}(t) + f_L^w(t)] - [\sum f_R^{ex}(t) + f_R^w(t)] \geq 0 \\ \vec{e}_i^R, & [\sum f_L^{ex}(t) + f_L^w(t)] - [\sum f_R^{ex}(t) + f_R^w(t)] < 0 \end{cases} \quad (13)$$

超越行为主要可以分为三个阶段: 行人行走方向偏移阶段、超越阶段以及恢复行走阶段。行人*i*对行人*j*的超越示意如图6所示。

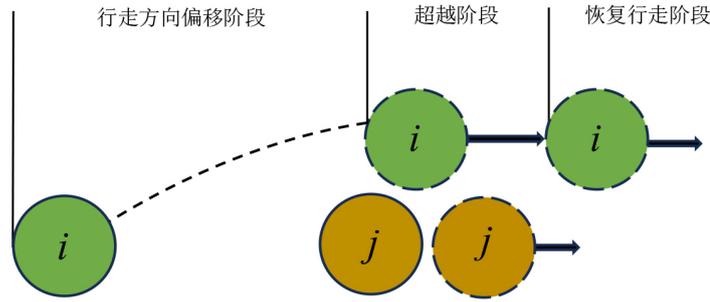


Figure 6. Pedestrian transcendent behavior
图 6. 行人的超越行为

行人在主动超越时, 行人需要横向移动改变自身的前行轨迹, 会导致向前的纵向位移减少, 为防止纵向速度减小且获得合适的超越空间, 行人会加快步频或者增大步幅。行人自身的横向移动能力*H*越大, 越容易发生超越行为; 感知范围内的人群密度*ρ*越大, 行人获得可超越空间的难度越大; 同时, 超越者在距离被超越者距离不同时, 超越的意愿也会发生变化。根据以上分析, 得出表示超越力的公式如下所示:

$$\vec{f}_{ov} = \frac{H}{\rho} \cdot \varphi(X) \cdot \varphi(Y) \cdot \vec{e}_i^{ov}(t) \quad (14)$$

$$\varphi(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left[-\frac{(X_j^t - X_i^t)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (15)$$

$$\varphi(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left[-\frac{(Y_j^t - Y_i^t)^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (16)$$

式中, $\varphi(X)$ 和 $\varphi(Y)$ 分别是水平维度函数和垂直维度函数; Y_i^t 和 Y_j^t 为行人*i*和行人*j*的实时位置纵坐标; σ_x 和 σ_y 的大小与行人的期望速度有关。结合实际仿真过程中行人在超越时还会受到其他行人和障碍物的排斥力, 可能会出现超越力不足而导致超越行为失败的情况。

综上所述, 将改进后的自驱力 \vec{f}_{will}^n 、行人间排斥力 \vec{f}_{ij}^r 、跟随力 \vec{f}_{fw} 、超越力 \vec{f}_{ov} 加入到原始社会力模型中完成对社会力模型的改进:

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{f}_{will}^n + \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij}^r + \sum_w \vec{f}_{iw} + \vec{f}_{fw} + \vec{f}_{ov} \quad (17)$$

4. 仿真实验

为了验证本章改进后的社会力模型的有效性, 本节内容基于以上研究内容, 并根据文献[3]中的实验数据条件, 模拟行人的汇流过程, 相关参数如表1所示。

Table 1. Parameter setting of simulation experiment**表 1.** 仿真实验参数设置

参数名称	取值
行人质量/ m_i	[60 kg, 80 kg]
反应时间/ τ_i	0.5 s
主路长度和宽度	16 m、1.6m
支路长度和宽度	3.6 m、1.2m
支路间隔距离	2.4 m
汇流角度	60°
期望速度/ $v_i^o(t)$	[1.2 m/s, 1.4 m/s]
行人半径/ r	[0.2 m, 0.25 m]
搜索角度/ α	120°
行人横向移动能力/ H	120 N
视野距离/ l_i	1.6 m
挤压力参数/ k	$1.2 \times 10^5 \text{ (N}\cdot\text{m)}^{-1}$
摩擦力参数/ κ	$2.4 \times 10^5 \text{ (N}\cdot\text{m)}^{-1}$

4.1. 模型可行性验证

图 7 所示为采用本章改进后的社会力模型模拟行人在多支路汇流场景运动的时空演化斑图。仿真开始时, 人群数量为 170 的行人按照 9:4:4 的比例分别从主路、甲支路和乙支路依次出发, 分别用棕色、蓝色、绿色表示。从模拟过程中可以看出, 主路和两条支路表现出了明显的独立成层现象, 这是由于行人的从众跟随行为所导致。与单条支路的汇流相似, 主路以及支路的行人在汇流前的运动状态都会比较自由, 主路和支路行人在各自通道有较大的运动空间, 行人可以较快通过。主路行人进入汇流区域 B 之前对主路的空间利用率较高, 受支路的各种因素影响较少, 运动较为分散, 可以保持适宜的个人空间和稳定的速度移动; 进入汇流区域 B 后, 由于来自乙支路行人对行走空间的侵占, 原本的主路行人产生避让行为并逐渐靠近道路的右侧侧, 整体速度降低并趋于稳定, 在区域交界处形成轻微程度的拥堵现象; 进入汇流区域 A 时, 同时受到来自甲支路行人的排斥作用, 主路行人的运动空间进一步被压缩, 拥挤情况更加明显, 整体速度进一步降低。乙支路的行人在仿真开始时速度会很快达到最大值, 进入汇流区域 B 后受到主路行人的影响导致速度降低, 且会尽可能沿着道路的左侧汇入主路, 但是到达汇流区域 A 后受来自甲支路的行人影响无法继续靠近左侧边前进, 只能向道路右侧倾移。甲支路的行人在前期阶段汇入主路不会受到阻碍, 进入主路后的行人轨迹也会更加分散且速度较快; 随着时间演化, 来自乙支路和主路的行人涌入汇流区域 A, 甲支路的行人受到较大的排斥力, 使得汇入空间被压缩, 汇入速度骤然降低。仿真结果与实验[3]符合, 验证了仿真结果的合理性与改进后模型的有效性。

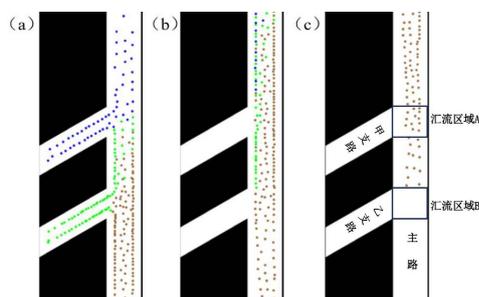


Figure 7. The spatiotemporal evolution pattern of pedestrian evacuation in multi-branch merging scene (a) $t = 30 \text{ s}$; (b) $t = 70 \text{ s}$; (c) $t = 110 \text{ s}$

图 7. 行人在多支路汇流场景疏散过程中时空演化斑图(a) $t = 30 \text{ s}$; (b) $t = 70 \text{ s}$; (c) $t = 110 \text{ s}$

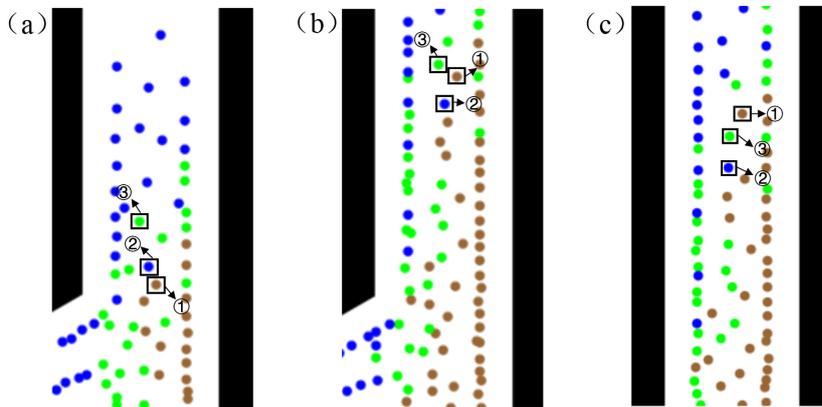


Figure 8. The spatiotemporal evolution pattern of overtaking behavior in pedestrian flows (a) $t = 23$ s; (b) $t = 25$ s; (c) $t = 27$ s
图 8. 超越过程中行人行为时空演化斑图(a) $t = 23$ s; (b) $t = 25$ s; (c) $t = 27$ s

图 8 给出了被选定的 3 个行人发生超越行为时的动态时空演化斑图。可以看出：被超越行人②在行人①的视野搜索范围内且阻挡了行人①的前进轨迹(见图 8(a))，行人①先偏移自身的行走路线然后进行超越(见图 8(b))；被超越行人③没有出现在行人①的正前方位置，所以可以完成直线加速超越(见图 8(c))。仿真过程中的超越行为的合理性验证了提出的模型具有可行性。

为比较改进模型与原始模型的误差，按照实验的测量区域在仿真空间中选取同样的位置采集数据。统计测量区域的行人密度变化，并将使用改进后模型的仿真数据与实验数据[8]、原始模型对比，如图 9 所示。可以很明显的观察到模拟仿真的密度曲线的变化率要小于实验数据，主要由于实验中的行人运动不确定因素更多，但是变化趋势基本吻合。经过计算得出，改进后模型的仿真数据比原始模型的误差率小 4.52%，证明了模型改进后的优越性。

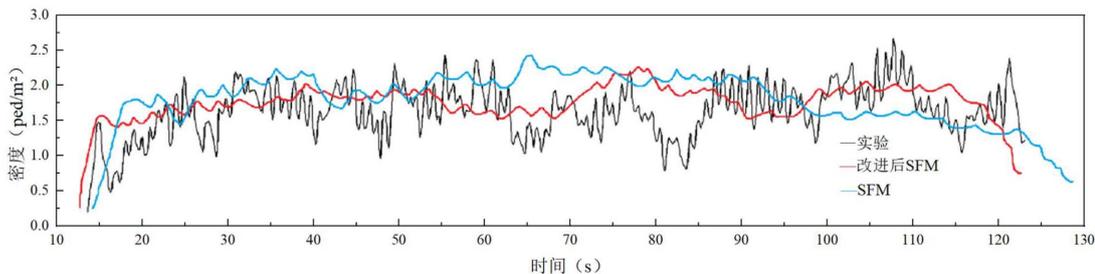


Figure 9. The relationship between density in measured area and time
图 9. 测量区域密度与时间的关系

4.2. 汇流角度对多支路汇流行为的影响分析

研究汇流角度对人群多支路汇流行为的影响，设定人群数量为 170 的行人按照 9:4:4 的比例分别从主路、甲支路和乙支路依次出发，改变汇流角度，其余仿真参数不变，如表 1 所示。图 10 和图 11 给出了汇流角度分别为 30°和 90°时行人运动的动态时空演化斑图。从仿真过程中可以看出，双支路汇流场景下合并角度的变化相较于单支路对行人汇流、穿越以及分散过程影响更加明显。汇流角度越大，支路行人更愿意靠近道路边侧前进，且进入主路之后的跟随行为导致的分层现象更加明显。

图 12 给出了在不同汇流角度下，行人通过不同区域的所需时间。双支路的汇流中，随着汇流角度的减小，支路行人进入主路的时间呈减少趋势，这是因为汇流角度越小，汇入口越宽，且行人没必要进行

大幅度的体位调整减少了速度损失,使得支路行人更容易汇入主路。这也就导致主路整体行人的密度增长速率加快,原始的主路行人需要避让减速来保证自己的安全空间,虽然支路的速度均值增大,但是主路的速度均值减小。对于主路行人来说,来自于甲、乙两条支路的行人都抢先占领了前进空间,前方行人越容易阻碍其运动,越容易产生超越行为扰乱人群的自组织现象,从而延长了整体行人到达出口的所需时间。所以在双支路的汇流仿真中,汇流角度越大,反而使疏散时间基本上呈减少趋势。



Figure 10. The spatiotemporal evolution pattern of pedestrians when the merging angle is 30° (a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

图 10. 汇流角度为 30° 时行人的时空演化斑图(a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

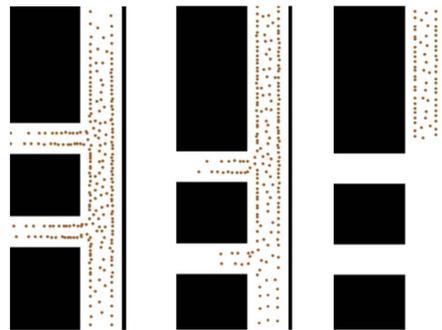


Figure 11. The spatiotemporal evolution pattern of pedestrians when the merging angle is 90° (a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

图 11. 汇流角度为 90° 时行人的时空演化斑图(a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

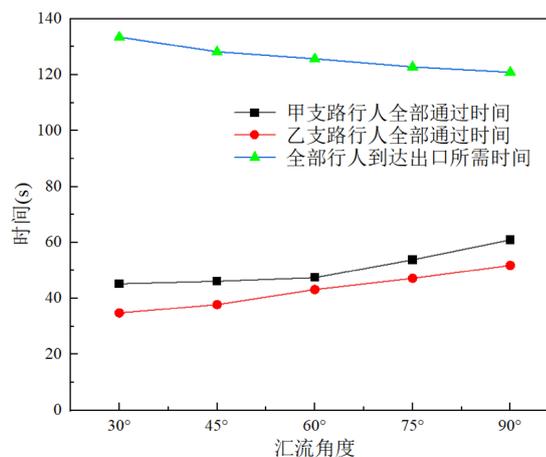


Figure 12. Influence of different merging angles on pedestrians' passing time

图 12. 不同汇流角度对行人通过时间的影响

4.3. 支路宽度对多支路汇流行为的影响分析

研究支路宽度对人群多支路汇流行为的影响, 设定人群数量为 170 的行人按照 9:4:4 的比例分别从主路、甲支路和乙支路依次出发, 改变两条支路宽度, 其余仿真参数不变, 如表 1 所示。图 13 和图 14 给出了支路宽度分别为 0.8 m 和 1.6 m 时行人运动的动态时空演化斑图。从图中可以看出, 当支路宽度足够时, 可以容纳更多行人并肩前行, 支路行人为了便于以最短路径汇入主路更倾向于靠近道路左侧侧前进, 进入主路后相对更多的行人会选择向远离支路的边侧移动占据更多的主路空间。此时支路与主路互为“瓶颈”。支路宽度变小时, 支路可以同时在同一水平位置的人数也随之减少, 两条支路在相同时间内的行人通过量减少, 支路的走停波会更加明显, 行人在汇流区域的堵塞范围也会变小。当支路宽度为 0.8 m 时, 在支路中同一排只能容纳一个行人行走, 进入主路时无法与主路行人形成竞争, 靠近主路左侧侧前进, 支路行人的平均速度也相对最小。当支路宽度为 2 m 大于主路的宽度, 此时的主路会变成“劣势路”受到严重的空间挤压导致行人前进速率降低。

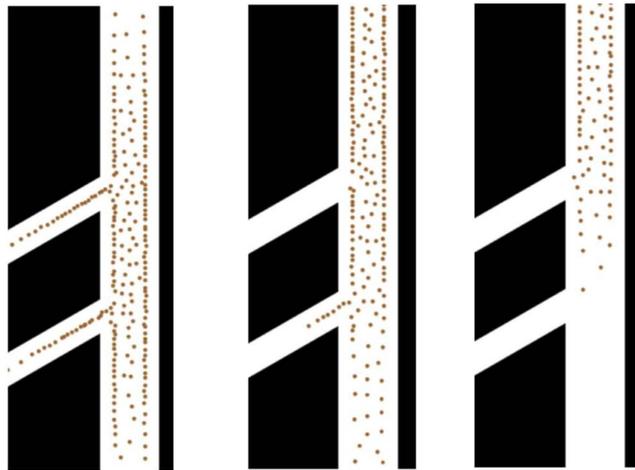


Figure 13. The spatiotemporal evolution pattern of pedestrians when the branch width is 0.8 m (a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

图 13. 支路宽度为 0.8 m 时行人的时空演化斑图(a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

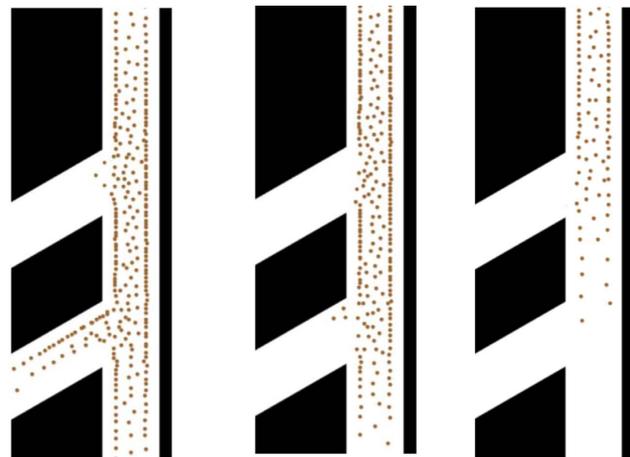


Figure 14. The spatiotemporal evolution pattern of pedestrians when the branch width is 1.6 m (a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

图 14. 支路宽度为 1.6 m 时行人的时空演化斑图(a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

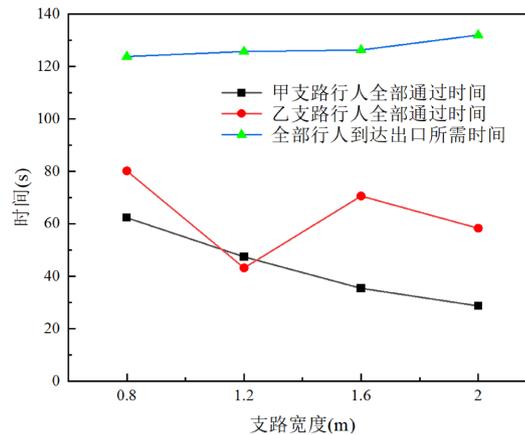


Figure 15. Influence of different merging angles on pedestrians' passing time
图 15. 不同汇流角度对行人通过时间的影响

图 15 给出了在不同支路宽度下, 行人通过不同区域的所需时间。由于甲支路在第一时间远离了来自乙支路和主路行人对空间的争抢, 可以看出支路宽度越大, 甲支路在单位时间的行人吞吐量就越大, 因此也会发生较多的行人绕行超越行为, 行人可以以更快的速度离开支路提前占据大部分的主路空间。反观乙支路的行人在支路宽度较大时, 乙支路与主路的汇流区域的人群密度会在开始时迅速到达峰值, 造成比较严重的堵塞情况, 降低行人疏散效率。整体来说, 虽然支路宽度的增加可以适当的提高支路的行人通过效率, 但是也增大了同等时间内主路同行的压力, 因此从数据来看对于双支路汇流的情况, 增加支路宽度并不能明显地提高整体的疏散效率。

4.4. 支路间距对多支路汇流行为的影响分析

研究支路间距对人群多支路汇流行为的影响, 设定人群数量为 170 的行人按照 9:4:4 的比例分别从主路、甲支路和乙支路依次出发, 改变两条支路的间距, 其余仿真参数不变, 如表 1 所示。图 16 和图 17 给出了支路间隔距离分别为 1.2 m 和 3.6 m 时行人运动的动态时空演化斑图。支路间隔距离较短时, 来自支路的行人对主路行人的影响显著增强, 主路的行人在支路行人汇入后速率明显降低, 各个区域的拥挤程度增加。支路间距较远时, 三条通道的行人之间的相互影响减少, 行人分布更加均匀, 空间竞争的减少使得平均速率提升, 超越现象的出现频率增加。

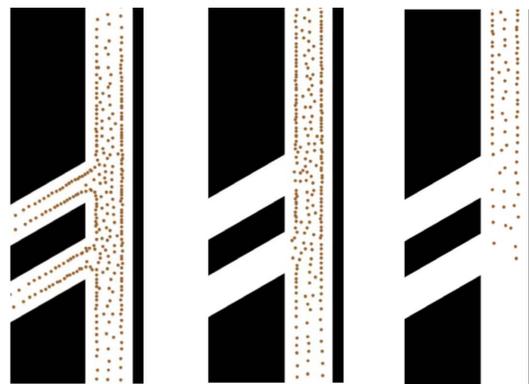


Figure 16. The spatiotemporal evolution pattern of pedestrians when the branch distance is 1.2 m
 (a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

图 16. 支路间距为 1.2 m 时行人的时空演化斑图(a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

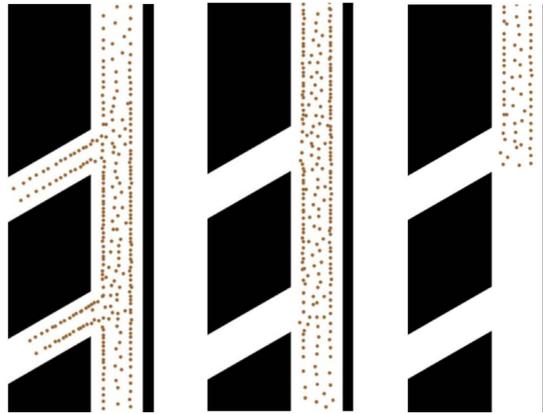


Figure 17. The spatiotemporal evolution pattern of pedestrians when the branch distance is 3.6 m (a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

图 17. 支路间距为 3.6 m 时行人的时空演化斑图(a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

图 18 给出了在不同支路间距下，行人通过不同区域的时间。由图中可以得出，支路间距越宽，来自乙支路的行人的通过时间明显减少，因为距离甲支路越远，乙支路的行人进入主路后的空间竞争程度越小，行人可以保持以较快地速度前进，但也可能造成甲支路的行人一定程度上进入主路难度增大。总体来说，两条支路间距主要影响的是三条道路的行人之间的交互作用，间距越大，汇流区域的拥堵程度减少，疏散效率越高。

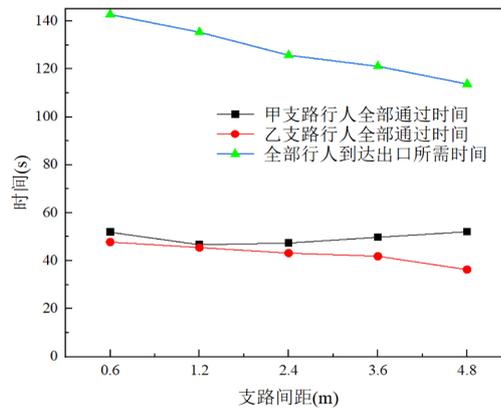


Figure 18. The influence of different branch distance on pedestrians' passing time

图 18. 不同支路间距对行人通过时间的影响

4.5. 支路方位对多支路汇流行为的影响分析

研究支路方位对人群多支路汇流行为的影响，设定人群数量为 170 的行人按照 9:4:4 的比例分别从主路、甲支路和乙支路依次出发，将同侧的两条支路的方位更改为在主路的异侧，如图 19 所示，其余仿真参数不变，如表 1 所示，以下仿真分析以甲支路在主路右侧的场景为例。图 20 给出了支路在主路异侧时行人的动态时空演化斑图。当两条支路位于同侧，人群在汇流时通常会在同一侧进行汇聚，主要的行人流量集中在同侧，可能导致该侧的拥挤程度增加，但如果空间允许，行人可能会因为对熟悉的方向的预期和相对较大的空间而维持较快的行走速度；反之，异侧的支路会让整个运动过程更加复杂，行人需要在通过汇流区域时减速和停顿以避免人群，并调整步伐以适应交汇的复杂性，行人可能会选择不同的路径或者超越行为来避免自身处于拥堵区域，以上都导致行人整体速度下降。总体而言，支路在同侧时行

人速度通常会较快。图 21 显示在同一稳定时间段内的不同汇流场景的主路行人轨迹。在同向双支路汇流中，主路行人只需要发生一次轨迹偏移便可以形成一个比较稳定的行人层；对于异侧支路的汇流，主路行人层则需要进行两次的较大的轨迹偏移，移动距离相对增加。

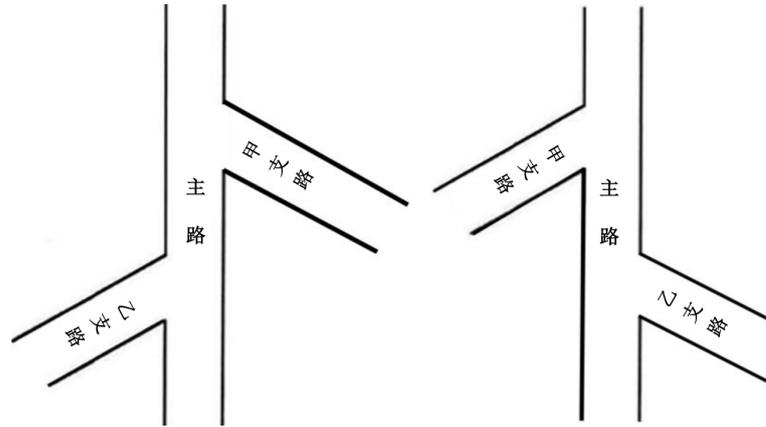


Figure 19. Diagram of the merging scenario in which branch directions are changed
图 19. 改变支路方向的汇流场景示意图



Figure 20. The spatiotemporal evolution pattern of pedestrians when the branch road is on the opposite side of the main road (a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

图 20. 支路在主路异侧时行人的时空演化斑图(a) $t = 30$ s; (b) $t = 70$ s; (c) $t = 110$ s

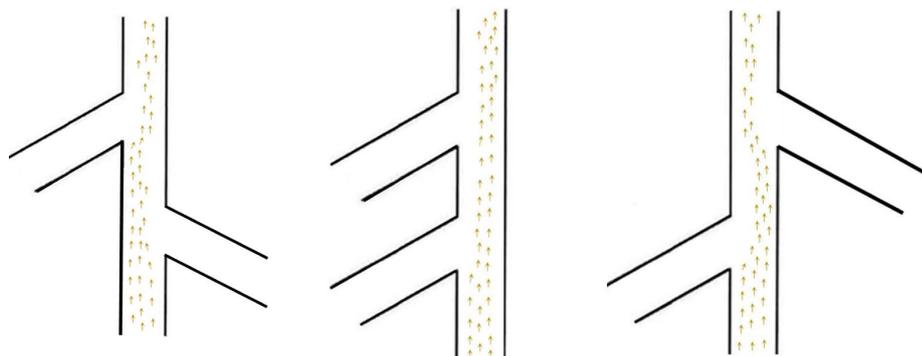


Figure 21. Trajectory comparison of pedestrians on the main road in different merging scenarios

图 21. 主路行人在不同汇流场景的轨迹对比

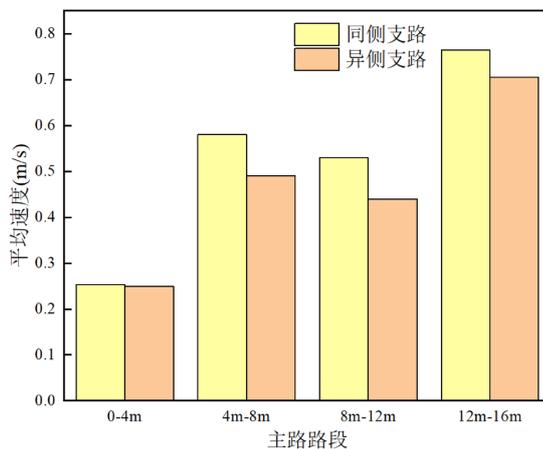


Figure 22. The change of average pedestrian speed in different main road sections
图 22. 行人平均速度在不同主路路段的变化

将主路按距离等分成 4 个路段，图 22 给出了在 $t = 35$ s 时主路中不同路段的速度数据图，此时在存在两条支路的汇流现象且整体运动相对稳定，可以看出，同侧支路的行人速度要快于异侧支路的行人，尤其是在包含两个汇流区域的中间路段。首先是因为主路行人需要完成两次轨迹偏移，移动距离的增加、身位和方向的矫正成本以及更多的超越现象都导致主路行人速度降低；间接延缓了两条支路行人的汇入，特别是来自乙支路的行人受前方行人减速的阻碍影响最大，乙支路的行人无法汇入主路使得支路内的拥挤情况更加明显。

5. 结论

本文基于行人在多支路场景的汇流特征，从行人的期望速度、跟随和超越行为入手改进原始社会力模型，使得行人的行为决策更符合实际情况，仿真结果和实验数据吻合验证了模型的有效性。进一步研究了汇流角度、支路宽度、支路间距和支路方位对多支路汇流的影响，研究结果表明：汇流角度越大，使得行人疏散效率更高；增大支路宽度并不能明显地提高整体的疏散效率；支路间距越大，行人的拥挤程度越小，通过的所需时间越少；支路在异侧时增加了运动和汇流的复杂程度，使得行人速度减缓，降低了通过效率。本章研究结果丰富了行人社会力仿真模型，同时证明了对于更加复杂的汇流场景，由于行人运动的随机性，控制行人的流量对于提升疏散效率有一定的帮助，为多支路汇流提供了理论依据。但是对于现实中更加复杂的场景，需要规划汇流线路以及减少行人的超越现象都应成为安全设计中应当考虑的因素。

基金项目

本论文获国家自然科学基金(52208408)、山西省回国留学人员科研教研资助项目(2022-159, 2023-149)资助。

参考文献

- [1] Yu, H., Jiang, N., Li, M., Jia, X., Shi, J., Wai Ming Lee, E., *et al.* (2025) Regulating Multi-Directional Passenger Flow: Impact of Obstacle Position and Flow Level on Pedestrian Merging Process. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **157**, Article 106336. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106336>
- [2] Yu, H., Zhou, X., Li, M., Jiang, N., Jia, X., Yang, L., *et al.* (2024) Experimental Study on the Movement Characteristics of Pedestrians in Asymmetric Merging Structures. *Journal of Building Engineering*, **84**, Article 108649. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108649>

-
- [3] 蒋嘉嘉. 多支道汇流人群运动特征可控实验研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [4] 孔令争, 张蕊, 杨明航, 杨明辉. 地铁站通道行人超越行为改进社会力模型[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3722-3726.
- [5] Shi, Y., Xu, J., Zhang, H., Jia, L. and Qin, Y. (2022) Walking Model on Passenger in Merging Passage of Subway Station Considering Overtaking Behavior. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **585**, Article 126436. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126436>
- [6] 曹宁博, 赵利英, 曲昭伟, 等. 考虑双向行人跟随行为的社会力模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(3): 688-694.
- [7] Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A. and Werner, T. (2005) Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions. *Transportation Science*, **39**, 1-24. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0108>
- [8] Lakoba, T.I., Kaup, D.J. and Finkelstein, N.M. (2005) Modifications of the Helbing-Molnár-Farkas-Vicsek Social Force Model for Pedestrian Evolution. *Simulation*, **81**, 339-352. <https://doi.org/10.1177/0037549705052772>
- [9] 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]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [10] Lee, J., Kim, T., Chung, J. and Kim, J. (2016) Modeling Lane Formation in Pedestrian Counter Flow and Its Effect on Capacity. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **20**, 1099-1108. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0741-9>
- [11] 杨明辉, 张蕊, 严巧兵, 等. 基于非机动车主动超越行为的社会力模型改进研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(4): 871-877.