



## 步行通道内人流拉链现象的生成机理与仿真研究

武鑫森 岳昊 刘秋梅 张旭 邵春福

### Generation mechanism and simulation research of zipper phenomenon of pedestrian flow in corridor

Wu Xin-Sen Yue Hao Liu Qiu-Mei Zhang Xu Shao Chun-Fu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 068901 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201626

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201626>

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

行人跟踪算法及应用综述

Review of pedestrian tracking: Algorithms and applications

物理学报. 2020, 69(8): 084203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191721>

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>

基于演化博弈论的行人与机动车冲突演化机理研究

Evolution mechanism of conflict between pedestrian and vehicle based on evolutionary game theory

物理学报. 2018, 67(19): 190201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180534>

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>

基于精细微观交通流模型的信号交叉口人-车相互干扰研究

Pedestrian-vehicle interference at a signalized crossing based on detailed microscopic traffic flow models

物理学报. 2019, 68(24): 240505 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191306>

考虑在能见度受限下行人跟随行为特性的建模与模拟

Modeling and simulation of following behaviors of pedestrians under limited visibility

物理学报. 2019, 68(24): 240504 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190707>

# 步行通道内行人流拉链现象的生成机理与仿真研究\*

武鑫森<sup>1)</sup> 岳昊<sup>1)†</sup> 刘秋梅<sup>1)</sup> 张旭<sup>2)</sup> 邵春福<sup>1)</sup>

1) (北京交通大学, 综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044)

2) (河南工业大学土木建筑学院, 郑州 450001)

(2020年9月30日收到; 2020年10月23日收到修改稿)

以步行通道内的单向行人流为研究对象, 分析研究行人拉链现象的生成机理, 并建立基于 Voronoi 图的速度修正模型对其仿真研究. 首先, 从行人追求视野最佳和步行舒适的角度分析拉链现象的生成机理, 以行人的视野关注和视野遮挡描述影响行人移动过程中产生拉链偏移的因素; 以行人局部密度描述行人的步行舒适度; 引入拉链敏感系数描述行人客观偏移的意愿程度; 提出单个行人侧向偏移的机制, 获得行人最佳的偏移位置. 然后, 构建基于 Voronoi 图的行人速度修正仿真模型, 考虑行人是否有偏移倾向的主观意愿, 并嵌入偏移规则, 模拟再现行人的拉链现象. 仿真发现: 行人的拉链层数与通道宽度成正比, 该模型速度密度关系图与实证数据吻合较好; 与不考虑拉链效应相比, 倾向主动进行侧向偏移的行人占比越大, 越有助于提高通道内行人的移动速度、舒适度和空间利用率.

**关键词:** 行人动力学, 行人仿真, 拉链效应, Voronoi 图

**PACS:** 89.40.-a, 05.65.+b, 07.05.Tp

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201626

## 1 引言

随着社会发展, 公共空间的人群集散问题越来越受到人们关注, 对行人动力学的研究也日益增多. 揭示行人动力学的运动特征和相关规律, 对合理指导步行设施设计<sup>[1]</sup>, 科学制定人群组织和疏散策略<sup>[2]</sup>, 有效诱导设施内行人流移动, 避免和缓解行人流拥堵等具有重要意义. 基于行人微观行为的仿真研究, 可以定性定量地分析行人流特性<sup>[3]</sup>, 再现人群宏观现象, 避免紧急情况下潜在的安全问题, 以及节约人力成本、增加效率<sup>[4]</sup>.

近年来, 基于微观行为的行人流仿真模型主要包括: 离散仿真模型和连续仿真模型. 离散仿真模

型, 即仿真时间和空间离散, 如元胞自动机模型<sup>[5-7]</sup>、领域模型<sup>[8]</sup>、格子气模型<sup>[9]</sup>、动态参数模型<sup>[10]</sup>等; 连续仿真模型, 即仿真时间离散, 而仿真空间连续, 如社会力模型<sup>[11-23]</sup>、离心力模型<sup>[24,25]</sup>等. 从仿真方法的角度, 可以分为基于力和基于启发式方法的仿真模型<sup>[26-29]</sup>. 研究对象主要包括步行通道或疏散空间等步行设施内, 单向或双向行人通过流<sup>[12]</sup>、疏散流<sup>[13]</sup>. 疏散场景包括: 行人视线受影响<sup>[11]</sup>, 多安全出口<sup>[14]</sup>或存在空间障碍物<sup>[15]</sup>等. 仿真研究再现了许多行人流自组织现象, 例如: 自动渠化<sup>[11,12]</sup>、通道形成<sup>[11,12]</sup>、成拱<sup>[11,12]</sup>、快即是慢<sup>[7]</sup>、避让三角区<sup>[16]</sup>、拉链效应<sup>[30,31]</sup>等.

在基于力仿真模型方面, 经典模型是社会力仿真模型, 提出假想社会力的概念来描述行人之间的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 71771013, 71621001)、国家重点研发计划 (批准号: 2019YFF0301403)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2019JBM041) 和新加坡教育部学术研究基金第二层次 (批准号: MOE2016-T2-1-044) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [hyue@bjtu.edu.cn](mailto:hyue@bjtu.edu.cn)

相互作用, 行人运动被定量描述为受自驱动力、排斥力和接触摩擦力等合力的影响<sup>[11]</sup>. 传统社会力模型可以克服元胞自动机模型中行人移动方向和速度固化等问题, 模拟再现更平滑的行人移动轨迹, 更好地定量描述行人之间的动态特性和相互作用; 尽管在模拟行人微观行为与再现宏观现象方面有较强的优势, 但仍然有不足, 例如: 参数复杂难以准确合理校准<sup>[18]</sup>, 会出现行人抖动和重叠现象<sup>[19-22]</sup>; 仿真少量行人会出现不合理的行人死锁现象<sup>[16,28]</sup>; 缺乏主动绕行其他行人的机制<sup>[16,28]</sup>等. 为克服社会力模型的缺点, 从多种角度进行修改完善, 包括: 自驱动力的改进<sup>[13]</sup>和排斥力的改进<sup>[17]</sup>; 引入其他参数和参数标定<sup>[17]</sup>; 构建共驱力使行人可以主动绕行<sup>[16]</sup>; 为避免行人重叠引入行人停止机制<sup>[19,20]</sup>、引入基于显式数值积分的算法<sup>[21]</sup>、引入减速避让机制<sup>[22]</sup>等.

在基于启发式方法的仿真模型方面<sup>[27-29]</sup>, 很多研究将启发式方法整合到行人建模中, 处理复杂情况并预测更平滑的行人轨迹. Moussaïd 等<sup>[29]</sup>认为行人行为模式改变是通过两种简单的认知过程来完成, 并引入了行人的视觉信息, 提出一种简单的行为启发式模型来捕捉人群行为中的潜在规律; 同时, 局部密度可用于反映行人运动的舒适程度并作为引发行人运动的重要参数<sup>[29]</sup>. 因为 Voronoi 图特有的几何特性, 有学者将 Voronoi 图的概念引入到行人动力学领域, 用于确定行人的个人空间、领域、安全距离、邻居, 行人局部密度及基于密度的最佳速度等<sup>[27,28]</sup>. 在 Voronoi 图中, 每个粒子分别位于各自的 Voronoi 元胞中; Voronoi 边位于相邻粒子连线的中垂线上, 由两个相邻的 Voronoi 元胞共享; Voronoi 点在非退化条件下关联 3 个 Voronoi 元胞, 是 3 个 Voronoi 边的交叉点. 在行人仿真过程中, 与行人共享 Voronoi 边的其他行人可视为行人的邻居, Voronoi 元胞的形状会随着行人位置的变化而实时变化. 行人的 Voronoi 元胞看起来像扭曲的传统元胞自动机, 但又与其不同; Voronoi 图中的元胞是不规则的, 且不存在空元胞.

在行人间相互影响和行人关注领域研究方面, 一般常识认为在行人移动过程中行人周围不同方向和距离的行人会对自身产生不同的影响. 例如多个相互不认识的行人一起移动, 后方行人必须要考虑前方行人的状态来决定是否跟随、避让或者超越, 而前方行人却不需要顾及后方行人. 同时,

Johansson 等<sup>[23]</sup>基于视频中的行人运动轨迹数据, 发现行人与周围不同方向行人间的相互作用也表现出各向异性的特征, 行人只受其前方约 180°空间范围内其他行人的影响, 而几乎不受身后行人的影响. 通过在社会力模型的框架下详细分析行人间的相互作用, 发现不同方向行人对目标行人的影响是不同的, 处于正前方的行人对目标行人的作用力最强, 处于两侧的行人对目标行人的作用力最弱. Yu 等<sup>[25]</sup>在离心力模型中也提到了行人视野范围的问题, 即行人一般只关注视野前方 180°范围内的情况, 对两侧顾及得比较少, 对身后就几乎不会去顾及. Porter 等<sup>[32]</sup>提出了 IM (integrated model) 模型框架, 集成了社会力模型、行为启发式模型及材料科学理论, 充分发挥了每个模型的优势, 将材料科学中“只考虑直接相邻的分子, 就可以很好地模拟分子间相互作用”的理论应用到行人移动的相互影响中, 只考虑行人视野范围中周围行人的影响, 而不是考虑周围所有行人, 从而大大简化了运算量.

在日常观察中, 虽然作为行人流自组织现象之一的拉链现象常被发现, 同时拉链效应也会对行人的移动行为产生影响; 但目前学者主要是针对拉链现象的行人实验进行了研究, 而缺乏对拉链效应形成机理的研究. 在行人实验中, Moussaïd 等<sup>[24]</sup>, Hoogendoorn 等<sup>[30]</sup>发现行人在移动过程中有侧向行走的倾向; Hoogendoorn 等<sup>[30]</sup>发现通道内单向行人流的“拉链”效应可提高通道的空间利用率和行人的步行速度; Seyfried 等<sup>[31]</sup>发现拉链效应对通道的通行能力产生影响; Ren 等<sup>[33]</sup>观察到行人的队列层数会随着通道宽度的增加而增加.

对拉链效应的研究, 有利于研究行人拉链现象的生成机理, 以及与步行设施的关系, 从而指导步行设施的规划设计和人流组织. 因此, 本文从拉链效应的表现形式, 生成拉链效应的影响因素, 拉链效应的偏移机制等方面探究拉链效应的生成机理. 基于 Voronoi 图, 考虑不同距离和方向周围行人对行人移动速度的影响, 构建速度修正模型, 考虑行人是否有偏移倾向的主观意愿, 引入偏移规则, 模拟行人的拉链现象. 以行人的视野关注和视野遮挡描述影响行人移动过程中偏移行为的因素, 以行人局部密度描述行人步行舒适的情况, 引入拉链敏感系数描述行人客观偏移的意愿程度, 提出单个行人侧向偏移的机制, 获得行人最佳的偏移位置. 仿真

研究行人的拉链层数与通道宽度的关系, 然后, 通过与其他实证数据对比, 验证模型的可靠性; 研究不同拉链效应主观偏移意愿占比与行人平均速度、平均局部密度的关系等.

## 2 拉链效应机理

### 2.1 拉链现象

行人流自组织现象是指行人流内部个体行人之间在无外界力量指导下, 出于自身因素和作用, 自发组织和形成的行人流宏观现象. 自组织现象之一的拉链效应<sup>[30]</sup>是指通道内多条单向行人流队列之间的相互重叠现象. 在通道内运动的单向行人流, 把每一列行人看作一层, 会自发产生层或小道, 不同层间的行人相互交错, 各层行人均占用相邻层的空间, 形成“拉链”现象, 如图 1 所示. 该现象的

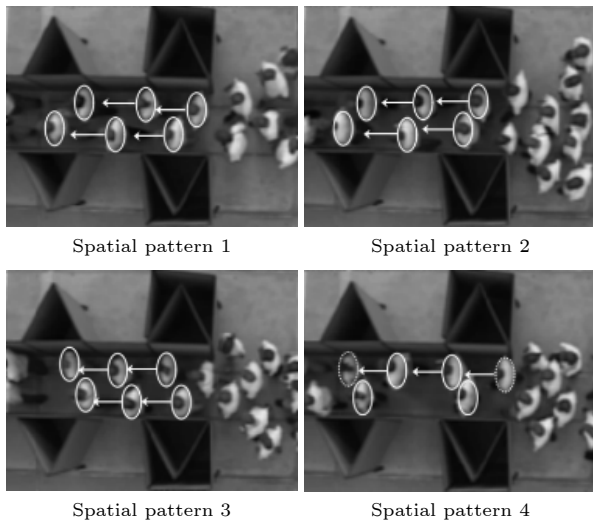


图 1 瓶颈中的行人拉链现象<sup>[30]</sup>

Fig. 1. Zipper phenomena of pedestrians in a bottleneck<sup>[30]</sup>.

产生主要是由于行人需要尽可能地利用通道中的可行空间, 在确保自身行走空间的同时提高自己的视野.

在拉链效应行人实验中<sup>[33]</sup>, 当充足行人以正常速度通过不同宽度通道时, 可以观察到拉链层数会随通道宽度增加而增加, 如图 2 所示. 当通道宽度  $B$  为 0.5—0.7 m 时, 因通道宽度较窄, 基本形成 1 层行人; 当通道宽度  $B$  为 0.8—1.1 m 时, 随通道宽度增加, 可以观察到形成 2—3 层行人; 当通道宽度  $B$  为 1.2—1.8 m 时, 因通道宽度较宽, 可以观察到形成 3—4 层行人.

### 2.2 表现形式

行人在移动过程中, 手脚有节奏的依次来回摆动, 其所占动态空间投影区域类似圆形. 在相同方向行走过程中, 两相邻行人组成的行人间基本位置形式可分为并排、斜列、直列 3 种, 如图 3 所示.

通过分析行人实验<sup>[33]</sup>, 研究通道宽度与行人拉链现象之间的关系, 可以发现当通道宽度仅能容纳一个行人通过时, 行人以直列形式排列, 如图 4(a) 所示; 当通道宽度不足以容纳两个行人并排通过时, 行人以直列、斜列形式排列, 如图 4(b) 所示; 当通道宽度足以容纳多个行人并排通过时, 行人之间的并排、斜列、直列多种排列形式均会出现, 如图 4(c) 所示. 图 4(b) 和图 4(c) 是典型拉链现象的表现形式.

### 2.3 视野最佳

行人行走时一般目视前方, 在视野后方的行人基本不会对前方行人的行为决策产生影响. 在行人有效视野范围内, 也不是所有角度和距离都会对行

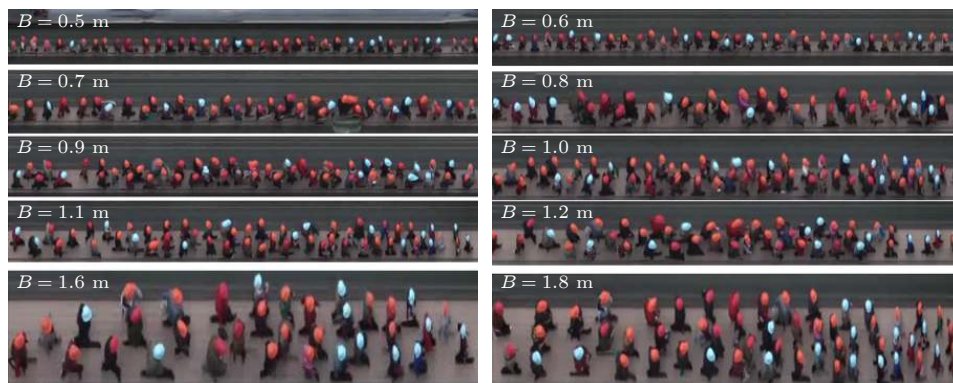


图 2 不同通道宽度下的行人拉链现象<sup>[33]</sup>

Fig. 2. Zipper phenomenon of pedestrians under different channel widths<sup>[33]</sup>.

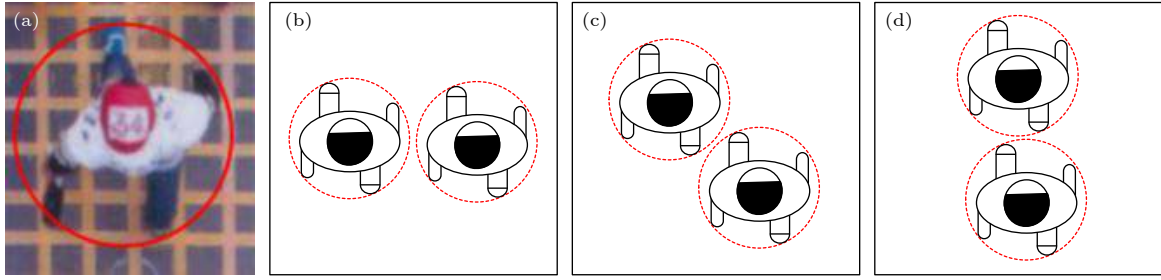


图 3 两相邻行人同方向行走形态 (a) 行人行走形态; (b) 两行人行走并排形式; (c) 两行人行走斜列形式; (d) 两行人行走直列形式  
 Fig. 3. Walking pattern of two adjacent pedestrians in the same direction: (a) The real single pedestrian walking pattern; (b) two adjacent pedestrians walking side by side; (c) two adjacent pedestrians walking in a diagonal pattern; (d) two adjacent pedestrians walking in a straight line.

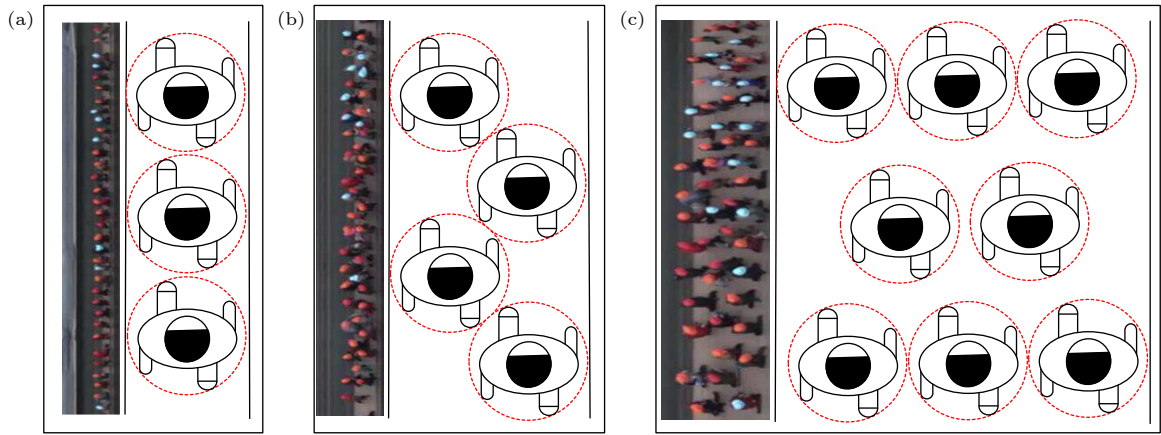


图 4 行人拉链现象表现形式 (a) 单列行人截图<sup>[33]</sup>与行人直列形式对比; (b) 两列行人截图<sup>[33]</sup>与行人直列、斜列形式对比; (c) 多列行人截图<sup>[33]</sup>与行人多种排列形式对比  
 Fig. 4. Manifestation of pedestrian zipper phenomenon: (a) The comparison of single-column pedestrian screenshot<sup>[33]</sup> with pedestrians in-line pattern; (b) the comparison of two-column pedestrian screenshot<sup>[33]</sup> with pedestrians in-line and diagonal patterns; (c) the comparison of multi-column pedestrian screenshot<sup>[33]</sup> with multiple arrangement patterns of pedestrians.

人产生同样的影响. 显然正前方是行人最为关注的视野区域, 对行人的行为决策影响最大; 而从中间向两侧的视野区域对行人行为决策的影响程度迅速衰减. 以图 5 为例, 移动行人  $P_1$  的视野被行人  $P_2, P_3, P_4$  阻挡, 行人  $P_1$  的可见视野区域是  $Z_2, Z_4, Z_6$ , 不可见视野区域是  $Z_1, Z_3, Z_5$ . 显然  $Z_3$  区域阻挡了行人  $P_1$  正前方的主要观察视野和道路, 对行人  $P_1$  行为决策的影响最大, 是促使行人  $P_1$  侧向偏离的主要诱因;  $Z_5$  区域虽然对行人  $P_1$  观察周围视野产生一定遮挡, 但不在行人  $P_1$  前进道路上, 对行人  $P_1$  行为决策的影响较弱;  $Z_1$  区域处于行人  $P_1$  观察视野的边缘区域, 对行人  $P_1$  行为决策的影响最弱, 几乎不会引起行人  $P_1$  的特别关注.

考虑视野对行人行为决策的影响, 以行人视野关注和视野遮挡描述影响行人侧向偏离的因素. 视野关注表示行人对不同视野区域的关注程度. 同时, 不同视野区域对行人行为决策的影响程度也不

同. 视野遮挡表示在行人有效视野区域内, 被遮挡视野区域面积占行人有效视野区域面积的比重. 正

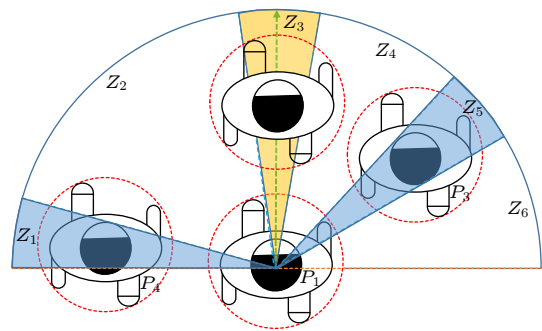


图 5 有效视野区域内的行人视野关注和遮挡 (橙色遮挡区域是目标行人最为关注和对该目标行人影响最大的区域, 蓝色遮挡区域对该目标行人的影响较弱)

Fig. 5. Pedestrian vision attention and occlusion in the effective vision area (the orange shaded area is the area that the target pedestrian pay the most attention to and has the greatest influence on the target pedestrian, while the blue shaded area has a relatively weak influence on the target pedestrian).

前方区域是行人视野最为关注和对行人视野遮挡影响最大的区域。

此外,即使是同一视野方向,不同距离行人对目标行人视野的遮挡影响程度也不同.距离越近,对目标行人视野遮挡越大;距离越远,对目标行人视野遮挡越小.以图6为例,行人 $P_3$ 和 $P_5$ 相对目标行人 $P_1$ 在同一视野方向,与行人 $P_1$ 的距离分别是 $l_{13}$ 和 $l_{15}$ ,对行人 $P_1$ 视野的遮挡角度分别是 $\sigma_{13}$ 和 $\sigma_{15}$ ,遮挡范围分别是 $Z_3$ 和 $Z_5$ .显然 $l_{15} > l_{13}$ , $\sigma_{15} < \sigma_{13}$ ,但 $Z_5 < Z_3$ .

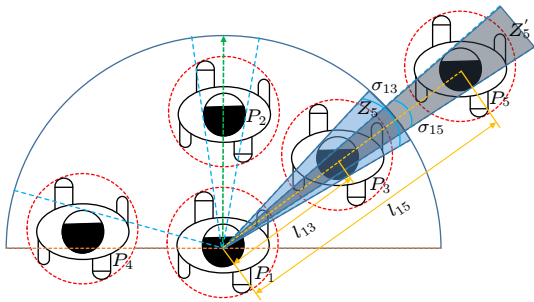


图6 不同距离行人对目标行人视野的遮挡程度  
Fig. 6. Occlusion degree of the target pedestrian's vision by surrounding pedestrians at different distances.

### 2.4 步行舒适

当通道宽度足以容纳多个行人通过时,在观察行人拉链现象过程中,可以引入行人局部密度,描述行人的步行舒适度.在Voronoi图中,假设行人 $P_i$ 所对应Voronoi元胞的面积是 $a_i$ ,则其局部密度为 $\rho_i = 1/a_i$ [27].当行人局部密度较低时,行人拥有较大的个人空间和较好的步行舒适度,行人之间会

出现并排、斜列、直列等形式,且行人的步行速度不受影响,行人以自由流速度移动,如图7(a)所示;当行人局部密度较高时,行人的个人空间较小,行人需要充分利用步行设施空间移动,行人的步行舒适度会受到影响,且会影响和限制后面行人的步行速度,行人之间会出现各种排列形式,如图7(b)所示.

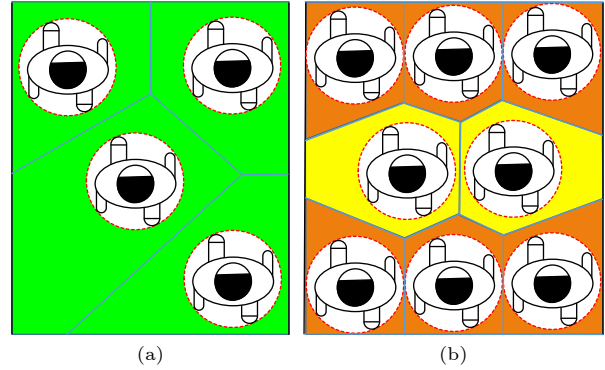


图7 不同行人局部密度下的拉链现象示意(绿色、黄色、橙色分别表示行人局部密度由低到高) (a) 行人局部密度较低时; (b) 行人局部密度较高时

Fig. 7. The zipper phenomenon of pedestrians under different local density (green, yellow and orange respectively represent the local pedestrian density from low to high): (a) When the local pedestrian density is relatively low; (b) when the local pedestrian density is relatively high.

同时,行人是否会进行侧向偏移还与自身的主观偏离意愿和习惯有关.以图8为例,当通道宽度正好可以允许两个行人并排通过时,若行人的偏离意愿程度较低,行人之间有可能形成规则形状的直列,如图8(a)所示;当通道宽度不足以允许两个行人并排通过时,若行人的偏离意愿程度较高,行

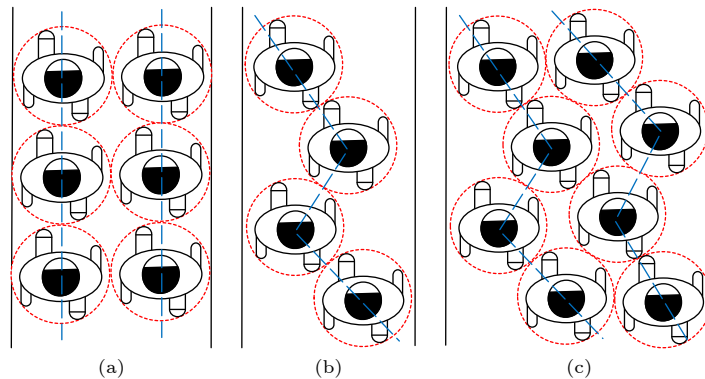


图8 不同偏离意愿下的拉链现象示意 (a) 窄通道行人偏离意愿较低时; (b) 窄通道行人偏离意愿较高时; (c) 宽通道行人偏离意愿较高时

Fig. 8. Zipper phenomenon of pedestrians under different deviation intentions: (a) When the deviation intention of pedestrians in narrow corridors is relatively low; (b) when the deviation intention of pedestrians in narrow corridors is relatively high; (c) when the deviation intention of pedestrians in wide corridors is relatively high.

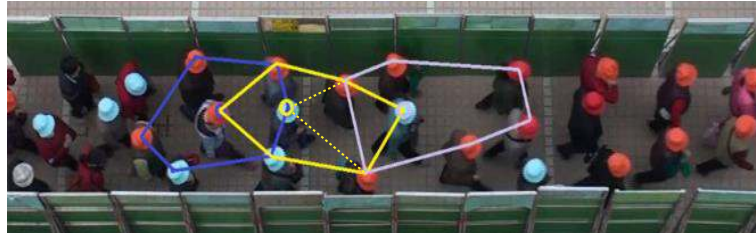


图 9 行人拉链效应的稳定形态<sup>[33]</sup>

Fig. 9. Stable form of pedestrian zipper effect<sup>[33]</sup>.

人之间会自发形成不规则形状的拉链, 如图 8(b) 所示; 当通道宽度可以允许多个行人并行通过时, 若行人的偏离意愿程度较高, 行人在潜意识驱动下会自发进行侧向偏离, 追求更宽广的可见视野和步行舒适度, 形成典型的拉链现象, 如图 8(c) 所示.

在行人追求视野最佳和步行舒适, 处于比较稳定的拉链效应状态时, 可以发现目标行人与周围行人会形成类似蜂巢的排列, 与视野前方行人形成类似等边三角形的形态, 如图 9 所示<sup>[33]</sup>. 处于稳定状态的行人, 占用较少的空间, 拥有较好的视野、个人舒适度和移动速度. 在现有行人仿真中, 也有学者采用蜂巢形态作为行人个体的稳定形态<sup>[34]</sup>. 以图 10 为例, 当行人之间彼此相切啮合, 相邻的 3 个行人形成夹角为  $\varphi$  的等边三角形, 处于比较理想的稳定结构时, 本文认为此时每个行人在行人流中处于视野最佳和步行舒适的状态.

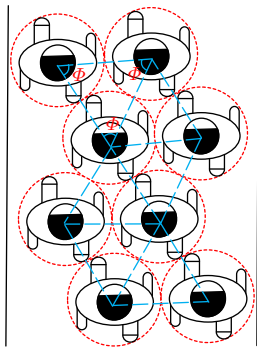


图 10 行人拉链效应的最佳形态

Fig. 10. The best form of pedestrian zipper effect.

## 2.5 偏移机制

通过观察, 分析行人追求视野最佳和步行舒适形成拉链现象的行为机制. 假设不考虑行人个体和主观偏移意愿的差异, 认为行人均有主观偏移意愿. 当通道宽度足够容纳多个行人并肩通过且行人整体密度较大时, 行人会呈现各种排列形式. 其中, 斜列形式在一定程度上是行人侧向偏移的结果, 是

行人拉链现象的主要表现形式. 在行人行走过程中, 若前方行人阻挡了后方行人的视野和道路, 会影响和限制后方行人行走的舒适度和步行速度. 此时, 为了追求更好的可见视野和行走舒适度, 后方行人会进行侧向偏移, 形成斜列形式.

以 3 个毗邻行人作为基本研究单元, 当行人处于图 10 所示的视野最佳和步行舒适的拉链稳定状态时, 在有效可见距离  $L$  内, 在目标行人正前方视野遮挡下, 行人可获得的最佳可见关注视野为  $\theta_s$ , 如图 11 所示. 设定行人半径为  $r_h$ , 头部半径为  $r_s$ , 目标行人相对正前方视线的最佳单侧可见视野范围标准值为  $\theta_h$ , 具体表达式为

$$\theta_s = \Phi - 2 \arcsin \frac{r_s}{2r_h}, \quad (1)$$

$$\theta_h = \theta_s / 2. \quad (2)$$

引入拉链敏感系数  $\alpha_i$ , 作为行人个体的属性参数, 用以描述行人客观偏移的意愿程度. 设定目标行人  $P_i$  相对周围行人  $P_j$  与自身正前方视线的可见

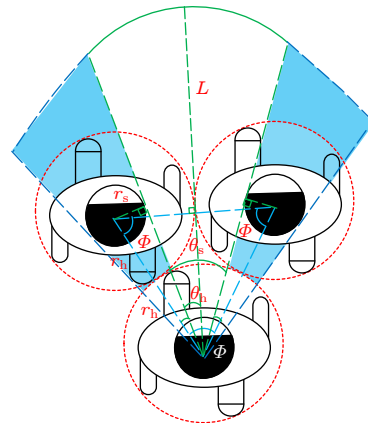


图 11 行人基本单元的拉链稳定状态 (阴影区域为目标行人正前方视野遮挡区域, 非阴影区域为目标行人有效可见视野区域)

Fig. 11. Zipper stability state of pedestrian basic unit (the shadow area is the vision occlusion area and the non-shaded area is the effective visible area in front of the target pedestrian).

范围为 $\theta_{ij}$ , 若 $\theta_{ij} \geq \theta_h$ , 设定 $\theta_{ij} = \theta_h$ , 行人拉链敏感系数的公式为

$$\alpha_i = 1 - \frac{\theta_{ij}}{\theta_h}. \quad (3)$$

当 $\alpha_i$ 越接近 1 时, 行人越有进行偏移的客观意愿; 当 $\alpha_i$ 越接近 0 时, 行人越没有进行客观偏移的意愿.

根据研究数据<sup>[35]</sup>和日常观察, 行人的投影形状接近于椭圆, 如图 12 所示. 在传统的行人仿真中, 行人原椭圆投影区域通常以圆表示, 且它们的投影面积基本相等. 本文将行人椭圆形的投影区域转换为圆形区域, 根据人体尺寸相关数据<sup>[35]</sup>, 可近似得到行人头部半径和行人半径:

$$\pi \cdot \frac{a_s}{2} \cdot \frac{b_s}{2} = \pi \cdot r_s^2, \quad (4)$$

其中,  $a_s$ 是椭圆长轴长,  $b_s$ 是椭圆短轴长,  $r_s$ 是圆的半径. 根据人体尺寸相关数据<sup>[35]</sup>, 近似得到行人头部半径 $r_s$ 为 0.08 m, 行人半径 $r_h$ 为 0.3 m.

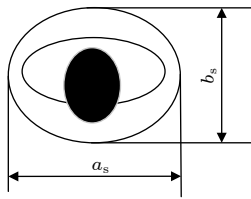


图 12 行人投影区域

Fig. 12. Projection area of pedestrians.

为了方便描述行人的偏移机制, 设定目标行人 $P_i$ 的原始位置坐标为 $(P_i(x), P_i(y))$ , 横向偏移后的位置坐标为 $(P_i'(x), P_i'(y))$ ; 周围行人, 诸如 $P_j, P_{j_2}$ 的位置坐标分别为 $(P_j(x), P_j(y))$ 和 $(P_{j_2}(x), P_{j_2}(y))$ . 设定目标行人 $P_i$ 的可见视野范围为 $\theta_i$ , 若目标行人 $P_i$ 前方有两个行人 $P_j$ 与 $P_{j_2}$ 分别在两侧阻挡其视野, 则行人 $P_i$ 最大可见视野范围 $\theta_i$ 为 $\theta_{ij}$ 与 $\theta_{ij_2}$ 之和, 目标行人 $P_i$ 与周围行人 $P_j$ 的距离为 $l_{ij}$ ,

$$\theta_i = \theta_{ij} + \theta_{ij_2}, \quad (5)$$

$$l_{ij} = \text{norm}(\mathbf{P}_j - \mathbf{P}_i) = \sqrt{(P_j(x) - P_i(x))^2 + (P_j(y) - P_i(y))^2}, \quad (6)$$

首先, 确定行人拉链效应的启动机制. 设定当目标行人 $P_i$ 同时满足与视野范围内距离自己最近行人 $P_j$ 的距离 $l_{ij}$ 小于临界值 $L$ , 且行人拉链敏感系数 $\alpha_i \neq 0$ , 则目标行人 $P_i$ 启动拉链效应, 进行侧向偏移 $\beta_i$ , 启动条件 $\gamma_i$ 为

$$\gamma_i = \begin{cases} l_{ij} < L, \\ \alpha_i \neq 0. \end{cases} \quad (7)$$

以图 13 为例, 目标行人 $P_1$ 的视野被左前方行人 $P_2$ 阻挡 (见图 13(a)), 且满足拉链效应启动条件 $\gamma_1$ , 此时目标行人 $P_1$ 开始进行侧向偏移, 直到新位置处的视野 $\theta_{1'2}$ 达到稳定视野 $\theta_h$ 为止, 如图 13(b) 所示.

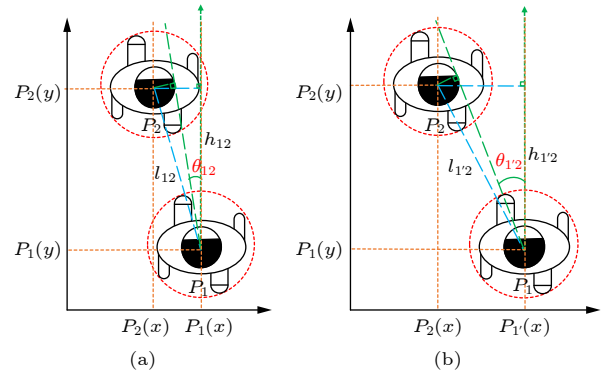


图 13 行人拉链效应启动机制示意 (a) 行人侧向位移前; (b) 行人侧向位移后

Fig. 13. Starting mechanism of pedestrian zipper effect: (a) Before lateral displacement of pedestrians; (b) after lateral displacement of pedestrians.

在图 13 中, 目标行人只考虑了视野范围内距离自己最近的一个行人, 且符合拉链效应启动条件, 然后进行侧向偏移的情况, 但是目标行人也需要处理视野范围内同时面对两侧都有行人的情况, 因此需要进一步研究. 以图 14 为例, 目标行人 $P_1$ 为避开左前方行人 $P_2$ 首先侧向偏移至位置 $P_{1'}(x, y)$ 处, 此时左侧视野范围为 $\theta_{1'2}$ , 相对右前方行人 $P_3$ 的右侧视野范围为 $\theta_{1'3}$ . 若 $\theta_{1'2} = \theta_h$ , 且 $\theta_{1'3} \geq \theta_h$ , 则 $P_{1'}(x, y)$ 为目标行人 $P_1$ 侧向偏移后的稳定位置, 如图 14(a) 所示; 若 $\theta_{1'2} = \theta_h$ , 且 $\theta_{1'3} < \theta_h$ , 则 $P_{1'}(x, y)$ 不是目标行人 $P_1$ 侧向偏移后的稳定位置, 行人 $P_1$ 距离右前方行人 $P_3$ 过近, 如图 14(b) 所示; 为了平衡图 14(b) 的情况, 目标行人 $P_1$ 在有限的空间内稍微左移到更合适的位置, 此时 $\theta_{1'2} = \theta_{1'3} = \theta_s/2 < \theta_h$ , 如图 14(c) 所示.

参照图 14(a) 的情况, 若目标行人 $P_i$ 相对前方一侧行人 $P_j$ 最佳偏移后, 与另一侧行人 $P_{j_2}$ 的视野范围 $\theta_{ij_2} \geq \theta_h$ , 则由 (5)—(12) 式可得目标行人 $P_i$ 侧向偏移后的稳定位置 $P_i'(x, y)$ 及偏离大小 $\beta_i$ , 此时其与周围行人 $P_j, P_{j_2}$ 的距离分别为 $l_{i'j}, l_{i'j_2}$ ; 参照图 14(b) 的情况, 若 $\theta_{ij_2} < \theta_h$ , 则由 (5)—(13) 式

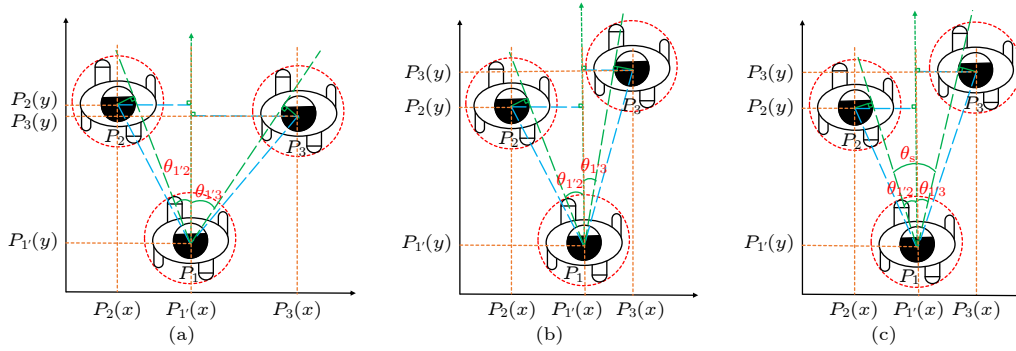


图 14 考虑两侧多个行人的拉链效应偏移情况示意 (a) 两侧均满足最佳视野; (b) 仅一侧满足最佳视野; (c) 两侧妥协后稳定视野  
Fig. 14. Deviation of zipper effect when consider multiple pedestrians on both sides: (a) Both sides meet the optimum field of vision; (b) only one side satisfies the optimal field of vision; (c) stabilize visual field after compromise on both sides.

可得目标行人 \$P\_i\$ 侧向偏移后的均衡位置 \$P\_{i'}(x, y)\$ 以及偏离大小 \$\beta\_i\$.

$$l_{i'j} = \text{norm}(\mathbf{P}_j - \mathbf{P}_{i'}), \quad (8)$$

$$h_{ij} = P_j(y) - P_i(y)$$

$$= \begin{cases} l_{ij} \cdot \cos\left(\arcsin\frac{r_s}{l_{ij}} + \theta_h\right), & \text{if } \theta_{ij2} \geq \theta_h, \\ l_{ij} \cdot \cos\left(\arcsin\frac{r_s}{l_{ij}} + \theta_{ij}\right), & \text{if } \theta_{ij2} < \theta_h, \end{cases} \quad (9)$$

$$\theta_{ij2} = \arccos \frac{(\mathbf{P}_{j2} - \mathbf{P}_{i'}) \cdot \mathbf{n}_i}{\text{norm}(\mathbf{P}_{j2} - \mathbf{P}_{i'}) \cdot \text{norm}(\mathbf{n}_i)}, \quad (10)$$

$$P_{i'}(x) = \begin{cases} P_{i'}(x) > P_i(x), & \text{if } P_j(x) < P_i(x), \\ P_{i'}(x) < P_i(x), & \text{if } P_j(x) > P_i(x), \end{cases} \quad (11)$$

$$\beta_i = \text{norm}(P_{i'}(x) - P_i(x)), \quad (12)$$

$$\theta_{ij} = \left( \arccos \frac{\mathbf{P}_{i'j} \cdot \mathbf{P}_{i'j2}}{\text{norm}(\mathbf{P}_{i'j}) \cdot \text{norm}(\mathbf{P}_{i'j2})} - \arcsin \frac{r_s}{l_{i'j}} - \arcsin \frac{r_s}{l_{i'j2}} \right) \cdot \frac{1}{2}, \quad (13)$$

其中, \$\mathbf{n}\_i\$ 是目标行人 \$P\_i\$ 的正前方视线方向, \$h\_{ij}\$ 是目标行人 \$P\_i\$ 相对周围行人 \$P\_j\$ 的竖直距离.

### 3 仿真模型

#### 3.1 速度修正

行人在正常行走时, 以接近匀速的状态移动. 社会力影响行人行走的本质是影响行人的速度变化, 进而影响行人的位移变化; 而传统的社会力模型更适合仿真拥挤状态下的行人相互作用, 在仿真正常状态下的行人移动时, 会出现不合理的行人现象 [16,27,28,36]. 为了克服传统社会力模型在仿真正常

状态下行人的一些不足, 简化模型参数校定的复杂性和不准确性, 克服行人仿真重叠性和跳动性的问题, 提出了一种综合考虑行人视野范围内周围不同方向和距离行人或障碍物对目标行人速度影响的速度修正模型, 适合仿真正常行走状态下的行人流.

通常在目标行人视野前方一定范围内的周围行人会对目标行人的行走决策产生影响, 而目标行人视野后方的周围行人对目标行人的影响较小, 且视野前方不同方向和距离的周围行人对目标行人行走速度的影响各不相同. 结合 Voronoi 图的几何特性, 可以有效得到目标行人 \$P\_0\$ 周围的行人 \$P\_1, P\_2, P\_3, P\_4, P\_5\$, 如图 15 所示. 设定在目标行人 \$P\_0\$ 正前方视野范围 (\$180^\circ\$) 内, 周围行人可以对目标行人 \$P\_0\$ 速度产生影响的范围为半径 \$r\$ 的半圆. 在 \$0 \leq r \leq r\_1\$ 范围内, 周围行人对目标行人 \$P\_0\$ 的速度影响较大, 如行人 \$P\_1\$; 在 \$r\_1 < r \leq r\_2\$ 范围内, 周围行人对目标行人 \$P\_0\$ 的速度影响较小, 如行人 \$P\_2\$; 在 \$r > r\_2\$ 范围内, 周围行人不对目标行人 \$P\_0\$ 的速度产

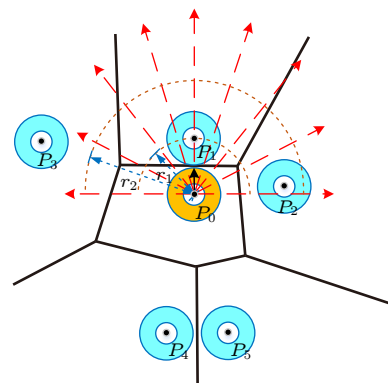


图 15 周围行人对目标行人的速度影响

Fig. 15. Velocity effects of surrounding pedestrians on the target pedestrian.

生影响, 如行人  $P_3$ ; 同样, 在目标行人  $P_0$  视野后方, 周围行人不对目标行人的速度产生影响, 如行人  $P_4$  和  $P_5$ .

周围行人对目标行人速度的影响除了与目标行人的相对距离有关, 也和周围行人相对目标行人移动方向的角度有关. 如, 在  $0 \leq r \leq r_1$  的范围内, 正前方行人  $P_1$  对目标行人  $P_0$  的视野遮挡影响最大, 且目标行人  $P_0$  对正前方的视野最为关注, 则行人  $P_1$  会对目标行人  $P_0$  产生相对其他行人更大的速度影响, 以使目标行人  $P_0$  减速甚至静止.

基于速度修正描述影响行人移动的心理趋势和物理行为, 本文提出一种速度修正模型. 设定行人在正常移动时主要受自驱动速度、周围行人和障碍物排斥速度的影响. 自驱动速度提供行人前进的速度, 表示行人按照期望速度前进的愿望; 排斥速度表示行人受周围行人和障碍物的排斥心理. 该模型将行人的移动看成每单位时间步的匀速运动, 计算行人在不同速度影响下的位置更新过程为

$$\mathbf{v}_i(t) = \mathbf{v}_0 + \sum_{j(\neq i)} \mathbf{v}_{ij} + \sum_W \mathbf{v}_{iw}, \quad (14)$$

$$\mathbf{v}_{ij} = v_0 g((d_{ij} - r_{ij})\theta_{ij}) \mathbf{n}_{ij}, \quad (15)$$

$$\mathbf{v}_{iw} = v_0 g(d_{iw} - r_i) \mathbf{n}_{iw}, \quad (16)$$

$$\mathbf{s}_i(t + \Delta t) = \mathbf{s}_i(t) + \mathbf{v}_i(t)\Delta t, \quad (17)$$

其中,  $\mathbf{v}_i(t)$  为目标行人  $P_i$  在时刻  $t$  的合速度, 目标行人在移动过程中, 会受来自周围行人的速度  $\mathbf{v}_{ij}$  和来自墙壁  $W$  的速度  $\mathbf{v}_{iw}$  的影响,  $\mathbf{v}_0$  为目标行人的初始移动速度.

$v_0 g((d_{ij} - r_{ij})\theta_{ij}) \mathbf{n}_{ij}$  表示目标行人受周围行人的排斥心理. 在目标行人视野范围内, 若  $d_{ij} - r_{ij} \leq d_1$ , 当  $\theta_{ij} = 0$  时,  $g(x)$  函数取值为  $k_1$ , 当  $\theta_{ij} \neq 0$  时,  $g(x)$  函数取值为  $k_2$ ; 若  $d_1 < d_{ij} - r_{ij} \leq d_2$ ,  $g(x)$  函数取值为  $k_3$ ; 若  $d_{ij} - r_{ij} > d_2$ ,  $g(x)$  函数取值为  $k_4$ . 其中  $d_{ij}$  表示两行人质心间的距离,  $r_{ij}$  表示两行人半径之和,  $\theta_{ij}$  表示两行人位置与目标行人速度方向的夹角,  $\mathbf{n}_{ij}$  为周围行人质心指向目标行人质心的单位向量.

$v_0 g(d_{iw} - r_i) \mathbf{n}_{iw}$  表示目标行人受来自墙壁  $W$  的速度影响, 与来自周围行人的速度影响类似, 在目标行人视野范围 ( $180^\circ$ ) 内, 若  $d_{iw} - r_i \leq d_3$ ,  $g(x)$  函数取值为  $k_5$ ; 若  $d_{iw} - r_i > d_3$ ,  $g(x)$  函数取值为  $k_6$ . 其中,  $d_{iw}$  为目标行人与墙壁  $W$  的垂直距离,  $r_i$  为目标行人的半径,  $\mathbf{n}_{iw}$  为与墙壁垂直且指

向目标行人的单位向量. 通过仿真实验测定, 速度修正模型中各参数的取值如表 1 所列.

表 1 速度修正模型参数取值  
Table 1. Parameter values of velocity correction model.

参数	取值	单位	参数	取值
$v_0$	1	m/s	$k_1$	1
$r_i$	0.3	m	$k_2$	0.6
$d_1$	0	m	$k_3$	0.2
$d_2$	0.5	m	$k_4$	0
$d_3$	0.25	m	$k_5$	0.8
$\Delta t$	0.5	s	$k_6$	0

### 3.2 偏移规则

为了真实再现人群的拉链现象, 考虑行人视野最佳和步行舒适的需求, 结合速度修正模型, 制定行人拉链效应的侧向偏移规则, 如图 16 所示.

首先, 考虑行人是否有进行拉链效应的主观偏移意愿, 因为各种因素影响, 行人有时会做出非理性的行为. 若行人主观意愿  $\kappa = 1$ , 行人有进行主观偏移的意愿; 否则, 行人不会刻意做出偏移行为.

其次, 若目标行人有进行主观偏移的意愿, 且符合行人进行客观偏移的条件, 即符合 (7) 式的拉链效应启动条件  $\gamma_1$ , 则根据 (5)—(13) 式可得单个行人  $P_i$  拉链效应偏移后的均衡位置  $P_i'(x, y)$ .

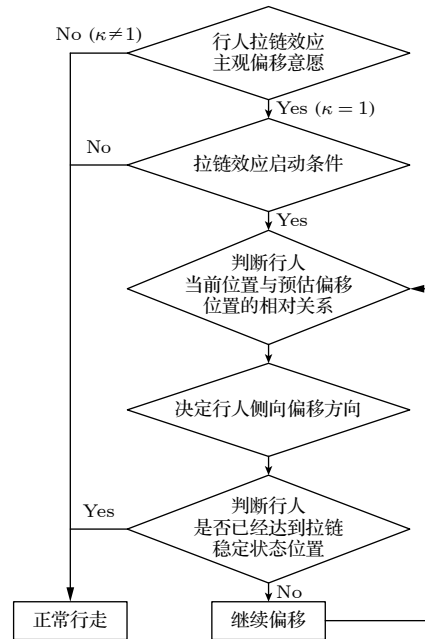


图 16 行人拉链效应偏移规则流程图

Fig. 16. Flow diagram of pedestrian zipper effect deviation rules.

然后, 根据目标行人  $P_i$  当前位置  $P_i(x, y)$  与其预测后的偏移位置  $P_i'(x, y)$  之间的相对位置关系, 确定目标行人的偏移方向  $n_i$ . 赋予目标行人  $P_i$  一个主动偏移速度  $v_i$ , 直到目标行人达到偏移后的均衡位置, (14) 式进行改进为

$$v_i(t) = \begin{cases} v_0 + \sum_{j(\neq i)} v_{ij} + \sum_W v_{iw} + v_i n_i, & \kappa = 1, \\ v_0 + \sum_{j(\neq i)} v_{ij} + \sum_W v_{iw}, & \kappa \neq 1. \end{cases} \quad (18)$$

在确定行人  $P_i$  的主动偏移速度  $v_i$  时, 需要考虑模型的仿真精度与效率, 考虑到行人的半径设定为 0.3 m, 在 0.5 s 的反应时间内, 若取行人  $P_i$  的主动偏移速度  $v_i$  为 0.2 m/s, 则行人在理想状态下侧向偏移 0.1 m, 比较符合行人的正常行为反应; 同时, 通过仿真实验测定, 可以获得较好的仿真效果, 因此在本文中, 行人  $P_i$  的主动偏移速度  $v_i$  取 0.2 m/s.

以图 17 为例, 示意有主动偏移意愿的目标行人  $P_1$  产生主动偏移速度  $v_1$ , 直到其到达偏移后的均衡位置  $P_1'(x, y)$ .

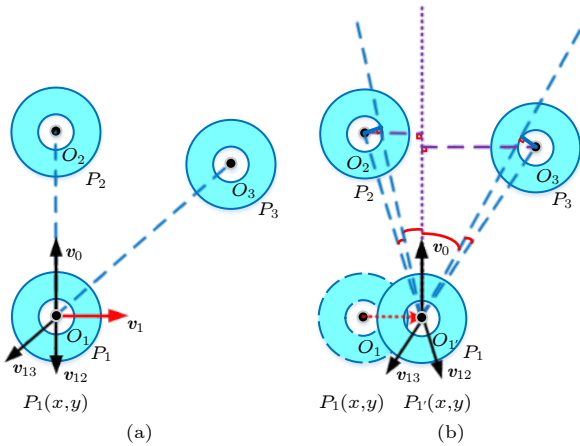


图 17 有偏移速度的行人侧向偏移示意

Fig. 17. Sideways deviation of pedestrians with deviation velocity.

## 4 仿真分析

为了实时区分每个行人的局部密度, 根据行人局部密度的大小, 对 Voronoi 元胞填充不同的颜色, 绿色表示低密度, 黄色表示中密度, 橙色表示中高密度, 红色表示高密度. 为了简约, 本文均采用一致性的行人进行仿真. 行人仿真时, 根据 Voronoi 元胞的颜色, 可以观察到不同位置和时间行人的拥挤程度, 且 Voronoi 元胞的形状和颜色会

随着行人位置和密度的变化而实时变化.

### 4.1 通道循环流

在 10 m × 3.5 m 的直通道走廊场景中进行行人单向循环流仿真实验, 验证模型的可靠性. 走廊下端是行人的产生区域, 上端是出口, 在走廊起始端 2 m × 3.5 m 的范围内随机生成 20 个行人, 行人向出口移动. 在实验中, 行人采用的是周期性循环流, 行人从走廊下端进入并从上端离开后, 从下端重新进入走廊; 走廊的左右边界采用的是封闭性实体边界, 上下两端采用的是开放性截断边界. 采用开放性截断边界时, 在走廊上下端边缘处行人的 Voronoi 元胞, 首先基于开放性边界生成被截割的 Voronoi 元胞, 然后利用上下端的边界将其截割, 从而生成适应边界的新 Voronoi 边和点 [27].

设定所有行人都有进行偏移的主观意愿  $\kappa = 1$ , 行人在走廊移动的过程如图 18 所示. 在仿真过程中, 行人数量和整体密度是固定的. 仿真开始时, 行人随机分布在走廊中, 且拥有各自的局部密度; 当行人从初始生成阶段过渡到稳定阶段, 行人为追求自身的舒适距离和视野, 会不断调整自身的位置, 呈现出一定的拉链现象; 最后行人基本均匀分布, 由 Voronoi 元胞颜色可见行人的局部密度基本一致, 行人之间分散形成四层队列, 且每个行人的速度都大致相等, 行人匀速向前移动. 同时, 由于在行人 Voronoi 图的计算中, 仿真场景的上下边界采用开放性截断边界, 因此, 当行人从走廊上端离开并从下端重新进入走廊时, 因距离走廊底端边界较近, 会增加行人的局部密度. 当走廊整体行人密

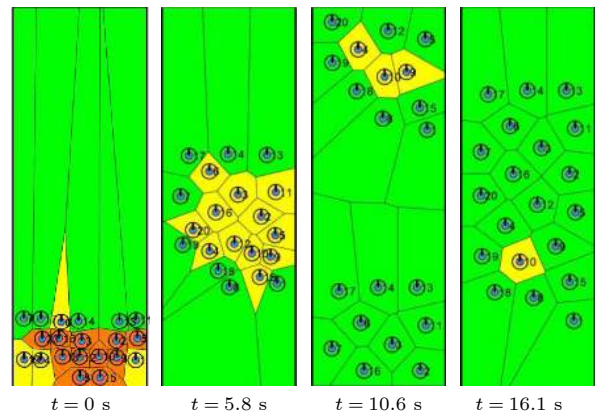


图 18 直通道行人循环流仿真过程截图 ( $w = 3.5$  m,  $l = 10$  m,  $\kappa = 1$ )

Fig. 18. Screenshot of simulation process of pedestrian flow in the straight corridor ( $w = 3.5$  m,  $l = 10$  m,  $\kappa = 1$ ).

度较小时,重新进入走廊的行人与前方行人距离较远,双方行人相互之间的速度影响较小或没有影响;当走廊整体行人密度较大,重新进入走廊的行人与前方行人距离较近,双方行人之间会产生一定的速度影响,但经过短暂时间行进后,相互影响的行人会自发调节重新进入稳定状态.该仿真实验再现了常态行人流,可以发现行人维持自身领域,克服了传统社会力模型抖动性和重叠性的不足.

以行人#4为例,可以看到在不同仿真时间步,行人#4进行了明显的拉链效应偏移,以获得更好的视野和步行舒适度,如图19所示.

### 4.2 对比分析

在直通道中随机产生20个行人,随着通道宽度 $B$ 的增加,行人自主选择的空间逐渐变大,行人可以充分地进行拉链效应偏移.当行人形成稳定的行人流时,可以观察到不同宽度通道中形成不同的行人队列层数,通道宽度越大,行人队列层数越多,与行人实验<sup>[33]</sup>的结论相吻合,如图20所示.

为了获得行人速度与密度的关系,对不同密度条件下(人/ $m^2$ )的行人进行单向循环流仿真,并通过基本图验证模型的可靠性.在每个行人密度点的仿真实验中,最开始行人随机地分布于走廊中,行人的目标点位于走廊上端,每次仿真实验重复10次,每次持续90个仿真时间步,实验的前30个仿真时间步当做热身时间,后60个仿真时间步的数据用于统计分析.图21将速度修正模型与其他实证研究的数据进行了对比,可以发现速度修正模型的速度-密度关系与实证数据符合得较好<sup>[37-41]</sup>.

通过改变行人拉链效应主观偏移意愿与无偏移意愿的占比 $u$ ,可以得到不同密度下,行人主观偏移意愿占比与行人平均速度的关系,如图22所示;也可以获得不同密度下,行人主观偏移意愿占比与行人平均局部密度的关系,如图23所示.可以发现,与不考虑拉链效应相比,倾向主动进行拉链效应偏移的行人占比越大,越有助于提高通道内行人的移动速度、舒适度和空间利用率,与行人实验<sup>[30]</sup>的研究结果相符合.

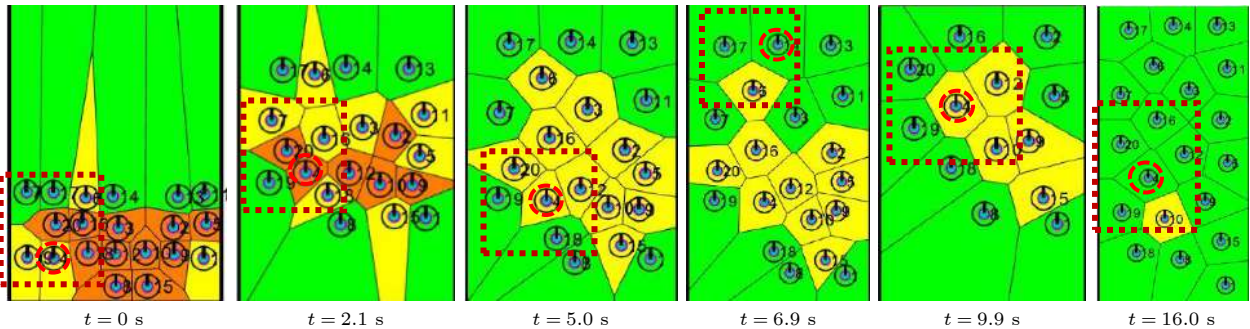


图19 行人#4在不同仿真时间步的拉链效应偏移截图

Fig. 19. Screenshot of zipper effect of pedestrian #4 at different simulation time steps.

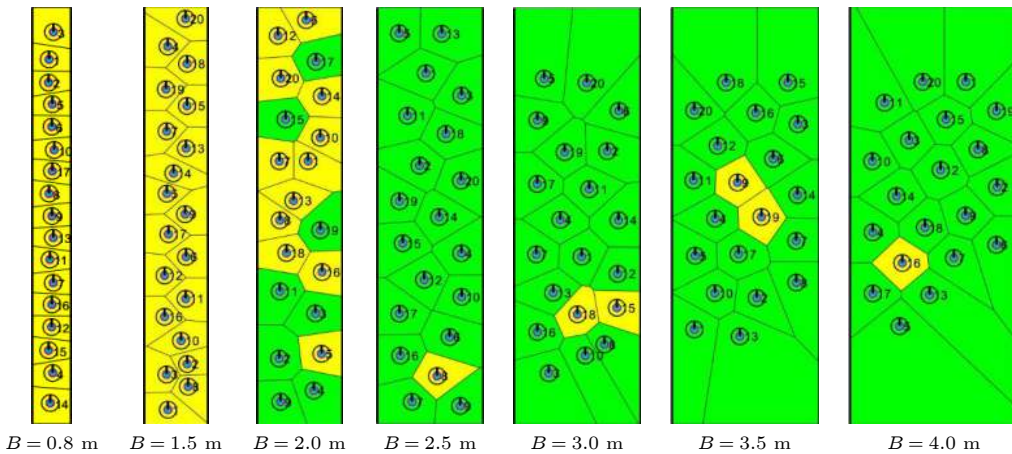


图20 行人拉链层数与通道宽度关系

Fig. 20. Relationship between the number of pedestrian zipper layers and the width of the corridor.

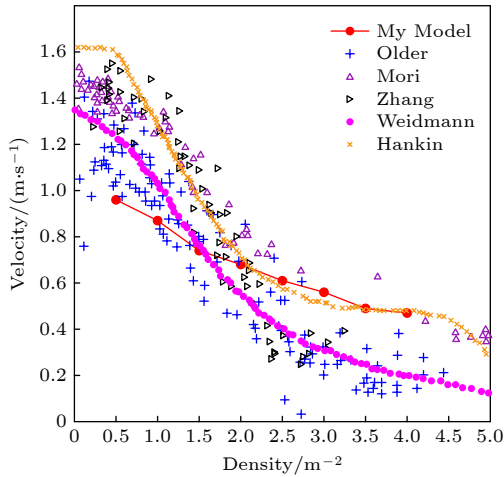


图 21 直通道单向行人流基本图<sup>[37-41]</sup>(该模型仿真数据与实证数据(Older<sup>[37]</sup>, Mori<sup>[38]</sup>, Zhang<sup>[39]</sup>, Weidmann<sup>[40]</sup>, Hankin<sup>[41]</sup>)进行对比)

Fig. 21. Fundamental diagram of unidirectional pedestrian flow in the corridor<sup>[37-41]</sup>. Actual data (Older<sup>[37]</sup>, Mori<sup>[38]</sup>, Zhang<sup>[39]</sup>, Weidmann<sup>[40]</sup>, Hankin<sup>[41]</sup>) are gathered to compare with our model.

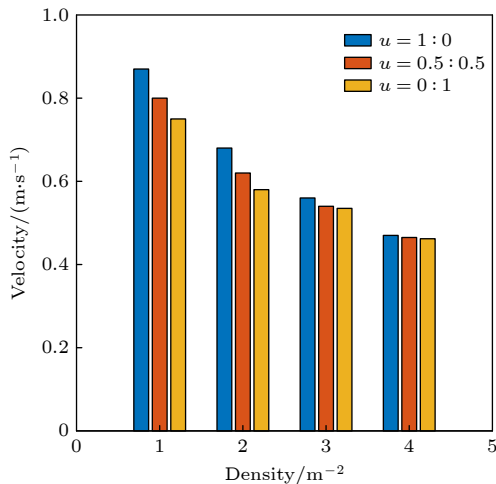


图 22 不同密度下行人主观偏移意愿占比与行人平均速度关系

Fig. 22. Relationship between the proportion of pedestrian subjective deviation intention and pedestrian average velocity under different overall densities.

同时,为验证 Voronoi 图划分对模型仿真效率的影响,仅分析了针对 Voronoi 图划分所需要的时间.在 Win7 64 位操作系统,酷睿双核 i7-6700 CPU 3.4 GHz, 16G 内存的台式电脑上,基于 Matlab R2018b 的编程环境,通过仿真计算了 Voronoi 图划分所需的时间.对 20 人的 Voronoi 图划分,需要 0.499254 s;对 200 人的 Voronoi 图划分,需要 0.992942 s;对 1000 人的 Voronoi 图划分,需要 4.952742 s;对 10000 人的 Voronoi 图划分,需要

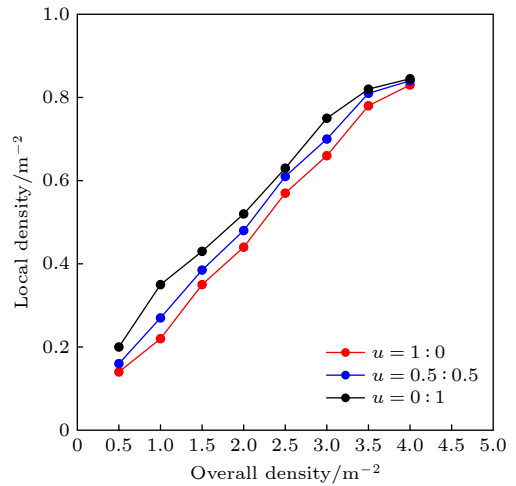


图 23 不同密度下行人主观偏移意愿占比与行人平均局部密度关系

Fig. 23. Relationship between the proportion of pedestrian subjective deviation intention and pedestrian average local density under different overall densities.

755.423851 s. 通过实际的计算时间可以看出:当行人数量较少时, Voronoi 图划分耗时在可承受的范围之内;当行人数量较大时, Voronoi 图划分耗时急剧增长.因此,为了减少 Voronoi 图划分耗时对模型仿真效率的影响,为了提高基于 Voronoi 图模型整体的仿真效率,使其适用于大规模行人的仿真,需要进一步研究并行环境下模型的仿真计算,包括基于空间分割、基于仿真规则、基于进程的并行计算等.

## 5 结论

本文提出行人拉链现象的生成机理,并构建基于 Voronoi 图的速度修正模型进行直通道单向循环行人流仿真研究.从视野最佳和步行舒适的角度分析拉链现象的生成机理,引入拉链敏感系数描述行人客观偏移的意愿程度,提出行人的偏移机制.引入 Voronoi 图,有效确定目标行人视野范围内的周围行人;基于 Voronoi 图考虑不同距离和方向周围行人对目标行人移动速度的影响,构建速度修正模型,考虑行人是否有偏移倾向的主观意愿,并嵌入偏移规则,模拟再现行人的拉链现象.仿真结果真实再现了直通道常态行人流,克服了传统社会力模型抖动性和重叠性的不足,可以观察到均匀分布的自组织行人流和明显的行人拉链效应,行人的拉链层数与通道宽度成正比.通过提取行人仿真实验数据与实证数据对比,该模型速度密度关系的基本

图与实证数据符合得较好; 与不考虑拉链效应相比, 倾向主动进行侧向偏移的行人占比越大, 越有助于提高通道内行人的移动速度、舒适度和空间利用率.

## 参考文献

- [1] Shiwakoti N, Sarvi M 2013 *Transp. Res. C, Emerg. Technol.* **37** 260
- [2] Guo R Y, Huang H J, Wong S C 2011 *Transp. Res. B, Methodol.* **45** 490
- [3] Duives D C, Daamen W, Hoogendoorn S P 2013 *Transp. Res. C, Emerg. Technol.* **37** 193
- [4] Zheng X, Zhong T, Liu M 2009 *Build. Environ.* **44** 437
- [5] Blue V J, Adler J L 2000 *Transp. Res. Rec.* **1710** 20
- [6] Yue H, Wang S, Jia X L, Li J, Shao C F 2016 *Simul.: Trans. Soc. Model. Simul. Int.* **92** 491
- [7] Zhu K, Yang Y, Shi Q 2016 *Simul. Model. Pract. Theory.* **69** 31
- [8] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507
- [9] Li M H, Yuan Z Z, Tian J F 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 018903 (in Chinese) [李明华, 袁振洲, 许痰, 田钧方 2015 物理学报 **64** 018903]
- [10] Yue H, Zhang B Y, Shao C F, Xing Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 050512
- [11] Helbing D, Farkas I, Vicsek T 2000 *Nature* **407** 487
- [12] Helbing D, Wemer T 2005 *Transp. Sci.* **39** 1
- [13] Hou L, Liu J G, Pan X, Wang B H 2014 *Physica A* **400** 93
- [14] Lv W, Song W G, Ma J, Fang Z 2013 *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **14** 1753
- [15] Zhao Y, Li M, Lu X, Tian L, Yu Z, Huang K, Wang Y, Li T 2017 *Physica A* **465** 175
- [16] Jia X L, Yue H, Tian X, Yin H H 2017 *Simul.: Trans. Soc. Model. Simul. Int.* **93** 1013
- [17] Seer S, Brandle N, Ratti C 2014 *Transp. Res. C, Emerg. Technol.* **48** 212
- [18] Frank G A, Dorso C O 2011 *Physica A* **390** 2135
- [19] Seyfried A, Steffen B, Lippert T 2006 *Physica A* **368** 232
- [20] Parisi D R, Gilman M, Moldovan H 2009 *Physica A* **388** 3600
- [21] Lakoba T I, Kaup D J, Finkelstein N M 2005 *Simul. Model. Pract. Theory.* **81** 339
- [22] Li S S, Qian D L, Wang J Z 2012 *J. Jilin Univ., Eng. Technol. Ed.* **42** 623
- [23] Johansson A, Helbing D, Shukla P 2007 *Adv. Complex Syst.* **10** 271
- [24] Moussaïd M, Helbing D, Garnier S, Johansson A, Combe M, Theraulaz G 2009 *Proc. R. Soc. Biol. Sci.* **276** 2755
- [25] Yu W J, Chen R, Dong L Y, Dai S Q 2005 *Phys. Rev. E* **72** 026112
- [26] Cao Z Q, Sai B, Lu X 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 084203 (in Chinese) [曹自强, 赛斌, 吕欣 2020 物理学报 **69** 084203]
- [27] Xiao Y, Gao Z Y, Qu Y C, Li X 2016 *Transp. Res. C, Emerg. Technol.* **68** 566
- [28] Qu Y C, Xiao Y, Wu J J, Tang T, Gao Z Y 2018 *Physica A* **492** 1153
- [29] Moussaïd M, Helbing D, Theraulaz G 2011 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **108** 6884
- [30] Hoogendoorn S P, Daamen W 2005 *Transp. Sci.* **39** 147
- [31] Seyfried A, Passon O, Steffen B, Boltes M, Rupperecht T, Klingsch W 2009 *Transp. Sci.* **43** 395
- [32] Porter E, Hamdar S H, Daamen W 2018 *Transportmetrica A* **14** 468
- [33] Ren X X, Zhang J, Cao S C, Song W G 2019 *J. Stat. Mech.* **12** 123204
- [34] 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]
- [35] Fruin J J 1971 *Pedestrian and Planning Design* (New York: Metropolitan Association of Urban Designer and Environmental Planners Inc.)
- [36] Zhang L, Yue H, Li M, Wang S, Mi X Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 060505 (in Chinese) [张磊, 岳昊, 李梅, 王帅, 米雪玉 2015 物理学报 **64** 060505]
- [37] Older S J 1968 *Traff. Eng. Contr.* **10** 160
- [38] Mōri M, Tsukaguchi H 1987 *Transp. Res. Part A* **21** 223
- [39] Zhang J, Klingsch W, Schadschneider A, Seyfried A 2011 *J. Statist. Mech. - Theory Exp.* **6** P06004
- [40] Weidmann U 1993 *Transporttechnik der Fussgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung)* (Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT), ETH Zürich)
- [41] Hankin B D, Wright R A 1958 *J. Oper. Res. Soc.* **9** 81

# Generation mechanism and simulation research of zipper phenomenon of pedestrian flow in corridor<sup>\*</sup>

Wu Xin-Sen<sup>1)</sup> Yue Hao<sup>1)†</sup> Liu Qiu-Mei<sup>1)</sup> Zhang Xu<sup>2)</sup> Shao Chun-Fu<sup>1)</sup>

1) (*Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Ministry of Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

2) (*College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China*)

( Received 30 September 2020; revised manuscript received 23 October 2020 )

## Abstract

In this study, the unidirectional pedestrian flow in the corridor is taken as a research object, the generation mechanism of the pedestrian zipper phenomenon is analyzed, and a velocity correction model based on the Voronoi diagram is established for the simulation research. First, the generation mechanism of the pedestrian zipper phenomenon is analyzed from the perspective of optimal visual field and walking comfort of pedestrians. Then the visual attention and visual occlusion of pedestrians are used to describe the factors which affect the zipper deviation during pedestrian movement, the local density of pedestrians is used to describe the walking comfort of pedestrians, the zipper sensitivity coefficient is adopted to describe the willingness of pedestrians to move objectively, and the mechanism of lateral deviation of a single pedestrian is considered to obtain the optimal deviation position of pedestrians. Besides, the Voronoi diagram is introduced to effectively determine the pedestrians surrounding the target pedestrian within the visual field. And the influence of surrounding pedestrians with different distances and directions on the moving velocity of the target pedestrian based on the Voronoi diagram is considered. Then, a velocity correction model of pedestrians based on the Voronoi diagram is constructed, whether the pedestrian has a subjective willingness to deviate is considered, and the deviation rule is embedded to simulate and reproduce the zipper phenomenon of pedestrians. The simulation results truly reproduce the normal pedestrian flow through the corridor and show that our model can overcome the deficiency of the jitter and overlap phenomenon of the traditional social force model. The self-organized pedestrian flow with uniform distribution and the pedestrian zipper effect can also be observed. Furthermore, through the simulation results, we can see that the number of zipper layers for pedestrians is proportional to the width of the corridor. The comparison of simulated pedestrian data with the empirical data indicates that the fundamental diagram of velocity-density relation of our model is in good agreement with the empirical data. A comparison between with and without considering the zipper effect shows that the larger the proportion of pedestrians actively willing to laterally deviate, the more helpful it will be to improve the moving velocity, comfort and space utilization of pedestrians in the corridor.

**Keywords:** pedestrian dynamics, pedestrian simulation, zipper effect, Voronoi diagram

**PACS:** 89.40.-a, 05.65.+b, 07.05.Tp

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201626

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 71771013, 71621001), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2019YFF0301403), the Special Funds for Fundamental Scientific Research Operation Fees of Central Universities, China (Grant No. 2019JBM041), and the Singapore Ministry of Education (MOE) AcRF Tier 2 (Grant No. MOE2016-T2-1-044).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [hyue@bjtu.edu.cn](mailto:hyue@bjtu.edu.cn)