

一种改进的多速双向行人流元胞自动机模型^{*}

周金旺 陈秀丽 周建槐 谭惠丽 孔令江 刘慕仁[†]

(广西师范大学物理与电子工程学院, 桂林 541004)

(2008 年 4 月 19 日收到, 2008 年 9 月 5 日收到修改稿)

考虑行人的位置交换、侧向前进和后退行为, 建立了一种改进的元胞自动机模型, 用于研究地下通道中具有多种运动速度的双向行人流. 将改进的元胞自动机模型与 Weng 的模型进行了比较. 计算机模拟表明, 改进的模型具有提高系统中行人的平均速度并降低行人占据密度的倾向.

关键词: 双向行人流, 元胞自动机, 计算机模拟

PACC: 0550, 0520

1. 引言

近年来, 关于行人流的研究引起了研究人员的关注^[1-9]. 行人流是相互作用和相互影响的行人组成的多粒子复杂系统, 一些物理模型已成功地应用于行人流自组织现象的研究^[1-9]. Helbing 等^[1]提出行人运动的社会力模型, 模拟了恐慌情景下人群的逃生. Muramatsu 等^[2]应用偏向随机行走的格子气模型研究了双向行人流的阻塞相变. Burstedde 等^[3]在元胞自动机模型的基础上, 提出用“地场”的方法模拟了房间内的行人疏散过程. 杨立中等^[4]应用元胞自动机模型研究了行人习惯偏向右行的行为对通道中双向行人流的影响. Weng 等^[5]应用概率型元胞自动机模型研究了广场中多速双向行人流的相变与状态斑图. 本文在文献 [5] 的模型基础上, 考虑行人的位置交换、侧向前进和后退这三种常见行为, 研究了地下通道中具有多种运动速度的双向行人流的相变与状态斑图. 计算机模拟表明, 改进的模型具有提高系统中行人的平均速度并降低行人占据密度的倾向.

2. 多速双向行人流元胞自动机模型

将地下通道平面均匀地划分成大小相等的正方形网格, 格点或被行人占据或为空, 大小取 $0.4 \text{ m} \times$

$0.4 \text{ m}^{[3]}$. 通道上下边界行人不可到达. 考虑行人的位置交换、侧向前进和后退行为, 采用 Moore 邻居, 以右行行人为例, 行人可以向前方、后方、左方、左上方、右方及右下方移动, 如图 1 所示.

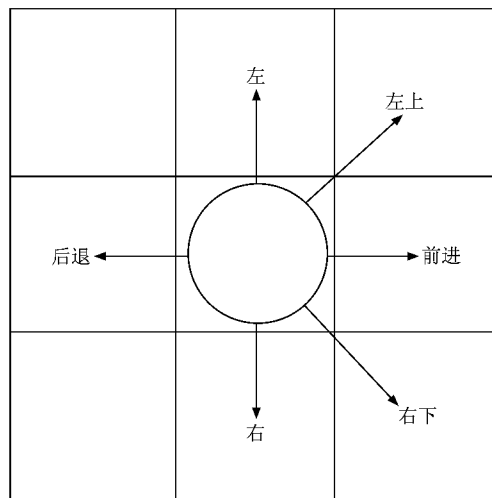


图 1 右行行人可能的运动方向示意图

如图 2 所示, 通道中具有四类行人, 分别为右行慢速行人、右行快速行人、左行慢速行人、左行快速行人. 慢速行人速度为 1.0 m/s , 侧向前进时速度为 $\sqrt{2} \text{ m/s}$; 快速行人速度为 1.5 m/s , 侧向前进时速度为 $1.5\sqrt{2} \text{ m/s}$. 慢速行人每间隔 3 个时步更新一次, 快速行人每间隔 2 个时步更新一次, 对应的每一时步为 $2/15 \text{ s}^{[5]}$.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10562001, 10762005)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: liumuren@163.com

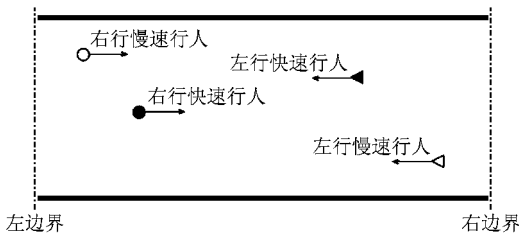


图 2 通道中四类行人运动示意图

位置交换是双向行人运动中的一种典型行为^[6].当前方格点是与其速度相等、运动方向相反的行人时,两行人将以概率 P_{ex} 进行位置交换.行人在前进过程中遇到前方行人时,总会以一定的概率侧向前进,而并不只是让道或原地静止.后退也是行人运动的常见行为,尤其是行人无法前进的时候,将以概率 P_b 后退一格.因此,本文把行人的位置交换、侧向前进和后退这三种常见的行为也容纳在模型中.文献[5]中,行人采用随机序列更新,本文采用同步并行更新,以与行人流的实际相符合.具体的更新规则如下:

1) 若行人前方格点为空,下一更新时步行人移动到前方格点.

2) 当行人前方格点为与其速度相等、运动方向相反的行人时,两行人以概率 P_{ex} 进行位置交换,如位置交换不成功,则转向下一步.

3) 行人根据其前方行人的速度大小和方向以某一概率侧向前进.根据大多数中国人行走的习惯,当正面遇到与其反向行走的行人时习惯靠右侧走,而要超过其前方同向行走的行人时,则习惯从左侧侧向前进.下面以速度为 V_1 的右行行人为例(左行行人运动规则相同),结合图 3 作出说明,图中黑色方格表示该格点被速度为 V_2 的其他行人占据.

当前方格点为右行行人时,若 $V_1 > V_2$,行人以概率 P_{sa} 侧向前进到左上方;若 $V_1 = V_2$,行人以概率 P_{sb} 侧向前进到左上方;若 $V_1 < V_2$,行人不侧向前进.若左方格点被其他行人占据(图 3(b)(d)),行人侧向前进受阻,侧向前进概率为 P_{sc} , $P_{sa} > P_{sb} > P_{sc}$.

当前方格点为左行行人时,行人以概率 P_{sa} 侧向前进到右下方;若右方格点被其他行人占据(图 3(c)(d)),行人侧向前进受阻,侧向前进概率为 P_{sc} .

如侧向前进不成功,则转向下一步.

4) 行人运动规则与文献[5]相同.行人向左方、右方移动的概率分别为 P_l, P_r ,静止在原位置的概

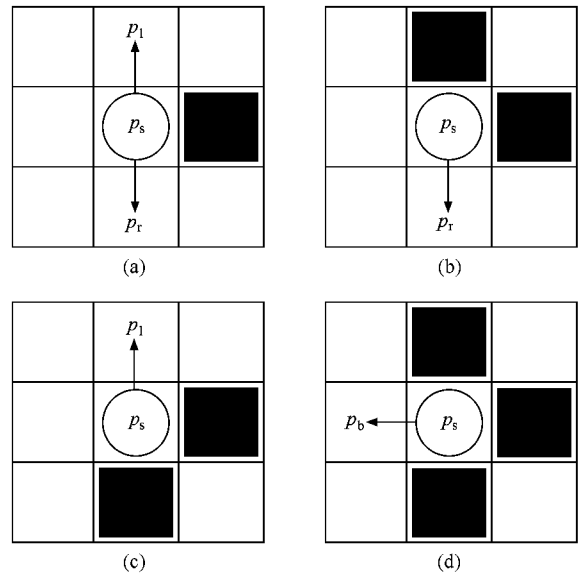


图 3 右行行人运动过程中可能出现的构型

率为 P_s .

当前方格点为右行行人时,对于图 3(a)的情形,若 $V_1 > V_2$, $P_l = 0.4, P_r = 0.1, P_s = 0.5$;若 $V_1 \leq V_2$, $P_l = 0.25, P_r = 0.25, P_s = 0.5$.对于图 3(b)的情形,若 $V_1 > V_2$, $P_r = 0.1, P_s = 0.9$;若 $V_1 \leq V_2$, $P_r = 0.5, P_s = 0.5$.对于图 3(c)的情形,若 $V_1 > V_2$, $P_l = 0.9, P_s = 0.1$;若 $V_1 \leq V_2$, $P_l = 0.5, P_s = 0.5$.

当前方格点为左行行人时,对于图 3(a)的情形, $P_l = 0.1, P_r = 0.4, P_s = 0.5$.对于图 3(b)的情形, $P_r = 0.5, P_s = 0.5$.对于图 3(c)的情形,若 $V_1 > V_2$, $P_l = 0.1, P_s = 0.9$.

对于如图 3(d)的情形,文献[5]考虑的行人运动是无后退的, $P_s = 1.0, P_b = 0$.考虑行人的后退行为,取 $P_s = 0.9, P_b = 0.1$.

所有行人按照上述规则运动,若某一格点同时被多个行人选中作为目标格点,将等概率随机地选择其中一行人进入该格点,其他行人依旧在原来的位置.

采用开放性边界条件,行人以一定的概率从左边界或右边界进入通道中, $P_{rs}, P_{rl}, P_{ls}, P_{lr}$ 分别表示右行慢速行人、右行快速行人、左行慢速行人、左行快速行人进入通道的概率.为简便起见,只考虑 $P_{rs} = P_{rl} = P_{ls} = P_{lr} = P_0/2$ 的情况,其中 P_0 为行人进入左(右)边界的概率.每间隔 6 个时步,四类行人同时以与其对应的概率从左(右)边界进入通道,当右(左)行行人到达左(右)边界,表明行人已走完通道,

将该行人从系统中自动除去。

3. 计算机模拟与数值分析

在计算机上模拟地下通道中的多速双向行人流. 设通道长度 $L = 100$, 宽度 $W = 40$. 行人位置交换、侧向前进和后退的概率各取两组参数. 第一组参数为 $P_{ex} = 0.2, P_{sa} = 0.5, P_{sb} = 0.3, P_{sc} = 0.2, P_b = 0.1$, 第二组参数为 $P_{ex} = 0.4, P_{sa} = 0.8, P_{sb} = 0.5, P_{sc} = 0.4, P_b = 0.1$. 这两组参数能对比出位置交换和侧向前进对行人运动的影响. 分别将 Weng 提出的模型称为模型 A, 第一组参数采用同步并行更新和随机序列更新对应的本文模型称为模型 B 和模型 C, 第二组参数采用同步并行更新和随机序列更新对应的本文模型称为模型 D 和模型 E. 本文主要研究在不同的进入边界概率 P_0 下行人的平均速度与行人占据密度, 行人在每一时步的平均速度

$$V(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i(t),$$

行人占据密度

$$\rho(t) = \frac{N}{LW},$$

其中 N 表示 t 时刻系统中行人总数. 每个样本运行 10000 时步, 系统平均速度 \bar{v} 取 4000 时步至 8000 时步的 $V(t)$ 值做时间平均. 为了减小随机性影响, 取样本数为 30, 再从 30 个样本中随机取 20 个样本作系综平均. 模拟结果表明, 当 $P_0 = 0.1$ 时, 各模型下系统中行人都将做自由运动. 图 4 为模型 B 在 $P_0 = 0.1$ 时系统中行人占据密度和平均速度随时间的变化关系.

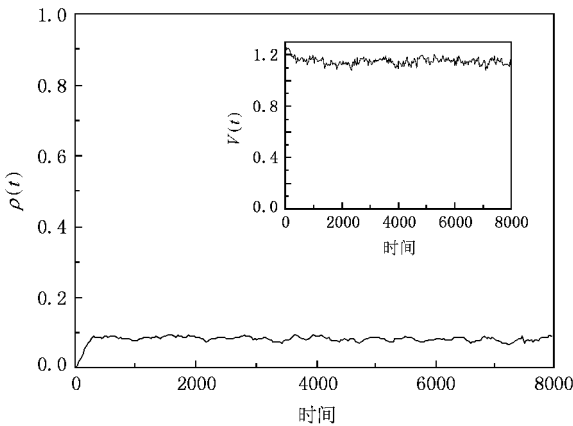


图 4 模型 B 在 $P_0 = 0.1$ 时行人占据密度和平均速度随时间的变化关系

值得注意的是, 当 $P_0 = 0.2$ 时, 各模型得到的结果有很大的区别. 采用模型 A, 系统运行 3000 时步后出现完全阻塞相, 而在模型 B 和模型 C 中虽然也出现阻塞相, 但从自由运动相到阻塞相过渡很缓慢, 平均在 6000 时步才出现完全阻塞相. 在增大位置交换和侧向前进概率的模型 D 和模型 E 中, 初始阶段行人做自由运动, 随后在一段较长的过程中常出现部分阻塞相, 由于行人的自组织, 出现阻塞的区域会自动解除, 所以模型 D 和模型 E 很难出现完全阻塞相. 当 $P_0 \geq 0.3$ 时, 各模型下系统都会出现完全阻塞相. 图 5 给出了模型 A 系统平均速度随 P_0 的变化关系, 同时给出了各模型在 $P_0 = 0.2$ 时系统平均速度的差异. 从图 5 可以看出, 在模型 A 中, $P_0 = 0.2$ 为发生相变的临界概率, 此时系统平均速度为零, 在模型 B 和模型 C 中系统平均速度分别约 0.1, 0.15 m/s, 而在模型 D 和模型 E 中系统平均速度将达到 0.8 和 0.9 m/s. 由此可见, 位置交换和侧向前进对提高系统中行人的平均速度起着很大的作用.

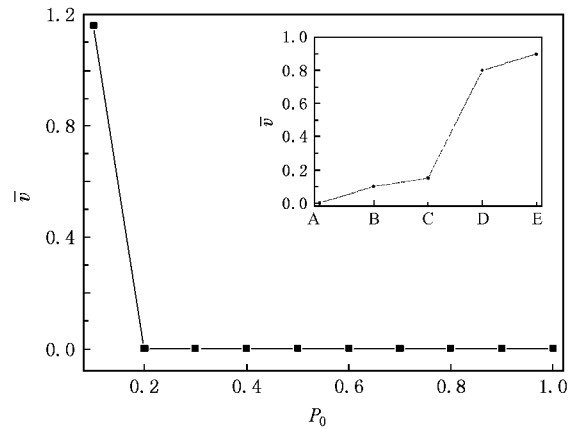


图 5 模型 A 中 \bar{v} 与 P_0 的变化关系. 内插图各模型在 $P_0 = 0.2$ 时 \bar{v} 的比较

为了进一步研究 $P_0 = 0.2$ 时各模型中行人运动状态的差异, 图 6 给出了各模型行人平均速度和占据密度随时间的变化关系.

从图 6 可以看出, 增大位置交换和侧向前进概率, 行人平均速度将明显增大, 行人占据密度逐渐下降. 而且随机序列更新比同步并行更新更加明显地提高了行人的运动速度. 这是因为采用同步并行更新, 行人在选择目标格点时会发生冲突, 未被选中的行人在原来的位置等待下一时步的运动, 显然这样降低了行人的平均速度. 采用随机序列更新, 行人在选择目标格点时不会发生冲突, 在每一更新时步有

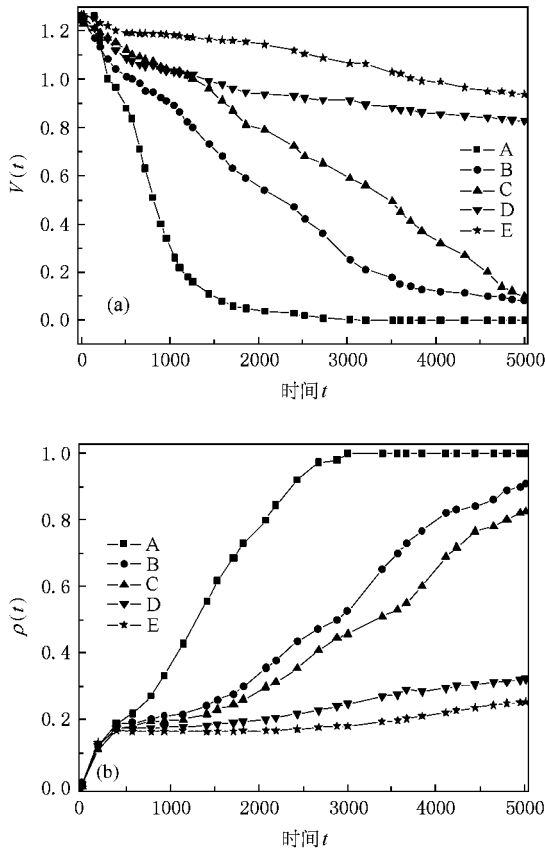


图 6 各模型在 $P_0 = 0.2$ 时行人平均速度和占据密度随时间的变化关系 (a)平均速度随时间的变化关系 (b)占据密度随时间的变化关系

更多的行人能移动,系统的平均速度更大,计算机运行效率也更高.需要说明的是,如文献 5 中提到,在开放性边界条件下,行人进入通道和运动过程中由于系统的随机性,每次得到的行人运动状态也会出现较大的差异.

图 7 给出了采用模型 B 得到行人在通道中出现的三个典型状态斑图.在 1000 时步,系统中的行人几乎都做自由运动,并出现“成行”现象^[5],在某些较小的区域出现局部阻塞,但会很快消失;在 3000 时步,系统中将出现较大区域的阻塞;到了 5000 时步,出现完全阻塞相,除极少数行人能进行位置交换,绝大部分行人都无法运动.

进一步的研究表明,当 P_0 较大时,由于通道中行人过于密集,各模型得到的结果没有较大的差异,图 8 为各模型在 $P_0 = 0.5$ 时行人平均速度和占据密度随时间的变化关系.从图 8 可以看出,各模型对应的曲线几乎重合.由此可见,当行人从边界进入通道的概率过大时,各模型除了计算时间有差异,计算结果没有太大区别.

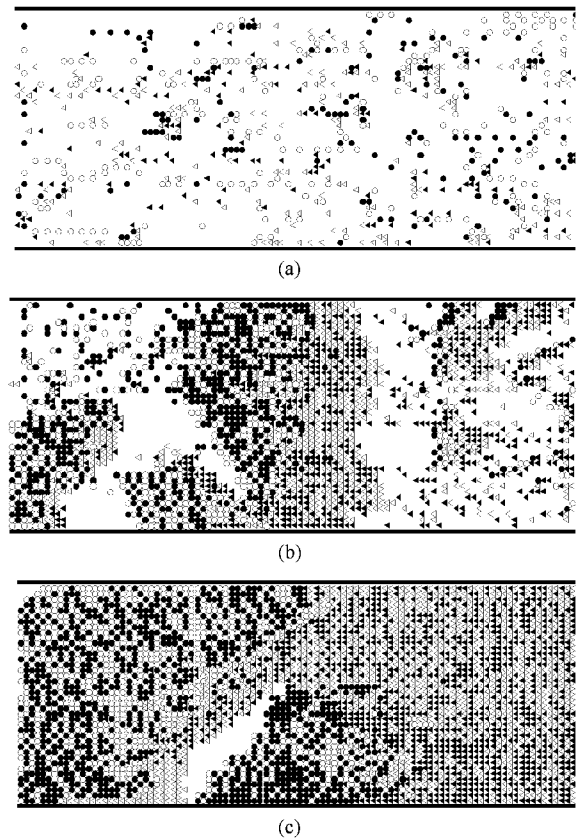


图 7 模型 B 在 $P_0 = 0.2$ 时出现的三个典型状态斑图 (a) $t = 1000$, (b) $t = 3000$, (c) $t = 5000$

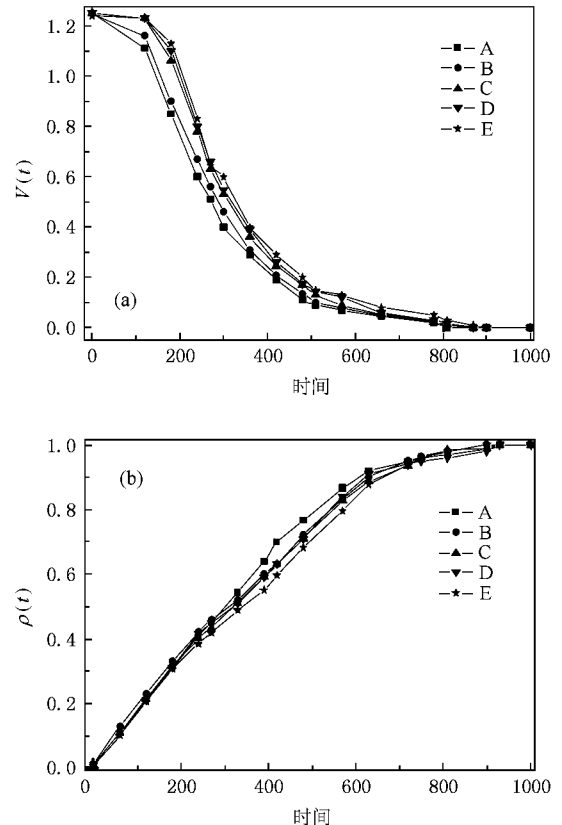


图 8 各模型在 $P_0 = 0.5$ 时行人平均速度和占据密度随时间的变化关系 (a)平均速度随时间的变化关系, (b)占据密度随时间的变化关系

4. 结 论

本文在 Weng 等人提出的概率型元胞自动机模型的基础上,考虑了行人运动过程中位置交换、侧向

前进和后退这三种常见的行为,研究了地下通道中的多速双向行人流.模拟结果对比表明,改进的模型能更好地反映行人的真实运动情况,尤其是在发生相变的临界行人进入边界概率下,改进的模型中行人具有更大的平均速度的倾向.

- [1] Helbing D , Molnar P 1995 *Phys. Rev. E* **51** 4282
 [2] Muramatsu M , Irie T , Nagatani T 1999 *Physica A* **267** 487
 [3] Burstedde C , Klauck K , Schadschneide A , Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507
 [4] Yang L Z , Li J , Liu S B 2008 *Physica A* **387** 3281
 [5] Weng W G , Chen T , Yuan H Y , Fan W C 2006 *Phys. Rev. E* **74** 036102

- [6] Li J , Yang , L Z , Zhao D L 2005 *Physica A* **354** 619
 [7] Maniccam S 2005 *Physica A* **346** 631
 [8] Yang L Z , Fang W F , Li J , Huang R , Fan W C 2003 *Chin. Sci. Bull.* **48** 1695
 [9] Yu Y F , Song W G 2007 *Phys. Rev. E* **76** 026102

An improved cellular automaton model simulation of pedestrian counter flow with variety velocities *

Zhou Jin-Wang Chen Xiu-Li Zhou Jian-Huai Tan Hui-Li Kong Ling-Jiang Liu Mu-Ren[†]
 (College of Physics and Electronic Engineering , Guangxi Normal University , Guilin 541004 , China)
 (Received 19 April 2008 ; revised manuscript received 5 September 2008)

Abstract

Taking into account three basic pedestrian behaviors , namely the position-exchange , lateral-move and step back , we proposed an improved cellular automaton model to simulated pedestrian counter flow with different velocities in subterranean channel . We compared cellular automaton model with Weng 's model . By computer simulation , the improved model is proved to be more efficient . Moreover , pedestrians in the system tend to have higher mean velocity and lower occupancy density .

Keywords : pedestrian counter flow , cellular automaton , computer simulation

PACC : 0550 , 0520

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10562001 , 10762005).

[†] Corresponding author. E-mail : liumuren@163.com