

8-25-2023

## Pedestrian Evacuation Model Considering Emotional Infection

Fan Dong

*College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China,  
dongfan0820@163.com*

Qimiao Xie

*College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China,  
qmxie@shmtu.edu.cn*

Xiaolian Li

*Public Security Department, Fujian Police College, Fuzhou 350007, China*

Shuchao Cao

*School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Pedestrian Evacuation Model Considering Emotional Infection

### Abstract

**Abstract:** To explore the role of panic in crowd evacuation, a crowd evacuation model considering panic infection is constructed based on SIR model, SIS model and CA model. The influences of emotional threshold and emotional decay rate on the evacuation process of pedestrians are discussed. The results show that pedestrians under high panic might lose rational judgment and hinder the evacuation of the crowd around, resulting in a decrease of evacuation efficiency. It can be found that the state of an individual depends on the infection threshold and the immune threshold. The emotional decay rate affects the change rate of the individual state, and there is a critical value that determines the spread or decay of emotion.

### Keywords

cellular automata, SIR model, panic, evacuation model, emotional contagion

### Recommended Citation

Dong Fan, Xie Qimiao, Li Xiaolian, et al. Pedestrian Evacuation Model Considering Emotional Infection[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(8): 1717-1725.

## 考虑情绪感染的人员疏散模型研究

董凡<sup>1</sup>, 谢启苗<sup>1\*</sup>, 李晓恋<sup>2</sup>, 曹淑超<sup>3</sup>(1. 上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306; 2. 福建警察学院 治安系, 福建 福州 350007;  
3. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 为了探讨恐慌情绪在人群疏散中的作用, 将 SIR 和 SIS 情绪感染模型相结合, 并在 CA 模型的基础上构建了一种考虑恐慌情绪感染的人群疏散模型。讨论了情绪阈值和情绪衰减速率对行人疏散过程的影响规律。研究表明: 与未考虑恐慌情绪的疏散模型相比, 高度恐慌下的行人会失去理性判断并占据他人疏散路径, 导致自身和周围个体疏散效率下降, 整体疏散时间延长。通过研究情绪阈值对疏散效率的影响, 发现感染阈值与免疫阈值共同确定个体状态。情绪衰减速率影响个体状态变化速率, 且存在一个决定情绪蔓延或衰减的临界值。

**关键词:** 元胞自动机; SIR 模型; 恐慌; 疏散模型; 情绪感染

中图分类号: X932; TP391 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)08-1717-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0490

**引用格式:** 董凡, 谢启苗, 李晓恋, 等. 考虑情绪感染的人员疏散模型研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(8): 1717-1725.

**Reference format:** Dong Fan, Xie Qimiao, Li Xiaolian, et al. Pedestrian Evacuation Model Considering Emotional Infection[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(8): 1717-1725.

## Pedestrian Evacuation Model Considering Emotional Infection

Dong Fan<sup>1</sup>, Xie Qimiao<sup>1\*</sup>, Li Xiaolian<sup>2</sup>, Cao Shuchao<sup>3</sup>

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Public Security Department, Fujian Police College, Fuzhou 350007, China; 3. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** To explore the role of panic in crowd evacuation, a crowd evacuation model considering panic infection is constructed based on SIR model, SIS model and CA model. The influences of emotional threshold and emotional decay rate on the evacuation process of pedestrians are discussed. The results show that pedestrians under high panic might lose rational judgment and hinder the evacuation of the crowd around, resulting in a decrease of evacuation efficiency. It can be found that the state of an individual depends on the infection threshold and the immune threshold. The emotional decay rate affects the change rate of the individual state, and there is a critical value that determines the spread or decay of emotion.

**Keywords:** cellular automata; SIR model; panic; evacuation model; emotional contagion

## 0 引言

行人与疏散动力学的实验和模拟研究有了极大的进展<sup>[1-6]</sup>。目前常见的疏散模型主要有宏观模型和微观模型 2 种。其中, 元胞自动机模型作为

行人疏散动力学研究的一种重要方法, 因其建模方便、计算效率高等特点<sup>[7]</sup>, 得到广泛应用<sup>[8-10]</sup>。

情绪对个人的决策起着重要作用<sup>[11]</sup>。行人在遇到非常规突发事件时易出现恐惧及不理智行为。

收稿日期: 2022-05-12

修回日期: 2022-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(52004158, 71503166, 72001095); 中国博士后科学基金(2020M681507)

第一作者: 董凡(1998-), 女, 硕士生, 研究方向为人员疏散。E-mail: dongfan0820@163.com

通讯作者: 谢启苗(1986-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为公共安全与应急管理。E-mail: qmxie@shmtu.edu.cn

负面情绪的传播速度极其快速，不仅影响个体自身行为，还通过情绪感染对其他个体产生影响，进而影响其他个体的行为。因此，研究恐慌情绪对行人运动的影响，具有重要意义。

Wang等<sup>[12]</sup>通过调查问卷，对地铁突发事件中疏散人群的恐慌心理和行为进行调查，指出女性比男性更容易恐慌。Zhang等<sup>[13]</sup>以恐慌小鼠为出口实验对象，分析了逃逸模式、平均流量、密度及疏散时间的演化特征。Hong等<sup>[14]</sup>利用涟漪扩散原理，结合行人运动特征建模，研究了恐慌心理在行人中的扩散问题。Varas等<sup>[15]</sup>基于元胞自动机模型引入恐慌参数，考虑行人会因过度恐慌而停止运动，研究出口数量对于疏散时间的影响。

传染病模型和人群仿真模型广泛用于描述具体场景中情绪的传播。凤四海等<sup>[16]</sup>采用基于热力学原理的情绪传染模型与元胞自动机疏散模型相结合的方法，模拟疏散人群中的恐慌情绪感染。在SIS模型的基础上，Niu等<sup>[17]</sup>构建了基于行人疏散策略的演化模型并发现行人在小范围内进行人群疏散时倾向于选择合作策略。陈长坤等<sup>[18-19]</sup>等把元胞自动机和SIS模型相结合，对恐慌情绪中人群疏散模型进行了研究，结果显示恐慌情绪会对疏散效率产生影响。吴杰新等<sup>[20]</sup>构建了个性化P-SIR情绪感染模型来模拟群体恐慌行为演变过程，并设定了无介入、管理员介入和使用设备介入情境开展了计算仿真实验。Xiang等<sup>[21]</sup>通过使用计算低层次运动参数的社会力和用于产生情感影响的SIR模型来模拟动态行人聚集。认为SIR模型能够有效提高情感交互过程和人群聚集的逼真度。Fu等<sup>[22]</sup>用改进CA-SIRS模型对情感传染进行了仿真研究。研究发现，特定系统内初始感染个体所占比例对于感染人群最终占比的影响较小，感染率随着平均人群密度升高而升高。

综上所述，恐慌情绪在人群中的传播会对行人的行为产生重要影响，但在考虑情绪因素的疏散行为方面的研究仍具有局限性，难以定量描述

平静与恐慌之间的心理转变。在突发事件中，如感知到火灾时，有人会产生恐惧，有人不会恐惧<sup>[22-23]</sup>，个体所表现出来的情绪反应和认知能力存在差异性。情绪蔓延过程同样具有循环效应，个体状态可能会发生转变<sup>[23]</sup>。SIS与SIR模型均无法准确刻画情绪演化规律。因此，本文考虑一种基于SIS和SIR的组合模型定义个体情绪状态，结合上海豫园九曲桥持续转角处行人的行走特性，利用CA方法在场域模型基础上构建了考虑恐慌的行人决策模型。与未考虑恐慌情绪的行人疏散模型进行比较，并讨论了情绪阈值和情绪衰减速率对疏散结果的影响规律。

## 1 人员疏散模型

### 1.1 元胞自动机模型

采用Moore型邻域的二维元胞自动机方法，每一个元胞的大小为50 cm×50 cm，空间内每个元胞为空或有且仅被1个行人占据。行人可以向8个方向移动或选择原地不动，具体移动方向如图1所示。

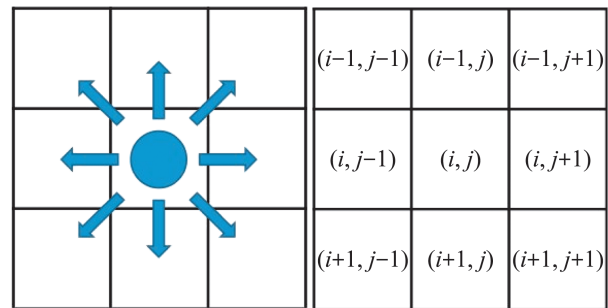


图1 元胞自动机模型  
Fig. 1 Cellular automata model

模型中每个元胞坐标用 $(i, j)$ 表示，每位行人向元胞 $(i, j)$ 转移的概率由 $P_{ij}$ 决定。正常情况下行人根据概率 $P_{ij}$ 做出路径最佳选择：

$$P_{ij} = N \exp(k_S S_{ij}) \exp(k_D D_{ij}) (1 - n_{ij}) \alpha_{ij} \quad (1)$$

式中： $N$ 为归一化系数； $S_{ij}$ 和 $D_{ij}$ 为其静态场域和动态场域； $k_S$ 和 $k_D$ 为其系数； $\alpha_{ij}$ 为类型参数，若下一个时刻目标的元胞为障碍物，则 $\alpha_{ij}=0$ ，否则

$\alpha_{ij}=1$ ;  $n_{ij}$  为状态参数, 若下一时刻目标的元胞有行人占据, 则  $n_{ij}=1$ , 否则  $n_{ij}=0$ 。

九曲桥游客在游览的过程中不断向出口转移, 在上述元胞自动机模型中, 用静态距离势场  $S_{ij}$  反映了通道内各个元胞  $(i, j)$  与出口之间的距离, 离出口距离越近, 元胞  $(i, j)$  的静态吸引力越大, 其计算式为<sup>[24]</sup>

$$\begin{cases} S_{ij}=r_{\max}-r_{ij} \\ r_{ij}=\sqrt{(x-x_{ij})^2+(y-y_{ij})^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $r_{\max}$  为疏散区域内元胞到出口的最大距离;  $r_{ij}$  为元胞  $(i, j)$  到出口的距离;  $x$  和  $y$  为出口坐标;  $x_{ij}$  和  $y_{ij}$  为元胞  $(i, j)$  坐标。

行人在移动过程中容易受到群体影响而选择同大多数个体相同的行走策略, 故用动态势场  $D_{ij}$  表示元胞  $(i, j)$  受周围人员密度的影响<sup>[25]</sup>:

$$D_{ij}=\rho/\omega \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为个体领域的元胞数;  $\rho$  为该领域内的总人数。

## 1.2 情绪感染模型

### 1.2.1 经典传染病模型

传统的传染病模型主要有 SIS 和 SIR 模型 2 种。考虑恐慌情绪传播的特性, 将 SIR 模型与 SIS 模型相结合<sup>[26]</sup>, 即情绪传播过程中, 一部分行人能够实现情绪免疫, 另一部分行人则会在情绪易感者与感染者之间发生转换。其微分系统动力学方程如式(4)所示, 状态转移如图 2 所示。

$$\begin{cases} S+I+R=N \\ \frac{dI}{dt}=\zeta SI-\gamma I-cI \\ \frac{dS}{dt}=-\zeta SI+cI \\ \frac{dR}{dt}=\gamma I \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $S$  为易感者;  $I$  为感染者;  $R$  为免疫者;  $N$  为人员总数;  $\zeta$  为接触传染率;  $\gamma$  为治愈率;  $c$  为无免疫传染率。

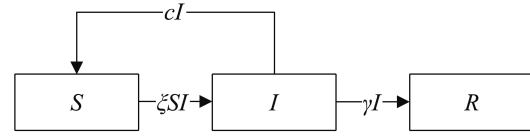


图 2 状态转移

Fig. 2 Status transfer diagram

### 1.2.2 情绪感染机制

感染者为恐慌情绪的传播者, 易感者是恐慌情绪的接收者, 免疫者不受恐慌情绪干扰。感染者和易感者之间可互相转化。

初始恐慌参数  $p(0 < p < 1)$  通过正态分布函数来确定:

$$p \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为正态分布函数的均值, 取 0.5;  $\sigma^2$  为其方差, 设为 0.1。

传播过程中感染者、易感者、免疫者之间存在状态转变, 将状态的临界值定义为情绪免疫阈值  $\theta$  和感染阈值  $\delta$ , 如表 1 所示。

表 1 情绪阈值  
Table 1 Emotional threshold

情感值	状态
$0 < p < \theta$	免疫者
$\theta \leq p < \delta$	易感者
$\delta \leq p < 1$	感染者

当个体恐慌值超过感染阈值  $\delta$  时, 行人陷入高度恐慌状态并有更大概率做出非理性行为。具体某时刻的恐慌情绪  $(\theta < p < 1)$  为

$$p_{t+1}=\min(p_t-p_d+\lambda \sum_{S < R_p} p e_t+\tau, p_{\max}) \quad (6)$$

式中:  $p_{t+1}$  为非免疫个体在  $t+1$  时刻的恐慌值;  $p_t$  为非免疫个体在  $t$  时刻的恐慌值;  $p_d$  为  $t \sim t+1$  时刻间的衰减值;  $R_p$  为感染半径;  $p e_t$  为感染者的恐慌值;  $\lambda$  为感染者的恐慌情绪传递参数;  $\tau$  为随机波动值;  $p_{\max}$  为感染区间内的情绪最大值。个体的情绪感知范围定义为个体坐标为中心, 半径为  $R$  的圆, 元胞离散化后近似为边长  $2R$  的正方形<sup>[19]</sup>。

个体的恐慌情绪不仅存在自衰减, 而且在行走过程中会随着行人距出口的距离发生衰减, 在

靠近出口时衰减更加明显<sup>[18,27]</sup>。恐慌情绪的衰减值为

$$p_d = p\beta + [1 - 1/(1 + e^{-d})] \quad (7)$$

式中： $\beta$ 为情绪调节因子； $d$ 为当前时刻个体到出口的距离。

## 2 模型应用及分析

应用MATLAB对处于恐慌状态下的行人进行疏散仿真，场景为上海豫园九曲桥，网格布局按实际尺寸近似取整。如图3所示，将九曲桥划分为一个 $57 \times 45$ 的二维网格。两端为出入口。行人数据根据景区游客实际平均密度分布，向上取整在区域内共设置157人<sup>[28]</sup>。假定感染者的情绪增加速率 $\lambda$ 为0.1，情绪衰减速率 $\beta$ 为0.1，感染半径 $R_p$ 为2，免疫阈值 $\theta$ 为0.1，感染阈值 $\delta$ 为0.7，为了减少实验数据的偶然性，仿真次数为100次。

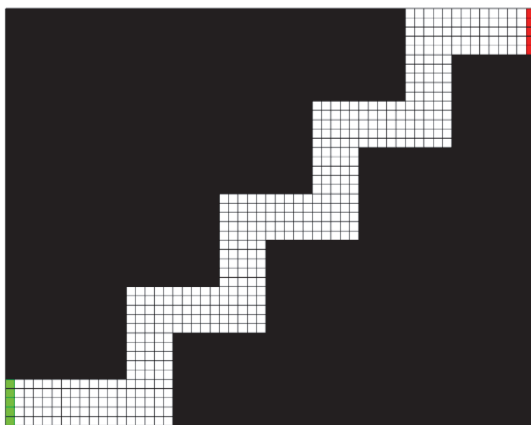


图3 九曲桥网格图

Fig. 3 Grid diagram of Zigzag Bridge

模型基本演化步骤如下。

step 1: 随机初始化人员位置、恐慌情绪参数正态分布、人员设置参考实际观测实验中的人员分布密度情况；

step 2: 根据静态和动态势场、恐慌参数、可行邻域计算行人运动方向；

step 3: 根据情绪感染和衰减模型，计算行人的恐慌参数；

step 4: 当个体为非恐慌情绪感染者时，行人

做出理性策略，当个体为恐慌情绪感染者时，行人在可行邻域内做随机运动；

step 5: 场景内所有人员根据相应的Moore型邻域开始疏散，更新行人位置；

step 6: 当行人移动到出口时，下一个时间步该行人离开系统；

step 7: 重复step 2~6，直到所有人员均离开仿真区域，进程结束。

### 2.1 恐慌情绪对行人状态的影响

为探究恐慌情绪与疏散时间之间的关系，模拟了考虑行人恐慌情绪和不考虑行人恐慌情绪2种情形的行人疏散情况，如图4所示。总体上考虑恐慌情绪时，行人疏散时间更长。在考虑恐慌情形时，100次模拟的行人疏散时间均值为135.97 s，而在未考虑恐慌情形下行人疏散时间均值则为107.06 s，两者差值为28.91 s。可见恐慌情绪下会对行人判断产生影响，在一定程度上会降低行人疏散效率，这与陈长坤等<sup>[18-19]</sup>的结论一致。

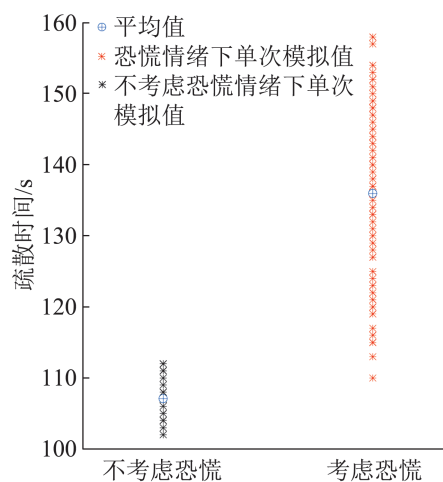


图4 考虑恐慌和不考虑恐慌情况下疏散时间对比  
Fig. 4 Evacuation time with and without panic

记录行人在网格区域内的位置信息，可获得每个行人的轨迹。该模型路段上行人叠加运动轨迹如图5所示。由于受到从众及寻找最短路径心理等因素的影响，2种情形下行人均存在靠拐角处

内侧行走的倾向, 而拐角外侧区域并没有被充分利用。考虑恐慌情绪影响下的行人轨迹交错更明显, 统计不同状态下行人经过的元胞数, 如图 6 所示。在考虑恐慌情绪情况下, 行人经过的元胞数最大为 69, 平均经过元胞数为 57.8; 不考虑恐慌情绪情况下, 行人经过的元胞数最大为 55, 平均经过元胞数为 52.2。行人在恐慌情绪的影响下, 易出现非理性行为和行走状态的不稳定性。这不仅会对自身疏散效率造成影响, 而且还会占用其他人的最佳疏散路径, 造成群体疏散效率的下降。

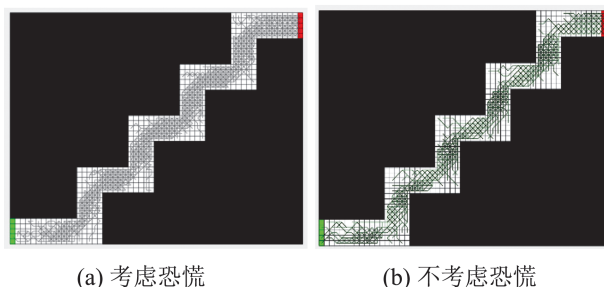


图 5 考虑恐慌和不考虑恐慌情况下行人轨迹  
Fig. 5 Pedestrian trajectories with and without panic

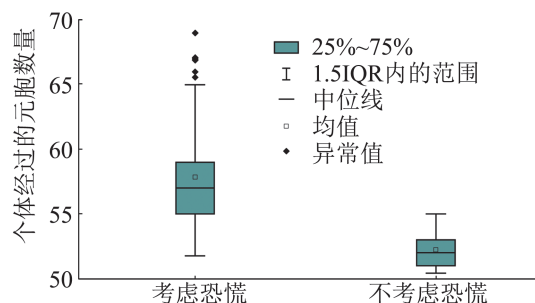


图 6 考虑恐慌和不考虑恐慌情况下行人经过元胞数  
Fig. 6 Number of cells passed by pedestrians with and without panic

在模拟过程中, 根据不同时刻的行人分布绘制其密度分布图, 如图 7~8 所示。行人流局部密度最大值主要分布于转角内侧区域, 为行人流拥堵的高发区, 而其他位置行人流密度分布相对比较均匀。未考虑恐慌的行人会在理性判断下朝着出口方向移动, 优先选择最短路径, 因此, 行人密度的分布更加集中。在恐慌情绪作用下, 部分行人会失去理性判断, 从而在区域内做随机运动, 在某种程度上分流了高密度地区, 因此, 在路段后半段, 不考虑恐慌情绪的行人高密度区域较大。

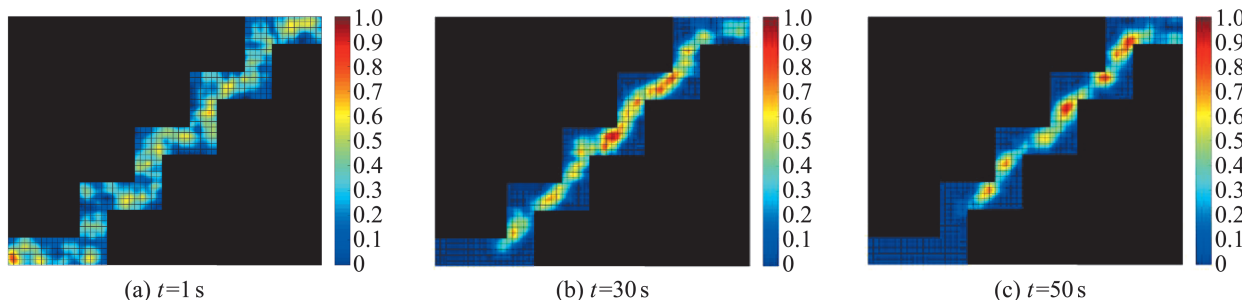


图 7 考虑恐慌情绪下不同时刻的行人密度分布  
Fig. 7 Distribution of pedestrian density at different time periods with panic

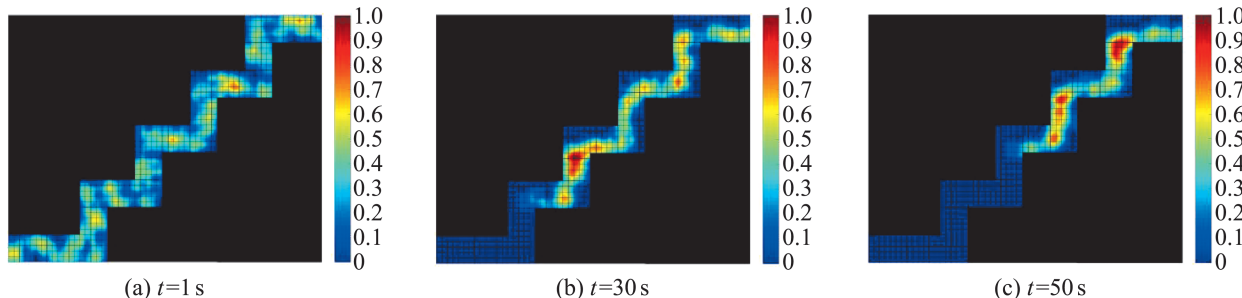


图 8 不考虑恐慌情绪下不同时刻的行人密度分布  
Fig. 8 Distribution of pedestrian density at different time periods without panic

## 2.2 情绪阈值对疏散效率的影响

情绪阈值对疏散时间的影响如图9所示，疏散时间为不同情绪阈值下多次仿真的平均结果。假定免疫阈值 $\theta$ 恒为0.1时，随着感染阈值 $\delta$ 的增加，群体中感染者人数下降，疏散时间随之缩短，最终稳定在115 s。当感染阈值 $\delta$ 较低时，有更多的行人陷入高度恐慌状态，不能维持理性行为来选择合适的疏散路径，从而极大地延长了疏散时间。当感染阈值 $\delta > 0.8$ 后，疏散时间几乎趋于稳定，这是由于大多数个体恐慌值都小于感染者情绪的临界值，行人行为较为理性。

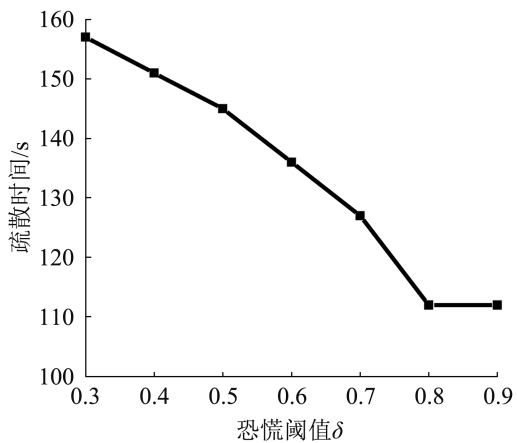


图9 感染阈值 $\delta$ 对疏散时间的影响  
Fig. 9 Effect of panic threshold  $\delta$  on evacuation time

当感染阈值 $\delta$ 恒为0.7时，疏散时间随着免疫阈值 $\theta$ 的升高呈下降趋势，如图10所示。免疫者不受感染者的影响，在某种程度上屏蔽了恐慌情绪的蔓延。群体中的免疫者人数越多，恐慌情绪被阻断，传播速度越慢，较多个体能够根据自己的最优策略疏散。当免疫阈值 $\theta$ 达到0.6后，大多数人员是免疫者，不受恐慌情绪的影响，故疏散时间较为稳定。

不同感染阈值 $\delta$ 下恐慌人数与时间的关系如图11所示。免疫阈值设为0.1，情绪增加速率 $\lambda$ 设为0.1，情绪衰减速率 $\beta$ 设为0.1。当感染阈值 $\delta$ 在0.4~0.7之间时，恐慌人数随时间的变化趋势比较一致，都是先增加后减少。感染阈值越小，行走过程中恐慌人数越多，造成恐慌行为加剧，从而

影响了疏散效率。感染阈值 $\delta$ 变大，尤其是在感染阈值高于绝大部分个体的情绪值时，恐慌情绪不会大范围蔓延。

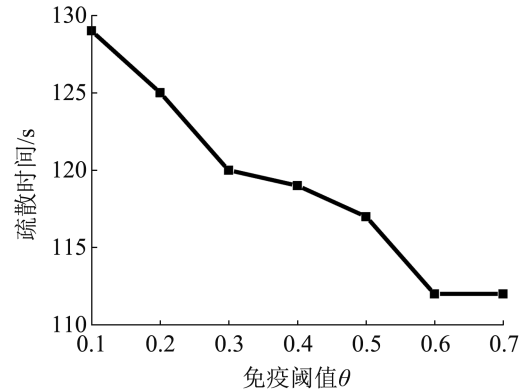


图10 免疫阈值 $\theta$ 对疏散时间的影响  
Fig. 10 Effect of immune threshold  $\theta$  on evacuation time

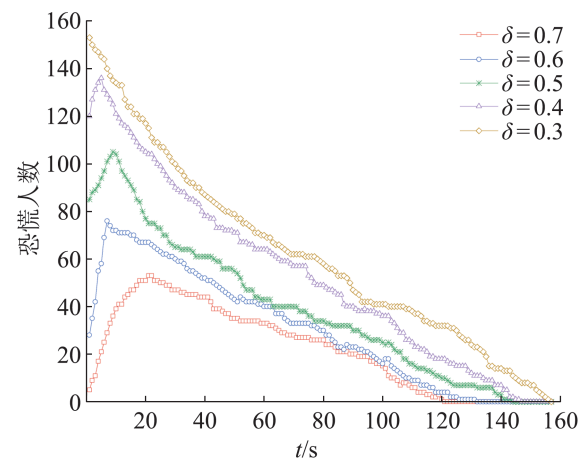


图11 不同感染阈值 $\delta$ 下恐慌人数随时间变化情况  
Fig. 11 Different infection threshold  $\delta$ , change of panic number with time

不同免疫阈值 $\theta$ 下恐慌人数随时间变化情况如图12所示。感染阈值 $\delta$ 设为0.6，初始感染者人数约25人，情绪增加速率 $\lambda$ 设为0.1，情绪衰减速率 $\beta$ 设为0.1。免疫阈值 $\theta$ 在0.1~0.4时，受感染者影响，恐慌人数随免疫阈值 $\theta$ 的升高而呈现先上升后下降的趋势，免疫阈值 $\theta$ 越小，行走过程中增加的感染者人数越多。当免疫阈值 $\theta$ 在0.5~0.6时，人群中除了感染者以外几乎都是免疫者，从而不会受到恐慌情绪的影响，故恐慌人数呈下降趋势，免疫阈值 $\theta$ 越大，恐慌人数减少速率越快。



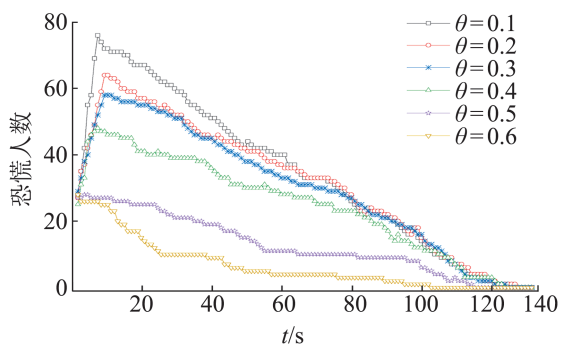


图12 不同免疫阈值 $\theta$ 下恐慌人数随时间变化情况  
Fig. 12 Different immune threshold  $\theta$ , change of panic number with time

### 2.3 情绪衰减速率对疏散时间的影响

在行走过程中,受感染者影响,恐慌情绪向人群蔓延,使个体的恐慌值增加。此外,情绪自身会发生衰减。情绪衰减也是影响行人能否正确选择疏散路径的重要因素。设免疫阈值 $\theta=0.1$ ,感染阈值 $\delta=0.7$ ,情绪增加速率 $\lambda=0.1$ 。不同情绪衰减速率下,人均恐慌值随时间的变化情况如图13所示。在情绪衰减速率 $\beta \leq 0.1$ 的条件下,随着时间的增加,人均恐慌值呈现先增大后减小的趋势。这是由于在情绪衰减速率较低的情况下,个体接收周围感染者转移的情绪值比自身衰减值更大,个体的状态主要受周围感染者情绪转移的影响。在情绪衰减速率 $\beta > 0.1$ 的条件下,人均恐慌值逐渐降低。这是由于情绪衰减速率越大,恐慌值增加速率小于情绪衰减速率时,个体恐慌值降低,高度恐慌的人数降低,故行人能够做出更加合理的路径选择。

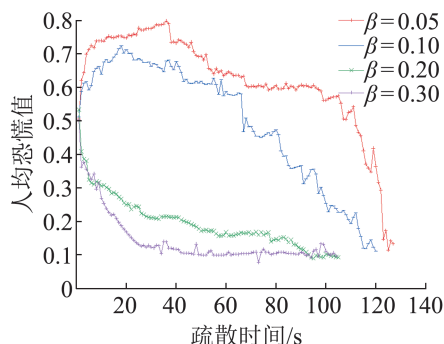


图13 不同情绪衰减速率人均恐慌值随疏散时间变化情况  
Fig. 13 Under different emotional decay rates, per capita panic changes with evacuation time

## 3 结论

将SIR模型与SIS模型相结合,以元胞自动机模型为基础,构建了九曲桥连续拐角情境下考虑行人恐慌情绪的疏散模型,结论如下:

(1) 恐慌情绪是行人疏散运动过程中的一个重要因素,会影响行人判断,使其疏散效率下降,从而导致总体疏散时间延长。在考虑恐慌情绪的人员疏散模型中,行人轨迹的分布范围更广、交错更加明显、通过元胞数更多。这是由于恐慌情绪使部分行人路径选择非理性,行走状态不稳定。

(2) 情绪阈值会对疏散时间以及个体状态产生影响。疏散时间随着感染阈值 $\delta$ 的升高而逐渐缩短,恐慌人数也呈现出先增加后降低的趋势。感染阈值 $\delta$ 越高,具有高度恐慌情绪的人数越少,疏散时间也越短。

(3) 感染阈值 $\delta$ 恒定,疏散时间随免疫阈值 $\theta$ 的增加而逐渐缩短。当免疫阈值 $\theta$ 达到某一临界值,疏散时间基本保持不变。免疫阈值 $\theta$ 越低,恐慌人数峰值越高,当 $\theta$ 达到0.5时,群体中免疫者对恐慌情绪的扩散起到阻挡作用,恐慌人数逐渐减少,初始恐慌人数即为峰值。

(4) 情绪衰减速率对行人疏散起着至关重要的作用,在恐慌值上升速率大于情绪衰减速率的情况下,群体人均恐慌值先增长后下降。当情绪衰减速率超过恐慌值增加速率时,恐慌人数在短时间内便可减少,人均恐慌值呈现下降趋势,此时行人可以在理性状态下疏散。

本研究有助于管理者了解在连续转角处由个体情绪引起的行人运动状态的变化情况,掌握行人疏散过程中情绪的动态变化趋势。为进一步制定科学有效地疏散策略提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 周金旺, 邝华, 刘慕仁, 等. 成对行为对行人疏散动力学的影响研究[J]. 物理学报, 2009, 58(5): 3001-3007.  
Zhou Jinwang, Kuang Hua, Liu Muren, et al. Paired Behavior Effect on Pedestrian Evacuation Dynamics[J].

- Acta Physica Sinica, 2009, 58(5): 3001-3007.
- [2] 张立红, 陈海涛, 杨鹏, 等. 心理迫切因素对行人疏散动力学的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(6): 79-84.  
Zhang Lihong, Chen Haitao, Yang Peng, et al. Study on Influence of Psychological Urgency Parameter on Pedestrian Evacuation Dynamics[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(6): 79-84.
- [3] 张俊, 李红柳, 宋卫国. 基于实验的行人与疏散动力学规律研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(12): 947-956.  
Zhang Jun, Li Hongliu, Song Weiguo. Experimental Study on Pedestrian and Evacuation Dynamics[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019, 49(12): 947-956.
- [4] Li Xiaolian, Ye Rui, Fang Zhiming, et al. Uni-and Bidirectional Pedestrian Flows Through Zigzag Corridor in a Tourism Area: A Field Study[J]. Adaptive Behavior, 2021, 29(3): 281-296.
- [5] Luo Lin, Fu Zhijian, Cheng Han, et al. Update Schemes of Multi-velocity Floor Field Cellular Automaton for Pedestrian Dynamics[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 491: 946-963.
- [6] Zhou Ru, Cui Yinkai, Wang Yan, 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.
- [7] 宋卫国, 于彦飞, 范维澄, 等. 一种考虑摩擦与排斥的人员疏散元胞自动机模型[J]. 中国科学E辑(工程科学 材料科学), 2005, 35(7): 725-736.  
Song Weiguo, Yu Yanfei, Fan Weicheng, et al. A Cellular Automata Model of Personnel Evacuation Considering Friction and Exclusion[J]. Science in China Series E (Engineering & Materials Science), 2005, 35(7): 725-736.
- [8] 吕伟, 汪京辉, 房志明, 等. 基于介观元胞自动机的城市区域人员疏散模拟方法[J]. 物理学报, 2021, 70(10): 76-84.  
Lü Wei, Wang Jinghui, Fang Zhiming, et al. Simulation Method of Urban Evacuation Based on Mesoscopic Cellular Automata[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(10): 76-84.
- [9] 李伟, 张鑫龙. 考虑个体行为的改进CA模型人员疏散研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(17): 275-282.  
Li Wei, Zhang Xinlong. Research on Pedestrian Evacuation Considering Individual Behavior Based on Improved CA Model[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(17): 275-282.
- [10] 宋英华, 张宇, 霍非舟, 等. 考虑避让行为的人员疏散元胞自动机模型研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(6): 975-981.  
Song Yinghua, Zhang Yu, Huo Feizhou, et al. Study on Evacuation Cellular Automaton Model Considering Avoidance Behavior[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(6): 975-981.
- [11] Wang Jinghong, Lo S M, Sun Jinhua, et al. Qualitative Simulation of the Panic Spread in Large-scale Evacuation[J]. Simulation, 2012, 88(12): 1465-1474.
- [12] Wang Jinghong, Yan Wenyu, Zhi Youran, et al. Investigation of the Panic Psychology and Behaviors of Evacuation Crowds in Subway Emergencies[J]. Procedia Engineering, 2016, 135: 128-137.
- [13] Zhang Teng, Zhang Xuelin, Huang Shenshi, et al. Collective Behavior of Mice Passing Through an Exit Under Panic[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 496: 233-242.
- [14] Hong Ling, Gao Jia, Zhu Wei. Self-evacuation Modelling and Simulation of Passengers in Metro Stations[J]. Safety Science, 2018, 110, Part B: 127-133.
- [15] Varas A, Cornejo M D, Mainemer D, et al. Cellular Automaton Model for Evacuation Process With Obstacles[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2007, 382(2): 631-642.
- [16] 凤四海, 王志杰, 邓捷, 等. 引入恐慌因素的元胞自动机应急疏散模型[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 148-154.  
Feng Sihai, Wang Zhijie, Deng Jie, et al. Cellular Automata Model for Emergency Evacuation Considering Panic Factor[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(4): 148-154.
- [17] Niu Yunyun, Chen Yulin, Kong Detian, et al. Strategy Evolution of Panic Pedestrians in Emergent Evacuation With Assailants Based on Susceptible-infected-susceptible Model[J]. Information Sciences, 2021, 570: 105-123.
- [18] 陈长坤, 童蕴贺. 基于元胞自动机恐慌状态下人群疏散模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(6): 12-17.  
Chen Changkun, Tong Yunhe. Study on Crowd Evacuation Model Under Panic State Based on Cellular Automata[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(6): 12-17.
- [19] 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): 1656-1662.  
Li Jiayang, Tang Jiafu, Guo Enming. Crowd Emergency Evacuation Model Based on Dynamic Emotion Drive[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2021, 42(11): 1656-1662.
- [20] 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.  
Wu Xinjie, Wang Weili, Hu Zhihua. Study on Emotion Contagion Model and Intervention Strategies of Panic in Subway Stations Under Emergency[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(12): 265-272.
- [21] Xiang Nan, Zhou Zehong, Pan Zhigeng. Using SIR Model to Simulate Emotion Contagion in Dynamic Crowd Aggregation Process[J]. International Journal of Performability Engineering, 2018, 14(1): 134-143.
- [22] Fu Libi, Song Weiguo, Lü Wei, et al. Simulation of Emotional Contagion Using Modified SIR Model: A Cellular Automaton Approach[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 405: 380-391.
- [23] Le Van Minh, Adam C, Canal R, et al. Simulation of the Emotion Dynamics in a Group of Agents in an Evacuation Situation[C]//Principles and Practice of Multi-agent Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 604-619.
- [24] 汪洋, 李楠, 张磊. 基于正六边形元胞自动机的行人疏散研究[J]. 计算机工程, 2017, 43(8): 310-315.  
Wang Yang, Li Nan, Zhang Lei. Research on Pedestrian Evacuation Based on Hexagonal Cellular Automata[J]. Computer Engineering, 2017, 43(8): 310-315.
- [25] 游磊, 罗熙越, 刘旭, 等. 基于元胞自动机和SIS传染算法的恐慌状态下行人疏散模型[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 51-54.  
You Lei, Luo Xiyue, Liu Xu, et al. Study on Pedestrian Evacuation Model Under Panic State Based on Cellular Automata and SIS Algorithm[J]. Journal of Chengdu University(Natural Science Edition), 2020, 39(1): 51-54.
- [26] 刘晓宇, 吕琳. 一类SIR和SIS组合的复杂金融网络风险传染模型稳定性分析[J]. 东北农业大学学报(社会科学版), 2018, 16(2): 34-38.  
Liu Xiaoyu, Lü Lin. Stability Analysis of a Risk Contagion Model for Complex Financial Networks Combined With a Class of SIR and SIS[J]. Journal of Northeast Agricultural University(Social Science Edition), 2018, 16(2): 34-38.
- [27] Xiao Qian, Li Jiayang. Evacuation Model of Emotional Contagion Crowd Based on Cellular Automata[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021: 5549188.
- [28] 李晓恋, 孙攀, 房志明, 等. 九曲桥行人运动实验与模拟研究[J]. 火灾科学, 2020, 29(3): 172-180.  
Li Xiaolian, Sun Pan, Fang Zhiming, et al. Experimental and Simulation Study on Pedestrian Movement of Zigzag Bridge[J]. Fire Safety Science, 2020, 29(3): 172-180.