

# 多出口室内行人出口选择行为研究\*

## Behavior Study on Exit Choice of Indoor Pedestrians in Multiple Exits

刘泽高<sup>1</sup>, 陈 栋<sup>2</sup>, 薛 郁<sup>1\*\*</sup>

LIU Ze-gao<sup>1</sup>, CHEN Dong<sup>2</sup>, XUE Yu<sup>1</sup>

(1. 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西南宁 530004; 2. 重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

(1. College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing, 400044, China)

**摘要:**【目的】研究行人在不同设定条件下选择合理出口的行为, 为多出口室内行人疏散提供参考。【方法】采用元胞自动机模型, 在静态场的基础上, 模拟行人在多出口室内的出口选择行为。在模型中引入出口代价, 即行人选择目标出口时需要考虑的距离及其与他人竞争因素的加权平均(权重为  $k$ )。为实现出口选择机制, 赋予每个出口元胞 1 个单元场, 当行人评估出室内最小代价值的出口时, 选用该出口的单元场来进行迁移。【结果】当权重  $k$  合适(区间较大)时, 在初始行人分布均匀或不均匀、出口分布对称或不对称, 以及在疏散过程中增加应急出口的情况下, 行人都会充分利用空闲的出口, 使不同的出口都聚集大致相等的人数; 而且应急出口打开时间越早行人疏散的效果越好, 应急出口打开过晚时行人疏散的效果甚至会比没有应急出口的情况还差。【结论】出口代价的引入, 使模型能合理地描述多出口的室内行人疏散。

**关键词:** 行人交通流 元胞自动机疏散 出口选择 出口代价

**中图分类号:** TP399 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)04-0388-07

**Abstract:** 【Objective】We simulate pedestrian evacuation in an optimal way that pedestrians choose an exit in a multi-exit room. 【Methods】The paper proposes a model that can simulate pedestrians choosing exit in a multi-exit room or in a room with emergency exits which can be activated at a certain time step during the evacuation. The pedestrians choose an exit in the model by a way that pedestrians weigh all the exits in the room with two factors: One is the distance weighted by  $k$  and the other is the competition weighted by  $1-k$ . The cost is defined as the sum of the two factors with weight. With every exit cell in the room having a “unit field”, the pedestrians choose a lowest cost exit and move by the “unit field” of the exit chosen. 【Results】When the weight  $k$  is suitable, pedestrians will make full use of idle exit at different situations, so that there are roughly equal number of people gathered at different exits. The emergency exit should open as soon as possible before it opens too late otherwise the evacuation time will take longer than the situation that have no emergency exit and the pedestrian will choose a reasonable exit to evacuate.

【Conclusion】The introduction of the cost factor in the model can reasonably describe indoor pedestrian evacuation in the multi-exits.

**Key words:** pedestrian traffic, cellular automata, exit selection, cost factor

收稿日期: 2015-04-20

修回日期: 2015-05-20

作者简介: 刘泽高(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事行人交通流理论研究。

\* 国家自然科学基金项目(11262003), 广西教育厅科研项目(2013ZD059)和广西研究生创新项目(No. YCSZ2012013)资助。

\*\* 通讯作者: 薛 郁(1963-), 男, 教授, 主要从事交通流动力学研究, E-mail: yuxuegxu@gxu.edu.cn.

### 0 引言

【研究意义】随着社会经济的快速发展, 人们聚集

大型超市、广场、电影院、戏剧院、体育馆等场所已成为生活的一部分。但在有限的空间里,行人大量聚集,安全隐患很难避免。在拥挤的人群中,若有恐怖源或其他兴奋源,行人容易情绪激动而失去理智,出现“多米诺骨牌”连锁反应,导致拥挤踩踏。故行人交通动力学的研究有着重要的现实意义。【前人研究进展】很多有趣的现象和行为已在行人交通流中被挖掘,例如集簇行为,自组织、拥挤和堵塞、加热凝结、快即是慢、自动成行排队、瓶颈处震荡等现象<sup>[1~7]</sup>。目前,研究行人交通流的主要模型有格子气模型<sup>[8~11]</sup>、元胞自动机模型<sup>[12,13]</sup>、社会力模型<sup>[1~4,10]</sup>和流体动力学模型<sup>[14,15]</sup>等。元胞自动机模型不是严格意义上的函数或者动力学方程,而是离散的时间空间形式,依据一定的规则进行演化。近年来,以静态场为基础的行人交通元胞自动机模型<sup>[16~19]</sup>受到了极大关注。岳昊等<sup>[17,19]</sup>建立用于模拟行人横向干扰、行人双向行走、行人正常情况下、行人视距受影响和安全出口处行人布局不平衡时的行人疏散元胞自动机模型。周金旺等<sup>[18,19]</sup>基于元胞自动机提出用于模拟行人双向运动的改进双向多速行人流模型,还模拟研究了成对行人结伴逃生对行人整体疏散的影响。谢积鉴等<sup>[20]</sup>研究室内人群通过博弈进行疏散。最近人们对多出口的室内行人疏散进行研究,得到了一些具有实际意义的成果<sup>[21]</sup>。文献[22]通过元胞自动机模型模拟了行人在多出口设定条件下的疏散。【本研究切入点】在多出口的室内,当应急门打开时,行人通常考虑空间距离和自身与其余行人的竞争后,选择最佳目标出口,获得最短的疏散时间。故需要考虑多种因素以提高出口选择效率,优化多出口的室内行人疏散模型。【拟解决的关键问题】在元胞自动机静态场的基础上,通过引入出口代价模拟多出口行人疏散过程。研究行人分布不均匀情况下,行人如何选择目标出口,同时,考虑应急门打开时机对室内行人疏散的影响。

## 1 元胞自动机背景场理论和模型

### 1.1 元胞自动机的背景场理论

用元胞自动机模拟行人疏散时,空间被离散成多个元胞(格子),一个元胞只能被一个人占据。运用场的概念,每一个元胞都被赋予一个场值,使整个房间都处于场中,这种场能驱使行人运动。静态场是不随时间变化的一种较为简单的场。由于只考虑静态场不影响本文结果,为了简单起见,以下以静态场为背景。

用集合  $R$  表示室内所有元胞,元胞集  $\{i_d, j_d\}$  表示所有出口所在的元胞。一个静态场的具体数学表

达式<sup>[15]</sup>为

$$S_{ij} = \min_{(i_d, j_d) \in \{i_d, j_d\}} \left\{ \max_{(i', j') \in R} \left\{ \sqrt{(i'_d - i')^2 + (j'_d - j')^2} \right\} - \sqrt{(i'_d - i)^2 + (j'_d - j)^2} \right\}, \quad (1)$$

$S_{ij}$  为室内元胞  $(i, j)$  处的场值,令

$$M_{i_d j_d} = \max_{(i', j') \in R} \left\{ \sqrt{(i_d - i')^2 + (j_d - j')^2} \right\}, \quad (2)$$

$$L_{i_d j_d}^j = \sqrt{(i_d - i)^2 + (j_d - j)^2}, \quad (3)$$

则(1)式可写成

$$S_{ij} = \min_{(i_d, j_d) \in \{i_d, j_d\}} \{M_{i_d j_d} - L_{i_d j_d}^j\}, \quad (4)$$

其中,  $M_{i_d j_d}$  表示室内所有的格子到出口集  $\{i_d, j_d\}$  中的最大距离(为了保证  $S$  始终为正)。 $L_{i_d j_d}^j$  表示室内行人所处的格子  $(i, j)$  到出口  $(i_d, j_d)$  的距离。静态场值随着行人到出口的距离  $L_{i_d j_d}^j$  的增大而减小,当行人离出口位置最远时,静态场值为零;当行人在出口位置时,静态场值最大。故只需室内空间大小和出口位置给定,静态场就已确定。

在场中,每一个时步,行人或者原地不动,或者朝上下左右4个方向运动一个格子,通过迁移概率的大小来决定下一步的行为,如图1所示。行人在运动过程中,只能运动到空的格子,若格子已经被其他行人或障碍物占据,则行人不能进入此格子。

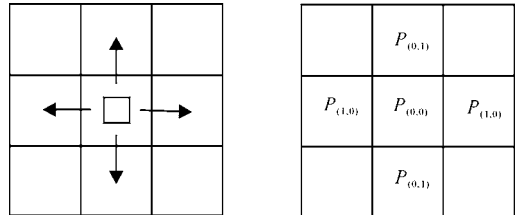


图1 行人运动示意图

Fig.1 Possibilities and movements of the neighbor cells

行人  $(i, j)$  运动到邻近的未被占据的格点  $(i_n, j_n)$  的迁移概率  $P_{ij}^{i_n j_n}$  由静态场  $S$  决定。采用如下计算公式:

$$P_{ij}^{i_n j_n} = \begin{cases} N_{ij} \cdot \exp(k_s \cdot S_{i_n j_n}), & \text{元胞 cell}(i_n, j_n) \\ & \text{可占据,} \\ 0, & \text{元胞}(i_n, j_n) \text{不可占据,} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $k_s$  为静态场的敏感因子,满足  $k \in [0, +\infty]$ 。 $N$  为归一化因子,具体表达式为

$$N_{ij} = \left( \sum_{(i', j') \in \{i_n, j_n\}} P_{ij}^{i' j'} \right)^{-1}, \quad (6)$$

其中  $\{i_n, j_n\}$  表示元胞  $(i, j)$  周围的近邻及  $(i, j)$  自身的集合(图1)。

### 1.2 出口选择模型

#### 1.2.1 区域的划分

为了在模型中方便地定义竞争代价,将大厅化分

成一些区域,且划分的依据出口分布决定。即一个出口拥有一片区域,该区域内的任何元胞到该出口的距离比到室内其他出口的距离都短。出口  $(i_d, j_d)$  对应的区域  $A_{i_d j_d}$  为如下元胞组成的集合:

$$A_{i_d j_d} = \{(i, j) \mid \sqrt{(i_d - i)^2 + (j_d - j)^2} = \min_{(i'_d, j'_d) \in \{i_d, j_d\}} \sqrt{(i'_d - i)^2 + (j'_d - j)^2}\}, \quad (7)$$

其中  $\{i_d, j_d\}$  为所有出口的集合。例如,对于有两个出口的房间,(7)式划分房间区域的方法就是以两出口的垂直平分线划分,出口所在的区域对应该出口。下文提及的“某出口/行人的区域”,指的是出口的区域或者行人所在元胞所处的区域。

处于出口  $(i_d, j_d)$  区域的行人  $(i, j)$ ,如果仅考虑(1)式中的场,则行人  $(i, j)$  会往出口  $(i_d, j_d)$  走去(因为距离最短)。以下,将做出修改,使得每个时刻行人能对室内的每一个出口预估出一个出口代价。

### 1.2.2 出口 $(i_d, j_d)$ 单独静态场的构建

对每个出口都构建 1 个只有该出口时房间应有的场,即针对整个房间,对于出口  $(i_d, j_d)$  构建静态场:

$$S_{ij} = N_{i_d j_d} - L_{i_d j_d}^{ij}, (i, j) \in R. \quad (8)$$

这样每个出口元胞都有一个对应的充满整个房间的静态场。但是,在这些场中,每一个行人在每一时刻能且只能选择某一个场进行迁移。

### 1.2.3 代价描述

对每一个出口  $(i_d, j_d)$  引入出口代价  $X_{i_d j_d}^{ij}$  以描述行人  $(i, j)$  对该出口预估的代价,这个代价考虑了距离因素与竞争(与其他行人的)因素,

$$X_{i_d j_d}^{ij} = (1 - k)\hat{P}_{i_d j_d}^{ij} + k\hat{L}_{i_d j_d}^{ij}, \quad (9)$$

其中,  $\hat{L}_{i_d j_d}^{ij}$  为行人  $(i, j)$  到出口  $(i_d, j_d)$  的距离代价;  $\hat{P}_{i_d j_d}^{ij}$  表示(与其他行人的)竞争代价。

再考虑两种情况下行人对某个目标出口评估的期望疏散时间。

1) 距离期望疏散时间: 目标出口距行人距离为  $L$ , 且之间的区域没有其他行人, 即假如行人一直朝该出口走, 且走最短的路径, 需用  $L$  个时间步(行人的速度为 1)才能走出室内。也就是行人要从相距  $L$  的空闲出口离开室内的期望疏散时间为  $L$ 。

2) 竞争期望疏散时间: 目标出口距行人距离为  $L$ , 但是目标出口的区域内有  $P$  个竞争的行人, 那么无论如何, 行人从该出口离开的疏散时间都不会少于  $P$ 。如果  $L > P$ , 则理想疏散时间为  $P$ , 即对于行人前方拥挤了  $P$  个行人的出口, 行人从该出口离开的理想期望时间为  $P$ 。

所以可以设  $\hat{P} = P, \hat{L} = L$ 。行人  $(i, j)$  预估出口

$(i_d, j_d)$  的竞争人数为

$$\hat{P}_{i_d j_d}^{ij} = \begin{cases} \text{Count}(A_{i_d j_d} \cap \{(i', j') \mid L_{i_d j_d}^{i' j'} \leq L_{i_d j_d}^{ij}\}) & (i, j) \in A_{i_d j_d}, \\ \text{Count}(A_{i_d j_d}) & (i, j) \notin A_{i_d j_d}, \end{cases} \quad (10)$$

其中  $\text{Count}(S)$  函数表示在任意元胞集合  $S$  中的行人总数。从(10)式可以看出, 选择本区域作为出口, 即当目标出口的区域就是行人处于自身元胞所在区域时, 竞争人数  $P$  等于自身区域与某个圆(或扇形)交集内的所有人。这个圆以自身区域的出口为圆心, 以自身到自身区域出口的距离为半径, 实际上表示了自身区域内的“前方”。在这个区域内的人就是行人要与其竞争的人。而当行人选择非本区域的出口作为目标出口时, 行人只考虑目标区域内所有行人数目作为其要竞争的人数; 对于既不在目标区域内又不在自身区域“前方”的行人(10式中未用到的区域), 由于尚无法确认他们最终是否参与竞争, 而且这类人对问题的结果影响不是很大, 所以暂不予考虑。

### 1.2.4 最小代价的选取

得出能描述出口代价的量  $X$  后, 行人就可以找出出口代价最小的出口, 然后选用此出口的场驱动行人迁移。也就是说, 行人  $(i, j)$  选出满足下式的出口  $(\hat{i}_d, \hat{j}_d)$

$$X_{\hat{i}_d \hat{j}_d}^{ij} = \min_{(i'_d, j'_d) \in \{i_d, j_d\}} X_{i'_d j'_d}^{ij} \quad (11)$$

作为这下一时步迁移的场。

为便于理解, 在本模型中给出一些量的意义。如图 2, 室内左右各有一对称分布的出口, 室内中间的虚线代表划分房间区域的分割线, 将房间分成区域 1 与区域 2, 分别对应于出口 1 和出口 2。  $L_1$  为行人  $(i, j)$  到本区域出口(出口 1)的距离,  $L_2$  则为行人  $(i, j)$  到出口 2 的距离,  $P_1 = 3$ (小五边形的个数), 实际是区域 1 与虚线圆交集内的人数,  $P_2 = 4$ (小正方形个数), 为区域 2 内的总人数。这样, 出口 1 的代价为  $(1 - k) \times P_1 + k \times L_1$ , 出口 2 的出口代价为  $(1 - k) \times P_2 + k \times L_2$ , 行人比较每个出口的代价后做出选择。另外, 对于图 2 中除了行人  $(i, j)$  外的行人(黑点), 在此例中他们可能更倾向于图中的出口 1, 对于稍复杂点的情况, 他们的去向一般是不确定的, 所以本文没有在竞争代价中考虑这些人。

对于所构模型, 若室内有一个离行人较远, 但比较空闲的出口, 行人根据距离代价与竞争因素之后的综合结果做出选择, 有可能会走离自己较远的出口, 因为该出口竞争的人数更少。

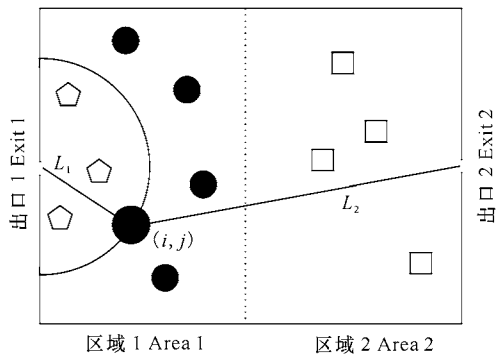


图2 本模型包含的各种量的简单举例

Fig. 2 Illustration of the model

### 1.3 室内布局

假设将  $N \times M$  个元胞的二维平面看作大厅, 每个元胞的大小为  $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ , 那么  $N$  与  $M$  的值决定了室内的几何形状(长宽比)。再根据需要使用行人分布在指定区域, 例如只分布在右边半部或只分布在左边半部, 此时室内的出口位置及宽度要求可以自由设置。

模型采用并行更新规则, 在更新过程中, 每个行人在每一时步运动都遵守如下规则:

1) 遍历所有的行人, 运用(11)式找出每个行人的最小代价出口, 然后以该出口的场作为此行人此时步的场。

2) 行人运动时, 以(8)式作为迁移场计算其运动区域内4个方向及停留原地的迁移概率  $P$ , 选择迁移概率最大的元胞作为下一步即将迁移的目标元胞。

若在运动过程中有多个行人争抢同一个目标元胞, 则选取迁移概率最大的行人运动到目标元胞, 其他行人保持不动; 若争抢的行人迁移概率相等, 则以相同的概率随机选取一个行人进入该空元胞。如果行人运动到出口, 下一个时步, 该行人就认为离开大厅。全部行人离开, 模拟过程结束。

## 2 模拟结果及分析

模拟前提是假设行人已确认大厅里的全部信息, 视野清晰, 且能判断在他前面行人的数量和到达目标出口的距离。考虑计算机模拟过程中的随机性, 疏散时间每次计算值都通过50次模拟后取平均。

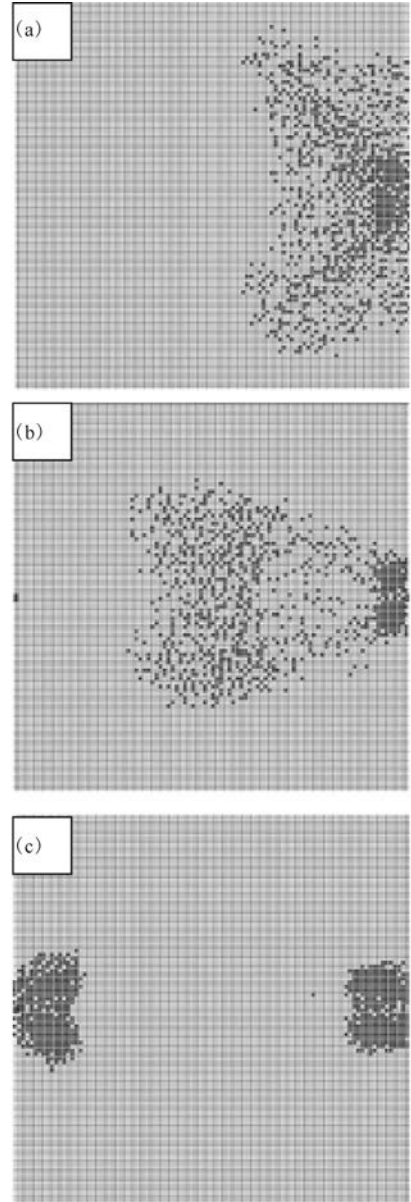
### 2.1 典型现象的模拟

#### 2.1.1 行人选择远处空闲的出口疏散

此时设置室内有左右对称分布的两个出口, 直到40个时步时才打开左边的出口, 一些参数如下: 大厅的静态场参数  $k_s = 2$ ,  $N = 100$ ,  $M = 100$ , 试探性的权重  $k = 0.5$ , 初始行人以密度  $\rho = 0.5$  分布在室内右半部

边, 出口宽度为2, 演化斑图如图3所示。

由图3a可以观察到, 此时行人只能从右边的出口出去, 所以所有的行人向右边的出口聚集, 靠近出口的局部密度逐渐增加。由图3b可以看出, 此时左边的出口已经打开25个时步, 一些行人经过权衡会选择左边的出口, 呈现出选择远处空闲出口疏散的现象。由图3c可以看出, 两边的出口最终有几乎相等的行人聚集, 显示出口都得到了充分利用。



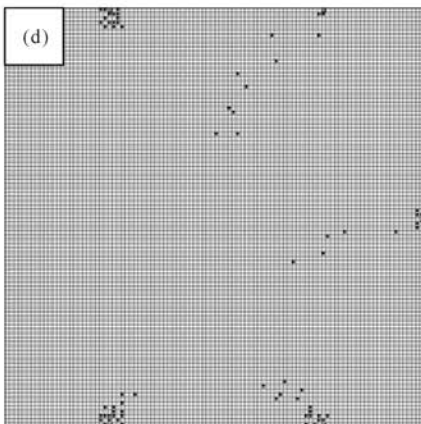
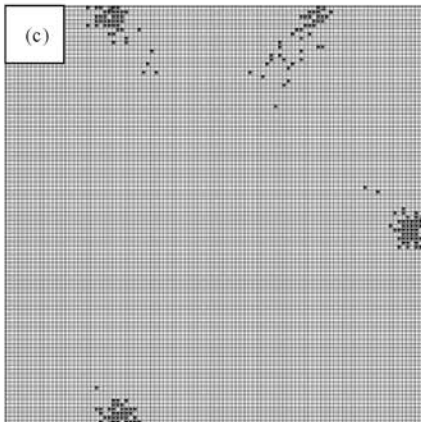
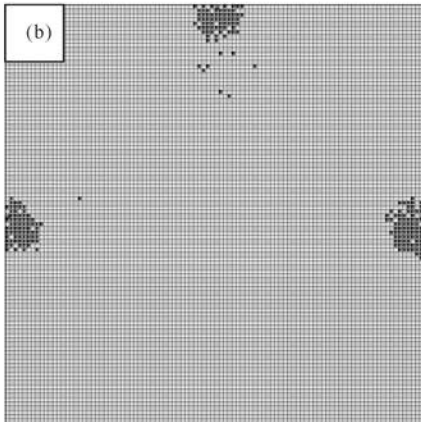
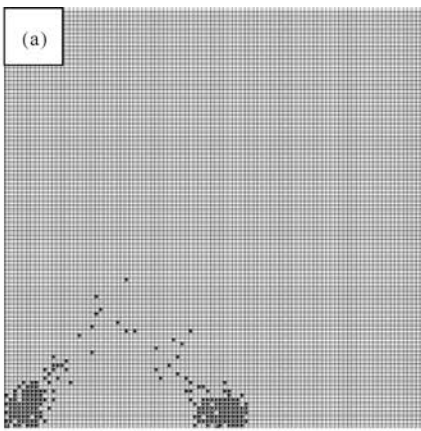
(a)  $t = 25$  steps; (b)  $t = 65$  steps; (c)  $t = 175$  steps

图3 行人选择远处出口演示

Fig. 3 Stages of the pedestrians choosing the distance exit

#### 2.1.2 多出口时行人的疏散

对于出口数多于2个且出口分布不对称的情况。行人初始密度为0.05, 分布在整个房间内, 其他参数与2.1.1节选取参数相同, 模拟结果如图4所示。



(a) 两出口不对称 (2 asymmetric exits); (b) 3 个出口 (3 exits); (c) 4 个出口 (4 exits); (d) 5 个出口 (5 exits)

图 4 多出口及不对称出口情况

Fig. 4 Situations of multiple exits and asymmetric exits

图 4 结果显示,对设置对称或不对称的多出口,行人都会自主选择合适的出口进行疏散,多个出口都得到充分利用。

## 2.2 应急出口在行人疏散过程中的作用

疏散时间与应急门启用时间的先后有一定的相关性。此模拟过程,静态场参数  $k_s = 2$ , 选取权重  $k = 0.5$  使情况不产生极端,出口宽度  $W = 2$ , 在不同时刻打开大厅左边的出口(作为应急门),得到结果如图 5 所示。

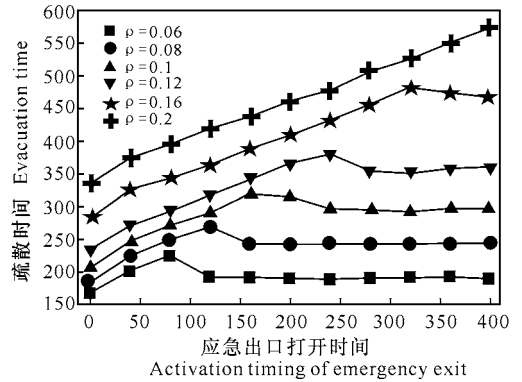


图 5 不同初始密度下,不同时刻打出口对应的疏散时间变化

Fig. 5 Evacuation time vs opening time of emergency exit under different density of pedestrians

从图 5 可以看出,所有曲线均是先几乎线性增加,然后到达一个极值后回落一小段,最后保持不变,只是随着密度增加,平台会延后。

取初始行人密度为  $\rho = 0.1$  进行分析,可以看出,在前期,打开应急门越早会使疏散时间线性减少。而对图中的“峰”,可以理解当打开应急门延迟到某个时刻后,疏散时间甚至比从初至终只有一个出口的情况还长,此后疏散时间减少至相当于只有一个出口的情况。说明,在本模型中应急出口越早打开越有利疏散,疏散时间是呈线性减少的,但是应急出口打开过晚可能会产生误导作用,使最终疏散时间甚至多于始终没有打开应急门的情况。

## 2.3 应急出口相对位置对疏散时间的影响

设定 3 种大厅的应急出口位置(图 6)。

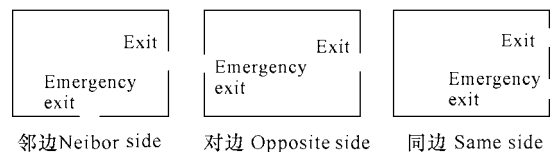


图 6 3 种应急出口设置

Fig. 6 Position of three emergency exits

行人以密度 0.25 初始分布于整个大厅,模拟结果如图 7 所示。图 7 结果表明,在疏散开始时,3 种设定下的变化趋势有较大不同,可以看到 3 种设定对

应急出口开启时间的影响程度不同;对于很晚才开启应急出口的情况下,应急出口同边设定疏散时间最短,然后是邻边设定,最长疏散时间的是对边设定。因为,当应急出口开启过晚,聚集在正常出口前的行人迁移至同边应急出口比迁移至对边应急出口的时间更短。

为进一步考察影响大小,加大行人密度至 0.5,以应急出口开启时间 0~200 时步内做模拟,结果如图 8。

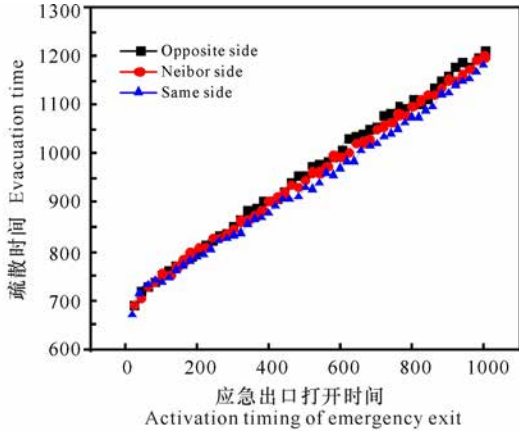


图 7 不同应急出口模型下的疏散时间比较

Fig. 7 Comparison of evacuation time vs opening time at different layout of emergency exits

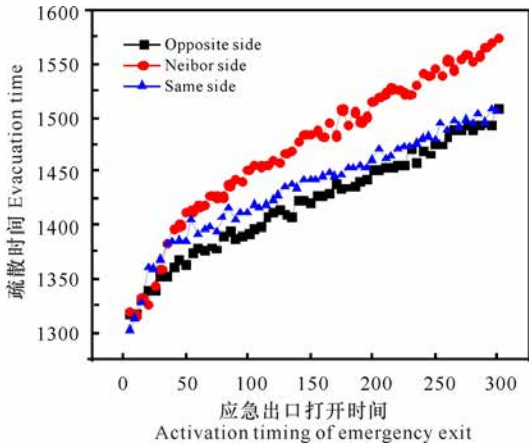


图 8 较早开启应急出口时 3 种应急出口模型疏散时间的比较

Fig. 8 Comparison of evacuation time vs opening time at different layout of emergency exits under early stages

图 8 结果反映,应急出口的开启有一个“黄金”(大约 0~50 时步)时期,在这个时期内应急出口开启越早,所获得的疏散时间减少更多。且 3 种不同应急出口设定在“黄金”时期对开启时机敏感程度也不一样,对于应急出口开启时机最敏感的是同边设定,其次是邻边设定,最不敏感的是对边设定,此后,当应急出口开启得越晚,疏散时间会趋向于图 7 的结论。

### 3 结论

本文在元胞自动机静态场基础上引入出口代价,研究室内行人在一些典型情况下的疏散,讨论出口代价中权重的作用,及最优权重  $\hat{k}$  随出口情况的设定如何改变,最后研究了应急门开启时机对疏散时间的影响。在典型疏散环境中,行人会根据实际情况选择最佳的出口,针对出口不规则分布的大厅,考虑出口代价的模型仍然有较好的模拟结果。在应急出口对疏散的影响研究中发现,应急出口打开越早越好,对疏散时间的减少近似地呈线性关系,但应急出口打开太迟反而会误导行人,导致疏散时间比没有应急门的情况还长。对于应急出口的分布研究结果表明,3 种应急出口分布中,与常规出口处于同一边的应急出口对疏散最有利,而且在应急出口较早打开的时候,3 种设定都存在一个黄金时期,这个时期内疏散时间减少较快。

#### 参考文献:

- [1] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature, 2000, 407(6803): 487-490.
- [2] Helbing D, Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Physical Review E, 1995, 51(5): 4282.
- [3] Helbing D, Farkas I J, Molnar P, et al. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations[J]. Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2002, 21: 21-58.
- [4] Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems[J]. Reviews of Modern Physics, 2001, 73(4): 1067.
- [5] Nagatani T. The physics of traffic jams[J]. Reports on Progress in Physics, 2002, 65(9): 1331.
- [6] Kuang H, Li X, Song T, et al. Analysis of pedestrian dynamics in counter flow via an extended lattice gas model [J]. Physical Review E, 2008, 78: 066117.
- [7] Nagatani T. Modified KdV equation for jamming transition in the continuum models of traffic[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1998, 261(3): 599-607.
- [8] Fukui M, Ishibashi Y. Jamming transition in cellular automaton models for pedestrians on passageway[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1999, 68(11): 3738-3739.
- [9] Muramatsu M, Nagatani T. Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2000, 275(1): 281-291.
- [10] Helbing D, Farkas I J, Vicsek T. Freezing by heating in a driven mesoscopic system[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(6): 1240.
- [11] Tajima Y, Nagatani T. Scaling behavior of crowd flow outside a hall[J]. Physica A: Statistical Mechanics and

Its Applications, 2001, 292(1): 545-554.

[12] Fukui M, Ishibashi Y. Self-organized phase transitions in cellular automaton models for pedestrians[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1999, 68(8): 2861-2863.

[13] Takimoto K, Tajima Y, Nagatani T. Effect of partition line on jamming transition in pedestrian counter flow [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2002, 308(1): 460-470.

[14] 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, 2001, 295(3-4): 507-525.

[15] Kirchner A, Schadschneider A. Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2002, 312(1-2): 260-276.

[16] Yue H, Hao H, Chen X, et al. Simulation of pedestrian flow on square lattice based on cellular automata model [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2007, 384(2): 567-588.

[17] 岳昊, 邵春福, 陈晓明, 等. 基于元胞自动机的对向行人交通流仿真研究[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 6901. Yue H, Shao C F, Chen X M, et al. Simulation of bi-directional pedestrian flow based on cellular automata model[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11): 6901.

[18] 周金旺, 陈秀丽, 周建槐, 等. 一种改进的多速双向行人

流元胞自动机模型[J]. 物理学报, 2009, 58(4): 2281. Zhou J W, Chen X L, Zhou J H, et al. An improved cellular automaton model simulation of pedestrian counter flow with variety velocities[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(4): 2281.

[19] 周金旺, 邝华. 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. Zhou J W, Kuang H. Paired behavior effect on pedestrian evacuation dynamics[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(5): 3001.

[20] 谢积鉴, 薛郁. 通过博弈的室内行人疏散动力学研究[J]. 物理学报, 2012, 61(19): 194502. Xie J J, Xue Y. Research on the dynamics of indoor pedestrian evacuation via game[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(19): 194502.

[21] Tian H H, Dong L Y, Xue Y. Influence of the exits' configuration on evacuation process in a room without obstacle[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2015, 420: 164-178.

[22] Xu Y, Huang H J, Tian L J. Simulation of Exit Choosing in Pedestrian Evacuation Using a Cellular Automaton Model Based on Surrounding Pedestrian Density [C]. 2011 Fourth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, 2011: 1109-1112.

(责任编辑: 尹 闯)

(上接第 387 页 Continue from page 387)

[12] Aw A, Rascle M. Resurrection of "second order" models of traffic flow[J]. SIAM Journal on Applied mathematics, 2000, 60(3): 916-938.

[13] Zhang H M. A non-equilibrium traffic model devoid of gas-like behavior[J]. Transpsn Res B, 2002, 36(3): 275-290.

[14] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J. A new continuum model for traffic flow and numerical tests [J]. Transp Res B, 2002, 36(5): 405-419.

[15] Xue Y, Dai Q. Continuum traffic model with the consideration of two delay time scales[J]. Phys Rev E, 2003, 68(6): 066123-066129.

[16] Wei Y F, Guo S L, Xue Y. Empirical verification of anisotropic hydrodynamic traffic model in traffic analysis at intersections in urban area[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B, 2007, 19(2): 230-235.

[17] Prigogine I, Herman R, Chaiken J. Kinetic theory of vehicular traffic[J]. Physics Today, 1972. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3070729>.

[18] Paveri-Fontana S L. On Boltzmann like treatments for traffic flow[J]. Transp Res, 1975, 9(4): 225-235.

[19] Helbing D. Gas-kinetic derivation of Navier-Stokes-like

traffic equations[J]. Phys Rev E, 1996, 53(3): 2366-2382.

[20] Méndez A R, Velasco R M. An alternative model in traffic flow equations[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42(9): 782-797.

[21] Velasco R M, Marques, Jr W. Navier-Stokes-like equations for traffic flow [J]. Phys Rev E, 2005, 72(2): 046102-046112.

[22] Paveri-Fontana S L, Zweifel P F. Application of the closure relation in transport theory[J]. Transport Theory and Statistical Physics, 1987, 16(8): 1095-1172.

[23] Helbing D. Improved fluid-dynamic model for vehicular traffic[J]. Phys Rev E, 1995, 51(4): 3164-3169.

[24] 戴世强, 雷丽, 董力耘. 高架路匝道附近的交叉口交通流分析[J]. 力学学报, 2003, 35(5): 513-517. Dai S Q, Lei L, Dong L Y. Analysis of traffic flow at intersections near ramps overhanging freeways[J]. Acta Mechnaica Sinica, 2003, 35(5): 513-517.

(责任编辑: 米慧芝)