

# 一种改进元胞自动机的人员疏散模型

张鑫龙<sup>1</sup> 陈秀万<sup>1</sup> 李怀瑜<sup>1</sup> 李飞<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北京大学地球与空间科学学院,北京,100871

**摘要:**为使人员疏散离散模型更好描述行人微观特性,提出一种改进元胞自动机的人员疏散模型。在传统模型基础上,将空间划分为更细小网格,令单个行人占据多个网格以便展现行人间微观行为。引入社会力模型中自身驱动力、排斥力、摩擦力的运算规则改进模型,以模拟行人间碰撞现象。通过建立行人出口选择机制并改进移动规则,真实模拟行人动态出口选择过程。疏散过程中考虑了速度因素,能更加具体展现行人不同的移动方式。模拟结果显示,改进的模型能够真实地反映人员疏散的具体过程。

**关键词:**元胞自动机;人员疏散模型;社会力模型;模拟仿真

**中图法分类号:**P208

**文献标志码:**A

近年来,公共区域突发事件不断发生,如“上海外滩踩踏事件”、“巴黎爆炸事件”等,公共区域人员疏散问题已经引起社会广泛关注。人员疏散模型是研究人员疏散的重要手段,如何更加准确模拟疏散过程是当前研究的关键。

目前常见的人员疏散模型包括连续模型和离散模型两种<sup>[1]</sup>。连续模型主要考虑行人微观特性,注重具有自治行为方式的虚拟行人建模,强调心理因素和外界环境对运动行为的影响,进而能够模拟疏散人员个体行为。但连续模型通常较为复杂,运算量较大,尤其在复杂环境下计算效率较低。常见的连续模型包括社会力模型<sup>[2-4]</sup>、流体动力学模型<sup>[5]</sup>等。离散模型将疏散区域离散化,并根据一定疏散规则来模拟人员疏散情况,计算简单且运行速度较快,但难以捕捉个体行为<sup>[6]</sup>,其典型模型代表是元胞自动机(cellular automaton, CA)模型<sup>[7]</sup>、格子气模型<sup>[8]</sup>等。

为使离散模型更好地模拟行人微观特征与应急疏散的真实情景,一些学者通过量化分析行人间的作用力或建立基于行人速度的移动方法来改进现有离散模型。Song等<sup>[9-10]</sup>将社会力模型中力的概念引入到元胞自动机模型和格子气模型中,建立了一种基于行人间、行人与障碍物间相互作用力的规则。Chen等<sup>[11]</sup>提出一种用于结合社会力与离散模型优点的元胞自动机模型,该模型可以更精确地模拟疏散过程。Jiang等<sup>[12]</sup>模拟了

当行人移动速度大于1 m/s时的疏散情景。Ansgar等<sup>[13]</sup>讨论了模型中不同行人最大运动速度在疏散过程中对行人密度分布以及人群形状的影响。尽管上述研究<sup>[9-13]</sup>量化了行人间、行人与障碍物间的摩擦力与排斥力,但是模型中行人间产生摩擦力时行人并未真正接触,而且没有给出作用力大小和行人移动距离之间的关系,行人受到的作用力大小仅与移动方向有关,与移动距离无关。同时疏散模型<sup>[8-15]</sup>虽讨论了速度因素对疏散结果的影响,但是每一时刻的速度并不是通过社会力模型计算得出,只是作为定值或随机变量。而在实际疏散过程中,行人的速度与行人所处状况有关,且在不断变化。

为更好地解决上述问题,本文在引入行人社会力模型的基础上对元胞自动机进行修改,提出一种改进的元胞自动机模型。同时,该模型改进了基于速度的移动规则并引入出口选择机制。根据模拟结果,发现该模型不但具有离散模型的特点,同时具备连续模型更真实模拟个体行为的优点。

## 1 人员疏散模型传统思路

### 1.1 元胞自动机

元胞自动机模型能够实现时间、空间维度的离散化,并可在任意时刻为各元胞设定有限集范围内的具体状态<sup>[16]</sup>。元胞自动机模型主要由元

胞状态集、邻居和局部规则组成,所有元胞状态同步更新,其更新规则为,第  $i$  个元胞在  $t+1$  时刻的状态由其自身及邻居在  $t$  时刻的状态共同决定<sup>[17]</sup>。元胞自动机模型应用很广,例如林火蔓延<sup>[18]</sup>、城镇扩张<sup>[19]</sup>、洪水演进<sup>[20]</sup>、人员疏散<sup>[21]</sup> 模拟等。

在基于元胞自动机的人员疏散模型中,公共区域划分为正方形网格,类似于 GIS 数据中的栅格数据。格点是网格的基本单位,每个格点只能容纳一个行人,并且只有“有人”和“无人”两种状态。行人每次只能向相邻格点移动一格,若多个行人同时移动至同一格点,根据选择机制只允许一个行人可以移动至该位置<sup>[15]</sup>。行人最终根据移动规则到达疏散出口,完成疏散过程。

### 1.2 社会力模型

社会力模型是目前较为公认的行人动力学模型。该模型在分子动理论的基础上,提出支配行人运动的“社会力”概念<sup>[22]</sup>。社会力模型的核心思想就是通过与牛顿机械学相似的受力分析建立行人基本行为趋向性的模型。社会力模型认为有自驱动力、人与人之间作用力、人与边界(墙壁)之间作用力三种力作用于行人。在这些力的共同作用下,行人如同一个受力物体,会产生一个加速度,朝着目标方向移动,最终达到目的地。社会力模型可表示为:

$$\mathbf{F}_\alpha(t) = m_\alpha \mathbf{a}_\alpha(t) = \mathbf{F}_\alpha^0(t) + \sum_\beta \mathbf{F}_{\alpha\beta}(t) + \sum_B \mathbf{F}_{\alpha B}(t) \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{F}_\alpha(t)$  与  $\mathbf{a}_\alpha(t)$  分别是行人  $\alpha$  在  $t$  时刻受到的合力与加速度;  $m_\alpha$  是行人质量;  $\mathbf{F}_\alpha^0(t)$  是行人  $\alpha$  自身驱动力;  $\mathbf{F}_{\alpha\beta}(t)$  与  $\mathbf{F}_{\alpha B}(t)$  是行人  $\alpha$  受到行人和墙壁的阻力。

自身驱动力表征行人内在驱动机制,使行人向目标移动,可表示为:

$$\mathbf{F}_\alpha^0(t) = m_\alpha \frac{v_\alpha^0 \mathbf{e}_\alpha - \mathbf{v}_\alpha(t)}{\tau_\alpha} \quad (2)$$

式中,  $v_\alpha^0$  为行人  $\alpha$  期望运动速率;  $\mathbf{e}_\alpha$  为期望方向,即指向出口方向的单位向量;  $\mathbf{v}_\alpha(t)$  为  $t$  时刻实际运动速度;  $\tau_\alpha$  为疏散情况下的松弛时间。

$t$  时刻行人与行人间的作用力  $\mathbf{F}_{\alpha\beta}(t)$  包括社会心理力  $\mathbf{F}_{\alpha\beta}^{\text{soc}}$  和身体接触力  $\mathbf{F}_{\alpha\beta}^{\text{ph}}$ 。具体可由式(3)~(5)表示:

$$\mathbf{F}_{\alpha\beta}(t) = \mathbf{F}_{\alpha\beta}^{\text{soc}}(t) + \mathbf{F}_{\alpha\beta}^{\text{ph}}(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_{\alpha\beta}^{\text{soc}}(t) = A_\alpha \exp\left(\frac{D_{\alpha\beta}}{B_\alpha}\right) \left\{ \gamma + (1-\gamma) \cdot \left[ \frac{1 + \cos(\varphi_{\alpha\beta})}{2} \right] \right\} \mathbf{n}_{\alpha\beta} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{\alpha\beta}^{\text{ph}}(t) = \begin{cases} K D_{\alpha\beta} \mathbf{n}_{\alpha\beta} + k D_{\alpha\beta} \Delta v_{\alpha\beta}' \mathbf{t}_{\alpha\beta}, & D_{\alpha\beta} \geq 0 \\ 0, & D_{\alpha\beta} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $D_{\alpha\beta} = r_{\alpha\beta} - d_{\alpha\beta}$ ,  $d_{\alpha\beta}$  是两个行人中心间的距离,  $r_{\alpha\beta}$  是行人  $\alpha$  与行人  $\beta$  半径之和;  $\mathbf{n}_{\alpha\beta}$  是  $\beta$  指向  $\alpha$  的单位矢量;  $A_\alpha$  为行人间作用力强度;  $B_\alpha$  为行人间作用力范围;  $\gamma$  表示行人运动过程中周围行人社会心理力在各个方向上的互异性,当  $\beta$  在行人  $\alpha$  运动方向前方时,  $\varphi_{\alpha\beta} = 0$ ;  $\beta$  在后方时,  $\varphi_{\alpha\beta} = \pi$ ;  $\mathbf{F}_{\alpha\beta}^{\text{soc}}$  随行人间距离的减小而增大,但不会超过一个最大值<sup>[23]</sup>。  $\mathbf{t}_{\alpha\beta}$  是两行人中心连线切线方向的单位矢量,与  $\alpha$  运动方向相反;  $\Delta v_{\alpha\beta}' = (\mathbf{v}_\alpha(t) - \mathbf{v}_\beta(t)) \cdot \mathbf{t}_{\alpha\beta}$ , 表示两行人在  $\mathbf{t}_{\alpha\beta}$  方向上的速率差值;  $K$  表示人体弹性系数;  $k$  为滑动摩擦力系数;  $\mathbf{F}_{\alpha\beta}^{\text{ph}}$  仅在行人有碰撞时产生。

$t$  时刻行人与墙壁的作用力  $\mathbf{F}_{\alpha B}(t)$  也包括社会心理力  $\mathbf{F}_{\alpha B}^{\text{soc}}$  与身体接触力  $\mathbf{F}_{\alpha B}^{\text{ph}}$ , 具体可由式(6)~(8)表示:

$$\mathbf{F}_{\alpha B}(t) = \mathbf{F}_{\alpha B}^{\text{soc}}(t) + \mathbf{F}_{\alpha B}^{\text{ph}}(t) \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{\alpha B}^{\text{soc}}(t) = A_w \exp\left(\frac{D_{\alpha B}}{B_w}\right) \mathbf{n}_{\alpha B} \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_{\alpha B}^{\text{ph}}(t) = \begin{cases} K D_{\alpha B} \mathbf{n}_{\alpha B} + k D_{\alpha B} \Delta v_{\alpha B}' \mathbf{t}_{\alpha B}, & D_{\alpha B} \geq 0 \\ 0, & D_{\alpha B} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $D_{\alpha B} = r_\alpha - d_{\alpha B}$ ,  $d_{\alpha B}$  是行人中心与最近墙壁间距离,  $r_\alpha$  是行人半径;  $\mathbf{n}_{\alpha B}$  是墙壁指向行人  $\alpha$  的单位矢量;  $A_w$  为墙壁对行人作用力强度;  $B_w$  为墙壁对行人作用力范围;  $\mathbf{t}_{\alpha B}$  是行人与墙壁连线的切线方向的单位矢量,方向与  $\alpha$  运动方向相反;  $\Delta v_{\alpha B}' = \mathbf{v}_\alpha(t) \cdot \Delta \mathbf{t}_{\alpha B}$ , 表示行人在切线方向的速率值。

## 2 考虑社会力的元胞自动机模型的建立

为了更精确地描述疏散细节,本文在传统元胞自动机模型基础上,引入社会力模型,同时加入出口选择机制,更新行人移动规则,提出一种改进的元胞自动机人员疏散模型。

### 2.1 改进的元胞自动机模型

在经典元胞自动机模型中,每个格点仅能容纳一个行人,难以描述社会力模型中行人间相互关系(如碰撞、摩擦等),同时元胞自动机模型中行人在单位时间  $\Delta t$  内只向邻近方向移动一格,难以根据速度描述行人不同的移动方式。为描述上述个体行为,对经典元胞自动机人员疏散模型作如下改进。

1) 公共区域划分为更小网格,即每个格点均

小于行人所占据实际空间。为方便计算,规定每个行人占据  $2 \times 2$  个格点,格点边长与行人半径相等,行人中心为 4 个格点中心。一般情况下,邻近行人在社会力合力作用下会保持一定距离,但在出口附近会出现多个行人严重挤压碰撞现象。为了模拟真实场景,规定每个格点最多可被两个行人同时占据,且两个行人最多相交一个格点。当两行人占据的格点相交时,即两行人发生碰撞与摩擦,行人与墙壁发生碰撞时有两个格点相交。

2) 根据社会力模型,同一时刻不同速率的行人移动距离不同。因此在单位时间  $\Delta t$  内,规定不同速率的行人移动格点数不相同,即单位时间内速率较大的行人可向目标方向移动不止 1 个格点。

根据上述两点改进,可量化社会力模型中自身驱动力、行人与行人间作用力、行人与墙壁间作用力的运算规则。在改进的模型中,根据行人当前速度与朝向出口的期望速度可计算出行人自驱动力;根据行人间和行人与墙壁格点距离以及行人速度朝向可以计算出心理排斥力;当行人发生碰撞时,可根据格点距离和相对速度计算出行人受到的身体接触力。根据社会力模型运算规则,在改进模型中计算得出行人受到各个力的矢量值,通过力的合成方式求出合力,并求出行人受到的矢量加速度,计算出行人下一时刻速度的大小和方向,从而判断行人移动的目标位置和方向。

2.2 行人出口选择机制

从疏散开始到结束,行人  $\alpha$  在单位时间  $\Delta t$  从  $m(m > 1)$  个出口中选择出口  $i$  的概率  $P_i$  为:

$$p_i = f_p (1 - \frac{d_i}{d}) e^{\frac{N_i}{N}} \quad (9)$$

$$P_i = \frac{p_i}{\sum_{j=1}^m p_j} \quad (10)$$

式中,  $f_p$  表示惯性系数,若上一单位时间也选择第  $i$  个出口,则  $f_p = P_0$ ,反之  $f_p = \frac{1 - P_0}{m - 1}$ ;  $d_i$  表示行人  $\alpha$  到  $i$  出口的距离,  $d = \sum_{j=1}^m d_j$ ;  $N_i$  表示出口  $i$  正前方  $8 \times 8$  格点内行人个数,  $N = \sum_{j=1}^m N_j$ ; 本文  $P_0$  取 0.55。

在计算出所有出口概率后,选择概率较大的出口作为行人的移动目标方向。根据出口选择机制,行人可以根据出口前方行人拥挤度和到出口距离等因素动态选择出口。

2.3 基于速度移动规则

行人根据社会力模型计算出加速度并且选择

合适出口后,按照基于速度的移动规则依次确定目标位置。

为了方便描述,定义  $t$  时刻行人  $\alpha$  的位置为该行人所占据 4 个像元的中心位置,记为  $(x, y)$ 。若  $(x, y)$  处有行人,则定义  $F(x, y, t) = 1$ , 否则  $F(x, y, t) = 0$ 。若  $F(x - 1, y, t) = 0, F(x, y - 1, t) = 0, F(x + 1, y, t) = 0, F(x, y + 1, t) = 0$ , 则定义  $G(x, y, t) = 0$ , 否则  $G(x, y, t) = 1$ 。

1) 行人移动顺序。对于每个出口,计算该出口与所有选择该出口行人的曼哈顿距离。出口  $i$  位置为  $(x_i, y_i)$ , 则行人  $\alpha$  距离出口  $i$  的曼哈顿距离  $d_a^i = |x'_i - x_i| + |y'_i - y_i|$ 。对于选择同一出口的行人,依据曼哈顿距离从小到大依次进行移动。若存在多个行人到该出口的曼哈顿距离相等,则依据速度大小从大到小依次计算。若  $t$  时刻  $d_a^i = 1$ , 则表示  $t + 1$  时刻  $\alpha$  已经脱离疏散区域。

2) 行人目标方向。在社会力模型中,行人速度不断更新。在  $t$  时刻,根据社会力模型得行人  $\alpha$  加速度为  $\mathbf{a}_\alpha(t)$ , 则速度为  $\mathbf{v}_\alpha(t) = \mathbf{a}_\alpha(t) \cdot \Delta t + \mathbf{v}_\alpha \cdot (t - 1)$ , 其中,速度方向为  $\theta(\theta \in [0, 2\pi))$ 。在疏散过程中,行人速度不会超过一个最大值,若计算的行人速度超过期望速度  $v_a^0$ , 则认为  $|\mathbf{v}_\alpha(t)| = v_a^0$ 。在改进模型中,定义移动目标方向  $\varphi = \text{round}(\frac{4\theta}{\pi})$ , 其中  $\text{round}$  函数表示四舍五入取整; 则行人  $\alpha$  的 8 个移动方向为 Moore 型领域,  $\varphi$  值与目标方向关系如图 1 所示。

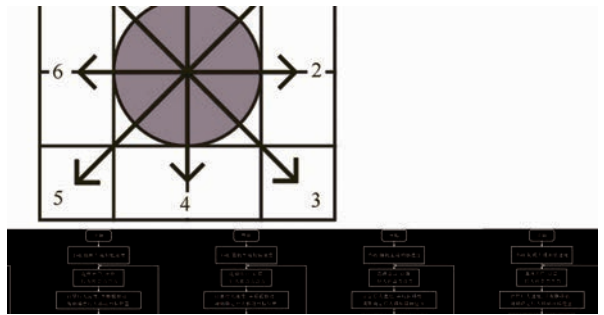


图 1  $\varphi$  值与疏散行人目标方向关系图  
Fig. 1 Diagram of Relation Between  $\varphi$  and Pedestrian Target Direction

3) 行人移动目标位置。行人  $\alpha$  在  $t$  时刻向目标方向前进的格点数  $n = \text{round}\{\rho \Delta t \cdot |\mathbf{v}_\alpha(t)|\}$ , 当  $\varphi = 0, 2, 4, 6, 8$  时,  $\rho = \frac{1}{r_a}$ ; 当  $\varphi = 1, 3, 5, 7$  时,  $\rho = \frac{1}{\sqrt{2}r_a}$ 。需要指出的是,行人在当前位置向  $\varphi$  方向移动  $n$  个格点的过程中如果碰撞到其他行人,则会停止在与其它行人发生碰撞位置的前一格

点。若行人  $\alpha$  朝  $\varphi$  方向移动到第  $k$  ( $1 \leq k \leq n$ ) 个格点时,该位置  $G(x, y, t) = 1$  或  $F(x, y, t) = 1$ , 即若  $\alpha$  在移动过程中与行人  $\beta$  发生碰撞,则  $\alpha$  在  $t+1$  时刻的位置为  $\alpha$  朝  $\varphi$  方向移动的第  $k-1$  个格点位置。设碰撞行人  $\beta$  速度为  $v_\beta(t)$ ,  $t+1$  时刻  $\alpha$  移动速度大小为  $|v_\alpha(t+1)| = \min \{ \cos\mu \cdot |v_\beta(t)|, |v_\alpha(t)| \}$ , 其中,  $\mu$  为  $v_\alpha(t)$  与  $v_\beta(t)$  的夹角,移动方向仍为  $\varphi$ 。若行人  $\alpha$  向  $\varphi$  移动过程中任意位置  $G(x, y, t) = 0$  且  $F(x, y, t) = 0$ , 则行人  $\alpha$  向  $\varphi$  移动第  $n$  个格点的位置即为目标位置,移动速度大小  $|v_\alpha^{t+1}| = v_\alpha^0$ , 方向为  $\varphi$ 。

### 2.4 改进模型流程示意图

在实际模拟过程中,根据行人速度及位置,确定行人下一时刻移动的目标位置。依照移动规则不断更新行人位置,直至所有行人到达疏散出口。改进的元胞自动机模拟过程如图 2 所示。

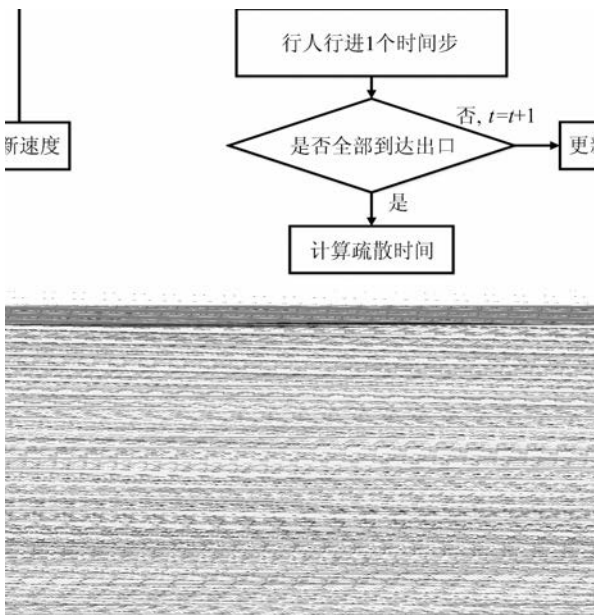


图 2 行人模拟过程流程图

Fig. 2 Flowchat of Pedestrian Simulation

## 3 改进模型实验与结果分析

为验证本文所提模型的实用性,通过模拟实验进行模型应用分析。选取  $14 \text{ m} \times 9 \text{ m}$  的房间作为疏散环境,设房间有 2 个出口,左上角出口为 A,右下角出口为 B,每个出口大小均为  $1 \text{ m}$ ,即每次只允许通过 1 个行人。设疏散人员为 100 人,行人质量  $65 \sim 75 \text{ kg}$ ,半径为  $0.25 \text{ m}$ ,每个行人实际占据面积为  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ,行人随机分布在房间中。由以往社会力模型研究结论知:初始行人速度为  $0.9 \sim 1.5 \text{ m/s}$ ,方向任意,在应急疏散情

况下期望速度大小  $v_\alpha^0 = 2.5 \text{ m/s}$ 。社会力模型的初始参数参考文献[4]设置。

### 3.1 模拟疏散过程与分析

具体模拟过程如图 3 所示,疏散开始后,行人逐渐向出口移动。最初,行人根据出口选择机制分别向两出口汇聚,随着出口附近行人密度越来越大,位于后方的行人推挤前方的行人,此时可以观察到行人间发生碰撞、排斥与摩擦现象,且在出口附近出现了堵塞效应,“弓形”结构开始形成。随着后方行人到达出口,出口聚集区边缘受到碰撞挤压的行人会在合力作用下向着周边绕行,人群最终较为均匀地分布在出口附近,从而使出口附近行人“弓形”结构更加明显。在疏散后期,出口附近行人逐渐变少,“弓形”结构逐渐减小直至最终消失。

### 3.2 行人出口选择分析

在整个疏散过程中,各个出口疏散的人数以及疏散的总人数随时间的变化趋势如图 4 所示。结合图 3 可以看出,出口附近人群密度和距离效应共同影响行人对出口的选择。两出口附近人员密度较小,行人主要依据距离效应选择出口(图 3(a))。因距离 A 出口近的行人较多,在疏散第 13 s 时(图 3(b)),行人在 A 出口汇集且密度大于 B 出口。尽管考虑出口选择的惯性作用,图 3(a)中部分最初选择 A 出口的行人重新选择 B 出口。随着 B 出口处汇集人数增加(图 3(c)),两出口附近人群密度近似,距离又成为影响出口选择的主要因素,部分选择 B 出口的行人最终又选择 A 出口作为目的地。在此期间,行人会依据出口附近的人员密度与行人到出口的距离效应不断重新做出选择,从而使两出口附近的人数得到动态调整,待疏散人数大致相等。虽然 A 出口疏散人数较多,但在疏散结束时两出口几乎同时完成人员疏散工作,没有出现一个出口闲置而另一出口仍处于拥堵的情况,说明实验符合真实模拟场景。

### 3.3 行人碰撞现象分析

在疏散过程中,必定会出现行人碰撞挤压现象。行人间碰撞比例越高,行人受伤概率越大。因此研究行人碰撞比例对研究人群整体安全有着重要作用。经典元胞自动机模型无法描述该过程,但在改进模型中可以分析行人碰撞现象。

图 5 是碰撞人数占总疏散人数、剩余疏散人数的比例与时间的关系对比图。结合模拟过程发现,随着部分行人开始汇聚到出口附近,行人间碰撞次数明显增加。在离开出口人数小于新到来出口人数时,两出口附近行人密度不断增大,行人间碰撞比例达到整个疏散过程最高。之后行人间碰

撞次数逐渐减少,但因剩余疏散行人数量也在减少,碰撞人数占剩余疏散人数的比例反而升高,在45 s达到峰值30%。若某一时刻,图5中两种比例都处于较大值时,意味着行人碰撞总人数较多

且待疏散行人碰撞比例较高,此时行人受伤概率最大。综合两条曲线可以发现,在疏散中期(23~40 s),行人间碰撞比例较高,有可能发生安全事故,需要疏散引导。

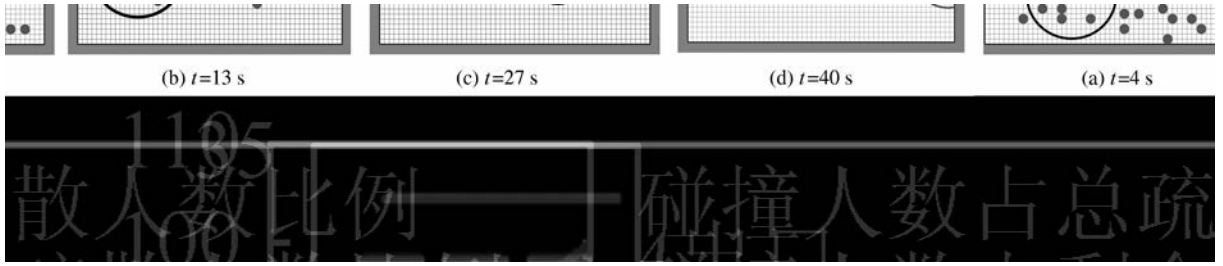


图3 行人疏散模拟动态过程

Fig. 3 A Dynamic Process of Simulating Pedestrian Evacuation

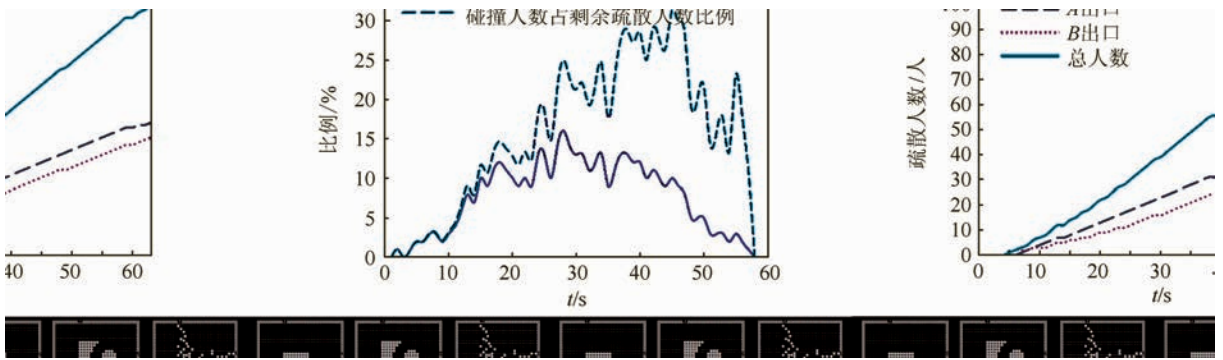


图4 疏散人数示意图

Fig. 4 Diagram of Numbers of Outgoing Pedestrians

图5 碰撞人数比例示意图

Fig. 5 Diagram of Ratio of Pedestrian Collision

### 3.4 改进模型与其它模型比较分析

由于改进的模型考虑了速度作用,因此改进模型与经典模型的动态疏散过程不同。

如图6(a)所示,72个行人在房间内规则排列(图6(a))。按照文献[15]的经典元胞自动机模型,在疏散开始4 s时间内,行人会以同样速度(1 m/s)向出口移动,即单位时间前进一格,因此疏散人群分别向两出口移动同样格数(图6(b))。由于没有考虑行人间相互作用力,人群以较为整齐的队列向出口移动,且行人间没有发生碰撞与挤压现象,这种情况显然不符合真实疏散情况。

而在改进的模型中(图6(c)),在疏散开始后,朝向出口的周边行人因为移动目标方向没有行人阻挡,会以1.8~2.5 m/s速度向出口前进,能够在较短时间到达出口附近。处于人群中间部分的行人,因为周边行人的阻挡,速度普遍在0.8~1.3 m/s,能够以正常的速度向出口聚集。而靠墙壁的行人因其他行人或墙壁阻挡等因素移动较慢,速度普遍小于0.8 m/s,部分行人在4 s时间内甚至停滞不前,因此在初始位置处形成滞留人群。通过对比图6(b)与图6(c),可以发现本文模型结果较符合真实疏散情况,验证了改进元胞自动机模型的逼真性和有效性。

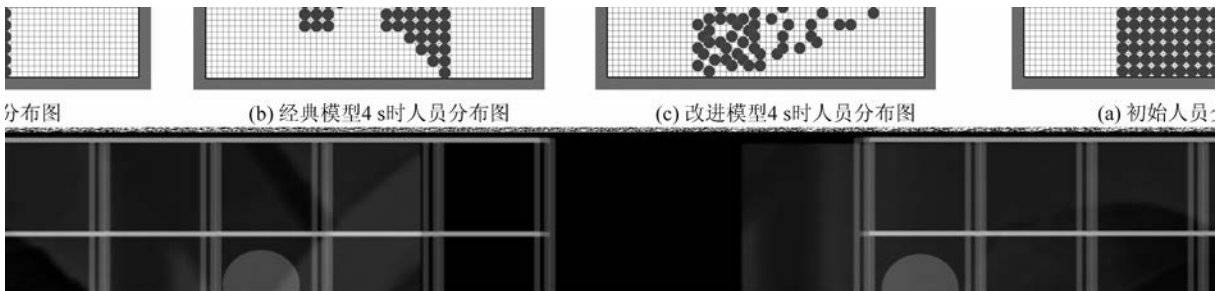


图6 疏散初始阶段人员疏散对比图

Fig. 6 Comparison of Pedestrian Distribution at the Beginning of Evacuation Process

表 1 是社会力模型、经典元胞自动机模型和本文模型运算结果对比情况,运行速度是在操作系统为 Windows7,CPU 为 i5-3450,内存 4 GB 环境下,两个出口疏散环境和疏散人数为 400 人的条件下比较得到的。

表 1 三种模型比较

Tab. 1 Comparison Among Three Models

模型	现象	运行时间/s
社会力模型	碰撞挤压,行人速度变化,弓形结构,出口总效用低。	496
经典元胞自动机模型	拥挤,行人运动速度一致,出口总效用低。	20
本文模型	碰撞挤压,行人速度变化,弓形结构,出口总效用高。	22

从表 1 可以看出,在出现较大规模行人疏散时,改进模型运算时间明显少于社会力模型,且能模拟出经典元胞自动机模型不能模拟出的行人速度变化、行人碰撞挤压等现象,两出口总效用较高。表明本文算法运行速度快且模拟结果更接近真实疏散情景。

## 4 结 语

本文在考虑社会力模型行人微观特性的基础上提出了一种改进的元胞自动机人员疏散模型,拓展了元胞自动机在疏散过程中模拟行人微观特征的应用。新模型可以更好地描述人员疏散中的典型现象,如行人间摩擦碰撞、行人动态选择出口、行人在出口附近聚集形成“弓形”结构以及行人不同的移动方式等。该模型能应用于现实中的群体行为模拟,为建立突发事件下的群体疏散预案提供新的思路和方法。在未来研究中,应考虑行人具有不同半径的情况,完善模型中行人在各个方向所受社会力的表示方式,并将其应用于模拟真实具体场景(如火灾场景)中。

## 参 考 文 献

- [1] Chen Peng, Wang Xiaoxuan, Liu Miaolong. A Simulation Method for Sports Grounds Evacuation Based on Integration of Multi-agent System and GIS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2):133-139(陈鹏,王晓璇,刘妙龙.基于多智能体与 GIS 集成的体育场人群疏散模拟方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(2):133-139)
- [2] Helbing D, Molnár P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics[J]. *Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics*, 1998, 51(5):4 282-4 286
- [3] Xu Mingliang, Wu Yunpeng, Lv Pei. Research on Evacuation in the Subway Station in China Based on the Combined Social Force Model[J]. *Physica A*, 2014, 394(4):33-46
- [4] Li Meifang, Zhao Yongxiang, He Lerong, et al. The Parameter Calibration and Optimization of Social Force Model for the Real-life 2013 Ya'an Earthquake Evacuation in China [J]. *Safety Science*, 2015, 79:243-253
- [5] Degond P, Appert-Rolland C, Moussaïd M, et al. A Hierarchy of Heuristic-based Models of Crowd Dynamics [J]. *Journal of Statistical Physics*, 2013, 152(6):1 033-1 068
- [6] Abdelghany A, Abdelghany K, Mahmassani H, et al. Modeling Framework for Optimal Evacuation of Large-scale Crowded Pedestrian Facilities [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 237(3):1 105-1 118
- [7] Li D, Han B. Behavioral Effect on Pedestrian Evacuation Simulation Using Cellular Automata [J]. *Safety Science*, 2015, 80:41-55
- [8] Guo X, Chen J, Zheng Y, et al. A Heterogeneous Lattice Gas Model for Simulating Pedestrian Evacuation [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2012, 391(3):582-592
- [9] Song Weiguo, Yu Yanfei, Wang Binghong, et al. Evacuation Behaviors at Exit in CA Model with Force Essentials: A Comparison with Social Force Model [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2006, 371(2):658-666
- [10] Song Weiguo, Yu Yanfei, Fan Weicheng, et al. A Cellular Automata Evacuation Model Considering Friction and Repulsion [J]. *Science in China; Serial E*, 2005, 48(4):403-413
- [11] Chen Miao, Han Duanfeng, Zhang Haipeng. Research on a Multi-grid Model for Passenger Evacuation in Ships [J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2011, 10(3):340-346
- [12] Jiang Rui, Wu Qingsong. Pedestrian Behaviors in a Lattice Gas Model with Large Maximum Velocity [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2007, 373(36):683-693
- [13] Kirchner A, Klüpfel H, Nishinari K, et al. Discretization Effects and the Influence of Walking Speed in Cellular Automata Models for Pedestrian Dynamics [J]. *Journal of Statistical Mechanics Theory & Experiment*, 2004, 10(10):453-468
- [14] Guo Renyong. New Insights into Discretization Effects in Cellular Automata Models for Pedestrian Evacuation [J]. *Physica A Statistical Mechanics &*



- Its Applications*, 2014, 400(400):1-11
- [15] Alizadeh R. A Dynamic Cellular Automaton Model for Evacuation Process with Obstacles[J]. *Safety Science*, 2011, 49(2):315-323
- [16] Chopard B. Cellular Automata Modeling of Physical Systems[M]. New York ;Springer, 2009
- [17] Zhang Lijuan, Zhang Yanfang, Zhao Yibin, et al. Simulation Research on Intelligent Evacuation Model Based on Cellular Automation[J]. *System Engineering Theory & Practice*, 2015, 35(1):247-253 (张丽娟,张艳芳,赵宜宾,等.基于元胞自动机的智能疏散模型的仿真研究[J].系统工程理论与实践, 2015,35(1):247-253)
- [18] Wang Haijun, Zhang Wenting, Chen Yingying, et al. Fire Spreading Model Based on CA Scope [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(5):575-578(王海军,张文婷,陈莹莹,等.利用元胞自动机作用域构建林火蔓延模型[J].武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(5):575-578)
- [19] Shu Bangrong, Liu Youzhao, Zhang Honghui, et al. Scenario Simulation of Urban Land Expansion Integrate Variable Weight with Constrained Fuzzy Cellular Automata[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(4):498-503(舒帮荣,刘友兆,张鸿辉,等.集成变权与约束性模糊CA的城镇用地扩张情景模拟[J].武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(4):498-503)
- [20] Yin Lingzhi, Zhu Jun, Wang Jinhong, et al. Real-time Simulation and Analysis of Dam-break Flood Routing Based on GPU-CA Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(8):1 123-1 129 (尹灵芝,朱军,王金宏,等. GPU-CA模型下的溃坝洪水演进实时模拟与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(8):1 123-1 129)
- [21] Schadschneider A. Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics Theory[C]. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Berlin, Germany, 2001
- [22] Johansson F, Peterson A, Tapani A. Waiting Pedestrians in the Social Force Model[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2015, 419:95-107
- [23] Xu Mingliang, Wu Yunpeng, Lv Pei, et al. miSFM: On Combination of Mutual Information and Social Force Model Towards Simulating Crowd Evacuation [J]. *Neurocomputing*, 2015, 168:529-537

## An Improved Cellular Automata Model for Simulating Pedestrian Evacuation

ZHANG Xinlong<sup>1</sup> CHEN Xiuwan<sup>1</sup> LI Huaiyu<sup>1</sup> LI Fei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract:** A new evacuation model is proposed for simulating pedestrian dynamics during emergencies. Based on the traditional cellular automata model enhanced with a finer discretization of space, each pedestrian occupies more than one cell and can move more than one cell during each time step. The operational rules of desire repulsive, and friction forces in a social force model are introduced in the proposed model. We establish an exit choosing method and the movement rules, and observe pedestrian movements to new destinations. Velocity is considered when describing dynamic processes of pedestrian behaviors during an evacuation. The characteristics of pedestrian evacuations are analysed in simulations and. The results show that the proposed model is valid for simulating pedestrian evacuation.

**Key words:** cellular automata; evacuation model; social force model; analog simulation

**First author:** ZHANG Xinlong, PhD candidate, specializes in cellular automaton. E-mail: mtxinlong@126.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41272366, 41230634.