

2-16-2023

Evacuation Dynamics Research Based on Evolutionary Game Theory

Qiaoru Li

School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
qiaoruli129@hebut.edu.cn

Jinxu Yan

School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

Xiaoyong Tian

School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

Kun Li

School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

See next page for additional authors

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.

Evacuation Dynamics Research Based on Evolutionary Game Theory

Abstract

Abstract: In order to study the impact of individual cooperative behavior on the overall pedestrian evacuation efficiency, combined with cellular automata and social force model, the co-evolution of evacuation system dynamics and "cooperative behavior" is studied, and an evacuation dynamics research method based on evolutionary game theory is proposed. *The cellular automata model is used as the basic simulation framework, and the social force model is used to represent the psychological repulsion among the practitioners. The evacuation individual strategy is updated through evolutionary game.* The simulation results show that when the game gain coefficient exceeds a certain threshold, the stable cooperation ratio of the group will rise sharply, and the cooperative behavior can effectively promote the evacuation efficiency.

Keywords

cellular automata, social force model, cooperative behavior, game gain coefficient

Authors

Qiaoru Li, Jinxiu Yan, Xiaoyong Tian, Kun Li, and Xia Li

Recommended Citation

Qiaoru Li, Jinxiu Yan, Xiaoyong Tian, Kun Li, Xia Li. Evacuation Dynamics Research Based on Evolutionary Game Theory[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 300-307.

基于演化博弈理论的疏散动力学研究

李巧茹, 燕锦秀, 田晓勇, 李昆, 李霞

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: 为了研究个体合作行为对行人整体疏散效率的影响, 结合元胞自动机与社会力模型对疏散系统动力学与“合作行为”的共演化进行了研究, 提出了基于演化博弈理论的疏散动力学研究方法。采用元胞自动机模型为基础仿真框架, 利用社会力模型来表征行人间的心理斥力, 通过演化博弈实现疏散个体策略更新。仿真实验结果表明: 当博弈增益系数超过一定阈值时群体的稳定合作比率会急剧上升, 且合作行为能有效促进疏散效率。

关键词: 元胞自动机; 社会力模型; 合作行为; 博弈增益系数

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2023)02-0300-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0927

引用格式: 李巧茹, 燕锦秀, 田晓勇, 等. 基于演化博弈理论的疏散动力学研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(2): 300-307.

Reference format: Li Qiaoru, Yan Jinxiu, Tian Xiaoyong, et al. Evacuation Dynamics Research Based on Evolutionary Game Theory[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 300-307.

Evacuation Dynamics Research Based on Evolutionary Game Theory

Li Qiaoru, Yan Jinxiu, Tian Xiaoyong, Li Kun, Li Xia

(School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to study the impact of individual cooperative behavior on the overall pedestrian evacuation efficiency, combined with cellular automata and social force model, the co-evolution of evacuation system dynamics and "cooperative behavior" is studied, and an evacuation dynamics research method based on evolutionary game theory is proposed. *The cellular automata model is used as the basic simulation framework, and the social force model is used to represent the psychological repulsion among the practitioners. The evacuation individual strategy is updated through evolutionary game.* The simulation results show that when the game gain coefficient exceeds a certain threshold, the stable cooperation ratio of the group will rise sharply, and the cooperative behavior can effectively promote the evacuation efficiency.

Keywords: cellular automata; social force model; cooperative behavior; game gain coefficient

0 引言

大型公共场所的群体性活动数量呈快速增长的趋势, 随之而来的是由于密集人群相互拥挤和交织诱发的推搡、踩踏事故经常发生^[1-2]。此类危急疏散事件不仅导致巨大的经济损失, 还会给人民生命安全造成严重的威胁, 因此, 进一步研究行人疏散机理以掌握提高疏散效率的科学手段具

有重大的社会价值和现实意义^[3]。

随着计算机技术的飞速发展, 通过建立行人群体疏散模型并对其进行仿真模拟越来越成为主流^[4]。疏散模型按照研究尺度不同可以分为宏观模型和微观模型两大类^[5]。其中, 微观模型受到更为广泛的关注, 它们更侧重从行人运动具体行为、运动轨迹、复杂交互等个体层面对疏散问题进行

收稿日期: 2021-09-09

修回日期: 2021-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(51908187)

第一作者: 李巧茹(1972-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为道路交通管理与技术。E-mail: qiaoruli129@hebut.edu.cn

动力学分析^[6]。最具代表性的微观模型为离散型的元胞自动机模型^[7]与连续型的社会力模型^[8]。

元胞自动机模型因具有较低的计算复杂度和较高的真实场景还原能力而在疏散研究领域广泛应用,其基本原理是对时间和空间进行二维状态离散以形成最小时间单元和有限规则网格^[9-10],并通过对元胞(网格)的占用概率来模拟个体运动过程。元胞模型的研究越来越注重对于真实疏散场景的再现,如菅肖霞等^[9]为再现坡度设施中密集人群的挤压倒地现象,建立一种势函数场元胞自动机模型;Weng等^[11]提出了一种可以模拟行人运动、避开障碍物和适应周围环境等行为的元胞自动机模型;卓亚琦等^[12]应用元胞自动机模型,研究行人中有慢半拍型行人和有亲人折返现象存在时对行人疏散的影响;Chen等^[13]利用元胞自动机模型描绘避难过程中存在碰壁行为的行人运动。

社会力模型是具有典型代表性的连续型微观模型。Helbing等^[8]在Lewin相关思想基础上提出了基础社会力模型。该模型将行人视为自驱动微粒,每个行人微粒受到周边行人或环境的影响,这些影响因素以力的形式表现,因此,从而行人在疏散空间内的时空变化可用微分方程准确阐释^[14-15]。相对于元胞自动机模型,社会力模型善于捕捉人群运动的复杂行为规则及微观细节信息,在建模精度上具有较大的优势^[16],但计算复杂度则高得多。社会力模型成功再现了现实疏散中的“快即是慢^[17-18]”“羊群行为^[19-20]”“领导行为^[21-22]”“小团体^[23-24]”等动力学现象。

由上可知若结合元胞自动机与社会力模型的长处就能既细致刻画疏散微观动力学过程,又降低计算复杂度从而实施大规模疏散仿真。

同时,疏散中行人的相互交互是难以避免的,即他们之间一定会发生博弈行为,而在危急环境中这一点尤为明显。少部分学者已经意识到博弈理论是解决疏散问题的潜在利器,刘群等^[25]利用演化博弈模型,研究多出口条件下疏散人员出口选择这一动态过程;Sam等^[26]探讨了在飓风过后

人群疏散过程中公共物品博弈的合作程度;霍良安等^[27]运用博弈论分析了展会管理者与参观者之间的矛盾冲突,提出了一种基于博弈分析的疏散方案。更多的学者则将博弈与人员疏散时的决策相结合,在人群疏散中应用博弈论对决策进行建模^[28],李蒙等^[29]研究群体中有多种持有不同策略的个体类型时,利用博弈论研究逃生观点的演化过程,并分析不同类型人选择不同策略的演化过程。但总的来说,关于疏散与博弈结合的研究工作整体偏少且未成体系,缺乏对群体疏散中“合作”策略演化对疏散动力学量化影响的相关研究。

鉴于以上因素,本文结合元胞自动机与社会力模型对应急疏散动力学及疏散中的博弈行为进行刻画。将行人群体划分为“合作型”疏散者和“背叛型”疏散者,并用公共品博弈(public goods game, PGG)来表征疏散个体与邻居间的交互,博弈后的总收益将代表行人竞争期望空格的“能力”值,竞争失败者将考虑学习成功者的策略。仿真结果表明:就疏散效率而言,合作型疏散者对于背叛型疏散者是有优势的,而从演化博弈的角度来看,此种机制还在一定程度上缓解了“公共地悲剧”(即所有的博弈参与者都不可避免地最终选择背叛)。

1 基于演化博弈的疏散动力学模型

本研究假设疏散个体分为两大类:合作型疏散者 P_C 和背叛型疏散者 P_D 。 P_C 对应的是亲缘关系、互助群体或者同事友人等; P_D 则对应力求自己能最快逃生的“自私”个体。基础疏散模型为Burstedde等^[30]提出的疏散中的力学场模型:整个疏散空间中的任意一点 (i, j) 的力学场分为静力场 σ_{ij} 与动力场 w_{ij} 。而疏散模型中空格元胞的吸引力是由静力场和动力场共同决定的。

从仿真技术层面看,本模型的总体框架为基于力学场的元胞自动机模型,其动力场构建部分借助了社会力模型的思想,而多元胞向同一空元胞移动的冲突过程则通过个体进行PGG后的收益作为占据空元胞的竞争力的评判标准。

以下介绍以元胞自动机为基础框架仿真的具体流程。如图 1(a)所示，疏散所用的元胞网格是 Moore 型，即位于(0, 0)位置的疏散个体在下一步最多有 9 个可选位置(包括自己原来占据的元胞格点)。静力场 σ_{ij} 表示的是(0, 0)所在的位置距离出口的距离，可以直接采用欧几里德距离来表征(采用曼哈顿距离、Dijkstra 距离等并不定性地改变仿真结果)。而在动力场计算上，则结合了社会力模型，即合作型疏散者给同类型个体相对较小的心理斥力。

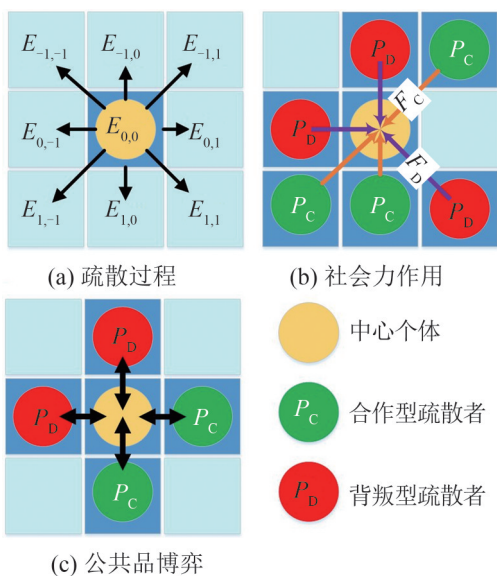


图 1 元胞模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of cell model

处于(0, 0)位置的个体下一步移动至(0, 0), $i, j \in \{-1, 0, 1\}$ 的迁移概率为

$$L_{ij} = \frac{E_{ij}}{\sum_{i,j} E_{ij}} \quad (1)$$

$$E_{ij} = \exp(-k_\sigma \Delta\sigma_{ij}) \exp(k_w \Delta w_{ij}) \theta_{ij} (1 - \eta_{ij}) \quad (2)$$

式中: $\Delta\sigma_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{00}$, 代表(0, 0)与(0, 0)位置的静力场之差(本章中即距离差); k_σ 为较大的常数, 表示疏散者对出口位置非常清楚; θ_{ij} 为布尔数, 当(0, 0)位置为障碍物时为 0, 否则为 1; η_{ij} 也为布尔数, 当(0, 0)位置被疏散个体占据时为 0, 否则为 1。以上与基本疏散力场模型吻合。

而动力场 Δw_{ij} 与(0, 0)位置个体所受的社会力中的心理斥力相关, 如图 1(b)所示, P_c 对疏散位置(0, 0)施加的社会力为 F_c , P_D 对同一位置施加的社会力则为 F_D 。为便于阐述, 设个体 x 处于(0, 0)位置, 则 x 受到整个疏散空间中的其他个体 y 的心理斥力 F_{xy}^H (元胞模型中不考虑社会力中的真实物理障碍力)可表示为

$$F_{xy}^H = \begin{cases} \varepsilon P_i \exp[(r_{xy} - d_{xy})/Q_i] n_{xy}, & x, y \in \{P_c\} \\ P_i \exp[(r_{xy} - d_{xy})/Q_i] n_{xy}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: r_{xy} 为行人 x 与 y 的身体半径之和; d_{xy} 为 x 与 y 的质心距离; 常数 P_i 和 Q_i 分别代表疏散行人间的心理排斥强度和排斥范围; $0 < \varepsilon < 1$ 为社会力折扣系数, 表示合作型疏散者之间的心理斥力会相对较小。同理, 墙对 x 的心理斥力为

$$F_{xw}^H = P_w \exp[(r_x - d_{xw})/Q_w] n_{xw} \quad (4)$$

式中: d_{xw} 为 x 到墙 W 的距离; P_w 和 Q_w 分别为行人 x 对于墙体的心理排斥强度和排斥范围。所以对于个体 x 来说, (0, 0)位置心理斥力的标量和为

$$\lambda_{ij}^H = \sum_y |F_{xy}^H| + \sum_W |F_{xw}^H| \quad (5)$$

式(2)中动力场为

$$\Delta w_{ij} = u_{ij} / \lambda_{ij}^H - u_{00} / \lambda_{00}^H \quad (6)$$

式中: u_{ij} 为原力场模型中的从众系数, 即每当有疏散者逃离(0, 0)位置时 u_{ij} 的值加 1。将式(6)代入式(1)、(2)中即可得到 x 的迁移概率。

按照元胞自动机规则, 每 Δt 时间所有个体有机会移动一步。在此引入 PGG, 表示疏散者通过与邻居、环境交互以获得“竞争力”。PGG 是研究现实中多人交互问题的经典模型: 存在一个公共品池具有增殖功能, 能将其中的总资源乘以增益因子 r , $1 < r < N$, N 为组内总人数, 而每个参与者可以无差异地分享增殖后的资源, 参与者如果合作的话, 需要向公共品池中投入代价 c ; 而如果背叛的话, 就不投入任何成本。按照经典博弈的观点, 由于合作相对于背叛始终是劣策略, PGG 中的所有个体最终趋于背叛^[31]。

假设每 Δh 时间内个体发生一次博弈。如图 1(c) 所示, 中心个体与邻居为 Von Neumann 关系, 在中心个体 x 主持的 PGG 中, 所有的合作型疏散者会向公共池中投入成本 1, 而背叛型疏散者投入 0, 公共池中的总成本会经博弈增益系数 r_b , $1 < r_b < 5$ 放大再平均分配给所有的参与者。根据上述 PGG 的基本定义, 如果中心个体 x 为背叛型疏散者 P_D , 且其周围有 m_C 个 P_C 和 m_D 个 P_D , 其总收益为 $r_b m_C / (m_C + m_D)$; 而如果中心个体为 P_C , 其收益为 $(r_b + 1) m_C / (m_C + m_D) - 1$ 。由于有空格存在, $m_C + m_D \leq 4$ 。中心个体 x 还参加最多为 4 个邻居 (Von Neumann 邻居位存在空格时则小于 4, 否则为 4) 主持的 PGG, 且收益规则和 x 主持时相同, 这样 x 获得所参加博弈的总收益 R_x 。若按照式 (1) 和 (2) 挑选下一步移动位置的仿真模拟中得到多个疏散者以 (i, j) 为目标, 其集合表示为 $y \in \Omega_y$, 则 x 占据 (i, j) 的概率 I_x 与他的具体收益相关, 可表示为

$$I_x = \frac{\exp(k_a R_x)}{\sum_{y \in \Omega_y} \exp(k_a R_y)} \quad (7)$$

式中: k_a 为常数。而每个竞争失败的疏散者 y 将保持原位置不动, 他们会以一定概率 $I(x \rightarrow y)$ 尝试学习成功者 x 的策略, 这里采用费米规则, 按照惯例, k_s 取常数:

$$I(x \rightarrow y) = \frac{1}{1 + \exp[k_s (R_y - R_x)]} \quad (8)$$

所有的个体都移动到下一位置 (包括保持原地不动) 且策略更新都已经完成, 则进入下一时间步 Δh 。直到整个房间所有疏散者撤离完毕则仿真结束。整个流程如流程图 2 所示。

2 仿真结果分析

仿真参数设置如下: 疏散空间为大小为 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ 的房间, 墙宽为 0.5 m , 单出口宽度为 1 m 。元胞格点的大小为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$, 时间步长 $\Delta h = 0.5 \text{ s}$, 也就是说疏散者每 0.5 s 移动 0.5 m 。

疏散人员总数为 200 人。用 $\rho_C(t)$ 表示时刻 t 合作型疏散者的比例。其他的固定参数为 $k_a = k_w = 10$, $P_i = 2000$, $Q_i = 0.5$, $k_s = 2$ 。为了获得精确结果并消除噪声影响, 每个仿真结果平均了 600 次以上。需要说明的是对极小的博弈增益系数 r_b , $r_b < 1.74$ 疏散个体将快速收敛至全部背叛状态, 而对于极大的 r_b , $r_b > 4.54$ 则快速收敛至全部合作状态。而这 2 种情况都导致疏散模型回归到最基础的疏散力学场元胞模型^[25], 故以下结果仅针对 $r_b \in [1.8, 4.5]$ 。

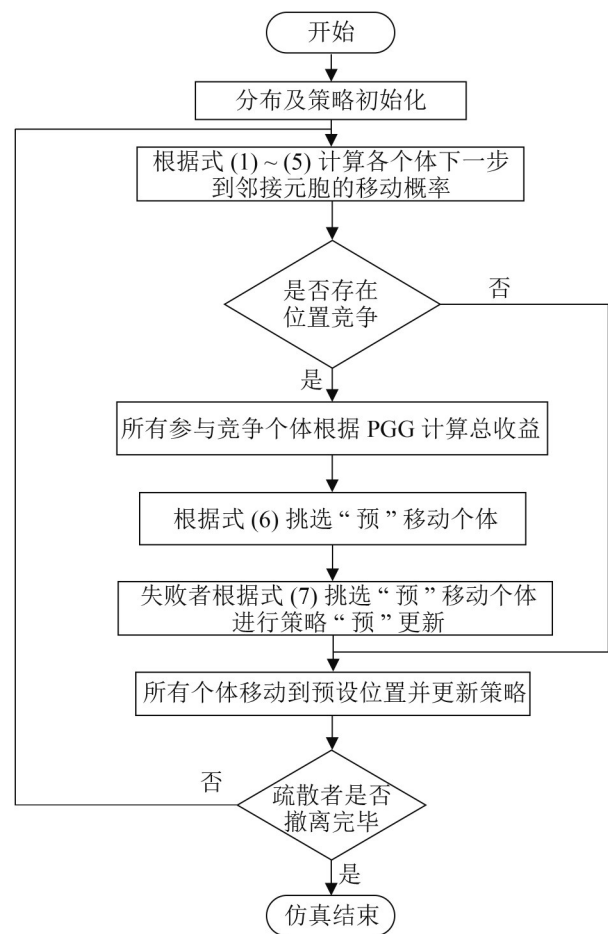


图2 基于演化博弈的疏散过程仿真流程

Fig. 2 Simulation flow chart of evacuation process based on Evolutionary Game.

图3展示了不同增益系数 r_b 下个体疏散过程及策略演化的经典快照。这里取 $\epsilon = 0.5$, 表征适中的合作者社会力折扣系数。与经典的 PGG 在方格网

上的演化博弈一样, r_b 对策略的演化方向起到了决定性作用。当 r_b 足够大的时候($r_b=3.5$), 疏散群体迅速转化为 P_C 主导状态, 这是由于从博弈收益上看, 当疏散环境适宜时合作利他行为与背叛行为的净收益差是较小的, 结合作者间在心理斥力上较小的优势($\varepsilon=0.5$), P_C 在竞争空格点的能力上远高于 P_D , 从而合作策略迅速占据群体, 见图 3(l)。而对于较小 r_b ($r_b=2, r_b=2.7$), P_C 和 P_D 将会陷入“均衡角力”的状态。但无论 r_b 为多大, 同类型疏散者都会发生“簇集”现象, 见图 3(d), (i), (n)。根据演化博弈理论, “簇集”行为会使合作型疏散者相对于背叛型产生一定的收益优势, 也就是著名的“网络互惠”。同时, 增大 r_b 能够加速拱形堵塞块的形成, 见图 3(b), (l)。由此可推测在演化早期 P_D 大量存在会阻碍疏散过程的推进, 因为 P_C 给予 P_D 的心理斥力明显大于 P_C 间的心理斥力, 所以 P_C 会利用集体的力量排斥 P_D , 从整个疏散群体上看就是对空格点的占据效率不高, 见图 3(b)。

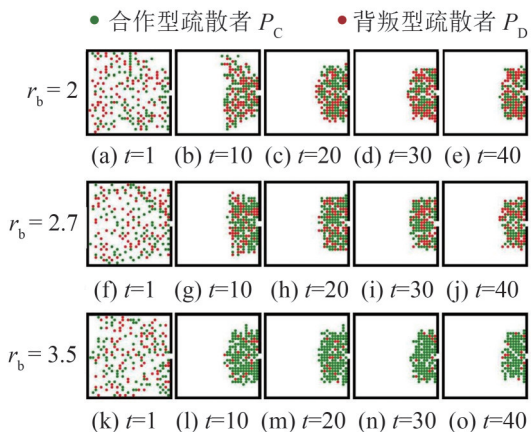


图 3 疏散博弈过程的经典快照
Fig. 3 Classic snapshot of evacuation game process

从图 3 可以看出 r_b 对疏散博弈动力学存在很大的影响, 所以接着量化研究了在不同 r_b 下合作型疏散者比例 $\rho_C(t)$ 的演化趋势, 见图 4。当初始比例 $\rho_C(0)$ 不同时, 相同的 r_b 依然导致 $\rho_C(t)$ 收敛到相同的水平。具体来看, $r_b=2$ 和 $r_b=2.7$ 对应的

稳定合作比率为 $\rho_{C_fix} \approx 0.5$, 而 $r_b=3.5$ 导致的稳定合作水平为 $\rho_{C_fix} \approx 0.9$ 。换言之, 策略演化是独立于合作型疏散者的初始比例 $\rho_C(0)$ 的, 并最终趋于稳定值。并且, 对给定的初始比例 $\rho_C(0)$, 增大 r_b 可以加速策略收敛, 这与图 3 中展示的结果是吻合的。稳定合作比率 ρ_{C_fix} 存在“阶跃”现象, 如图 4 所示, $\varepsilon=0.5$ 时, 存在一个 r_b 的阈值约为 3.27, 低于此值 ρ_{C_fix} 都收敛到 0.5 左右, 高于此值则会收敛到 0.9 左右。当然具体的阈值受到 ε 的影响, 但不同的 ε 值并不会从定性程度上改变以上结果。

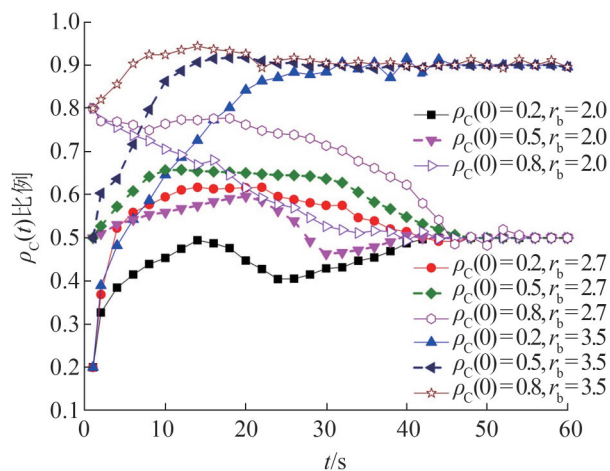


图 4 合作型疏散者比例随时间的演化曲线
Fig. 4 Evolution curve of cooperative evacuee proportion with time

这里的 ρ_{C_fix} 是独立仿真 1 000 次, 将每次 60 s 时的合作比率平均所得。如图 5 所示, 对于任意给定的 r_b , 增大 ε 会导致 ρ_{C_fix} 的下降, 这是由于 ε 增大实际上代表了合作者之间心理斥力的增大, 这样在合作型疏散者簇团附近的空格对 P_C 和 P_D 的吸引力相当接近, 实际降低了合作者从簇团中获得的相对优势。而对于任意给定的 ε , 则都存在一个 r_b 阈值, 超过该阈值 ρ_{C_fix} 会发生明显的“阶跃”, 这与图 4 中的结果是吻合的。而随着 ε 的增大这个 r_b 阈值也是单调增加的。当 ε 超过 0.82 以后, 这种“阶跃”现象几乎消失了, 稳定合作率

将维持在一个很低的水平(小于0.15)。

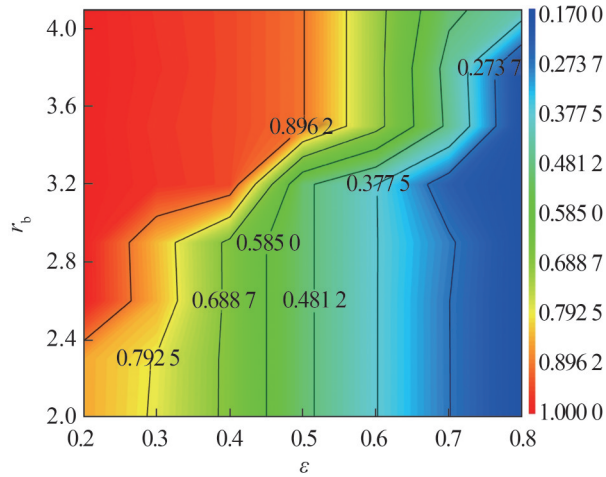


图5 稳定合作比率关于博弈增益系数和社会力折扣系数的函数关系云图

Fig. 5 Cloud plot of stable cooperation ratio as a function of game gain coefficient and social-force discount coefficient

疏散时间也是本研究关心的核心问题。除了总疏散时间, 也对不同类型疏散者的逃离时间进行了比较。需要说明的是, 由于疏散者在撤离过程中存在策略更新, 所以以疏散者最终离开出口时的策略为准。如图6所示, ε 越小 r_b 越大, 则总疏散时间越小。对比图5可知, 稳定合作比率 ρ_{C_fix} 越高越有利于整体疏散。当疏散人员数量增大时(采用500人), 这个优势会体现的愈发明显(定性结果并不改变)。而图7中整个参数平面上背叛型 P_D 与合作型 P_C 平均疏散时间之比都大于1, 表明合作型疏散者 P_C 的群体优势在应急疏散中是普遍存在的。尤其当参数组合为适中的社会力折扣系数 ε 配合适中的增益水平 r_b 时 ($\varepsilon=0.54$, $r_b=3.3$), P_C 对于 P_D 的疏散优势最为明显(此时 P_D 与 P_C 平均疏散时间之比约为1.29)。而参考图3可知, P_C 的疏散优势在早期最为明显, 他们通过形成“簇集”使他们周边的一些空格点对 P_D 保持较大的心理斥力, 从而保证了这些格点较为容易被 P_C 类型本身所占据。在危急疏散中利用群体力量在现实生活中屡见不鲜。当 ε 过小时 ($\varepsilon < 0.1$), P_D 在很短的时间内迅速转化为 P_C 型, 撤离出口的疏

散者几乎都为 P_C 型。总的来说, 合作策略无论对于合作者本身还是整个群体来说都是有利的。

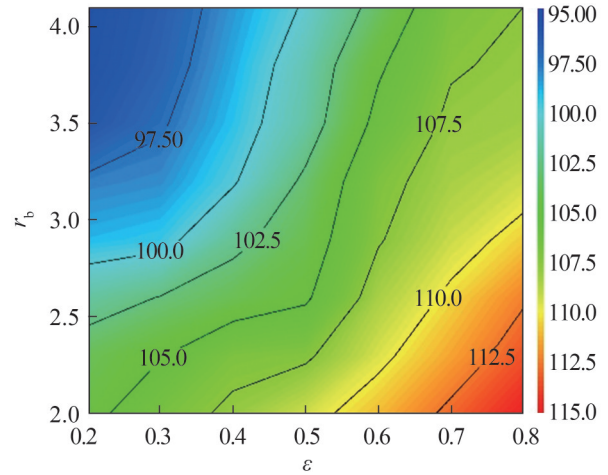


图6 总疏散时间关于博弈增益系数和社会力折扣系数的函数关系云图

Fig. 6 Cloud plot of total evacuation time as a function of game gain coefficient and social-force discount coefficient

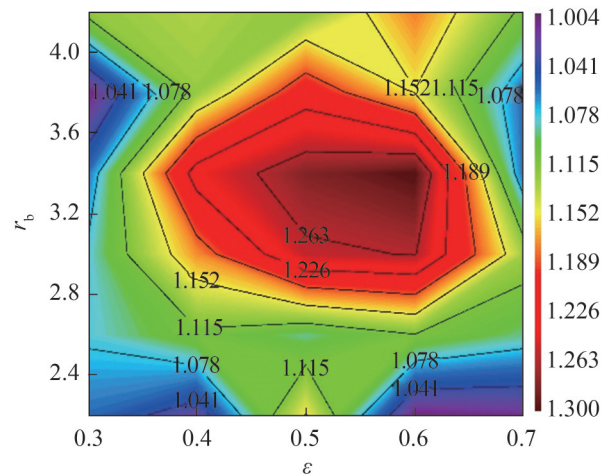


图7 背叛型与合作型疏散者平均疏散时间之比
Fig. 7 Ratio of average evacuation time of defective evacuees to that of cooperative evacuees

3 结论

在危急环境疏散中, 群体难免发生多样性地交互。从博弈角度来看, 个体的行为可以体现为合作型和背叛型。合作型个体对同类型个体施加较小的社会力, 同时他们更容易从同类型个体身上获取竞争能力(收益)。基于此假设, 本文结合社会力模型与元胞自动机模型研究了疏散博弈动力

学。仿真结果表明合作策略的盛行不但对合作型疏散者本身有利，也能够提高整体疏散效率。而随着增益系数的增加，稳定合作率存在“阶跃”现象，这与普通复杂网络上合作的演化是有区别的。并且，在适中的增益系数和社会力折扣系数下，合作行为相对于背叛行为在疏散时间上具有最大优势。本文一方面探索了疏散中的群体行为(尤其是合作行为)的演化，从而对疏散动力学向有利方向收敛给予引导；另一方面丰富了复杂网络上“合作”演化的研究，对博弈理论的研究领域给予拓展。

参考文献:

- [1] 周晓冰, 张永领. 我国拥挤踩踏事故发生规律、诱发因素及防控策略[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(5): 174-179.
Zhou Xiaobing, Zhang Yongling. Occurrence Regularity and Inducing Factors of Stampede Accidents in China and its Prevention and Control Strategies[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(5): 174-179.
- [2] Fernandez G, Tun A M, Okazaki K, et al. Factors Influencing Fire, Earthquake, and Cyclone Risk Perception in Yangon, Myanmar[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction(S2212-4209), 2018, 28: 140-149.
- [3] 黄家骏, 徐瑞华, 洪玲, 等. 动态不确定性环境下的地铁车站应急疏散仿真建模[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(2): 164-170.
Huang Jiajun, Xu Ruihua, Hong Ling, et al. Simulation Model of Evacuation Process in Metro Station under Dynamic and Uncertain Environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(2): 164-170.
- [4] 郑小平, 钟庭宽, 刘梦婷. 用于群体疏散的数字仿真方法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(12): 3503-3508.
Zheng Xiaoping, Zhong Tingkuan, Liu Mengting. Study on Numeral Simulation Approaches of Crowd Evacuation [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(12): 3503-3508.
- [5] Zheng X P, Zhong T K, Liu M T. Modeling Crowd Evacuation of a Building Based on Seven Methodological Approaches[J]. Building and Environment(S0360-1323), 2009, 44(3): 437-445.
- [6] Zhao D L, Yang L Z, Li J. Occupants' Behavior of Going with the Crowd Based on Cellular Automata Occupant Evacuation Model[J]. Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications(S0378-4371), 2008, 387 (14): 3708-3718.
- [7] Schadschneider A. Traffic Flow: A Statistical Physics Point of View[J]. Physica A-Statistical Mechanics and its Applications(S0378-4371), 2002, 313(1/2): 153-187.
- [8] Helbing D, Molnar P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics[J]. Physical Review E(S1539-3755), 1995, 51 (5): 4282-4286.
- [9] 菅肖霞, 张小宁. 基于势函数场模型的密集人群排队疏散方法[J]. 系统工程学报, 2016, 31(6): 850-862.
Jian Xiaoxia, Zhang Xiaoning. Dense Crowd Grouping Evacuation Strategy Based on Potential Field Model[J]. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(6): 850-862.
- [10] 岳昊, 邵春福, 姚智胜. 基于元胞自动机的行人疏散流仿真研究[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4523-4530.
Yue Hao, Shao Chunfu, Yao Zhisheng. Pedestrian Evacuation Flow Simulation Based on Cellular Automata [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(7): 4523-4530.
- [11] Weng W G, Hasemi Y, Fan W C. Motor Schema-Based Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics[J]. International Journal of Modern Physics C(S0129-1831), 2006, 17(6): 853-859.
- [12] 卓亚琦, 王力虎, 郭松斌. 行人个体差异对行人疏散的影响研究[J]. 广西物理, 2012, 33(4): 21-24.
Zhuo Yaqi, Wang Lihu, Guo Songbin. Study on the Influence of Pedestrian Individual Differences on Pedestrian Evacuation[J]. Guangxi Physics, 2012, 33(4): 21-24.
- [13] Chen L, Tang T Q, Huang H J, et al. Modeling Pedestrian Flow Accounting for Collision Avoidance during Evacuation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory (S1569-190X), 2018, 82: 1-11.
- [14] Jiang J, Lu D, Jiang Y, et al. Understanding Environment-influenced Swarm Behavior from a Social Force Perspective[J]. Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications(S0378-4371), 2018, 492: 724-736.
- [15] Helbing D. Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems[J]. Reviews of Modern Physics (S0034-6861), 2001, 73(4): 1067-1141.
- [16] Zhang H, Liu H, Qin X, et al. Modified Two-Layer Social Force Model for Emergency Earthquake Evacuation[J]. Physica A-Statistical Mechanics and its Applications (S0378-4371), 2018, 492: 1107-1119.
- [17] Parisi D R, Dorso C O. Morphological and Dynamical Aspects of the Room Evacuation Process[J]. Physica A-Statistical Mechanics and its Applications(S0378-4371), 2007, 385(1): 343-355.
- [18] Sticco I M, Cornes F E, Frank G A, et al. Beyond the Faster-is-Slower Effect[J]. Physical Review E

- (S1539-3755), 2017, 96(5): 052303.
- [19] Yang X X, Dong H R, Wang Q L, et al. Guided Crowd Dynamics via Modified Social Force Model[J]. *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications*(S0378-4371), 2014, 411: 63-73.
- [20] Yang X X, Dong H R, Yao X M, et al. Necessity of Guides in Pedestrian Emergency Evacuation[J]. *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications*(S0378-4371), 2016, 442: 397-408.
- [21] Pelechano N, Badler N I. Modeling Crowd and Trained Leader Behavior During Building Evacuation[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*(S0272-1716), 2006, 26(6): 80-86.
- [22] Hou L, Liu J G, Pan X, et al. A Social Force Evacuation Model with the Leadership Effect[J]. *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications*(S0378-4371), 2014, 400: 93-99.
- [23] Qiu F S, Hu X L. Modeling Group Structures in Pedestrian Crowd Simulation[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*(S1569-190X), 2010, 18(2): 190-205.
- [24] 秦欣. 基于双层关系机制的行人疏散仿真研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2018.
Qin Xin. Simulation of Pedestrian Evacuation Based on Two-layer Relationship Mechanism[D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2018.
- [25] 刘群, 刘磊, 高轶, 等. 人员疏散出口选择行为的演化博弈模型[J]. *计算机工程与设计*, 2013, 34(2): 638-642.
Liu Qun, Liu Lei, Gao Yi, et al. Evolutionary Game Model of Pedestrians' Behavior of Selection of Exits[J]. *Computer Engineering and Design*, 2013, 34(2): 638-642.
- [26] Whitt S, Wilson R K. Public Goods in the Field: Katrina Evacuees in Houston[J]. *Southern Economic Journal* (S0038-4038), 2007, 74(2): 377-387.
- [27] 霍良安, 黄培清, 方星. 基于Stackelberg博弈模型的展会人员应急疏散问题[J]. *系统管理学报*, 2013, 22(3): 425-430.
Huo Liangan, Huang Peiqing, Fang Xing. The Model of Emergency Evacuation in Exhibition Based on Stackelberg Game[J]. *Journal of Systems & Management*, 2013, 22(3): 425-430.
- [28] James Samuel Coleman. *Foundations of Social Theory* [M]. Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press, 1990.
- [29] 李蒙, 丁凌灵, 林从谋. 采用演化博弈的地质灾害人员疏散仿真[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(3): 324-328.
Li Meng, Ding Lingling, Lin Congmou. Simulation on the Evacuation Model in the Geologic Hazard Using Evolutionary Game Theory[J]. *Journal of Huaqiao University(Natural Science)*, 2013, 34(3): 324-328.
- [30] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, et al. Simulation of Pedestrian Dynamics Using a Two-Dimensional Cellular Automaton[J]. *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications*(S0378-4371), 2001, 295(3): 507-525.
- [31] Hardin G. The Tragedy of the Commons[J]. *Science* (S0036-8075), 1968, 162(3859): 1243-1248.