

# 通过博弈的室内行人疏散动力学研究\*

谢积鉴 薛郁<sup>†</sup>

(广西大学物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

(2012年1月2日收到; 2012年3月23日收到修改稿)

在室内行人疏散过程中, 行人博弈对疏散效率有着重要的影响. 本文把抵制博弈策略更新的强度定义为抵制强度. 为了研究抵制强度对疏散效率的影响, 通过在行人博弈策略更新的概率中引入抵制强度, 基于元胞自动机模型数值计算在不同的行人密度, 出口宽度下疏散总时间随抵制强度变化的关系. 结果表明: 室内行人疏散过程中, 抵制强度小会使得争抢行为极易蔓延. 当行人密度小且出口宽大时, 输入以急速疏散为主的规范信息, 鼓励行人模仿优胜者更新博弈策略, 当行人密度大且出口狭小时, 输入以避让为主的规范信息抑制行人争抢, 都能提高疏散效率. 最后找出不同条件下与最短疏散总时间相对应的优化抵制强度, 为提高室内行人疏散效率提供一个新的视角.

**关键词:** 元胞自动机, 行人流, 疏散动力学, 博弈

**PACS:** 45.70.Vn, 05.65.+b, 05.70.Fh

## 1 引言

近几十年来, 行人交通研究的重要性日益显现, 行人动力学已经引起了科学家们的广泛兴趣, 不仅是因为行人动力学的研究具有解决现实问题的意义, 同时也因为行人动力学在研究过程中出现了许多有趣的现象, 例如自组织、集群、加热凝结、快即是慢、从众行为等<sup>[1-6]</sup>. 很多具有代表性的模型被建立以研究行人动力学问题, 如社会学模型<sup>[5]</sup>、格子流体力学模型<sup>[6,7]</sup>、磁力模型<sup>[8]</sup>等. 与连续性的动力学模型不同, 元胞自动机模型不是由严格定义的方程或函数确定, 而是通过确定系统的状态, 制定一系列的演化规则构成<sup>[9]</sup>. 具有处理方式易于大规模仿真计算和计算效率优于其他交通流模型的重要特点. 因此, 元胞自动机模型在研究复杂系统方面被认为是一种非常有效的工具, 目前, 人们已经将元胞自动机和格子气模型广泛应用于行人交通的研究<sup>[10-16]</sup>.

近年来, 博弈理论在社会、经济以及生态等系统的研究中得到广泛的应用<sup>[17]</sup>. 博弈理论也因其

与行人流现实特性联系紧密, 近来在行人动力学研究中倍受重视<sup>[2,10,11,16]</sup>. 众所周知, 行人流是多个智能个体组成的复合系统<sup>[18]</sup>. 通常, 行人喜欢以有利于自身且满意的方式行走. 所以, 在室内行人疏散过程中, 由于行人博弈时优胜者获得更大的收益, 避让的行人很有可能通过模仿优胜者更新他们自身的博弈策略. 但是在不同文明规范下, 行人对策略更新有着不同的抵制, 文章把这种抵制策略更新的强度定为抵制强度. 所以, 为了了解抵制强度对疏散效率的影响, 本文基于元胞自动机模型, 通过在行人博弈策略更新的概率中引入抵制强度对室内行人疏散动力学进行研究, 模拟在不同的行人密度, 出口宽度下, 室内行人疏散总时间与抵制强度之间的关系, 并找出优化抵制强度, 为提高室内行人疏散效率提供一个新的视角.

## 2 模型

### 2.1 建模

如图 1 所示<sup>[16]</sup>, 模型建立在二维元胞自动机

\* 国家自然科学基金(批准号: 11262003, 11047003)、广西壮族自治区“十百千人才工程”专项基金(批准号: 2005205)和广西壮族自治区研究生创新基础项目(批准号: 105930903077)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yuxuegu@gxu.edu.cn

的基础上,室内平面被平均分成方形网格,每一个格子代表一个元胞,每一个元胞为空或被一个行人占据.当格子为灰色时,表示此格子已被一个行人占据,而当格子为白色时,表示此格子为空.假设出口位于此图的右上方,图中的两个行人 A 和 B,在通往出口的路线上出现了空格 C.行人 A 和 B 就会面临进入同一个空格 C 的博弈,而博弈策略分为避让或争抢.如果他们都避让,就会耽误一个时步,然后他们中的任意一个才会进入空格.如果 A 避让而 B 争抢,那么 B 将直接进入空格.如果他们都争抢,那么他们将因为没有人愿意避让而耽误两个时步,然后他们中的任意一个将胜利并进入空格.很明显,如果 A 选择避让,那么 B 的最佳策略就是争抢,因为在这种情况下 B 可以直接进入空格.如果 A 选择争抢,那么 B 的最佳策略也是争抢,因为在这种情况下 B 争抢才有进入空格的机会.所以,无论竞争对手选择何种策略,另一个行人的最佳策略都为争抢,那么,行人之间最终将会进入相互争抢的状态.当 A 和 B 相互争抢时,没有个体会主动先改变自己的策略,因为个体先改变自身的策略将使自己的收益降低.我们注意到,如果把其中的两个博弈行人看成一个整体,在相互争抢的情况下两个行人前进一个格子所花费的时间最长,但是,即使两个行人都选择避让,他们所花费的时间也不是最短的.

当两个行人以不同的策略去竞争同一个空格时,失败者将有可能仿优胜者更新自身的博弈策略,这一模仿优胜者更新策略的概率用公式表示为 [19-23]

$$W_{ij} = \frac{1}{1 + \exp[-(U_j - U_i)/k]}$$

其中  $W_{ij}$  为失败者模仿优胜者更新策略的概率,  $U_i$  是失败者的收益,  $U_j$  是获胜者的收益,  $k(0 < k < \infty)$  是环境噪声项,表示非理性选择强度,噪声项受环境因素影响而不受收益变化的影响 [19-24].当  $k \rightarrow \infty$  时,  $W_{ij} = 1/2$  表示博弈个体此环境下不会对收益进行理性判断,个体随机选择是否进行策略更新,当  $k \rightarrow 0$  时,  $W_{ij} = 1$ ,表示博弈个体在此环境下对收益进行理性判断,在理性的驱动下个体确定性地选择模仿优胜者进行策略更新.

考虑到由于行人在不同的文明规范下等,行人对策略更新具有不同的抵制强度,以坚持个人原始

行为而抵制策略更新,所以在失败者更新策略的概率中引入抵制强度项,则策略更新的概率为

$$W_{ij} = \frac{1}{1 + \exp[-(U_j - U_i)/k]}(1 - ci),$$

其中  $ci(0 \leq ci \leq 1)$  为抵制强度.在考虑  $k \rightarrow 0$  的情况下,当  $ci \rightarrow 0$  时,  $W_{ij} = 1$ ,即行人个体在此环境下对收益进行理想判断,对策略更新没有抵制时将确定性地选择模仿优胜者进行策略更新,而当  $ci \rightarrow 1$  时,  $W_{ij} = 0$ ,即行人个体确定性地坚持初始博弈策略.在考虑  $k \rightarrow \infty$  的情况下,当  $ci \rightarrow 0$  时,  $W_{ij} = 1/2$ ,即行人个体在此环境下对收益进行非理想判断,对策略更新没有抵制时将随机地选择模仿优胜者进行策略更新,而当  $ci \rightarrow 1$  时,  $W_{ij} = 0$ ,即行人个体确定性地选择坚持初始策略.本文研究的室内行人疏散过程,由于避险因素的影响,在没有文明规范的情况下,使自身获得更高收益的理性自私决定使得个体将确定性地选择模仿优胜者进行策略更新,即  $k$  趋于零.

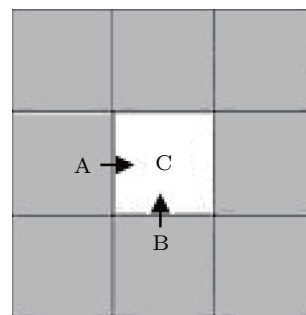


图1 行人 A 和 B 为进入空格 C 博弈(灰色格子表示已被行人占据;白色格子表示格子为空)

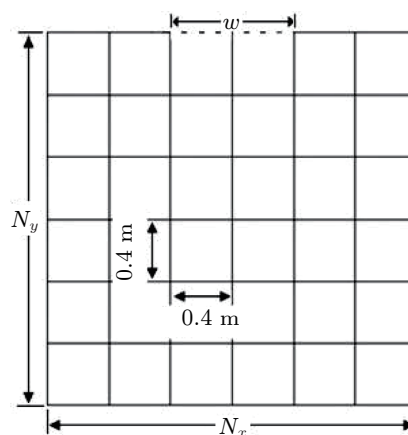


图2 室内平面模型( $N_x$  为室内长而  $N_y$  为宽,  $w$  为出口宽度)

如图 2 所示 [16],室内平面被平均分成方形网

格, 每个格子的尺寸为  $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$  [25]. 所以我们定义  $0.4\text{ m}$  为单位长度.  $N_x$  为室内的长而  $N_y$  为宽, 出口位于平面上边界的中央,  $w$  为出口宽度. 通常, 行人的平均行走速度为  $1.0\text{ m/s}$  [25], 即通过一个格子所需的时间为  $0.4\text{ s}$ , 所以每一个时步为  $0.4\text{ s}$ .  $\rho$  为行人密度,  $p_c$  为初始争抢行人比例,  $T$  为室内行人疏散总时步, 以下称为疏散总时间.

## 2.2 行走方向

如图 3 所示 [16], 某一个行人的坐标为  $(x_i, y_j)$ , 而出口中心坐标为  $(x_o, y_o)$ .

1) 如果  $x_i \leq x_o, y_j \leq y_o$ , 那么这个行人将选择坐标为  $(x_i + 1, y_j)$  或  $(x_i, y_j + 1)$  的空格进入, 且  $x_i + 1 \leq x_o, y_i + 1 \leq y_o$ .

2) 如果  $x_i \geq x_o, y_j \leq y_o$ , 那么这个行人将选择坐标为  $(x_i - 1, y_j)$  或  $(x_i, y_j + 1)$  的空格进入, 且  $x_i - 1 \geq x_o, y_i + 1 \leq y_o$ .

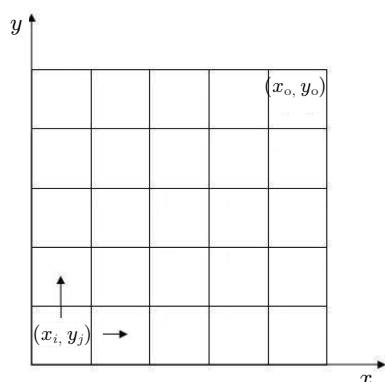


图 3 室内行人行走方向 ( $(x_i, y_j)$  为行人的坐标;  $(x_o, y_o)$  为出口中心坐标)

## 2.3 行走规则

1) 如果一个格子已经被一个行人占据, 则此时其他的行人不能进入该格子, 而是选择为空的格子进入.

2) 如果两个避让行人同时选择进入同一个空格子, 且都采取避让策略, 那么相互的避让将耽误一个时步, 然后他们中的任意一个才能进入该空格.

3) 如果一个避让行人和一个争抢行人同时选择进入同一个空格子, 那么争抢行人将直接进入该空格.

4) 如果两个争抢行人同时选择进入同一个空格子, 因为无人避让所以耽误两个时步, 然后他们中的任意一个才能取胜并进入该空格.

5) 当两个行人处于博弈过程中时, 如果有一个新的空格子出现在他们其中一个行人通往出口的路线上, 那么这个行人也将同时选择进入该空格子, 而不是只保持原来的博弈.

6) 出口具有相应的宽度, 如果一个行人到达出口, 那么这个行人将从系统中删除.

## 3 模拟与讨论

### 3.1 模拟分析

在此模拟试验中, 室内平面的长为  $N_x = 100$ , 宽为  $N_y = 100$ . 根据给定的行人密度, 行人在室内初始随机分布. 为了减小模拟过程中随机性对试验结果的影响, 本文每个试验进行 50 次并对疏散总时间取平均值. 平均疏散总时间为

$$\langle T \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i.$$

### 3.2 抵制强度对室内行人流斑图的影响

图 4 为当出口宽度为  $w = 10$ , 行人密度为  $\rho = 0.5$ , 噪声项为  $k = 0$ , 初始争抢行人比例为  $p_c = 0.1$  时, 在四个不同抵制强度下, 室内行人流在第 100 个时步时的斑图. 黑色格子代表争抢行人而灰色格子代表避让行人. 如图所示, 随着抵制强度的增大, 争抢行人的比例相对减小.

### 3.3 抵制强度对疏散时间的影响

图 5 为当出口宽度分别为  $w = 10, w = 40$ , 行人密度分别为  $\rho = 0.1, \rho = 0.8$ , 噪声项为  $k = 0$  时, 疏散总时间  $T$  随抵制强度  $ci$  与初始争抢行人比例  $p_c$  变化的三维图. 如图所示, 抵制强度对疏散总时间有着巨大的影响. 比较图 5(a) 和 (c) 可知, 当行人密度为  $\rho = 0.1$  时, 疏散总时间随抵制强度的增大而增加. 比较图 5(b) 和 (d) 可知, 当行人密度为  $\rho = 0.8$  时, 疏散总时间随抵制强度的增大而减少.

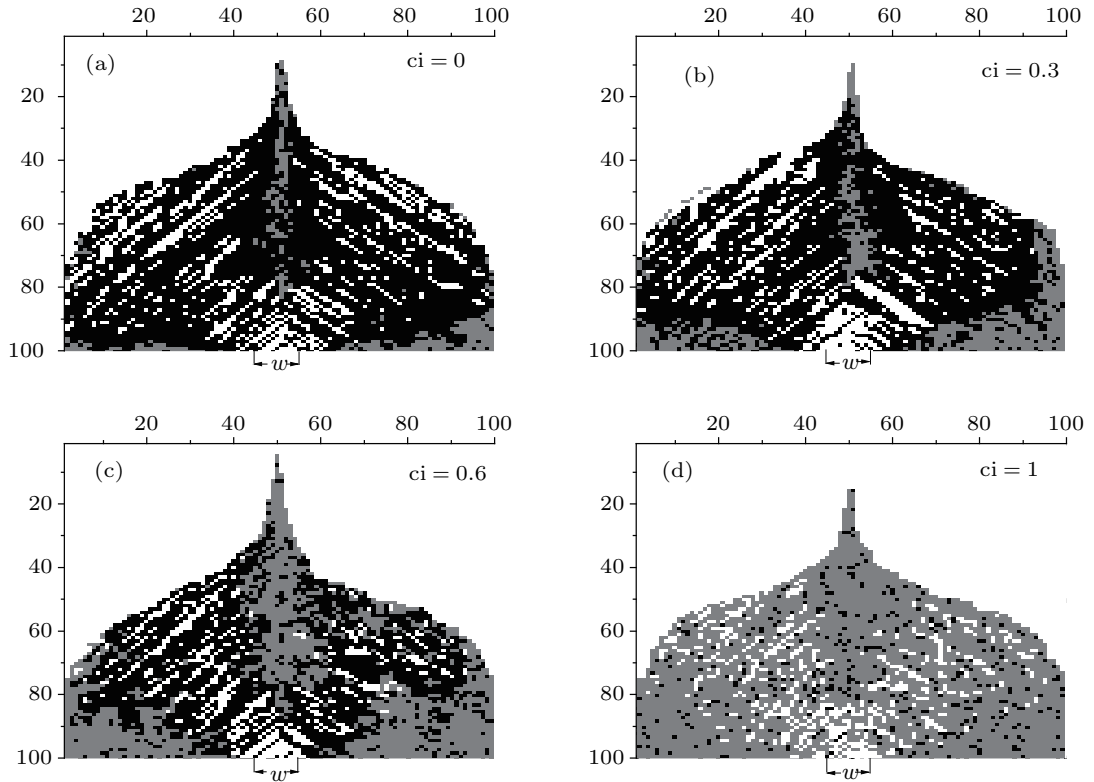


图4 不同抵制强度下室内人流在第100个时步时的斑图 (黑色格子为争抢行人; 灰色格子为避让行人; 白色格子为空)

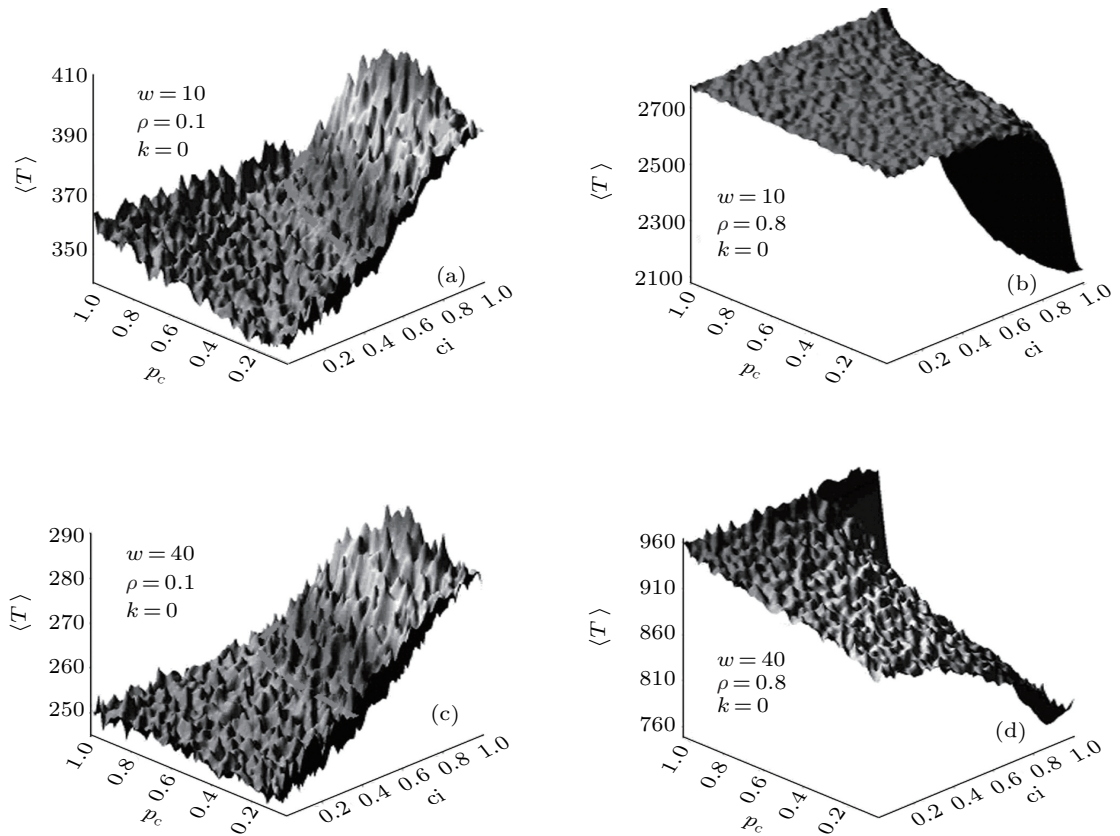


图5 不同出口宽度, 行人密度下疏散总时间随抵制强度与初始争抢行人比例变化的三维图

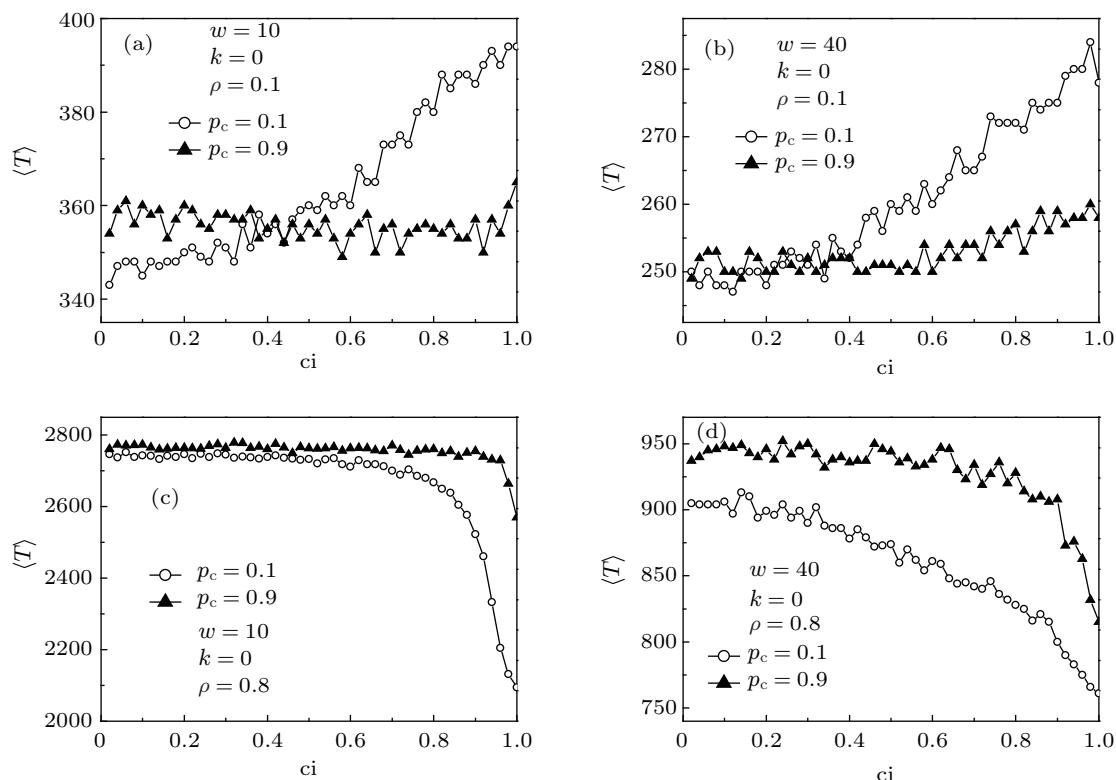


图 6 不同行人密度不同初始争抢比例, 不同出口宽度下疏散总时间随抵制强度变化的关系曲线

为了进一步探究疏散总时间与抵制强度的关系, 图 6 给出了当室内行人密度为  $\rho = 0.1$  和  $\rho = 0.8$  时, 疏散总时间随抵制强度变化的关系曲线. 如图所示, 当室内行人密度小且出口宽度足够大时, 抵制强度的减小明显有利于行人疏散. 但是, 当室内行人密度大且出口宽度小时, 抵制强度的增大有利于行人疏散.

### 3.4 室内行人密度对优化抵制强度的影响

在仿真模拟中, 抵制强度由 0 逐渐增大到 1, 根据对应的抵制强度推算出所需的室内行人疏散总时间, 其中对应疏散总时间最短的表示为优化抵制强度  $oci$ .

图 7 为当噪声项  $k = 0$ , 出口宽度分别为  $w = 2, w = 10, w = 40, w = 80$  时, 优化抵制强度与行人密度的关系曲线. 如图所示, 当出口的宽度极其小时,  $w = 2$ , 优化抵制强度保持在高位,  $oci = 1$ , 这意味着出口狭小的情况下, 每个人都抵制博弈策略的更新将有利于室内行人疏散. 当出口的宽度为  $w = 10$  时, 优化抵制强度由低位迅速攀升到高位, 这意味着当行人密度很小时, 行人模仿优胜者更新策略有利于室内行人疏散, 而随着行人

密度的增大, 抵制强度的增大则有利于室内行人疏散. 在出口宽度增大到一定程度,  $w = 40$  时, 随着行人密度的增大, 优化抵制强度先下降而后缓慢上升. 在出口宽度增大到  $w = 80$  时, 优化抵制强度先缓慢上升而后迅速下降并保持在低位.

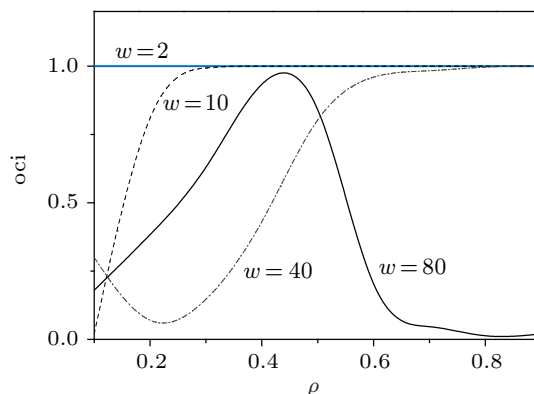


图 7 不同出口宽度下优化抵制强度随室内行人密度变化的关系曲线

## 4 结论

文章研究结论如下:

1. 通常室内行人疏散过程中, 由于避险本能因素的影响, 文明行为受到理性心理的抑制, 即  $k \rightarrow 0$

的情况下, 行人对策略更新的抵制强度小时, 将会导致行人群体在理性的驱动下模仿优胜者更新博弈策略, 使自身获得更高收益的自私决定使得争抢行为极其容易蔓延, 群体进入相互争抢的状态.

2.  $k \rightarrow 0$  时, 在不同的行人密度和出口宽度下, 优化抵制强度具有不同的值, 即疏散效率的提高需要我们对实际情况进行具体分析. 通常情况下, 当行人密度小而出口宽大时, 我们需要注入以急速疏散为主的规范信息, 鼓励行人模仿优胜者更新博弈

策略. 但当行人密度大而出口狭小时, 注入以避让为主的规范信息抑制行人争抢, 则能提高疏散效率.

文章在室内行人疏散过程中, 通过在行人博弈策略更新的概率中引入抵制强度, 为提高行人疏散效率提供了一个新的视角. 建立更加接近现实的疏散过程行人博弈模型需要进一步的考虑与验证, 所有的这些研究将为指导行人疏散提供有利的帮助, 从而降低社会财产损失与挽救生命<sup>[16]</sup>.

- [1] Helbing D, Molnar P 1995 *Phys. Rev. E* **51** 4282
- [2] Helbing D, Farkas I, Vicsek T 2000 *Nature* **407** 487
- [3] Helbing D 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 1067
- [4] Nagatani T 2002 *Rep. Prog. Phys.* **65** 1331
- [5] Kuang H, Li X L, Song T, Dai S Q 2008 *Phys. Rev. E* **78** 66117
- [6] Nagatani T 1998 *Physica A* **261** 599
- [7] Nagatani T 1999 *Physica A* **264** 581
- [8] Okazaki S 1979 *Transactions of Architectural Institute of Japan* **283** 111
- [9] Jia B, Gao Z Y, Li K P, Li X G 2007 *Models and Simulations of Traffic System Based on the Theory of Cellular Automaton* (Beijing: Science Press) p10 (in Chinese) [贾斌, 高自友, 李克平, 李新刚 2007 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟 (北京: 科学出版社) 第 10 页]
- [10] Hao Q Y, Jiang R, Hu M B, Jia B, Wu Q S 2011 *Phys. Rev. E* **84** 036107
- [11] Zheng X P, Cheng Y 2011 *Physica A* **390** 1042
- [12] Yue H, Shao C F, Yao Z S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4523 (in Chinese) [岳昊, 邵春福, 姚智胜 2009 物理学报 **58** 4523]
- [13] Zhou J W, Kuang H, Liu M R, Kong L J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3001 (in Chinese) [周金旺, 邝华, 刘慕仁, 孔令江 2009 物理学报 **58** 3001]
- [14] Xue Y, Tian H H, He H D, Lu W Z, Wei Y F 2009 *Eur. Phys. J. B* **69** 289
- [15] Tian H H, Xue Y, He H D, Wei Y F, Lu W Z 2009 *Physica A* **388** 2895
- [16] Xie J J, Xue Y 2011 *Seventh International Conference on Natural Computation* Shanghai, China, July 26–28, 2011 p2283
- [17] Wu Z X, Rong Z H, Wang W X 2008 *Advances in Mechanics* **38** 794 (in Chinese) [吴枝喜, 荣智海, 王文旭 2008 力学进展 **38** 794]
- [18] Grimm V, Revilla E, Berger U, Jeltsch F, Mooij W M, Railsback S F, Thulke H H, Weiner J, Wiegand T, Deangelis D L 2005 *Science* **310** 987
- [19] Szabo G, Toke C 1998 *Phys. Rev. E* **58** 69
- [20] Szabo G, Hauert C 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 118101
- [21] Szabo G, Vukov J, Szolnoki A 2005 *Phys. Rev. E* **72** 047107
- [22] Vukov J, Szabo G, Szolnoki A 2006 *Phys. Rev. E* **73** 067103
- [23] Vukov J, Szabo G, Szolnoki A 2008 *Phys. Rev. E* **77** 026109
- [24] Zhao L, Zhou X, Liang Z, Wu J R 2012 *Chin. Phys. B* **21** 018701
- [25] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507

# Research on the dynamics of indoor pedestrian evacuation via game\*

Xie Ji-Jian Xue Yu<sup>†</sup>

( College of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China )

( Received 2 January 2012; revised manuscript received 23 March 2012 )

## Abstract

In the process of indoor pedestrian evacuation, the game between pedestrians greatly influence evacuation efficiency. In this paper, we introduce the boycott strength into the updated game strategy coefficient in order to investigate the influence of boycott strength on the evacuation efficiency. The relations between the evacuation time and boycott strength for different pedestrian densities and exit widths are obtained by numerical simulations based on cellular automaton model. The results show that the vying behaviors are extremely easy to spread and the crowd will turn into a vying state when the boycott strength is small. When the pedestrian density is low and the exit is wide, we encourage the pedestrians to imitate the winners to update their game strategies via offering the information about standardizing roles about rapid evacuation. When the pedestrian density is high and the exit is narrow, the information about standardizing roles about avoiding to congestion is provided. Thus, the evacuation efficiency can be enhanced. Finally, the optimal boycott strength corresponding to the shortest evacuation time in different conditions is yielded. Our study provides a new perspective to enhance the efficiency of indoor pedestrian evacuation.

**Keywords:** cellular automaton, pedestrian flow, evacuation dynamics, game

**PACS:** 45.70.Vn, 05.65.+b, 05.70.Fh

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11262003, 11047003), the Special Foundation for the New Century Talents Program of Guangxi Zhuang Autonomous Region (Grant No. 2005205), and the Graduate Student Innovative Foundation of Guangxi Zhuang Autonomous Region (Grant No. 105930903077).

<sup>†</sup> E-mail: yuxuegxu@gxu.edu.cn