

基于前摄效应的不耐烦行为建模与双向行人流动态

张琦 渠静

Impatient behavior modelling and simulation of bidirectional pedestrian flow dynamics based on proactive effect

Zhang Qi Qu Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 070502 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211537

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211537>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度梯度区域熔化作用下熔池迁移的元胞自动机模拟

Cellular automaton simulation of molten pool migration due to temperature gradient zone melting

物理学报. 2019, 68(4): 048102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181587>

高Cr铸铁中 M_7C_3 碳化物与奥氏体共生长的元胞自动机模拟

Cellular automaton simulation on cooperative growth of M_7C_3 carbide and austenite in high Cr cast irons

物理学报. 2021, 70(21): 218102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210725>

基于元胞自动机-格子玻尔兹曼模型的枝晶碰撞行为模拟

Simulation of dendrite collision behavior based on cellular automata-lattice Boltzmann model

物理学报. 2021, 70(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211292>

基于元胞自动机的气动光学光线追迹算法

Cellular automata ray tracing in two-dimensional aero-optical flow fields

物理学报. 2020, 69(19): 194201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200532>

基于元胞传输模型的楼梯区域行人运动

Study of pedestrian flow on stairs with a cellular transmission model

物理学报. 2019, 68(2): 020501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20180912>

通道中行人-机动车相互作用机理的建模和模拟

Modeling and simulation on interaction between pedestrians and a vehicle in a channel

物理学报. 2018, 67(24): 240503 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181499>

基于前摄效应的不耐烦行为建模 与双向行人流动态^{*}

张琦[†] 渠静

(北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

(2021 年 8 月 22 日收到; 2021 年 12 月 17 日收到修改稿)

不耐烦情绪是一种因人而异的心理因素, 且随环境实时变化. 本研究构建了基于元胞自动机的行人微观模型, 并用其研究了双向行人流在不耐烦行为决策影响下的动态特征. 模型定义了潜在势能场表达行人对可用空间的占用倾向, 合理体现双向流行决策的前摄效应. 提出在行人运动过程中, 根据瞬时状态测量、记录和更新行人个体不耐烦水平的方法, 并以此触发个性化行为. 对比研究了 3 种不同的不耐烦行为模式的作用效果. 仿真试验结果显示, 与不考虑不耐烦行为相比, 当不耐烦水平用于触发横跨行为时, 双向流在速度、流率和等待时间方面的表现均有改善; 当不耐烦用于直接计算行人对有限空间的竞争力时, 这 3 项指标则在大部分密度水平下均呈恶化. 针对不耐烦作用强度与决策阈值的参数灵敏度分析显示了模型在不耐烦作用表现方面的灵活性. 同时, 分场景的仿真试验还揭示了低比例慢速行人、步道宽度及混合行为模式等对双向流效率的作用.

关键词: 元胞自动机, 双向行人流, 基本图, 不耐烦行为

PACS: 05.50.+q, 05.65.+b, 07.05.Tp

DOI: 10.7498/aps.71.20211537

1 引言

关于行人双向流行为的既有研究揭示了行人群集现象源于个体的协作行为. 针对现实世界中公共区域采集数据的调查和对情景实验统计数据的研究表明: 行人流的自组织, 尤其是步道生成对双向流起着至关重要的作用^[1,2]. 随着密度的增加, 双向流比单向流效率更高^[3], 这也可能是自组织效应增强的结果^[4,5]. 行人步道生成有助于有效缓解正面冲突^[6], 并防止形成僵局^[7]. 因此, 无论采用连续模型^[8,9]还是离散模型^[10–14], 步道生成一直是行人双向行为模型验证的主要指标. 然而, 在不同情况下, 行人对协作的态度是多变的. Nagatani^[15]采用元胞自动机模型的实验研究表明, 行人在低密度时

倾向自由移动, 而高密度时则试图生成步道. 李明华等^[16]构建了改进的格子气模型再现低密度下双向行人流不会出现分层现象的特性. Feliciani 和 Nishinari^[17]对自组织步道生成的研究表明, 步道生成后平衡的双向行人流十分稳定, 然而步道生成的过程中则要求行人最大程度地横向移动. 这解释了为什么平衡的双向流在低密度下效率高, 但会快速导致高密度下的死锁. 事实上, 行人之间的协作是基于特定条件的, 至少与密度^[14,18,19]有关. 一些研究探讨了高密度的建模解决方案^[20,21], 然而, 问题的核心仍取决于协作机制是否正确合理地表达.

在现实世界中, 行人个体根据用户最佳原则在微观层面上做出运动决策, 在宏观层面上则体现为可能的系统最佳结果. 例如, 行人个体选择适时跟随前方的同向行人, 避免与对向行人碰撞, 这种利

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 62003027)、北京市自然科学基金 (批准号: L201013)、同济大学道路与交通工程教育部重点实验室开放基金 (批准号: K201904) 和中央高校基本科研业务费重大项目 (批准号: 2020JBZD007) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: qzhang6@bjtu.edu.cn

己的个体行为对应的群体现象即为步道生成,且提高了特定条件下整个群体的效率.因此,行人之间的所谓“协作”,实际上是个体基于其局部环境的个性化行为的集成表现.目前针对各种个性化行为的大量研究普遍集中在人群疏散场景上. Fu 等^[22]引入了模糊理论表现性格各异的行人对危险信息的反应. Haghani 等^[23]通过实验揭示了适度的竞争压力有利于中等规模人群的疏散,并引发了对传统的“快即是慢”效应的深入讨论. Fu 等^[24]和 Weng 等^[25]则分别探讨了行人差异化行为能力和速度对疏散效率的重要作用. 针对行人流的研究也揭示了个性化行为的强大作用,包括随机减速^[26]、右行偏好^[27]、偏移倾向^[28]以及跟从行为^[29–31]等. 基于个性化行为的协作可能提升群体效率,也可能导致群体表现的恶化,尤其是在高密度争夺有限空间^[32,33]的条件下. 关于人群疏散的研究表明,个体过于积极的疏散行为会导致整体效率降低^[34,35]. 可见,群体现象的决定因素是个体的决策原则和行为模式,有必要正视个性化行为对群体表现的重要作用.

个性化行为视角的引入打破了由统一运动规则触发群体效应的常规思路. 在双向行人流中,协作表现为基于个性化行为决策的步道生成过程. 这里的个性化行为取决于行人个体对同向和对向行人潜在作用的反应,包括运动状态下的碰撞规避和停滞状态下的行为决策. 碰撞规避基于行人对来自其他行人潜在作用的预判. Suma 等^[36]和 Lü 等^[30]分别改进了势能场模型和社会力模型用于表现行人的预见性行为. Jin 和 Guo^[37]针对上下楼梯场景改进了元胞传输模型,利用异向行人对元胞势能的影响驱动路径选择行为. 这些研究揭示了前摄效应在行人行为研究中的重要性. 停滞状态则源于排队或冲突导致的拥堵,并进一步引发行人的不耐烦情绪. 近年来不少行人流动态研究^[38,39]中也考虑到了行人的心理状况,不耐烦已被证明是影响人群疏

散效率的一个关键因素^[40,41]. 本研究假定不耐烦是可能引发双向流中个性化行为的一个因素,并进一步导致不同的群体表现. 根据日常经验,在不耐烦的情况下,行人会更加渴望移动,更具竞争力或更加积极地寻找可用空间,从而也会影响其预判和碰撞规避的相关决策. 值得注意的是,个体之间的不耐烦程度各不相同,而且不耐烦状态会随着行人周围的情势发生持续变化. 因此,前摄效应和不耐烦触发的行为决策对双向流的步道生成过程至关重要,进而影响双向流的群体表现.

既有研究显示了基于元胞自动机的模型^[13–15, 21,24–26,32,41–43]在捕捉与重现个性化行为方面具有强大的表现力和有效性. 本文构建基于元胞自动机的模型,通过定义潜在势能场合里表现双向流中行人决策的前摄效应. 针对不耐烦触发的个性化行为及其作用,提出了行人个体不耐烦水平的计量和更新规则,对比研究了由不耐烦触发的3种行为模式对双向流的作用效果.

2 行人双向流中的前摄效应与不耐烦行为

冲突和死锁是制约双向行人行为建模的瓶颈问题之一. 在真实世界中,行人并不会盲目前进直至拥堵,而是在行走过程中通过不断观察和调整避免冲突和停滞^[14,33],这种前摄效应在建模中尤为重要. 行人在进行前摄决策时,同向和异向行人的相对数量发挥了潜在作用. 通常同向行人相对较少的一方更倾向于转向换道,而人数相对较多的一方则具备更明显的优先权保持原前进方向.

如图1所示,行人群体 L_n 和 R_n 对向行走,行人在行走过程中实时表示自己对前方空间的占用倾向. k_{L_n} 和 k_{R_n} 分别代表两个群体的行人释放占用倾向的作用距离. 从时刻 t 过渡到时刻 $t+1$ 时,

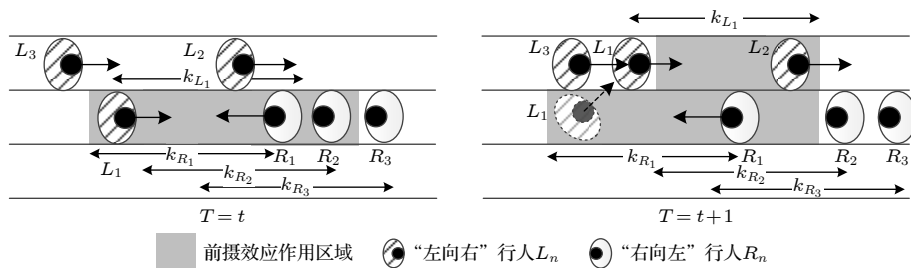


图1 双向行人的前摄效应

Fig. 1. Proactive effect of bi-directional pedestrians.

行人 L_1 (身后没有同向行人) 感知到对向行人的占用倾向后随即选择换道至左侧以避免与 R_1 及其身后的人碰撞.

本文提出的模型中定义了由行人作用和更新的潜在势能场来表现上述前摄效应. 每个行人个体对其前方空间的占用倾向以潜在势能场的方式予以记录、累加和比较. 详细规则见 3.2 节.

前摄效应的表达机制为缓解面对面冲突提供了途径, 但随着人群密度的增加, 拥堵不可避免. 被迫停止和等待的行人可能产生不耐烦心理, 这在真实世界中十分普遍. 因此, 不耐烦的行人可能基于其不耐烦的程度进行行为决策. 一方面, 不耐烦水平在行走过程中是动态变化的, 当行人停止前进等待较长时间时, 不耐烦水平较高, 当其继续以期望速度行走时不耐烦水平可能降低甚至消失. 另一方面, 不耐烦对行人的行为决策可能产生不同的影响. 一个不耐烦的行人可能横跨换道, 也可能在占用前方有限空间方面更具竞争力. 同向和异向不同个体之间差异化的动态不耐烦水平, 使得每个行人面对的环境更加复杂和难以预测. 本文针对 3 种不同的不耐烦行为模式进行建模和对比研究. 不耐烦水平的变化规则以及行为模式的表达详见 3.3 节.

3 不耐烦行人运动模型

3.1 基础定义

仿真模型基于一个以方形单元格为基础结构的二维系统. 单元格边长为 0.45 m, 每个单元格在任一时间步只能由一名行人占用或者空闲. 如图 2 所示, 有两类行人以相反的方向相向运动, Lefts(L) 代表“左向右”行人, Rights(R) 代表“右向左”行人. 每个行人作用并更新其影响的单元格上的潜在势能场值, 从而生成和更新潜在势能场. 潜在势能场影响并触发行人的移动决策.

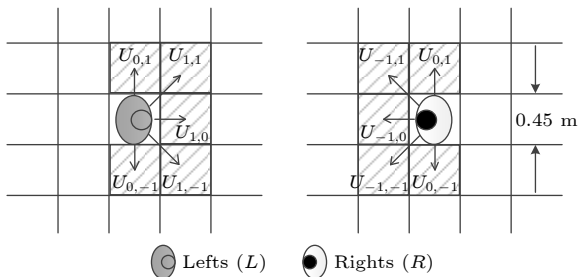


图 2 行人移动的方位及概率

Fig. 2. Pedestrian movement space and tendency.

如图 2 所示, 每个行人每时间步尝试移动至其周围的 5 个格子, 具体位置与其行走方向相关. $U_{i,j}$ 表示行人移动至格子 (i, j) 的转移概率. 对于任意一个格子, 行人对其设定和更新两个潜在势能场值: $E_{i,j}^L$ 和 $E_{i,j}^R$, 分别表示通过右向左行人和左向右行人进行赋值的潜在势能场值. 某个行人向其周围相邻格子的 (i, j) 的转移概率 $U_{i,j}$ 由该格子的 $E_{i,j}^L$ 和 $E_{i,j}^R$ 值确定. 每时间步每个行人向其影响距离内的所有格子设定潜在势能场值, 每个格子累计所有对其作用的行人的潜在势能场值, 并更新该时间步内格子的 $E_{i,j}^L$ 和 $E_{i,j}^R$. 下个时间步, 每个行人依据自己周围格子的 $E_{i,j}^L$ 和 $E_{i,j}^R$ 及其空闲情况, 确定自己移动到哪个格子或原地等待, 并进一步再次对其影响距离内的所有格子设定潜在势能场值. 行走方向为 d 的行人的转移概率如公 (1) 式所示.

$$U_{i,j}^d = E_{i,j}^d - E_{i,j}^{\bar{d}}, \quad (1)$$

其中, $U_{i,j}^d$ 表示方向为 d 的行人向格子 (i, j) 的转移概率, $E_{i,j}^d$ 表示格子 (i, j) 由方向为 d 的行人触发的潜在势能场值, $E_{i,j}^{\bar{d}}$ 表示格子 (i, j) 由方向为 \bar{d} 的行人触发的潜在势能场值.

通过比较转移概率, 行人移动到周围 5 个格子中转移概率最大的空闲单元格, 转移概率则取决于双向行人的影响. 行人移动可以通过持续更新潜在势能场值和转移概率值来实现. 潜在势能场值更新的详细规则见 3.2 节, 行人移动规则见 3.3 节. 模型的变量和参数见表 1.

表 1 参数及其物理意义

Table 1. Some parameters and the corresponding physical meanings.

符号	物理意义
$U_{i,j}^d$	行走方向为 d 的行人向格子 (i, j) 移动的转移概率, d 表示“右向左”或“左向右”
$E_{i,j}^d, E_{i,j}^{\bar{d}}$	取决于方向 d 或 \bar{d} 行人的格子 (i, j) 的潜在势能场值, 当 d 表示“右向左”, 则 \bar{d} 表示“左向右”, 反之亦然
$E_{i,j}^L, E_{i,j}^R$	取决于“右向左”或“左向右”行人的格子 (i, j) 的潜在势能场值, $E_{i,j}^L$ 表示“左向右”, $E_{i,j}^R$ 表示“右向左”
T	时间步
k	行人前进方向前方 k 个格子 (即受影响格子)
β	潜在势能场值的衰减率, $0 \leq \beta \leq 1$
i	行人的不耐烦水平
α	不耐烦水平增长率, $\alpha \geq 1$
γ	不耐烦水平衰减率, $0 \leq \gamma \leq 1$
δ	影响决策的不耐烦水平阈值, $\delta \geq 0$

3.2 潜在势能场值更新

对于每个格子, 两个潜在势能场值 E^l 和 E^r 分别由可对其施加影响的“左向右”和“右向左”行人进行更新. 行人可影响的格子包括其正在占据的格子以及未来时间步内倾向于占据的格子.

1) 行人影响其正在占据的格子

以图 3 中“左向右”行人 L 为例, 一旦 L 移动到其前方 3 个格子之一 (图 3(b) 和图 3(c)), 目标格子的 E^l 将被行人 L 更新为 $E^l + 1$; 如果 L 横跨至左侧或右侧的格子 (图 3(d)) 或停在目标格子不动 (图 3(e)), 目标格子的 E^l 将不会被行人 L 更新. 因此, E^l 的增加表示曾占用该格子的行人成功前进, 该格子值得后方其他与行人 L 同向的行人考虑选择.

2) 行人影响其未来时间步内倾向于占据的格子

如果行人前进, 前方 k 个格子为其未来时间步内倾向于占据的格子; 如果行人原地等待, 将尝试选择左前或右前的格子, 则其左前和右前格子为其未来时间步内倾向于占据的格子. 如图 4 所示, 每个时间步内, 一旦行人 L 移动到其前方 3 个格子之一 (图 4(b) 和图 4(c)), 或横跨至左侧或右侧的格子 (图 4(d)), 则其前方 k 个格子的 E^l 将被行人 L 更新为 $E^l + 1$; 如果 L 停在目标格子不动 (图 4(e)), 则其左前和右前格子的 E^l 将被行人 L 更新为 $E^l + 1$. 同时, 行人 R 前方 k 个格子的 E^r 将被行

人 R 更新为 $E^r + 1$. 因此, E^l 的增加表示该格子对“左向右”行人更具吸引力.

初始状态下无人移动时每个格子的潜在势能场值均为 0. 行人更新其正在占据的和倾向于占据的格子的潜在势能场值. 每个时间步内无人占用的格子的 E^l 和 E^r 衰减为 $E^l \times \beta$ 和 $E^r \times \beta$, β 为潜在势能场值的衰减率.

每个时间步内, 每个人为自己影响范围内的格子设定潜在势能场值, 每个格子则依据所有对其产生影响的行人的作用进行累加并更新其潜在势能场. 对于某个格子, 如果更多的“左向右”行人影响该格子, 或更多的“左向右”行人占据并经过该格子, 则该格子的 E^l 应当大于 E^r , 对于“左向右”而言其转移概率 $U = E^l - E^r$ 越大, 反之亦然.

3.3 行人移动规则

3.3.1 不考虑不耐烦的行人移动规则

运动过程中, 行人依据转移概率 $U_{i,j}$ 向前方、左前和右前 3 个格子中的一个移动. 如果 3 个格子均不空闲 (如被他人占用), 则原地等待直至这 3 个格子有空闲. 行人前进方向上前 k 个格子被视为倾向占用的影响区域. 不考虑不耐烦的基本移动规则如表 2 所列 (以“右向左”行人及由其确定的 E^r 为例).

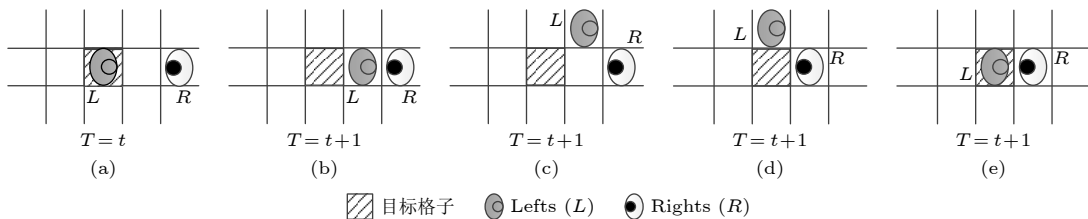


图 3 正在占据的格子的潜在势能场值更新

Fig. 3. Potential field value update for occupied cells.

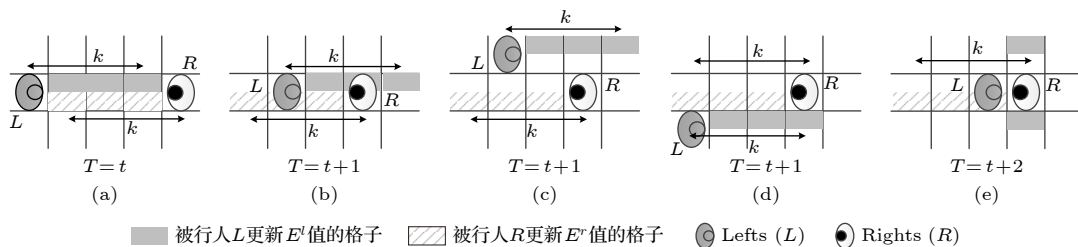


图 4 倾向于占据的格子的潜在势能场值更新

Fig. 4. Potential field value update for interested cells.

表 2 不考虑不耐烦情况下“右向左”行人 R 的基本运动规则

Table 2. Basic movement rules a pedestrian of Rights without considering impatience.

Step 1: 比较 $U_{-1,0}$, $U_{-1,1}$ 和 $U_{-1,-1}$, 具备最大 $U_{i,j}$ 值的空闲格子 (i, j) 被选为目标格子, 转Step 2; 如果3个格子均无空闲, 跳转至Step 4;
Step 2: 将当前格子的 E^r 值 $E_{0,0}^r$ 设为 $E_{0,0}^r + 1$, 转Step 3;
Step 3: 移向目标格子, 转Step 5;
Step 4: 停留在当前格子, 将右前格子的 $E_{-1,1}^r$ 设为 $E_{-1,1}^r + 1$, 将左前格子的 $E_{-1,-1}^r$ 设为 $E_{-1,-1}^r + 1$, 转Step 6;
Step 5: 将走行方向上前 k 个格子的 $E_{-k,0}^r$ 设为 $E_{-k,0}^r + 1$, 转 Step 6;
Step 6: 将所有空闲格子的 E^r 设为 $E^r \times \beta$.
对于“左向右”行人, E^l 的更新规则类似. 当多人选择同一目标格子时, 随机选择一人移动.

3.3.2 考虑不耐烦的行人移动规则

移动过程中, 如果 3 个格子均不空闲, 行人被迫原地等待, 直至 3 个格子中有格子空闲. 不耐烦情绪在行人原地等待无法移动时产生. 不同行人的不耐烦水平存在差异, 对于同一个人, 不耐烦水平也是变化的. 行人的不耐烦水平随着原地等待时间的增加而提升, 一旦其再次开始移动, 则不耐烦水平下降甚至消失.

令 i^t 代表行人在时间步 t 的不耐烦水平. 运动过程中, 每个行人依据即时状态更新其 i^t . 更新规则如下:

如果行人不移动, 令

$$i^{t+1} = \begin{cases} 1 & i^t = 0 \\ i^t \times \alpha & i^t > 0, \alpha \geq 1, \end{cases} \quad (2)$$

如果行人移动, 令

$$i^{t+1} = \begin{cases} 0 & i^t \times \gamma < 1, 0 \leq \gamma < 1 \\ i^t \times \gamma & i^t \times \gamma \geq 1, 0 < \gamma \leq 1, \end{cases} \quad (3)$$

其中 α ($\alpha \geq 1$) 为不耐烦水平增长率, γ ($0 \leq \gamma \leq 1$) 为不耐烦水平衰减率.

行人在不耐烦心理的作用下可能更积极地尝

试搜索空闲格子, 可能在停滞不前时选择横跨, 也可能引发更强烈的移动意愿. 本文针对这 3 种可能的不耐烦行为模式展开研究.

模式 1 不耐烦水平 i 作为横跨行为的触发条件 (图 5(a));

模式 2 不耐烦水平 i 作为直接参数用于确定多人竞争同一目标格子时的优先权 (图 5(b));

模式 3 不耐烦水平 i 用于计算转移概率, 并作为间接参数用于确定多人竞争同一目标格子时的优先权 (图 5(c)).

令 $\delta \geq 0$ 表示影响决策的不耐烦水平阈值. 如图 5(a) 所示, “右向左”行人 R 不耐烦水平为 $i > \delta$ 时, 该行人在前方 3 个格子不空闲时决定横跨换道, 即不耐烦水平大于阈值作为横跨行为的触发条件 (即模式 1). 图 5(b) 中, 目标格子的所有竞争者中, “左向右”行人 L (不耐烦水平为 $i > \delta$) 具备最高的不耐烦水平, 则 L 可以优先移动至该目标格子, 即不耐烦水平 i 作为直接参数用于确定多人竞争同一目标格子时的优先权 (即模式 2). 不考虑不耐烦因素时采用随机选择规则处理冲突 (表 2), 模式 2 则引入不耐烦水平处理冲突. 图 5(c)

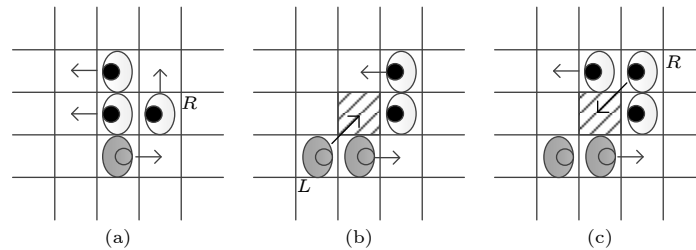


图 5 3 种不耐烦行为模式 (a) 模式 1, 不耐烦作为回避的触发因素 (R 不耐烦水平 $i > \delta$); (b) 模式 2, 不耐烦作为估计优先权的直接参数 (目标格子有 4 名潜在竞争者, 其中, L 的不耐烦水平 i 最高且大于 δ); (c) 模式 3, 不耐烦作为估计优先级的间接参数 (R 的 $i \times U_{i,j}$ 最高且不耐烦水平 i 大于 δ)

Fig. 5. Three patterns of impatient behaviors: (a) Pattern 1, impatience as a trigger of sidestep (i of $R > \delta$); (b) Pattern 2, impatience as a direct parameter to estimate priority (4 potential competitors for the target cell, L has the largest i (i of $L > \delta$) among all of the potential competitors for the target cell); (c) Pattern 3, impatience as an indirect parameter to estimate priority (R has the largest $i \times U_{i,j}$ (i of $R > \delta$) among all of the potential competitors for the target cell).

中, 行人依据 $i \times U_{i,j}$ 计算转移概率选择目标格子, 目标格子的所有竞争者中, “右向左”行人 R (不耐烦水平为 $i > \delta$) 具备最大的 $i \times U_{i,j}$ 值, 则 R 可以优先移动至该目标格子, 即不耐烦水平 i 作为间接参数用于确定多人竞争同一目标格子时的优先权 (即模式 3).

以一个“右向左”行人为例, 其考虑不耐烦行为的行动规则如表 3—表 5 所列.

4 试验结果分析

采用多智能体可编程建模平台 NetLogo 6.0.3^[44] 搭建仿真试验环境. 通过设置不同的参数组合, 在不同条件下实施双向行人仿真试验, 用于分析不同场景下不耐烦行为模式的作用. N 表示行人总数

(双向数量对等分别为 $N/2$). 定义密度为 N /格子总数, 以符号 ρ 表示. T 表示仿真时间步长.

图 6 给出了随着仿真时间步推进双向流步道自组织形成过程. 当 $T = 0$ 时, 一定数量的行人 ($\rho = 0.3$) 随机分布在 $22.05 \text{ m} \times 22.95 \text{ m}$ 的空间内, 双向行人数量对等. 行人依据表 2 所列的规则运动. 当 $T = 25$ 时, 步道初步成型, $T = 100$ 时, 步道形态更加清晰. 可见, 前摄型潜在势能场的触发和更新对于捕捉双向行走过程中的自组织效应是有效的.

4.1 前摄型潜在势能场及不耐烦效应的作用分析

仿真试验针对 3 个不耐烦行为模式及一个不考虑不耐烦的基本模式进行对比分析. 图 7 给出了

表 3 模式 1 的规则
Table 3. Rules of Pattern 1.

Step 1: 比较前进方向 3 个格子的 $U_{-1,0}$, $U_{-1,1}$ 和 $U_{-1,-1}$, 具备最大 $U_{i,j}$ 的空闲格子 (i, j) 被选为目标格子, 转 Step 2; 如果 3 个格子均非空且 $i > \delta$, 跳转 Step 7; 否则, 跳转 Step 4;
Step 2—Step 6: 与表 2 规则中的 Step 2—Step 6 相同;
Step 7: 比较左右横向格子的 $U_{0,1}$ 和 $U_{0,-1}$, 具备最大 $U_{i,j}$ 的空闲格子 (i, j) 被选为目标格子, 转 Step 2; 如果两个格子均非空, 跳转 Step 4.

表 4 模式 2 的规则
Table 4. Rules of Pattern 2.

Step 1: 比较前进方向 3 个格子的 $U_{-1,0}$, $U_{-1,1}$ 和 $U_{-1,-1}$, 具备最大 $U_{i,j}$ 的空闲格子 (i, j) 被选为目标格子, 判断该行人是否在竞争者中具备最大 i ($i > \delta$), 是转 Step 2, 否跳转 Step 7; 如果 3 个格子均非空, 跳转 Step 7;
Step 2—Step 6: 与表 2 规则中的 Step 2—Step 6 相同;
Step 7: 依次针对该行人周边的空闲格子判断该行人是否在竞争者中具备最大 i ($i > \delta$), 是则对应的格子选为目标格子, 转 Step 2; 否跳转 Step 4.

表 5 模式 3 的规则
Table 5. Rules of Pattern 3.

Step 1: 比较前进方向 3 个格子的 $U_{-1,0}$, $U_{-1,1}$ 和 $U_{-1,-1}$, 具备最大 $U_{i,j}$ ($i \leq \delta$) 或 $U_{i,j} \times i$ ($i > \delta$) 的空闲格子 (i, j) 被选为目标格子, 判断该行人是否在竞争者中具备最大的 $U_{i,j}$ ($i \leq \delta$) 或 $U_{i,j} \times i$ ($i > \delta$), 是转 Step 2, 否跳转 Step 7; 如果 3 个格子均非空, 跳转 Step 7;
Step 2—Step 6: 与表 2 规则中的 Step 2—Step 6 相同;
Step 7: 依次针对该行人周边的空闲格子判断该行人是否在竞争者中具备最大 $U_{i,j}$ ($i \leq \delta$) 或 $U_{i,j} \times i$ ($i > \delta$), 是则对应的格子选为目标格子, 转 Step 2; 否跳转 Step 4.

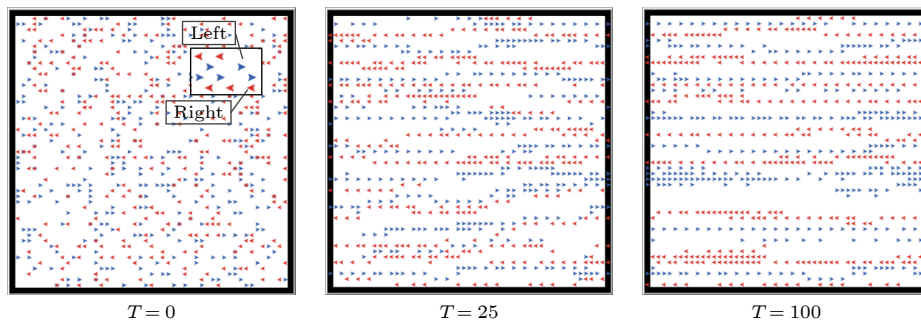
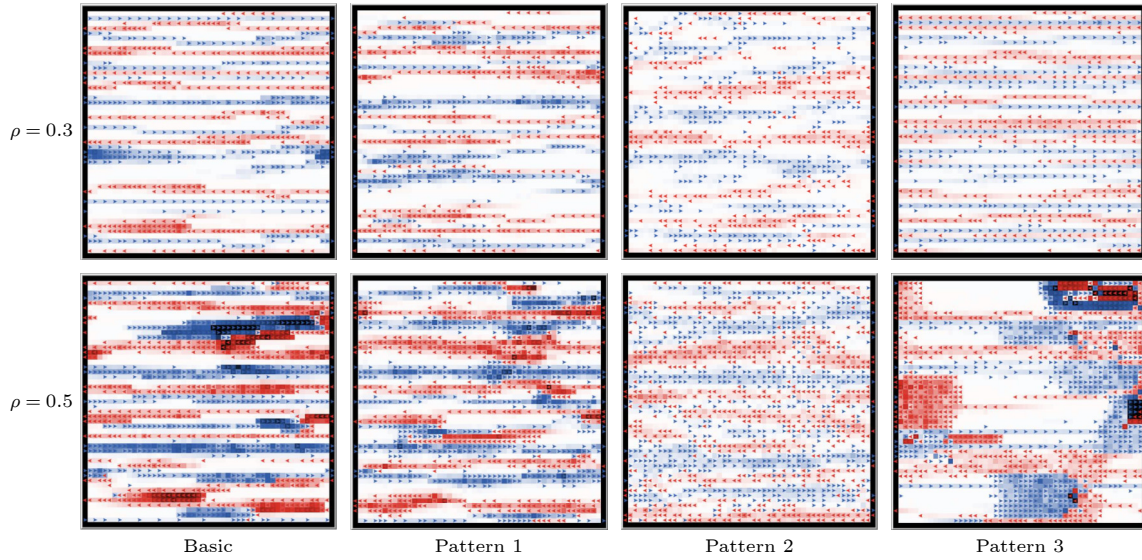
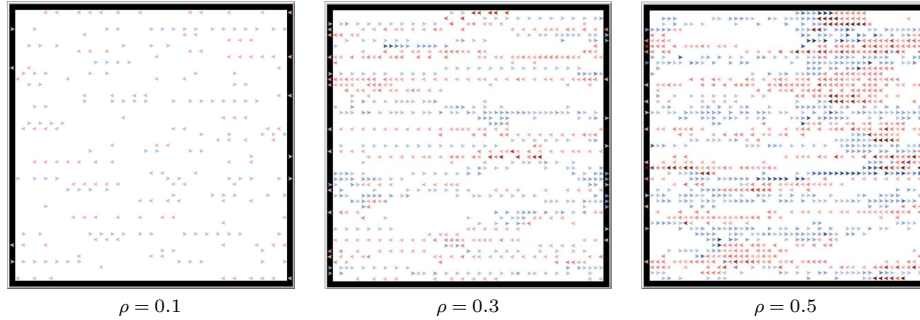


图 6 基本规则下的步道形成

Fig. 6. Lane formation with Basic movement rules ($\rho = 0.3$).

图 7 4 种场景下形成的潜在势能场 ($T = 100$)Fig. 7. Potential field generation under 4 scenarios ($T = 100$).图 8 模式 1 下不同密度水平个体的不耐烦水平 ($T = 50$)Fig. 8. Individual impatient level under different density levels with Pattern 1 ($T = 50$).

不同密度水平下行人触发的潜在势能场的动态情形. 较深的颜色代表该格子具备较大的潜在势能场值. 图中 Basic 代表基本模式 (不考虑不耐烦行为), Pattern 1—3 分别代表模式 1—3 (考虑不耐烦行为). 总体而言, 基本模式下行人相对集中分布, 同向行人由于排队停滞而产生局部的轻微拥堵, 并触发了较强的潜在势能场. 考虑不耐烦的 3 个模式下行人则相对分散, 步道之间间隙更小, 边界也相对模糊. 考虑不耐烦行为时, 不同程度的拥堵主要源自对向行人的面对面冲突.

图 8 给出了模式 1 下不同密度水平行人个体的不耐烦水平. 具有较高不耐烦水平的行人呈现较深的颜色. 当密度较小时 ($\rho = 0.1$), 没有停滞和等待, 不耐烦水平较低. 密度较大时 ($\rho = 0.5$), 拥堵较明显, 部分行人开始变得不耐烦, 平均不耐烦水平提升.

4.2 不耐烦行为模式及参数的作用分析

4.2.1 不耐烦行为模式的作用分析

用于结果分析的统计指标定义如表 6 所列. 每次仿真试验前 50 个时间步用于启动试验, 指标的记录和统计基于后 800 时间步的情况. 仿真试验采用的参数取值为 $k = 3$, $\beta = 0.8$, $\alpha = 1.5$, $\gamma = 0.5$, $\delta = 0$. 依据 3.1 节的定义, 试验参数取值反映了前摄影响范围为前方 3 个格子, 不耐烦水平直接影响决策, 并且不耐烦作用力量为中等水平的情况. 参数条件变化及对应的灵敏度分析见 4.2.2 节, 4.2.3 节和 4.3 节.

图 9 给出了速度 (Speed) 和流率 (Flow rate) 在不同密度水平下的变化曲线, 本研究涉及的基本模式 (Basic) 和 3 个不耐烦行为模式 (Pattern 1—3 分别代表模式 1—3) 与经典的 CA 模型 (Blue, 2001) 进行对比. 结果表明: 基本模式与经典 CA

表 6 统计指标及其含义
Table 6. Definitions of statistic index.

指标	含义	计算方法
Speed	速度	每一时间步向前进方向3个邻居格子(正前、左前、右前)移动的人数比总计人数
Flow rate	流率	每一时间步移动穿过右侧边界的“左向右”行人数量与移动穿过左侧边界的“右向左”行人数量之和
Waiting time	等待时间	行人原地停滞等待的时间步之和比总计人数

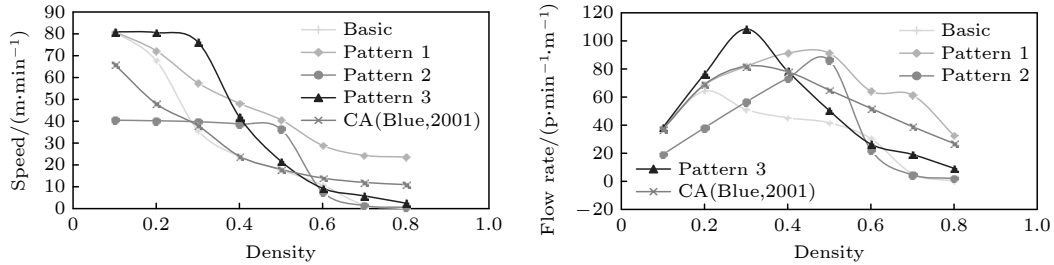


图 9 不同密度水平下速度和流量的差异
Fig. 9. Comparison of speed and flow rate under different density levels.

模型的趋势最为接近. 而考虑不耐烦的 3 种模式则表现出较大差异. 模式 1 显示了与经典 CA 模型类似的速度曲线趋势, 但具有更高的绝对值. 这样的曲线形态揭示了合理的横跨换道行为有助于提高双向行人流的效率. 模式 2 在低密度和高密度下的速度和流率均较低, 意味着如果不耐烦水平决定行人争抢优先空间的竞争力, 则对行走效率产生负面影响. 这与图 12 中步道较宽且边界较为模糊的形态具有一定关联. 模式 3 在密度较低 ($\rho = 0.2, 0.3$) 时具备最高的速度和流率, 但密度大于等于 0.4 时却突然恶化. 这与图 12 中呈现的形态一致, $\rho = 0.3$ 时行人有条不紊地移动, $\rho = 0.5$ 则出现明显拥塞.

如图 10 所示, 大多数密度水平下基本模式等待时间最长, 表明不耐烦行为对减少行人的平均等待时间有积极的影响. 模式 1 在大多数密度下等待时间最短, 在高密度时尤为明显. 模式 2 在较低和较高密度下均具备 3 种不耐烦模式中最长的等待时间. 模式 3 在较低的密度下获得最短的等待时间, 但随着密度大于 0.4 而快速增加.

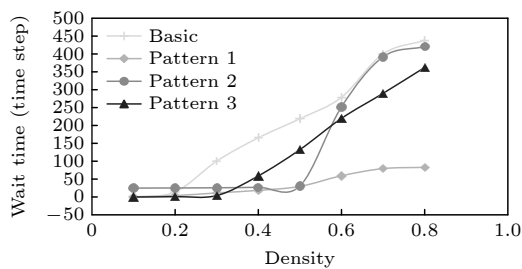


图 10 不同密度水平下的等待时间差异
Fig. 10. Wait time under different density levels.

4.2.2 参数 δ 的作用分析

参数 $\delta \geq 0$ 表示不耐烦水平影响决策的阈值. $\delta = 0$ 表示只要行人不耐烦 ($i > 0$), 就依据相应的模式规则触发其不耐烦行为. $\delta > 0$ 表示行人只有在不耐烦水平 i 达到特定阈值 δ 时, 才会按照不耐烦模式规则触发其行为. 图 11 给出了在不同 δ 值作用下速度随密度的变化关系. 在不同的不耐烦模式下, δ 对速度的影响明显不同. $\delta = 0$ 时模式 1 具备所有密度水平下的最高速度, 而 $\delta > 0$ 时其具体取值对速度的影响不大. 对于模式 2, 当 $\rho \leq 0.5$ 时, $\delta > 0$ 会导致明显的速度下降, 但 $\rho = 0.6$ 时速度值会随 δ 值的增大而不同程度地增大. δ 的取值对模式 3 的速度影响不大.

4.2.3 参数 α 和 γ 的作用分析

参数 α 和 γ 分别表示不耐烦水平的增长率和衰减率. $\alpha = 1.2$ 和 $\gamma = 0.2$ 表示不耐烦水平缓慢增加和快速下降, 说明不耐烦的作用力量相对较弱. 而 $\alpha = 1.8$ 和 $\gamma = 0.8$ 则代表不耐烦水平快速增加并缓慢下降, 说明不耐烦的作用力量相对较强.

对于模式 1(图 12(a)), 更强的不耐烦作用力得到更高的速度, 反之, 较弱的不耐烦作用力则得到较低的速度. α 和 γ 不同取值时得到的等待时间差异不明显(图 12(b)). 对于模式 2(图 12(c) 和图 12(d)), 最弱的不耐烦作用力 ($\alpha = 1.2$ 和 $\gamma = 0.2$) 在所有密度水平下均得到最低的速度和最长的等待时间. 而最强的不耐烦作用力 ($\alpha = 1.8$ 和 $\gamma = 0.8$) 只在 $\rho \leq 0.4$ 时才能获得最高速度和最短的等待时间.

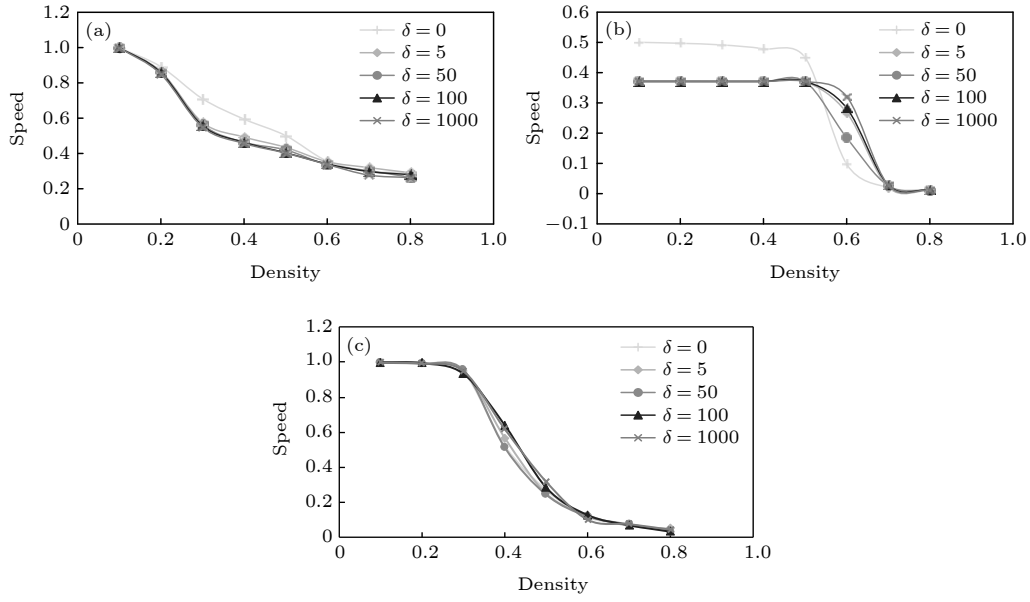


图 11 不同 δ 情况下速度和密度的关系 (a) 模式 1; (b) 模式 2; (c) 模式 3
Fig. 11. Speed vs. Density under different δ : (a) Pattern 1; (b) Pattern 2; (c) Pattern 3.

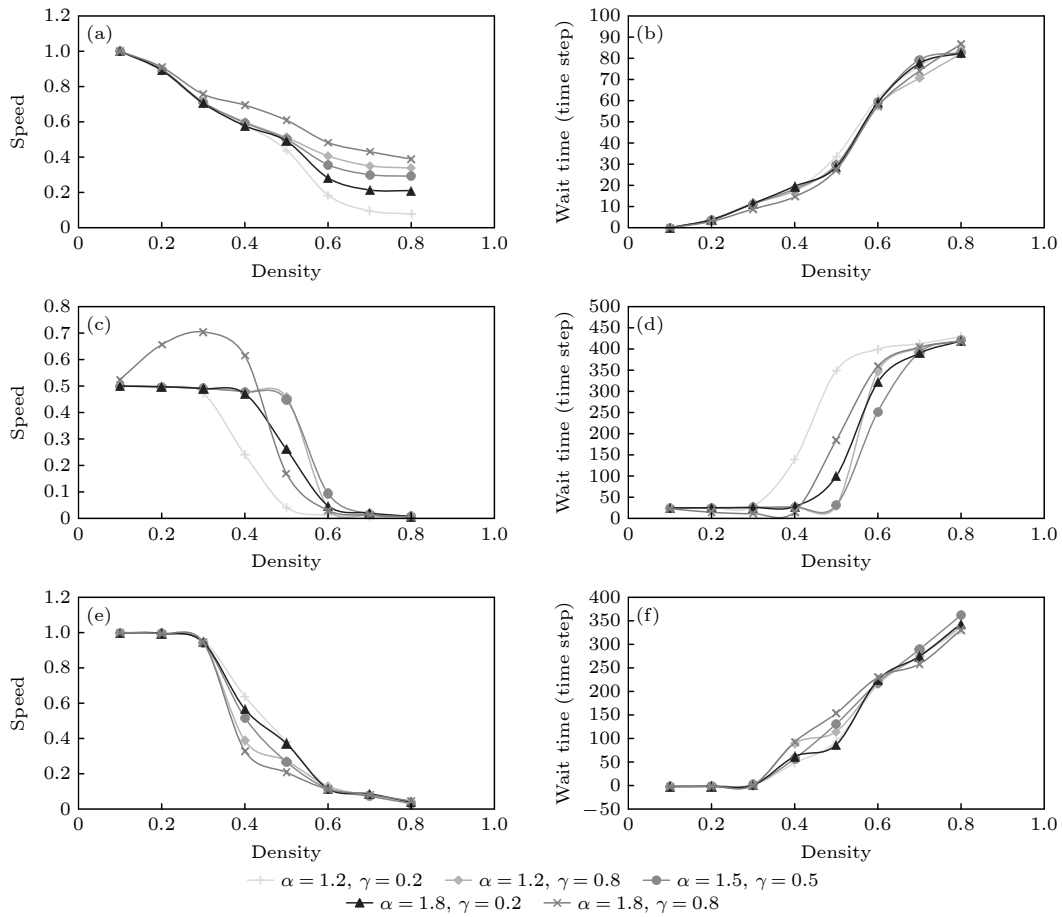


图 12 不同 α 和 γ 下的速度和等待时间随密度的变化趋势 (a) 模式 1 的速度; (b) 模式 1 的等待时间; (c) 模式 2 的速度;
(d) 模式 2 的等待时间; (e) 模式 3 的速度; (f) 模式 3 的等待时间

Fig. 12. Speed and wait time vs. density under different α and γ : (a) Speed with Pattern 1; (b) wait time with Pattern 1; (c) speed with Pattern 2; (d) wait time with Pattern 2; (e) speed with Pattern 3; (f) wait time with Pattern 3.

当 $\rho \geq 0.5$ 时, 中等程度的不耐烦作用力表现更好. 模式 3 则反映出不同的特征 (图 12(e) 和图 12(f)). 不耐烦作用力的增长和衰减对 $\rho = 0.4-0.5$ 的速度和等待时间表现出相反的影响, 即最弱的不耐烦作用力得到最高的速度和最长的等待时间, 而最强的不耐烦作用力则得到最低的速度和最短的等待时间.

4.3 慢速行人作用分析

考虑行人群体存在速度差异, 部分行人 (如老人或行动不便者) 速度较低. 与正常速度的行人相比, 假设这类慢速行人对前方区域的影响范围较小, 且其不耐烦的作用力量相对较弱. 本模型正常速度行人每时间步移动一格, 即 0.45 m, 3 个时间步相当于 1 s, 走行速度约为 1.35 m/s; 慢速行人每 2 个时间步移动一格, 走行速度约为 0.675 m/s. 在仿真试验中, 慢速行人的行为参数取值为 $k = 1$, $\alpha = 1.2$, $\gamma = 0.2$. 正常速度行人参数取值为 $k = 3$, $\alpha = 1.5$, $\gamma = 0.5$. 图 13 给出了仿真试验中连续时间步内捕捉到的正常速度行人对慢速行人的超越过程.

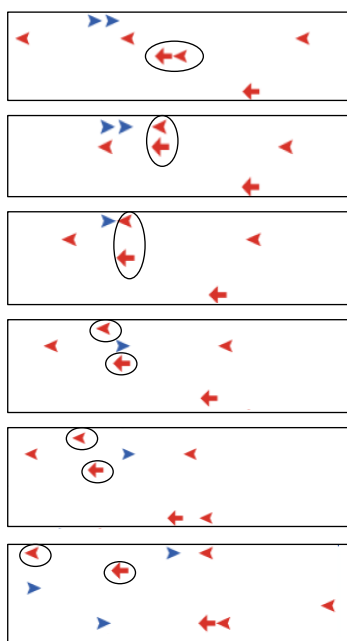


图 13 仿真试验中正常速度行人对慢速行人的超越过程 (局部图) 注: 其中三角形代表正常速度行人, 箭头形代表慢速行人

Fig. 13. Overtaking process between pedestrians with normal speed and slower speed (Partial screenshot) Note: the triangles represent pedestrians with normal speed and the arrows represent pedestrians with slower speed.

设定慢速行人占总人数比例 S 分别为 0%, 10% 和 20%, 试验结果如图 14 所示. 与全体行人均为单一正常速度 ($S = 0\%$) 相比, 当 10% 或 20% 的行人为慢速行人时, 行人的平均速度普遍降低, 但慢速行人对不同的不耐烦作用模式的影响存在差异. 模式 1 的速度衰减在各密度水平下均较为显著; 模式 2 的速度衰减在密度大于或等于 0.5 时才较为明显; 而模式 3 的速度衰减则在各密度水平下均相对平缓. 说明在特定密度水平下, 适度不耐烦行为对于缓解低比例慢速行人的冲击具备积极作用.

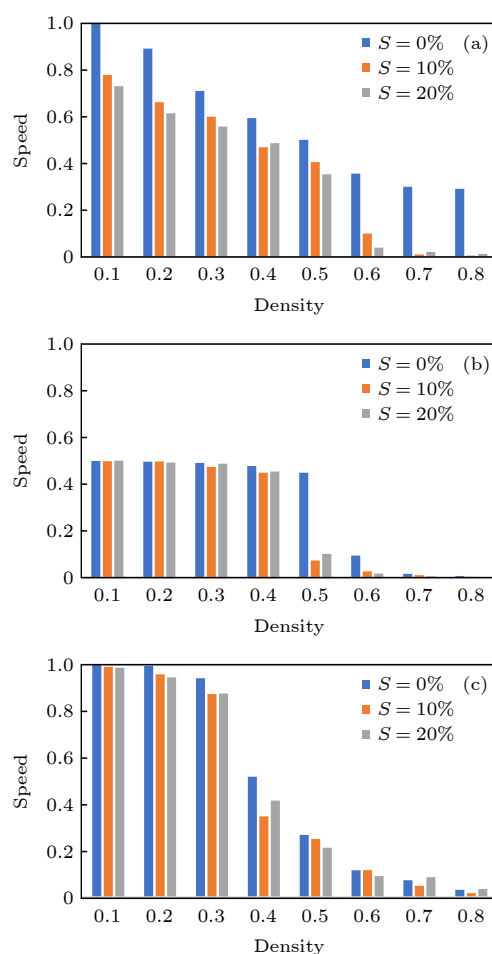


图 14 不同慢速行人比例下速度和密度的关系 (a) 模式 1; (b) 模式 2; (c) 模式 3

Fig. 14. Speed vs. density under different proportion of slower pedestrians: (a) Pattern 1; (b) Pattern 2; (c) Pattern 3.

4.4 步道宽度的作用分析

为了研究不耐烦行为模式在不同步道宽度 W 条件下的表现, 选取 3 种不同宽度进行仿真试验. 其中 $W = 22.05$ m 为理论试验取值, 依据《地铁设计规范》(GB50157-2013) 中规定岛式站台最

小宽度为 8 m, 以及《铁路旅客车站设计规范》(TB 10100-2018) 中规定特大型站旅客进站、出站通道最小净宽 12 m, 结合本模型的单元格尺寸 0.45 m, 分别取 $W = 8.1$ m, 11.7 m; 步道长度统一为 22.95 m.

实验结果显示, 以 $W = 22.05$ m 的试验结果为基础, 随着步道宽度的减小, 各密度水平下的速度和流率基本呈现减小趋势, 密度高时速度和流率的衰减尤为明显. 当步道宽度减小为 11.7 m 时, 双向流率降低了约 44%—79%; 当步道宽度减小为 8.1 m 时, 双向流率降低了约 63%—86%. 对比几种行为模式, 考虑不耐烦行为的模式 1 在各密度水平下的平均速度衰减最为明显, 但两个宽度水平下衰减程度相差不大, 衰减率分别为 38.4% ($W = 8.1$ m) 和 36.7% ($W = 11.7$ m); 模式 3 的速度衰减则对宽度较为敏感, 衰减率分别为 20.3% ($W = 8.1$ m) 和 12.9% ($W = 11.7$ m).

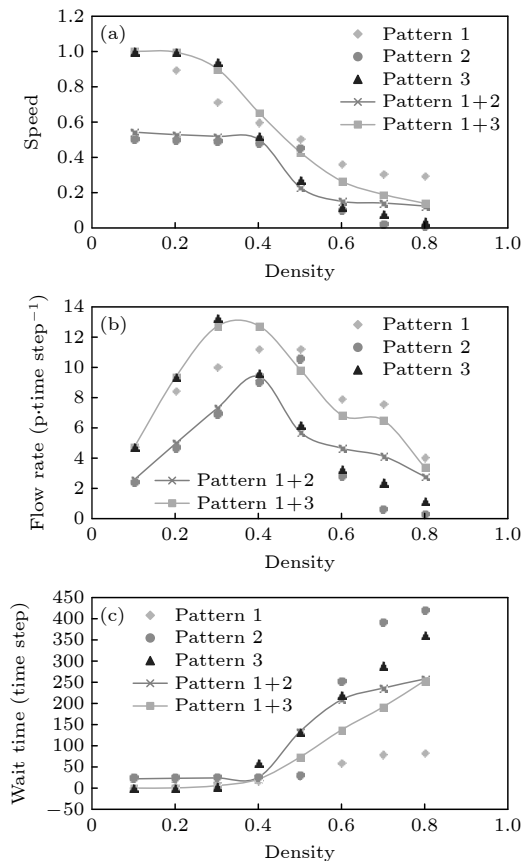


图 15 混合模式不同密度下速度、流率、等待时间的变化 (a) 速度与密度关系; (b) 流率与密度关系; (c) 等待时间与密度关系

Fig. 15. Speed, flow rate and wait time under different density levels with mix impatience patterns: (a) Speed; (b) flow rate; (c) wait time.

4.5 不耐烦行为模式共存下的作用分析

行人在产生不耐烦情绪时, 可能会采取不同的行为模式. 仿真试验模拟采用不同行为模式的行人共存条件下的双向流行为, 以研究模式共存条件的作用效果. 图 15 中“Pattern 1 + 2”和“Pattern 1 + 3”分别表示行人中随机选择一半的人采用行为模式 1, 另一半人采用行为模式 2 或 3 的情形. 如图 15 所示, 在混合模式下, 速度、流率和等待时间的曲线形态、最大值和临界值均与单一模式不同. 基本上, 混合模式的各项统计值是两个单一模式的中间值.

5 结 论

本文构建了不耐烦行为模型研究不耐烦行为对双向行人流的影响. 通过定义由个人产生和更新的潜在势能场表现行人之间的前摄效应, 并触发行人的行为决策. 在行人运动过程中, 根据瞬时状态测量、记录和更新每个人的不耐烦水平, 并通过可控参数调节不耐烦的变化动态. 模型支持对兼顾个体多样性和运动过程动态性的不耐烦水平的实时表达, 并将其作为行人个性化行为的触发因素. 本文提出并比较了 3 种不同的不耐烦行为模式.

基本图和相关统计数据揭示了 3 种不耐烦行为模式在不同情况下的作用效果. 模式 1 使双向流具备最高的速度和流率、最短的等待时间; 模式 2 具备最低的速度和流率, 且在大多数密度水平下等待时间最长; 模式 3 在较低的密度水平下具备最高的速度和流率以及最短的等待时间, 但在高密度水平下各项指标都急剧恶化. 不耐烦水平影响决策的阈值 δ , 对不同的不耐烦行为模式有不同的影响. 由不耐烦水平增长率 α 和衰减率 γ 表达的不耐烦水平的作用力量对行人双向流的效率也具备影响. 通过调整前摄效应和不耐烦水平的相关参数, 模型支持对慢速行人差异化不耐烦行为的表现. 在特定密度水平下, 适度不耐烦行为对于缓解低比例慢速行人对双向流效率的冲击具备积极作用. 同时, 不同的不耐烦行为模式在步道宽度减小时的速度衰减程度也体现出差异性. 在现实世界中, 人群通常由不耐烦水平各异的行人组成, 这些行人按照不同的不耐烦行为模式进行行为决策. 本文中混合不耐烦模式场景的试验揭示了双向流基本图的不同

特征. 更加全面的结论有赖于进一步深入的研究分析.

本文构建的行人模型为探索不耐烦行为对双向行人流的作用提供了量化方法, 试验结果揭示了不耐烦行为模式对双向流基本图关键因素的作用, 为理解个体个性化行为对群体运动效率的作用机理提供了理论支持. 由于定量观测行人的不耐烦行为特征较为困难, 本文的研究局限于对特征规律的理论探讨, 后续研究工作中可借助虚拟现实等试验手段获取行人不耐烦心理及行为决策的动态特征, 有望进一步标定和完善本文提出的模型.

参考文献

- [1] Lam W H K, Cheung C Y 2000 *Journal of Transportation Engineering-asce* **126** 343
- [2] Lam W H K, Lee J Y S, Cheung C Y 2002 *Transportation* **29** 169
- [3] Corbetta A, Meeusen J, Lee C M, Toschi F 2016 *In Pedestrian and Evacuation Dynamics* (He Fei: University of Science and Technology of China Press) pp18–24
- [4] Kretz T, Gr A, Kaufman M, Mazur F, Schreckenberg M 2006 *J. Stat. Mech:Theory Exp.* **10** 10001
- [5] Helbing D, Buzna L, Johansson A, Werner T 2005 *Transp. Sci.* **39** 1
- [6] Zhang J, Klingsch W, Schadschneider A, Seyfried A 2012 *J. Stat. Mech:Theory Exp.* **2** P02002
- [7] Xue S Q, Jiang R, Jia B, Wang Z Y, Zhang X 2019 *Transp. B Transp. Dyn.* **7** 169
- [8] Jiang Y Q, Wong S C, Zhang P, Liu R X, Duan Y L, Choi K 2012 *APPLIED MATHEMATICS AND COMPUTATION* **218** 6135
- [9] Hoogendoorn S P, Wageningen-Kessels F L, van Daamen W, Duives D C 2014 *Physica A* **416** 684
- [10] Nagai R, Fukamachi M, Nagatani T 2005 *Physica A* **358** 516
- [11] Blue V J, Adler J L 2001 *Transp. Res. Part B* **35** 293
- [12] Helbing D, Molnar P 1995 *Phys. Rev. E* **51** 4282
- [13] Nagatani T 2009 *Phys. Lett. A* **373** 2917
- [14] Nowak S, Schadschneider A 2012 *Phys. Rev. E* **85** 066128
- [15] Nagatani T 2012 *Appl. Math. Modell.* **36** 702
- [16] Li M H, Yuan Z Z, Xu Y, Tian J F 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 018903 (in Chinese) [李明华, 袁振洲, 许琰, 田钧方 2015 物理学报 **64** 018903]
- [17] Feliciani C, Nishinari K 2016 *Phys. Rev. E* **94** 032304
- [18] Alonso-Marroquín F, Busch J, Chiew C, Lozano C, Ramírez-Gómez Á 2014 *Phys. Rev. E* **90** 063305
- [19] Kwak J, Jo H H, Luttinen T, Kosonen I 2017 *Phys. Rev. E* **96** 022319
- [20] Feliciani C, Nishinari K 2016 *Physica A* **451** 135
- [21] Jin C J, Jiang R, Yin J L, Dong L Y, Li D W 2017 *Physica A* **482** 666
- [22] Fu L B, Song W G, Lo S M 2016 *Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **42** 682
- [23] Haghani M, Sarvi M, Shahhoseini Z 2019 *Transp. Res. Part A* **122** 51
- [24] Fu Z J, Zhou X D, Zhu K J, Chen Y Q, Zhuang Y F, Hu Y Q, Yang L Z, Chen C K, Li J 2015 *Physica A* **420** 294
- [25] Weng W G, Chen T, Yuan H Y, Fan W C 2006 *Phys. Rev. E* **74** 036102
- [26] Fu Z J, Zhou X D, Chen Y Q, Gong J H, Peng F, Yan Z D, Zhang T L, Yang L Z 2014 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **20** 832
- [27] Zhang D W, Zhu H T, Hostikka S, Qiu S 2019 *Physica A* **525** 72
- [28] Wu X S, Yue H, Liu Q M, Zhang X, Shao C F 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 068901 (in Chinese) [武鑫森, 岳昊, 刘秋梅, 张旭, 邵春福 2021 物理学报 **70** 068901]
- [29] Tang T, Huang H, Shang H 2012 *Nonlinear Dyn.* **67** 437
- [30] Li Y X, Wu Z X, Guan J Y 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 043250
- [31] Yang C, Chen Q, Chen L 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 240504 (in Chinese) [杨灿, 陈群, 陈璐 2019 物理学报 **68** 240504]
- [32] Kirchner A, Nishinari K, Schadschneider A 2003 *Phys. Rev. E* **67** 056122
- [33] Hidalgo R C, Parisi D R, Zuriguel I 2017 *Phys. Rev. E* **95** 042319
- [34] Helbing D, Farkas I J, Vicsek T 2000 *Nature* **407** 487
- [35] Pastor J M, Garcimartín A, Gago P A, Peralta J P, Martín-Gómez C, Ferrer L M, Maza D, Parisi D R, Pugnaloni L A, Zuriguel I 2015 *Phys. Rev. E* **92** 062817
- [36] Suma Y, Yanagisawa D, Nishinari K 2012 *Physica A* **391** 248
- [37] Jin H, Guo R Y 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 020501 (in Chinese) [金辉, 郭仁拥 2019 物理学报 **68** 020501]
- [38] Ma Y P, Zhang H 2020 *Chin. Phys. B* **29** 038901
- [39] Degond P, Appert-Rolland C, Moussaïd M, Pettré J, Theraulaz G 2013 *J. Stat. Phys.* **152** 1033
- [40] Shi M, Eric W L M, Ma Y, Cao R F 2019 *Transp. B Transp. Dyn.* **7** 1651
- [41] Shi M, Eric W L M, Ma Y 2019 *Simul. Modell. Pract. Theory* **94** 367
- [42] Yu Y F, Song W G 2007 *Phys. Rev. E* **75** 046112
- [43] Yanagisawa D, Kimura A, Tomoeda A, Nishi R, Suma Y, Ohtsuka K, Nishinari K 2009 *Phys. Rev. E* **80** 036110
- [44] Wilensky U <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/index.shtml> [2021-8-20]

Impatient behavior modelling and simulation of bidirectional pedestrian flow dynamics based on proactive effect^{*}

Zhang Qi[†] Qu Jing

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 22 August 2021; revised manuscript received 17 December 2021)

Abstract

Impatience is a psychological factor that varies from person to person and constantly changes with the environment in real time. In this paper, a model based on cellular automaton is presented to investigate the dynamics of bi-directional flow, with considering individual impatient behaviors. Potential field is defined to represent pedestrian's interest in available space, which provides an approach to the description of proactive mechanism in bi-directional flow. By formulating the dynamics with controllable parameters, individual impatience level is measured, recorded and updated to trigger off the personalized behaviors. Three different patterns of impatient behaviors are modeled and compared with each other. Simulation results demonstrate the different performances of impatient behavior patterns. Comparing with the situation without considering impatience, bidirectional flow is improved in terms of speed, flow rate and waiting time when impatience level is used to triggers off the sidestep behavior. However, the collective performance shows a deterioration at a most density level when impatience is regarded as a direct parameter to estimate the priority to a target cell among several competitors. The parameter sensitivity analysis of impatience intensity and decision threshold shows the flexibility of the model to present the impatience effect. Simulation experiments under different scenarios also reveal the effects of low proportion of slower pedestrians, walkway width and mixed behavior mode on the efficiency of pedestrian counter flow.

Keywords: cellular automaton, bidirectional pedestrian flow, fundamental diagram, impatient behavior

PACS: 05.50.+q, 05.65.+b, 07.05.Tp

DOI: 10.7498/aps.71.20211537

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62003027), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. L201013), the Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, China (Grant No. K201904), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. 2020JBZD007).

[†] Corresponding author. E-mail: qzhang6@bjtu.edu.cn