

中文引用格式:邓莎,张竞,李莹,等. 考虑恐慌情绪与拥挤规避行为的疏散模型[J]. 中国安全科学学报,2026,36(4):211-219.

英文引用格式:Deng Sha, Zhang Jing, Li Ying, et al. Evacuation model considering panic and crowding avoidance behavior [J]. China Safety Science Journal, 2026,36(4):211-219.

考虑恐慌情绪与拥挤规避行为的疏散模型*

邓莎¹讲师,张竞²高级工程师,李滢³,陶振翔^{**3}副教授

(1 湖南开放大学 经济管理学院,湖南 长沙 410004; 2 三一汽车制造有限公司,湖南 长沙 410100;

3 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院,北京 100083)

中图分类号:X928.03

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.1114

资助项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3011000);2024年湖南省教育科学“十四五”规划课题项目(XJK24BZY012)。

【摘要】 为探究行人受恐慌驱动与局部高密度区域避让所导致的移动冲突及其对群体疏散效率的影响,考虑行人到出口距离、周围人群密度及情绪感染对个体恐慌情绪的动态影响,以及疏散过程中行人为规避高密度区域的绕行行为以及相互推挤行为,构建恐慌传播模型并在社会力模型(SFM),并引入拥挤规避力与推挤力,提出一种考虑恐慌情绪与拥挤规避行为的人群疏散模型。研究表明:疏散过程中适度的拥挤规避行为可在一定程度上提高疏散效率,但过强的相互作用会放大移动冲突与推挤累积导致踩踏发生;低密度条件下,个体恐慌情绪主要受出口距离影响,拥挤规避力整体较弱,而在高密度条件下,出口距离的主导作用减弱,恐慌情绪传播与人群密度叠加形成密度-情绪耦合反馈,这种耦合反馈显著提高了行人拥挤规避力与推挤强度。疏散过程中,行人最大拥挤规避力峰值呈现先升后降趋势,在疏散中后期高推挤阶段,较大的踝关节扭矩权重可显著降低跌倒风险。

【关键词】 恐慌情绪; 拥挤规避行为; 人群疏散; 社会力模型(SFM); 情绪感染; 行人跌倒

Evacuation model considering panic and crowding avoidance behavior

Deng Sha¹, Zhang Jing², Li Ying³, Tao Zhenxiang³

(1 School of Economics & Management, Hunan Open University, Changsha Hunan 410004, China;

2 Sany Automobile Manufacturing Co., Ltd., Changsha Hunan 410100, China;

3 School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the movement conflicts caused by pedestrians driven by panic and the avoidance of locally high-density areas, as well as their impact on crowd evacuation efficiency, the dynamic effects of the distance of pedestrians to the exit, surrounding crowd density and emotional infection on individual panic were considered. In addition, the detouring behavior of pedestrians to avoid the high-density areas and the mutual pushing behavior during evacuation are incorporated. A panic propagation model was constructed based on SFM, and crowding avoidance force and pushing force were introduced to

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0211-09; 收稿日期:2025-11-14; 修稿日期:2026-02-04

** 通信作者:陶振翔(1990—),男,陕西渭南人,博士,副教授,主要从事消防应急疏散等方面的研究。E-mail: ztao@cumt.edu.cn。

develop a crowd evacuation model considering panic emotion and crowding avoidance behavior. The results indicate that moderate crowding avoidance behavior during evacuation can enhance evacuation efficiency to a certain extent, whereas excessively strong interactions amplify movement conflicts and the accumulation of pushing forces, thereby increasing the risk of stampedes. In low-density evacuation scenarios, individual panic levels are mainly influenced by the distance to exit, and the crowding avoidance force remains relatively weak. In contrast, under high-density situations, the dominant role of exit distance diminishes. The propagation of panic emotions interacts with crowd density to form a “density-emotion” coupled feedback, which significantly increases pedestrian crowding avoidance force and pushing intensity. During evacuation, the maximum crowding avoidance force of pedestrians first increases and then decreases. In the middle and late stages of evacuation, when pushing becomes intense, a larger ankle joint torque weight can significantly reduce the probability of falling.

Keywords: panic; crowd avoidance behavior; crowd evacuation; social force model (SFM); emotional infection; pedestrian falls

0 引言

随着城市化进程的加快,人口不断地向城市高度集中,公共场所开放运营期间普遍面临着高密度人群聚集风险^[1]。在紧急疏散过程中,人员的恐慌情绪极易诱发推搡、超越等非理性行为,尤其在高密度人群环境中,频繁的身体接触、呼吸空间的压缩以及通道拥堵会进一步加剧人群的无序推挤风险^[2]。而拥挤踩踏事故通常具有突发性、高密度性和事故连锁性等特点,导致事故现场行人间微观交互数据难以获取。因此,基于微观仿真研究人群拥挤踩踏行为逐渐受到学者们的关注。

近年来,高密度人群疏散过程中的踩踏及拥挤行为研究取得显著进展。岳昊等^[3]将行人视为具有弹性特性的个体,基于元胞自动机模型研究步行设施内疏散人流拥挤踩踏现象。Huo Feizhou等^[4]在元胞自动机框架下引入拥挤程度、身体支撑力和摩擦力等因素,进一步拓展了对踩踏行为的刻画。此外,研究表明:当行人处于高密度环境并感知到危险时,往往会产生强烈的逃生欲望,并通过绕行或改变行进方向等拥堵规避行为,试图脱离人群^[5]。Helbing等^[6]通过分析德国杜伊斯堡“爱的大游行”音乐节踩踏事件,揭示了高密度人群中因个体规避密集人群而产生的相互移动冲突进而引发拥挤踩踏现象。Chen Changkun等^[7]提出了考虑挤压窒息和拥挤跌倒的元胞自动机模型,来分析高密度场景下行人因移动冲突和拥堵规避引起的挤压对疏散过程的影响。然而,上述研究主要关注几何空间约束与物理力学机制,对于行人在复杂心理状态下的行为差异仍难以充分刻画。事实上,在踩踏事

故引发的疏散过程中,恐慌与焦虑等负面情绪可能迅速在群体中传播,使个体行为失控,进一步加剧事故风险^[2,6]。Zhu Wenjie等^[8]基于社会力模型(Social Force Model, SFM)与Aw-Rascle模型,通过“压力项”量化恐慌行为,动态模拟了紧急疏散踩踏风险。Li Yufei等^[9]基于火灾动力学模拟(Fire Dynamics Simulator, FDS)与元胞自动机的动态耦合模型,研究了恐慌及拥挤跌倒等因素对疏散效率和踩踏风险的影响。然而,恐慌并不仅仅是个体层面的心理反应,还具有群体传播特征。刘婷婷等^[10]考虑了密集踩踏人群中的情绪感染因素,构建了基于心理学原理的人群踩踏仿真模型,研究了情绪传播对群体行为的影响。郭乘麟等^[11]基于大五人格模型(Openness to Experience, Conscientiousness, Extraversion, Agreeableness, Neuroticism, OCEAN)和易感-感染-易感模型(Susceptible Infectious Susceptible, SIS)构建了多模型耦合的情绪感染元胞自动机模型,探讨了恐慌情绪下行人跨越障碍物时绊倒行为对疏散效率的影响。

综上所述,尽管现有研究探究了踩踏以及规避拥挤区域行为对人群疏散的影响,但多数研究假设行人始终保持向出口移动,忽视了疏散中为规避高密度而产生的多向移动及其引发的移动干扰、碰撞与踩踏风险^[12]。此外,现有研究构建的心理模型多为静态模型,在一定程度上难以反映疏散过程中行人心理的动态变化。因此,笔者拟考虑行人到出口距离、周围人群密度和周围人群情绪感染3个参数,构建动态的行人恐慌情绪模型,并在SFM中引入行人推挤力和拥挤规避力,构建考虑恐慌情绪的行人拥挤规避的疏散模型,以期更好地明确行人恐慌情

绪动态变化和拥挤规避力对行人疏散的影响。

1 行人恐慌情绪模型

目前,虽然疏散过程中影响行人恐慌的具体因素会因场景构建的不同而有所差异,但恐慌情绪的形成往往源于多重机制的耦合作用,而非单一因素驱动。在现有恐慌模型构建中,通常会考虑以下几个因素:①出口距离^[13];②局部人群密度^[14];③周围行人情绪状态^[15]。在构建恐慌情绪模型时,综合考虑上述3种因素,以系统刻画其对行人恐慌情绪演化的综合影响。

1) 行人到出口距离引起行人恐慌情绪变化。在疏散过程中,如果行人意识到自身远离出口,可能会因担忧无法及时撤离而产生较强的恐慌情绪。因此,参考 Geng Zhongfei 等^[13]的研究,构建行人与出口之间的距离对恐慌情绪状态的影响见下式:

$$\Delta f_i(D_i, t) = D_i(t-1) \exp\left(-\frac{D_i(t-1)}{d_{\max}}\right) \quad (1)$$

$$D_i(t-1) = \min(d_{ik}(t-1)) \quad k \in 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: $\Delta f_i(D_i, t)$ 为行人 i 在 t 时刻出口的距离引起的恐慌情绪增量; $D_i(t-1)$ 为行人 i 在 $t-1$ 时刻距离最近出口的距离, m; $d_{ik}(t-1)$ 为行人 i 在 $t-1$ 时刻到 k 出口的距离, m; $d_{\max}$ 为场景内距离出口的最大距离, m。

2) 周围人群密度引起恐慌情绪变化在高密度人群中,个体行动受限,可移动的空间受到压缩,且局部空气流通性减弱,行人容易产生被困感和空间感知能力下降的心理。同时,行人与周围人距离过近时,出于自我保护还会产生排斥心理,从而共同加剧其恐慌程度^[14]。因此,由周围人群密度引起的恐慌情绪增量见下式:

$$\rho_i^*(t) = \frac{\rho_i(t)}{\rho_{\max}} \quad (3)$$

$$\rho_i(t) = \frac{N_R}{\pi R^2} \quad (4)$$

式中: $\rho_i^*(t)$ 为行人 i 在 t 时刻周围人群密度引起的情绪增量; $\rho_{\max}$ 为令行人感到不安的人群密度阈值,参考 Pearl^[16]的研究,取 $4 \text{ 人}/\text{m}^2$; $\rho_i(t)$ 为 t 时刻行人 i 周围的行人密度, $\text{人}/\text{m}^2$; R 为密度计算范围,取 2 m ; N_R 为半径为 R 的面积范围内行人数量,人。

3) 周围行人情绪引起恐慌情绪变化。在疏散过程中,个体恐慌情绪状态不仅受其初始情绪水平

影响,还会受到周围人群恐慌情绪传播与群体效应的作用。然而,这种由周围行人情绪带来的影响并非均匀分布,会随着个体之间的距离增加而逐渐衰减。因此,由周围行人情绪感染引发的恐慌情绪变化见下式:

$$Q_i(t) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\sum_{j \in N_R} \frac{E_j(t)}{d_{ij}}\right)} \quad (5)$$

式中: $Q_i(t)$ 为周围行人情绪对于 t 时刻行人 i 影响的恐慌情绪增量; $E_j(t)$ 为行人 j 在 t 时刻的恐慌情绪值; d_{ij} 为行人 i 和 j 的距离, m。

综上所述,综合考虑上述3个因素对影响行人个体情绪的影响,行人的恐慌情绪增量以及恐慌情绪值计算具体见下式:

$$\Delta E_i(t) = \alpha \Delta f_i(D_i, t) + \beta \rho_i^*(t) + \delta Q_i(t) \quad (6)$$

$$E_i(t) = \begin{cases} E_i(t-1) + \Delta E_i(t) & E_i \leq 1 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: α 为出口距离对恐慌情绪影响调节系数,取 0.5 ; β 为周围密度对恐慌情绪影响调节系数,取 0.25 ; δ 为周围行人情绪对恐慌情绪影响的调节系数,取 0.25 ; $\Delta E_i(t)$ 为行人 i 在 t 时刻恐慌情绪增量。

2 考虑恐慌与拥挤规避行为的疏散仿真模型

2.1 基本 SFM

SFM 是由 Helbing 等^[17]提出的一种微观行人行为模型,通过引入力的概念,描述行人运动学机制。具体的模型公式如下:

$$\sum F = m_i \frac{dv_i}{dt} = f_i + \sum_{j(i \neq j)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad (8)$$

式中: m_i 为行人 i 的质量, kg; $v_i^0(t)$ 为行人 i 在 t 时刻期望速度, m/s; $v_i(t)$ 为行人 i 在 t 时刻的实际运动速度, m/s; f_i 为行人 i 的自驱动力, N; f_{ij} 为行人 i 和行人 j 之间的作用力, N; f_{iw} 为行人 i 与墙壁或障碍物 w 之间的作用力, N。式(8)中的各种力的计算公式及模型中参数的设置参考 HELBING 等^[17]的研究。

2.2 改进 SFM 的行人拥挤规避模型

2.2.1 行人推挤力和人群拥挤规避力计算及传递

1) 行人推挤力和人群拥挤规避力。在非理性的高密度人群疏散过程中,由于人群密度过高、个体距离过近,导致彼此身体接触并互相施压,行人之间

容易因争夺有限的移动空间而产生相互推挤力。推挤力的强度通常与行人的情绪状态呈正相关,即情绪越恐慌的个体,其试图迅速脱离危险区域的意图越强烈,所施加的推挤力也越大^[8]。此外,研究表明:在单个队列中,行人相互作用产生的个体拥挤力在单个时间步长内通常介于0~200 N^[7]。行人推挤力公式如下:

$$F_A(i) = E_i(t)\lambda \quad (9)$$

式中: $F_A(i)$ 为行人*i*产生的推挤力,N; λ 为单个行人规避高密度人群时施加的最大作用力,取200 N^[7]。

在人群拥挤环境中,拥挤规避力的产生主要源于行人本能的自保行为。当个体感知到周围密度过高时,会自然产生远离拥挤区域的倾向,这种定向避开了高密度区域的移动行为会对周围人群施加拥挤规避力^[6]。此外,在人群拥挤环境中,拥挤规避力有明显方向性特征。当个体试图移动或逃离拥挤区域时,会向行人想移动方向的前方施加作用力以开辟移动空间。此外,这种拥挤规避力的大小与个体的恐慌情绪、移动意愿以及环境拥挤度呈正相关^[7,9]。此外,个体的拥挤规避力在数值上与其所承受的单个他人的拥挤力相等,但作用方向相反。因此,综上所述,行人拥挤规避力公式表示为:

$$F_B(i) = E_i(t)\lambda\Theta(\rho_i(t) - \rho_{\max}) \quad (10)$$

式中: $F_B(i)$ 为行人*i*的拥挤规避力; $\Theta(x)$ 为阶跃函数,当 $x \geq 0$ 时, $\Theta(x) = 1$,否则 $\Theta(x) = 0$ 。

2) 行人推挤力及拥挤规避力传递。在行人群体中,行人推挤力以及远离高密度人群的拥挤规避力中的力均主要通过接触在人群进行链式传递。然而,由于行人自身弹性特征以及人体缓冲作用,力在传递过程中会存在一定的损失导致传递到下一位行人的力均逐渐衰减。随着推挤力和拥挤规避力在多个相互接触的行人之间层层传递,其强度会不断减弱。此外,推挤力和拥挤规避力的传递方向会受行人分布影响,当力的方向上存在多个行人时,可沿着人群传播,并进行力的分解,但当力的方向上出现障碍物或空隙时,拥挤规避力的传递会被截断,不再继续传递^[3,7]。因此,行人推挤力 $F_A(ij)$ 传递计算见下式:

$$F_A(ij) = F_A(i) \exp\left(\frac{-d_{ij}}{\sigma}\right) f(\theta_{ij}) \quad (11)$$

拥挤规避力 $F_B(ij)$ 传递的计算见下式:

$$F_B(ij) =$$

$$F_B(i) \Theta(\theta_{\max} - \theta_{ij}(t)) \omega_i \exp\left(\frac{-d_{ij}}{\sigma}\right) f(\theta_{ij}) \quad (12)$$

式中: $\theta_{\max}$ 为行人可感知到行人的最大角度,参考王楠等^[18]研究取120°; $\theta_{ij}(t)$ 为*t*时刻行人*i*和*j*之间的角度; $\exp(d_{ij}/\sigma)$ 为行人拥挤规避力随距离逐渐衰减; σ 为拥挤规避力随距离衰减的调整参数,参考岳昊等^[3]研究,取0.5; $f(\theta_{ij})$ 为行人*i*对周围行人施加拥挤规避力分力。

因此,行人*i*受到推挤力和拥挤规避力合力为:

$$F_T(ij) = F_A(ij) + F_B(ij) \quad (13)$$

行人的拥挤规避力方向的计算公式如下:

$$\omega_i = \begin{bmatrix} \omega_{L_1} & \omega_{L_2} & \omega_{L_3} \\ \omega_{L_4} & 0 & \omega_{L_5} \\ \omega_{L_6} & \omega_{L_7} & \omega_{L_8} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\omega_{L_s} = -\frac{\nabla \rho_i}{\|\rho_i\|} \quad s \subseteq (1, 2, \dots, 8) \quad (15)$$

$$\nabla \rho_i = \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial x}, \frac{\partial \rho_i}{\partial y} \right) \quad (16)$$

式中: $\nabla \rho_i$ 为行人密度梯度; L_s 为行人当前位置处第*s*个方向对应的方向量,其中,*s*为行人周围的8个相邻方向,分别对应左前、前、右前、左、右、左后、后、右后; ω_i 为行人密度下降快的方向,也就是行人*i*的拥挤规避力方向。

此外,参考刘秋梅^[19]文中力的分解规则,行人的拥挤规避力可分解为纵向和横向2个方向。因此,不同角度下的拥挤规避力的计算公式如下:

$$f(\theta_{ij}) = \begin{cases} 1 & j = 1 \text{ 且行人 } j \text{ 位于力的方向线上} \\ \cos\theta_{ij} - \frac{\sin\theta_{ij}}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} & j = 1, 2 \\ \cos\theta_{ij} & j = 1 \text{ 且行人 } j \text{ 不在力的方向线上} \end{cases} \quad (17)$$

行人*i*受力计算见下式:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_i + \sum_{j(i \neq j)} f_{ij} + \sum_W f_{iW} + \sum_{j(i \neq j)} F_T(ij) \quad (18)$$

2.2.2 行人移动跌倒判定

参考现有文献判定跌倒行为,当行人所受推挤力超过摩擦力阈值且周围存在空余空间时,可能发生跌倒^[4,7];当踝关节所受扭矩超过最大承受阈值时,关节稳定性被破坏,导致失衡与跌倒^[20];恐慌等

负面情绪会延长反应时间并削弱肌肉协调能力,从而增加行人跌倒风险^[21]。同时,行人跌倒的出现通常是多种因素共同作用的结果^[22],因此,行人跌倒判定公式如下:

$$P_i = \gamma_r \frac{\|F_T(i)\|}{m_i g u} + \xi_z \frac{\|r_x(i)F_T(ix) - r_y(i)F_T(iy)\|}{\tau_{\max}} + \psi_e \exp\left(-\frac{E_i}{E_{\max}}\right) \quad (19)$$

式中: P_i 为行人 i 的跌倒风险值; u 为摩擦因数,参考卓霖等^[23]研究,取 0.5; g 为重力加速度,取值 9.8 m/s²; $r_x(i)$ 和 $r_y(i)$ 分别为合力作用点相对于行人 i 踝关节的位置上 x 轴和 y 轴上的向量分量; $F_T(ix)$ 和 $F_T(iy)$ 分别为作用在行人身上的合力在 x 和 y 轴方向上的分量; $\tau_{\max}$ 为行人的最大扭矩。 γ_r 为周围行人合力作用权重系数,取值 0.5; ξ_z 为个体踝关节扭矩能力权重系数,取值 0.25; ψ_e 为行人反应能力的权重系数,取值 0.25。当 $P_i \geq 1$ 时且推挤方向存在可移动空间时,则判定行人 i 摔倒,否则行人没有跌倒。

3 疏散模型仿真与结果分析

构建一个简单场景来模拟考虑恐慌情绪与拥挤规避行为的人群疏散,如图 1 所示。场景设置为 12 m×12 m,在右墙的中间位置设置 1 个宽 1.5 m 的出口,深灰色圆圈表示正常行人(圆形半径为 0.25 m),黑色椭圆表示跌倒行人(椭圆长轴为 1 m,短轴为 0.5 m)。初始行人数量 $N_n = 350$,疏散开始前行人随机分布在场景内,为减少模拟的误差,每次模拟仿真的结果取 20 次模拟结果平均值。

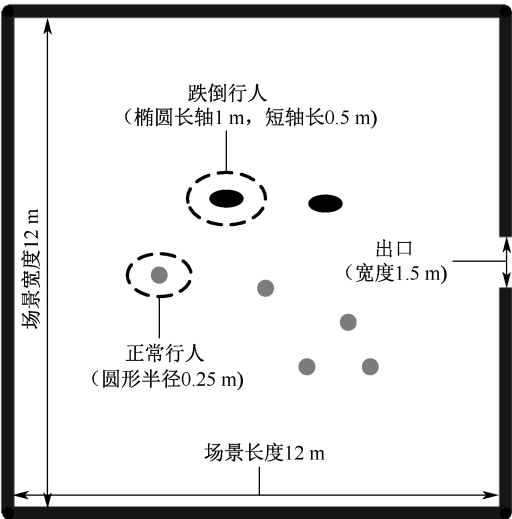


图 1 疏散场景
Fig. 1 Evacuation scenario

3.1 疏散过程分析

图 2 为考虑恐慌传播的行人拥挤规避疏散的不同时刻的疏散场景。从图 2 中可以看出,在疏散初期,行人普遍朝出口方向集中,在出口区域逐渐形成拱形结构。此时由于行人周围区域密度升高,部分行人在恐慌情绪作用下试图避开拥挤区域并向人流较少的方向移动,导致人群中出现移动方向上的“对抗”,引发行人间推挤,在 $t = 17.5$ s 时出现行人跌倒现象。同时,后方行人感知到前方出现跌倒区域后,为规避潜在踩踏风险选择绕行疏散,这也间接导致在跌倒区域后方人群移动方向的不一致,再次引发行人跌倒($t = 21$ s)。此外,由于跌倒行人的阻碍作用,其周围出现低密度或短暂空白区域。同时,随着后方行人因焦虑情绪持续向前推挤,跌倒区域发生连锁反应,人群中出现多米诺骨牌式跌倒现象。

3.2 不同模型下行人疏散效率对比

图 3 为 3 种场景参数下的行人疏散效率对比结果,由图 3 可知:适度引入行人的拥挤规避力在一定程度上可提高疏散效率。主要是因为,行人在疏散过程中为规避踩踏风险,会主动避开高密度区域,转而朝向人流较少的方向移动。这种趋利避害的行为在一定程度上可促成人群自发性的分流,有利于缓解出口拥堵。然而,在高密度人群环境下,如果拥挤规避力的作用过强,由于个体移动方向存在差异,剧烈的身体接触可能引发行人跌倒,进而导致踩踏事故。因此,适度的行人推挤规避在一定程度上有助于提升整体疏散效率,但在高密度环境中,过强的人群中的推挤规避力可能会对人员安全产生不利影响。

3.3 恐慌情绪因素权重对行人疏散效率影响

图 4 为行人到出口距离、周围人群密度以及周围行人恐慌情绪 3 个影响个体的情绪参数的不同权重对行人疏散效率影响的结果。在疏散初期,各参数不同权重下的疏散曲线相似。然而,随着行人向出口靠近,局部区域人群逐渐聚集,密度升高对行人的恐慌情绪干扰作用开始逐渐增强。因此,随着周围人群密度权重 β 及周围行人情绪权重 δ 的增加,个体受情绪干扰程度增加,这进一步导致人群内部相互推挤的作用增强导致完成疏散的人数减少。进一步地,从未疏散人数与疏散时间的箱线图中可以看到,随着出口距离权重 α 的升高,整体疏散时间有所延长,但未能完成疏散的人数呈减少趋势,表明出口距离参数相比于周围人群密度参数以及周围行

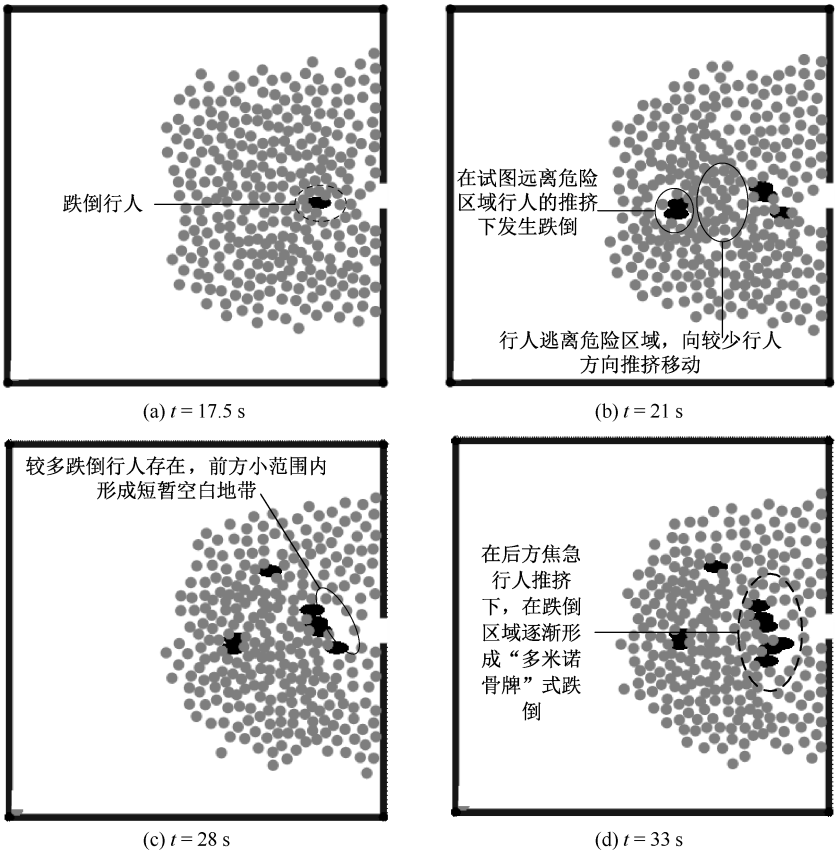


图2 不同时刻下行人疏散场景

Fig. 2 Pedestrians evacuation scenarios at different time

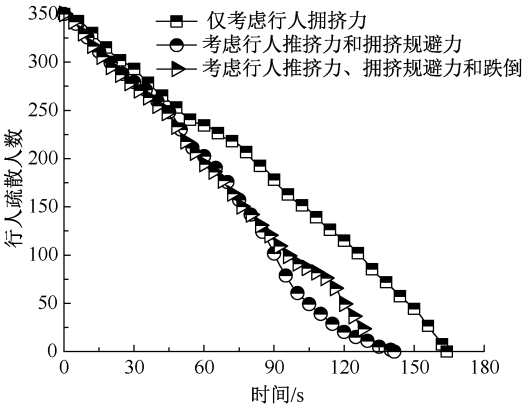


图3 不同模型下行人疏散效率

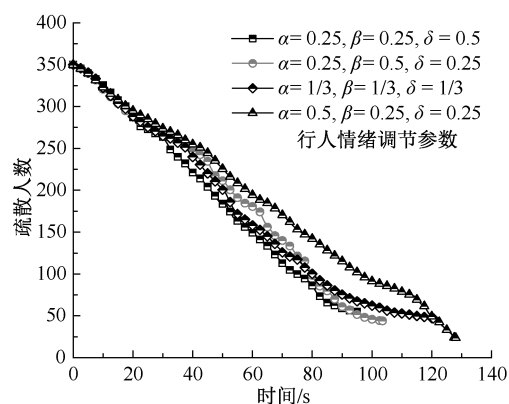
Fig. 3 Pedestrian evacuation efficiency under different models

人恐慌情绪传播参数对行人疏散效率的影响相对较小。此外,在出口距离权重 $\alpha = 0.25$ 条件下,相较于周围人群密度的影响,周围行人恐慌情绪传播所产生的情绪干扰对疏散效率的影响更为显著。

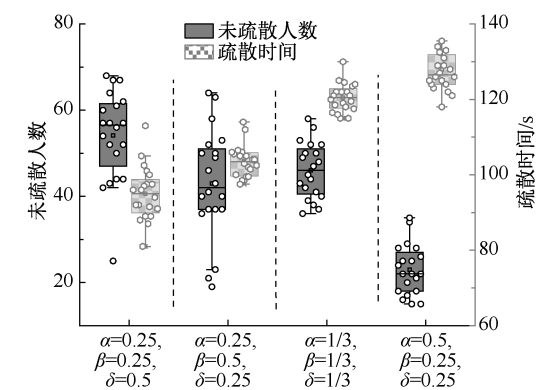
3.4 行人密度和恐慌因素权重对疏散效率影响

图5为在不同初始行人数量条件下,恐慌情绪相关参数权重对行人疏散时间及疏散比例的影响。

从图5a可以看到,在初始人数 $N_n \leq 350$ 时,随着出口距离权重 α 的上升,疏散时间逐渐增加。然而,当初始人数增加至 $N_n = 450$ 时,疏散结果则出现了不同变化,行人到出口距离参数对于行人情绪的影响强度降低。此时,随着周围人群密度权重 β 和行人恐慌情绪传播权重 δ 的增加,疏散时间呈现增长趋势。这主要是因为初始行人数量增加导致单位面积内的密度上升。同时,行人个体聚集效应增强,导致出口区域的通行能力降低,行人疏散难度加剧,再加上周围个体数量增多,行人更容易受周围行人情绪影响。由此形成的这种双重反馈机制,导致行人情绪值不断升高,这也进一步增强了个体之间的推挤作用,导致整体疏散时间显著延长。此外,从图5b的疏散比例曲线看出,当初始行人数量较少 ($N_n \leq 250$ 人) 时,不同恐慌情绪影响参数权重下的疏散比例差异较小,表现出较为一致的疏散行人比例。然而,随着初始行人数量的增加,周围人群密度及恐慌情绪感染对个体情绪状态的影响显著增强,导致行人间的推挤行为愈发频繁,能够顺利完成疏散的行人比例呈现下降趋势。



(a) 不同恐慌因素权重下行人疏散数量随时间关系



(b) 不同恐慌因素权重下未疏散行人数量及疏散时间

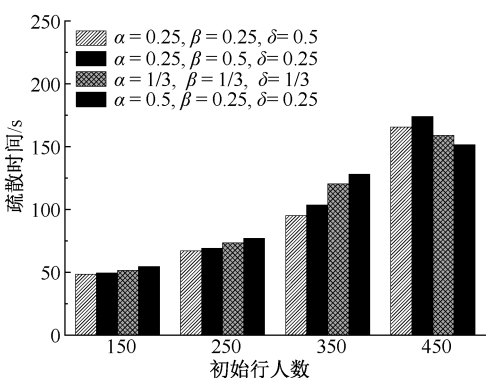
图 4 不同恐慌情绪权重下对行人疏散效率影响
Fig. 4 Effect of different panic weight on pedestrian evacuation efficiency

3.5 行人受到最大拥挤规避力峰值分析

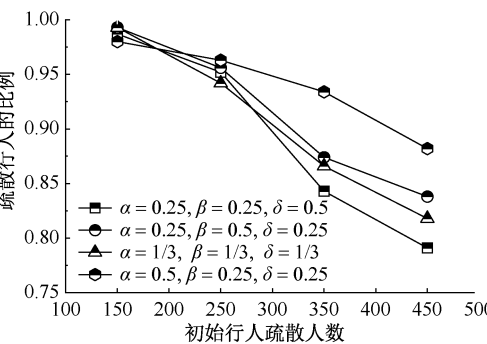
图 6 为行人内部所受最大拥挤规避力峰值随疏散时间的变化趋势。可以看到,随着疏散的进行,行人内部所受到的最大拥挤规避力峰值呈现先上升后下降的趋势。在大约 $t = 6.5\text{ s}$ 之前,场景内行人内部所受到的最大拥挤规避力峰值几乎为 0,这是由于初始时行人随机分布,局部密度较低,人群中并未产生的相互推挤作用力。然而,随着行人向出口积聚,局部区域密度不断上升,导致行人内部所受到的拥挤规避力增强。与此同时,结合图 2 可以看到,随着行人在出口附近形成拱形的拥堵结构,在大约 $t = 17.5\text{ s}$ 时出现行人跌倒事故。此外,随着跌倒事故的不断发生且行人处于高密度环境中,在受到恐慌与焦虑情绪的影响下,行人之间的推挤行为不断加剧,导致整体拥挤规避力持续积聚,使得行人内部所受到拥挤规避力达到全程峰值。此后,随着场景内行人数量减少导致行人的局部密度下降,行人所受最大拥挤规避力也开始逐步下降。

3.6 行人跌倒判定因素权重对疏散效率影响

图 7 为周围行人推挤力和拥挤规避力合力作



(a) 不同初始密度和恐慌调节系数权重下疏散时间



(b) 不同初始密度和恐慌调节系数权重下疏散比例

图 5 不同初始密度和恐慌调节系数对疏散效率影响
Fig. 5 Effects of different initial densities and panic adjustment coefficients on evacuation efficiency

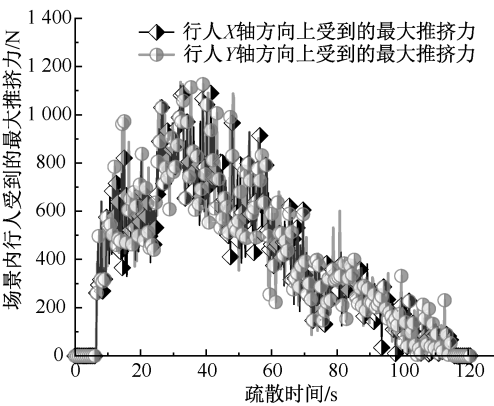


图 6 场景内行人受到最大推挤力峰值随疏散时间变化
Fig. 6 Variation of the peak maximum push force on pedestrians in the scene with evacuation time

用、个体踝关节扭矩能力与行人反应能力这 3 个影响行人跌倒参数在不同权重下对疏散效率的影响。可以看到,与周围行人推挤力和拥挤规避力合力作用和行人自身的踝关节扭矩作用相比,行人反应能力对行人跌倒的影响更为显著,这一情形与现实踩踏事故中的常见现象在一定程度上是一致的,即行人在突发紧急情况下常因惊慌失措而忽视周围环境,反应迟缓,导致难以及时应对周围人群推挤作

用,从而发生跌倒事故。此外,虽然在疏散初期,各参数权重下的疏散效率差异不大,但当行人自身踝关节扭矩权重设为 $\xi_z = 0.5$,在 $t = 65 \sim 84$ s 时,行人表现出相对更快的疏散,主要原因在于较强的踝关节扭矩能力抵抗外部推挤,降低了行人跌倒风险。在此阶段,虽然存在较大的推挤合力,但行人自身可以有效适应这种推挤作用和力。

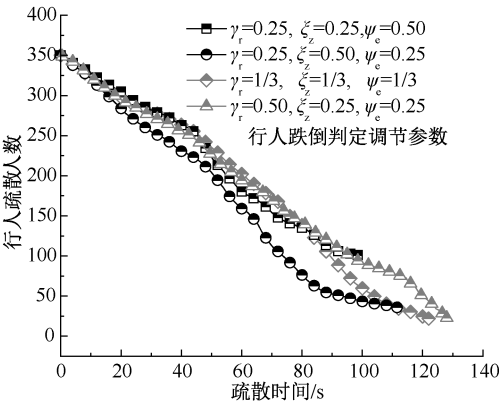


图7 不同行人跌倒判定因素权重下行人疏散效率
Fig.7 Pedestrian evacuation efficiency under different weights of pedestrian fall determination factors

4 结 论

- 1) 适度的拥挤规避行为在一定程度上有助于提升行人疏散效率,但当人群中的相互作用力过强时,容易引发个体间移动方向的冲突,导致推挤与跌倒等现象的发生。
- 2) 在低密度人群疏散中,恐慌情绪参数中的行人到出口距离参数对疏散效率影响较为显著。但在高密度人群疏散中,周围人群恐慌情绪感染与行人可移动空间压缩造成周围密度增大而形成的对行人恐慌情绪影响的双重反馈机制,增强行人间的推挤行为,降低疏散效率。
- 3) 疏散过程行人受到的最大拥挤规避力峰值呈现出先升后降的变化趋势。在高密度人群中,较强的反应能力有助于维持行人行走稳定性。此外,良好的踝关节扭矩能力,即个体的抗干扰能力也能在一定程度上增强行人在拥挤环境中的移动稳态控制,促进个体更快速完成疏散。

参 考 文 献

[1] 刘艺,李茂源,王欣芝,等.大型活动踩踏事故“态-势”情景构建与组合推演方法[J].中国安全科学学报,2024,34(9):183-190.
Liu Yi, Li Maoyuan, Wang Xinzhi, et al. Research on ‘status and trends’ scenario construction and combination deduction method of stampede accident in large-scale activities [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 183-190.

[2] Almeida M, Schreeb J. Human stampedes: an updated review of current literature [J]. Prehospital and Disaster Medicine, 2019, 34(1): 82-88.

[3] 岳昊,刘秋梅,武鑫森.步行设施内疏散行人拥挤踩踏仿真研究[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(3):190-197.
Yue Hao, Liu Qiumei, Wu Xinsen. Simulation of crowding and stampede on evacuation pedestrians in pedestrian facilities [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(3): 190-197.

[4] Huo Feizhou, Li Yufei, Li Chao, et al. An extended model describing pedestrian evacuation considering pedestrian crowding and stampede behavior [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 604: 127 907-127 018.

[5] Gu F, Guiselin B, Bain N, et al. Emergence of collective oscillations in massive human crowds[J]. Nature, 2025, 638(8049):112-119.

[6] Helbing D, Mukerji P. Crowd disasters as systemic failures: analysis of the Love Parade Disaster [J]. EPJ Data Science, 2012, 1(7): 1-40.

[7] Chen Changkun, Lu Tong, Jiao Weibing, et al. An extended model for crowd evacuation considering crowding and stampede effects under the internal crushing [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2023, 625: 129 002-12 9027.

[8] Zhu Wenjie, Zhao Rongyong, Zhang Hao, et al. Panic-pressure conversion model from microscopic pedestrian movement to macroscopic crowd flow[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2023, 18(12): DOI: 10.1115/1.4063505.

[9] Li Yufei, Li Chao, Guo Chenglin, et al. Dynamic coupling model of FDS and cellular automata considering trampling behavior [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2024, 633(1): 129 369–129 389.

[10] 刘婷婷, 刘箴, 柴艳杰, 等. 一种基于心理学模型的人群踩踏情景法 [J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(10): 2 448–2 454.

Liu Tingting, Liu Zhen, Chai Yanjie, et al. Method for crowd trampling and crushing simulation based on psychological model [J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(10): 2 448–2 454.

[11] 郭乘麟, 霍非舟, 李宇飞, 等. 考虑恐慌情绪感染下行人绊倒行为的疏散模型 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(6): 173–179.

Guo Chenglin, Huo Feizhou, Li Yufei, et al. Evacuation model considering tripping behavior of pedestrian under panic emotional infection [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(6): 173–179.

[12] Gayathri H, Aparna P, Verma A. A review of studies on understanding crowd dynamics in the context of crowd safety in mass religious gatherings [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2017, 25: 82–91.

[13] Geng Zhongfei, Li Xingli, Kuang Hua, et al. Effect of uncertain information on pedestrian dynamics under adverse sight conditions[J]. *Physica A:Statistical Mechanics and Its Spplications*, 2019, 521: 681–691.

[14] 邓社军, 虞宇浩, 张俊林, 等. 基于行人恐慌情绪解析的改进社会力模型[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(2): 45–52.

Deng Shejun, Yu Yuhao, Zhang Junlin, et al. Improved social force model based on analysis of pedestrian panic emotion [J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(2): 45–52.

[15] 李佳洋, 唐加福, 郭恩铭. 基于动态情绪驱动的人员应急疏散模型[J]. *东北大学学报:自然科学版*, 2021, 42(11): 1 656–1 662.

Li Jiayang, Tang Jiafu, Guo Enming. Growd emergency evacuation model based on dynamic emotion drive [J]. *Journal of Northeastern University:Natural Science*, 2021, 42(11): 1 656–1 662.

[16] Pearl T. Crowd crush: how the law leaves American crowds unprotected[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2015, 104(1): DOI:10. 2139/ssrn. 2569373.

[17] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487–490.

[18] 王楠, 王月, 石献琼. 计算机辅助设计[M]. 杭州: 中国美术学院出版社. 2019:128.

[19] 刘秋梅. 步行设施内疏散行人拥挤踩踏仿真与预防研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.

Liu Qiumei. Research on simulation and prevention of stampede in congestion evacuation in pedestrian facilities [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[20] Xie Kefan, Yu Song, Liu Jia, et al. Stampede prevention design of primary school buildings in china: a sustainable built environment perspective[J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2018, 15(7): DOI: 10. 3390/ijerph15071517.

[21] Schepers P, Den B, Methorst R, et al. Pedestrian falls: a review of the literature and future research directions [J]. *Journal of Safety Research*, 2017, 62(9): 227–234.

[22] Sucha M, Sragova E, Suriakova B, et al. Self-reported pedestrian falls in 15 countries worldwide[J]. *Transportation Research part F-Traffic Psychology and Behaviour*, 2024, 105: 267–283.

[23] 卓霖, 刘婷婷, 刘箴, 等. 疏散出口附近的人群踩踏仿真分析 [J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(11): 234–241.

Zhuo Lin, Liu Tingting, Liu Zhen, et al. Simulation analysis of crowd stampeding near evacuation exit[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(11): 234–241.

作者简介: 邓莎 (1983—),女,湖南长沙人,硕士,讲师,主要从事公共安全管理、应急疏散管理、人力资源管理等方面的研究。E-mail: 342844944@qq. com。

