

基于改进格子气模型的对向行人流分层现象的随机性研究

李明华 袁振洲 许琰 田钧方

Randomness analysis of lane formation in pedestrian counter flow based on improved lattice gas model

Li Ming-Hua Yuan Zhen-Zhou Xu Yan Tian Jun-Fang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 018903 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.018903

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018903>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有加权顾前势的交通流模型

[On traffic flow model with weighted look-ahead potential](#)

物理学报.2014, 63(22): 228901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228901>

三维空间行人疏散的元胞自动机模型

[A cellular automata model of pedestrian evacuation in three-dimensional space](#)

物理学报.2014, 63(8): 080507 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.080507>

基于多尺度熵的交通流复杂性分析

[Complexity analysis of traffic flow based on multi-scale entropy](#)

物理学报.2014, 63(3): 038903 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.038903>

交叉口混合交通流元胞自动机模型及仿真研究

[Research and simulation on cellular automaton model of mixed traffic flow at intersection](#)

物理学报.2014, 63(1): 010508 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.010508>

基于动态地场和元胞自动机的自行车流建模

[Modeling of bicycle flow based on dynamic floor field and cellular automata](#)

物理学报.2013, 62(24): 240511 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.240511>

# 基于改进格子气模型的对向行人流分层现象的随机性研究\*

李明华<sup>1)†</sup> 袁振洲<sup>1)</sup> 许琰<sup>1)</sup> 田钧方<sup>2)</sup>

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)(天津大学系统工程研究所, 天津 300072)

(2014年8月23日收到; 2014年9月21日收到修改稿)

在考虑行人视野范围的随机偏走格子气模型基础上, 引入行人对前方开阔区域的移动偏好特性, 提出改进的格子气模型, 对通道内对向行人流进行仿真研究. 模型再现了对向行人流在不同密度下出现的3种演化过程, 发现了行人密度与对向行人流分层现象的形成具有随机性, 以及统计了概率的变化趋势, 同时分析了分层现象形成概率与系统几何尺寸参数、移动强度参数、右行人流比例参数和视野范围参数等的关系. 分析结果表明, 改进的模型能够再现实际低密度下对向行人流不会出现分层现象的特性. 根据分层形成的概率, 可将对向行人流的密度分为5个区间, 不同区间的行人流演化过程各有差异. 模型和分析结果对理解对向行人流的动态演化过程, 提高通道内对向行人流的走行效率有一定帮助.

**关键词:** 对向行人流, 格子气模型, 分层现象, 概率

**PACS:** 89.40.Bb, 02.50.Cw, 05.50.+q

**DOI:** 10.7498/aps.64.018903

## 1 引言

近年来行人交通越来越受到学者关注, 研究场景包括对向行人流、交叉行人流、室内行人疏散等<sup>[1-7]</sup>, 其中通道内的对向行人流作为最简单、最常见的现象, 研究较为广泛. 包括社会力模型、元胞自动机模型、格子气模型等在内的微观仿真模型凭借模型简单、容易编程、适于大规模计算等优点, 已成为研究对向行人流的一类重要模型. Helbing等<sup>[8,9]</sup>提出的社会力模型描述行人运动过程中的行人间以及行人与环境间的相互作用, 可以重现高密度行人流中的走走停停波、人群湍流之外的几乎所有自组织现象. Yu等<sup>[10]</sup>提出了修正高密度下行人间作用力的改进社会力模型, 可重现行人流的走走停停波、人群湍流等. Fang等<sup>[11]</sup>通过引入行人的右行偏好行为和后退行为建立了一个元胞自动机模型, 发现双向行人流的相变现象, 并发现后

退选择的考虑可以防止行人密度相对较低情况下的死锁现象. Yang等<sup>[12]</sup>应用元胞自动机模型研究了行人习惯偏右侧行走的行为对通道中双向行人流的影响, 并确定了一个较为真实可信而且合理的行人右行偏好概率. Weng等<sup>[13]</sup>利用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. Beak等<sup>[14]</sup>考虑行人的右行偏好, 基于元胞自动机模型分析了双向行人流的行为特征, 研究发现如果有一定数量行人不遵循右行规则, 会有助于提高对向行人流量. Yu等<sup>[15]</sup>在元胞自动机模型中引入了环境对行人行为选择的影响, 并分析了环境作用半径和场景尺寸大小的影响. 岳昊等<sup>[16]</sup>提出基于4个动态参数描述行人走行的元胞自动机模型, 分析了对向行人流在不同人流比例和不同系统尺寸规模下的模拟过程, 发现对向行人流在临界密度点存在自由流到阻塞流的相位转换. Muramatsu等<sup>[17]</sup>提出的随机偏走格子气模型研究了对向行人

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB725403)和国家自然科学基金(批准号: 71401120)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: learup@126.com

流的拥堵相变过程. Takimoto 等<sup>[18]</sup>基于格子气模型发现对向行人流间设置分割线可有效提高双向行人流的流量,使相比的临界密度增大. Yu 等<sup>[19]</sup>在 Takimoto 模型的基础上提出了2个分割线模型,分别考虑时间刻度分割和空间刻度分割,各自分析了行人在越过分割线后的一定时间间隔和一定空间距离后不遵循行走规则可能产生的影响. 模型结果表明,行人的违规行为对拥挤流的影响超过对自由流和停止流的影响. Fukamachi 等<sup>[20]</sup>在随机偏走格子气模型基础上考虑了行人的侧身行为的影响,结果表明侧身行为能够有效缓解对向行人流阻塞的发生. Kuang 等<sup>[21]</sup>基于修正的格子气模型模拟双向行人流,考虑了快慢两种行人和潜意识的影响. Kuang 等<sup>[22]</sup>提出考虑行人跟随效应的格子气模型,能够再现对向行人流的分层现象、高密度下的相变分离等. Ma 等<sup>[23]</sup>提出考虑行人占据多个格子的双向行人流模型,模型结果显示,在自由流下的基本图与实际调查数据较为符合. Tajima 等<sup>[24]</sup>在格子气模型基础上引入视野范围概念,提出两个改进的模型,分别刻画行人的同向跟随行为和同向避让行为,再现了对向行人流的分层现象. Li 等<sup>[25]</sup>在 Tajima 模型基础上改进了行人转移概率公式,提出了周期性边界下的对向行人流模型,给出了行人流基本图,发现改进模型的行人流平均速度和临界密度有不同程度的增加. Ma 等<sup>[26]</sup>提出了  $K$  近邻视野范围的对向行人流模型,发现行人与周围  $k$  近邻的行人间的相互作用在对向流形成分层现象的过程中起到重要作用. 任刚等<sup>[27]</sup>在 Ma 的基础上构建行人复杂网络,揭示了行人流密度、速度和流量的关系,分析了行人复杂网络主要特征参数.

对向行人流最显著的自组织现象是分层现象 (lane formation). Hoogendoorn 等<sup>[28]</sup>给出了分层数量的量化方法,并分析了给定宽度的通道内形成行人分层数量的频率分布. Helbing 等<sup>[29]</sup>也指出,对向行人流中形成的分层的数量和位置是随时间动态变化的,和通道的宽度、长度、进出流量等有关. 对向行人流分层的出现,是基于行人在前行过程中对左前方和右前方有差别的选择导致的. 诸多能够再现分层现象的对向行人流模型,都是基于各种规则刻画行人的差异化选择行走特性而实现的. 例如, Fang 等<sup>[11]</sup>提出的考虑右行偏好的元胞自动机模型设定行人前行时,选择右侧元胞的概率值大于左侧;岳昊等<sup>[16]</sup>提出的动态参数元胞自动机模型

中,设定的类别参数使得行人会偏向于同向行人更多的一侧行走;引入视野范围的格子气模型<sup>[24,25]</sup>使得行人之间的交互影响范围从局限于邻域周边扩大到视野范围内,行人根据视野范围内的同向和对向行人数量不同而对左偏移或右偏移做出差异性的选择;  $K$  近邻的对向行人流模型<sup>[26,27]</sup>通过考虑  $k$  个最近邻行人的影响,对前左方和前右方的选择也存在差异性.

现有模型中对行人分层现象的讨论主要集中在以下两方面: 1) 模型能够再现分层现象<sup>[16,21-27]</sup>; 2) 对分层数量的定量分析<sup>[23,25,28]</sup>. 但对分层现象的形成机理以及分层现象与通道几何尺寸、行人密度、不同走向的行人比例等因素之间的关系缺乏深入研究. 从对向行人流的基本图可知,分层现象形成后对向行人流的平均速度和流量均有明显提高,而分层个数与平均速度无明显相关性<sup>[25]</sup>. Helbing 等<sup>[29]</sup>也指出,对向行人流的分层能够提高对向行人流的行走效率. 因此,讨论分层现象的能否形成对提高对向行人流行走效率、优化通道设计有积极意义. 文献<sup>[25]</sup>提出的考虑视野范围影响的格子气模型形式简单、计算效率高、灵活可调、可很好地再现分层现象等优点,本文基于此模型(下文简称原模型),引入行人为了避免冲突而对空旷区域的移动偏好行为,提出改进的模型,进行数值模拟研究,并与原模型进行对比分析,讨论对向行人流的分层现象演化过程在不同密度下的随机性特点,以及分层现象形成的概率与相关参数的关系.

## 2 模型

### 2.1 随机偏走格子气模型

在基本的随机偏走格子气模型中,研究场景被划分为  $W \times L$  个大小相同的正方形网格,其中  $W$  为通道的宽度,  $L$  为通道的长度. 如图 1 所示,通道场景内包括两类行人: 分别为朝左走行的行人(图 1 空心圆)、朝右走行的行人(图 1 实心圆). 行人可根据一定的概率选择向紧邻的左侧、前方、右侧的格子移动,但不允许后退. 图 1 中  $P_1$  表示行人选择左侧格子的基本转移概率,  $P_2$  表示选择前方格子的基本转移概率,  $P_3$  表示选择右侧格子的基本转移概率. 每个网格只能容纳一个行人. 场景的上下边界类似于实体墙壁,行人不能走出上下边界,左右两端设置为周期性边界,使得行人到达左(右)边界后,在右(左)边界重新进入场景. 为分析方便,

设定通道长度方向为  $X$  轴方向, 通道宽度方向为  $Y$  轴方向.

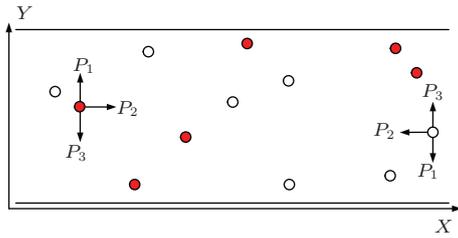


图1 (网刊彩色) 周期性边界条件下通道内对向行人流仿真示意图

在仿真更新时, 每个行人下一步的移动位置由行人当前所在格子紧邻的左侧、前方、右侧格子的占据情况确定, 如果某格子没有被占据, 则行人会以一定的概率移动到此格子处. 分别用  $S_1, S_2, S_3$  表示行人的左侧、前方、右侧紧邻格子的占据状态,  $S_i = 0$  或  $1$  ( $i = 1, 2, 3$ ). 其中,  $S_i = 0$  表示格子没有被行人占据,  $S_i = 1$  表示格子被行人占据(或者为上下边界). 根据格子是否被占据判断, 每个行人的可移动状态  $(S_1, S_2, S_3)$  共有 8 种, 各状态下行人选择各个紧邻格子作为下一目标位置的基本转移概率如表 1 所示.

表 1 行人在 8 种状态下选择各邻域格子的基本转移概率

状态编号	1	2	3	4	5	6	7	8
$(S_1, S_2, S_3)$	(0, 0, 0)	(0, 0, 1)	(0, 1, 0)	(0, 1, 1)	(1, 0, 0)	(1, 0, 1)	(1, 1, 0)	(1, 1, 1)
$P_1$ (左侧)	$(1 - D)/3$	$(1 - D)/2$	$1/2$	1	0	0	0	0
$P_2$ (前方)	$D + (1 - D)/3$	$D + (1 - D)/2$	0	0	$D + (1 - D)/2$	1	0	0
$P_3$ (右侧)	$(1 - D)/3$	0	$1/2$	0	$(1 - D)/2$	0	1	0

如表 1 所示, 如果某个行人的状态为  $(0, 0, 1)$ , 说明此行人的左侧、前方紧邻格子均没有行人, 而右侧紧邻格子被行人占据(或者右侧为上下边界). 行人选择左侧紧邻格子的概率为  $P_1 = (1 - D)/2$ , 选择前方紧邻格子的概率为  $P_2 = D + (1 - D)/2$ , 选择右侧紧邻格子的概率为  $P_3 = 0$ , 其中  $D$  为移动强度参数,  $D \in [0.0, 1.0]$ , 表示行人往前行方向移动的意愿.  $D$  值越大, 行人越倾向于往前行走, 对应于行人的行走速度也越大<sup>[17]</sup>.

## 2.2 考虑开阔区域移动偏好的改进格子气模型

如 2.1 所述, 在基本格子气模型中, 行人每一仿真更新步的决策结果只与紧邻的格子有关. 而实际中, 行人在移动时, 会综合考虑视野内的各向行人的分布和数量, 进而决策下一步的行走方向和位置. 例如, 行人会倾向于选择同向行人更多、对向行人更少的方向移动, 表现出明显的跟从行为和避让行为. 同时, 行人会更倾向于朝前方开阔的位置移动, 从而尽可能地避免行人之间的相互干扰和交通拥堵. 因此, 本文在文献 [25] 提出的考虑视野范围影响的原模型基础上, 考虑行人对前方开阔区域的选择偏好特性, 提出改进的格子气模型. 模型将行人的视野范围分为左前方范围、前方范围、右前方范围三个方形视野区域, 其中左前方范围、右前

方范围视野区域均定义为  $m \times n$  的范围, 前方范围视野区域定义为  $m \times 1$  范围. 其中  $m$  为视野区域长度、 $n$  为视野区域宽度, 如图 2 所示. 行人会根据各视野范围内的行人数量决定下一步目标位置的最终转移概率, 其移动规则如下:

1) 根据行人当前所在格子紧邻的左侧、前方、右侧格子是否被占据的情况, 判断行人的移动状态, 并根据表 1 计算移动到各邻域格子的基本转移概率.

2) 计算行人在左前方视野内的同向行人数量  $T_1$ 、对向行人数量  $O_1$ 、空格数  $E_1$ ; 前方视野内的同向行人数量  $T_2$ 、对向行人数量  $O_2$ 、空格数  $E_2$ ; 右前方视野内的同向行人数量  $T_3$ 、对向行人数量  $O_3$ 、空格数  $E_3$ .

3) 根据各视野范围内的行人数量计算邻域的左侧、前方、右侧格子的最终转移概率  $\bar{P}_i$  为

$$\bar{P}_i = \frac{P_i \left( \frac{E_i + T_i + 1}{O_i + 1} \right)}{\sum_{j=1}^3 P_j \left( \frac{E_j + T_j + 1}{O_j + 1} \right)}, \quad (1)$$

式中,  $\bar{P}_i$  为选择各邻域格子的最终转移概率,  $P_i$  为选择各邻域格子的基本转移概率,  $T_i$  为视野范围内的同向行人数量,  $O_i$  为视野范围内的对向行人数量,  $E_i$  为视野范围内的空格数,  $i = 1$  为左侧格子或者左前方视野,  $i = 2$  为前方格子或者前方视野,  $i = 3$  为右侧格子或者右前方视野.

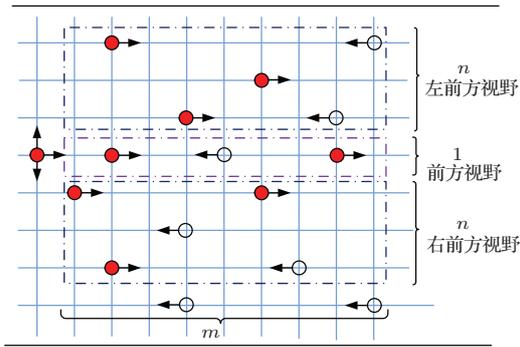


图2 (网刊彩色) 行人在通道内的视野范围设定示意图

仿真模型采用随机串行更新规则, 每个更新步内, 随机选择行人顺序更新, 根据模型的行人移动规则确定行人选择各邻域格子的最终转移概率, 进而确定最终移动位置. 结合(1)式和表1可知, 只需计算状态1, 2, 3, 5的最终转移概率值即可, 则在计算效率上会有较大提高, 仿真时间会大大缩短[25].

### 3 数值模拟与分析

#### 3.1 模拟场景和参数

将通道划分为  $W \times L$  个正方形网格, 每个网格的实际尺寸为  $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ , 以保证每个格点最多可以容纳一个行人. 仿真的单位时间步长对应物理时间为  $(1/3) \text{ s}$ , 即行人的运动速度为  $1.2 \text{ m/s}$ , 符合实际中行人的平均行走速度.

初始时刻, 产生行人总数为  $N = W \times L \times \rho$ ,

并随机分布在通道内, 其中朝右走行的行人数量为  $N_{\text{right}} = N \times f$ , 朝左走行的行人数量为  $N_{\text{left}} = N \times (1 - f)$ . 定义对向人流的平均速度  $v_{\text{average}} = N_{\text{forward}}/N$ , 流量  $F_{\text{average}} = v_{\text{average}} \times \rho$ . 其中,  $\rho$  为行人密度,  $\rho \in [0.0, 1.0]$ ,  $f$  为朝右走行的行人所占比例(下文简称右行人流比例),  $f \in [0.0, 0.5]$ ,  $N_{\text{forward}}$  为当前仿真步中所有往前走方向移动的行人数量.

#### 3.2 行人流演化分析

##### 3.2.1 分层现象和基本图

首先, 应用本文提出的改进格子气模型(下文简称本模型)分析分层现象演化过程. 仿真参数选取  $W = 20, L = 50, D = 0.6, f = 0.5, m = 20, n = 3, \rho = 0.3$ . 每次仿真运行 20000 时间步长, 取后 5000 个步长用于统计数据, 相同参数重复仿真 50 次, 用于统计数据取平均值.

图3显示了本模型在不同仿真步下的通道内对向行人流演化过程. 由图可知, 本模型能够很好地再现分层现象. 初始时刻仿真时间步  $t = 0$ , 行人随机分布在通道内, 如图3(a)所示; 当  $t = 228$  时, 通道内基本形成6个分层, 如图3(b)所示; 随着仿真步长的推进, 最下侧朝左走行的分层通道逐步消散, 此层内的行人逐步移动到最近的同向层通道内, 如图3(c)所示; 最终, 在  $t = 998$  以后, 通道内形成稳定的5个分层, 如图3(d)所示. 分层个数的变化符合 Helbing 等[29]指出的对向行人流分层数量是动态变化的结论.

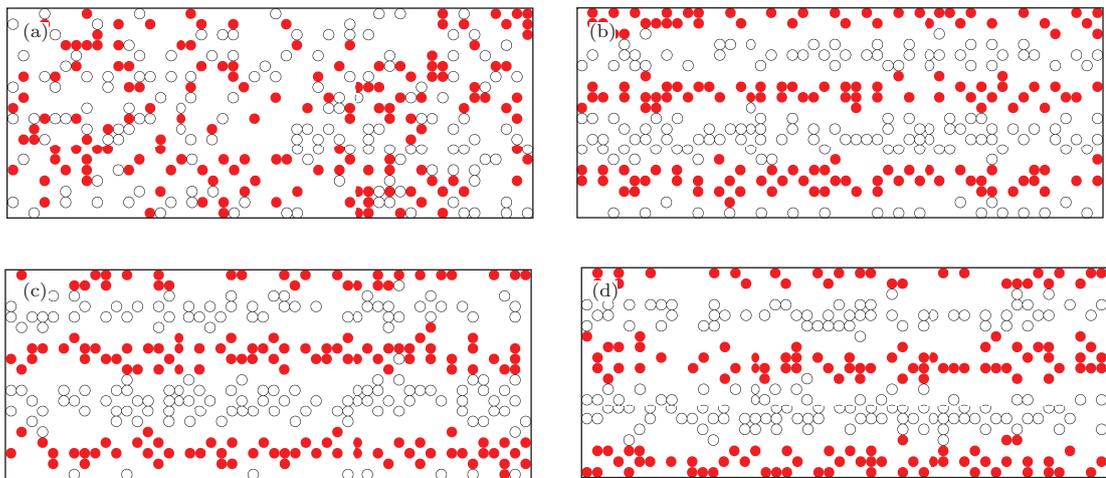


图3 (网刊彩色) 不同仿真时间步的对向行人流状态 (a)  $t = 0$ ; (b)  $t = 228$ ; (c)  $t = 798$ ; (d)  $t = 998$

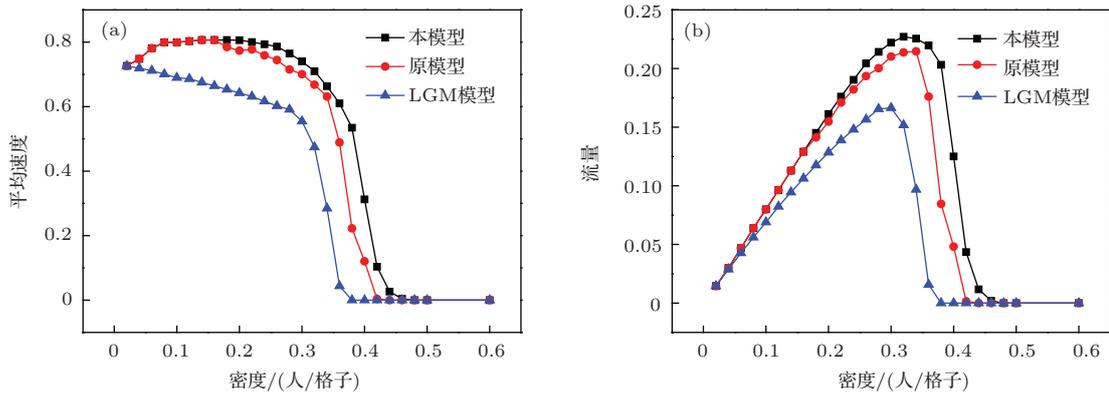


图4 (网刊彩色) 基本图 (a) 平均速度-密度曲线图; (b) 流量-密度曲线图

其次, 进一步分析行人流在不同密度下的平均速度  $v_{average}$  和流量  $F_{average}$ . 利用本模型仿真输出的数据, 得到平均速度-密度曲线图、流量-密度曲线图, 如图4所示. 由图4可知, 初期阶段平均速度随着密度的增加有一个快速增加的过程, 然后随着密度的增加缓慢下降. 当密度达到一个临界值, 即  $\rho = 0.4$  左右时, 速度会快速下降. 这意味着当行人密度超过此密度临界值, 对向行人流会从正常行走状态变为拥堵时的走走停停的状态. 密度  $\rho > 0.48$  时, 平均速度随着密度的增加而逐渐降为0, 这时对向行人流基本处于拥堵死锁状态, 如图4(a)所示. 同时, 流量也随着密度的变化经历了先增加、后突然下降、最后逐渐趋于0的过程, 如图4(b)所示, 这与行人流基本图的变化趋势是一致的<sup>[27]</sup>. 本模型基本图与原模型基本图对比可知, 在低密度时, 二者得到的基本图差别不大. 当密度  $\rho \in [0.2, 0.46]$  时, 本模型的平均速度要略大于原模型, 对应的前者的流量也略大于后者. 这是因为在此密度区间, 本模型中行人较原模型有更加强烈的意愿选择开阔空地行走, 行人具有更大的行走速度, 使得平均速度值偏大.

### 3.2.2 不同密度下的对向行人流演化过程分析

经仿真发现, 本模型在不同密度下, 对向行人流存在三种不同的演化过程: 自由流的演化、分层形态演化、堵塞现象的演化. 我们将通过分析通道长度方向( $X$ 轴方向)的行人线密度  $\rho_{line}$  研究不同密度下对向行人流的演化过程. 定义  $\rho_{line} = N_{t,y}/L$ , 其中  $N_{t,y}$  为  $t$  仿真时间步时, 通道宽度方向( $Y$ 轴方向)值为  $y$  且平行于  $X$  轴的直线上朝左(右)行人人数,  $y = 1, 2, 3, \dots, W$ ,  $W, L$  分别为通道的宽度和长度. 系统基本仿真参数:

$W = 40, L = 100, D = 0.6, f = 0.5, m = 20, n = 3.$

图5为当  $\rho = 0.06$  时, 原模型和本模型在通道宽度方向不同位置的行人线密度  $\rho_{line}$  随仿真时间推进的演化图. 图5(a), (b) 分别表示原模型中朝右和朝左行人线密度变化, 图5(c), (d) 分别对应本文模型中朝右和朝左行人线密度变化. 由图5(c), (d) 可知, 在低密度下, 本文模型不会形成分层现象. 这是因为模型中(1)式引入空格参数  $E_i$  后, 在低密度下视野范围内的空格数  $E_i$  要远大于同向行人人数  $T_i$  和对向行人人数  $O_i$ , 这使得每个行人选择左前方和选择右前方的概率值差异不明显, 导致不会形成分层现象. 通过对地铁通道内对向行人走行的观察, 在低密度下, 通道内有足够的空间供行人移动, 行人会表现出较强烈的自由行走的意愿, 行人趋向于朝着更为空旷的区域移动的偏好较为明显. 对向行人的避让、同向行人的跟从等心理感知不明显, 则不会表现出明显的跟从与避让的行为, 使得分层现象较难观察到.

由图5(a), (b) 可以看出, 由于不考虑行人偏好空格方向的移动, 在低密度下, 原模型会演化形成明显的分层现象, 这与实际情况略有差异. 另外, 在同一仿真时间步下, 本模型的行人线密度在  $Y$  轴方向分布较原模型更为均匀, 这表明在低密度条件下本模型中的行人在通道中分布更为均匀, 而原模型中的同向行人被约束在每个层的宽度区域内移动, 层与层之间存在较多空白区域, 这与实际情况也略有差异.

图6是当  $\rho = 0.3$  时, 本模型不同走向行人线密度演化图. 图6(a), (b) 分别是朝右和朝左行人线密度演化图. 从图6(a) 可看出, 在仿真初期, 朝右走行的行人随机分布在通道内, 初始时刻线密度

分布也较为均匀. 随着仿真时间推进, 受到同方向行人吸引、对向行人的排斥, 朝右行走的行人逐步汇聚形成5条人流. 此后, 在5条同向人流之间的相互吸引和对向人流的相互排斥的共同作用下, 第4条右行人流最终汇入第5条人流中, 流的宽度也相应变大, 并最终形成4条朝右行人流的稳定形态. 相应的, 朝左行走的行人, 在形成5条分层通道后,

由于同向人流与对向人流的共同作用, 朝右行走的第4条流与朝左行走的第4条流相互交叉, 朝左行走的第4条行人流最终汇入第3条流中, 使得第3条流宽度变大, 也形成4条朝左行人流的稳定形态. 对比图6(a)和(b)可发现, 不同走行的行人流在Y轴方向是相互错位的.

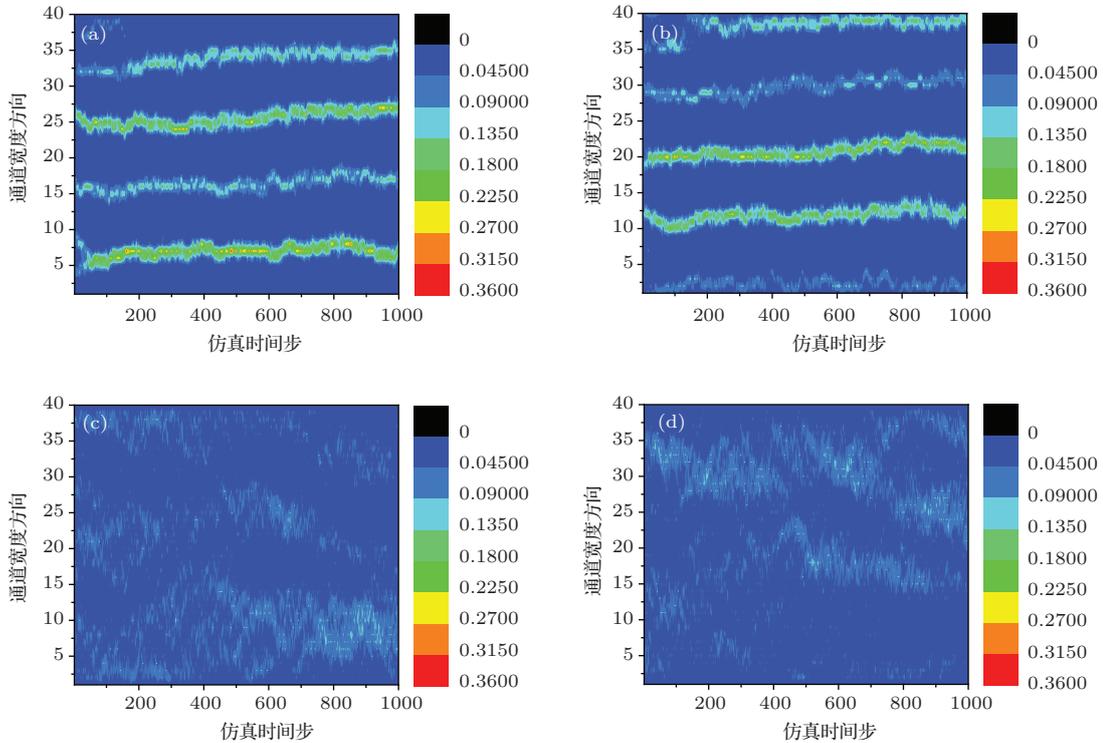


图5 (网刊彩色) 当  $\rho = 0.06$  时, 不同模型中行人线密度演化图 (a) 原模型的朝右行人演化图; (b) 原模型的朝左行人演化图; (c) 本模型的朝右行人演化图; (d) 本模型的朝左行人演化图

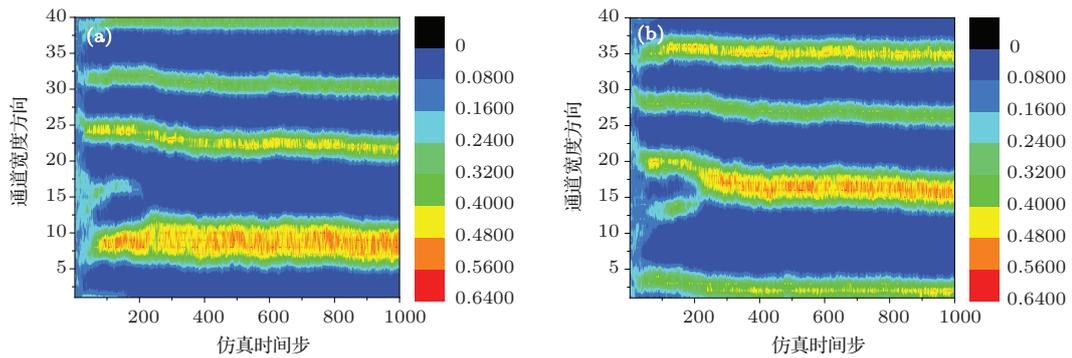


图6 (网刊彩色) 当  $\rho = 0.3$  时, 不同走向行人线密度演化图 (a) 朝右行人线密度演化图; (b) 朝左行人线密度演化图

图7是当  $\rho = 0.48$  时, 本模型不同走向行人线密度演化图. 图7(a), (b) 分别是朝右和朝左行人线密度演化图. 从图7(a)可看出, 在仿真开始后, 由于行人密度较大, 视野范围内的行人数量较多, 在同向与对向行人的共同作用下, 朝右行人很快

汇聚为5条流, 流的形成所需仿真时间步要比密度  $\rho = 0.3$  时短. 随着仿真时间推进, 由于高密度下空格数减少, 同向行人为汇聚在一起而进行的位置互换活动越来越困难. 最终在  $t = 100$  左右, 在通道的上侧部分首先出现由于无法互换位置而导

致的局部死锁现象, 局部死锁导致局部拥堵. 同时, 通道下侧部分行人为了避免局部拥堵, 行人流会往下偏移, 绕行拥堵区域. 在演化图上表现为, 在  $t \in [105, 180]$  时, 朝右的行人流和朝左的行人流都同时有往下偏移的趋势. 当局部拥堵扩散至整个通道横截面时, 通道完全被堵塞, 各向行人线密度值随着仿真时间步的推进基本保持不变.

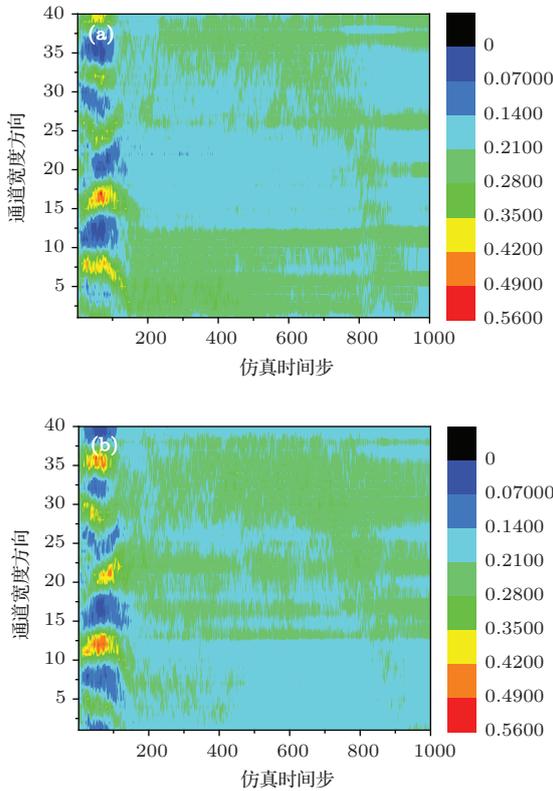


图7 (网刊彩色) 当  $\rho = 0.48$  时, 不同走向行人线密度演化图 (a) 朝右行人线密度演化图; (b) 朝左行人线密度演化图

### 3.3 分层现象形成概率分析

分析发现, 在肯定形成分层现象的行人密度和肯定导致堵塞的行人密度之间, 存在一个密度区间. 在此密度区间内, 相同的仿真参数下, 系统可能会演化形成分层形态, 也可能会发生堵塞现象. 在低密度下形成分层现象的行人密度值变化过程中, 也会出现类似的密度区间. 因此, 本文定义这两个密度区间为临界密度区间. 本小节将分析临界密度区间的范围值和临界密度值下的分层现象形成的概率值, 以及通道宽度  $W$ , 长度  $L$ , 移动强度参数  $D$ , 右行人流比例参数  $f$ , 视野范围参数  $m, n$  对通道内对向行人流分层现象形成概率的影响.

#### 3.3.1 行人密度对分层现象形成的概率分析

为分析分层现象的形成与密度、通道尺寸等参数的关系, 根据分层形态的特点, 定义通道内  $X$  轴方向的行中同向行人的比例超过 90%, 且这样的行的个数比例超过 90% 时, 认为对向行人流形成分层形态; 定义通道内行人的平均速度  $v_{\text{average}} = 0$  时, 认为通道处于拥堵状态.

系统仿真参数取  $\rho = \{0.01, 0.02, 0.03, \dots, 0.06\}$ ,  $W = 20, L = 50, D = 0.6, f = 0.5, m = 20, n = 3$ , 分析不同密度  $\rho$  下出现分层现象的概率. 每次仿真至少 20000 步长, 确保系统达到稳定状态, 在 20000 步以后再判断是否形成分层形态. 相同参数的仿真重复 500 次, 统计出现分层现象的次数, 计算各个密度下分层现象形成的概率  $P_{\text{lane}}$ , 如图 8 所示.

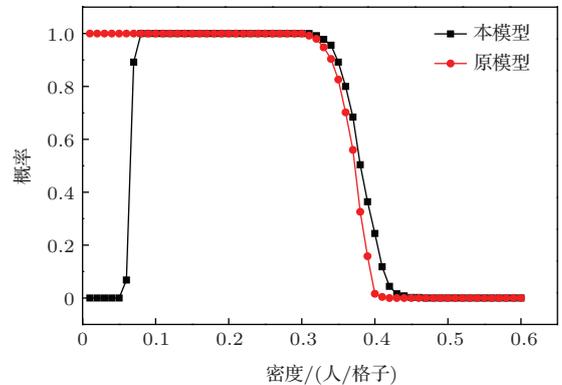


图8 (网刊彩色) 不同密度下对向行人流形成分层现象的概率图

由图 8 可知, 根据对向行人流的分层现象形成的概率  $P_{\text{lane}}$  分布情况, 密度值  $\rho$  可分为 5 个区间, 分别如下:

1) 当  $0 < \rho \leq 0.05$  时, 称之为低密度区间, 对向行人流不会出现分层现象,  $P_{\text{lane}} = 0$ . 通过仿真演化图观察, 在此密度区间内, 通道内局部可能会形成不稳定的分层形态, 但在随后仿真步的推进中, 分层形态也会消失. 这是因为在低密度区间, 由于视野内空阔区域吸引作用的考虑, 同向行人吸引和对向行人的排斥等作用影响不明显. 而即便在局部出现分层现象, 也会因为行人被空档区域的吸引, 导致分层形态的破坏. 而与之对比的是, 原模型形成分层现象的概率  $P_{\text{lane}} = 1.0$ , 其原因 3.2.2 中已经分析, 不再详述.

2) 当  $0.05 < \rho \leq 0.08$  时, 称之为低密度临界区间, 对向行人流会以一定的概率形成稳定的分层形态. 而如果没形成分层形态时, 行人流会处于自由流状态, 行人在通道内可随意行走. 统计结果显

示, 当  $\rho = 0.06$  时,  $P_{\text{lane}} = 0.068$ , 当  $\rho = 0.07$  时,  $P_{\text{lane}} = 0.892$ . 这是因为当  $0.05 < \rho \leq 0.08$  时, 视野范围内的行人数量逐渐增加, 同向吸引和对向排斥的作用表现明显, 通道内如形成局部的分层形态, 能够较容易保持稳定并扩大为整个通道的分层形态. 行人密度越大, 通道内越容易出现局部的分层形态. 同时, 相同密度下, 通道内能否形成局部分层形态也与行人初始位置的分布有关, 分布越集中的局部, 越易出现分层形态.

3) 当  $0.08 < \rho \leq 0.32$  时, 称之为中密度区间, 考虑视野范围影响的对向行人流总会形成分层形态. 这是因为, 在此密度区间, 行人视野范围内的同向吸引作用和对向行人排斥作用的影响下, 行人的每一步移动位置的确定都会表现出明显的跟从与避让行为. 走行过程中, 行人为了提高走行效率, 会不断调整自己的  $Y$  轴方向位置, 使得同向行人能够尽量汇聚在同一水平方向. 在通道提供足够的调整空间以及足够的演化时间后, 相同走向的行人会聚集在同一水平方向, 最终出现分层现象. 当分层形态稳定后, 分层数量和每个层的宽度不会发生变化(如图 6 所示). 在中密度区间, 通道能够提供足够的空间给行人用于  $Y$  轴方向位置的调整和交换, 使得分层现象的形成能够顺利进行.

4) 当  $0.32 < \rho \leq 0.46$  时, 称之为高密度临界区间, 通道内对向行人流的演化结果有 2 种: 形成分层现象, 或者因为局部拥堵的蔓延, 导致整个通道堵塞. 这是因为行人在受到同向与对向行人的影响下, 做出跟从与避让的决策行为时, 会不断调整自己的移动方向和位置, 使得尽量靠近同向行走的行人, 而避开对向行走的行人, 不断的进行调整与演化后, 分层现象形成, 行人流进入稳定状态. 而这一演化过程, 需要足够的空间用于行人的位置移动与调整. 显然, 能否形成分层现象, 与初始状态的行人分布有关. 如果行人的初始位置分布较为均匀, 使得有足够的空间用于行人之间位置的交换, 则分层现象较易出现. 否则, 当某个局部区域因为行人密度较大, 导致行人的位置调整无法顺畅进行时, 易发生局部拥堵, 进而扩大为通道某处横断面的拥堵锁死, 最后导致整个通道堵塞, 如图 7 所示. 从图 8 可以看出, 当  $0.32 < \rho \leq 0.46$  时,  $P_{\text{lane}}$  随着  $\rho$  的增加逐渐降低, 说明随着通道内行人的密度增加, 行人之间的干扰越来越大, 行人灵活移动的空间也越来越少, 所有行人由无序状态调整到形成分

层状态时所能利用的空间越来越小, 导致分层现象形成的难度越来越大.

5) 当  $\rho > 0.46$  时, 称之为高密度区间, 由于行人密度较大, 通道内无法提供行人  $Y$  轴方向位置调整时所需的缓冲空间, 导致局部拥堵发生, 进而蔓延至整个通道拥堵. 因此, 这一密度范围内, 对向行人流总会发生堵塞现象.

通过对比原模型和本模型的统计结果发现: 1) 在低密度区间, 原模型会形成分层现象, 本模型不会, 原因分析如前所述; 2) 在高密度临界区间内, 在相同密度下, 本模型的分层现象形成概率值要大于原模型. 这是因为在考虑了空格因素后, 行人在走行过程中, 表现出更加灵活的侧向移动, 侧向偏移的频率更高. 通过空间位置的不断调整, 使得行人在通道内分布更为均匀, 因此形成分层现象的概率值更大.

### 3.3.2 系统几何尺寸对分层现象的影响分析

在本小节中, 主要分析通道宽度  $W$  以及长度  $L$  对分层现象形成的影响. 图 9 为  $W = 20, 30, 40, 50$  时, 行人密度  $\rho$  与分层现象形成概率  $P_{\text{lane}}$  的曲线图. 由图 9 可见, 宽度对对向行人流的分层现象形成有一定的影响. 当  $W$  较小时, 低密度临界区间值也随之变小. 在相同密度下,  $W$  越小,  $P_{\text{lane}}$  值越大. 这是因为通道宽度越小, 视野范围对通道的覆盖率越大, 受同向与对向的作用越明显. 此外, 宽度越小, 通道内空格的绝对值越小, 则空格对行人的侧偏影响将会变小, 导致形成分层现象的可能性变大. 高密度临界区间值的范围随着  $W$  的变化基本没变化. 但是, 在相同密度下, 随着  $W$  的增加,  $P_{\text{lane}}$  值会略有下降, 这是因为可用于行人位置交换的空格会越来越来少.

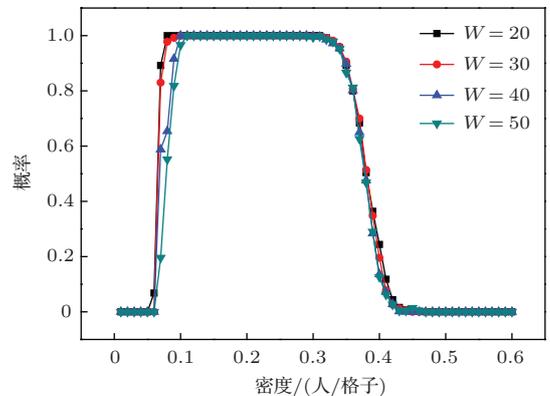


图 9 (网刊彩色) 不同宽度  $W$  下密度与分层形成概率图

图 10 为  $L = 50, 60, 70, 80$  时, 行人密度  $\rho$  与分层现象形成概率  $P_{\text{lane}}$  的曲线图. 由图可见,  $L$  对两个临界区间值的范围基本没影响. 在低密度临界区间内,  $L$  值的变化对  $P_{\text{lane}}$  值的影响不大. 在高密度临界区间,  $P_{\text{lane}}$  值随着  $L$  的增加略有所减少. 由图 9 和图 10 可看出, 仿真系统几何尺寸对分层现象形成的影响不显著.

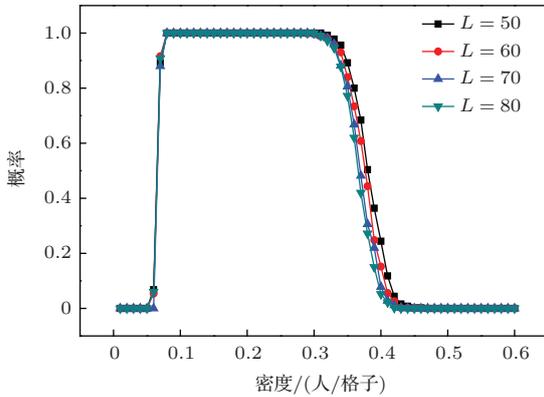


图 10 (网刊彩色) 不同长度  $L$  下密度与分层形成概率图

### 3.3.3 参数 $D$ 和 $f$ 对分层现象的影响分析

本小节主要分析移动强度参数  $D$  和右行人流的比例参数  $f$  对分层现象的影响. 图 11 为  $D = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  时, 行人密度  $\rho$  与分层现象形成概率  $P_{\text{lane}}$  的曲线图. 由图 11 可知,  $D$  的变化对两个临界密度区间范围有一定的影响, 且高密度临界区间的变化更为显著. 随着  $D$  的增加, 高密度临界区间会明显往  $X$  轴负方向偏移. 当  $D = 0$  时, 高密度临界区间范围为  $[0.40, 0.54]$ , 当  $D = 0.6$  时, 高密度临界区间范围为  $[0.32, 0.44]$ . 在低密度临界区间内, 随  $D$  值增加, 相同密度下  $P_{\text{lane}}$  值会略有减小. 在高密度临界区间内,  $D$  值增加, 相同密度下  $P_{\text{lane}}$  值会明显下降. 这是因为  $D$  越大, 侧向偏移的意愿越小, 导致行人间  $Y$  轴方向位置的调整概率变小. 这使得低密度下的行人流能够保持自由流状态, 分层形态较难形成; 而高密度下的行人流因位置无法调整而分布更不均匀, 形成局部堵塞的可能性更大, 进而导致通道堵塞. 文献 [17] 将  $D$  解释为行人往前移动的意愿,  $D$  值越大, 行人越倾向于往前行走, 对应的走行速度也越快. 由图 11 可知, 在高密度下, 行人往前走行的意愿越强烈, 对向行人流越易于发生拥堵. 因此, 从分层现象形成概率的角度分析对向行人流, 也可以得出文献 [29] 提出的“快即是慢 (faster is slower)”现象.

图 12 为右行人流的比例参数  $f = 0.1, 0.2, 0.3,$

$0.4, 0.5$  时, 行人密度  $\rho$  与分层现象形成概率  $P_{\text{lane}}$  的曲线图. 由图 12 可知,  $f$  对高密度临界区间范围的变化显著, 当  $f = 0.1$  时, 高密度临界区间范围为  $[0.42, 0.54]$ ; 当  $f = 0.5$  时, 区间范围变为  $[0.32, 0.45]$ . 在低密度临界区间内,  $f$  值增加, 相同密度下  $P_{\text{lane}}$  值会略有减小. 在高密度临界区间内,  $f$  值增加, 相同密度下  $P_{\text{lane}}$  值会明显下降. 这是因为, 在低密度下,  $f$  越小, 不均衡的对向行人流更易形成分层形态. 在高密度下,  $f$  越大, 同向与对向行人比例更加均衡, 行人频繁换位的需求更大. 而行人  $Y$  轴位置调整是需要空间的, 密度越高, 通道内空格空间越少时, 越易于堵塞.

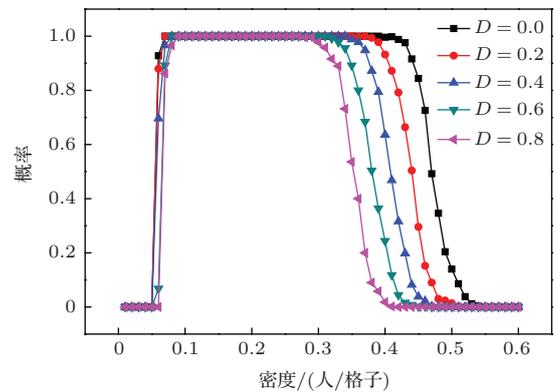


图 11 (网刊彩色) 不同  $D$  值下密度与分层形成概率图

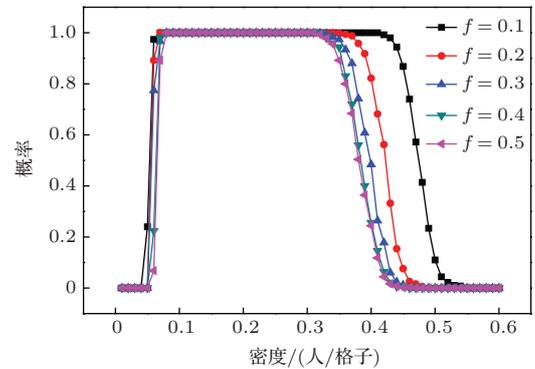


图 12 (网刊彩色) 不同  $f$  值下密度与分层形成概率图

### 3.3.4 视野范围参数对分层现象的影响分析

本小节主要分析视野范围参数  $m, n$  对分层现象的影响. 图 13 为视野长度参数  $m = 5, 10, 15, 20$  时, 行人密度  $\rho$  与分层现象形成概率  $P_{\text{lane}}$  的曲线图. 由图 13 可知, 变化对低密度临界区间、高密度临界区间均有一定的影响. 当  $m$  值增加时, 两个密度临界区间均会往  $X$  轴负方向偏移, 且低密度临界区间的偏移更显著. 在低密度临界区间的相同密

度下,  $m$  值越大,  $P_{\text{lane}}$  值越大; 反之, 在低密度临界区间内,  $m$  值越大,  $P_{\text{lane}}$  值越小. 这是因为在低密度下,  $m$  值越大, 视野范围变大, 视野内的同向与对向行人数量更多, 同向吸引与对向排斥的双重作用下, 并且有足够的空间用于位置交换, 对向行人流更易于形成分层现象. 高密度下,  $m$  值越大, 行人视野范围越大, 越倾向于通过侧向偏移行为调整自己的水平位置, 但是高密度下并没有空间可供调整位置时, 频繁变化位置, 则导致局部堵塞, 进而全局堵塞.

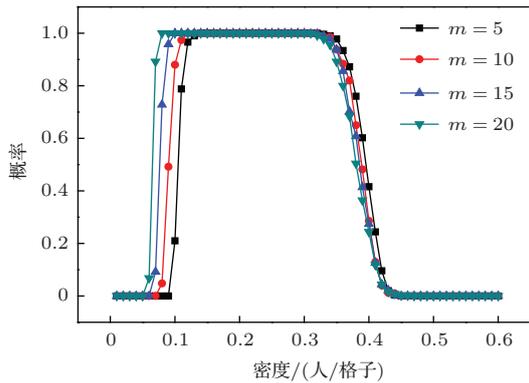


图 13 (网刊彩色) 不同  $m$  值下密度与分层形成概率图

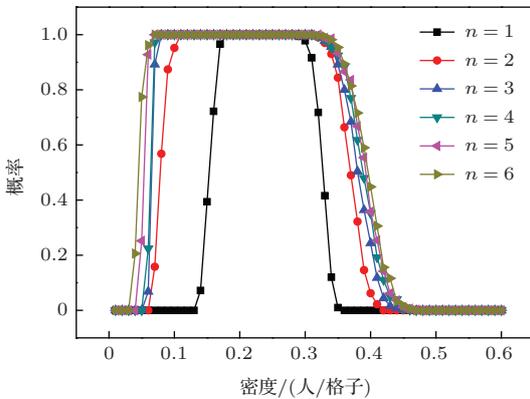


图 14 (网刊彩色) 不同  $n$  值下密度与分层形成概率图

图 14 为视野宽度参数  $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  时, 行人密度  $\rho$  与分层现象形成概率  $P_{\text{lane}}$  的曲线图. 由图 14 可知,  $n$  变化对低密度临界区间、高密度临界区间均有显著影响. 当  $n$  值增加时, 低密度临界区间会往  $X$  轴正方向偏移, 高密度临界区间会往  $X$  轴负方向偏移, 且  $n$  值越小, 偏移幅度越大. 在低密度临界区间内, 相同密度  $\rho$  下,  $n$  值越大,  $P_{\text{lane}}$  值越大, 高密度临界区间也呈现同样的变化趋势. 这是因为,  $n$  值较小, 视野宽度较窄, 左右侧视野范围的同向、对向行人的作用影响小, 行人行走状态更

接近于不考虑视野范围影响的格子气模型, 使得在低密度时, 视野范围受限, 不易形成分层现象, 而高密度时, 又更容易发生堵塞现象. 当  $n = 1$  时, 此现象尤其明显. 具体表现在: 当  $\rho = 0.1$  时仍不会出现分层现象, 而当  $\rho = 0.32$  时则已经会以一定概率出现拥堵现象. 而  $n = 0$  时, 模型退化为基本格子气模型, 任何密度下均不会出现分层现象. 对比图 9 和图 10 可知, 与系统几何尺寸参数相比, 视野范围参数对对向行人流的分层形态能否形成的影响更大.

## 4 结 论

本文通过对地铁通道内双向行人走行特性的观察, 在考虑行人视野影响范围的格子气模型基础上, 增加了行人对开阔区域的移动偏好特性, 提出了改进的格子气模型. 该模型的更新规则充分体现了行人的同向跟随、对向避让、开阔区域移动偏好等特性.

应用本文所提出的改进格子气模型对通道的对向行人流进行了大量仿真实验研究. 主要分析了对向行人流在不同密度下的演化过程, 研究了不同密度下对向行人流形成分层现象的概率, 同时还分析了分层现象形成概率与仿真系统几何尺寸、移动强度参数、右行人流比例以及视野范围等参数的关系. 得到如下主要结论: 1) 本模型能够再现低密度下对向行人流不会出现分层现象的特性, 这较现有模型更符合实际情况; 2) 根据对向行人流分层现象形成的概率, 可将对向行人流的密度分为 5 个区间, 不同区间的行人流演化过程各不相同; 3) 通道几何尺寸对分层现象形成的影响并不显著; 4) 在高密度下, 移动强度参数  $D$  值越大, 行人往前走行的意愿越强烈, 对向行人流越易于发生拥堵, 此结果表明从分层现象形成概率的角度分析对向行人流, 也可以反映“快即是慢”的现象; 5) 视野宽度参数对对向行人流的分层现象形成的影响较大, 而且在不同的行人密度条件下, 影响效果不一样. 由此可见, 模型和分析结果对理解对向行人流的动态演化过程有一定帮助.

## 参考文献

- [1] Isobe M, Adachi T, Nagatani T 2004 *Physica A* **336** 638
- [2] Ge H X, Cheng R J, Lu Z M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 070507

- [3] Xu L, Lu Z M, Ge H X 2013 *Chin. Phys. B* **22** 120508
- [4] Chen R, Li X, Dong L Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **14** 144502 (in Chinese) [陈然, 李翔, 董力耘 2012 物理学报 **14** 144502]
- [5] Lu L L, Ren G, Wang W, Wang Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 088901
- [6] Wang H N, Chen D, Pang W, Xue Y, He H D 2014 *Chin. Phys. B* **23** 080505
- [7] Yue H, Zhang B Y, Shao C F, Xing Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 050512
- [8] Helbing D, Molnar P 1995 *Phys. Rev. E* **51** 4282
- [9] Helbing D 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 1067
- [10] Yu W, Johansson A 2007 *Phys. Rev. E* **76** 046105
- [11] Fang W F, Yang L Z, Fan W C 2003 *Physica A* **321** 633
- [12] Yang L Z, Li J, Liu S B 2008 *Physica A* **387** 3281
- [13] Weng W G, Chen T, Yuan H Y, Fan W C 2006 *Phys. Rev. E* **74** 036102
- [14] Beak S K, Minnhagen P, Bernhardtsson S, Choi K, Kim B J 2009 *Phys. Rev. E* **80** 016111
- [15] Yu Y F, Song W G 2007 *Phys. Rev. E* **75** 046112
- [16] 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, 郝合端 2008 物理学报 **57** 6901]
- [17] Muramatsu M, Irie T, Nagatani T 1999 *Physica A* **267** 487
- [18] Takimoto K, Tajima Y, Nagatani T 2002 *Physica A* **308** 460
- [19] Yu Y F, Song W G 2007 *Phys. Rev. E* **76** 026102
- [20] Fukamachi M, Nagatani T 2007 *Physica A* **377** 269
- [21] Kuang H, Li X L, Song T, Dai S Q 2008 *Phys. Rev. E* **78** 066117
- [22] Kuang H, Li X L, Wei Y F, Song T, Dai S Q 2010 *Chin. Phys. B* **19** 070517
- [23] Ma J, Song W G, Liao G X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 128901
- [24] Tajima Y, Takimoto K, Nagatani T 2002 *Physica A* **313** 709
- [25] Li X, Duan X Y, Dong L Y 2012 *Chin. Phys. B* **10** 108901
- [26] Ma J, Song W G, Zhang J, Lo S M, Liao G X 2010 *Physica A* **389** 2101
- [27] 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]
- [28] Hoogendoorn S, Daamen W 2005 *Traffic and Granular Flow'03* (Berlin: Springer) p373
- [29] Helbing D, Buzna L, Johansson A, Werner T 2005 *Transport. Sci.* **39** 1

# Randomness analysis of lane formation in pedestrian counter flow based on improved lattice gas model\*

Li Ming-Hua<sup>1)†</sup> Yuan Zhen-Zhou<sup>1)</sup> Xu Yan<sup>1)</sup> Tian Jun-Fang<sup>2)</sup>

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

2) (Institute of Systems Engineering, College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

( Received 23 August 2014; revised manuscript received 21 September 2014 )

## Abstract

In this paper, we extend a lattice gas model recently proposed by Li et al, which considers the view field of pedestrian. An improved lattice gas model takes into account the effect of pedestrians' walking preference feature of empty area in the view field to simulate traffic dynamics of pedestrian counter flow. Three dynamic evolution processes under different pedestrian density are reproduced. The randomness of lane formation for different pedestrian density is found, and the probability of lane formation is given. Numerical simulations of relationship diagrams between the probability of lane formation and parameters of the system geometry size, the probability and the proportion of right walker flow, the probability and the strength of the drift, also the probability and the view field size are investigated. Results show that the extended model cannot form for the lane formation under a low pedestrian density, which is associated with the real pedestrian traffic. It is found that the density of pedestrian counter flow could be divided into 5 intervals, and there are differences in the dynamic evolution processes between these 5 intervals. This model and its result is useful for the study of the dynamic evolution process, and is helpful for raising efficiency of pedestrian counter flow in the channel.

**Keywords:** counter flow, lattice gas model, lane formation, probability

**PACS:** 89.40.Bb, 02.50.Cw, 05.50.+q

**DOI:** [10.7498/aps.64.018903](https://doi.org/10.7498/aps.64.018903)

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China(Grant No. 2012CB725403), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 71401120).

† Corresponding author. E-mail: [learup@126.com](mailto:learup@126.com)