

成对行为对行人疏散动力学的影响研究^{*}

周金旺^{1)†} 邝 华^{1)‡} 刘慕仁^{1)‡} 孔令江¹⁾

1) 广西师范大学物理与电子工程学院 桂林 541004)

2) 上海大学上海市应用数学和力学研究所 上海 200072)

(2008 年 9 月 16 日收到, 2008 年 11 月 3 日收到修改稿)

熟悉的行人之间经常存在着聚集运动的整体跟随行为现象. 为了研究这种行为对疏散过程的影响, 考虑了行人的并排成对、前后成对、混合成对三种方式, 建立了一个新的元胞自动机模型, 研究了三种成对方式对双出口房间内行人疏散过程的影响, 并分析、讨论了不同参数下成对方式之间的差异.

关键词: 行人流, 元胞自动机, 成对疏散, 计算机模拟

PACC: 0550, 0520

1. 引 言

近年来, 行人安全疏散的问题引起了许多物理学家的关注^[1-18]. 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. 目前, 用来模拟行人流的模型主要有社会力模型^[1, 2]、格子气模型^[3-5]及元胞自动机模型^[6-15]等. Helbing 等提出社会力模型^[1], 研究了在恐慌情景下人群的逃生行为^[2], 发现了行人的自组织现象及在出口附近行人的“聚集”行为、“成拱”现象以及“快即是慢”效应. Tajima 和 Nagatani 应用偏向随机行走的格子气模型研究了不同建筑结构对人员疏散的影响, 如大厅^[3]、瓶颈通道^[4]和 T 形通道^[5]等, 并得到了不同条件下发生相变的临界阈值. Burstedde 等^[6]提出“地场”的概念建立了二维元胞自动机行人流模型, 模拟了房间内行人的疏散及双向行人流运动的过程, 发现了行人“成行”等典型现象. 杨立中等^[7]在基于“地场”的方法上, 引入了“位置危险度”的概念来确定行人运动规则, 再现了火灾发生时行人的逃生过程. 宋卫国等^[8]在考虑人与人之间相互作用的基础上, 引入了吸引力、排斥力和摩擦力, 构造出了一个新的元胞自动机模型, 模拟结果不但与实际行人疏散情况符合较好, 而且具有较高的运算

效率. 然而, 以上模型在研究行人疏散过程中, 没有考虑情侣、家人、朋友等亲密熟悉的人群之间存在着聚集运动的整体跟随行为现象. 为了研究这种行为对疏散过程的影响, 本文考虑了行人的并排成对、前后成对、混合成对(同时存在并排成对与前后成对)三种方式, 建立了一个新的自动机模型, 引入人员密度、混合成对比例、出口间距和出口宽度等参数, 对双出口房间内的行人疏散进行了数值模拟, 并分析、讨论了三种成对行走方式之间的差异, 其模拟结果对行人疏散具有一定的指导意义.

2. 行人流疏散模型

将房间内平面均匀地划分成大小相等的正方形网格, 每个网格相当于一个元胞. 网格或被行人占据或为空. 大小取 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ ^[6]. 每个格点对应一个位置危险度, 行人根据其邻域内格点的位置危险度来确定下一时刻的运动情况. 为了反映熟悉行人之间的跟随行为, 我们把成对的两个行人看作一个整体, 一起同时各自移动一格. 不考虑行人向后斜退行走, 行人面对着出口, 可以有六个运动方向. 图 1 给出了单个行人、并排成对行人、前后成对行人的运动示意图. 在混合成对中并排成对与前后成对行人在一定的条件下可以发生相互转化.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10562001, 10762005, 10765002)和广西研究生教育创新计划项目(批准号: 2008106020711M239)资助的课题.

[†] E-mail: jinw_zhou@163.com

[‡] 通讯联系人.

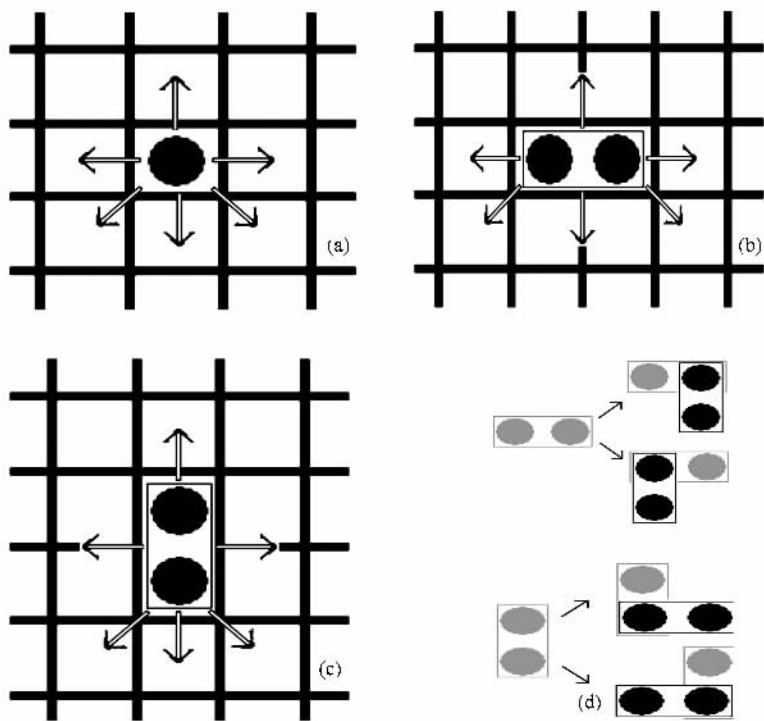


图1 各类行人运动示意图 (a)单个行人 (b)并排成对行人 (c)前后成对行人 (d)混合成对与并排成对与前后成对行人相互转化

每一时步取 0.4 s ,行人向前、后、左、右方向移动时速度为 1.0 m/s ,向左下方或右下方移动时速度为 $\sqrt{2}\text{ m/s}$.行人运动规则如下.

- 1)对系统中的所有行人进行随机编号 ,行人按照编好的顺序按以下规则依次进行位置更新 .
- 2)确定每个格点对应的位置危险度 $PD(i, j)$ 为

$$PD(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{(格点在出口处),} \\ C, & \text{(格点被行人占据),} \\ \min(\sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_j - y_1)^2}, \sqrt{(x_i - x_2)^2 + (y_j - y_2)^2}), & \text{(格点为空),} \end{cases}$$

其中 (i, j) 为格点位置 , C 为大于房间对角线长度的任意常数 . (x_i, y_j) 为格点坐标 (x_1, y_1) (x_2, y_2) 分别为房间两个出口中点坐标 .

中并排成对行人的左方或右方 ,前后成对行人的上方或下方以及顺(逆)时针旋转方向) ,此时该格点的位置危险度仍当作格点为空来计算 .

3)比较行人其邻域内格点的位置危险度 ,选择位置危险度最小的格点作为该行人下一时刻的运动目标格点 .成对行人则比较各方向上两个格点的位置危险度之和 ,在混合成对中 ,同时还要比较成对行人顺(逆)时针旋转 90° 的方向上两格点的位置危险度之和 ,当顺(逆)时针旋转方向的两个格点的位置危险度之和最小时 .并排成对(前后成对)行人将变成前后成对(并排成对)行人 ,见图 1(d) .值得注意的是 ,与单个行人不同 ,由于在某些方向上的两个格点已被成对行人本身占据了其中一个(例如图 1

4)到达出口处的行人将自动从系统中除去 .对于前后成对的两个行人 ,当其中一行人离开房间时 ,另一行人在房间出口附近变成单个行人 .

3. 计算机模拟与数值分析

在模拟中 ,设房间长度(格子数) $L = 50$,宽度(格子数) $W = 40$.房间两个出口以长边中线左右对称分布 ,其出口间距(格子数) $f = 20$,出口宽度(格子数) $D = 4$.本文重点研究了在不同的人员密度、

成对比例、出口宽度和出口间距下,系统中人员数目与平均速度随疏散时间的变化关系.系统的平均速度计算公式为 $v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(t)$, N 表示 t 时刻系统中行人的总数目.初始时刻 1000 人随机地分布在房间内,行人成对比例为 30%,其中混合成对时并排成对行人与前后成对行人各占 50%.为了消除初始位形的随机性对结果的影响,取 30 个样本作系综平均.数值模拟结果如图 2—10 所示.

图 2 给出了行人单个疏散与成对疏散过程中,房间内行人数目随时间的变化关系.为简便起见,在本文图中行人单个疏散、并排成对疏散、前后成对疏散和混合成对疏散分别用 single, paired A, paired B, paired C 表示.图 2(a)是行人总数目随时间的变化关系;图 2(b)为成对行人数目随时间的变化关系.图 3 是系统平均速度随时间的变化关系.

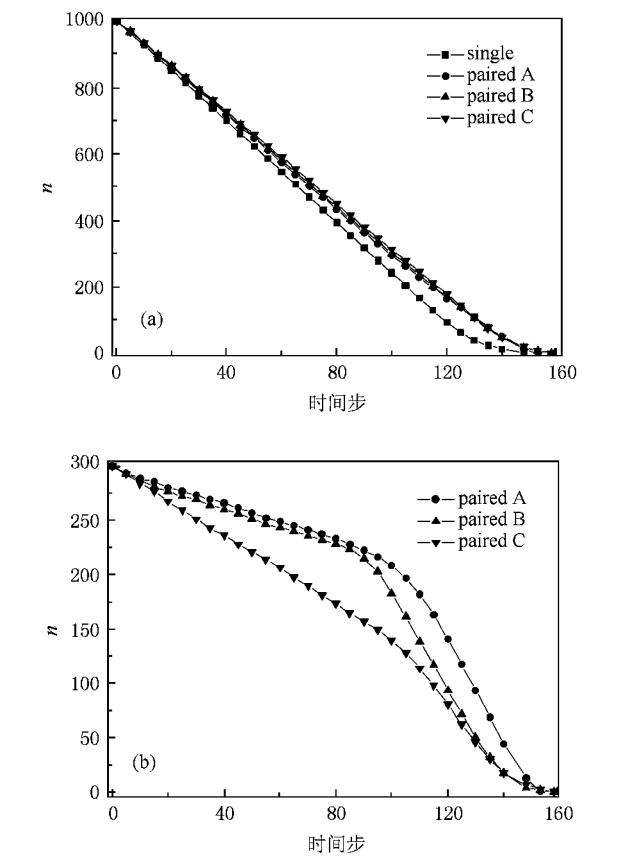


图 2 1000 人,成对比例 30%,房间内行人数目随时间的变化关系 (a)行人总数目随时间的变化关系 (b)成对行人数目随时间的变化关系

从图 2(a)可知,行人单个疏散明显要比行人成对疏散快,这是因为在紧急疏散过程中,单个行人要比成对行人更能灵活地选择并移动到目标格点,尤

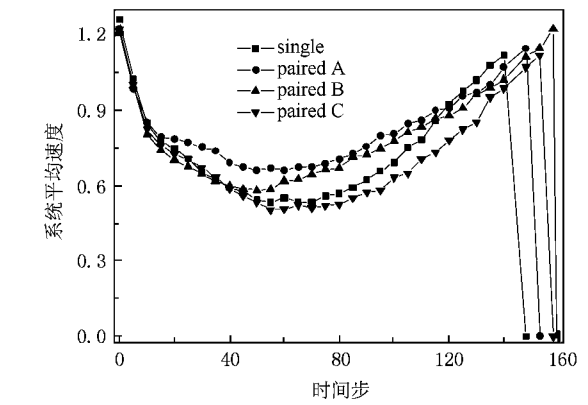


图 3 1000 人,成对比例 30%,系统平均速度随时间的变化关系

其是人员密度较大时,行人之间的相互作用较大,成对的两个行人不容易同时移动到目标格点,从而降低了疏散效率,增长了疏散时间.因此,从安全的角度考虑,当行人逃生时,即使是亲密熟悉的人群之间,成对疏散行走也应该解散为单个行人疏散行走.由图 2(b)可见,在三种成对疏散中,同一时刻,房间内混合成对行人数目总是最少,这是因为混合成对的行人可以根据其邻域内格点的位置危险度来合理调整其成对的状态,例如并排成对或前后成对,这使混合成对行人在疏散过程中能更加灵活地选择目标格点,因此比行人单纯的并排成对和前后成对疏散更快.另一方面,前后成对中的成对行人比并排成对中的成对行人更容易离开房间,在疏散的后阶段更是如此.这是因为前后成对疏散类似于具有跟随效应的前后两个单个行人的疏散,因此,在疏散过程中,虽然行人聚集在出口附近,人员密度迅速增大,但是前后成对行人会比并排成对行人更容易逃离出房间.

为了比较不同疏散方式下平均速度随时间的变化差异,图 3 给出了系统平均速度随时间的变化关系.从图 3 可知,单个行人疏散时间最少,但是平均速度并非一直最大,而成对的行人疏散时间最长,但是平均速度却较大.这是因为行人单个疏散不需要较多的侧向运动,就能较轻易地逃离出房间,而侧向运动的速度为 $\sqrt{2}$ m/s,比前、后、左、右方向移动时的速度 1.0 m/s 大,所以单个行人疏散的统计平均速度就小.然而成对的行人疏散具有较多的侧向运动,因此平均速度较大,这也从侧面再现了行人疏散过程中的“快即是慢”现象,这与文献[29]结果相一致.另一方面,混合成对的行人由于能够灵活地调整成对的状态,疏散过程中平均速度与行人单个疏散

的平均速度较接近,通过数值模拟发现,单个疏散与混合成对疏散在初始阶段,系统的平均速度几乎相同,行人迅速向出口处移动,并开始聚集在出口附近,单个疏散与混合成对疏散中的行人减少较快,随着人数逐渐减少,单个疏散平均速度又逐渐增大,而混合成对疏散则由于成对行人之间相互阻碍作用增大,所以平均速度增大较缓慢.其次,在并排成对与前后成对疏散过程中,行人由于彼此的相互阻碍不能直接快速地向出口方向运动,虽然行人运动频繁,但行人更多的是上下或左右徘徊,正是这种“无效”的运动导致了并排成对疏散与前后成对疏散的平均速度一直保持较大值.图 4 为混合成对疏散过程中的两个典型演化斑图,其中黑色实心圆表示并排成对行人,灰色实心圆表示前后成对行人,白色空心圆表示单个行人.从图 4 可以明显地看到人群聚集在出口,出口处的堵塞非常严重,大部分行人无法运动,从而导致人群在出口处形成一个拱形分布,对应着堵塞现象的加剧,这与行人疏散的真实结果相一致^[29].

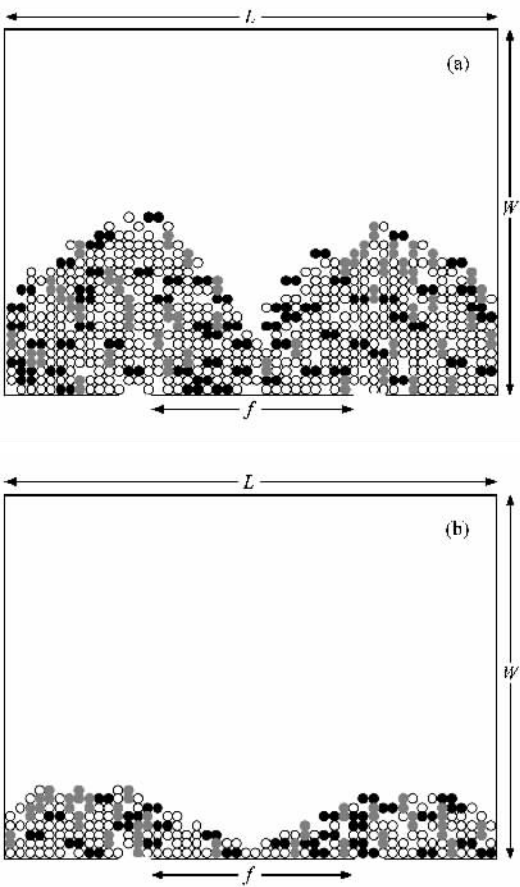


图 4 1000 人,成对比例 30%,混合成对行人疏散的两个典型状态斑图 (a) $t = 50$; (b) $t = 110$

为了研究人员密度对成对疏散过程的影响,分别取密度为 0.2(400 人),0.5(1000 人)和 0.8(1600 人)进行比较,得到了三种人员密度下不同疏散方式的平均疏散时间图(如图 5 所示).数值模拟结果表明,在不同密度下,平均疏散时间随不同疏散方式的变化趋势基本相同,在相同密度下,三种成对疏散方式所需的平均疏散时间差别较小,然而,当人员密度较低,为 0.2 时,单个疏散比成对疏散平均少 8 个时步;当人员密度较高,为 0.8 时,单个疏散比成对疏散平均少 22 个时步.这是因为在人员密度较低时,系统中大多数行人处于自由运动相,单个行人与成对的行人都能较快地向出口运动,因此不同疏散方式差别不明显.而人员密度较大时,行人彼此之间的相互阻碍较大,行人不能较快地运动,尤其是成对的行人,对疏散的阻碍更大,因而成对疏散与单个疏散之间的差异也增大.由图 5 可知,随着人员密度增大,行人单个疏散与成对疏散平均所需时间差别增大,而三种成对疏散方式的平均疏散时间差异不大.

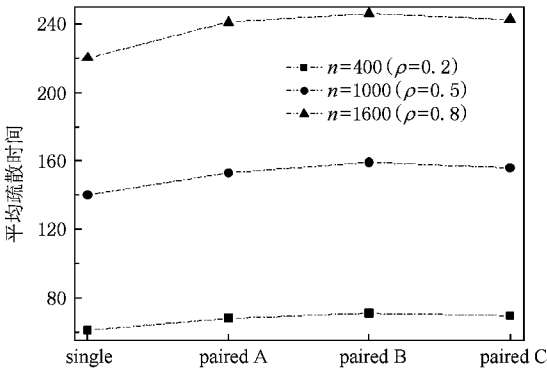


图 5 成对比例 30%,人员密度分别为 0.2,0.5,0.8,各疏散方式下的平均疏散时间

为了研究成对比例对成对疏散的影响,数值模拟了成对比例为 10%、20%、30%、50% 时,单个疏散与成对平均疏散时间的对比图(见图 6).由图 6 可知,单个行人疏散的时间最短,在疏散方式相同的情况下,疏散时间随着成对比例的增大而增大.由于成对比例增大,成对行人增多,对整个疏散过程的阻碍也越大.这反映了行人成对行走的聚集效应会严重影响其他行人的疏散,降低了疏散效率,增加了疏散时间,从而导致了行人的潜在危险加强.因此,在行人疏散过程中,成对行走的行人应该分开行走,从而达到减少与其他行人相互阻碍的效果,便于缩短疏散时间.图 7 是不同成对比例下,混合成对疏散与行人单个疏散房间内行人数目在疏散后阶段随时间的

变化关系.从图 7 也可以清楚地看到,在同一时刻,成对比例越大,房间内剩下的行人就越多,所需疏散时间也就越长,这对整个疏散过程是不利的.这进一步表明成对行为对行人的疏散起着严重的阻碍作用.

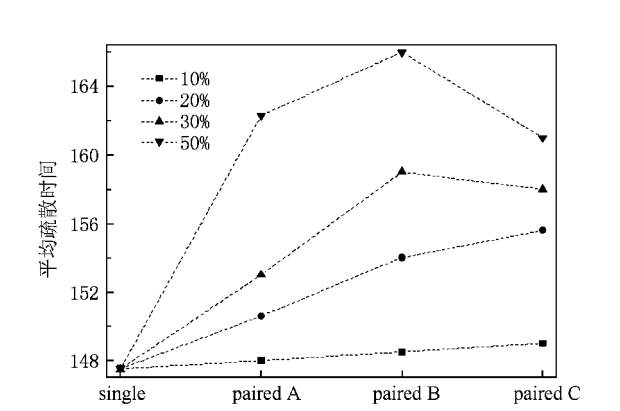


图 6 1000 人,成对比例分别为 10% 20% 30% 50%,各疏散方式下的平均疏散时间

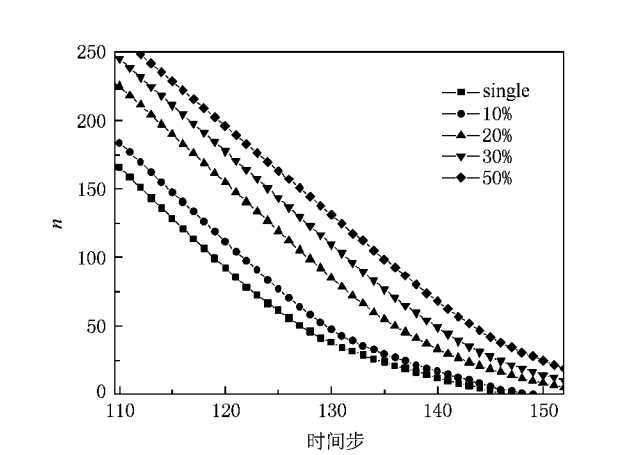


图 7 1000 人,成对比例分别为 10% 20% 30% 50%,行人数目在疏散后阶段随时间的变化关系

图 8 为不同疏散方式下,平均疏散时间与出口宽度 D 的变化关系图.由图 8 可知,行人单个疏散所需时间总是最少,且平均疏散时间随出口宽度的增大而减小,但减小幅度却越来越缓慢,当 $D > 6$ 时,增大出口宽度对疏散时间几乎没有什么影响.当 $D < 7$ 时,三种成对疏散方式的平均疏散时间相差不大,且在 $D = 4, 5, 6$ 时,并排疏散所需时间较少,而当 $D > 6$ 时,并排成对明显要比混合成对和前后成对疏散时间更长.其次,当出口宽度较小或较大时,三种成对疏散方式中的前后成对疏散所用时间最短.这是因为当出口宽度较小时,行人在出口附近

堵塞加重,前后成对的行人较容易离开房间,而当出口宽度较大时,行人都能较快地逃离出口,但是并排成对疏散和混合成对疏散由于更容易受到其他行人的阻碍,所以总疏散时间也更长.

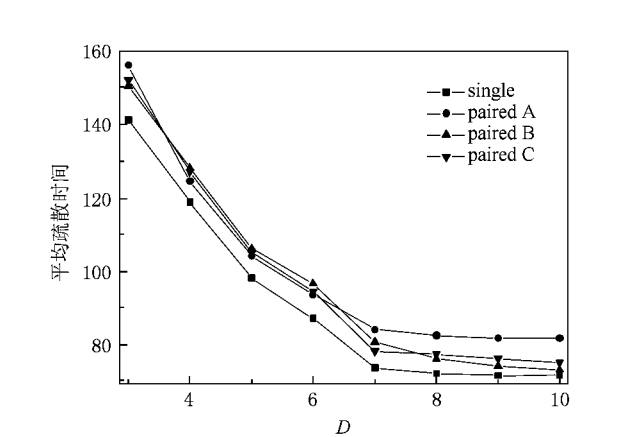


图 8 800 人,成对比例 30%,平均疏散时间与出口宽度之间的变化关系

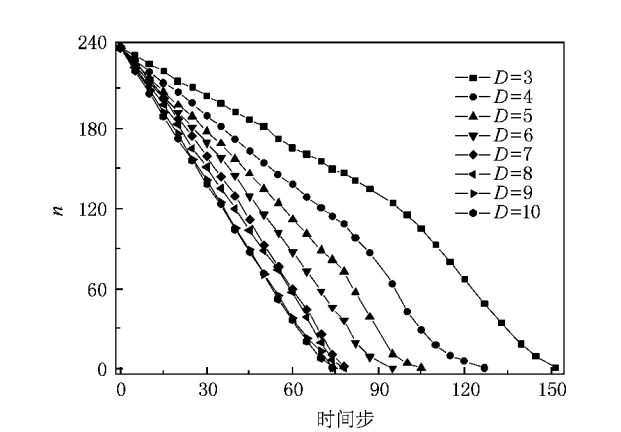


图 9 800 人,成对比例 30%,不同出口宽度下,混合成对疏散中成对行人数目随时间的变化关系

为了进一步研究不同的出口宽度对混合成对疏散的影响,图 9 给出了不同出口宽度下,混合成对疏散中房间内成对行人数目随时间的变化关系.由图 9 可知,随着出口宽度的增大,成对行人平均疏散时间迅速减小,当 $D > 6$ 时,成对行人呈线性急剧减少,此时再增大出口宽度将对成对行人的疏散影响不大.

为了探讨两个出口间距 f 对行人疏散过程的影响,图 10 给出了不同疏散方式下,平均疏散时间随 f 的变化关系.从图 10 可知,随着 f 的增大,各疏散方式的平均疏散时间都先减小,然后逐渐增大,呈

“U”形变化趋势.这说明双出口的间距要适中,其过小或过大都会降低整个行人的疏散效率.特别当 $f = 0$ 时,双出口相当于一个单出口,其宽度变为原来双出口中每一个出口宽度的 2 倍,此时,在相同的疏散方式下,其疏散时间最长.同理可推测,如果房间只有一个出口,其出口宽度等于双出口中每一个出口宽度时,疏散时间将更长.由此可见,将房间设计成单出口不利于行人的疏散.

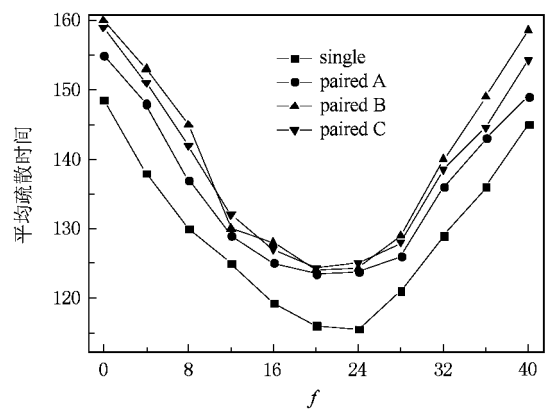


图 10 800 人,成对比例 30%,平均疏散时间与出口间距之间的变化关系

4. 结 论

为了反映情侣、家人、朋友等熟悉亲密的人群在疏散过程中存在的整体跟随行走的真实情况,本文研究了并排成对、前后成对与混合成对这三种成对方式对行人疏散动力学的影响,并分析讨论了在不同参数下三种成对疏散之间的差别.计算机模拟表明,新模型不仅可以较好地描述行人疏散中的典型现象,如拥挤、堵塞、人群的拱形结构、快即是慢现象等,而且还揭示了行人单个疏散总要比成对疏散快,行人成对行为总要对疏散起阻碍作用的特征.这对认识行人疏散行为有所帮助.三种成对疏散过程中,混合成对中的成对行人最易于疏散,前后成对的行人比并排成对的行人疏散得快,而并排成对疏散最不利于成对行人安全逃离房间.随着人员密度和成对比例的增大,成对行为对疏散的阻碍也越大.计算结果还发现,将房间设计成单出口会降低行人的疏散效率,而对于双出口的房间,两出口间距太小或太大也都不利于行人的疏散.总而言之,就整个疏散过程而言,成对疏散的行人应该分开为单个行人的疏散,这样可提高疏散效率,降低行人的危险程度,该结论对行人疏散具有一定的指导意义.

[1] Helbing D , Molnar P 1995 *Phys. Rev. E* **51** 4282

[2] Helbing D , Farkas I , Vicsek T 2000 *Nature* **407** 487

[3] Tajima Y , Nagatani T 2001 *Physica A* **292** 545

[4] Tajima Y , Takimoto K , Nagatani T 2001 *Physica A* **294** 257

[5] Tajima Y , Nagatani T 2002 *Physica A* **303** 239

[6] Burstedde C , Klauck K , Schadschneide A *et al* 2001 *Physica A* **295** 507

[7] Yang L Z , Fang W F , Huang R *et al* 2002 *Chin. Sci. Bull.* **47** 896 (in Chinese) [杨立中、方伟峰、黄锐等 2002 科学通报 **47** 896]

[8] Song W G , Yu Y F , Fan W C *et al* 2005 *Sci. China. Ser. E* **35** 725 (in Chinese) [宋卫国、于彦飞、范维澄等 2005 中国科学 E 辑 **35** 725]

[9] Song W G , Xu X , Wang B H *et al* 2006 *Physica A* **363** 492

[10] Guo R Y , Huang H J 2008 *Physica A* **387** 580

[11] Qiu B , Tan H L , Kong L J *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 990

[12] Song W G , Yu Y F , Wang B H *et al* 2006 *Physica A* **371** 658

[13] Zhao D L , Yang L Z , Li J 2008 *Physica A* **387** 3708

[14] Varas A , Cornejo M D , Mainemer D *et al* 2007 *Physica A* **382** 631

[15] Chen R H , Qiu B , Zhang C Y *et al* 2007 *Int. J. Mod. Phys. C* **18** 359

[16] Zhao D L , Li J , Zhu Y *et al* 2008 *Building and Environment* **43** 518

[17] Ito S , Nagatani T , Saegusa T 2007 *Physica A* **373** 672

[18] Fukamachi M , Nagatani T 2007 *Physica A* **377** 269



Paired behavior effect on pedestrian evacuation dynamics^{*}

Zhou Jin-Wang^{1)†} Kuang Hua^{1)‡} Liu Mu-Ren^{1)‡} Kong Ling-Jiang¹⁾

1) *College of Physics and Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China*

2) *Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University Shanghai 200072, China*

(Received 16 September 2008 ; revised manuscript received 3 November 2008)

Abstract

Gathered movement follow with the group is a common behavior among familiar pedestrians. In order to study such behavior acts on the impact of the evacuation process , we proposed a new cellular automaton evacuation model which taking into account side-by-side in paired , front-behind in paired , and mixed paired , studied the influence of evacuation among the three paired pattern and compared each other under different parameters .

Keywords : pedestrian flow , cellular automaton , paired evacuation , computer simulation

PACC : 0550 , 0520

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10562001 ,10762005 ,10765002) ,Innovation Project of Guangxi Graduate Education(Grant Nos. 200810602711M239).

[†] E-mail :jinw_zhou@163.com

[‡] Corresponding author.