

基于元胞自动机的行人疏散流仿真研究^{*}

岳 昊¹⁾ 邵春福^{1)†} 姚智胜²⁾

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) (北京市城市规划设计研究院, 北京 100045)

(2008 年 11 月 11 日收到; 2008 年 11 月 28 日收到修改稿)

基于元胞自动机对行人疏散流进行仿真研究. 模型利用两个动态参数反映行人移动区域内的疏散情况, 从而决定行人的行为选择. 模型中行人可以根据自身周围的情况选择移动、等待行为. 本文仿真研究了行人在正常疏散环境下, 系统规模、疏散人数、安全出口宽度、多个安全出口布局对行人疏散时间的影响. 研究表明, 行人疏散时间随行人数量呈线性增加; 随安全出口宽度呈负指数性减少; 同时, 多个安全出口布局的不平衡也会对行人的疏散过程和疏散时间产生一定的影响.

关键词: 元胞自动机, 行人疏散流, 动态参数, 疏散时间

PACC: 0550, 0520, 6470

1. 引言

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. 以人为本的人性化设施设计需要行人流理论的支持, 只有掌握和理解行人流的微观和宏观特征, 才能合理地规划和设计行人设施和行人交通规则. 因此, 通过基于行人微观特征的宏观行人流仿真研究, 探索不同环境下宏观行人流特征和现象的生成机理, 是行人流研究的重点和热点. 行人不同于机动车, 它比机动车更具有灵活性和适应性, 可以根据自身周围的情况改变自己的速度、移动方向、或者变换行走的轨迹, 同时, 也可以接受行人之间的轻微碰撞和位置交换.

在行人流的仿真研究中, 基于元胞自动机(CA)的仿真技术已经被广泛应用于交叉口行人流、对向行人流和疏散行人流的仿真研究. 元胞自动机通过模拟或定义系统中简单个体的微观行为特征, 在个体间相互作用的条件下, 实现系统整体宏观行为特征的仿真与研究^[1]. 在基于 CA 的行人流仿真研究中, 已建立两步骤更新模型(two processes model)^[1,2]、格子气模型(lattice gas model)^[3-6]、两领域模型(two floors model)^[7,8]、先前确定概率模型

(pre-fixed probabilities model)^[9,10]、动态参数模型(dynamic parameters model)^[11,12]、实地编码模型(real-coded CA model)^[13]、多网格模型(multi-grid model)^[14,15]、移动格子气模型(mobile lattice gas model)^[16]等应用于行人流的仿真研究.

本文利用动态参数模型^[11]的两个基本参数(方向参数和空格参数), 对正常疏散情况下无不良影响的行人疏散流进行仿真研究, 分析系统规模、安全出口宽度、行人初始密度、多个安全出口布局等对行人疏散时间以及行人疏散演化过程的影响.

2. 模型

行人疏散仿真模型建立在大小为 $(W+2) \times (W+2)$ 的二维离散元胞网格系统内, 即把行人疏散空间的移动区域分割为 $W \times W$ 个大小相等的离散元胞空格, W 为系统规模; 用障碍物占据系统边界元胞形成房间围墙, 在墙上留有空格元胞作为房间的安全出口. 在系统内, 每个空格位置只能容纳一个行人; 每个行人也只能占据一个元胞空格. 行人的仿真过程也被离散化为相等的时间步长, 在每个离散的时间步长内, 行人仅仅能移动一个元胞的位置. 在每个时间步长内, 行人或停止等待, 或以最大的速度 $V_{\max} = 1$ 元胞/step 移动. 行人不能穿越和跨越围墙,

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:2006CB705500)资助的课题.

[†] 通讯联系人 E-mail: cfshao@center.njtu.edu.cn

只能通过房间安全出口离开系统,疏散行人离开系统后将不再进入系统.仿真模型如图 1 所示.

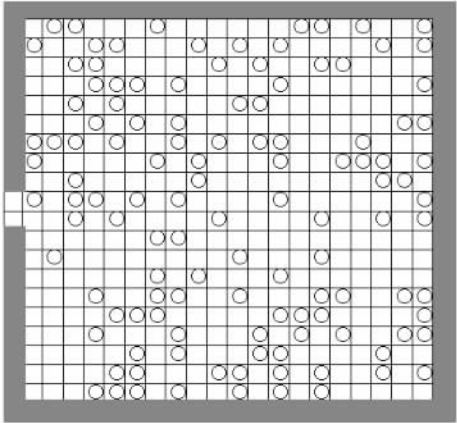


图 1 基于元胞自动机的行人疏散流仿真模型

在模型演化的每个离散时间步长内,行人可以等待或者向自己周围的八个方向移动,移动领域如图 4(a) 所示.在选择下一时间步的位置时,行人会判断移动领域内每个位置的移动收益,选择其中拥有最大移动收益值的位置作为自己下一时间步的目标位置.行人也可以选择正被其他行人占据的位置作为自己下一时间步的目标位置,因此在行人疏散过程中存在行人之间交换位置的可能性.在同一个时间步长内,当且仅当两个行人彼此选择对方目前所占据的位置作为自己下一时间步的目标位置时,行人将会在下一时间步交换彼此的位置,且两人之间的位置交换一定会发生并且成功.

移动领域内每个元胞位置的移动收益是通过动态参数模型的两个基本参数求和得到:方向参数(direction-parameter)和空格参数(empty-parameter).方向参数描述了下一步可选位置距行人目标位置的接近程度;空格参数反映了下一步可选位置是否被其

他行人占据.模型假设行人在疏散移动过程中做出移动选择之前,都会判断和评价每个可选位置的移动收益.

在参数计算方面,由于行人疏散时的交通环境与移动目的地不同于交叉口行人流和对向行人流,因此疏散行人流方向参数的计算有疏散仿真模型自身的特点.

2.1. 参数计算

行人疏散移动具有目的性和方向性,不是漫无目的地游走.行人疏散流移动的目的地是房间的安全出口,移动方向是指向安全出口的方向.行人疏散时尽可能地选择离安全出口近的位置作为自己下一时间步的目标位置.因此,安全出口对疏散行人的吸引力是驱使行人向安全出口移动的原始驱动力.从方向参数的角度分析,在时间步长内行人移动一个步伐获得的移动收益是在行人移动领域内选择的位置与安全出口距离接近的程度.模型采用元胞位置距安全出口的最短距离表达房间内不同位置对行人的吸引程度.在行人疏散房间内,元胞位置距安全出口的距离越近,元胞吸引行人进入该位置的吸引力就越强,行人进入该位置的动力就越大.

在计算方向参数时,首先计算元胞位置距安全出口的欧氏距离,并规定安全出口内的距离为零.当行人疏散房间拥有多个安全出口时,取距最近安全出口的距离值作为元胞位置距安全出口的最短距离;当安全出口的宽度大于一个元胞空格时,取距安全出口内最近元胞的距离值作元胞位置距安全出口的最短距离.元胞位置距安全出口的最短距离由(1)式计算,图 2 和图 3 分别为单个安全出口和多个安全出口疏散空间内元胞位置距安全出口最短距离的示意图.

$$S_{xy} = \begin{cases} \min_m (\min_n (\sqrt{(x - x_n^m)^2 + (y - y_n^m)^2})), & \text{元胞}(x, y) \text{ 为空格,} \\ M, & \text{元胞}(x, y) \text{ 为墙,} \end{cases} \tag{1}$$

式中, S_{xy} 为元胞 (x, y) 距安全出口的最短距离; (x, y) 为元胞在疏散系统中的坐标; (x_n^m, y_n^m) 为第 m 个门内第 n 个元胞在疏散系统中的坐标; M 为一个

很大的正数,说明墙对行人几乎没有吸引力.
在疏散行人占据中心位置的移动领域内,与其对应的方向参数矩阵元素的值为

$$D_{ij} = \begin{cases} \frac{S_{00} - S_{ij}}{1}, \text{垂直水平方向移动}, i + j = 1, -1, \\ \frac{S_{00} - S_{ij}}{\sqrt{2}}, \text{斜线方向移动}, i + j = 0, -2, 2, \end{cases} \quad (2)$$

式中, S_{00} 为移动领域中心位置距安全出口的最短距离; S_{ij} 为行人移动领域内元胞(i, j)距安全出口的最短距离.

空格动态参数矩阵元素的值为

$$E_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{空的元胞位置} \\ 0, & \text{中心元胞位置,} \\ -1, & \text{被其他行人占据的元胞位置.} \end{cases} \quad (3)$$

两个动态参数的值是根据移动领域内元胞距安全出口的最短距离和行人周围疏散环境的变化而变化的.

500	500	500	500	500	500	0	0	0	500	500	500	500	500	500
500	5.1	4.12	3.16	2.24	1.41	1	1	1	1.41	2.24	3.16	4.12	5.1	500
500	5.39	4.47	3.61	2.83	2.24	2	2	2	2.24	2.83	3.61	4.47	5.39	500
500	5.68	5	4.24	3.61	3.16	3	3	3	3.16	3.61	4.24	5	5.68	500
500	6.4	5.68	5	4.47	4.12	4	4	4	4.12	4.47	5	5.68	6.4	500
500	7.07	6.4	5.68	5.39	5.1	5	5	5	5.1	5.39	5.68	6.4	7.07	500
500	7.81	7.21	6.71	6.32	6.08	6	6	6	6.08	6.32	6.71	7.21	7.81	500
500	8.6	8.06	7.62	7.28	7.07	7	7	7	7.07	7.28	7.62	8.06	8.6	500
500	9.43	8.94	8.54	8.25	8.06	8	8	8	8.06	8.25	8.54	8.94	9.43	500
500	10.3	9.85	9.49	9.22	9.06	9	9	9	9.06	9.22	9.49	9.85	10.3	500
500	11.18	10.77	10.44	10.2	10.05	10	10	10	10.05	10.2	10.44	10.77	11.18	500
500	12.03	11.7	11.4	11.18	11.05	11	11	11	11.05	11.18	11.4	11.7	12.03	500
500	13	12.65	12.37	12.17	12.04	12	12	12	12.04	12.17	12.37	12.65	13	500
500	13.93	13.6	13.34	13.15	13.04	13	13	13	13.04	13.15	13.34	13.6	13.93	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500

图2 单个安全出口疏散房间元胞位置距安全出口的最短距离

500	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500	500
500	6.08	5.1	4.12	3.16	2.24	1.41	1	1.41	2.24	3.16	4.12	5.1	6.08	500
500	5.1	5.39	4.47	3.61	2.83	2.24	2	2.24	2.83	3.61	4.47	5.39	5.1	500
500	4.12	4.47	5	4.24	3.61	3.16	3	3.16	3.61	4.24	5	4.47	4.12	500
500	3.16	3.61	4.24	5	4.47	4.12	4	4.12	4.47	5	4.24	3.61	3.16	500
500	2.24	2.83	3.61	4.47	5.39	5.1	5	5.1	5.39	4.47	3.61	2.83	2.24	500
500	1.41	2.24	3.16	4.12	5.1	6.08	6	6.08	5.1	4.12	3.16	2.24	1.41	500
0	1	2	3	4	5	6	7	6	5	4	3	2	1	0
500	1.41	2.24	3.16	4.12	5.1	6.08	6	6.08	5.1	4.12	3.16	2.24	1.41	500
500	2.24	2.83	3.61	4.47	5.39	5.1	5	5.1	5.39	4.47	3.61	2.83	2.24	500
500	3.16	3.61	4.24	5	4.47	4.12	4	4.12	4.47	5	4.24	3.61	3.16	500
500	4.12	4.47	5	4.24	3.61	3.16	3	3.16	3.61	4.24	5	4.47	4.12	500
500	5.1	5.39	4.47	3.61	2.83	2.24	2	2.24	2.83	3.61	4.47	5.39	5.1	500
500	6.08	5.1	4.12	3.16	2.24	1.41	1	1.41	2.24	3.16	4.12	5.1	6.08	500
500	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500	500

图3 多个安全出口疏散房间元胞位置距安全出口的最短距离

2.2. 演化规则

模型采用并行更新机理,在仿真模型的演化规则中,每个行人都必须遵守如下行人移动规则:

1)在每一时间步长 t 内,疏散行人只能移动一个元胞的长度.行人有九个可选的位置作为自己的下一步目标位置,即行人可以选择原地等待或者向自己周围的八个位置移动,如图4(a)所示.

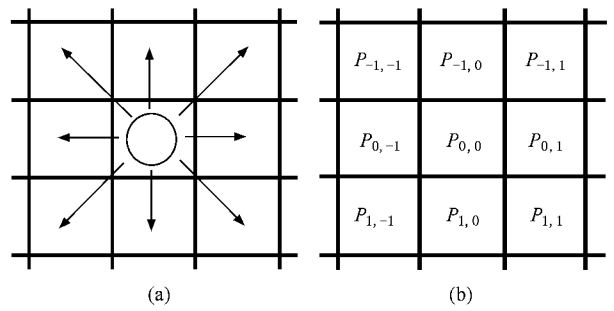


图4 疏散行人移动领域及其相应的移动收益矩阵 (a) 行人移动领域; (b) 移动收益矩阵

2)行人移动领域内的九个备选位置都拥有自己的动态参数和移动收益,如图4(b)所示.移动收益是方向参数和空格参数两个动态参数值的总和.移动收益的计算为

$$P_{ij} = D_{ij} + E_{ij}, \quad (4)$$

式中, P_{ij} 为移动收益; D_{ij} 为方向参数; E_{ij} 为空格参数.

3)疏散行人在选择自己的下一步目标位置时,首先计算和判断自己移动领域内九个被选位置的移动收益,并选择拥有最大收益值的位置作为自己下一步的目标位置.由于行人的移动过程是有目的、有方向的追求移动收益最大化的过程,因此行人会选择拥有最大移动收益值的元胞作为自己的下一步移动位置.

4)在疏散行人选择下一目标位置时,当移动领域内存在多个拥有移动收益最大值的元胞位置时,行人在这些元胞中以相同的概率随机选择一个元胞作为自己的下一步目标位置.

5)在模型演化过程中,由于存在多个行人同时

竞争一个空闲位置的情况,因此行人之间会存在位置冲突.当行人之间存在位置冲突时,系统将会以相等概率随机选择一个行人占据该位置,被选择的行人将在下一步内移动到目标位置,没有被选中的行人将留在原地保持位置不变.

6)在模型演化过程中,只有当两个行人同时选择对方当前的位置作为自己下一步的目标位置时,行人之间才交换彼此的位置.当行人之间位置交换的条件满足时,位置交换一定会成功完成;但行人之间位置交换的条件不满足时,行人将会保持原有的位置不变,不作任何移动.

7)当疏散行人移动到安全出口内时,在下一时间步长内,行人将移出系统内.

8)当疏散房间内的所有疏散行人都移出系统后,房间内没有行人存在,仿真过程结束.

在并行更新机理的演化规则中,模型在每个时间步长内需要并行地把行人的移动规则应用到每一个人,并做相应的数据统计工作.

3. 仿真分析

在仿真研究中,疏散行人流的密度 K 定义为系统内的行人数量 N 与行人移动区间内的元胞数量 $W \times W$ 的比例;行人疏散时间 T 定义为系统内所有疏散行人离开房间时所需要的时间步.在仿真过程中,为减少仿真初始状态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.在仿真的初始时刻,所有疏散行人均匀地分布在房间内,安全出口内没有布置行人.当行人全部离开房间时,仿真过程终止.

3.1. 单个安全出口

本文仿真研究了在系统规模 $W = 10, 20, 30, 40$ 的情况下,单个安全出口在墙壁中间位置时,行人疏散时间随行人流密度 K 和安全出口宽度 L 的变化情况.图 5 显示了在不同系统规模、安全出口宽度 L

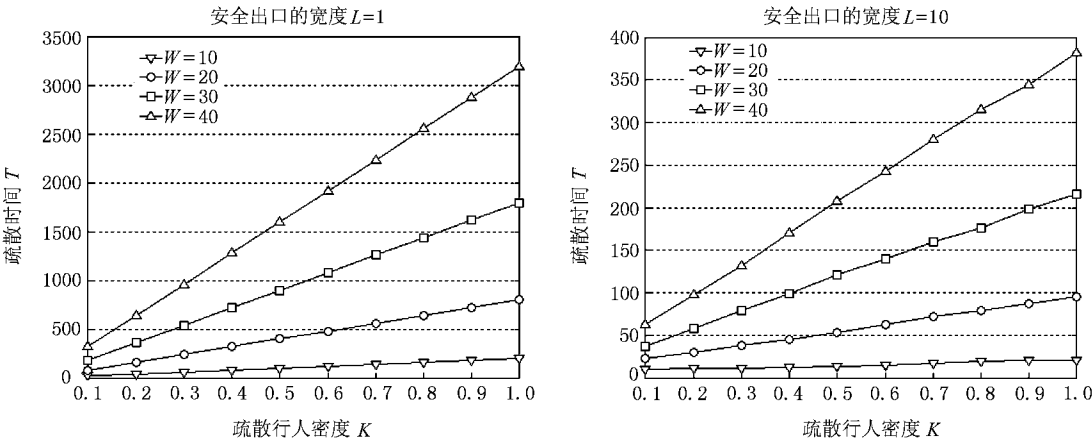


图 5 $L = 1$ 和 $L = 10$ 时不同系统规模的疏散时间随行人密度的变化曲线

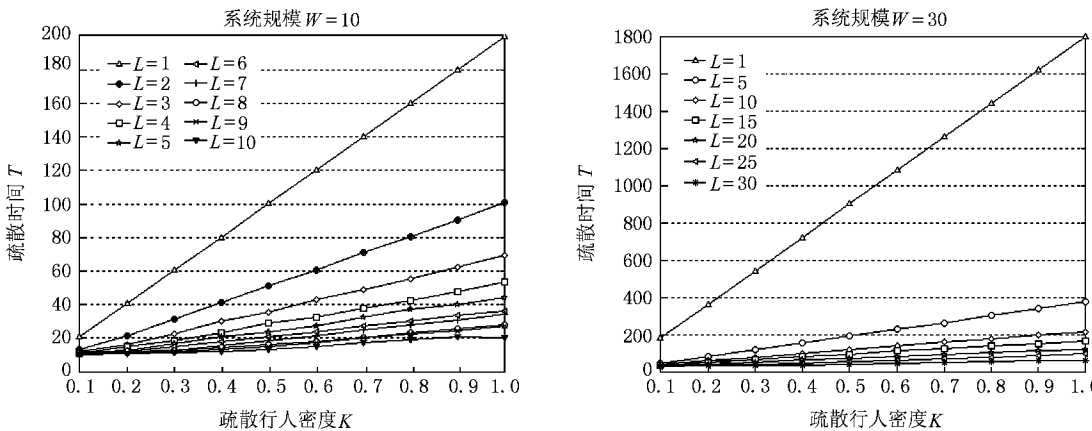


图 6 $W = 10$ 和 $W = 30$ 时不同安全出口宽度的疏散时间随行人密度的变化曲线

$= 1$ 和 $L = 10$ 的情况下行人疏散时间随行人初始密度的变化曲线;图 6 显示了在不同安全出口宽度、系统规模 $W = 10$ 和 $W = 30$ 的情况下行人疏散时间随

行人初始密度的变化曲线;图 7 显示了在不同系统规模、行人初始密度 $K = 0.1$ 和 $K = 0.5$ 的情况下行人疏散时间随安全出口宽度的变化曲线.

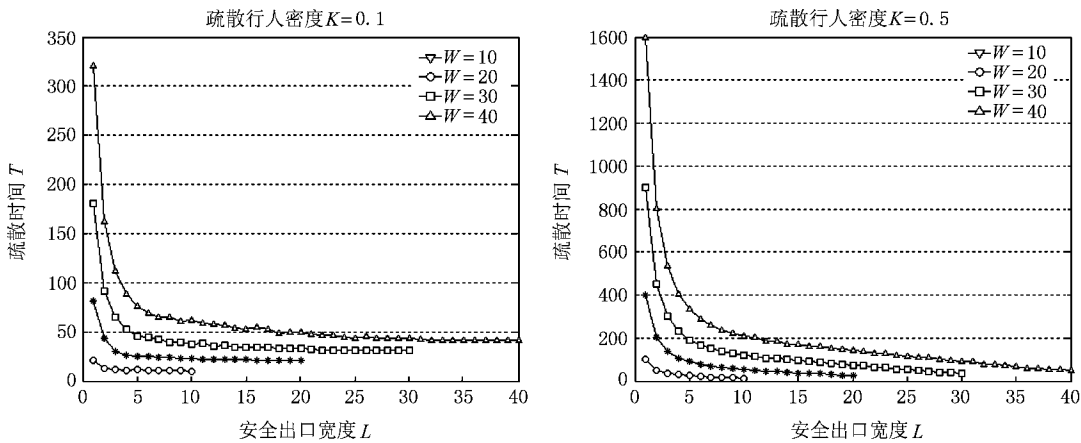


图 7 $K=0.1$ 和 $K=0.5$ 时不同系统规模的疏散时间随安全出口宽度的变化曲线

在固定安全出口宽度或系统规模的情况下,行人疏散时间随行人初始密度的增加呈线性增加趋势.在固定初始密度的情况下,系统规模越大或者安全出口宽度越窄,行人疏散所需的时间越长.在行人初始密度和系统规模不变的情况下,行人的疏散时

间随安全出口的增加而减少.行人疏散时间对安全出口宽度的变化曲线呈负指数型.

在只考虑方向参数和空格参数的动态参数行人疏散仿真研究中,模型仅考虑了疏散行人的移动特性和行人选择空位的特性,没有考虑行人之间摩擦

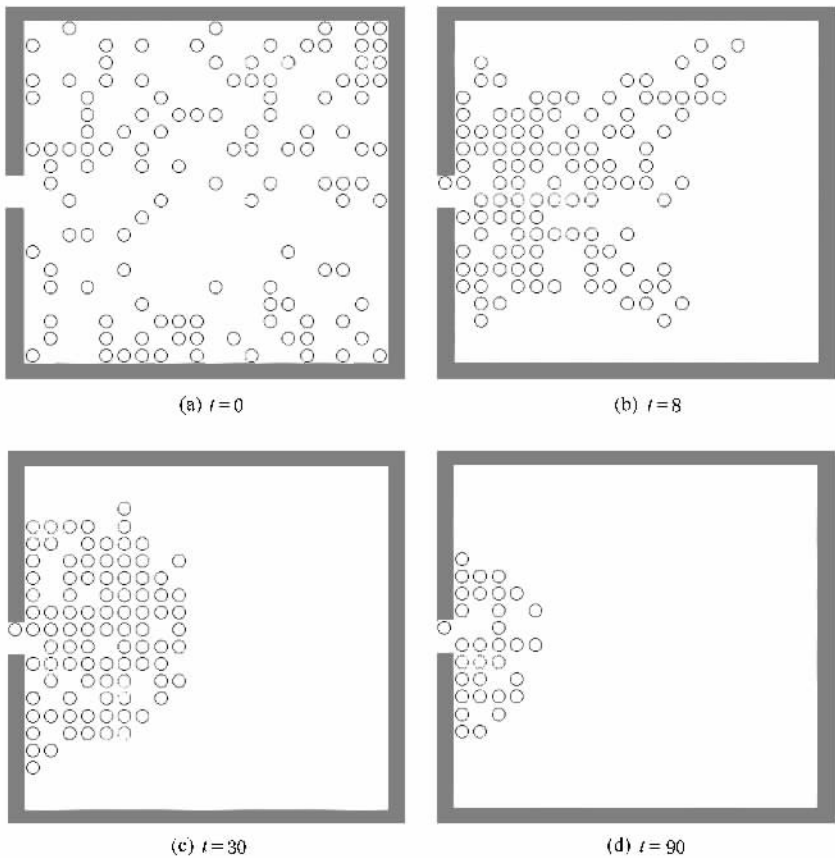


图 8 $W=20, L=2, N=1, K=0.3$ 时疏散行人演化过程

拥挤排斥等因素对行人疏散过程的影响. 因此, 模型的仿真数据仅能代表行人在正常情况下, 没有焦急情绪等心理因素影响的疏散情况. 在仿真开始后, 疏散行人会依次聚集到安全出口前等待离开, 同时由于模型没有考虑行人之间的相互拥挤摩擦等干扰因素对行人速度的影响, 行人的疏散时间在很大程度上决定于安全出口的宽度和疏散房间内行人的数量. 因此, 行人的疏散时间随行人密度呈线性变化. 在单安全出口的疏散房间内, 随着安全出口宽度的增加, 行人疏散时间的减少量由急剧下降趋势变得逐渐平缓, 这是由于随着安全出口宽度的增加, 安全出口用于行人疏散的利用率越来越低.

在行人疏散演化过程中, 能观察到在安全出口

前形成拱形的行人拥挤状态. 图 8 显示了系统规模 $W = 20$ 、单安全出口、出口宽度 $L = 2$ 、行人密度 $K = 0.3$ 的行人疏散演化过程.

3.2. 多个安全出口

本文仿真研究了多个安全出口在疏散房间墙上不同位置布局对行人疏散时间的影响. 模型仿真研究了系统规模 $W = 20$ 、安全出口个数 $N = 4$ 、安全出口的宽度 $L = 1$ 的情况下行人疏散时间随行人初始密度的变化情况. 在仿真研究中, 4 个安全出口分别按照不同的方式被分配到疏散空间的墙壁上, 共生成 8 种方案, 如图 9 所示.

在安全出口不同布置方案中, 行人的疏散时间

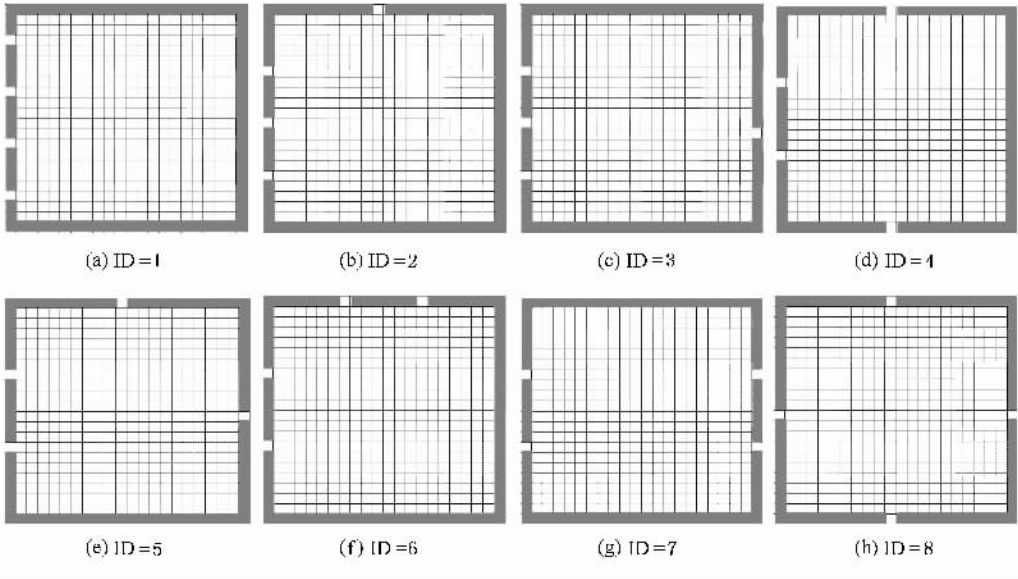


图 9 四个安全出口的布局示意图

随着行人初始密度的增加几乎呈线性增长. 然而, 由于元胞位置距安全出口最短距离的计算方法, 不同的安全出口布置方案会对行人的疏散时间造成一定的影响, 如图 10 所示.

在多个安全出口的疏散空间元胞位置距安全出口的最短距离计算中, 元胞位置距安全出口的最短距离值是在多个安全出口之间选取元胞位置距最近安全出口的距离值作为最短距离. 因此, 房间内的每个元胞位置都将会附属于距自己距离最近的安全出口, 如图 11(a) 和图 12(a) 所示. 行人的移动规则决定了某元胞位置内的行人必将会向自己附属的安全出口移动. 安全出口布局的平衡与否必将会造成疏散房间内元胞位置附属安排的均匀情况. 在行人的初始化时刻, 行人被均匀分布在疏散空间内. 因此, 向不同安全出口聚集的行人数量是不同的, 如图 11

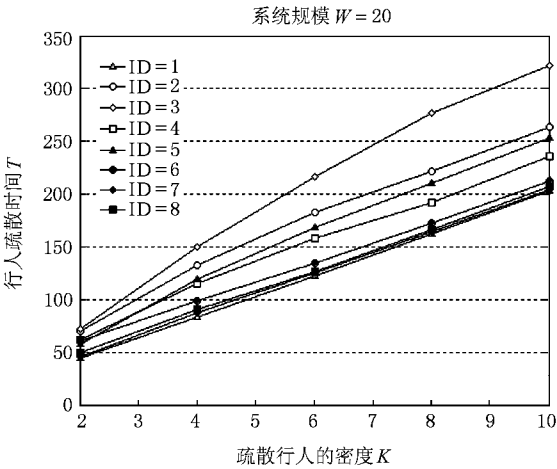


图 10 $W = 20$ 时不同安全出口布局的疏散时间随行人密度的变化曲线

(b)和图 12(b)所示,而行人的疏散时间是由最后一个行人离开疏散房间内的时刻决定的.所以,由于安全出口布置的不平衡性,造成了行人疏散时间的不同.

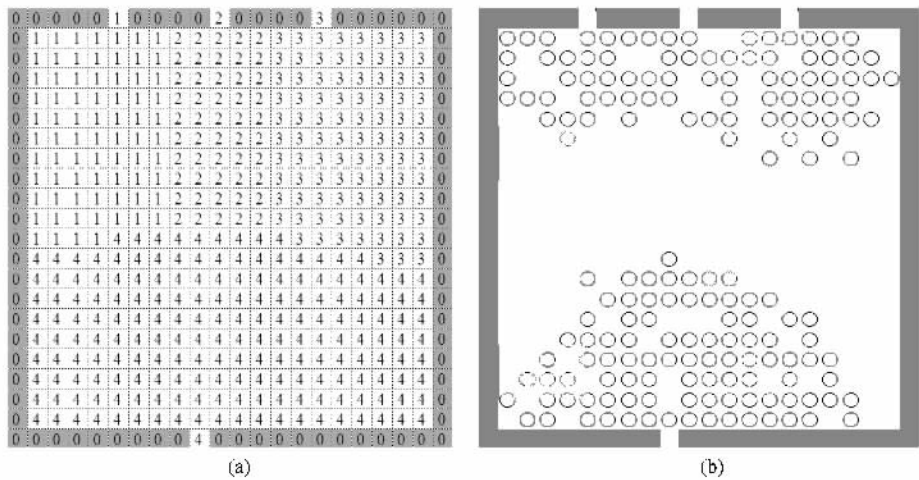


图 11 ID=3 的元胞位置隶属于安全出口情况及其安全出口前行人聚集情况

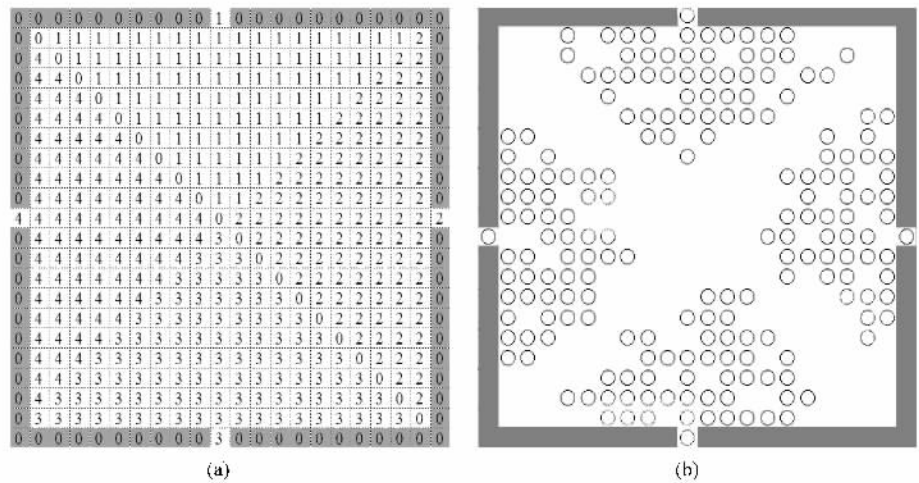


图 12 ID=8 的元胞位置隶属于安全出口情况及其安全出口前行人聚集情况

4. 结 论

本文利用基于元胞自动机的动态参数模型对正常疏散情况下的行人疏散流进行仿真研究.模型假设疏散空间内没有障碍物存在,行人视线也不受影响,行人可以根据自身周围的情况移动或等待.同

时,模型也没有考虑行人之间的摩擦拥挤排斥等因素对行人疏散过程的影响.研究表明,行人疏散时间随行人数量呈线性增加,随安全出口宽度呈负指数性减少,同时多个安全出口布局的不平衡也会对行人的疏散过程和疏散时间产生一定的影响.此外,在行人疏散演化过程中,能观察到在安全出口前形成拱形的行人拥挤状态.

- [1] Blue V J, Adler J L 2001 *Transp. Res. B* **35** 293
- [2] Blue V J, Adler J L 2001 *80th TRB Annual Meeting*.
- [3] Muramatsu M, Irie T, Nagatani T 1999 *Physica A* **267** 487
- [4] Tajima Y, Nagatani T 2001 *Physica A* **292** 545
- [5] Jiang R, Wu Q S 2006 *Physica A* **368** 239
- [6] Jiang R, Wu Q S 2007 *Physica A* **373** 683
- [7] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507
- [8] Kirchner A, Schadschneider A 2002 *Physica A* **312** 260
- [9] Fang W F, Yang L Z, Fan W C 2003 *Physica A* **321** 633
- [10] Li J, Yang L Z, Zhao D L 2005 *Physica A* **354** 619
- [11] Yue H, Hao H R, Chen X M, Shao C F 2007 *Physica A* **384** 567
- [12] 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]
- [13] Yamamoto K, Kokubo S, Nishinari K 2007 *Physica A* **379** 654
- [14] Song W G, Xu X, Wang B H, Ni S J 2006 *Physica A* **363** 492
- [15] Zhang J, Song W G, Xu X 2008 *Physica A* **387** 5457
- [16] Guo R Y, Huang H J 2008 *Physica A* **387** 580

Pedestrian evacuation flow simulation based on cellular automata^{*}

Yue Hao¹⁾ Shao Chun-Fu^{1)†} Yao Zhi-Sheng²⁾

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

2) (Beijing Municipal Institute of City Planning & Design, Beijing 100045, China)

(Received 11 November 2008; revised manuscript received 28 November 2008)

Abstract

Pedestrian facility planning and pedestrian flow management and control depend on the theory of pedestrian flow. Simulation of pedestrian evacuation flow is presented based on cellular automata (CA) in this paper. Two dynamic parameters are formulated to simplify tactically the decision-making process of pedestrians, which can reflect the pedestrian judgment on the surrounding conditions and decide the pedestrian's choice of action. The relationships of evacuation time against pedestrian density and exit width for different sizes of systems are studied. Moreover, the effect of exits arrangement on evacuation time is analyzed. It is observed that there is a linear relationship between evacuation time and pedestrian density, however, there is a negative exponential one between evacuation time and exit width. And exits arrangement affects pedestrian evacuation time.

Keywords: cellular automata, pedestrian evacuation flow, dynamic parameters, evacuation time

PACC: 0550, 0520, 6470

^{*} Project sponsored by the National Basic Research Program of China (Grant No.2006CB705500).

[†] Corresponding author. E-mail: cfshao@center.njtu.edu.cn