

双出口房间内疏散行人流的仿真和实验研究*

陈亮 郭仁拥† 塔娜

(内蒙古大学计算机学院, 呼和浩特 010021)

(2012 年 9 月 20 日收到; 2012 年 10 月 25 日收到修改稿)

为研究行人疏散过程中的路径选择行为, 提出了一个基于元胞自动机的行人微观模型, 并组织了三组双出口教室内的学生疏散实验. 模型中, 行人路径选择行为受其到出口距离、前方路径通行能力和行人间排斥力影响. 通过观察实验结果, 得到一些相关现象. 利用实验结果对模型参数进行校正. 利用校正模型对该教室内疏散学生流进行仿真, 结果表明模型能有效地刻画教室内学生流的疏散特征, 疏散时间随学生人数线性增加. 该研究有助于类似场景中行人疏散策略和方案的制定.

关键词: 元胞自动机, 行人疏散, 仿真, 实验

PACS: 05.50.+q, 45.70.Mg, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.62.050506

1 引言

行人流是由相互作用的行人构成的多主体复杂系统, 行人之间具有较强的非线性相互作用^[1]. 行人流研究的开端始于交通流的研究, 由于行人行为的复杂性, 使得行人流问题要比交通流问题复杂得多. 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^[2]. 安全的行人疏散时间决定建筑物的疏散标准, 通过模拟行人流疏散过程可以得到相应的安全疏散时间, 从而提高建筑物的疏散标准. 随着计算机模拟技术水平的不断提高, 国内外研究人员建立了一系列各具特色的行人疏散模型, 这些模型各有其使用场所, 但有一个共同特点就是模型中包含了更多的行为细节, 除了考虑建筑物结构对行人疏散的影响, 而且还注重了人的因素.

目前, 疏散行人流的计算机仿真模型主要分为两种类型: 第一类仅仅考虑建筑物及其各部分的疏散能力, 这类模型通常称为宏观仿真模型, 它以人群整体运动作为分析目标, 此类模型计算速度快,

但无法描述疏散过程中行人的行为细节, 计算结果有较大的偏差^[3]; 第二类模型不仅考虑建筑物空间的物理特性, 而且考虑每个行人做出的决策, 通常称为微观仿真模型, 它以行人在人群中的个体特性作为分析对象, 依照一定算法来驱动行人向出口行走, 此类模型仿真度较高, 但计算结果受驱动算法的影响大^[4,5].

在宏观仿真模型方面, Hughes^[3] 运用流体力学模型给出了一个行人流动的控制方程解, 并将临界流和超临界流中的扰动稳定性做了比较. 在微观仿真模型方面, Burstedde 等^[4] 基于二维元胞自动机 (cellular automata) 模型, 仿真研究了行人流的聚集效应和自组织现象; Helbing 等^[5] 仿真研究了拥挤和恐慌的环境下行人的疏散行为; Guo 和 Guo^[6] 提出一个避免行人重叠的行人位置更新规则, 对行人模型进行改进; Fang 等^[7] 通过考虑行人的右偏喜好选择和后退选择, 确定了不同交通情况下行人可能的行为选择, 建立了一个元胞自动机模型来分析双向行人流特征; Yang 等^[8] 仿真研究了交通出行惯例对双向行人流的影响. 基于元胞自动机的行人模型能通过简单的演化规则模拟行人个体的行为, 并通过微观行为之间的相互作用产生宏观的群体

* 国家自然科学基金 (批准号: 71001047, 71261016) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: buaa-guorenong@126.com

行为^[9].

目前, 基于元胞自动机模型的行人疏散仿真已经取得了一系列的成果^[4,10-22], 较为成熟的模型有 Burstedde 和 Kirchner 提出的地面场模型 (floors field model)^[4,10-13]、Yang 等提出的离散社会力模型 (discrete social force model)^[14-16], 以及 Yue 等提出的动态参数模型 (dynamic parameters model)^[17-20]. 尽管这些元胞自动机模型规则设置简单, 但是已经能模拟出阻塞聚集 (jamming and clogging)、愈快即慢 (faster-is-slower) 等宏观疏散特性.

在教室内, 桌子、椅子和讲台等障碍物被固定, 形成交错的走道和路线. 研究其中行人的疏散过程有助于了解行人初始分布和周围环境布局对其疏散效率的影响. Guo 和 Huang^[23] 基于 Logit 选择模型, 仿真研究了具有多出口和内部障碍环境下行人的路径选择行为; Guo 和 Huang^[24] 仿真研究了具有内部障碍房间内路径通行能力对疏散行人路径选择行为的影响. Liu 等^[25] 利用教室内的疏散实验和一个元胞自动机模型研究了教室出口前的行人密度对行人的路径选择行为的影响. Zhu 和 Yang^[26] 利用构建的元胞自动机模型研究了教室不同出口位置、教室内不同布局情况下的行人疏散效率. Guo 等^[27] 通过组织教室内的疏散实验和建立微观行人疏散模型, 研究了行人分别在良好和零能见度条件下的路径选择行为.

目前, 在行人的疏散路径选择行为研究中, 多数学者利用模型仿真的方法, 利用真人实验研究该问题的成果相对较少, 且多数存在的实验研究常常考虑单出口的疏散情形, 对多出口的疏散行人研究相对较少. 在实际情况下, 行人往往处于多安全出口的疏散空间中, 这时疏散行人将会呈现出不同于单出口情况下的路径选择行为. 而且, 利用真人实验研究多出口情况下行人疏散的路径选择行为, 不仅能够利用得到的行人特征提出更加完善的疏散行人模型, 还能够利用实验结果验证仿真结果的正确性和模型的可用性. 因此, 利用模型模拟和真人实验相结合的方法对多出口情况下行人疏散特征进行研究有助于行人疏散策略和方案的制定.

本文提出了一种考虑行人到出口距离、前方路径通行能力和行人间排斥力综合影响的元胞自

动机模型; 我们组织了三组在双出口教室内进行的学生疏散实验, 并观察到一些疏散学生流的行为特征; 利用实验结果对该模型参数进行校正, 仿真研究了双出口房间内疏散行人流的路径选择行为.

2 模型

2.1 模型描述

模型场景的地面结构由二维网格表示. 每个网格相当于一个元胞, 每个元胞可以为空, 可以被行人占据, 也可以被墙体、桌椅等障碍物占据. 典型的网格大小规定为一个行人所占据空间的大小, 即 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$, 但大多数场景及内部设施的实际大小不是 0.4 m 的整数倍, 为了减小度量误差, 我们将网格大小定为 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$, 每个行人占据 2×2 个网格.

每个时间步, 疏散空间中的每个行人可以移动到未被占据的相邻元胞内. 在每个时间步, 行人会被放在一个随机队列中, 按照队列中的顺序每个行人不但可以向东、南、西、北四个方向移动一个网格的距离, 也可停留在原来的位置. 模型中用 a_e, a_s, a_w, a_n 分别代表行人是否可以向东、南、西、北方向移动. 例如, 如果与行人北面相邻的两个网格都没有被障碍物或其他行人占据, 那么该行人就可以向北移动, $a_n = 1$; 否则, $a_n = 0$. 如果四个方向都不可以移动, 那么该行人保持位置不变.

当行人至少有一个方向可以移动时, 每个行人都有一个偏好方向即行人在移动时最容易选择的方向. 行人的偏好方向受每个方向的转移概率影响, 用 P_e, P_s, P_w, P_n 分别代表行人向东、南、西、北方向移动的转移概率, 其计算公式如下:

$$P_e = Na_e e^{-\epsilon V_e}, \quad (1)$$

$$P_s = Na_s e^{-\epsilon V_s}, \quad (2)$$

$$P_w = Na_w e^{-\epsilon V_w}, \quad (3)$$

$$P_n = Na_n e^{-\epsilon V_n}, \quad (4)$$

其中

$$N = 1 / (a_e e^{-\epsilon V_e} + a_s e^{-\epsilon V_s} + a_w e^{-\epsilon V_w} + a_n e^{-\epsilon V_n}). \quad (5)$$

因为模型中每个行人占据 2×2 个网格, 所以 V_e, V_s, V_w, V_n 分别表示该行人东、南、西、北方向

两个相邻元胞势能值的和. ε 是一个敏感参数, 当它的值是零时, 行人会随机的选择移动方向; 当它的值为无穷大时, 行人会选择势能值最小的方向进行移动.

2.2 空间势能计算

模型中, 每个元胞的势能值由其到出口距离、前方路径通行能力和行人间排斥力共同决定. 设 V_{ij} 表示位置为 (i, j) 的元胞势能值, 首先根据 Von Neumann 型邻域计算势能值 V_{vij} , 然后根据 Moore 型邻域计算势能值 V_{mij} . 元胞按 Von Neumann 型邻域有水平和垂直方向的 4 个相邻元胞, 按 Moore 型邻域不仅包括水平和垂直方向还包括对角线方向的相邻元胞 (8 个). 计算元胞势能值的公式为

$$V_{ij} = \alpha V_{vij} + (1 - \alpha) V_{mij}, \quad (6)$$

其中 α 是一个权重参数. 若 $\alpha = 1$, 表示元胞势能值 V_{ij} 为 V_{vij} ; 若 $\alpha = 0$, 表示 V_{ij} 为 V_{mij} . 计算势能值 V_{vij} 的步骤如下:

第一步, 设置墙壁或障碍物占据元胞势能值为无穷大; 设置出口占据元胞势能值为零.

第二步, 势能值为零的元胞被放在一个有序队列中, 该队列按照势能值的大小升序排列.

第三步, 从有序队列中选择势能值最小的元胞作为检查元胞, 并将其从有序队列中移除. 检查元胞的位置为 (i_0, j_0) , 势能值为 $V_{v_{i_0 j_0}}$. 根据 Von Neumann 型邻域可知与其相邻的元胞有四个, 它们称为被检查元胞, 被检查元胞的位置是 (i, j) . 如果被检查元胞的势能值还没有给定, 那么根据以下两种情况计算其势能值 V_{vij} .

如果检查元胞 (i_0, j_0) 没有被行人占据, 那么

$$V_{vij} = V_{v_{i_0 j_0}} + (1 + \beta/b_{i_0 j_0}); \quad (7)$$

如果检查元胞 (i_0, j_0) 被行人占据, 那么

$$V_{vij} = V_{v_{i_0 j_0}} + (1 + \gamma)(1 + \beta/b_{i_0 j_0}). \quad (8)$$

第四步, 将第三步中计算出势能值的被检查元胞添加到有序队列中, 然后继续从队列中选取检查元胞, 如果队列为空则停止计算; 否则, 执行第三步.

根据 Moore 型邻域计算元胞势能值 V_{mij} 的步骤与上述步骤相似, 不同在于第三步中与检查元胞相邻的元胞有八个.

在上述算法中, γ 为控制行人间排斥力影响的参数. 行人间排斥力体现在模型中为行人占据的元胞对相邻元胞势能值的影响, 即当检查元胞被行人占据时, 它周围元胞势能值的增加速度比未被行人占据的检查元胞周围元胞势能值的增加速度快.

β 是一个强度参数, 描述检查元胞 (i_0, j_0) 的通行能力对被检查元胞势能值的影响程度, 即前方路径通行能力对元胞势能值的影响程度. $b_{i_0 j_0}$ 表示检查元胞 (i_0, j_0) 的通行能力, 如果检查元胞被墙壁或障碍物占据, $b_{i_0 j_0} = 0$; 否则, $b_{i_0 j_0} = b (> 0)$. 从上述公式中可以看出, 如果 $b_{i_0 j_0}$ 的值比较小, 即检查元胞的通行能力弱, 那么被检查元胞的势能值将会以很快的速度增加, 这样元胞势能值受到前方路径通行能力的影响.

利用该势能算法对空间势能进行计算, 每个元胞的势能值由其到出口距离与其到出口之间路径的通行能力和行人的拥挤程度决定. 在每个时间步, 以上算法执行一次, 元胞势能值会被重新计算.

3 实验

3.1 实验描述

实验在图 1 所示教室内进行. 选取的教室大小为 $10.80 \text{ m} \times 5.65 \text{ m}$, 有两个出口, 均位于教室北侧墙壁, 出口 1 宽度为 0.76 m , 距离西侧墙壁 0.26 m ; 出口 2 宽度为 1.05 m , 距离东侧墙壁 0.2 m . 在教室的西侧有电脑桌和讲桌两个障碍物, 另外有 70 张桌椅按 9 行 8 列分布在教室中. 在图 1 中, 黑色矩形代表障碍物和桌椅, 行人的初始位置用 1 到 70 编号的圆圈表示, 编号按照蛇形排列. 教室内的桌椅被两个水平过道划分成三个部分, 其中相邻两桌之间的横向距离为 0.9 m , 两个水平过道宽度均为 0.5 m . 当学生起立时, 椅座可自动折起, 为学生移动留出空间. 在教室西南角安置一台摄像机, 用来记录教室内学生疏散的过程.

30 名学生参与实验. 实验分为三组进行, 分别是 10 人组、20 人组和 30 人组, 其中 10 人组和 20 人组的实验次数均为 8 次, 30 人组的实验次数为 16 次, 每次实验中学生的初始位置由计算机程序随机生成. 实验开始后, 所有学生起立, 并尽快选择出口离开, 学生一旦从出口出去就视为已离开教室.

实验中每个学生疏散所用时间为从实验开始到其离开教室为止. 每次实验按 i - j 形式编号, i 表示实验中的人数, j 表示该人数的第 j 次实验. 图 2 显示

了疏散实验 30—14 在 2, 4, 6 和 8 s 的画面. 图 3 给出了实验 30—5 和 30—14 中行人的疏散时间和出口选择.

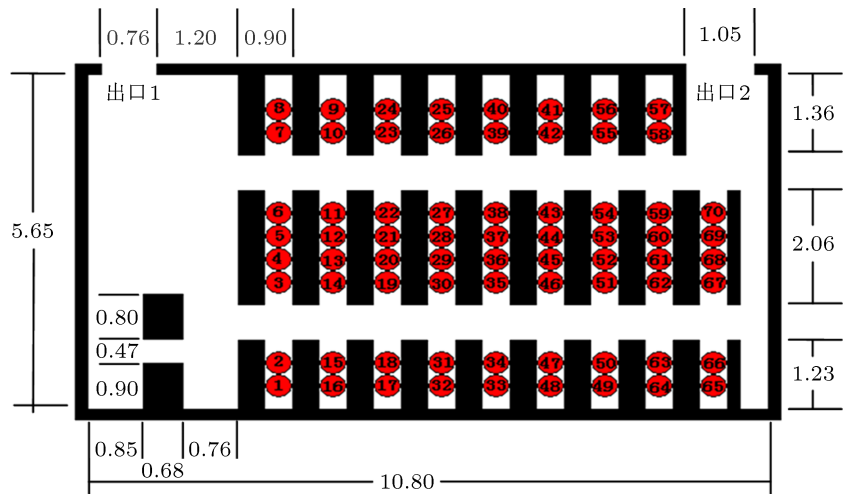


图 1 教室示意图



图 2 疏散实验 30—14 在 2, 4, 6 和 8 s 时的画面

3.2 行人行为

通过观察实验视频, 我们发现一些行人疏散的行为特征.

第一, 在实验开始前, 行人已经熟悉其周围空间的情况, 因此行人主要根据其到两出口的距离,

形成朝向目的出口的首选路径. 行人在行走时具有强烈的朝目的地方行走的倾向性^[9], 所以当实验开始后, 行人首先会迅速按照首选路径移动. 在疏散过程中, 行人会实时地根据其周围空间情况的变化对自身的疏散路径进行调整和更改. 为避免行人在多次实验后的学习行为, 每次实验中行人的初始位

置由计算机程序随机生成.

第二, 表 1, 2 和 3 显示了在每次实验中, 教室内每一行中行人向西走和向东走的人数. 编号为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 的座位构成第 1 行, 其他行按同样方式定义, 一共有 9 行. 从统计结果中可以得出, 在每次实验中, 初始位置在第 1, 2, 3, 4 行的行人倾向于向西移动, 初始位置在第 5 行的行人有的倾向于向西移动有的倾向于向东移动, 初始位置在第 6, 7, 8, 9 行的行人倾向于向东移动. 第 4 行的座位到两个出口的距离相同, 但行人倾向于向西移动; 第 5 行的座位到出口 1 的距离比到

出口 2 的距离长, 但有些行人倾向于向西移动. 这是因为当疏散开始后行人迅速向出口方向聚集, 出口 2 前的疏散空间比出口 1 前的疏散空间小, 出口 2 前疏散路径的行人密度会变得比出口 1 前疏散路径的行人密度大, 行人密度大的区域对行人产生的排斥力强, 所以行人倾向于向西移动, 即倾向于向出口 1 移动, 避免疏散路径前方行人密集的区域. 因此在疏散过程中, 行人之间的排斥力是影响行人疏散路径选择的一个重要因素.

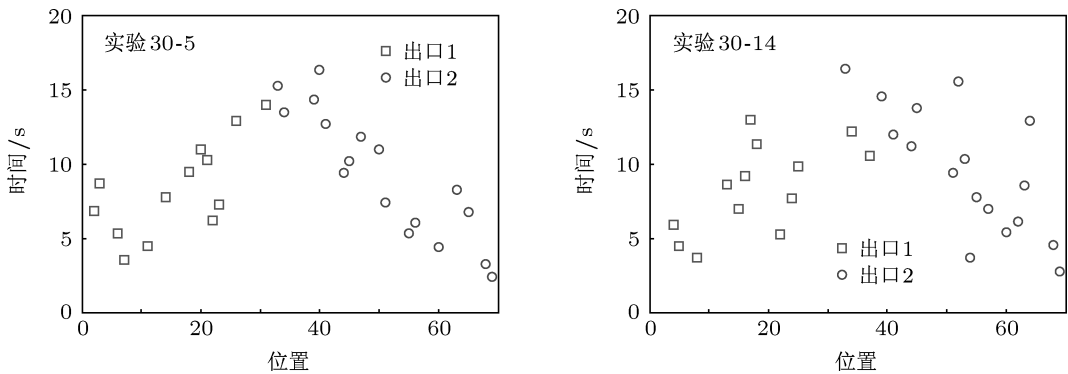


图 3 实验 30—5 和 30—14 中行人的疏散时间和出口选择 (□ 行人从出口 1 离开, ○ 从出口 2 离开)

表 1 10 人组实验每行行人向西走和向东走的人数

| 行数 | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | |
|---------|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|
| | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E |
| 实验 10-1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 |
| 实验 10-2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 实验 10-3 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 实验 10-4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 实验 10-5 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 实验 10-6 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 3 |
| 实验 10-7 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 实验 10-8 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 合计 | 9 | 0 | 11 | 0 | 8 | 0 | 9 | 0 | 2 | 6 | 0 | 12 | 0 | 9 | 0 | 6 | 0 | 8 |

第三, 当行人有多条疏散路径可选时, 即使带有椅子的过道的疏散路径短, 行人也会避免选择这些路径. 虽然椅座在行人离开后折起, 为行人的移动留出空间, 但是椅子的存在影响了通过行人前方路径的通行能力, 给行人的疏散带来不便.

第四, 图 3 仅给出实验 30—5 和实验 30—14 中行人疏散时间和出口选择. 从统计的实验结果可以

得到, 每次实验中初始位置在教室中间的行人所用疏散时间比在教室西侧和东侧距出口近的行人所用时间长. 虽然初始位置在东北角的行人到出口 2 的距离比初始位置在西北角的行人到出口 1 的距离近, 但前者的疏散时间不一定比后者的疏散时间短. 表 4 给出了每组实验中初始位置编号为 7 与 58, 8 与 57, 9 与 56, 10 与 55 的行人疏散时间的对

比, 他们的位置都很靠近出口, 从表中可以看出初始位置编号为 7, 8, 9, 10 的行人疏散时间不一定比初始位置编号为 55, 56, 57, 58 的行人疏散时间长.

这也许是因为出口 1 前的路径通行能力强, 行人可以很快地移动, 虽然疏散路径长但良好的通行能力可以缩短疏散时间.

表 2 20 人组实验每行行人向西走和向东走的人数

| 行数 | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | |
|---------|----|---|----|---|----|---|----|---|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|
| | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E |
| 实验 20-1 | 3 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 2 |
| 实验 20-2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4 | 0 | 3 | 0 | 3 |
| 实验 20-3 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 | 0 | 2 | 0 | 3 | 0 | 1 |
| 实验 20-4 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 5 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| 实验 20-5 | 2 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 2 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 2 |
| 实验 20-6 | 4 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 3 | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 实验 20-7 | 4 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| 实验 20-8 | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 3 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| 合计 | 20 | 0 | 15 | 0 | 11 | 0 | 23 | 1 | 7 | 10 | 0 | 17 | 0 | 23 | 0 | 19 | 0 | 14 |

表 3 30 人组实验每行行人向西走和向东走的人数

| 行数 | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | |
|----------|----|---|----|---|----|---|----|---|----|----|---|----|---|----|---|----|---|----|
| | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E | W | E |
| 实验 30-1 | 3 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 4 | 1 | 0 | 2 | 1 | 3 | 0 | 3 | 0 | 5 | 0 | 2 |
| 实验 30-2 | 3 | 0 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 0 | 3 | 2 | 0 | 6 | 0 | 4 | 0 | 3 | 0 | 1 |
| 实验 30-3 | 3 | 0 | 4 | 0 | 5 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 4 | 0 | 3 | 0 | 5 | 0 | 3 |
| 实验 30-4 | 2 | 0 | 5 | 0 | 2 | 0 | 4 | 0 | 2 | 2 | 0 | 3 | 0 | 4 | 0 | 3 | 0 | 3 |
| 实验 30-5 | 4 | 0 | 2 | 0 | 5 | 0 | 2 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 3 |
| 实验 30-6 | 2 | 0 | 3 | 0 | 4 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 5 | 0 | 5 | 0 | 3 |
| 实验 30-7 | 3 | 0 | 3 | 0 | 5 | 0 | 4 | 0 | 2 | 4 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 2 | 0 | 1 |
| 实验 30-8 | 5 | 0 | 2 | 0 | 5 | 0 | 3 | 0 | 1 | 2 | 0 | 3 | 0 | 2 | 0 | 4 | 0 | 3 |
| 实验 30-9 | 4 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 4 | 0 | 1 | 3 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 4 | 0 | 2 |
| 实验 30-10 | 3 | 0 | 1 | 0 | 7 | 0 | 2 | 0 | 2 | 4 | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 3 |
| 实验 30-11 | 5 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 4 | 0 | 1 | 3 | 0 | 4 | 0 | 4 | 0 | 3 | 0 | 2 |
| 实验 30-12 | 3 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 5 | 0 | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 | 0 | 3 |
| 实验 30-13 | 5 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 4 | 0 | 1 | 3 | 0 | 3 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| 实验 30-14 | 3 | 0 | 3 | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 3 | 0 | 5 | 0 | 5 | 0 | 2 |
| 实验 30-15 | 3 | 0 | 3 | 0 | 4 | 0 | 5 | 0 | 1 | 2 | 0 | 4 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| 实验 30-16 | 6 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 3 |
| 合计 | 57 | 0 | 49 | 0 | 57 | 0 | 54 | 1 | 22 | 38 | 2 | 53 | 0 | 56 | 0 | 53 | 0 | 38 |

表 4 实验中初始位置编号为 7 与 58, 8 与 57, 9 与 56, 10 与 55 的行人疏散时间对比

| 位置 | 7 | 58 | 8 | 57 | 9 | 56 | 10 | 55 |
|-----------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 10 人组实验 | 4.4 | — | 3.62 | 3.49 | 5.52 | 5.61 | — | 4.51 |
| <i>td</i> | — | — | 0.13 | — | —0.09 | — | — | — |
| 20 人组实验 | 4.00 | 5.04 | 4.60 | 4.92 | 6.99 | 8.44 | — | 4.96 |
| <i>td</i> | —1.04 | — | —0.32 | — | —1.45 | — | — | — |
| 30 人组实验 | 3.74 | 3.54 | 3.87 | 4.75 | 6.14 | 6.98 | 5.90 | 5.99 |
| <i>td</i> | 0.20 | — | —0.88 | — | —0.84 | — | —0.09 | — |

注: “*td*” 代表前者与后者的时间差, “—” 代表实验中没有初始位置为该编号的行人.

4 实验与仿真结果的比较分析

第一, 根据实验中得到的数据对模型参数进行校正. 校正模型时有两个标准: 相同位置上的行人分别在实验和仿真中完成疏散所用时间的差别, 用 Δt 表示; 相同位置上的行人分别在实验和仿真中对出口选择的差别, 用 Δe 表示. 每个行人在仿真中的疏散时间和出口选择取 100 次仿真的平均值. 时间差别的计算公式为

$$\Delta t = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - t_i)^2}, \tag{9}$$

其中, T_i 表示实验中第 i 个行人离开教室用的时间, t_i 表示仿真中第 i 个行人离开教室用的时间, n 表示实验中的人数. 出口选择差别的计算公式为

$$\Delta e = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - e_i)^2}, \tag{10}$$

其中, E_i 表示实验中第 i 个行人离开教室的出口选择, 如果行人从出口 1 离开, $E_i = 1$; 如果行人从出口 2 离开, $E_i = 2$. e_i 表示仿真中第 i 个行人离开教室的出口选择, n 为实验中的人数.

表 5 模型参数 $\alpha = \sqrt{2} - 1, \beta = 16, \varepsilon = 1, \gamma = 0.5, v = 0.95 \text{ m/s}$ 的校正结果

| | | | | | | | | |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 实验 | 10—1 | 10—2 | 10—3 | 10—4 | 10—5 | 10—6 | 10—7 | 10—8 |
| Δt | 1.15 | 1.59 | 1.15 | 1.03 | 0.98 | 1.39 | 1.92 | 1.83 |
| Δe | 0.32 | 0.32 | 0 | 0.32 | 0.32 | 0 | 0.45 | 0.32 |
| 实验 | 20—1 | 20—2 | 20—3 | 20—4 | 20—5 | 20—6 | 20—7 | 20—8 |
| Δt | 2.09 | 1.71 | 1.33 | 1.92 | 1.47 | 1.77 | 1.24 | 1.44 |
| Δe | 0.32 | 0.22 | 0.32 | 0.22 | 0.39 | 0.32 | 0 | 0.38 |
| 实验 | 30—1 | 30—2 | 30—3 | 30—4 | 30—5 | 30—6 | 30—7 | 30—8 |
| Δt | 3.17 | 2.21 | 2.56 | 1.95 | 2.22 | 2.39 | 1.71 | 2.18 |
| Δe | 0.18 | 0.45 | 0 | 0.37 | 0.32 | 0.26 | 0.34 | 0.18 |
| 实验 | 30—9 | 30—10 | 30—11 | 30—12 | 30—13 | 30—14 | 30—15 | 30—16 |
| Δt | 2.17 | 2.11 | 1.87 | 2.41 | 2.07 | 2.26 | 2.46 | 2 |
| Δe | 0.14 | 0.22 | 0.32 | 0.37 | 0.26 | 0.26 | 0.32 | 0.26 |

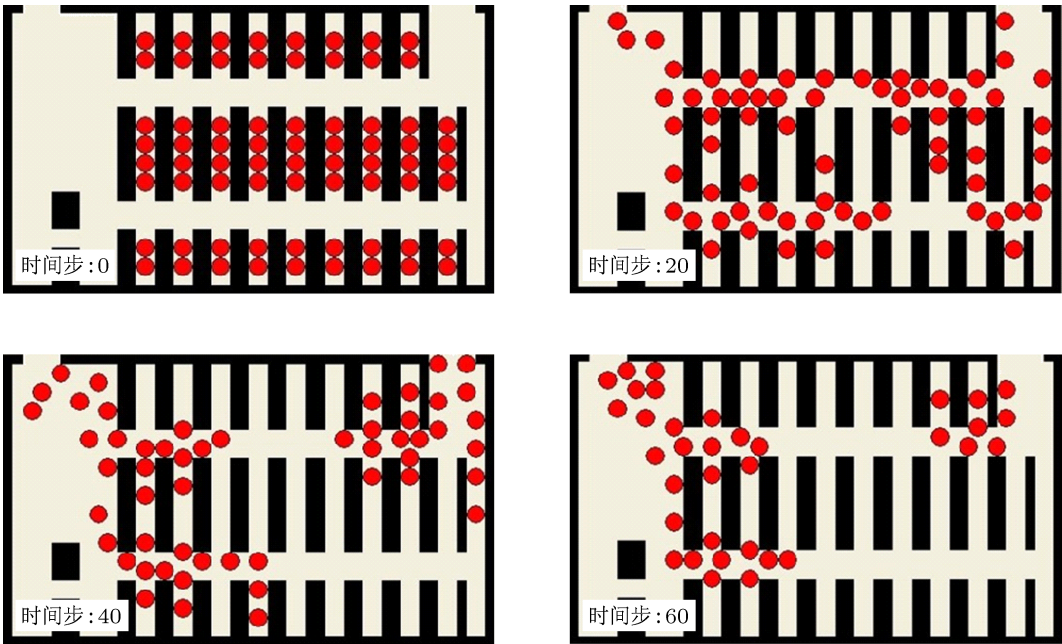


图 4 人数为 70 人时的疏散仿真中在时间步为 0, 20, 40, 60 时的画面

Δt 和 Δe 的值越小, 模型的仿真效果越好, 即越能够有效地刻画行人流的疏散特征. 选取一个参数组合对真人实验进行仿真, 根据校正参数的两个标准, 确定该组参数的可用性. 表 5 显示了模型参数为 $\alpha = \sqrt{2} - 1$, $\beta = 16$, $\varepsilon = 1$, $\gamma = 0.5$, 行人的移动速度 $v = 0.95$ m/s, 即以 0.21 s 为一个时间步时的校正结果. 从中可以看出, 模型使用该组参数时 Δt 和 Δe 取得较小的值, 能够有效地刻画行人流的疏散特征. 这表明通过适当的参数选择, 该模型能够有效地再现教室内学生流的疏散过程.

第二, 利用校正后的模型进行该教室内疏散行人流仿真. 人数为 70 人时的疏散仿真在时间步为 0, 20, 40, 60 时的疏散画面如图 4 所示. 在仿真开始后, 行人会向势能值小的方向移动. 从仿真中可以看出, 初始位置在第 1, 2, 3, 4 行的行人倾向于向西移动, 初始位置在第 5 行的行人有的倾向于向西移动有的倾向于向东移动, 初始位置在第 6, 7, 8, 9 行的行人倾向于向东移动. 人数为 70 人时的疏散仿真中每个行人的疏散时间如图 5 所示, 该疏散时间是 100 次仿真的平均值. 可以看到, 初始位置在教室中间的行人疏散时间比教室东西两侧距离出口近的行人所用疏散时间长. 在同一行中, 初始位置与过道相邻的行人疏散时间比里面的行人疏散时间短. 初始位置编号为 7, 8, 9, 10 的行人疏散时间不一定比初始位置编号为 55, 56, 57, 58 的行人疏散时间长. 这些现象与在实验中观察到的现象相符.

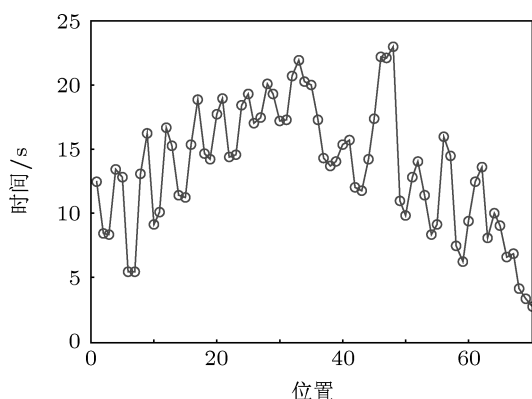


图 5 人数为 70 人时的疏散仿真中每个行人的疏散时间

第三, 仿真研究了教室内不同学生人数对学生疏散时间的影响. 仿真中疏散时间取 100 次仿真的

平均值. 图 6 给出了实验中行人疏散时间与仿真疏散时间的对比. 从仿真的结果可以看出, 学生人数与疏散时间是线性关系, 即随着教室内人数的增加, 疏散完成时间线性增加. 从统计的实验数据中可以看出, 学生人数与疏散完成时间是线性关系. 仿真得到的结果与实验结果几乎一致.

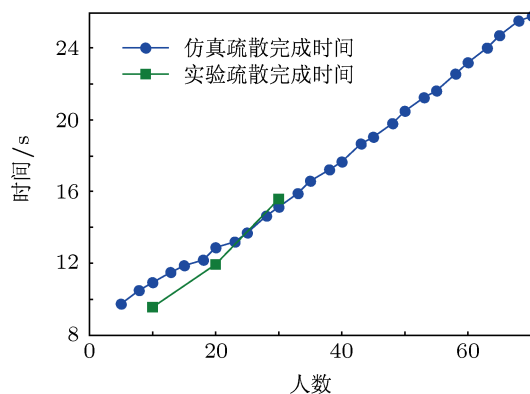


图 6 实验与仿真中疏散时间的对比

5 结 论

本文利用模型模拟和真人实验对双出口房间内疏散行人流的路径选择行为进行研究. 基于元胞自动机原理, 建立了一个模拟行人疏散的微观模型. 模型中, 行人路径选择行为受其到出口距离、前方路径通行能力和行人间排斥力的影响. 在实验中观察到一些疏散行人流的行为特征: 1) 在疏散过程中, 行人首先根据其到出口的距离迅速向出口方向移动, 然后会实时地根据其周围疏散空间情况的变化对疏散路径进行调整和更改; 2) 行人在选择出口时会对其前方的拥挤情况进行判断, 行人倾向于选择前方行人密度稀疏的方向, 其次考虑路径长度; 3) 当行人有多条疏散路径选择时, 行人倾向于选择通行能力强的路径, 即选择能够让多人快速通过的路径, 避免带有椅子的过道; 4) 教室中间位置的行人比教室西侧和东侧的行人疏散时间长, 在靠近出口的位置, 虽然初始位置在东北角的行人到出口 2 的距离比初始位置在西北角的行人到出口 1 的距离近, 但前者的行人疏散时间不一定比后者的行人疏散时间短.

利用实验结果对模型参数进行校正. 对该教室内疏散学生流进行仿真, 研究结果表明, 通过适当的参数选择, 该模型能够有效地再现教室内学生流

的疏散过程; 学生人数与疏散完成时间成线性关系, 即随着教室内人数的增加, 疏散完成时间线性增加.

该研究有助于类似场景中行人疏散策略和方案的制定.

-
- [1] 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]
- [2] Yue H, Zhang X, Chen G, Shao C F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 130509 (in Chinese) [岳昊, 张旭, 陈刚, 邵春福 2012 物理学报 **61** 130509]
- [3] Hughes R L 2002 *Trans. Res. B* **32** 507
- [4] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, Zittart J 2001 *Physica A* **295** 507
- [5] Helbing D, Farkas I, Vicsek T 2000 *Nature* **407** 487
- [6] Guo R Y, Guo X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 018901
- [7] Fang W F, Yang L Z, Fan W C 2003 *Physica A* **321** 633
- [8] 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]
- [9] Ren G, Lu L L, Wang W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144501 (in Chinese) [任刚, 陆丽丽, 王炜 2012 物理学报 **61** 144501]
- [10] Kirchner A, Schadschneider A 2002 *Physica A* **312** 260
- [11] Kirchner A, Klupfel H, Nishinari K, Schadschneider A, Schreckenberg M 2003 *Physica A* **324** 689
- [12] Kirchner A, Nishinari K, Schadschneider A 2003 *Phys. Rev. E* **67** 056122
- [13] Xu Y, Huang H J, Yong G 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 080502
- [14] Yang L Z, Fang W F, Huang R, Deng Z H 2002 *Chin. Sci. Bull.* **47** 1484
- [15] Yang L Z, Fang W F, Li J, Huang R, Fan W C 2003 *Chin. Sci. Bull.* **48** 1695
- [16] Zhao D L, Yang L Z, Li J 2008 *Physica A* **387** 3708
- [17] Yue H, Hao H R, Chen X M, Shao C F 2007 *Physica A* **384** 567
- [18] 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]
- [19] 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]
- [20] Zhu N, Jia B, Shao C F, Yue H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 050501
- [21] Zarita Z, Lim E A 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 018901
- [22] Xie J J, Xue Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194502 (in Chinese) [谢积鉴, 薛郁 2012 物理学报 **61** 194502]
- [23] Guo R Y, Huang H J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030501
- [24] Guo R Y, Huang H J 2011 *J. Stat. Mech.* P04018
- [25] Liu S B, Yang L Z, Fang T Y, Li L 2009 *Physica A* **388** 1921
- [26] Zhu K J, Yang L Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7701 (in Chinese) [朱孔金, 杨立中 2010 物理学报 **59** 7701]
- [27] Guo R Y, Huang H J, Wong S C 2012 *Trans. Res. B* **46** 669

Simulation and experimental results of evacuation of pedestrian flow in a classroom with two exits*

Chen Liang Guo Ren-Yong[†] Ta Na

(College of Computer Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

(Received 20 September 2012; revised manuscript received 25 October 2012)

Abstract

A microscopic pedestrian model based on cellular automata is proposed and three groups of experiments on pedestrian evacuation from a double-exit room are conducted to investigate the route choice of pedestrians during evacuation. In the model, the route-choice behavior of pedestrians is affected by the route distance from the pedestrians to the exit, the capacity of the frontal route, and the repulsive force between pedestrians. Through the analysis of the video recordings, certain conclusions related to the route choice of pedestrians in these experiments are obtained. Model parameters are calibrated by the experimental data. Simulation results indicate that the model can reproduce the evacuation behavior of pedestrians in the room effectively and evacuation time is an increasing linear function of student number. The present study is helpful for devising evacuation strategies and schemes in buildings that are similar to the room.

Keywords: cellular automata, pedestrian evacuation, simulation, experiment

PACS: 05.50.+q, 45.70.Mg, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.62.050506

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 71001047, 71261016).

[†] Corresponding author. E-mail: buaa_guorenyong@126.com