

初始位置布局不平衡的疏散行人流仿真研究*

岳昊^{1)†} 张旭¹⁾ 陈刚²⁾ 邵春福¹⁾

1) (北京交通大学, 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044)

2) (军事交通学院, 汽车指挥系, 天津 300161)

(2011年8月22日收到; 2011年11月15日收到修改稿)

行人初始位置布局不平衡的多安全出口疏散过程, 是行人疏散流仿真研究的热点. 利用行人流动态参数仿真模型, 在实际距离和假想距离“极大极小”路径选择机理的基础上, 改进假想距离的计算方法及其拥堵计算区域, 实现疏散过程的动态平衡; 提出行人位置布局的不平衡系数, 以描述疏散空间内行人初始位置布局的不平衡性. 从行人初始位置随机和固定布局的角度, 仿真研究正常疏散环境下行人布局的不平衡性对疏散时间的影响, 并将仿真结果与原始模型做对比分析. 研究表明, 模型能有效地实现行人流疏散过程的动态平衡, 行人疏散时间受行人位置或安全出口布局的影响较小, 而与安全出口总宽度、行人的初始数量以及拥堵感知系数有关.

关键词: 元胞自动机, 疏散行人流, 动态参数, 行人布局

PACS: 05.50.+q, 05.20.Jj, 64.70.-p

1 引言

合理规划和设计行人步行设施、聚集活动场所、以及行人交通规则需要掌握和理解行人流的微观和宏观特征. 因此, 行人流理论是行人设施和聚集活动场所设计以及行人流管理、控制和诱导的基础理论之一. 基于行人微观行为特征的仿真技术, 已成为探索研究不同行人集散环境下宏观行人流特征的主要手段. 疏散行人流作为行人流的重要组成部分, 具有向安全出口聚集, 竞争安全出口空间, 离开疏散空间的特征, 是交通流和颗粒流领域的研究热点.

在行人流的仿真研究中, 包括有社会力模型^[1]、离心力模型^[2]、领域模型 (floors model)^[3-5]、格子流体力学模型 (lattice hydrodynamic model)^[6]、实地编码模型 (real-coded model)^[7]、多网格模型 (multi-grid model)^[8]、动态参数模型 (dynamic parameters model)^[9-14]、修正格子气模型 (modified lattice gas model)^[15] 等, 其中

动态参数仿真模型已用于横向干扰行人流^[9]、双向行人流^[10,11]、正常疏散行人流^[12]、视线收影响疏散行人流^[13]、安全出口布局不平衡的疏散行人流^[14] 等的仿真研究. 文献 [16] 将准滑模控制引入 LWR 模型, 用于模拟研究行人通道瓶颈处的障碍对行人流的影响; 文献 [17] 基于元胞自动机仿真研究交通出行惯例对双向行人流的影响; 文献 [18] 建立了改进的多速双向行人流元胞自动机模型, 并用于双向行人流的疏散; 文献 [19] 仿真研究了行人成对的整体跟随现象对行人疏散动力学的影响; 文献 [20] 仿真研究了紧急情况下的行人疏散特征; 文献 [21] 仿真研究了疏散空间内存在障碍物的行人疏散过程. 在多安全出口疏散行人流的仿真研究中, 文献 [5] 基于 Logit 选择模型刻画行人的路径选择行为; 文献 [22,23] 在行人移动规则中引入了安全出口前的行人密度, 以描述行人的路径选择行为; 文献 [12] 利用不考虑安全出口前行人拥堵的仿真模型, 分析了安全出口布局不平衡造成的行人疏散不平衡; 文献 [14] 基于行人流动态参数仿真模型, 引入假想距离的概念, 并建立了“极大极小”路径

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB725400)、国家自然科学基金资助项目 (批准号: 11172035)、中国博士后科学基金资助项目 (批准号: 20090460184, 201003036) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 2011JBM057) 资助的课题.

† E-mail: yuehao@bjtu.edu.cn

选择机理, 仿真研究了安全出口布局不平衡的疏散行人流. 在行人的疏散仿真研究中, 行人的疏散空间常常被简化为规则的正方形, 而且行人的初始位置常常被假设为均匀分布, 且对多安全出口初始位置布局不平衡的疏散行人流研究相对较少.

在疏散空间安全出口或行人初始位置布局不平衡的情况下, 行人将会采取不同于布局平衡情况的策略进行疏散, 呈现出不同的疏散流宏观特征. 同时, 行人在疏散过程中, 会实时地根据空间内疏散环境、安全出口的布局、自身的位置以及安全出口前的拥堵程度, 调整和更改自身的疏散路径, 以减少布局的不平衡性对其疏散造成的影响, 实现疏散过程的动态平衡, 达到以最短时间离开疏散空间的目标. 因此, 探索多安全出口疏散空间行人布局不平衡的疏散流宏观特征和现象的生成机理, 是行人疏散流仿真研究的热点和重点. 实际的行人疏散由于建筑设施物理空间特征、活动安排布局等原因, 会存在行人初始位置布局不平衡的疏散情况, 因此, 基于仿真的初始位置布局不平衡的疏散行人流理论有助于指导疏散行人流的管理、控制和诱导.

针对行人初始位置对其疏散路径选择的影响, 建立行人初始位置布局的不平衡系数以描述行人位置布局的不平衡性; 利用动态参数仿真模型的两个基本参数(方向参数和空格参数), 基于实际距离和假想距离的“极大极小”路径选择机理, 通过改进假想距离的计算方法及其拥堵计算区域, 对多安全出口初始位置布局不平衡的疏散行人流进行仿真研究, 实现疏散过程的动态平衡.

2 模型

行人疏散仿真模型为 $(W + 2) \times (W + 2)$ 的二维离散元胞网格系统 Ω^2 , W 为系统规模. 用障碍物占据系统边界元胞形成空间围墙 Wall, 在墙上留有空格元胞为疏散空间的安全出口 Exit. 行人不能穿越和跨越围墙, 只能通过安全出口离开系统, 疏散行人离开系统后将不再进入系统.

$$\begin{aligned} \text{Wall} &= \{(x, y) = 2, x = 1, W; y = 1, W\}, \\ \text{Exit} &= \{(x, y) = 0, x = 1, W; y = 1, W\}, \quad (1) \\ &(x, y) \in \Omega^2. \end{aligned}$$

在系统内, 每个元胞只能容纳一个行人, 行人

与占据元胞一一对应, 即:

$$(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{行人,} \\ 0 & \text{空元胞,} \end{cases} \quad (x, y) \in \Omega^2. \quad (2)$$

仿真过程被离散化为相等的时间步长 t . 在每个 t 内, 行人 (x, y) 占据中心位置的移动领域 $F_{(x,y)}$ 为 Moore 型领域, 如图 1(a) 所示. 在 $F_{(x,y)}$ 内行人的九个备选位置都拥有其方向参数 D_{ij} 、空格参数 E_{ij} 和移动收益 P_{ij} , 如图 1(b) 所示.

$$\begin{aligned} F_{(x,y)} &= \{ (m, n) \mid |x - m| \leq 1 \\ &\text{and } |y - n| \leq 1, (m, n) \in \Omega^2 \}. \quad (3) \end{aligned}$$

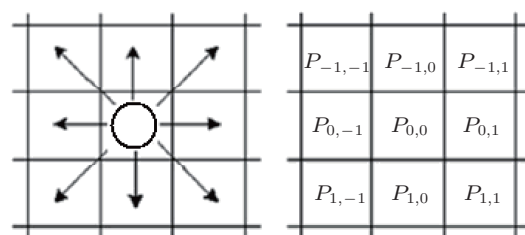


图 1 疏散行人移动领域及其相应的移动收益矩阵 (a) 行人移动领域; (b) 移动收益矩阵

2.1 基本规则

在 $F_{(x,y)}$ 内,

$$\begin{aligned} P_{ij} &= D_{ij} + E_{ij}, \\ E_{ij} &= \begin{cases} \max(D_{ij}), & (m, n) = 0, \\ 0, & m = x, n = y, \\ -\max(D_{ij}), & (m, n) = 1, (m, n) \neq (x, y), \end{cases} \\ D_{ij} &= \frac{S_{xy} - S_{mn}}{\sqrt{(m-x)^2 + (n-y)^2}}, \\ i &= m - x, \quad j = n - y, \\ (m, n) &\in F_{(x,y)}, (x, y) \in \Omega^2, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, S_{xy} 为元胞 (x, y) 距安全出口的最短估计距离. D_{ij} 和 E_{ij} 根据行人所处位置, 及其自身周围疏散环境的变化而变化.

2.2 行人布局

在多安全出口疏散空间内, 行人的初始位置、安全出口的位置或长度影响行人疏散路径和安全出口的选择. 不考虑安全出口前行人拥堵的动态参

数仿真模型 [12],

$$S_{xy} = \begin{cases} \left(\min_i \left(\min_j \left(\sqrt{(x - x_i^j)^2 + (y - y_i^j)^2} \right) \right) \right), & (x, y) \notin \text{Wall}, \\ +\infty, & (x, y) \in \text{Wall}, \end{cases}$$

$$(x, y) \in \Omega^2, (x_i^j, y_i^j) \in \text{Exit}. \quad (5)$$

式中, (x_i^j, y_i^j) 为第 i 个安全出口的第 j 个元胞在疏散系统中的坐标; S_{xy} 取 $+\infty$, 说明墙对行人几乎没有吸引力. 疏散空间内的元胞都将会隶属于距自己距离最近的安全出口, 疏散空间被划分为隶属于不同安全出口的区域. 行人的移动规则决定了隶属区域内的行人将会向自己隶属的安全出口移动. 因此, 行人的初始位置和安全出口的布局决定了行人疏

散过程的平衡性, 如图 2 和图 3 所示. 图 2 为行人初始位置均匀分布, 安全出口布局不平衡的疏散过程; 图 3 为行人位置固定, 安全出口布局平衡的疏散过程.

为描述行人初始位置布局的不平衡性, 从安全出口布局和利用程度的角度, 分析行人的布局情况. 定义安全出口的理想分担率 ϕ 、实际分担率 φ 和分担率差 γ .

$$\phi_i = \frac{n_i}{N}; \quad \varphi_i = \frac{l_i}{L},$$

$$\gamma_i = \phi_i - \varphi_i,$$

$$L \cdot \gamma_i = L \cdot \phi_i - l_i, \quad (6)$$

$$N \cdot \gamma_i = n_i - N \cdot \varphi_i,$$

$$\sum_{i=1}^m \phi_i = 1, \quad \sum_{i=1}^m \varphi_i = 1,$$

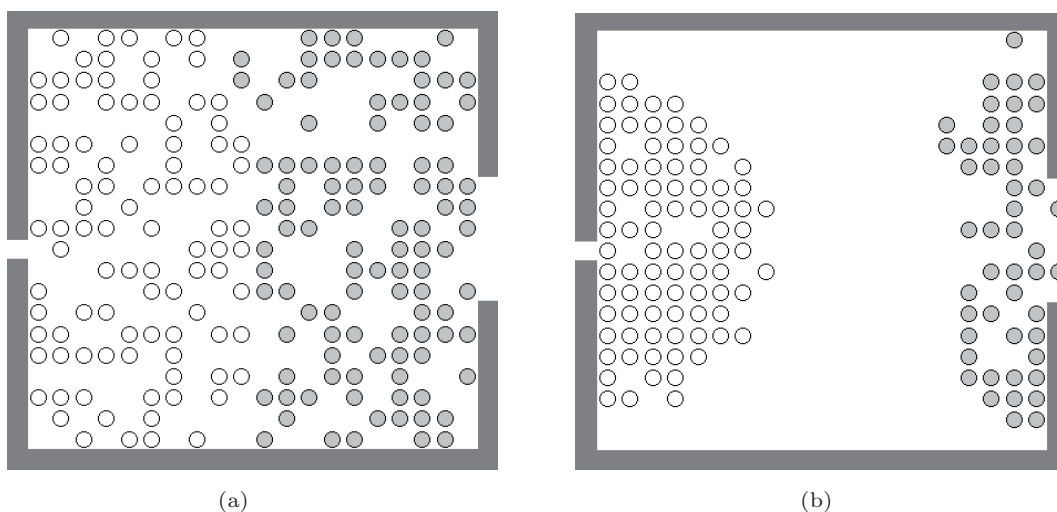


图 2 行人初始位置均匀分布由安全出口布局不平衡引起的疏散不平衡 (a) 初始位置; (b) 疏散过程

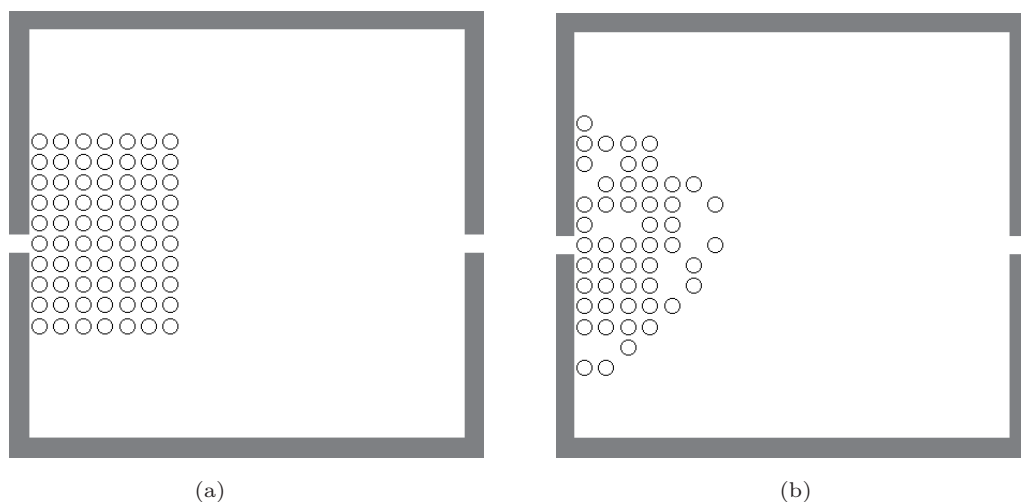


图 3 安全出口布局平衡由行人初始位置分布引起的疏散不平衡 (a) 初始位置; (b) 疏散过程

式中, $\phi_i, \varphi_i, \gamma_i$ 分别为第 i 个安全出口的理想分担率、实际分担率和分担率差, N 为空间内疏散行人的总数, n_i 为隶属于第 i 个安全出口的行人数量, L 为疏散空间安全出口的总宽度, l_i 为第 i 个安全出口的宽度, m 为安全出口的数量.

行人布局平衡时, 所有的安全出口被充分利用, 安全出口的单位利用率 μ 为 N 与 L 的比, 且每个安全出口的 ϕ 和 φ 相等.

$$\begin{aligned} \mu_i &= \frac{n_i}{l_i} = \frac{N}{L} = \mu \\ \Rightarrow \frac{n_i}{N} &= \frac{l_i}{L} \\ \Rightarrow \phi_i &= \varphi_i \Rightarrow \gamma_i = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

行人布局不平衡时, 存在部分安全出口的实际宽度不足 ($\gamma > 0$) 和过剩 ($\gamma < 0$) 的情况. 假设 m 个安全出口, $i = 1, \dots, j$ 时, $\gamma_i \geq 0$; $i = j + 1, \dots, m$ 时, $\gamma_i < 0$. 定义

$$\gamma^+ = \sum_{i=1}^j \gamma_i, \quad \gamma^- = \sum_{i=j+1}^m \gamma_i. \quad (8)$$

从安全出口宽度利用的角度, γ^+ 描述 $\gamma > 0$ 类安全出口满足其 $\mu = N/L$ 时, 应拓宽的宽度占 L 的比例; γ^- 描述 $\gamma < 0$ 类安全出口满足其 $\mu = N/L$ 时, 应缩减的宽度占 L 的比例. 即,

$$\begin{aligned} L \cdot \gamma^+ &= L \cdot \sum_{i=1}^j \phi_i - \sum_{i=1}^j l_i > 0, \\ & i = 1, \dots, j, \\ L \cdot \gamma^- &= L \cdot \sum_{i=j+1}^m \phi_i - \sum_{i=j+1}^m l_i < 0, \\ & i = j + 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (9)$$

从行人位置布局的角度, γ^+ 描述隶属于 $\gamma > 0$ 类安全出口的区域满足其安全出口 $\mu = N/L$ 时, 应减少的安置行人数量占 N 的比例; γ^- 描述隶属于 $\gamma < 0$ 类安全出口的区域满足其安全出口 $\mu = N/L$ 时, 应增加的安置行人数量占 N 的比例. 即,

$$\begin{aligned} N \cdot \gamma^+ &= \sum_{i=1}^j n_i - N \cdot \sum_{i=1}^j \varphi_i > 0, \\ & i = 1, \dots, j, \\ N \cdot \gamma^- &= \sum_{i=j+1}^m n_i - N \cdot \sum_{i=j+1}^m \varphi_i < 0, \\ & i = j + 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (10)$$

由式 (6) 和式 (8) 可知,

$$\left. \begin{aligned} \gamma^+ > 0, \gamma^- < 0 \\ \gamma^+ + \gamma^- = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \gamma^+ = |\gamma^-|. \quad (11)$$

在多安全出口的疏散空间内, 行人布局平衡时, $\gamma^+ = \gamma^- = 0$; 行人布局不平衡时, $\gamma^+ = |\gamma^-| < 1$. 因此, 可用 γ^+ 描述行人布局的不平衡系数 β , 为计算方便取

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^m \left| \frac{n_i}{N} - \frac{l_i}{L} \right|}{2} = \gamma^+. \quad (12)$$

β 的取值范围在 0—1 之间, 当 $\beta = 0$ 时, 行人布局是平衡的; 当 $\beta > 0$ 时, 行人布局是不平衡的; 随着 β 的增加, 行人布局的不平衡性增强. 由式 (9) 和式 (10) 可知, 通过调整安全出口的宽度 l_i 或其隶属区域内的行人数量 n_i , 可以实现行人初始位置的布局平衡.

2.3 疏散策略

行人疏散是一个复杂的动态过程, 行人会根据各安全出口前的拥堵情况, 选择疏散过程最便捷的安全出口离开疏散空间, 实现整个疏散过程的动态平衡. 在不考虑安全出口前行人拥堵的仿真研究中, 行人布局的不平衡性会造成行人疏散过程的不平衡, 如图 2 和图 3 所示. 为克服行人布局的不平衡性对行人疏散过程的影响, 分析行人选择通过某安全出口的疏散时间特征.

当疏散空间内行人密度比较低时, 由于安全出口前没有形成拥堵或拥堵程度较小, 此时安全出口前的行人拥堵对行人疏散路径的选择不产生影响, 行人的疏散策略为选择离自身位置最近的安全出口离开疏散空间. 行人选择通过某一无拥堵安全出口时的无拥堵移动时间 t^M 不包括排队等候时间 t^H . t^M 内移动的距离为实际距离 M , 即行人自身位置距安全出口的欧式距离, 决定了行人的 t^M .

$$M_{xy}^i = \min_j \left(\sqrt{(x - x_i^j)^2 + (y - y_i^j)^2} \right), \quad (13)$$

式中, M_{xy}^i 为元胞 (x, y) 距第 i 个安全出口的实际距离.

当疏散空间内行人密度较高时, 由于安全出口前行人拥堵程度较高, 此时安全出口前的行人拥堵对行人疏散路径的选择产生影响, 行人的疏散策略为选择拥挤程度最小的安全出口离开疏散空间. 行人选择通过某一拥堵安全出口时的判断拥堵移动时间 t^Q 可以分解为正常的无拥堵移动时间 t^M 和拥堵造成的排队等候时间 t^H .

$$t^Q = t^M + t^H. \quad (14)$$

由式 (14) 可见, 行人选择通过某一安全出口时, 其最短的移动时间为 t^M , 存在行人拥堵时, t^H 增加了行人的移动时间. t^H 是在 t^M 的基础上通过行人的拥堵程度对 t^Q 产生影响. t^Q 内行人假想移动的距离为假想距离 Q , 包括: 实际距离 M 和等待距离 H , 分别对应 t^M 和 t^H . H 描述安全出口前的行人拥挤程度.

$$Q_{xy}^i = M_{xy}^i + \alpha \cdot H_{xy}^i, \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (15)$$

式中, Q_{xy}^i 为元胞 (x, y) 距第 i 个安全出口的假想距离, M_{xy}^i 为元胞 (x, y) 距第 i 个安全出口的实际距离, H_{xy}^i 为元胞 (x, y) 距第 i 个安全出口的等待距离, α 为拥堵感知系数, 描述行人对拥堵的感知程度, $\alpha = 1$ 说明对安全出口前的行人拥挤是完全感知的.

计算元胞距安全出口的 H 时, 需划分安全出口前的行人拥堵统计区域. 采用元胞与安全出口之间的区域为行人拥堵统计区域, 如图 4 所示, 即在拥堵统计区域内元胞的 M 小于被计算元胞的 M .

$$\Phi_{xy}^i = \{(m, n) | M_{mn}^i < M_{xy}^i\}, \quad (16)$$

式中, Φ_{xy}^i 为元胞 (x, y) 第 i 个门 H 的行人拥堵统计区域.

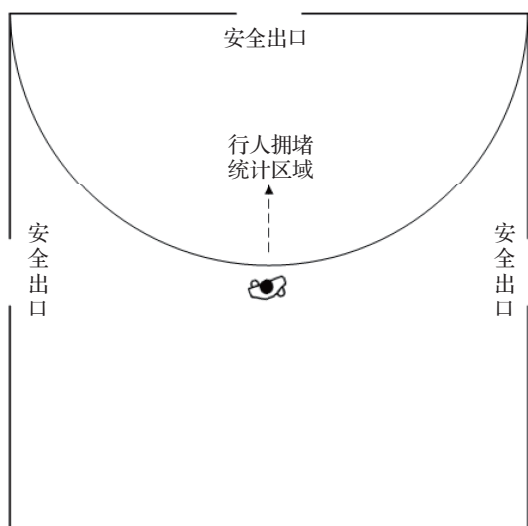


图 4 安全出口前行人拥堵统计区域的示意图

在 $\alpha = 1$ 的情况下, 安全出口前存在较大的行人拥堵排队时, Φ_{xy}^i 内的行人数量和安全出口宽度决定了 Q_{xy}^i . 因此,

$$H_{xy}^i = \frac{2 \times N_{xy}^i}{l_i} - M_{xy}^i, \quad (17)$$

式中, N_{xy}^i 为 Φ_{xy}^i 内的行人数量; l_i 为第 i 个安全出口的宽度.

安全出口前不存在行人拥堵排队时或拥堵排队较少时, $H_{xy}^i \leq 0$, 说明 Φ_{xy}^i 的行人对行人疏散不产生影响. 由式 (15) 和式 (17) 可知,

$$Q_{xy}^i = \alpha \frac{2 \times N_{xy}^i}{l_i} + (1 - \alpha) \cdot M_{xy}^i. \quad (18)$$

$Q_{xy}^i \geq M_{xy}^j$ 时, 说明安全出口前的行人拥挤对行人疏散产生影响, 决定行人通过第 i 个安全出口移动时间的因素是 Q_{xy}^i ; $M_{xy}^j \geq Q_{xy}^i$ 说明安全出口前的行人拥挤对行人疏散不产生影响, 决定行人通过第 i 个安全出口移动时间的因素是 M_{xy}^j . 可见, $\max(M, Q)$ 决定了通过某安全出口的移动时间.

假设行人期望利用最短的时间离开疏散空间, 在疏散过程中实时比较各个安全出口的 M 和 Q , 并选取拥有最小 $\max(M, Q)$ 的安全出口离开. 因此, 元胞距安全出口的最短估计距离为

$$S_{xy} = \min_i \left(\max \left(M_{xy}^i, Q_{xy}^i \right) \right). \quad (19)$$

基于 M 和 Q 的多安全出口选择策略, 如图 5 所示. 图 5 中, 箭头实直线为行人移动的 M , 箭头虚直线为行人判断的 Q .

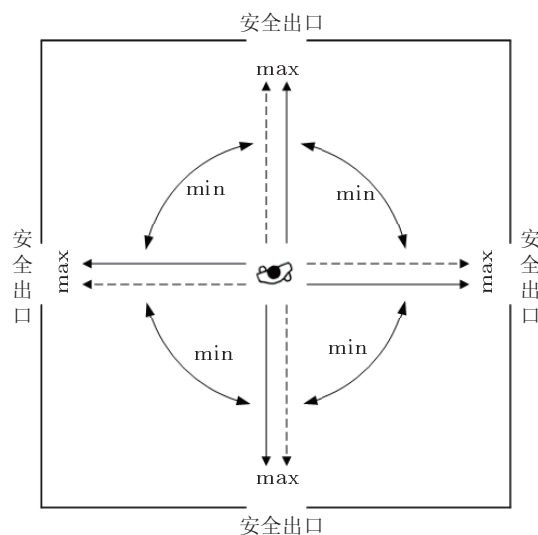


图 5 基于实际距离和假想距离的“极大极小”选择机理

2.4 演化规则

模型采用并行更新机理, 在 $t \rightarrow t + 1$ 时,

(1) 行人 (x, y) 选择 $t + 1$ 的目标位置时, 计算和判断 $F_{(x,y)}$ 内各备选位置的 P_{ij} , 并选择拥有 $P_{\max} = \max(P_{ij})$ 的位置作为 $t + 1$ 的目标位置.

当 $F(x,y)$ 内拥有多个 P_{\max} 时, 以相等的概率随机选择.

(2) 多个行人竞争同一个空闲位置, 发生位置冲突时, 系统将以相等概率随机选择一个行人在 $t+1$ 内移动到目标位置, 没有被选中的行人将留在原地保持位置不变.

(3) 只有当两个行人同时选择对方当前的位置作为 $t+1$ 的目标位置时, 行人之间才交换彼此的位置; 否则, 行人将保持原有的位置不变.

(4) 当行人 $(x,y) \in \text{Exit}$ 时, $t+1$ 时, 行人将移出系统, 即 $(x,y) = 0$.

(5) 当疏散空间内的所有行人移出系统后, 即 $(x,y) \neq 1, (x,y) \in \Omega^2$ 时, 仿真过程结束.

3 仿真分析

在仿真研究中, 疏散行人流的密度 K 定义为

空间行人数量 N 与系统 $W \times W$ 的比例; 行人疏散时间 T 定义为所有疏散行人离开空间时所需 t 的数量. 为减少仿真初始状态或等概率选择对各项统计指标的影响, 每项统计指标分别取 10 次运行指标的平均值. $t=0$ 时, 所有疏散行人的初始位置均匀或固定分布在空间内, 安全出口内没有布置行人. 论文分别从行人随机分布和位置固定的角度, 在行人布局不平衡的情况下仿真研究行人的疏散时间特性.

仿真研究了行人均匀分布的情况下由安全出口布局引起的行人布局不平衡的疏散流. 安全出口个数为 4, 安全出口的长度 $l=1, W=20, \alpha=1$, 简称四安全出口仿真系统. 4 个安全出口分别按照 5 种不同的方式被布置到疏散空间的墙壁上, 由于 $t=0$ 时行人被均匀分布在疏散空间内, 所以从 ID=1 到 ID=5 的情况下, 行人布局的 β 分别为: 0.26, 0.22, 0.21, 0.13, 0, 如图 6 所示.

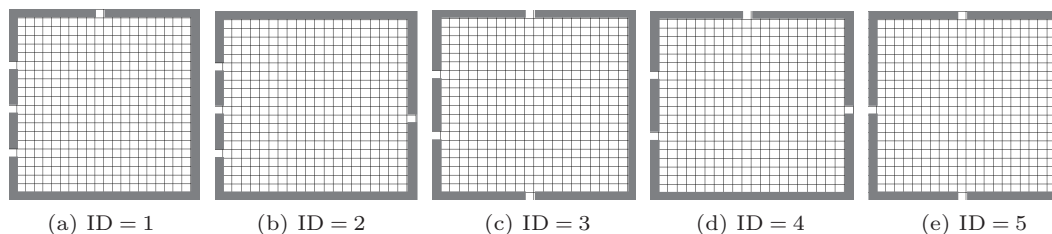


图 6 四安全出口仿真系统的安全出口的布局示意图 (a) ID=1; (b) ID=2; (c) ID=3; (d) ID=4; (e) ID=5

图 7 显示了 $\alpha=1$ 时不同安全出口布局下, 四安全出口仿真系统 T 随 K 的变化曲线, 其中, 左上图为不考虑安全出口前行人拥挤程度的疏散曲线 [12], 即 $\alpha=0$. 可见在由安全出口布局引起的行人布局不平衡的疏散过程中, 模型考虑安全出口前行人拥堵对疏散过程的影响, 能有效地实现行人疏散的平衡过程, 且 T 随行人数量呈线性增长. 此时, 决定 T 的主要因素是安全出口的总宽度.

在行人初始位置固定的情况下, $W=20$, 拥有两个相对且布置在墙中部的安全出口, 安全出口的宽度分别为 l_A 和 l_B , 行人的初始位置固定在安全出口 A 的一侧, 数量分别为 $N=70$ 和 $N=140$, 简称双门仿真系统, 如图 8 所示. 此时, 行人布局的 β 与安全出口的宽度有关, 当 $l_A=1, l_B=4$ 时, $\beta=0.8$; 当 $l_A=1, l_B=9$ 时, $\beta=0.9$.

图 9 显示了行人位置固定, 不同安全出口宽度, 两安全出口仿真系统 T 随 α 的变化曲线. 在 α 较

小的情况下, 由于行人对安全出口前的拥挤程度认识不全面, 对克服由行人布局引起的疏散不平衡的能力较弱, 随着 α 的增加, 行人克服疏散不平衡的能力增强, 所以在安全出口总宽度和行人数量不变的情况下, T 随 α 的增加而减少.

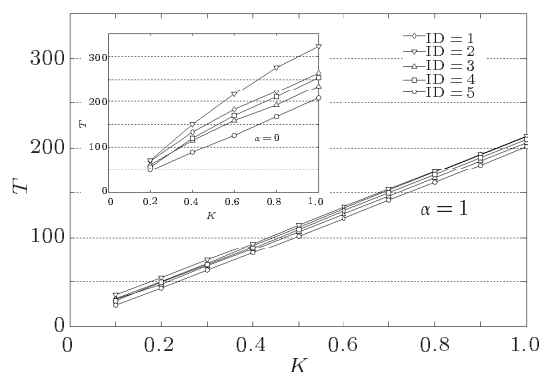


图 7 $\alpha=1$ 时不同安全出口布局的疏散时间随行人密度的变化曲线, 左上图为不考虑安全出口前行人拥挤程度的疏散时间曲线, 即 $\alpha=0$

图 10 显示了不同 α , 行人位置固定, 且 $N = 140$ (如图 8(b) 所示), 两安全出口仿真系统 T 随 l_B 的变化曲线. $\alpha = 0$ 时, 由于没有考虑安全出口前行人的拥堵情况, 行人疏散呈现不平衡的过程, T 不随 l_B 的变化而变化, 此时, 行人仅仅利用安全出

口 A 疏散, 安全出口 B 被闲置; $\alpha > 0$ 时, 行人疏散时考虑安全出口前的拥堵情况, 疏散过程中也会利用安全出口 B 疏散; 随着 l_B 的增加, 安全出口 B 吸引行人通过的能力越强, 因此 T 随着 l_B 的增加而减少.

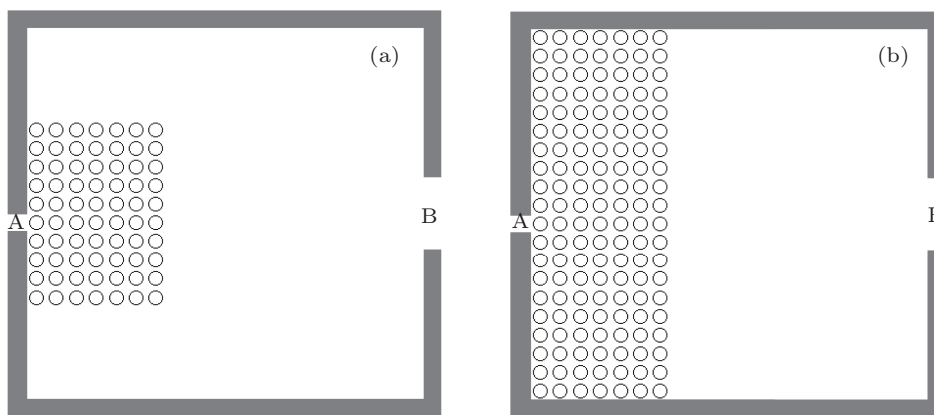


图 8 两安全出口的仿真系统行人初始位置固定的布局示意图 (a) $N = 70$; (b) $N = 140$

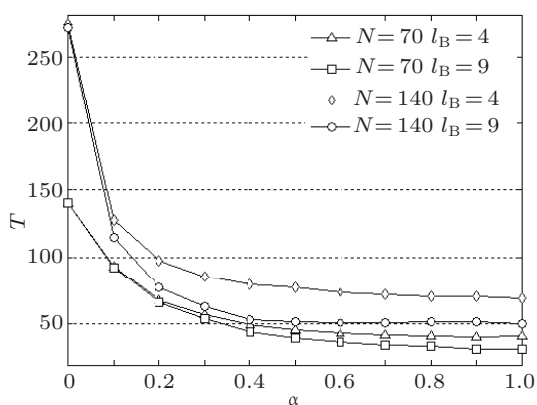


图 9 $l_A = 1$ 时不同 N 和 l_B 的疏散时间随感知系数的变化曲线

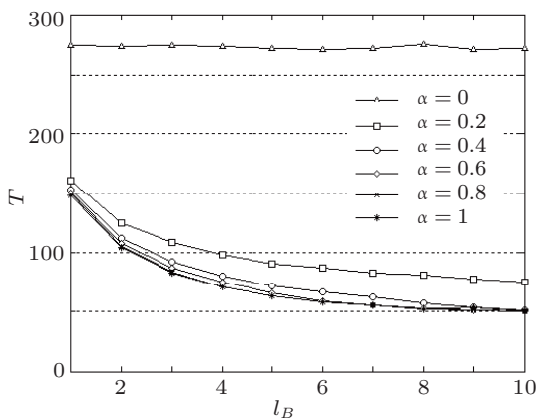


图 10 $N = 140$ 时不同 α 的疏散时间随 l_B 的变化曲线

4 对比分析

$\alpha = 0$ 时, 仿真模型退化为文献 [12] 提出的不考虑安全出口前行人拥堵的原始仿真模型. 文献 [14] 提出了假想距离的概念 (简称模型 A), 用于仿真研究安全出口布局不平衡的疏散行人流; 本文改进了假想距离的计算方法及其拥堵计算区域 (简称模型 B), 用于仿真研究行人初始位置布局不平衡的疏散行人流, 改进模型能有效地实现行人疏散的动态平衡, 如图 11 所示.

在模型 A 中, 由于拥堵计算区域的划分依赖于疏散空间安全出口的布局以及行人位置, 拥堵程度仅仅统计安全出口子区内或子区内行人前方区域内的行人; 同时, 由于 Q 蕴含了 M 和 H , 在“极大极小”的路径选择机理中 α 对 Q 的修正也会对 M 进行修正, 因此导致模型 A 在仿真过程中出现行人“停滞”的现象, 与实际的行人疏散过程不相符, 如图 12 所示. 模型 B 对 Q 的计算方法及其拥堵计算区域进行改进, 且 α 仅仅对反映拥堵程度的等待距离进行修正, 从而克服了行人仿真疏散的“停滞”现象, 如图 13 所示. 在图 12 和图 13 中, 白色圆圈代表距离安全出口 A 近, 并通过安全出口 A 离开仿真系统的行人; 灰色圆圈代表距离安全出口 B 近, 并通过安全出口 B 离开仿真系统的行人; 黑色圆圈代表距离安全出口 A 近, 并通过安全出口 B 离开仿真系统的行人.

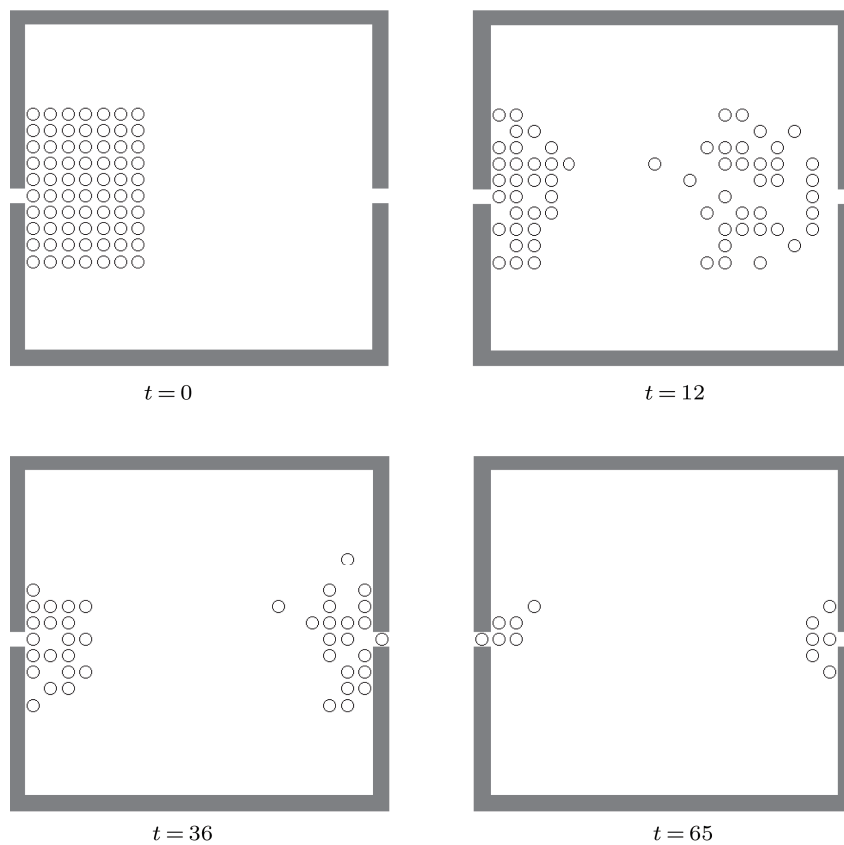


图 11 $W = 20, N = 70, a = 1$ 时模型 B 双门仿真系统的行人疏散过程

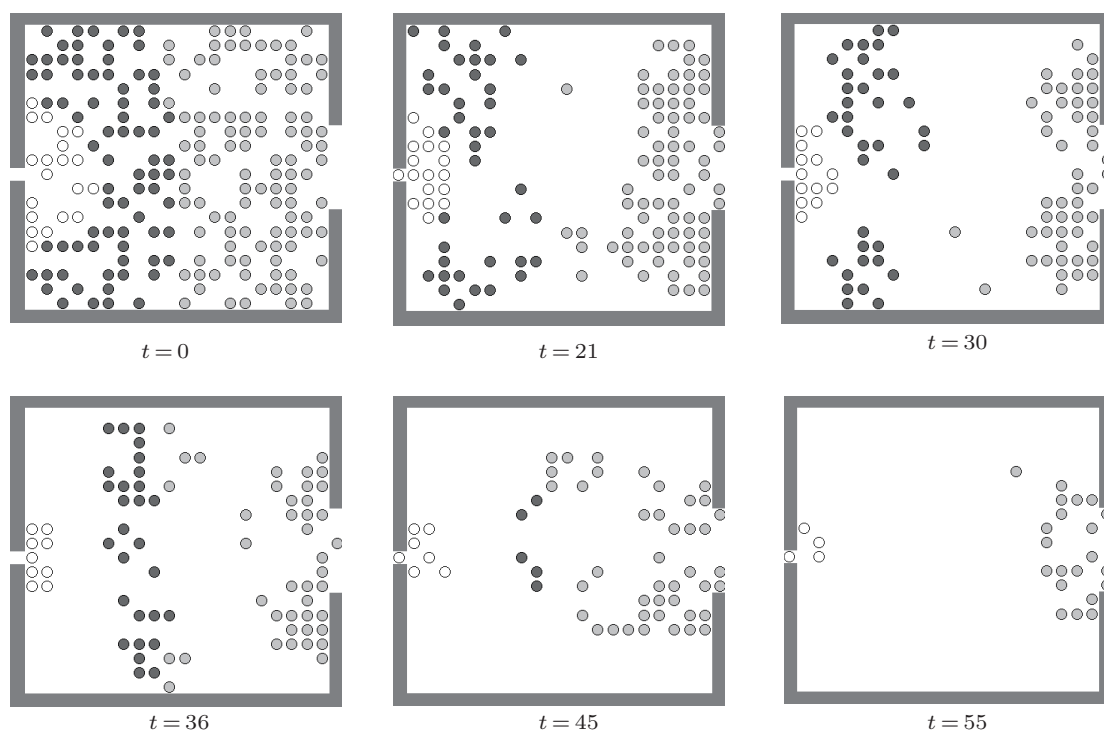


图 12 $W = 20, K = 0.5, a = 1$ 时模型 A 双门仿真系统的行人疏散过程

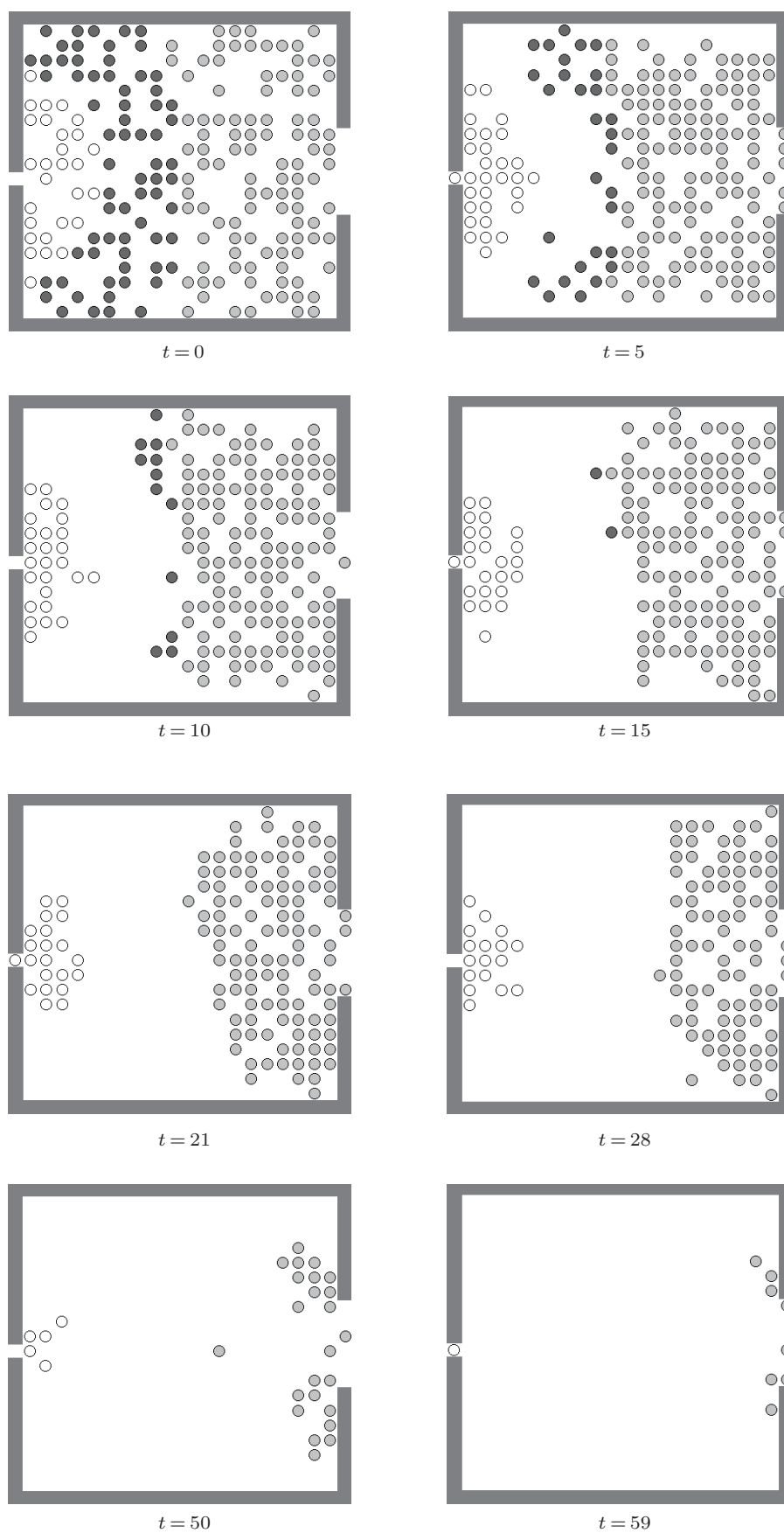


图 13 $W = 20, K = 0.5, a = 1$ 时模型 B 双门仿真系统的行人疏散过程

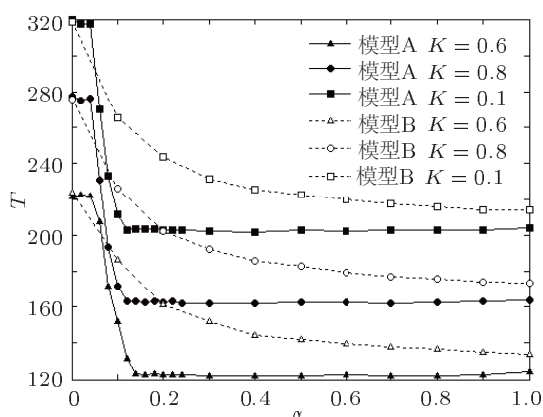


图 14 高密度时不同模型的疏散时间随感知系数的变化曲线

图 14 为四安全出口仿真系统、ID = 2、高密度时模型 A 和 B 的 T 随 α 的变化曲线. 在行人初始秘密较高, 初始位置均匀分布的疏散系统中, 模型 A 和 B 呈现出不同的 T 随 α 变化曲线. 模型 A 的变化曲线呈反“S”型, 存在相位转换和临界感知系数; 模型 B 的变化曲线呈下降的负指数型, 如

图 14 所示.

5 结论

利用元胞自动机的动态参数模型对行人初始位置布局不平衡的疏散人流进行仿真研究. 通过改进假想距离的计算方法及其拥挤计算区域, 能有效地实现行人疏散过程的动态平衡, 达到行人以最短时间离开疏散空间的目的, 并且克服了原有模型行人仿真疏散的“停滞”现象. 研究表明, 在考虑安全出口前行人拥堵的情况下, 行人疏散时间随行人数量呈线性增加, 随安全出口的总宽度呈负指数型减少; 在初始行人数量和安全出口宽度一定的条件下, 行人疏散时间随感知系数的增加而减少; 行人疏散时间受安全出口总宽度、行人的初始数量、拥堵感知系数的影响较大, 而受行人的初始位置和安全出口布局的影响较小. 因此, 在实际的行人疏散过程中, 需提高行人对安全出口前拥堵的了解程度, 以便行人及时选择最短疏散路径, 以提高安全出口的整体利用率, 缩短行人疏散时间.

- [1] Helbing D, Farkas I, Vicsek T 2000 *Nature* **407** 487
- [2] Yu W J, Chen R, Dong L Y, Dai S Q 2005 *Phys. Rev. E* **72** 026112
- [3] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507
- [4] Henein C M, White T 2007 *Physica A* **373** 694
- [5] Huang H J, Guo R Y 2008 *Phys. Rev. E* **78** 021131
- [6] Wen J, Tian H H, Xue Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3817 (in Chinese) [温坚, 田欢欢, 薛郁 2010 物理学报 **59** 3817]
- [7] Yamamoto K, Kokubo S, Nishinari K 2007 *Physica A* **379** 654
- [8] Ma J, Song W G, Liao G X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 128901
- [9] Yue H, Hao H R, Chen X M, Shao C F 2007 *Physica A* **384** 567
- [10] Yue H, Shao C F, Chen X M, Hao H R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6901 (in Chinese) [岳昊, 邵春福, 陈晓明, 郝合瑞 2008 物理学报 **57** 6901]
- [11] Yue H, Guan H G, Zhang J, Shao C 2010 *Physica A* **389** 527
- [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] Yue H, Shao C F, Guan H G, Duan L M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4499 (in Chinese) [岳昊, 邵春福, 关宏志, 段龙梅 2010 物理学报 **59** 4499]
- [14] Yue H, Guan H G, Shao C F, Zhang X 2011 *Physica A* **390** 198
- [15] Kuang H, Li X L, Wei Y F, Song T, Dai S Q 2010 *Chin. Phys. B* **19** 070517
- [16] Zeng G X, Xue Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014502 (in Chinese) [曾广湘, 薛郁 2011 物理学报 **60** 014502]
- [17] Yang L X, Zhao X M, Gao Z Y, Zheng J F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 100501 (in Chinese) [杨凌霄, 赵小梅, 高自友, 郑建风 2011 物理学报 **60** 100501]
- [18] Zhou J W, Chen X L, Zhou J H, Tan H L, Kong L J, Liu M R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2281 (in Chinese) [周金旺, 陈秀丽, 周建槐, 谭惠丽, 孔令江, 刘慕仁 2009 物理学报 **58** 2281]
- [19] 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]
- [20] Zhao D L, Yang L Z, Li J 2006 *Physica A* **363** 501
- [21] Varas A, Cornejo M D, Mainemer D, Toledo B, Rogan J, Muñoz V, Valdivia J A 2007 *Physica A* **382** 631
- [22] Liu S, Yang L, Fang T, Li J 2009 *Physica A* **388** 1921
- [23] Yuan W, Tan K 2007 *Physica A* **384** 549

Simulation of pedestrian evacuation with asymmetrical pedestrian layout*

Yue Hao^{1)†} Zhang Xu¹⁾ Chen Gang²⁾ Shao Chun-Fu¹⁾

1) (MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2) (Automobile Transport Command Department, Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

(Received 22 August 2011; revised manuscript received 15 November 2011)

Abstract

Simulation of pedestrian evacuation from a room with multi-exit and asymmetrical pedestrian layout is presented based on an improved dynamic parameter model in this paper. The computation and the count-area of imaginary distance are improved based on the “Max-Min” evacuation path selection of actual and imaginary distance in order to reduce evacuation imbalance caused by the asymmetry of pedestrian layout. An imbalance coefficient is introduced to describe the asymmetry of pedestrian layout. The effects of pedestrian layout asymmetry on the evacuation time are analyzed respectively from fixed and unfixed pedestrian initialization site. The simulation results of the improved and original models are compared and analyzed, and the improved model can effectively reduce evacuation imbalance. Simulation results show that under normal evacuation condition with considering reasonable pedestrian and jam around exits, evacuation time is hardly affected by pedestrian and exit layout and depends mainly on cognition coefficient, total width of exits and pedestrian initialization amount.

Keywords: cellular automata, pedestrian evacuation, dynamic parameters, pedestrian layout

PACS: 05.50.+q, 05.20.Jj, 64.70.-p

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB725400), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11172035), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 20090460184, 201003036) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. 2011JBM057).

† E-mail: yuehao@bjtu.edu.cn