

基于动态情绪驱动的人员应急疏散模型

李佳洋¹, 唐加福^{1,2}, 郭恩铭³
(1. 东北大学 工商管理学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北财经大学 管理科学与工程学院, 辽宁 大连 116025;
3. 东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 针对应急疏散中人员的动态疏散行为, 将情绪感知及传染机制引入行人运动策略, 以 SIS (susceptible-infectious-susceptible) 模型为基础构造了人员情绪更新函数, 提出了情绪感知域界定, 改进了元胞自动机的动态场. 通过仿真实验对所构建动态情绪驱动人员疏散运动模型的性能开展分析, 验证了该模型符合个体运动的动态特征. 同时探讨了动态行为切换的情绪强度阈值、感染系数和平静系数等因素对疏散过程的影响. 结果表明: 个体情绪强度阈值决定了系统的个体最终状态, 而感染系数和平静系数影响状态变化速率, 进而影响疏散时间. 该研究为疏散人群管理提供理论依据.

关 键 词: 情绪感知; 疏散模型; 动态行为; SIS 模型; 元胞自动机

中图分类号: TP 391.9 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2021)11-1656-07

Crowd Emergency Evacuation Model Based on Dynamic Emotion Drive

LI Jia-yang¹, TANG Jia-fu^{1,2}, GUO En-ming³
(1. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Management Science and Engineering, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China; 3. School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110619, China. Corresponding author: LI Jia-yang, E-mail: jiyang_neu@163.com)

Abstract: Aiming at the crowd dynamic behavior in emergency evacuation, emotion perception and infection mechanism are combined into behavior decision-making. Based on the susceptible-infectious-susceptible model (SIS model), emotion updating function is constructed in order to improve the dynamic field and transition probability of cellular automata. By analyzing the performance of the constructed model, it is verified that the emergency evacuation model conforms to the dynamic characteristics of crowd flow. Moreover, through simulation experiments, the effect of system parameters is analyzed on dynamic behavior switching, and the impacts of such parameters of dynamic behavior switching as emotional intensity threshold, infection coefficient, and calmness coefficient are explored. The results show that the individual emotional intensity threshold determines the individual final state of the system. The infection and calmness coefficients affect the rate of state change and evacuation time. This research provides a theoretical basis for the management of evacuated crowd.

Key words: emotion perception; evacuation model; dynamic behavior; SIS (susceptible-infectious-susceptible) model; cellular automata

人员动态疏散模型是应急疏散研究的重要工具, 模拟突发事件的真实情境是评估模型的一个重要指标^[1-2]. 在微观模型中, 元胞自动机 (cellular automata, CA) 具有模拟复杂系统时空动态演变的能力, 并且原理简单、计算效率高, 因此在运动主体动态行为分析等方面得到了广泛应

用. Burstedde 等^[3]提出“静态场”和“动态场”的概念,由此构建场域 CA 模型用以研究个体的疏散特征. Zheng 等^[4]提出了一种扩展的 CA 模型以分析三维烟雾扩散对个体疏散行为的影响. Zhang 等^[5]考虑行人对距离的认知差异并对背景场规则进行修正,构建了基于背景场的粒子群优化算法的出口选择策略.

情绪等心理状态在个体行为决策中起着非常重要的作用,从而影响个体运动. 近年来,研究人员逐渐关注疏散模型如何表达个体的情绪状态. Helbing 等^[6]建立了一个模拟个体在紧急情况下紧张情绪和逃离动态行为的模型. Zheng 等^[7]提出了一种改进的地板场 CA 模型,分析了危机的扩散和个体情绪对疏散行为的影响. Cocking 等^[8]通过实证分析指出,紧急疏散时情绪能在人群中快速传播,即便是陌生人之间依旧可以传播. 情绪的模型化是一个难题,如何表述情绪的更迭和动态演化,并将情绪状态的动态性嵌入行人运动模型,是目前疏散模型构建的一个难题. Mao 等^[9]从研究同伴行为互动的角度,提出了一个基于亲密关系的情绪传染模型来模拟紧急疏散中的同伴决策机制. Fu 等^[10]将流行病学 SIR (susceptible-infectious-removal) 模型与 CA 结合,认为在某种程度上,情绪传染类似于疾病的传播,每个个体可能处于三种状态之一:易感(S)、感染(I)或恢复(R),据此提出了一个新的情绪传染模型. 梳理现有文献,情绪传播及更新是一个复杂的过程,当前疏散建模中考虑情绪因素的动态疏散行为方面研究是有限的,情绪的动态更新和行为决策结合的模型仍需要研讨.

在突发事件下,情绪会影响人们的判断和行为习惯^[11]. 而传统传染病 SIS (susceptible-infectious-susceptible) 模型考虑到个体很难达到完全免疫,仅存在易感者和感染者这两种人群,更加符合行人的情绪传播特性,因此本文在 SIS 模型基础上提出一种改进的情绪传染模型. 本文基于 SIS 传染模型定义疏散个体状态,考虑个体速度变化和方向感知域,构建一种符合行人疏散特征的情绪更新机制,并将情绪传播动力学与行人运动结合,改进转移概率,建立动态情绪驱动的行人运动模型,最后对模型进行疏散过程仿真,分析微观情绪传染演化模型、情绪传染机理对总疏散时间和安全疏散人数的影响. 该模型有助于应急管理者了解紧张情绪在人与人之间传播特征,便于制定有效的管控策略.

1 经典传染病模型

不同的情绪强度不仅对个体产生影响,其本身可以通过疏散个体之间的情绪感染而蔓延,而情绪传染类似于传染病的传播^[10]. 传统的传染病学模型主要有两类:SIR 模型和 SIS 模型.

SIR 模型是指个体状态为“易感者”、“感染者”、“免疫者”三种类型. S, I, R 分别表示三类群体占总群体的比例. SIR 模型在传染过程中不计算新出生率和死亡率,故 $S + I + R = 1$. 该模型反映了人群传染的宏观过程:当传染疾病发生时,三类人群总数量恒定,“易感者”一旦与“感染者”接触,以 β 概率被传染;“感染者”以一定的概率 γ 转变到“免疫者”;“免疫者”等同于疫苗注射者,对疾病免疫,不再被传染.

另一种经典 SIS 模型考虑某些疾病传染时个体很难达到完全免疫,因此在传染过程中仅存在“易感者”和“感染者”. 该模型的微分系统动力学方程如式(1)所示,状态转移如图 1 所示.

$$\left. \begin{aligned} S + I &= 1, \\ \frac{dS}{dt} &= -\beta SI + \gamma I, \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: β 为日接触传染率; γ 为日治愈率.

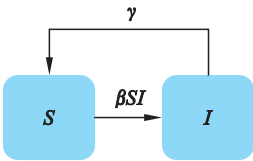


图 1 SIS 模型状态转移示意图
Fig. 1 State transfer diagram of the SIS model

由于 SIS 模型采用常微分方程表示传染动力学宏观模型,是一个宏观、静态数学模型,并不适合用于描述疏散个体的微观情绪感染和自由移动个体状态;并且 SIS 模型假定人群总数在传染过程中不发生变化,而疏散时行人一旦离开出口即为安全,在危险区的人数每时每刻都是变动的. 综上,经典 SIS 并不完全适用. 本文结合 CA 构建突发事件下考虑情绪感染的行人疏散动态模型.

2 情绪传染机制

2.1 状态定义

当室内突发异常事件,如火灾、有毒气体扩

散、非法侵害等,行人均带有紧张情绪.因室内空间有限,个体对危机认知及心理承受能力的差异,具有不同情绪状态.模型中疏散个体根据其紧张情绪值分为潜在情绪状态和显著情绪状态.

2.2 情绪感染机制

疏散个体情绪值与自身持有情绪及周围他人情绪相关^[9],定义 $PE_j(t)$ 表示 t 时刻个体 j 的紧张情绪强度值,取值范围 $(0,1]$,即在疏散全过程中个体不存在紧张情绪消失的时刻.个体 j 的紧张情绪强度值随着时间变化的动态方程如式(2)所示.

$$PE_j(t) = PE_j(t-1) + (1-\xi) \cdot \Delta e_j(t) + \tau. \quad (2)$$

其中: $\Delta e_j(t)$ 表示 t 时刻个体 j 情绪感知增量; ξ 是感知衰减系数,取值范围 $[0,1]$,体现了情绪感知非理性; τ 为随机扰动.

此处,情绪感知增量 $\Delta e_j(t)$ 是 t 时刻个体 j 的速度引起的情绪变化量 $\Delta f_j(v,t)$ 及周围行人的情绪均值 $\Delta \varphi_j(t)$ 的相关函数,如式(3)所示.

$$\Delta e_j(t) = \Delta f_j(v,t) + \Delta \varphi_j(t). \quad (3)$$

该函数是情绪强度值的动态演化的关键,是本文的研究重点,下面对其构成开展研究.

1) 个体速度变化引起的情绪增量 $\Delta f_j(v,t)$.在疏散过程中,若个体行走速度低于最大期望速度,他的不良情绪(烦躁、紧张、焦虑)增长较快.那么, t 时刻个体 j 由速度引起的情绪感知增量函数如式(4)所示^[12]:

$$\Delta f_j(v,t) = \left(1 - \frac{v_j(t-1)}{v_j^{\max}}\right) \cdot \exp\left(-\alpha \cdot \left(\frac{v_j(t-1)}{v_j^{\max}}\right)\right). \quad (4)$$

其中: $v_j(t-1)$ 表示 $t-1$ 时刻个体 j 的实际速度; v_j^{\max} 表示个体 j 的最大期望速度; α 表示 t 时刻个体 j 的速度敏感参数,取值范围 $[0,1]$.

该函数可以清楚表示移动速度的变化对个体紧张情绪的波动.若实际速度远小于最大期望速度, $\Delta f_j(v,t)$ 值将趋近于 1,即个体原地不动时,紧张情绪接近峰值.

2) 情绪感知域内他人引起的情绪增量 $\Delta \varphi_j(t)$.行人疏散对周围他人情绪有认知且受其影响,文献[4,10]定义 R 为情绪感知域半径,行人 j 的情绪感知范围离散化后是以该行人元胞为中心, $2R$ 为边长的正方形.然而,文献[12]指出,疏散个体视线内的信息传播与非视线内信息传播影响力存在明显差异.据此,本文认为情绪感知域分为可视区域 RV 和不可视区域 RI ,且可视区域的情绪传染性高于不可视区域.

t 时刻个体 j 的情绪感知域定义为: t 时刻个体 j 所处元胞坐标 $cell_j(x,y)$ 为中心,半径为 R 的圆,进行元胞离散化后区域为 $2R$ 边长的正方形.

t 时刻个体 j 的可视感知域 RV 定义为:以个体 j 的元胞坐标 $cell_j(x,y)$ 为中心,角度为 $[\theta_j(t) - \frac{\pi}{4}, \theta_j(t) + \frac{\pi}{4}]$ 的图形,其中 $\theta_j(t)$ 为个体 j 的正方向,如图 2 浅色区域所示.

t 时刻个体 j 的不可视感知域 RI 定义为:以个体 j 所处元胞以坐标 $cell_j(x,y)$ 为中心, $2R$ 为边长的正方形中除去 RV 的部分,如图 2 深色区域所示.

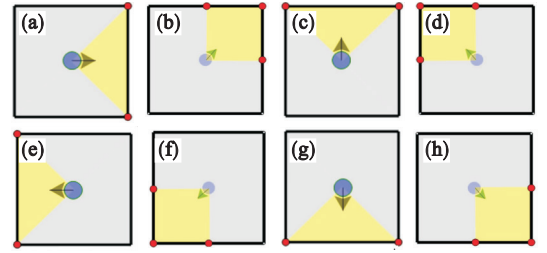


图 2 t 时刻个体 j 的情绪感知域
Fig. 2 Emotion perception domain of individual j at time t

(a)— $\theta_j(t) = 0$; (b)— $\theta_j(t) = \pi/4$; (c)— $\theta_j(t) = \pi/2$;
(d)— $\theta_j(t) = 3\pi/4$; (e)— $\theta_j(t) = \pi$; (f)— $\theta_j(t) = 5\pi/4$;
(g)— $\theta_j(t) = 3\pi/2$; (h)— $\theta_j(t) = 7\pi/4$.

个体 j 的情绪感知域内,情绪增量是与距离有关的函数,那么, t 时刻个体元胞 j 感知到的他人情绪变化量函数为式(5)所示:

$$\Delta \varphi_j(t) = g_1^{-1} \cdot \sum_{k \in RV} d_k \times [PE_k(t-1) - PE_j(t-1)] + \eta \cdot g_2^{-1} \sum_{k \in RI} [PE_k(t-1) - PE_j(t-1)]. \quad (5)$$

其中,距离权重 dd_k 为式(6)所示:

$$dd_k = \left[1 - \frac{1}{1 + \exp(-d_{jk} \cdot cl)}\right] \times \left\{ \sum_j \left[1 - \frac{1}{1 + \exp(-d_{jk} \cdot cl)}\right] \right\}^{-1}. \quad (6)$$

式中: g_1 表示个体元胞 j 可视感知域 RV 中个体数; g_2 表示个体元胞 j 非可视感知域 RI 中个体数; η 表示非可视域他人情感差值被个体 j 接收的程度,取值不大于可视感知域中距离权重最小值,即 $0 \leq \eta \leq \min_{k \in RV} d_{jk}$; d_{jk} 表示疏散个体 j 到元胞 k 的距离; cl 为相邻元胞的距离.

3 疏散模型

基于情绪感染的疏散模型分为情绪传染、情

绪更新和行为决策三个步骤^[9],本文构建的动态情绪驱动的行人运动疏散模型以元胞自动机为基础的行人运动模型 (crowd emotional cellular automata, CECA),行人运动时因情绪状态不同,采取不同行动策略,构成情绪驱动行为机制.该疏散模型的基本流程是: t 时刻疏散个体 j 更新情绪强度值,情绪强度达到一定阈值后发生状态的更新,进而改变行为策略^[3,10],其过程如图 3 所示.



图 3 t 时刻疏散个体 j 一次迭代过程
Fig. 3 Individual j update once at time t

3.1 情绪更新

t 时刻疏散个体 j 疏散策略迭代过程由情绪更新判别状态更新,执行状态对应的疏散策略. t 时刻疏散个体 j 紧张情绪强度值依据 $t-1$ 时刻的紧张情绪强度值、行动策略、状态、前进方向有关,受到情绪感知范围内其他人紧张情绪强度值影响,情绪变动将引起疏散个体 j 状态及行为策略的动态变化,具体状态更新流程如图 4 所示.

3.2 状态更新

Fu 等^[10]提出基于情绪阈值的状态改变实现疏散人群状态的动态变化.若潜在情绪状态(S)的紧张情绪强度高于阈值 λ_{emotion} 时,以 β 概率转成显著情绪状态(I), β 称感染系数.若显著情绪

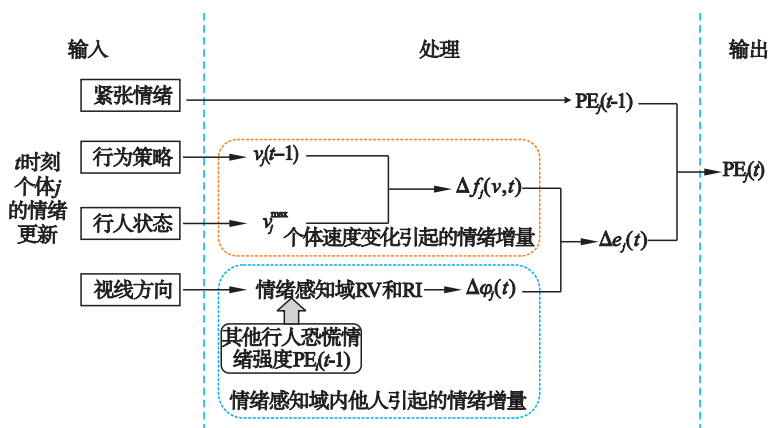


图 4 t 时刻疏散个体 j 紧张情绪更新机制
Fig. 4 Nervous updating mechanism of individual j at time t

状态(I)的紧张情绪强度低于阈值 λ_{emotion} 时,以 γ 概率转为潜在情绪状态(S), γ 称平静系数.

3.3 行为策略执行

CA 行为策略是个体元胞 j 下一步的移动策略,个体 j 情绪状态决定了 j 的期望速度和期望目标元胞位置,评估期望目标元胞的转移概率,确定最终移动的目标元胞,实施移动策略.

$$P_{ji}(t) = U \cdot \exp(k_s S_{ji}(t) + k_p(1 - \rho_{ji}(t))) \cdot cp_{ji}(t) \cdot co_{ji}(t), \quad \left. \begin{aligned} U = \left[\sum_{i \in \text{所有领域元胞}} \exp(k_s S_{ji}(t) + k_p(1 - \rho_{ji}(t))) \cdot cp_{ji}(t) \cdot co_{ji}(t) \right]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中: k_s 为到出口距离影响系数; k_p 为密度影响系数; $cp_{ji}(t)$ 表示 t 时刻疏散个体 j 的邻域元胞 i 的状态参数,若被占据,则该值为 0,否则为 1; $co_{ji}(t)$ 表示 t 时刻疏散个体 j 的邻域元胞 i 是否为障碍物,若是障碍物,则该值为 0,否则为 1; $\rho_{ji}(t)$ 表示 t 时刻疏散个体 j 的邻域元胞 i 的周围的密度. $S_{ji}(t)$ 表示 t 时刻个体元胞 j 的邻域元胞 i 到出口的最短距离.设个体 j 的位置坐标为 $C(x_j, y_j)$,邻域元胞 i 的位置坐标为 $C(x_i, y_i)$,疏散空间中有 m 个有效出口,每个出口的中点坐标为

根据个体情绪状态定义不同的行为策略,即:

1) 潜在情绪状态(S)的个体在疏散过程中采取“冷静型”策略:期望速度为 $v_j^{\max} = 0.8 \text{ m/s}$,选择目标元胞为 Moore 邻域的 8 个元胞,且评估邻域元胞的密度,选择密度低的元胞.该类人群转移概率公式为

$$C(x_{ek}, y_{ek}), \text{ 则 } S_{ji}(t) \text{ 如式(8)所示.} \\ S_{ji}(t) = \max_{i \in \text{所有领域元胞}} \left\{ \min_{\substack{i \rightarrow \text{所有出口} \\ k \in [1, m]}} \left\{ [(x_{ek} - x_i)^2 + (y_{ek} - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right\} - \min_{\substack{i \rightarrow \text{所有出口} \\ k \in [1, m]}} \left\{ [(x_{ek} - x_i)^2 + (y_{ek} - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (8)$$

2) 显著情绪状态(I)在疏散中采取“冲动型”策略:期望速度 $v_j^{\max} = 1.6 \text{ m/s}$,即每次更新时移动 2 个步长;倾向选择密度 ρ 高的元胞;需要说明的是,若首选 8 个元胞全部被占据则退而求其次,选

择邻域 8 个元胞中转移概率最大的目标元胞。

4 结果与讨论

将动态情绪驱动行人运动模型与经典 CA 模型进行比较,验证该模型是否符合疏散时个体运动特征。在此基础上,分析情绪强度阈值 λ_{emotion} , 情绪感染系数 β , 情绪平静系数 γ 对总疏散时间的影响。

4.1 模型有效性分析

模拟的场景取文献[12]的基础场景,单位元胞为 $cl \times cl$, $cl = 0.4\text{ m}$, $18cl \times 14cl$ 的单出口房间,出口宽度为 $el_1 = 2cl$ 。初始状态 $T = 0$ 时,150 位疏散个体随机分布在空间位置上,每人占据一个元胞。疏散时间以时间步 Time step 为单位,用 T 表示,每一时间步定义为 0.5 s ,疏散个体移动时采用 Moore 邻居规则。CECA 模型的其他参数设置为: $\lambda_{\text{emotion}} = 0.6$, $\xi = 0$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 0.5$ 。图 5 和图 6 分别记录两个模型在相同仿真场景下不同时间步的密度图。

由图 5 和图 6 可以看出,随着时间推移 CECA 模型与 CA 模型中的人流特性相同,两种模型的行人均逐渐聚集在出口位置,在出口处表现出行人流拱形特征,但由于 CA 模型整体疏散较慢,其拱形特征更加明显。在相同时间步,CECA 模型中个体移动速度更快,可以表明情绪波动及感染对减少总体疏散时间是有利的,这结论与文献[8]一致。

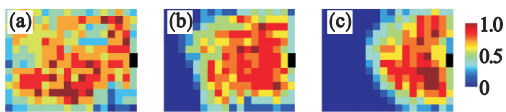


图 5 经典 CA 模型不同时刻人员密度图
Fig. 5 Crowd density diagram of classical CA model at different time
(a) — $T = 0$; (b) — $T = 40$; (c) — $T = 80$.

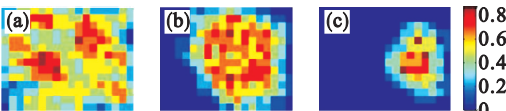


图 6 CECA 模型不同时刻人员密度图
Fig. 6 Crowd density diagram of CECA model at different time
(a) — $T = 0$; (b) — $T = 40$; (c) — $T = 80$.

为了验证 CECA 模型的动态特性,在同一模拟场景下,改变情绪强度阈值 λ_{emotion} ,得到每一时间步的系统平均速度,如图 7 所示。由图可见,CECA 模型中情绪动态变化,驱动了行为策略的

动态变化,可以反映实际疏散过程中速度的动态性^[1]。而由于经典 CA 模型中的每一个行人元胞遵循同样的规则进行同步更新,行人状态单一,不能体现不同行人的差异化的运动特征。

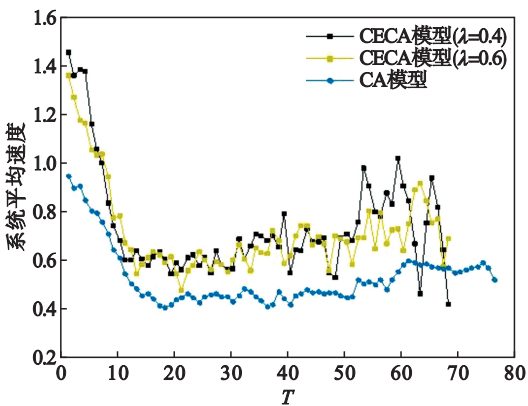


图 7 系统平均速度
Fig. 7 System average velocity

4.2 情绪强度阈值 λ_{emotion} 的影响

文献[10]将情绪强度阈值设定为 $\lambda_{\text{emotion}} = 0.6$ 开展了仿真实验,然而并未讨论阈值对疏散效果的影响。为了分析情绪强度阈值对总疏散时间的影响,文中模拟一个 $12\text{ m} \times 12\text{ m}$ 的单出口房间,出口宽度为 $el_1 = 3cl$,设参数 $\xi = 0$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 0.5$ 。初始人数分别为 $N = 100, 200, 300, 400, 500$ 时,个体随机分布在空间中,每次仿真程序运行 100 次得到平均总疏散时间,结果如图 8 所示。

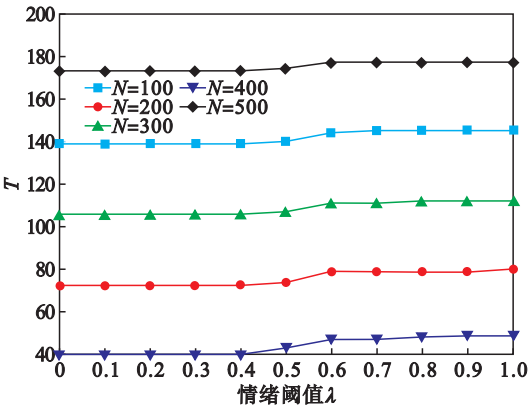


图 8 不同情绪阈值和不同初始人数时的系统总疏散时间
Fig. 8 Total evacuating time of the system with different emotional thresholds and different initial numbers

由图 8 所示,情绪强度阈值对系统总疏散时间是有影响的,其影响可以分为三个区间: $\lambda_{\text{emotion}} \in [0, 0.4]$ 的疏散时间最快; $\lambda_{\text{emotion}} \in [0.6, 1]$ 时的系统疏散时间最慢;而 $\lambda_{\text{emotion}} \in [0.4, 0.6]$ 时,是总疏散时间发生显著变化的区间。

进一步分析情绪阈值影响疏散时间的机理,

对两类状态群体疏散过程动态演化进行了仿真实验. 在上述同一场景中以 200 人为例, 相同的初始位置分布和初始情绪值, 情绪阈值分别取 $\lambda_{\text{emotion}} = 0.3, 0.5, 0.7$, 两类状态群体在疏散场地内的位置如图 9 所示, 蓝色表示 S 状态个体, 红色表示 I 状态个体, 绿色表示出口.

情绪阈值 $\lambda_{\text{emotion}} = 0.3$ 时, 个体分布如图 9a 和图 9b 所示, 初始时系统内 I 的人数为 155, S 的人数为 45, I 状态的人数多于 S ; $T = 5$ 时系统中绝大

多数是 I 状态个体, I 状态的人数为 185, S 状态的人数为 2. 由图 9e 和图 9f 可见, 当 $\lambda_{\text{emotion}} = 0.7$ 时, 初始时系统内 S 状态的比例较大, 此时 S 状态的人数为 156, I 状态的人数为 44; 而 $T = 5$ 时系统内绝大多数是 S 状态个体, S 状态和 I 状态的人数分别为 183 和 6. $\lambda_{\text{emotion}} = 0.5$ 时, 个体分布如图 9c 和图 9d 所示, 初始时, S 状态的人数为 101, I 状态的人数为 99, 两种状态人数相当, $T = 5$ 时系统中 S 状态的人数为 100, I 状态的人数为 87, 短时间内并未明显出现哪类群体多于其他群体.

4.3 感染系数 β 和平静系数 γ 的影响

感染系数 β 和平静系数 γ 是疏散过程中个体情绪驱动行为改变的重要因子, 主要分析其对总疏散时间的影响. 以上文场景作为模拟场地, 初始人数为 200, 考虑情绪阈值分别为 $\lambda_{\text{emotion}} = 0.5$ 和 $\lambda_{\text{emotion}} = 0.6$ 两种情况, 分别探讨感染系数 β 和平静系数 γ 单独变化时系统中显著情绪状态 (I) 的比例, 仿真程序每种情况执行 100 次取平均值, 结果如图 10 所示.

由图 10 可见, $\gamma = 0.1$ 时, $\lambda_{\text{emotion}} = 0.5$, 感染系数 β 值越大, 系统中 I 的比例由 0.5 增加到 1 的速度越快. 而 $\lambda_{\text{emotion}} = 0.6$ 时, 无论 β 为何值时, 系统中 I 群体的数量逐渐减少. $\beta = 0.1$ 时, $\lambda_{\text{emotion}} = 0.5$, 系统中 I 群体比例最终都趋于 1. I 群体比例经过一个小幅下降后, 逐步上升, 特别是在 $T = 40$ 之后振荡上升至 1. 而 $\lambda_{\text{emotion}} = 0.6$ 时, 系统最终均为 S 群体, 平静系数 γ 数值越大, 系统变为全 S 群体的速度越快.

4.4 讨论

综合上述分析, 情绪强度阈值 λ_{emotion} 决定了系统中两类群体的状态, 感染系数 β 和平静系数 γ 影响了行人之间情绪变化的速率. 两个系数可以通过外界干预调整^[13-14].

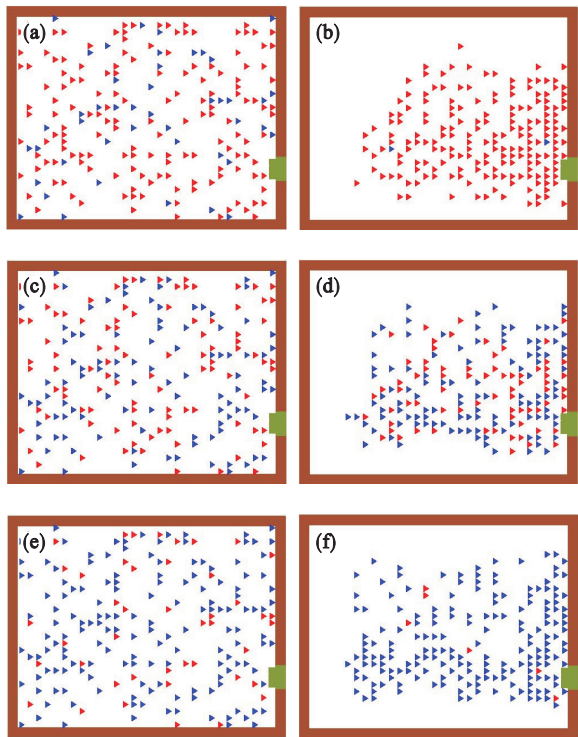
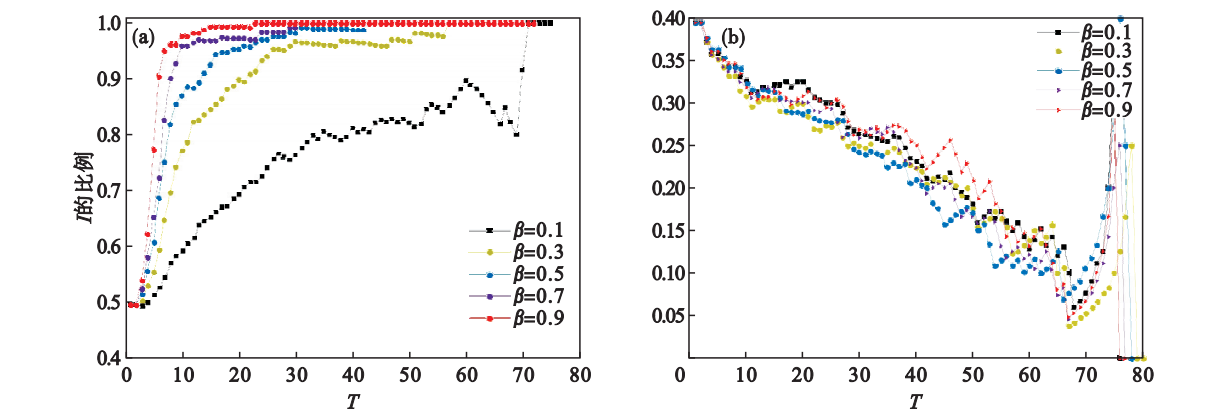


图 9 不同情绪阈值初始时刻和 $T = 5$ 时刻群体分布
Fig. 9 Population distribution at the initial moment of different emotional thresholds and at $T = 5$

- (a)— $\lambda_{\text{emotion}} = 0.3, T = 0$; (b)— $\lambda_{\text{emotion}} = 0.3, T = 5$;
(c)— $\lambda_{\text{emotion}} = 0.5, T = 0$; (d)— $\lambda_{\text{emotion}} = 0.5, T = 5$;
(e)— $\lambda_{\text{emotion}} = 0.7, T = 0$; (f)— $\lambda_{\text{emotion}} = 0.7, T = 5$.



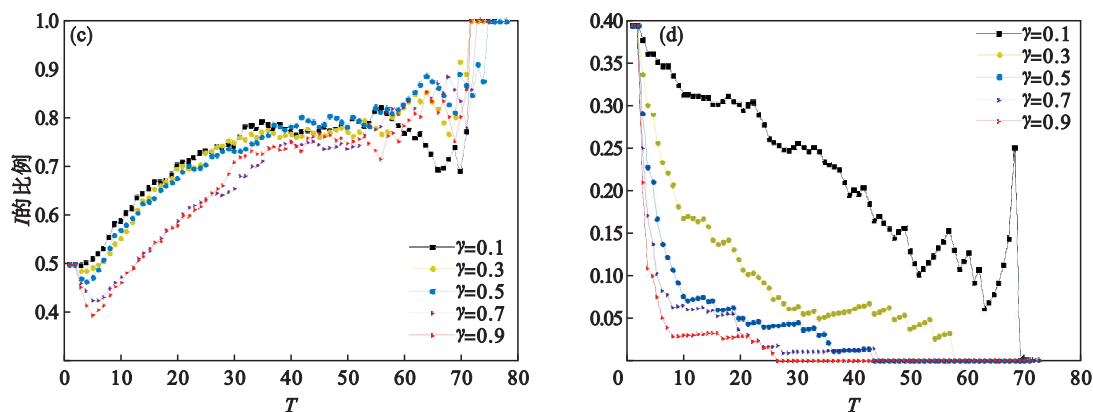


图 10 不同阈值及状态转移参数下的 I 的比例

Fig. 10 Proportion of the population in state I under different thresholds and state transition parameters

(a)— $\lambda_{\text{emotion}} = 0.5, \gamma = 0.1$; (b)— $\lambda_{\text{emotion}} = 0.6, \gamma = 0.1$; (c)— $\lambda_{\text{emotion}} = 0.5, \beta = 0.1$; (d)— $\lambda_{\text{emotion}} = 0.6, \beta = 0.1$.

$\lambda_{\text{emotion}} \leq 0.5$ 时,感染系数 β 影响力更大,该值越大,系统内 S 群体转变成 I 群体的速度越快,最终达到全部都是 I 状态群体,总疏散时间较少。

$\lambda_{\text{emotion}} > 0.5$ 时,平静系数 γ 影响力更大, γ 越大,系统中 I 群体转变为 S 群体的速度越快,形成全员 S 群体,导致疏散总时间相对较大。

上述结论为疏散管理者提供重要依据,当 $\lambda_{\text{emotion}} \leq 0.5$,可增加感染系数 β ,加速行人的状态转化。而当 $\lambda_{\text{emotion}} > 0.5$ 时,可加速抑制平静系数 γ ,使系统内群体可以尽可能向 I 群体转变,对管理者来说,可以采取适当策略提高行人疏散效率。

5 结 论

1) 探讨动态情绪及传染模型,阐明情绪动态演化机理,将情绪传染动力学与行人运动结合,构建基于动态情绪驱动的行人运动疏散模型。

2) 人员疏散运动中,情绪是重要影响因素,疏散系统中个体最终状态由情绪阈值决定;感染系数和平静系数影响状态转化速率。

3) 本研究有助于室内疏散管理者掌握疏散群体情绪动态变化趋势,为疏散管理者了解个体情绪导致行动状态演化机理、制定切实有效的疏散策略提供了理论依据。

参考文献:

[1] Li X L, Guo F, Kuang H, et al. Effect of psychological tension on pedestrian counter flow via an extended cost potential field cellular automaton model [J]. *Physica A*, 2017, 487: 47–57.

[2] Zhang H, Liu H, Qin X, et al. Modified two-layer social force model for emergency earthquake evacuation [J]. *Physica A*, 2018, 492: 1107–1119.

[3] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, et al. Simulation

of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton [J]. *Physica A*, 2001, 295: 507–525.

[4] Zheng Y, Li X G, Zhu N, et al. Evacuation dynamics with smoking diffusion in three dimension based on an extended floor-field model [J]. *Physica A*, 2018, 507: 414–426.

[5] 张丽杰, 刘建昌, 谭树彬. 基于背景场的粒子群优化多出口疏散策略 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(9): 1221–1227.

(Zhang Li-jie, Liu Jian-chang, Tan Shu-bin. Multi-exit evacuation strategy based on particle swarm optimization with background field [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(9): 1221–1227.)

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

[7] Zheng L J, Peng X L, Wang L L, et al. Simulation of pedestrian evacuation considering emergency spread and pedestrian panic [J]. *Physica A*, 2019, 522: 167–181.

[8] Cocking C, Drury J, Reicher S. The psychology of crowd behaviour in emergency evacuations: results from two interview studies and implications for the fire and rescue services [J]. *The Irish Journal of Psychology*, 2009, 30 (1/2): 37–41.

[9] Mao Y, Fan Z X, Zhao J W, et al. An emotional contagion based simulation for emergency evacuation peer behavior decision [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2009, 96: 260–269.

[10] Fu L B, Song W G, Lyu W, et al. Simulation of emotional contagion using modified SIR model: a cellular automaton approach [J]. *Physica A*, 2014, 405: 380–391.

[11] Shi M, Lee E, Ma Y. A dynamic impatience-determined cellular automata model for evacuation dynamics [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2019, 94: 367–378.

[12] Geng Z F, Li X L, Kuang H, et al. Effect of uncertain information on pedestrian dynamics under adverse sight conditions [J]. *Physica A*, 2019, 521: 681–691.

[13] Durupinar F, Gdkbay U, Aman A, et al. Psychological parameters for crowd simulation: from audiences to mobs [J]. *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, 2016, 22(9): 2145–2159.

[14] Basak A E, Gdkbay U, Durupinar F. Using real life incidents for creating realistic virtual crowds with data-driven emotion contagion [J]. *Computers & Graphics*, 2018, 72: 70–81.