

考虑结伴行为的改进社会力模型在地铁建筑 应急疏散仿真中的应用研究

董利辉¹, 何迎双¹, 邓云峰²

(1. 沈阳航空航天大学 安全工程学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 中共中央党校国家行政学院, 北京 100089)

摘要: 地铁建筑作为高密度人流聚集的封闭空间, 突发火灾等事件下的应急疏散效率高度依赖个体与群体行为的动态交互。传统社会力模型多基于个体独立性假设, 难以刻画现实中普遍存在的结伴行为及其非对称信息传递机制。针对上述问题, 本文提出一种融合结伴行为特征的改进社会力模型: 引入相对权重吸引力机制, 刻画舍领导者的松散结伴群体中“引导-跟随”非对称关系, 并增设速度同步项以增强群体凝聚力; 采用 Morse 势函数描述紧密结伴群体内部的非线性吸引-排斥作用, 更真实地反映家庭或熟人团队的动态行为。在此基础上, 构建典型岛式地铁站三维仿真场景, 系统探究出口数量、障碍物类型(闸机、安检区)对疏散效率的影响。仿真试验表明: 增加出口数量可显著缩短疏散时间, 但需配合物理引导以缓解“拱效应”; 封闭式障碍物对疏散的阻碍效应远大于点状障碍。本文研究成果既为地铁建筑应急疏散仿真提供了更贴近现实的结伴建模框架, 也为疏散标识优化、通道设计及群体引导策略制定提供了理论支撑与实践依据。

关键词: 社会力模型; 相对权重吸引力; Morse 势函数; 结伴行为; 建筑仿真模拟

中图分类号: X947

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)05-0053-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.05.054

Research on application of improved social force model considering companion behavior in simulation of emergency evacuation of subway buildings

DONG Lihui¹, HE Yingshuang¹, DENG Yunfeng²

(1. School of Safety Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, Liaoning, China; 2. Party School of the CPC Central Committee, National Academy of Governance, Beijing 100089, China)

Abstract: As a closed space with high-density crowds, the emergency evacuation efficiency of subway buildings under sudden fires and other incidents is highly dependent on the dynamic interaction between individual and group behavior. Traditional social force models are mostly based on the assumption of individual independence, and it is difficult to describe the common companion behavior and its asymmetric information transmission mechanism in reality. In order to solve the above problems, an improved social force model that integrates the characteristics of companion behavior is proposed; introducing the relative weight attraction mechanism to describe the asymmetric relationship of “guidance-following” in loose companion groups with leaders, and adding the speed synchronization term to enhance group cohesion; The Morse potential function is used to describe the nonlinear attraction-repulsion effect within a close-companion group, which more realistically reflects the dynamic behavior of a family or acquaintance team. On this basis, a three-dimensional simulation scenario of a typical island subway station is constructed, and the influence of the number of exits and obstacle

收稿日期: 2025-12-11

作者简介: 何迎双(2000—), 男, 硕士研究生, 从事航空安全工程与人群疏散动力学方面的研究。

通信作者: 董利辉(1987—), 男, 博士研究生, 讲师, 从事系统可靠性分析、流体数值仿真、灾害气体传播及控制方面的研究。

types(turnstiles, security checkpoints) on the evacuation efficiency is systematically explored. Simulation experiments show that increasing the number of exits can significantly shorten the evacuation time, but it needs to be cooperated with physical guidance to alleviate the “arch effect”. The hindrance effect of closed obstacles on evacuation is much greater than that of point obstacles. The results not only provide a more realistic companion modeling framework for emergency evacuation simulations in subway construction, but also offer theoretical support and practical basis for the optimization of evacuation signage, corridor design, and the development of crowd guidance strategies.

Key words: social force model; relative weight attractiveness; Morse potential function; companion behavior; building simulation

随着城市轨道交通网络的快速扩张, 地铁站作为高密度人流聚集的封闭空间, 其应急疏散能力直接关系到公共安全。因此, 如何在紧急情况下实现人员迅速、安全、高效的疏散, 是保障公共安全和生命财产的重要课题。

在社会力模型研究层面, 疏散人员的结伴行为对效率的显著影响已成为近年来的研究热点。国外研究中, IVO 等^[1]提出了群体结构的灵活表征机制的模型, 可灵活创建具有不同结构的(有无领导力)以及成员之间具有不同层次关系的群组; HUANG 等^[2]关注群体间的心理排斥与子群体内的协调机制; ZHOU 等^[3]和 NICOLAS 等^[4]则进一步细化了行人类别, 探讨了不同社会属性对宏观流量-密度关系及自组织模式的影响。国内研究多基于成熟的微观模型框架, 广泛引入“OCEAN”大五人格模型、SIR/SIS 情绪感染模型等, 结合陈治伟等^[5]、程明等^[6]、霍非舟等^[7]的工作, 探究恐慌情绪传播、性格差异及环境熟悉度对结伴疏散的耦合效应。

然而, 传统社会力模型通常将行人互动简化为对称且全局归一化的物理过程, 难以刻画结伴群体内部普遍存在的非对称社会纽带与信息传递机制(即成员间吸引力的强弱差异或单向依赖)。针对这一局限, 本文在现有结伴行为研究基础上, 提出一种改进思路: 引入改进的自驱力与相对权重吸引力机制, 以表征同伴间的差异化吸引及速度协调机制; 采用 Morse 势函数构建非对称作用力, 精准描述结伴行人之间动态变化的非对称相互作用。此外, 通过构建典型岛式站台场景并开展多组仿真实验, 系统探究不同结伴程度、出口数量与障碍物对地铁站疏散效率的影响, 旨在为地铁应急管理提供量化依据与优化策略。

1 改进的社会力模型

1.1 社会力模型

1995 年, HELBING 等^[8]在牛顿第二定律的基础上, 考虑行人自身的驱动力、行人之间的相互作用力以及行人与墙壁障碍物等的相互作用力, 提出了描述行人运动的社会力模型。研究表明, 该模型能够有效再现人群的自组织现象。

传统社会力模型将行人间的相互作用简化为纯粹的物理过程, 并建立在作用力对称且全局归一化的基本假设之上。这一假设在模拟结伴群体时呈现出显著局限性, 无法充分捕捉现实中结伴群体普遍存在的非对称性信息传递现象。具体而言, 在存在领导者的结伴群体中, 成员间存在本质上的非对称机制: 领导者根据疏散信息发挥“领头羊”作用, 通常无需关注追随者; 而追随者则需密切关注领导者以获取引导。这种非对称吸引力通常表现为领导者对跟随者的吸引力显著强于反向作用。基于此, 本文将前者定义为松散群体, 后者定义为紧密群体。

自然界中的迁徙鸟群依靠个体局部规则实现自组织、无明确层级结构, 属于典型的松散型群体。象群的社会结构高度依赖母系领导制, 其核心特征为成员间存在稳定的社会纽带与非对称的作用机制——即特定个体(领导者/照护者)对追随者施加主导性引导力, 而反向作用微弱甚至可忽略, 属于紧密群体。由此可见, 结伴群体内部并非均质互动系统, 而是蕴含结构性权力关系与信息不对称性。为此, 本文在考虑结伴行为时, 引入改进的自驱力和相对权重吸引力^[9], 以表征同伴间的吸引力、速度协调机制; 同时采用 Morse 势函数构建非对称作用力, 以反映“领导-跟随”

关系中的主导方向, 进而提出一种融合结伴行为特征的改进社会力模型。

1.2 考虑结伴行为的改进社会力模型

在自驱动力改进方面, 群体成员倾向于保持相近的运动速度, 以避免脱离群体。为此, 在自驱动力中引入速度同步项:

$$F^{\text{sync}} = \varepsilon \sum_{k \in G} (v_k - v_i) \quad (1)$$

式中: F^{sync} 为作用于人员 i 的速度同步力; ε 为速度同步系数, 其值越大表示群体速度协同性越强; v_k 、 v_i 为人员当前速度, m/s; G 为人员 i 所在的社会群体集合。参考 COUZIN 等^[10] 的研究, 可将 ε 设定为群体中所有个体速度向量的平均模长。此外, 考虑到结伴行人之间存在恐慌心理, 引入情绪值对行人期望速度进行动态修正^[11-12]。

在结伴行人间的相互作用力计算中, 将其分为排斥力和吸引力。对于松散群体, 人员间的排斥力在结伴过程中可忽略不计^[5]。为此, 建立结伴群体的相对权重吸引力模型, 将同伴吸引力重定义为基于相对影响权重的吸引力, 其表达式如下:

$$F_i^{\text{attr}} = \alpha \cdot \frac{\sum_j \varphi(|x_j - x_i|) \cdot (x_j - x_i)}{\sum_k \varphi(|x_k - x_i|)} \quad (2)$$

式中: F_i^{attr} 为人员 i 所受的相对权重吸引力; α 为吸引强度系数, 用于控制吸引加速度的大小; $\varphi(r)$ 为同伴影响函数; x_i 、 x_j 为人员当前坐标。

该作用力具有局部自适应优势, 即吸引力仅依赖于个体周围同伴的分布密度, 而非全局人数 N 。通过定义活跃集筛选有效同伴, 其集合定义为

$$\Lambda_i(\theta) = \{j | \varphi(|x_j - x_i|) \geq \theta \cdot \max_k \varphi(|x_k - x_i|)\} \quad (3)$$

式中: $\Lambda_i(\theta)$ 为从所有其他行人 j 中, 选出对行人 i 具有“显著局部吸引力”的有效同伴(即活跃集); θ 为相对吸引力权重的筛选阈值, 人员吸引力不低于其环境中最强吸引力的 θ 倍时, 才将其纳入活跃集。

通过上述引入相对权重吸引力和速度同步项的改进, 可有效刻画松散群体中的非对称引导关系。同时, 在行人动力学领域, 部分学者借鉴分子动力学中的相互作用势(如 Lennard-Jones 势^[13])描述行人之间的复杂相互作用。然而,

Lennard-Jones 势函数的对称性和无限深势阱特性并不适用于模拟社会关系中非对称的“分离倾向”。为此, 引入 Morse 势^[14-15]描述紧密群体成员间作用力的非线性变化, 其改进形式的力表达式为

$$f_{\text{group}} = - \frac{dU_{\text{group}}}{dr} = - \left[2D_e a e^{-a(r-r_0)} (1 - e^{-a(r-r_0)}) + \frac{\lambda}{d_{\text{max}}} \right] \quad (4)$$

式中: f^{morse} 为 Morse 势函数力; U_{group} 为 Morse 势函数, 其力为势函数的负梯度; r 为核间距; D_e 为 Morse 势的阱深, 其势能零点可任意选取, 在此将解离极限设为势能零点, 即两核间距趋于无穷远时令体系势能为 0; ω 为势阱的“宽度”参数, 它控制势能曲线在平衡位置附近的陡峭程度或曲率势阱的“宽度”; γ_0 为平衡距离(群体成员的舒适间距); λ 为远距离吸引力增强系数($\gamma > \gamma_0$ 时吸引力随距离线性增长, 但不超过 d_{max}); d_{max} 为最大有效作用距离。

综上所述, 通过引入强弱关联场景的差异化表征, 建立统一的改进社会力模型框架:

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = f_i^{\text{drive}} + \sum_w f_{iw}^{\text{wall}} + \xi f_{\text{group}}(r) + (1 - \xi) F_i^{\text{attr}} \quad (5)$$

式中: f_i^{drive} 为引入速度同步项之后的行人自驱力; $\sum_w f_{iw}^{\text{wall}}$ 为行人与障碍物之间的作用力; ξ 为场景切换标签($\xi = 1$ 表示强关联紧密群体, $\xi = 0$ 表示弱关联松散群体)。

2 仿真实验设计与结果分析

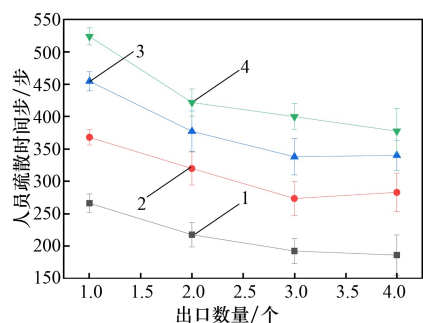
针对地铁火灾等高风险应急场景下人员疏散行为的复杂性, 系统构建两类面向不同群体结构的改进社会力模型。两种模型在理论框架与行为刻画上互为补充, 共同构成一个更具普适性与现实解释力的结伴疏散建模范式。为验证模型的有效性, 基于 Python 编程语言开发了仿真平台。该平台在 PySocialForce 开源项目的传统社会力模型基础上进行二次开发, 通过引入领导者分配机制、相对权重吸引力及 Morse 势函数等关键算法, 实现对结伴群体的仿真模拟。

2.1 疏散出口配置的影响

在应急疏散场景中, 出口作为人员流动的关

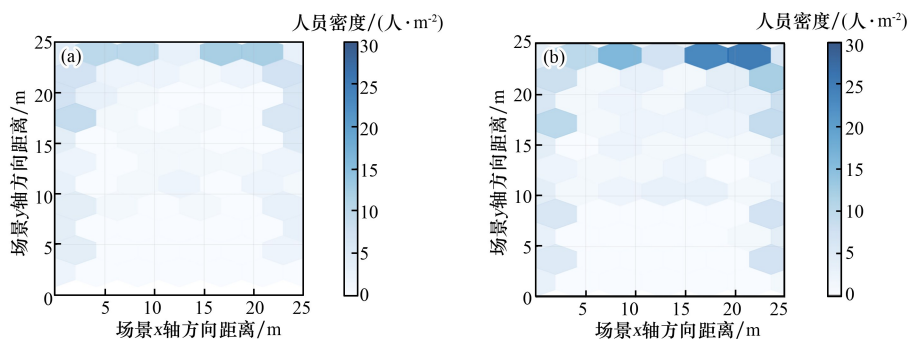
键节点,其数量配置直接影响疏散效率和生命安全水平。本文基于改进后的社会力模型,重点研究地铁站出口数量(1~4个)对人员疏散效率的影响。从疏散通道设置的安全判据出发,探讨疏散通道设置的影响因素^[16]。采用双因素实验设计,系统考察人员密度和出口数量两个自变量对疏散效率的影响。

图1为出口数量与疏散时间步之间的负相关关系。由图1可知:在所有测试的密度场景下,随着出口数量由1增至4个,疏散时间步均呈现单调递减趋势;而在出口数量固定的前提下,随着人员密度的增大,疏散时间步则显著上升。这一现象符合排队论的基本原理:出口数量的增加有效提升了系统的服务率,通过分流效应缓解局部拥堵,从而减少人员的平均排队等待时间;相反,人员密度的增加强化了个体间的排斥力场,限制了有效移动速度。上述现象符合社会力模型中的群体互动机制。在此基础上,本文进一步对不同出口布局(如三出口分别位于左右两侧及顶部中心)场景下的疏散过程空间分布特征进行对比



人员密度/(人·m⁻²): 1—0.32; 2—0.64;
3—0.96; 4—1.28。

图1 人员密度与出口数量对疏散时间步影响的模拟分析



(a) 低密度; (b) 高密度

图2 不同密度场景下三出口疏散过程的空间分布特征

分析。

图2为典型的“出口聚集效应”。具体而言,低密度场景下的最大密度值为16人/m²,而在高密度场景下,该数值升至25人/m²,符合人员密度与拥堵程度正相关的理论预期。空间布局特征显示,顶部出口处出现显著拥挤,其左右两侧形成高强度密度区,而正对出口的纵向区域密度则相对较低。这种非对称的空间分布模式揭示了出口几何结构对人员流动的重要影响:缺乏中央通道的有效引导,导致人群向出口侧向挤压,增加了局部拥堵的概率。模拟结果验证了在疏散设计中实施有序疏导的重要性。基于此,本文提示在实际疏散系统设计中,应通过物理引导设施(如隔离栏)规范通行路径,避免侧向冲突导致的“拱效应”。

2.2 疏散障碍物的影响

为系统探究地铁站厅内典型障碍物(如闸机、安检站)对结伴行人疏散行为模式的影响,重点分析行人绕行路径选择、速度波动特征及群体完整性维持能力。实验在固定行人总数与密度的前提下,设置无障碍、单一闸机、单一安检站及两者串联4种布局,旨在隔离障碍物类型对群体行为的独立影响。

障碍物类型配置如图3所示。以典型地铁站厅为原型构建仿真场景,设定统一出口位置,并在通行路径上嵌入两类代表性障碍物,其关键行为指标包括:1) 路径绕行复杂度:通过实际轨迹长度与理想直线距离的比值,量化路径偏移程度;2) 速度波动特征:以组内成员速度的标准差及低速持续时间,反映协同运动的稳定性;3) 群体完

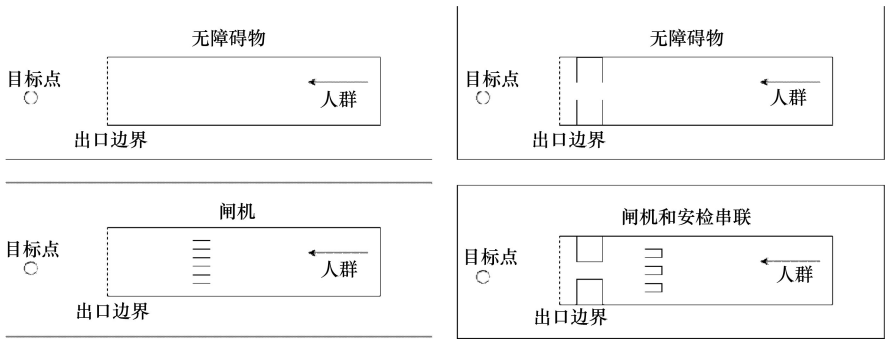


图 3 障碍物类型配置

整性维持率：定义为疏散结束时，仍保持空间邻近（间距 $\leq 2\text{ m}$ ）的原始组成员比例。

仿真结果汇总如表 1 所示。由表 1 可知：障碍物的存在显著延长了疏散时间，且安检站对效率的负面影响远大于闸机。这主要源于安检结构形成的“U 型”物理围挡迫使行人必须通过狭窄的中央通道，造成严重流线交叉与停滞；相比之下，闸机虽限制了通行宽度，但呈离散柱状分布，允许多向分流，故通行能力相对较高。此外，路径复杂度与障碍物的几何形态呈正相关，从无障碍场景的 2.058 逐步上升至闸机与安检共存场景的 3.587。这表明障碍物不仅延长疏散时间，还通过迫使行人频繁变向，显著增加了轨迹曲折度。该结果印证了障碍物的空间封闭性比点状阻隔更易引发非理性路径选择。

基于上述单障碍物影响的分析，为进一步研究多通道闸机布局对群体绕行策略与队列形成的影响，结合行人动力学原理与地铁实际场景，提出 3 种典型布局方案，以揭示其对群体行为的调控机制。图 4 为 3 种多通道闸机的布局方式，分别用于优化人流通行效率和空间利用。对称均匀布局的特点是闸机在通道两侧对称排列且间距均匀；空间偏置布局的特点是闸机在通道一侧或两侧不对称布置，部分闸机向出口或中心线偏移。

非对称交错布局的特点是闸机在两侧呈交错式排列，形成“错位”布局以避免正对设置。

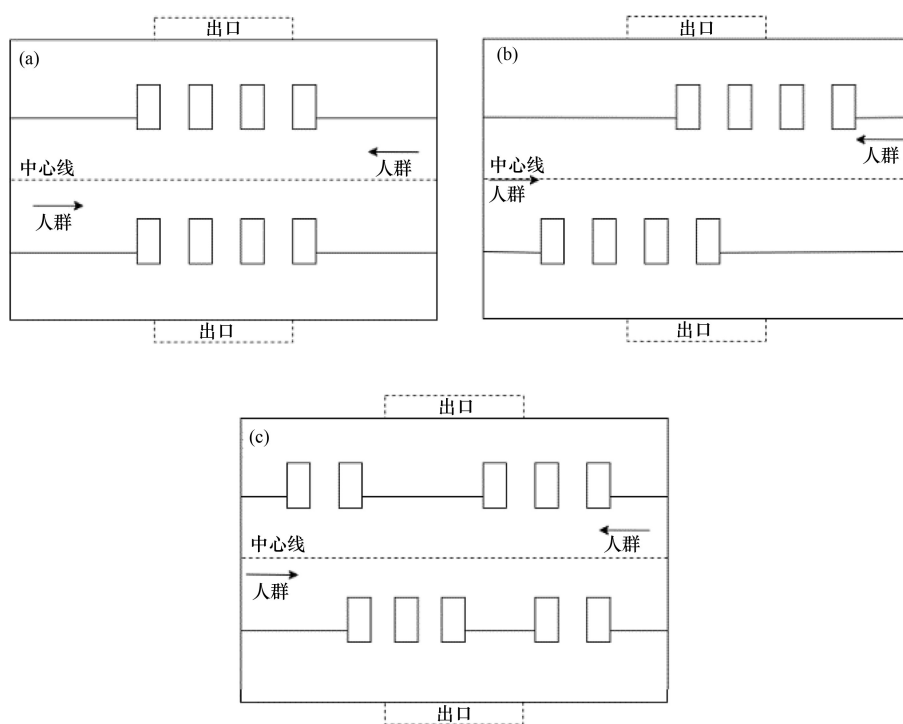
3 种障碍物布局对人员疏散的影响如图 5 所示。由图 5 可知：对称均匀布局下，通道均匀、对称地分布于上下两个区域，路径清晰且易于理解：行人能直观看到左右两侧出口，并且每条路径由相同数量障碍物组成，减少决策复杂性；空间偏置布局下，打破严格对称性，将上层与下层通道在水平方向错位布置，促进人流分散，显著降低单一通道或特定区域的拥堵风险；非对称交错布局下，该布局进一步复杂化，不仅存在错位，且通道数量和位置在上下两层间呈现“交错”模式。行人可根据自身位置和前方情况，灵活选择最短或最通畅路径，这种布局对各种复杂、非对称的人流分布具有极强的适应能力。

3 结 论

本文构建了融合相对权重吸引力与 Morse 势函数的改进社会力模型，突破了传统模型的对称性假设，精准刻画了松散及紧密结伴群体中的非对称引导与非线性协同机制。仿真实验表明：增加出口数量虽显著缩短疏散时间，但在高密度场景下，结伴群体因互相等待与协同移动易在出口处形成“拱效应”，致使单纯增设出口难以充分释

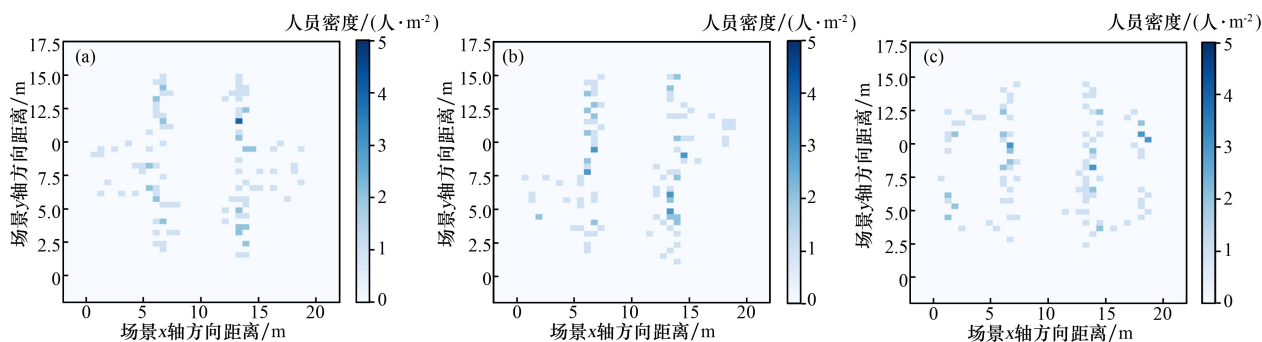
表 1 地铁场景障碍物类型影响汇总

障碍物类型	平均疏散时间/步	平均路径复杂度	平均群体完整性	平均瓶颈密度/(人·m ⁻²)	平均排队长度/人
无障碍	73.0	2.058	0.208	0.81	57.0
单通道闸机	87.0	2.374	0.280	1.71	24.0
单一安检区	122.0	3.076	0.167	0.57	8.0
闸机 + 安检区串联	141.0	3.587	0.125	1.71	24.0



(a) 对称均匀布局; (b) 空间偏置布局; (c) 非对称交错布局

图 4 3 种多通道闸机布局



(a) 对称; (b) 空间偏移; (c) 非对称

图 5 不同布局下人员密度热图

放效能,需辅以物理引导打破僵局以实现疏散效率最大化。此外,研究明确了障碍物的阻滞特征,证实封闭式障碍物(如闸机、安检区)对人流的阻碍作用远超点状障碍物,是引发地铁站局部拥堵与疏散瓶颈的关键因素。

参考文献:

- [1] IVO D,CAVALCANTE-NETO J,VIDAL C. A model for flexible representation of social groups in crowd simulation [J]. Computers&Graphics,2021,101:7-22.
- [2] HUANG L,GONG J H,LI W H, et al. Social force model-based group behavior simulation in virtual geographic environments[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information,2018,7(2):79.
- [3] ZHOU R,CUI Y K,WANG Y,et al. A modified social force model with different categories of pedestrians for subway station evacuation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2021,110:103837.
- [4] NICOLAS A,HASSAN F H. Social groups in pedestrian crowds:Review of their influence on the dynamics and their modelling [J]. Transportmetrica A: Transport Science,2023,19(1):1970651.
- [5] 陈治伟,李梦乐,李慧,等. 考虑性格差异性的恐慌人员疏散模型研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与工程版),2024,46(4):528-533.

- [6] 程明,陈霄. 耦合结伴行为的航站楼人员疏散信息传递模型构建与分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(10):3992–4000.
- [7] 霍非舟,范丹丹,刘昶,等. 考虑结伴行为与情绪感染的人员疏散模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(11):126–132.
- [8] HELBING D, MOLNÁR P. Social force model for pedestrian dynamics [J]. *Physical Review E*, 1995, 51(5):4282–4286.
- [9] MOTSCH S, TADMOR E. A new model for self-organized dynamics and its flocking behavior [J]. *Journal of Statistical Physics*, 2011, 144(5):923.
- [10] COUZIN I D, KRAUSE J, JAMES R, et al. Collective memory and spatial sorting in animal groups[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2002, 218(1):1–11.
- [11] 曾杨,黎金玲,郭海湘,等. 基于风险感知的室内疏散情绪传染与干预策略研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(12):2691–2703.
- [12] 吴新杰,王维莉,胡志华. 突发事件下人群恐慌情绪感染模型与干预方法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(12):265–272.
- [13] XIE W, LEE E W M, LI T, et al. A study of group effects in pedestrian crowd evacuation: Experiments, modelling and simulation[J]. *Safety Science*, 2021, 133:105029.
- [14] JONES J E. On the determination of molecular fields. II. from the equation of state of a gas [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1924, 106(738):463–477.
- [15] MORSE P M. Diatomic molecules according to the wave mechanics. II. vibrational levels[J]. *Physical Review*, 1929, 34(1):57–64.
- [16] 徐少军,牛凯,柳雪丽,等. 公路隧道疏散通道设置主要影响因素分析[J]. 工程建设, 2017, 49(7):14–17.