

通道中行人-机动车相互作用机理的建模和模拟

张稷 韦艳芳 董力耘

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

Zhang Ji Wei Yan-Fang Dong Li-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 240503 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181499

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181499>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I24>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双能谷效应对 N 型掺杂 Si 基 Ge 材料载流子晶格散射的影响

Lattice scattering in n-type Ge-on-Si based on the unique dual-valley transitions

物理学报.2018, 67(4): 040501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171413>

基于递推-变换方法计算圆柱面网络的等效电阻及复阻抗

Calculation of the equivalent resistance and impedance of the cylindrical network based on recursion-transform method

物理学报.2017, 66(7): 070501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070501>

横场中非束缚类准周期伊辛链的赝临界点

Quantum pseudocritical point in the unbounded quasiperiodic transverse field Ising chain

物理学报.2015, 64(19): 190501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.190501>

拥堵疏散的行人拥挤力仿真研究

Simulation of pedestrian push-force in evacuation with congestion

物理学报.2015, 64(6): 060505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060505>

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>

## 通道中行人-机动车相互作用机理的建模和模拟\*

张稷<sup>1)</sup> 韦艳芳<sup>1)2)</sup> 董力耘<sup>1)3)†</sup>

1) (上海大学, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

2) (玉林师范学院物理科学与工程技术学院, 玉林 537000)

3) (上海市力学在能源工程中的应用重点实验室, 上海 200072)

(2018年8月7日收到; 2018年10月8日收到修改稿)

本文研究了通道中行人与车辆同向或反向运动时的人车相互作用. 车辆运动的描述采用细化的确定性元胞自动机模型, 而行人流则采用考虑背景场的格子气模型. 车辆及其影响区被视为一种可移动的障碍物, 形成动态变化的背景场, 可以更好地反映人车之间的相互作用. 通过数值模拟得到典型参数下的行人流基本图以及平均车速随行人密度的变化曲线. 人车反向时行人流基本图中存在两个临界密度, 其间的行人流量-密度曲线呈线性分布, 曲线斜率  $k$  主要依赖于车辆宽度和行人预判时间, 而平均车速近似为  $k$ , 即反向车辆形成的移动瓶颈和行人拥堵向上游传播的速度是一致的. 文中进一步考察了行人预判时间、车辆宽度及限速对人车混合交通流的影响. 人车同向时, 这三个参数的影响都不明显. 人车反向时, 当车辆宽度较小, 即使在很高密度下, 车辆仍可以前行, 而更大的行人预判时间也有助于车辆的运动.

关键词: 元胞自动机, 格子气模型, 人车相互作用, 背景场

PACS: 05.50.+q, 45.70.Mg, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.67.20181499

## 1 引言

近年来, 国内外众多学者开展了大量的交通流观测、建模、模拟和应用研究等工作, 对机动车流和行人流的研究都取得了显著的进展<sup>[1-4]</sup>. 在交通流的微观建模中, 元胞自动机模型得到广泛应用: 机动车流的 NaSch 模型<sup>[5]</sup> 和可以描述三相交通特征的模型<sup>[6,7]</sup>; 行人流模型包括基于背景场的元胞自动机模型<sup>[8,9]</sup> 和格子气模型<sup>[10]</sup>. 元胞自动机模型通常采用并行更新模式, 因此需要解决多个行人同时进入一个目标元胞的冲突问题. 背景场元胞自动机模型的一个突出优点是有效解决了复杂环境中行人的寻径问题<sup>[11,12]</sup>. 格子气模型可以视为一种特殊的元胞自动机模型, 通常采用随机串行更新方式, 其优点是可以避免行人之间的冲突. 众多的机动车和行人流模型为深入研究人车混合交通流奠

定了坚实的基础.

最近, 行人和车辆之间的相互作用已成为交通流研究关注的热点之一. 最常见的人车相互作用发生在行人横穿道路时, 其特点是人群与车流运动方向相互垂直, 与之相关的研究也最多. Helbing 等<sup>[13]</sup> 研究了横穿街道的行人与车辆之间相互作用导致的振荡模式. 段后利和张毅<sup>[14]</sup> 建立了由行人元胞自动机子模型、机动车元胞自动机子模型及相互干扰子模型三部分构成的行人过街模型, 用于分析有信号灯人行横道处的人车混合交通流的特性. 孙泽和贾斌<sup>[15]</sup> 通过引入行人和机动车的冲突干扰规则, 建立了能够描述人行横道处机动车和行人相互干扰行为的元胞自动机模型. 余艳等<sup>[16]</sup> 基于 VDR 模型, 建立了行人与机动车相互干扰的元胞自动机模型, 研究开放边界条件下有/无红绿灯控制时, 车辆产生概率、消失概率和绿信比对车流和行人流的影响. Zheng 等<sup>[17]</sup> 研究了行人乱穿马

\* 国家自然科学基金(批准号: 11572184, 11562020, 11172164) 和国家重点基础研究发展计划(批准号:2012CB725404) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dly@shu.edu.cn

路的行为以及司机对此类违章行为的反应. Li和Sun<sup>[18]</sup>提出改进的元胞自动机模型,探讨了车辆为避免撞上行人所采取的换道行为对交通流量、能量损耗、行人穿越行为以及交通安全的影响. Gorini等<sup>[19]</sup>, Chen等<sup>[20]</sup>和Lu等<sup>[21]</sup>研究了无信号灯人行横道处行人与机动车相互作用行为. 2018年, Khallouk等<sup>[22]</sup>提出改进的元胞自动机模型,对简化的无信号灯十字路口人行横道处行人与机动车的相互影响进行研究.

另一种典型情况是人群和车辆的混合交通流. 这在亚洲一些中小城市以及我国农村乡镇中尤为常见. 农村乡镇上道路狭窄,往往只有一条机动车道,当车辆在拥挤的街道上行驶时,常常出现人群、非机动车和机动车的混合交通流,这种情况下往往是双向的行人流. 在大型群体活动散场时,密集的人群进入活动场馆周边的街道,或者当隧道内发生事故而进行人群疏散时,也会发生人车混行的情况,这时通常会出现单向运动的人群,本文主要研究这种情况. 相比于行人横穿马路,目前此类研究相对较少. Jiang和Wu<sup>[23]</sup>首次采用行人流格子气模型和简化的车辆运动模型研究了通道中的人车相互作用,考察行人密度、车辆大小和位置对车辆运动的影响. 发现车辆逆行时,在通道中间行驶更快;而人车同向时,则沿着通道壁行驶更快. Jiang和Wu<sup>[24]</sup>进一步考虑了 $V_{\max} > 1$ 的情况,并引入了车辆影响区域的概念. 他们发现对于给定的人数,存在一个临界最大车速,还发现存在车辆从自由运动态到低速运动态的切换现象. 在Jiang和Wu<sup>[23,24]</sup>的工作中主要关注了车辆在人群中的运动. 本文认为应该给予行人运动同等的重视,尤其是车辆附近行人的行为. 由于车辆可以移动,出于安全性考虑,车辆的影响还不限于自身的大小. 如何准确刻画车辆附近行人的避让行为是描述人车相互作用的关键,目前对于这方面的系统研究还较少.

本文拟细致研究通道内行人和车辆之间的相互作用. 车辆运动描述采用细化的确定性NaSch模型<sup>[5]</sup>,而行人运动描述则采用基于背景场的格子气模型<sup>[25]</sup>. 把车辆及其影响区域作为移动的障碍物,通过在格子气模型中引入背景场来更好地反映行人在车辆周围的避让行为,并且该背景场是动态变化的. 基于该行人-车辆耦合微观模型,对人车混合交通流进行数值模拟,通过行人运动基本图以及

平均车速随行人密度的变化关系给出行人和车辆运动的统计特征,并采用人车空间分布图和短时平均车速时间序列来详细刻画人车之间的干扰机理. 文中还进一步研究行人预判时间、车辆最大限速以及车辆宽度等3个重要参数对通道内人车混合交通流的影响.

## 2 行人-车辆运动的微观离散模型

### 2.1 基本假设

本文仅研究通道内单向运动人群与单一车辆的相互作用,可以看作隧道内人群疏散的情况. 当大型活动散场时,考虑到街道两侧建筑物对人群运动的限制,也可以简化成这种情形,模型示意图如图1所示,基本假设如下:

1) 行人运动限制在水平通道内,通道上下两侧为刚性壁,不可穿越,见图1. 行人可以从左往右走,也可以从右往左走,但本文不考虑双向行人的情况. 本文引入行人预判时间 $\tau$ 来表示车辆运动对行人的影响,其数值越大,相同车速下车辆的影响范围就越大,从而行人可提前避让车辆. 该参数反映了行人对自身安全的敏感程度.

2) 车辆沿着通道的中轴线从左向右运动. 暂不考虑车辆偏离通道中轴线的情况. 车辆对行人的影响不仅限于它在通道中占据的面积,还与它的自身速度和行人的预判时间有关. 车辆速度越大,行人的预判时间越长,则车辆对前方的影响范围就越大. 同时车速还会影响两侧的行人,车速越大,行人须离车辆越远,以保障安全.

3) 采用周期边界条件. 即行人(车辆)从通道一侧边界离开,就立即从另一侧进入通道.

### 2.2 行人运动模型

#### 1) 确定背景场

本文考虑两种情况: 1) 行人和车辆运动方向相同; 2) 行人和车辆运动方向相反. 在下文中分别用Case 1和Case 2表示. 对于向右(左)运动的行人而言,右(左)侧边界产生一个背景场(floor field),如图1(b)和图1(c)所示. 右(左)行行人在该背景场的驱动下向右(左)运动. 本文将车辆作为一种可以移动的障碍物,因此车辆的影响不限于它自身所占面积,示意图见图1(a).

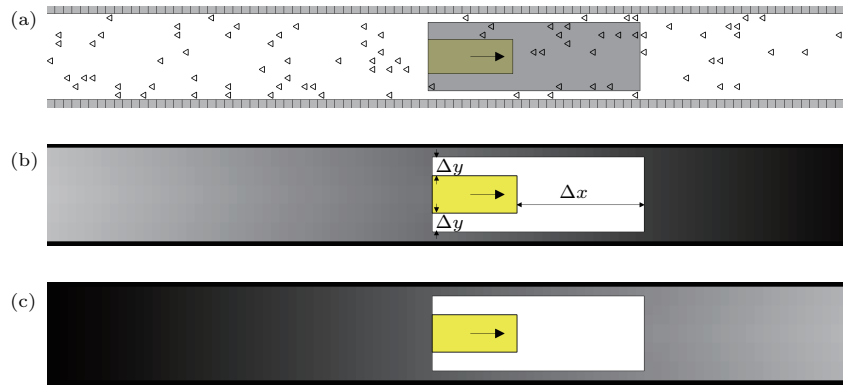


图1 车辆及其影响区和背景场示意图 (a) 车辆及其影响区(灰色); (b) 人车同向时的背景场; (c) 人车反向时的背景场; (b) 和 (c) 中白色区域(车辆的影响区)外为背景场; 行人在背景场的作用下由浅灰色区域向深灰色区域运动  
Fig. 1. Sketches of the vehicle (and its influence area) and floor fields: (a) The vehicle and its impact area (grey) in Case 2; (b) floor field in Case 1; (c) floor field in Case 2. Outside area of the white area (i.e., impact area) in panel (b) or (c) is the floor field. Pedestrians are driven to move from light-grey part to black part under the floor field.

车辆影响范围的纵向(运动方向)长度  $\Delta x$  和横向长度  $\Delta y$  的表达式如下:

$$\Delta x = v_e \times \tau,$$

$$\Delta y = \lceil v_e/v_0 \rceil,$$

其中  $v_e = \min(v(t) + 1, V_{\max})$ ,  $v_0 = 10$ ,  $\lceil \dots \rceil$  表示向上取整函数. 上式表明, 车辆的期望速度  $v_e$  越大, 行人的预判时间  $\tau$  越长, 在运动方向上的影响范围就越大; 此外车辆的期望速度还产生横向的影响, 即  $v_e$  越大, 对于车辆两侧的行人而言, 横向的安全距离就越大. Jiang 和 Wu<sup>[24]</sup> 采用了如下形式的影响区:  $\Delta x = 1 + v^2/(2a_-)$ ,  $\Delta y = 1$ ,  $a_-$  为车辆减速时的加速度, 即车辆前方的影响范围是车速为  $v$  的车辆以  $a_-$  减速到零时驶过的距离, 而横向的影响范围则是给定的.

本文采用 Varas 等<sup>[11]</sup> 提出的方法来计算内部有障碍物区域的背景场. 将车辆的影响区作为一个障碍物, 而不仅是车辆本身所占据的元胞, 如图 1(b) 和图 1(c) 所示. 由于车辆位置和影响区的大小随着时间改变, 每一时步都要重新计算背景场, 因此计算量有所增加.

2) 计算背景场的梯度, 确定行人的期望运动方向

对于车辆影响区以外的行人, 如果他所在位置处背景场梯度沿水平方向的分量大于沿垂直方向的分量, 则沿水平方向运动, 反之则沿垂直方向运动.

对于处于车辆影响区(其中无背景场)的行人,

他们倾向于尽快离开该区域, 因而根据其相对于中轴线的位置, 选择向上或向下运动.

3) 行人根据相邻元胞的状态确定目标元胞

当行人的期望运动方向确定后, 他与周围行人或车辆的局部相互作用采用格子气模型<sup>[10]</sup> 来描述, 其中行人偏移概率用  $D$  表示. 由于采用格子气模型避免了处理行人冲突问题, 可以提高计算效率.

4) 采用随机串行更新方式逐一更新行人的位置.

### 2.3 车辆运动模型

本文采用细化的确定性 NaSch 模型, 即车道划分为长为 0.4 的元胞(即与行人所占元胞大小一致). 相应规则如下:

- 1) 加速,  $v_i = \min(v_i(t) + 1, V_{\max})$ ;
- 2) 减速,  $v_i(t + 1) = \min(v_i, d_i(t))$ ;
- 3) 运动,  $x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1)$ .

这里  $V_{\max}$  为车辆限速,  $d_i(t)$  是车辆与其正前方最近一个行人的距离.

### 2.4 人车相互作用

对于车辆而言, 当它在通道中行驶时, 为确保不发生碰撞事故, 只要前方有行人, 车辆必须在碰到行人之前停下. 另一方面, 车辆在运动时, 其影响区以及所形成的背景场会驱使前方行人避让车辆, 车速越快, 其影响区就越大. 当行人比较谨慎

而采用较大的预判时间时, 相同车速下车辆的影响区随预判时间增大. 因此, 整个车辆影响区可视为一个随速度和预判时间而动态变化的障碍物.

对于行人而言, 当他发现车辆接近时, 会根据车速做出预判, 提前向两侧避让, 以免发生碰撞. 如果避让不及或者由于其他行人阻碍而未能进入安全区域, 就会阻碍车辆的运动.

### 3 数值模拟与分析

#### 3.1 参数设置

把通道离散成由大小为  $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$  的元胞构成的二维网格, 尺度为  $L \times W$ . 一个行人最多可占据一个元胞. 本文仅研究通道内只有一辆车的情况. 设车辆的长度为  $l$ , 宽度为  $w$ . 则通道内最多可以容纳  $N = L \times W - l \times w$  人. 模拟中以下参数保持不变:  $L = 500, W = 10, l = 10, D = 0.9$ . 模型的可变参数为: 车辆限速  $V_{\max}$ , 可取 1, 5, 10, 15 和 20; 车辆的宽度  $w$ , 可取 2, 4 和 6, 分别相当于摩托车、小轿车和公交车的宽度; 行人的预判时间  $\tau$ , 可取 0, 1, 2, 3 和 4.

初始时刻, 一辆车停在通道的中心, 密度为  $\rho$  的行人随机分布在通道内. 行人密度  $\rho$  定义为

$$\rho = \frac{N_p}{N},$$

其中  $N_p$  是通道中行人的数量.

行人的平均速度  $U$  定义为

$$U = \frac{1}{T} \sum_{t=T_0+1}^{T_0+T} \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} u_i(t),$$

其中  $u_i(t)$  是第  $i$  个行人在  $t$  时的速度,  $T_0$  是系统达到稳态的时间,  $T$  是计算速度平均值所用的总时间步长.

行人流量  $J$  定义为

$$J = \rho U.$$

由于只有一辆车, 其平均速度  $V$  定义为

$$V = \frac{1}{T} \sum_{t=T_0+1}^{T_0+T} v(t),$$

其中  $v(t)$  是车辆在  $t$  时的速度.

#### 3.2 典型参数下模型的基本性质

为了把握系统的基本性质, 首先研究一组典型参数 ( $V_{\max} = 5, w = 4, \tau = 3$ ) 下的人车相互作用.

图 2 给出人车同向和反向两种情况下的行人流基本图, 并进行比较.

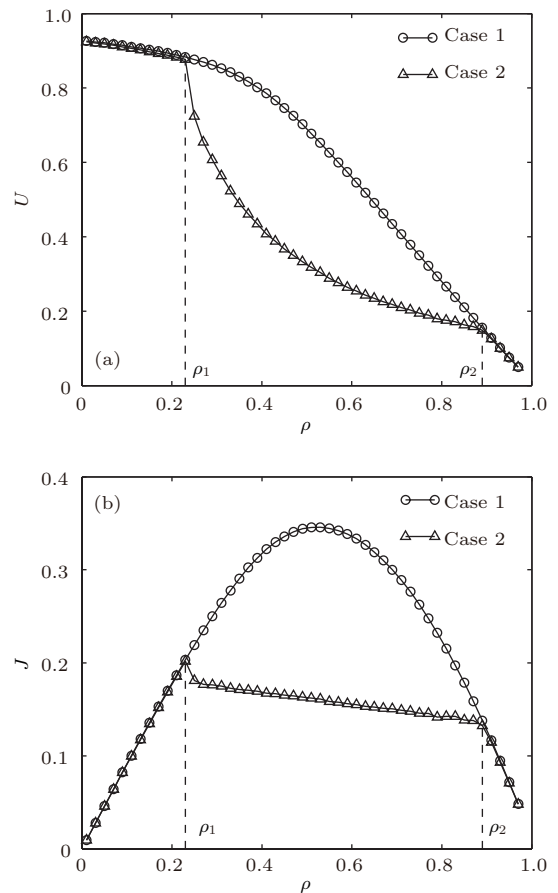


图 2 两种情况下的行人流基本图 (a) 速度-密度曲线; (b) 流量-密度曲线

Fig. 2. Fundamental diagrams for pedestrian in both cases: (a) Average speed of pedestrians against pedestrian density; (b) flux of pedestrians against pedestrian density.

由图 2 可见, 当人车同向时, 行人平均速度随着密度的增加而单调光滑地减小, 流量曲线则呈现出随密度增加先增大而后减小的趋势, 最大流量出现在  $\rho \approx 0.53$  附近. 当人车反向时, 发现存在两个临界密度  $\rho_1$  和  $\rho_2$ . 当  $\rho < \rho_1$  和  $\rho > \rho_2$  时, 两种情况下的速度(流量)-密度曲线基本重合, 表明在低密度和很高密度下, 行人的运动受车辆运动方向影响不明显, 这与日常经验是一致的. 当行人较少时, 行人会由于避让车辆而沿通道两侧行走且两侧也有足够空间, 因此人车运动都较为通畅; 而当行人密度很高, 车辆也只能缓慢行进, 甚至停滞不前. 当  $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$  时, 反向运动行人流平均速度低于同向情况. 在流量-密度曲线上则呈现线性下降的

趋势, 其斜率为

$$k = \frac{J(\rho_1) - J(\rho_2)}{\rho_1 - \rho_2}.$$

该斜率近似为一个常数 ( $k \leq 0$ ), 表明行人拥堵向上游传播的速度, 即反向车辆运动所形成的移动瓶颈的速度, 因为拥堵发生在瓶颈处及其下游区域. 该斜率依赖于车辆的宽度、行人的预估时间等参数, 将在后面给出.

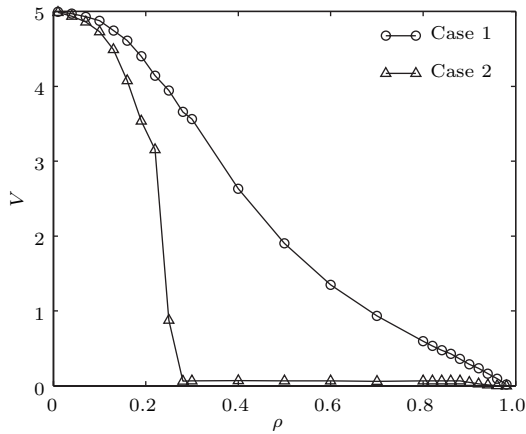


图3 平均车速随行人密度变化曲线

Fig. 3. Average speed of the vehicle against pedestrian density.

图3为平均车速随行人密度的变化, 可以看出, 当人车同向时, 平均车速随行人密度的增加而逐渐下降. 而人车反向时, 当行人密度很小时, 平均车速仅比人车同向时下降略快; 当行人密度进一步增加时则迅速下降. 当  $\rho > \rho_1$  时, 平均车速突降, 表明车辆前方上游附近开始出现行人的拥堵, 车辆只

能以很低的平均速度  $U$  运动, 且  $U \approx k$ . 表明反向移动车辆形成一个缓慢移动的瓶颈, 其速度与行人拥堵传播速度相当, 参考图4(d). 当  $\rho > \rho_2$  时, 平均车速逐渐减小, 直到完全停止.

图4给出了典型密度下的行人-车辆时空分布图. 当密度较小时, 行人大多分布在道路两侧, 见图4(a)和图4(b), 当  $\rho \ll 1$  时, 平均车速  $V \approx V_{\max}$ . 当密度较大时, 人车同向与反向两种情况差异较大: 当人车同向时, 人群在通道内分布比较均匀, 由于车辆对于行人的排斥作用, 车辆前方的行人密度略低, 见图4(c), 当  $\rho > \rho_1$  时, 平均车速  $V \approx 1/\rho - 1$ ; 而人车反向时, 图4(d)可分为两个区域, 一个是车辆下游的高密度行人拥堵区域, 车辆难以向前移动, 因此  $v \approx 0, U \approx 0$ , 另一个是车辆上游的低密度行人畅行区域, 其中  $U \approx 1$ . 由此可知人车反向时车辆所造成的瓶颈效应十分明显, 而同向运动的车辆则不会形成明显的瓶颈, 这也是两种情况下人群运动基本图在  $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$  有显著差异的根本原因.

为了更全面了解车辆的运动, 下面计算不同行人密度下的短时平均车速时间序列, 即每60个时间步长计算一次车速的平均值:

$$\bar{v}(m) = \frac{1}{60} \sum_{t=T_0+60(m-1)+1}^{T_0+60m} v(t), \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

图5为计算得到的典型密度下短时平均车速的时间序列.

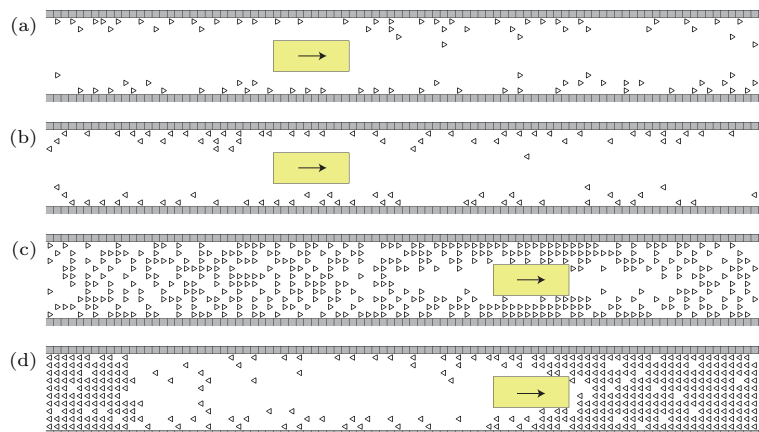


图4 典型密度下的人车空间分布 ( $L = 100, V_{\max} = 5, w = 4, \tau = 3$ ) (a) 人车同向,  $\rho = 0.1$ ; (b) 人车反向,  $\rho = 0.1$ ; (c) 人车同向,  $\rho = 0.5$ ; (d) 人车反向,  $\rho = 0.5$

Fig. 4. Spatial distribution of pedestrians and vehicle at typical densities, where  $L = 100, V_{\max} = 5, w = 4, \tau = 3$ : (a) Case 1,  $\rho = 0.1$ ; (b) Case 2,  $\rho = 0.1$ ; (c) Case 1,  $\rho = 0.5$ ; (d) Case 2,  $\rho = 0.5$ .

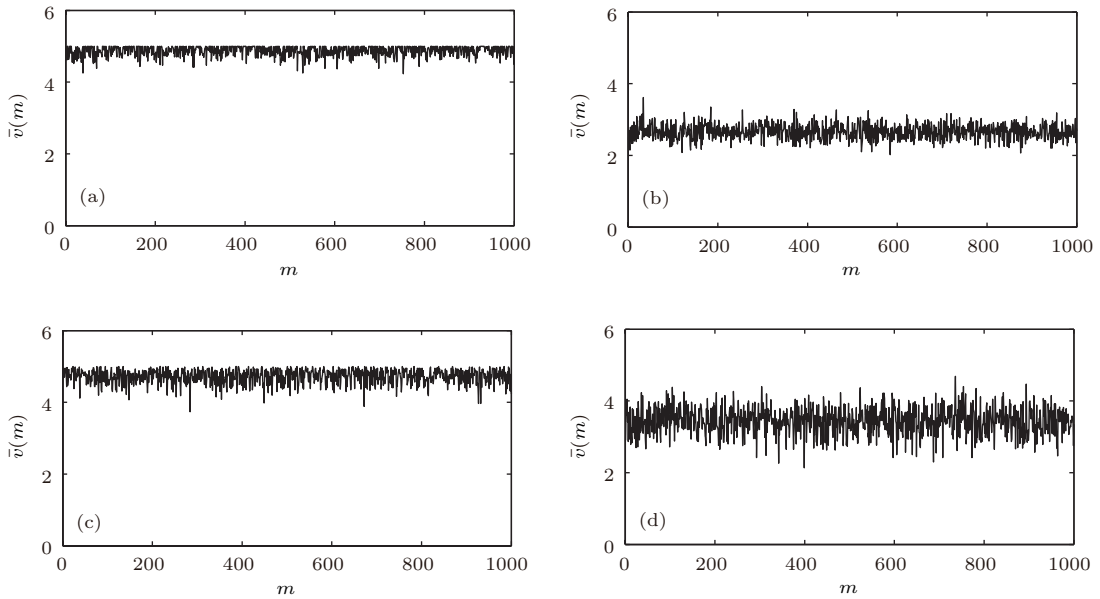


图5 典型密度下短时平均车速的时间序列 (a) 人车同向,  $\rho = 0.1$ ,  $std = 0.142$ ; (b) 人车同向,  $\rho = 0.4$ ,  $std = 0.214$ ; (c) 人车反向,  $\rho = 0.1$ ,  $std = 0.203$ ; (d) 人车反向,  $\rho = 0.2$ ,  $std = 0.382$

Fig. 5. Time series of short time average speed of the vehicle at typical densities: (a) Case 1,  $\rho = 0.1$ ,  $std = 0.142$ ; (b) Case 1,  $\rho = 0.4$ ,  $std = 0.214$ ; (c) Case 2,  $\rho = 0.1$ ,  $std = 0.203$ ; (d) Case 2,  $\rho = 0.2$ ,  $std = 0.382$ .

从图5可见, 随着行人密度的增加, 短时平均车速减少, 同时速度的脉动增大, 即标准偏差值 ( $std$ ) 增大. 当  $\rho < \rho_1$  时, 行人密度相同时, 人车反向情况下的短时平均车速下降更快, 且有更大的脉动值, 表明人车反向时车辆运动更不稳定.

### 3.3 预判时间的影响

下面研究行人预判时间  $\tau$  对人车相互作用的影响, 结果如图6所示. 当  $\tau$  较大时, 表示行人较为

谨慎, 反之则表示行人较为冒险. 当人车同向时, 行人预判时间的长短对于行人基本图没有明显的影响. 这是因为当行人密度较小时, 行人趋向于沿通道两侧行走, 因此预判时间的影响并不明显, 而当行人密度较大时, 处于车辆影响区的行人会向两侧运动, 由于道路两侧空间有限, 在车辆前方容易出现人群堆积而阻挡车辆运动, 此时车辆也只能跟着同向运动的行人缓慢向前走. 在现实交通中, 只要行人密度足够大, 行人通常也不太关注后面的车辆, 因为车辆总会尽量避免发生与行人的碰撞.

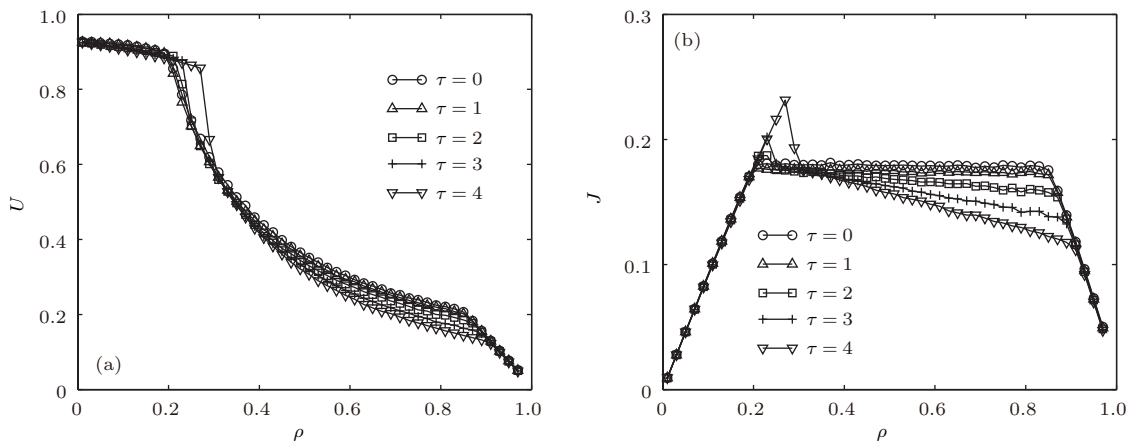


图6 人车反向运动时考虑不同预判时间的行人基本图 (a) 速度-密度曲线; (b) 流量-密度曲线

Fig. 6. Fundamental diagrams for pedestrian in Case 2 with different anticipation times: (a) Average speed of pedestrians against pedestrian density; (b) flux of pedestrians against pedestrian density.

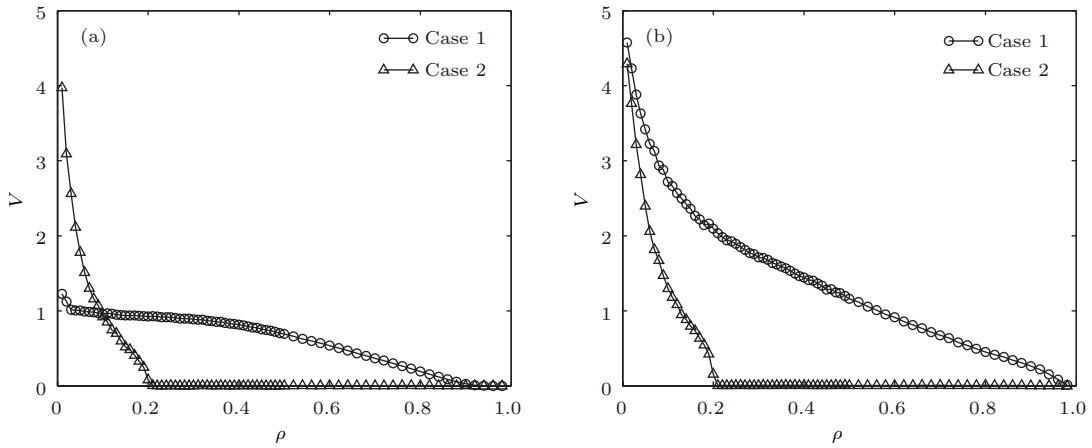


图7 不同预判时间时两种情况下平均车速随行人密度的变化 (a)  $\tau = 0$ ; (b)  $\tau = 1$

Fig. 7. Average speed of the vehicle against pedestrian density with different anticipation times: (a)  $\tau = 0$ ; (b)  $\tau = 1$ .

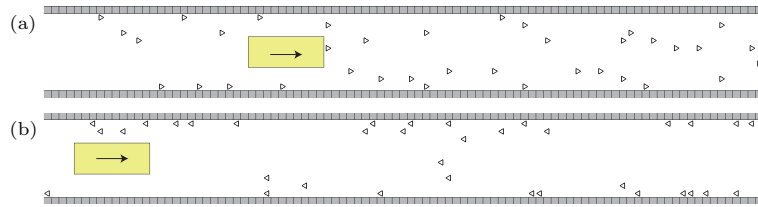


图8 典型密度下的人车空间分布, 其中  $L = 100, V_{\max} = 5, w = 4, \tau = 0, \rho = 0.04$  (a) 人车同向; (b) 人车反向  
Fig. 8. Spatial distribution of pedestrians and vehicle at typical densities, where  $L = 100, V_{\max} = 5, w = 4, \tau = 0, \rho = 0.04$ : (a) Case 1; (b) Case 2.

从图6可以看出预判时间对人车反向运动的行人基本图有一定的影响. 随着 $\tau$ 的增加, 临界密度 $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 都有所增加. 即在 $\rho_1$ 附近行人平均速度和流量有所提高, 当 $\tau = 4$ 时更加明显. 当 $\rho > \rho_1$ 时, 由于车辆前方出现了局部拥堵, 此时采取提前避让等措施将在一定程度上加剧拥堵程度, 因此反而会导致行人平均速度减小、流量明显下降. 由图6(b)可见, 当 $\rho_1 < \rho < \rho_2$ 时, 流量-密度曲线呈线性变化趋势, 其斜率 $k \leq 0$ .  $\tau$ 越大,  $k$ 越小, 表明移动瓶颈向上游移动的速度越大, 即考虑行人预判时间, 有助于车辆的运动. 当 $\tau = 0$ 时, 可以观察到一个水平的流量平台, 表明不考虑行人预判时间, 车辆将很难前进, 会形成一个静止的瓶颈.

下面研究行人预判时间对车辆运动的影响. 如果不考虑预判时间, 平均车速随行人密度的变化如图7(a)所示, 可以看出, 当行人密度很小时, 人车反向时的车速比同向时还大. 这表明当密度很小时, 不考虑行人的预判时间, 车辆逆行时更容易获得较高的速度. 图8为典型密度下的人车空间分布, 可以看出, 在人车同向时, 行人随机分布在通

道内, 部分通道中间的行人会阻碍车辆的运行 (如果考虑预判时间, 行人会在车辆到达前提前避让, 对车辆的阻碍就会明显减少); 在人车反向时, 即使不考虑行人预判时间, 车辆前方的背景场也会驱使行人靠边行走, 减少对车辆的阻挡, 因此车速反而较高. 而当行人密度进一步增大, 逆行车辆造成的局部拥堵会导致车速显著降低. 与此对比, 与行人同向的车辆可以跟随人群前行, 所以车速反而会更快一些. 如果考虑行人的预判时间, 如图7(b)所示, 可以看出, 人车同向时的车速始终大于人车反向时的车速. 随着 $\tau$ 的增加, 在同一密度下的车速都有一定的提高. 这说明无论对于人车同向还是反向, 更多的预判时间均有助于提高车辆的运行速度.

### 3.4 车辆限速的影响

图9给出了人车反向运动时的行人流基本图. 可见当行人密度较大时, 车辆限速对于行人的平均速度和流量几乎没有影响, 这是可以预期的结果. 无论车辆限速多大, 一旦车辆前方发生行人拥堵,



车辆只能低速缓行. 当行人密度较低而车辆限速较大 ( $V_{\max} = 15, 20$ ) 时, 反而导致行人平均速度略有下降, 如图 9(a) 所示. 这是因为行人密度低时高速运动车辆的影响范围很大, 减少了行人的实际运动空间, 因此造成人群运动速度的降低. 如果采用更大的通道长度, 这种效应将会减弱. 对于人车同向的情况, 其基本图也呈现类似的性质. 由图 9(b) 可见车辆限速对  $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$  之间线性流量-密度曲线的斜率基本没有影响.

图 10 给出了不同车辆限速下平均车速随行人密度的变化. 人车同向时, 当  $V_{\max} = 1$  时, 平均车速缓慢下降, 而当  $V_{\max} > 1$  时, 平均车速下降较快. 人车反向时, 平均车速很快下降到很低的平均速度, 当  $\rho \geq \rho_1$  时,  $U \approx 0.064$ , 但临界密度都未发生明显的改变.

图 11 给出了典型密度下短时平均车速的时间

序列, 可以看出, 当  $V_{\max}$  较大且  $\rho < \rho_1$  时, 无论是人车同向还是反向运动时, 短时平均车速的脉动均明显增大, 表明车辆运动出现严重的时停时走现象; 当  $\rho > \rho_1$  时, 与图 5 相比, 短时平均车速的脉动也有所增加. 总体而言, 当人车混行时, 应该采取较小的车辆限速, 或车辆应该缓行. 如果车辆尽可能以较高速度运行, 往往导致车速变化剧烈, 更容易发生拥堵.

### 3.5 车辆宽度的影响

下面考虑车辆宽度对人车运动的影响. 当人车同向时, 车辆宽度对行人的平均速度和流量几乎没有影响. 这是因为在同向运动时, 车辆可以视为以较快速度运动的一群人, 当遇到前方慢速运动的人群, 也只能减速跟随, 更大或更小的车辆宽度都不会产生明显影响.

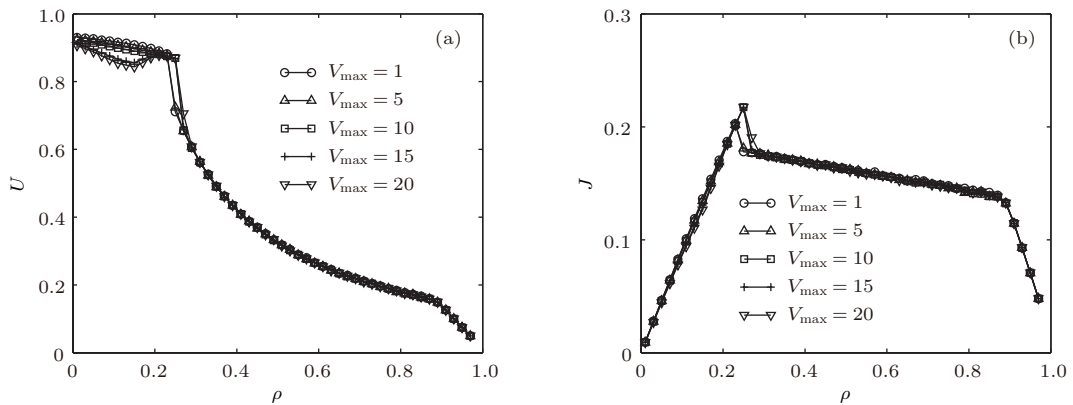


图 9 人车反向时不同车辆限速下的行人基本图 (a) 速度-密度曲线; (b) 流量-密度曲线

Fig. 9. Fundamental diagrams for pedestrian in Case 2 with different speed limits: (a) Average speed of pedestrians against pedestrian density; (b) flux of pedestrians against pedestrian density.

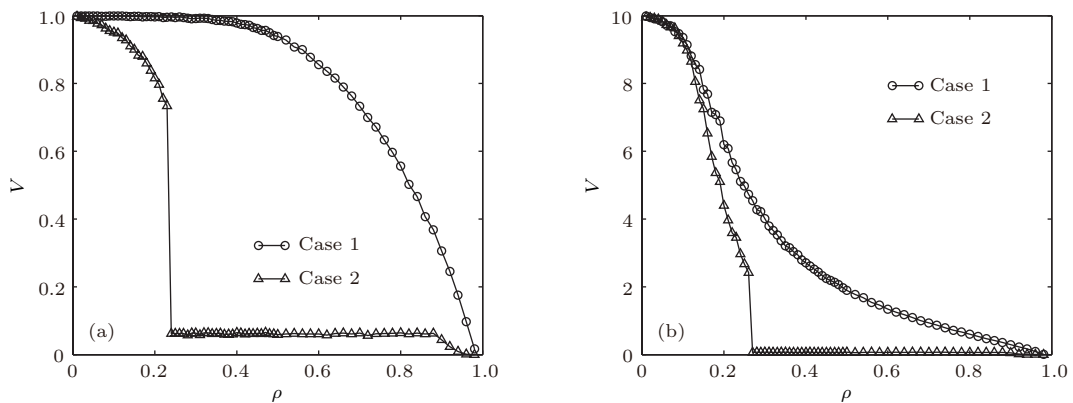


图 10 不同车辆限速时平均车速随行人密度变化曲线 (a)  $V_{\max} = 1$ ; (b)  $V_{\max} = 10$

Fig. 10. Average speed of the vehicle against pedestrian density with different speed limits: (a)  $V_{\max} = 1$ ; (b)  $V_{\max} = 10$ .

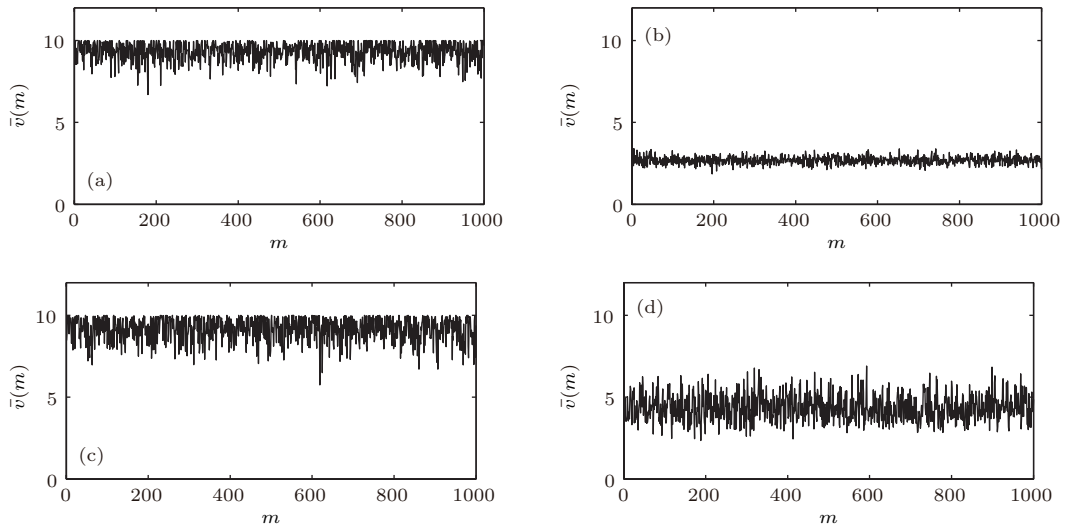


图 11 典型密度下短时平均车速的时间序列 ( $V_{\max} = 10$ ) (a) 人车同向,  $\rho = 0.1$ ,  $std = 0.573$ ; (b) 人车同向,  $\rho = 0.4$ ,  $std = 0.237$ ; (c) 人车反向,  $\rho = 0.1$ ,  $std = 0.725$ ; (d) 人车反向,  $\rho = 0.2$ ,  $std = 0.807$   
 Fig. 11. Time series of short time average speed of the vehicle at typical densities ( $V_{\max} = 10$ ): (a) Case 1,  $\rho = 0.1$ ,  $std = 0.573$ ; (b) Case 1,  $\rho = 0.4$ ,  $std = 0.237$ ; (c) Case 2,  $\rho = 0.1$ ,  $std = 0.725$ ; (d) Case 2,  $\rho = 0.2$ ,  $std = 0.807$ .

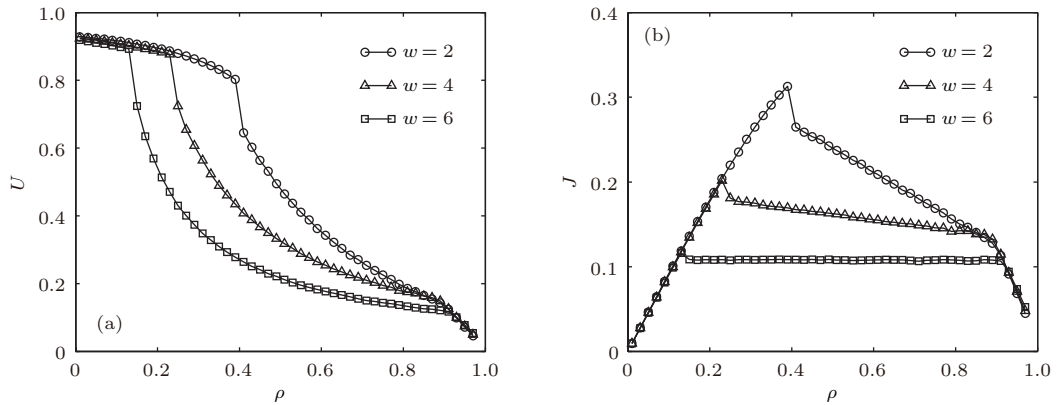


图 12 人车反向运动时不同车辆宽度下的行人基本图 (a) 速度-密度曲线; (b) 流量-密度曲线  
 Fig. 12. Fundamental diagrams for pedestrian in Case 2 with different vehicle width: (a) Average speed of pedestrians against pedestrian density; (b) flux of pedestrians against pedestrian density.

与人车同向相比, 车辆宽度对于人车反向运动的人群有显著的影响, 如图 12 所示. 可以看出, 临界密度  $\rho_1$  发生了显著变化. 车辆宽度越小,  $\rho_1$  越大, 这与日常经验是相符的. 车辆宽度越小, 由车辆产生的瓶颈效果就越弱, 相应的行人流量也会越大, 发生拥堵的临界密度也会更高. 在很高行人密度下, 这种效果就变得不明显, 因此  $\rho_2$  只是略微增大.

从图 13 可以看出车辆宽度对平均车速的影响. 在同样的行人密度下, 车辆宽度越小, 平均车速越大. 平均车速和行人运动情况密切相关. 随着行人临界密度的变化, 平均车速也同步变化. 车辆宽度越小, 车辆开始低速运动的临界密度  $\rho_1$  越大,

相应的速度值也更大, 这也体现在图 12 (b) 中, 即  $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$  时流量随密度线性下降的斜率发生变化.

图 14 给出了不同车辆宽度时的人车空间分布. 可以看出, 当车辆宽度较小时, 即使在很高密度下, 仍有可能向前运动, 如图 14 (b) 所示. 而当车辆宽度较大时, 即使密度较低, 由于车辆较宽, 在车辆前方形成更为致密的拥堵区, 虽然行人仍然可以通过瓶颈, 但是车辆前方有源源不断的行人补充, 始终阻挡车辆的运动, 形成一个固定的瓶颈, 如图 14 (d) 所示.

进一步研究不同宽度车辆的平均速度时间序列. 对于  $w = 2$  的情形, 当车辆处于运动状态时

( $\rho < \rho_1$ ), 人车同向时的平均车速要超过人车反向运动时的平均车速, 且速度脉动更小. 当人车同向时, 车辆速度脉动随着行人密度的增加而增大, 表明时停时走现象越来越频繁. 当行人密度很高时, 车辆速度脉动则会减小. 对于人车反向运动的情

况, 当  $\rho = 0.4$  时, 正好位于临界点  $\rho_1$  附近, 会出现车辆不同状态的切换, 如图 15 (b) 所示, 且各种状态都可以维持相当长的时间. 由于车辆状态的随机切换, 导致出现很高的速度脉动.

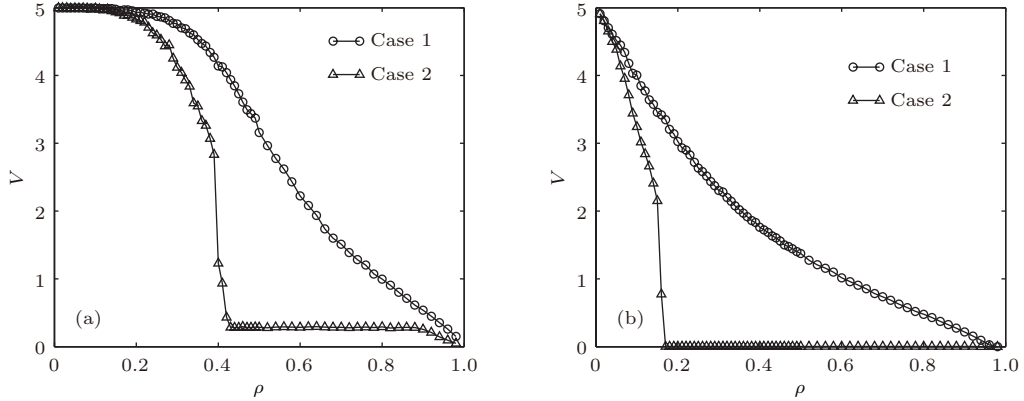


图 13 不同车辆宽度时平均车速随行人密度的变化 (a)  $w = 2$ ; (b)  $w = 6$

Fig. 13. Average speed of the vehicle against pedestrian density with different vehicle width: (a)  $w = 2$ ; (b)  $w = 6$ .



图 14 人车空间分布图, 其中  $L = 100$ ,  $V_{\max} = 5$ ,  $\tau = 3$  (a) 人车同向,  $w = 2$ ,  $\rho = 0.6$ ; (b) 人车反向,  $w = 2$ ,  $\rho = 0.6$ ; (c) 人车同向,  $w = 6$ ,  $\rho = 0.4$ ; (d) 人车反向,  $w = 6$ ,  $\rho = 0.4$

Fig. 14. Spatial distribution of pedestrians and vehicle, where  $L = 100$ ,  $V_{\max} = 5$ ,  $\tau = 3$ : (a) Case 1,  $w = 2$ ,  $\rho = 0.6$ ; (b) Case 2,  $w = 2$ ,  $\rho = 0.6$ ; (c) Case 1,  $w = 6$ ,  $\rho = 0.4$ ; (d) Case 2,  $w = 6$ ,  $\rho = 0.4$ .

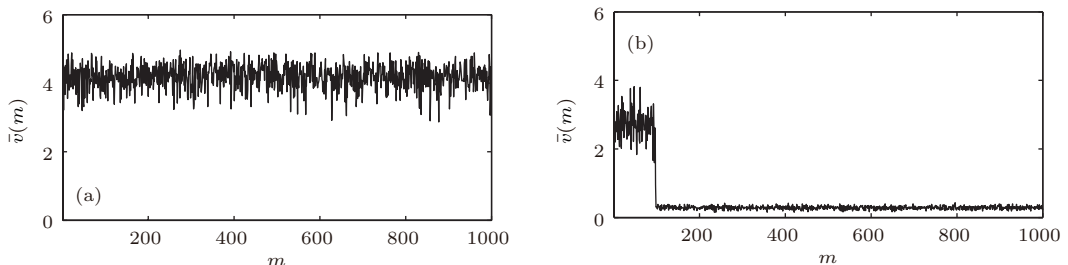


图 15 人车反向时典型密度下短时平均车速时间序列 ( $w = 2$ ) (a)  $\rho = 0.3$ ,  $std = 0.357$ ; (b)  $\rho = 0.4$ ,  $std = 0.733$

Fig. 15. In Case 2, time series of short time average speed of the vehicle at typical densities ( $w = 2$ ): (a)  $\rho = 0.3$ ,  $std = 0.357$ ; (b)  $\rho = 0.4$ ,  $std = 0.733$ .

## 4 结 论

行人和车辆组成的混合交通流会呈现出单一交通流所不具有的特性. 本文研究通道中车辆与行人同向或反向运动时人车相互作用. 车辆运动的描述采用细化的确定性NaSch模型, 而行人流则采用考虑背景场的格子气模型. 车辆及其影响区被视为一种可移动的障碍物, 同时车辆影响区的大小依赖于车速以及行人的预判时间, 因此它所形成的背景场是动态变化的. 通过数值模拟, 可以得到典型参数下的行人流基本图以及平均车速随行人密度的变化曲线. 从人车反向运动时的行人基本图发现存在两个临界密度 $\rho_1$ 和 $\rho_2$ , 当 $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$ 时, 流量-密度曲线呈线性分布, 其斜率是行人流拥堵向上游传播的速度, 也可以表征车辆所形成的移动瓶颈的速度. 当 $\rho < \rho_1$ 和 $\rho > \rho_2$ 时, 人车同向和反向的基本图接近. 当人车同向时, 车辆则不会导致明显的瓶颈效应. 进一步考察了行人预判时间、车辆的限速以及宽度对人车混合交通流的影响. 对于人车同向的情况, 这三个参数的影响都不明显. 对于人车反向的情况, 车辆宽度的影响最大, 行人预判时间次之, 而车辆限速的影响最小. 当车辆宽度较小时, 即使在很高密度下, 车辆仍可以前行. 而更多的行人预判时间也有助于车辆的运动. 人车空间分布和短时平均车速则给出更多人车运动的直观信息, 进一步验证了定量的模拟结果. 本文的结果对于大型活动散场时或隧道内发生事故时的人群疏散有一定的参考价值.

本文对通道中相互作用的行人和车流的研究并重, 但仅研究了比较简单情况. 现实交通中大多会出现双向行人流与车辆混行的情况, 此外还要从实际交通观测中提取行人和车辆的相互作用的定量信息, 并以此作为完善模型的基础, 这些都是值得继续研究的问题.

## 参考文献

[1] Chowdhury D, Santen L, Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199

[2] Maerivoet S, Moor B D 2005 *Phys. Rep.* **419** 1

[3] Schadschneider A, Klingsch W, Klüpfel H, Kretz T, Rogsch C, Seyfried A 2009 *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (New York: Springer) pp3142–3176

[4] Helbing D, Johansson A 2009 *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (New York: Springer) pp6476–6495

[5] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I* **2** 2221

[6] Knospe W, Santen L, Schadschneider A, Schreckenberg M 2000 *J. Phys. A* **33** L477

[7] Kerner B S, Klenov S L, Wolf D E 2002 *J. Phys. A* **35** 9971

[8] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507

[9] Kirchner A, Schadschneider A 2002 *Physica A* **312** 260

[10] Muramatsu M, Irie T, Nagatani T 1999 *Physica A* **267** 487

[11] Varas A, Cornejo M D, Mainemer D, Toledo B, Valdivia J A 2007 *Physica A* **382** 631

[12] Huang H J, Guo R Y 2008 *Phys. Rev. E* **78** 021131

[13] Helbing D, Jiang R, Treiber M 2005 *Phys. Rev. E* **72** 046130

[14] Duan H L, Zhang Y 2006 *ITS Communication* **8** 52 (in Chinese) [段后利, 张毅 2006 ITS通信 **8** 52]

[15] Sun Z, Jia B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 100508 (in Chinese) [孙泽, 贾斌 2012 物理学报 **61** 100508]

[16] Yu Y, Bai K Z, Kong L J 2013 *J. Guangxi Normal Univ.* (Natural Science Edition) **31** 6 (in Chinese) [余艳, 白克钊, 孔令江 2013 广西师范大学学报(自然科学版) **31** 6]

[17] Zheng Y N, Chase T, Elefteriadou L, Schroeder B, Sisiopiku V P 2015 *Simul. Modell. Pract. Theory* **59** 89

[18] Li X, Sun J Q 2015 *Physica A* **438** 251

[19] Gorrini A, Vizzari G, Bandini S 2016 *Pedestrian and Evacuation Dynamics* Hefei, China, October 17–21, 2016 p42

[20] Chen P, Wu C, Zhu S 2016 *Saf. Sci.* **82** 68

[21] Lu L L, Ren G, Wang W, Chan C Y, Wang J 2016 *Accid. Anal. Prev.* **95** 425

[22] Khallouk A, Echab H, Ez-Zahraouy H, Lakouari N 2018 *Phys. Lett. A* **382** 566

[23] Jiang R, Wu Q S 2006 *Physica A* **364** 457

[24] Jiang R, Wu Q S 2006 *Physica A* **368** 239

[25] Chen R, Li X, Dong L Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144502 (in Chinese) [陈然, 李翔, 董力耘 2012 物理学报 **61** 144502]

# Modeling and simulation on interaction between pedestrians and a vehicle in a channel\*

Zhang Ji<sup>1)</sup> Wei Yan-Fang<sup>1)2)</sup> Dong Li-Yun<sup>1)3)†</sup>

1) (Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

2) (College of Physical Science and Technology, Yulin Normal University, Yulin 537000, China)

3) (Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai 200072, China)

( Received 7 August 2018; revised manuscript received 8 October 2018 )

## Abstract

The mixed traffic flow composed of pedestrians and vehicles shows distinct features that a single kind of traffic flow does not have. In this paper, the motion of a vehicle is described by the finer deterministic Nagel-Schreckenberg model, while the motion of pedestrians is mimicked by the lattice gas model with taking the floor field into account. Then the interaction between a certain vehicle and pedestrians in a narrow channel is investigated in two cases, i.e., pedestrians move in the same as or opposite to the direction of vehicle. The direction of the pedestrian movement is determined by the floor field, and the vehicle (and its influential area), regarded as a movable obstacle, and thus causing the floor field to change. Because of the timely change of vehicle speed and the size of impact area, the floor field must be calculated at each time step. Through numerical simulation, the fundamental diagram for pedestrian flow under the typical parameters is obtained together with the average speed of the vehicle as a function of pedestrian density. It is found that there are two critical densities, i.e.,  $\rho_1$  and  $\rho_2$ . When  $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$ , the fundamental diagrams in the two cases are significantly different. This is due to the reverse movement of pedestrian and vehicle, the congestion ahead of the vehicle makes the average speed of pedestrians significantly lowered. In this case, the flux of pedestrians is a linear function of pedestrian density, and its slope indicates the speed at which pedestrian congestion propagates upstream. It can also represent the speed of the moving bottleneck formed by the vehicle. The slope mainly depends on the width of the vehicle and the anticipation time of pedestrians. When  $\rho < \rho_1$  and  $\rho > \rho_2$ , there is no obvious difference between the two cases. We further investigate the effect of three parameters, i.e., the anticipation time of pedestrians, the width and the speed limit of the vehicle. When pedestrians have the same direction as the vehicle, these parameters only have negligible effects. However, in the case that pedestrians move oppositely to the vehicle, the width of the vehicle influences the mixed traffic significantly. When the width of the vehicle is small, even in rather high pedestrian density, the vehicle can move forward. In addition, larger anticipation time of pedestrians is helpful in improving the speed of vehicle, while the effect of the speed limit of vehicle is relatively small. The spatial distribution of pedestrians and the vehicle and the short time average speed of the vehicle are also provided to reveal more information about both pedestrians and the vehicle.

**Keywords:** cellular automata, lattice gas model, pedestrian-vehicle interaction, floor field

**PACS:** 05.50.+q, 45.70.Mg, 05.65.+b

**DOI:** [10.7498/aps.67.20181499](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181499)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11572184, 11562020, 11172164) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB725404).

† Corresponding author. E-mail: [dly@shu.edu.cn](mailto:dly@shu.edu.cn)