

文章编号:1004-5309(2022)-0175-10

DOI:10.3969/j.issn.1004-5309.2022.03.01

一种基于社会力的行人-自行车混合疏散模型及模拟研究

杨龙楠,宋卫国*,张俊,张赛男,王巧,姜克淳,许晗

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室,合肥,230026)

摘要:当公共安全事件发生时,借助自行车进行疏散是一种重要方式。针对这种情况,开展了行人-自行车混合疏散建模和模拟研究。为了更好量化自行车的超越行为,引入了临时期望运动方向,改变自行车的自驱力,实现对自行车避让超越行为的细致描述;修改了单车模型来更新自行车的运动,建立了一种多层次的自行车运动子模型。将该模型与行人社会力模型相结合,得到一种基于社会力的行人-自行车混合疏散模型“MixSF”。模拟发现,MixSF能够较好地再现混合疏散中的超越行为。在实验条件下,发现个体密度小于 $0.548\text{人}/\text{m}^2$ 时,自行车占比的增加能加快疏散;相对密度大于 0.81 时,自行车失去疏散速度优势。

关键词:社会力模型;行人;自行车;混合疏散;疏散效率

中图分类号: X915.5

文献标识码: A

0 引言

随着时代的发展,城市化进程加速,人员密集场所日益增加,这给公共安全带来了更大的挑战。在诸如海啸等公共安全事件发生时,需要进一步提高人员疏散效率来保障人们的生命安全。共享单车的推广让高效方便的自行车逐渐成为了不可替代的出行工具。在发生应急安全事件时,可以借助自行车来加快疏散速度,提高疏散安全性。由于疏散场景下交通标识的约束力减弱和专用自行车道缺乏等因素,人和自行车的混合疏散无法避免。研究行人-自行车混合疏散一方面可以帮助加快大型集会等场所的疏散,给人们提供更好的道路体验;另一方面,可以助力公共安全,为应急疏散策略提供一定指导意见。

前人研究了使用自行车来加快疏散的可行性。

Takada等^[1]研究海啸情况下借助自行车进行疏散的效果,发现增加自行车疏散人员会使得疏散人群更安全。叶霞等^[2]研究借助自行车对于大型活动散场时疏散的作用,提出了基于人流预测的大型活动散场疏散模型,模拟发现自行车能够提高疏散效率。金美莲等^[3]构建了一套基于元胞自动机的混合流疏散模型,发现自行车和步行结合的疏散方式可能比单一疏散方式更有利。但在这些研究中,关于行人-自行车混合的微观疏散模型较少,且模型对自行车的运动描述不够细致。

目前较为细致的行人-自行车混合微观模型包括启发式模型^[4]、元胞自动机模型^[5,6]和社会力模型^[7-9]等。在这些模型中,对行人和自行车的微观运动特征都进行了定量描述,能够反映行人-自行车的交互作用。但是,这些模型对于自行车超越行为的描述仍然不够完善,对自行车的空间结构及更新规

收稿日期:2022-03-23;修改日期:2022-05-26

基金项目:国家自然科学基金(52074252);安徽省重点研发计划(202004a07020052)

作者简介:杨龙楠(1998—),男,中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室硕士研究生,研究方向为行人-自行车混合疏散模型。

通讯作者:宋卫国,E-mail:wgsong@ustc.edu.cn

则建模过于简化,对行人-自行车混合疏散场景的适用性仍有待研究。因此,在前人模型的基础^[9]上,本文引入临时期望运动方向实现对自行车超越行为的细致描述,综合采用社会力和单车模型更新自行车的运动状态,建立起一个多层次的自行车运动子模型,并结合行人社会力模型,得到一种基于社会力的行人-自行车混合疏散模型(MixSF)。

1 行人运动子模型

行人运动子模型采用 Helbing 的社会力模型^[10-12]。该模型中,行人个体 i 的受力 $\vec{F}_i(t)$ 可以描述为:

$$\vec{F}_i(t) = m_i \frac{d\vec{v}_i(t)}{dt} = \vec{F}_{\text{desired},i}(t) + \sum_{j(\neq i)} \vec{F}_{ij}(t) + \sum_w \vec{F}_{iw}(t) + \vec{\xi}(t) \quad (1)$$

式中: m_i 为 i 的质量; $\vec{v}_i(t)$ 为 t 时刻 i 的速度; $\vec{F}_{\text{desired},i}(t)$ 为 t 时刻 i 的自驱力; $\vec{F}_{ij}(t)$ 为 t 时刻个体 j 对 i 的作用力; $\vec{F}_{iw}(t)$ 为 t 时刻边界 w 对 i 的作用力; $\vec{\xi}$ 描述了个体的随机波动。

个体 i 在 t 时刻的自驱力 $\vec{F}_{\text{desired},i}(t)$ 为:

$$\vec{F}_{\text{desired},i}(t) = m_i \frac{v_{\text{free},i} \vec{e}_{\text{desired},i}(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} \quad (2)$$

式中: $v_{\text{free},i}$ 为 i 的期望速度; $\vec{e}_{\text{desired},i}(t)$ 为期望运动方向; τ_i 为松弛时间。

个体 i 受到个体 j 的作用力 $\vec{F}_{ij}(t)$ 包含排斥力

$\vec{F}_{\text{psy},ij}(t)$ 和接触力 $\vec{F}_{\text{phy},ij}(t)$, 如式(3)所示:

$$\begin{cases} \vec{F}_{ij}(t) = \vec{F}_{\text{psy},ij}(t) + \vec{F}_{\text{phy},ij}(t) \\ \vec{F}_{\text{psy},ij}(t) = A_{ij} \exp\left(\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_{ij}}\right) \vec{n}_{ij} \omega_{ij} \\ \vec{F}_{\text{phy},ij}(t) = K g(r_{ij} - d_{ij}) \vec{n}_{ij} + k g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \vec{t}_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中: A_{ij} 和 B_{ij} 都为常数; r_{ij} 为 i 和 j 的半径和; d_{ij} 为 i 和 j 的质心间距; $\vec{n}_{ij}$ 为由 j 指向 i 的单位向量; ω_{ij} 为各项异性系数,如式(4)所示, λ_i 为常数, φ_{ij} 为 $\vec{v}_i$ 和 $-\vec{n}_{ij}$ 的夹角; K 和 k 均为常数; $g(x)$ 为分段函数, $x > 0$ 时等于 x , 否则为 0; $\vec{t}_{ij}$ 为垂直于 i 和 j 圆心连线的单位向量; Δv_{ji}^t 为 j 和 i 速度沿 $\vec{t}_{ij}$ 方向上的分量差值。

$$\omega_{ij} = \lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos(\varphi_{ij})}{2} \quad (4)$$

个体 i 受到的边界力公式如下:

$$\vec{F}_{iw}(t) = A_{iw} \exp\left(\frac{r_i - d_{iw}}{B_{iw}}\right) \vec{n}_{iw} + K g(r_i - d_{iw}) \vec{n}_{iw} + k g(r_i - d_{iw}) \Delta v_{wi}^t \vec{t}_{iw} \quad (5)$$

式中: A_{iw} 和 B_{iw} 都为常数; r_i 为个体 i 的半径; d_{iw} 为 i 到边界 w 的距离; $\vec{n}_{iw}$ 为边界指向 i 的单位向量; d_{iw} 为 i 离边界的距离; $\vec{n}_{iw}$ 为垂直于边界且指向 i 的单位向量; $\vec{t}_{iw}$ 为平行边界的单位向量; Δv_{wi}^t 为 i 的速度在 $-\vec{t}_{iw}$ 方向上的分量值。

2 自行车运动子模型

自行车和行人在外观与运动模式上存在差异,因此直接套用行人的社会力模型来描述自行车的运动是不准确的。本文改进前人模型^[9],构建了一个多层次的基于社会力的自行车运动子模型,如图 1 所示。

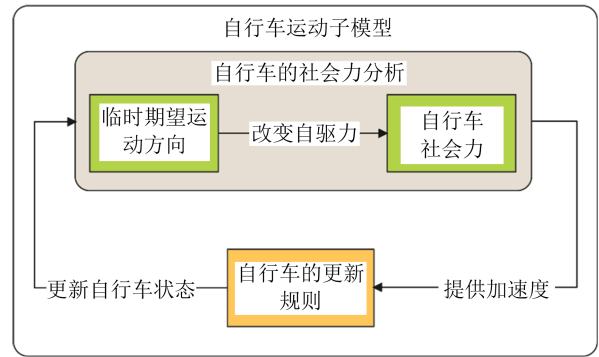


图 1 自行车运动子模型结构图

Fig. 1 Structure diagram of bicycle movement sub-model

2.1 自行车的社会力分析

基于郝妍熙的模型^[9],本文更细致地考虑了自行车的避让超越行为。假设自行车的避让超越是由于自行车骑手在期望运动方向上受到了障碍物的阻碍,此时,自行车骑手会寻找临时期望运动方向来避免可能的冲突。

自行车的空间结构如图 2 所示,使用三个圆来代表自行车。圆 1 和圆 3 分别代表前后轮区域,圆 2 代表骑行者。在分析自行车所受社会力时,首先需要生成临时期望运动方向,改变其自驱力,实现对自行车超越行为的细致描述。

借鉴无碰撞速度模型^[13-15]的方法,自行车的临时期望运动方向通过如下三个步骤得到。第一步,自行车骑行者 i (图 2 中的圆 2) 寻找期望运动方向上最近的障碍物 j_{ob} 。如图 3,图 3 中左侧的圆为自

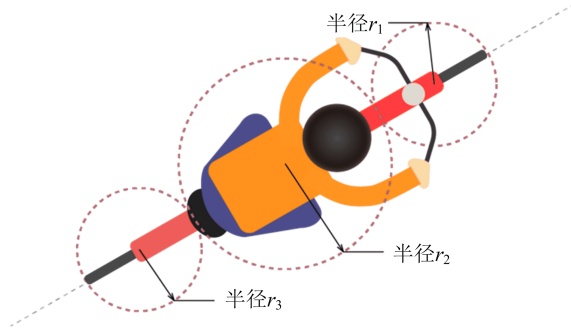


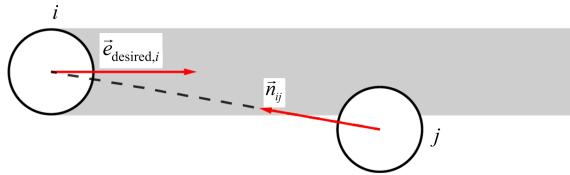
图 2 自行车的空间结构示意图

Fig. 2 Spatial structure diagram of the bicycle

行车骑行者 i (图 2 中的圆 2), 右侧的圆为障碍物 j , 障碍物是在期望运动方向 $\vec{e}_{\text{desired},i}$ 上可能与骑行者发生冲突的行人或其他自行车的圆 (可以是图 2 中的圆 1、圆 2 或圆 3)。为了更好体现自行车的避让超越行为, 假设障碍物的影响区域半径如下式所示:

$$r_{\text{desired},ob} = 2r_{ob} \quad (6)$$

式中: r_{ob} 为 j_{ob} 的半径。

图 3 自行车 i 的骑行者的障碍物判断示意图Fig. 3 Obstacle judgment diagram of the rider of bicycle i

第二步, 判断 j_{ob} 离骑行者的距离是否大于临界距离 S_c 。如果满足条件, 自行车将保持期望运动方向。否则, 寻找与障碍物的影响区域相切的两个方向 (如图 4 所示)。

第三步, 判断这两个方向上的空间是否足够。如果均满足条件, 则选择较近的方向 $\vec{e}_{\text{close}}$ 为临时期望运动方向。如果仅一个方向满足, 则选择该方向为临时期望运动方向。如果均不满足, 骑行者将保持原期望运动方向 $\vec{e}_{\text{desired},i}$ 。

考虑临时期望运动方向时, 自行车 α 产生的自驱力为:

$$\vec{F}_{\text{desired},\alpha}(t) = m_\alpha \frac{v_{\text{free},\alpha} \vec{e}'_{\text{desired},\alpha}(t) - \vec{v}_\alpha(t)}{\tau_\alpha} \quad (7)$$

式中: m_α 为自行车 α 的总质量; $v_{\text{free},\alpha}$ 为 α 的期望速度; 当临时期望运动方向存在时, $\vec{e}'_{\text{desired},\alpha}(t)$ 为 α 在 t 时刻的临时期望运动方向, 否则为原期望运动方

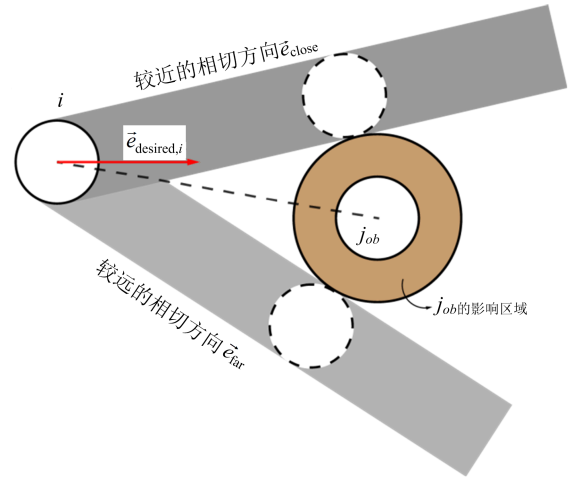
图 4 自行车 i 的临时期望运动方向选择示意图

Fig. 4 Schematic diagram about the selection of bicycle's temporary expected moving direction

向 $\vec{e}_{\text{desired},i}(t)$; $\vec{v}_\alpha(t)$ 为 α 在 t 时刻的速度; τ_α 为松弛时间。

关于个体间的受力以及个体与边界的受力, 本文考虑到疏散场景可能存在的接触, 在前人模型^[9]的基础上添加了接触力。因而, 自行车 α 受到自行车 β 的心理排斥力和物理接触力公式如下:

$$\vec{F}_{\text{psy},\alpha\beta}(t) = \sum_{a=1}^2 \sum_{b=1}^3 A_{ab} \exp\left(\frac{r_{ab} - d_{ab}}{B_{ab}}\right) \vec{n}_{ab} \omega_{ab} \quad (8)$$

$$\omega_{ab} = \lambda_\alpha + (1 - \lambda_\alpha) \frac{1 + \cos(\varphi_{ab})}{2} \quad (9)$$

$$\vec{F}_{\text{phy},\alpha\beta}(t) = \sum_{a=1}^2 \sum_{b=1}^3 K' g(r_{ab} - d_{ab}) \vec{n}_{ab} + \sum_{a=1}^2 \sum_{b=1}^3 k' g(r_{ab} - d_{ab}) \Delta v_{ba}^t \vec{t}_{ab} \quad (10)$$

式中: a 代表自行车 α 的圆 a ; b 代表自行车 β 的圆 b , 通过遍历圆 a 和圆 b , 可以得到自行车 α 的圆 1 和圆 2 受到自行车 β 的三个圆的作用力; A_{ab} 和 B_{ab} 为常数; r_{ab} 为圆 a 和圆 b 的半径和; d_{ab} 为圆 a 与圆 b 的圆心距; $\vec{n}_{ab}$ 为圆 b 圆心指向圆 a 圆心的单位向量; ω_{ab} 为各向异性系数, λ_α 为常数, φ_{ab} 为个体 i 的运动方向和 ij 质心连线的夹角; K' 和 k' 均为常数; $\vec{t}_{ab}$ 为垂直于 a 和 b 连线的单位向量; Δv_{ba}^t 为圆 b 和圆 a 的速度沿 $\vec{t}_{ab}$ 方向上的分量差值。

自行车和行人之间的相互作用为:

$$\vec{F}_{ai}(t) = \sum_{a=1}^2 A_{ai} \exp\left(\frac{r_{ai} - d_{ai}}{B_{ai}}\right) \vec{n}_{ai} \omega_{ai} + \sum_{a=1}^2 K' g(r_{ai} - d_{ai}) \vec{n}_{ai} +$$

$$\sum_{a=1}^2 k'g(r_{ai} - d_{ai})\Delta v_{ia}^t \vec{t}_{ai} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \vec{F}_{ia}(t) = & -\sum_{a=1}^2 A_{ia} \exp\left(\frac{r_{ai} - d_{ai}}{B_{ia}}\right) \vec{n}_{ai} \omega_{ia} - \\ & \sum_{a=1}^2 K'g(r_{ai} - d_{ai}) \vec{n}_{ai} + \\ & \sum_{a=1}^2 k'g(r_{ai} - d_{ai}) \Delta v_{ia}^t \vec{t}_{ia} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: a 代表自行车 α 的圆 a ; A_{ai} 和 B_{ai} 为常数; r_{ai} 为圆 a 和行人 i 的半径和; d_{ai} 为圆 a 与 i 的圆心距; $\vec{n}_{ai}$ 为 i 指向圆 a 圆心的单位向量; ω_{ai} 和 ω_{ia} 为各向异性系数; $\vec{t}_{ai}$ 和 $\vec{t}_{ia}$ 为垂直于 a 和 i 连线方向上的两个单位向量; Δv_{ia}^t 为行人 i 和圆 a 的速度沿 $\vec{t}_{ai}$ 方向上的分量差值; Δv_{ia}^t 为圆 a 和行人 i 的速度沿 $\vec{t}_{ia}$ 方向上的分量差值。

自行车 α 受到的边界力为:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{aw}(t) = & \sum_{a=1}^2 A_{aw} \exp\left(\frac{r_a - d_{aw}}{B_{aw}}\right) \vec{n}_{aw} + \\ & \sum_{a=1}^2 K g(r_a - d_{aw}) \vec{n}_{aw} + \\ & \sum_{a=1}^2 k g(r_a - d_{aw}) \Delta v_{wa}^t \vec{t}_{aw} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: a 代表 α 的圆 a ; A_{aw} 和 B_{aw} 为常数; r_a 为圆 a 半径; d_{aw} 为圆 a 和边界 w 的距离; $\vec{n}_{aw}$ 为垂直于边界且指向圆 a 圆心的单位向量; $\vec{t}_{aw}$ 为平行边界的单位向量; Δv_{wa}^t 为圆 a 的速度沿 $-\vec{t}_{aw}$ 方向上的分量值。

2.2 自行车的更新规则

前人模型常采用行人的更新方式(见式(14)和式(15))来更新自行车,但实际场景中自行车的运动状态主要由两个方面决定:(1)根据脚踏板的力度或刹车力度确定自行车后轮的速率加减;(2)通过转动车把手改变自行车的前轮转角,控制自行车行驶方向。为了实现这两点,本文引入并修改单车模型^[16,17]来更新自行车的运动状态。

$$\vec{x}(t + \Delta t) = \vec{x}(t) + \vec{v} \Delta t \quad (14)$$

$$\vec{v}(t + \Delta t) = \vec{v}(t) + \vec{a} \Delta t \quad (15)$$

单车模型的示意图如图 5。

图 5 中:线段 AC 代表车身; A (圆 1 中心)是前轮的中心, A 附近的长条状阴影代表自行车前轮, θ_1 是前轮转角(以下统称转角), $\vec{v}_1$ 为 A 点的速度, v_1 为速度大小; B (圆 2 中心)为自行车的质心, $\vec{v}_2$ 为 B 点的速度, v_2 为速度大小; θ_2 为速度和车身的

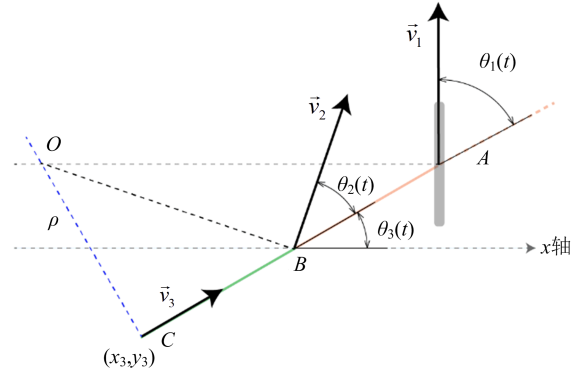


图 5 单车模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bicycle model

夹角; θ_3 为航向角,即自行车车身与 x 轴的夹角; C (圆 3 中心)是后轮的中心, $\vec{v}_3$ 为 C 点的速度, v_3 为速度大小, $v_3 \geq 0$; O 为速度瞬心,则有 $\overrightarrow{OA} \perp \vec{v}_1$, $\overrightarrow{OB} \perp \vec{v}_2$, $\overrightarrow{OC} \perp \vec{v}_3$; $\rho = OC$ 。

假设 B 的位置为 (x_2, y_2) ,单车模型中二维平面的自行车非线性运动方程^[16]如下:

$$\dot{x}_2 = v_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \quad (16)$$

$$\dot{y}_2 = v_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (17)$$

$$\dot{\theta}_3 = \frac{v_2}{BC} \sin \theta_1 \quad (18)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\tan \theta_1 \frac{BC}{AC}\right) \quad (19)$$

本文使用后轮的位置 (x_3, y_3) 和航向角 θ_3 来体现自行车的运动状态,修改并简化式(16)~式(19)为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 \\ \tan \theta_1 / AC \end{bmatrix} v_3 \quad (20)$$

输入当前时刻 v_3 的变化率 a_3 和转角 θ_1 ,下一时刻自行车的运动状态更新如下:

$$\begin{bmatrix} x_3(t + \Delta t) \\ y_3(t + \Delta t) \\ v_3(t + \Delta t) \\ \theta_3(t + \Delta t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_3(t) \\ y_3(t) \\ v_3(t) \\ \theta_3(t) \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} v_3 \cos \theta_3 \\ v_3 \sin \theta_3 \\ a_3 \\ v_3 \tan \theta_1 / AC \end{bmatrix}^T \Delta t \quad (21)$$

a_3 和转角 θ_1 由改进的自行车社会力模型给出:

$$\vec{F}_a(t) = \vec{F}_{\parallel, a}(t) + \vec{F}_{\perp, a}(t) \quad (22)$$

$$a_3 = \frac{\vec{F}_{\parallel, a}(t)}{m_a} \cdot \frac{\vec{CA}}{\|CA\|} \quad (23)$$

$\theta_1 =$

$$\begin{cases} \min\left(\theta_{\max}, \tan^{-1}\left(k_{\theta_1} \frac{AC \cdot \|\vec{F}_{\perp,a}(t)\|}{m_a v_3^2}\right)\right), v_3 \neq 0, \\ \theta_{\max}, v_3 = 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\tan\theta_1 = \frac{AC}{\rho} \quad (25)$$

$$a_{\text{cen},\theta_1} = \frac{v^2}{\rho} \quad (26)$$

式中: $\vec{F}_a(t)$ 为自行车所受合力, $\vec{F}_{\parallel,a}(t)$ 和 $\vec{F}_{\perp,a}(t)$ 分别为沿着平行和垂直车身(AC)方向的合力分量; m_a 为自行车的质量; $\theta_{\max}$ 为自行车前轮允许的最大转角; k_{θ_1} 为骑行者对 $\vec{F}_{\perp,a}(t)$ 反应系数, 本文取值为 1; a_{cen,θ_1} 为 θ_1 下自行车后轮的向心加速度, 基于后轮的期望向心加速度大小为 $k_{\theta_1} \cdot \frac{\|\vec{F}_{\perp,a}(t)\|}{m_a}$ 的假设得到式(24), 对应的期望转角 θ_1 由式(25)和(26)可得。

3 MixSF 的建立和模拟

综合行人运动子模型和自行车运动子模型, 得到一种基于社会力的行人-自行车混合疏散模型(MixSF)。模型采用式(14)和式(15)更新行人运动状态, 采用式(21)更新自行车运动状态。

疏散场景往往具有单向性。因而本节针对常见的直通道场景开展周期性边界下的单向混合疏散模拟, 研究自行车占比和相对密度对混合疏散的影响。

3.1 模拟参数标定

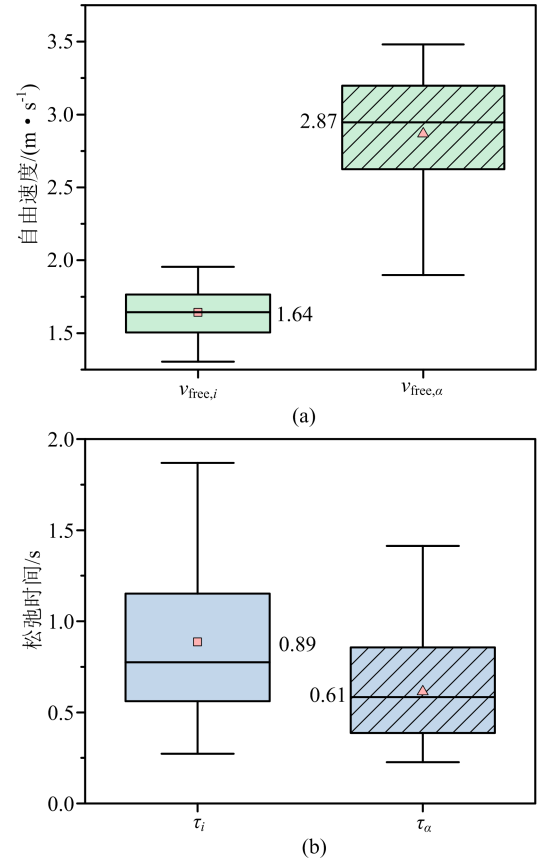
MixSF 模型参数分为直接测量参数(个体的自由速度和松弛时间)和间接获得参数(如公式中的排斥力作用强度)。对于直接测量参数, 由自驱力公式, 可以得到自由运动情况下个体速度随时间变化公式:

$$v(t) = v_{\text{free}}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (27)$$

式中: $v(t)$ 为个体在 t 时刻的速度大小, v_{free} 为个体的自由速度, τ 为个体的松弛时间。

利用 Wang 等^[18] 的 38 组行人和 38 组自行车的自由运动实验数据, 对式(27)进行拟合, 剔除异常值, 得到行人和自行车的自驱力方程的拟合参数分布图(见图 6), 个体的自由速度和松弛时间采用拟合参数的平均值, 即 $v_{\text{free},i} = 1.64 \text{ m/s}$, $\tau_i = 0.89 \text{ s}$, $v_{\text{free},a} = 2.87 \text{ m/s}$, $\tau_a = 0.61 \text{ s}$ 。

模型的间接测量参数通过参考前人的工作^[7,9]



图(a)按从左到右的顺序展示了行人和自行车的自由速度箱型图, 图(b)从左到右的顺序展示了行人和自行车的松弛时间箱型图, 其中的小方块和小三角形分别是行人箱型图和自行车箱型图的均值。

图 6 行人和自行车的自驱力参数箱型图

Fig. 6 Box figure of driving force parameter of pedestrian and bicycle

和多次模拟测试来确定。最终, MixSF 模型使用的相关参数见表 1。

选取某校园内一直通道在上下课时间段的观测数据, 利用 MixSF 模型对此场景开展模拟。通过对模拟结果和观测数据的对比(如图 7 和图 8), 发现模型在一些微观运动特征方面(如轨迹、速度等)能够较好地再行人-自行车混合流中典型的避让超越行为。

前人(王占中等^[7]和郝妍熙等^[9])构建的行人-自行车混合社会力模型中, 期望运动方向只取决于最终目标点, 自驱力不受障碍物的影响。因此在遭遇障碍物时, 自行车无法提前进行避让超越(例如 Wang 等^[18]的实验中得到自行车提前避让距离约为 2.82 m)。由于排斥力随着距离的增加呈指数型减小, 自行车只有在非常靠近障碍物时, 才能在排斥力

的作用下减速避让再超越障碍物,而在行人和自行车共线同向运动时甚至无法完成超越。本文通过去掉 MixSF 模型中自行车的临时期望运动方向来近似前人的模型规则,得到如图 9 所示的模拟结果。图 9 (a)中,单个圆代表行人,圆内的直线表示其运动方向,三个相接的圆代表自行车,其中的粗线表示前轮朝向,细线代表车身。当自行车和行人共线时,前人的模型中自行车只会跟随行人运动,即使有足够的超越空间,也不会产生避让超越行为,这与疏散过程中人群争先恐后的求生行为不一致。本文使用 MixSF 模型(考虑了自行车的临时期望运动方向)同样开展了自行车和行人共线模拟,如图 10 所示,发现模型能够很好地复现自行车的超越行为,体现了模型的优越性。

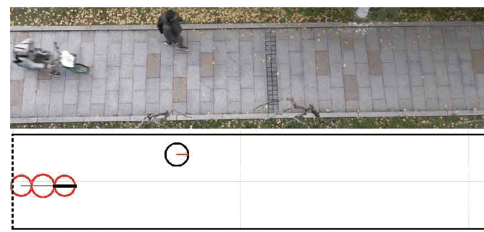
表 1 参数表

Table 1 Parameter table

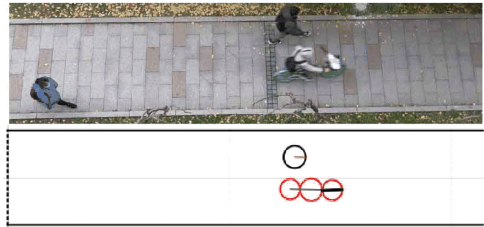
参数	取值	单位	参数	取值	单位
r_i	0.25	m	B_{ij}	0.08	m
r_1	0.225	m	A_{ab}	22.5	N
r_2	0.25	m	B_{ab}	3	m
r_3	0.225	m	A_{ai}	22.5	N
m_i	60	kg	B_{ai}	5	m
m_a	80	kg	A_{ia}	2.25	N
K	$1.2 \cdot 10^5$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	B_{ia}	3	m
k	$2.4 \cdot 10^5$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	A_{iw}	200	N
K'	$1.2 \cdot 10^3$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	B_{iw}	0.08	m
k'	$2.4 \cdot 10^3$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	A_{aw}	100	N
$v_{\text{free},i}$	1.64	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	B_{aw}	0.5	m
$v_{\text{free},a}$	2.87	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	λ_i	0.3	—
S_c	3.2	m	λ_a	0.3	—
θ_{max}	$\pi/6$	—	τ_i	0.89	s
A_{ij}	2 000	N	τ_a	0.61	s

3.2 自行车占比分析

为研究自行车占比 p_{bic} (即自行车数 n_{ped} 占个体总数 Sum 的比例)对疏散效率的影响,本文考虑长 20 m,宽 2.1 m(宽与图 7 的场景相对应)的狭窄直通道场景,保持自行车和行人总数 Sum 一定,随机生成行人和自行车个体,开展如图 11 的周期性边界下的混合疏散模拟。通过多次测试发现,自行车



(a) $t=0$ s时的实验和模拟场景



(b) $t=1.6$ s时的实验和模拟场景

图 7 $t=0$ s 和 1.6 s 时实验和模拟的场景对比图

Fig. 7 The comparison of experiment and simulation scenarios when $t=0$ s and 1.6 s

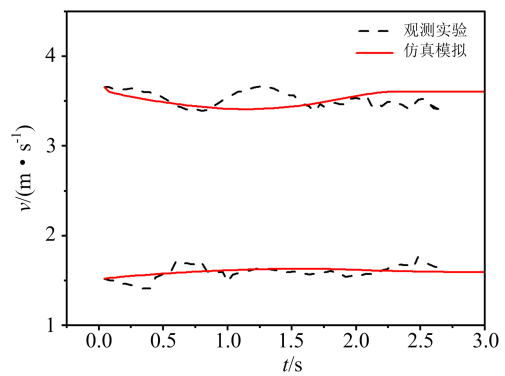


图 8 实验和模拟的速度-时间图

Fig. 8 Speed-time relation of the experiment and simulation

数量高于 35 辆时难以生成场景,因此 Sum 需要小于 35。对于每个 Sum ,考虑多种工况(即随机生成的自行车数量以 1 为增量从 0 到 Sum),重复模拟 20 次,计算 50 s~150 s 内(通道中个体的速度在第 50 s 达到相对稳定)的平均速度和平均流量。其中平均流量为每秒通过 $x=10$ m(通道中线)的平均个体(行人或自行车)数量。

图 12 为 $Sum=10,15,20,25,30$ 和 35 时,通道总个体的平均速度和平均流量在不同自行车占比下的表现,可以看到,个体密度较小时,例如 $Sum=10$ (0.238 人/ m^2),总个体的平均速度和平均流量均随自行车占比的增加而增加。这说明较低个体密度下,自行车占比的增加能够提高疏散效率,体现了借助自行车加快疏散的可行性。

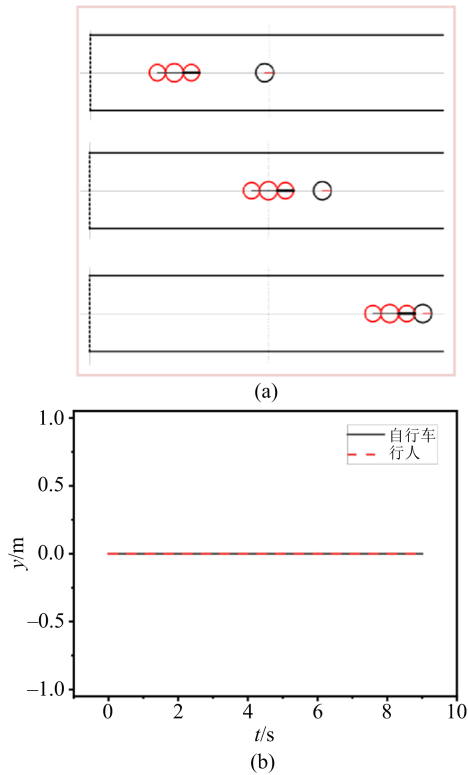


图9 不考虑临时期望运动方向下的行人和自行车同向共线模拟: x 轴沿通道方向, y 轴垂直于通道方向,(a)为三个模拟截图,从上到下依照时间先后顺序排序;(b)为模拟中行人和自行车的 y 坐标变化情况图

Fig. 9 Simulation of bicycle and pedestrian alignment without considering temporary expected movement direction

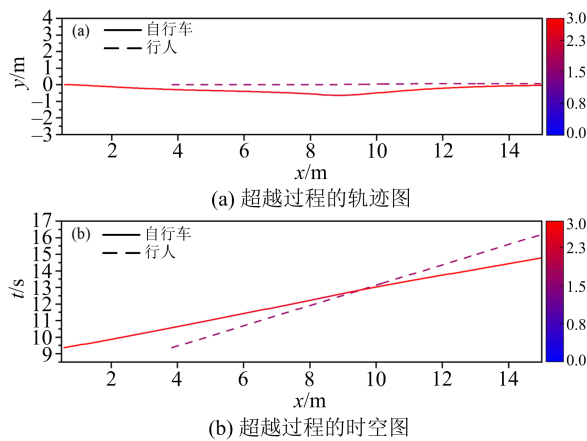
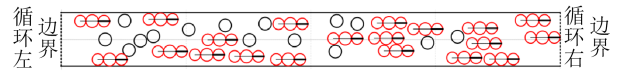


图10 行人和自行车同向共线场景下的 MixSF 模拟结果图
Fig. 10 MixSF simulation results under the scenario of bicycle and pedestrian alignment

从图12还可以发现,当个体密度较高,例如 $Sum=35$ (0.833 人/ m^2)时,自行车占比的增加反而会使总体的平均速度和平均流量下降。通过对



图中单个圆代表行人,圆内的直线表示其运动方向,三个相接的圆代表自行车,其中的粗线表示前轮朝向,细线代表车身。

图11 周期性边界下的模拟场景图

Fig. 11 Simulation scenario diagram under periodic boundary

$Sum=35$ 时的自行车和行人的平均速度变化情况(如图13)进行分析,可以看到当自行车占比小于 0.54 时,自行车的平均速度接近行人的平均速度;而自行车占比大于 0.54 时,自行车和行人的平均速度差异随着自行车占比的增大而减小。这是因为个体密度较高时,通道空间占有率较高,自行车难以超越行人。且自行车占比的增加使得通道空间占有率越来越高,导致自行车的运动比行人的运动更为艰难。

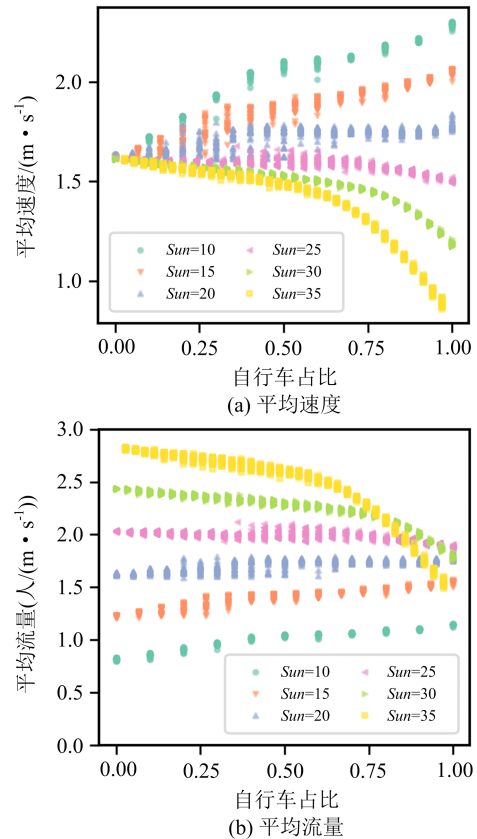
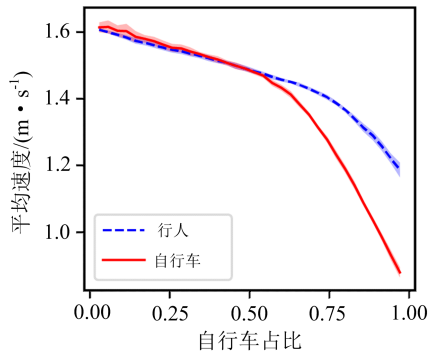


图12 $Sum=10, 15, 20, 25, 30$ 和 35 时,总个体的平均速度(a)和平均流量(b)在不同自行车占比下的散点分布图。

图(a)和图(b)中,每个自行车占比对应20个散点(每组工况重复20次)

Fig. 12 Scatter plot of average velocity (left) and average flow (right) of total individuals under different bicycle proportions when $Sum=10, 15, 20, 25, 30, 35$



图中的曲线代表 20 组数据的平均结果,阴影区域代表数据的波动范围。

图 13 $Sum = 35$ 时,自行车和行人的平均速度随自行车占比变化图

Fig. 13 The average speed of bicycles and pedestrians changes with the proportion of bicycles when $Sum = 35$

通过对图 12 中,不同 Sum 取值下的平均速度和平均流量的散点分布进行对比,可以发现随着个体密度的增大,自行车占比的增加对疏散速度和疏散流量的促进程度在逐渐减弱(例如从图 12 中的 $Sum = 10$ 下的工况变化到 $Sum = 20$ 下的工况)。且存在一个临界值,个体密度超过此临界值后,自行车占比的增加反而降低疏散速度和疏散流量,个体密度越大,降低的程度也越大(例如从图 12 中的 $Sum = 25$ 下的工况变化到 $Sum = 35$ 下的工况)。

为寻找此临界值,本文进一步模拟分析了 $Sum = 21, 22, 23$ 和 24 的场景,并计算所有 Sum 取值下的平均速度和平均流量的标准差,得到图 14。其中标准差越大,自行车占比对速度和流量的影响也就越大。从图 14 中可以看到,平均速度和平均流量的标准差随着个体数量的增加均先减小后增大,且极小值都在 $Sum = 23$ 取得。因此所求的临界个体密度约为 $0.548 \text{ 人}/\text{m}^2$ 。

3.3 相对密度分析

为了进一步研究行人-自行车混合疏散场景中的空间占有率对混合疏散效率的影响,本小节通过控制自行车占比,模拟不同相对密度 d_r 下的混合疏散, d_r 的定义如下:

$$d_r = Sum / Sum_{\max} \quad (28)$$

式中: d_r 为相对密度; Sum 为个体总数, $Sum_{\max}$ 为给定自行车占比下能够随机生成的最大个体数量。当自行车占比一定时,假设控制自行车占比为 p_{bic} ,单个行人所占空间为 S_{ped} ,单辆自行车所占空间为 S_{bic} ,通道总空间为 S ,个体总数为 Sum

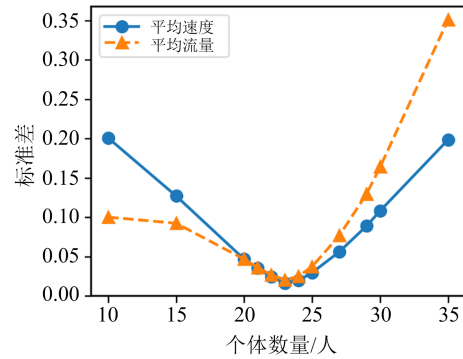


图 14 自行车占比对总个体平均速度和平均流量的影响程度(标准差)随个体数量的变化曲线

Fig. 14 The variation curve of the influence (standard deviation) of bicycle proportion on the average speed and average flow of total individuals with individual number

时,通道的空间占有率为

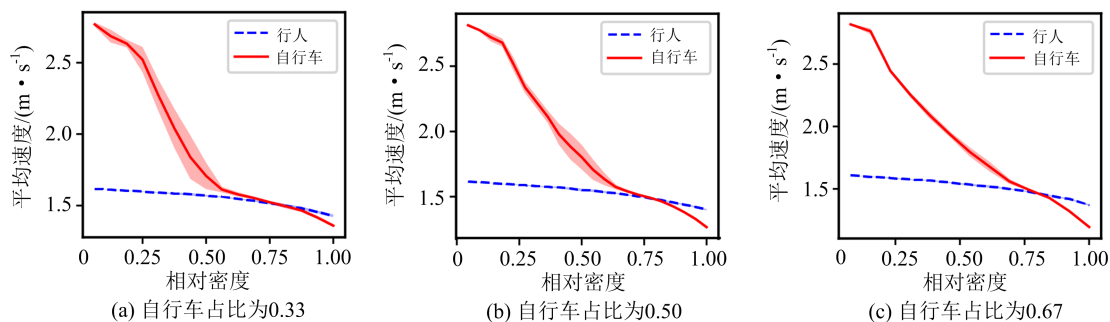
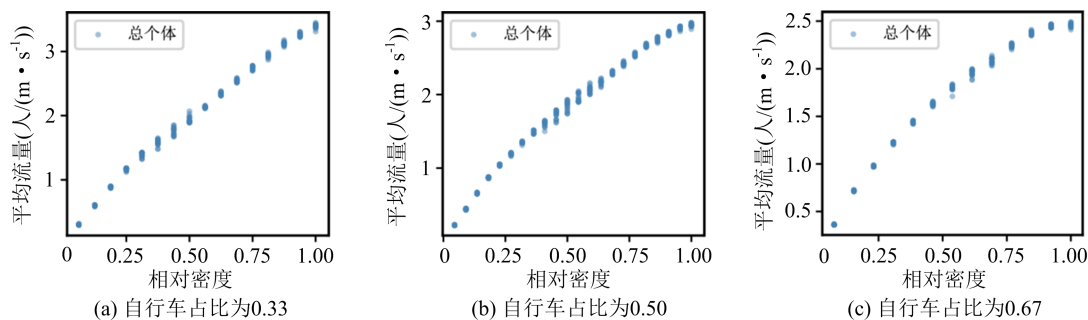
$$\rho = \frac{Sum \cdot p_{\text{bic}} \cdot S_{\text{ped}} + Sum \cdot (1 - p_{\text{bic}}) \cdot S_{\text{bic}}}{S} = Sum \cdot \frac{p_{\text{bic}} \cdot S_{\text{ped}} + (1 - p_{\text{bic}}) \cdot S_{\text{bic}}}{S},$$

ρ 和 Sum 成正比。由于同一自行车占比下 $Sum_{\max}$ 不变,因此 d_r 可以体现空间占有率。

本小节采用和上一小节相同的通道场景,开展三种自行车占比下的模拟,即 $p_{\text{bic}} = 0.33, 0.50$ 和 0.67 。通过多次模拟测试可知,三个占比下的 $Sum_{\max}$ 分别为 48、44 和 39。控制三个占比下的行人和自行车的生成比例(分别为 $2:1, 1:1$ 和 $1:2$),分别以 3、2 和 3 为增量逐渐增加场景的个体总数到最大值,得到多个工况,并对每个工况模拟 20 次。

图 15 展示了三种自行车占比下行人和自行车的平均速度随相对密度 d_r 的变化,可以发现这三种自行车占比下的平均速度变化曲线极为相似。行人和自行车的平均速度均随着相对密度的增大而下降。且自行车的平均速度下降更快。此外,发现自行车的曲线和行人的曲线均存在交点,此三种情况下的交点对应的相对密度相同($d_r = 0.81$)。只有在 $d_r < 0.81$ 时,自行车的平均速度才高于行人的平均速度,说明自行车只有在相对密度处于 0 到 0.81 区间内才具有速度上的优势。这种速度优势随着相对密度的增大而减小。相对密度超过 0.81 这个临界值时,自行车会失去疏散速度优势。因此在进行混合疏散时,应考虑将相对密度控制在 0.81 以下。

从总个体平均流量来看,如图 16,此三种自行车占比的总个体平均流量均随着相对密度的增加而增长。

图 15 三种自行车占比下相对密度 d_r 对行人和自行车平均速度的影响Fig. 15 Influence of relative density d_r on average speed of pedestrians and bicycles under three kinds of bicycle proportion图 16 三种自行车占比下相对密度 d_r 对总个体平均流量的影响Fig. 16 Influence of relative density d_r on total average flow rate under three kinds of bicycle proportion

4 总结

在前人工作的基础上,本文引入临时期望运动方向改进了自行车的自驱力,更为准确地量化了自行车对障碍物的避让超越过程,利用社会力细致地描述了自行车的运动状态,提出了一种多层次的自行车运动子模型,并与行人社会力模型相结合,得到一种行人-自行车混合疏散模型“MixSF”。

利用 MixSF 模型,本文对周期性边界条件下的直通道行人-自行车混合疏散场景开展了模拟,研究自行车占比和相对密度对混合疏散的影响。研究结

果表明:在直通道行人-自行车混合疏散中存在临界个体密度($0.548 \text{ 人}/\text{m}^2$),当个体密度低于此临界值时,自行车占比的增加能够提高疏散速度和疏散流量,加快人群疏散的效率;但当个体密度高于此临界值时,自行车占比的增加反而降低疏散速度和流量;在直通道行人-自行车混合疏散中,存在临界相对密度(0.81),当超过该临界值时,借助自行车疏散不再具有速度上的优势。本文所发现的临界值对行人-自行车混合疏散可望具有一定参考价值,但是它们的具体数值在其他场景的普适性还需要进一步的验证。

参考文献

- [1] Takada K, Ikeda K, Aoki K, Murakami H, Koyama M. Experimental study on the effectiveness of bicycle use for tsunami evacuation-Case study of Horikiri district in Tahara city[J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2017, 12: 158-166.
- [2] 叶霞, 夏海霞, 高志刚. 大型活动散场观众交通疏散模型[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(12): 54-60.
- [3] 金美莲, 陈涛, 申世飞. 城市混合流疏散中不同交通方式配比对疏散时间的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(2): 179-182.
- [4] Guo N, Jiang R, Wong S C, Hao Q Y, Xue S Q, Xiao Y, Wu C Y. Modeling the interactions of pedestrians and cyclists in mixed flow conditions in uni- and bi-directional flows on a shared pedestrian-cycle road[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 139: 259-284.
- [5] Liu M F, Xiong S W. A refined and dynamic cellular automaton model for pedestrian-vehicle mixed traffic

- flow[J]. International Journal of Modern Physics C, 2016, 27(5): 1650053.
- [6] Li B X, Fang L. An improved multi-value cellular automata model for mixed bicycle traffic flow on campus [C]//2nd Annual International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Information Science (EEEIS 2016), 2017.
- [7] 王占中, 赵利英, 焦玉玲, 曹宁博. 信号交叉口自行车和行人混合交通流社会力模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2018, 48(1): 89-97.
- [8] 严巧兵. 基于社会力模型的非机动车混合流仿真研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [9] 郝妍熙, 刘戎阳, 胡华, 方勇, 刘志钢. 单向通道行人-自行车混合流建模及自组织现象研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 223-229.
- [10] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature, 2000, 407(6803): 487-490.
- [11] Helbing D, Farkas I J, Molnar P, Vicsek T. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations[J]. Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2002, 21(2): 21-58.
- [12] Helbing D, Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Physical Review E, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [13] Tordeux A, Chraïbi M, Seyfried A. Collision-Free Speed Model for Pedestrian Dynamics[M]. In: Knoop V L, Daamen W. Traffic and Granular Flow'15, Springer, 2016: 225-232.
- [14] Zhang S N, Zhang J, Chraïbi M, Song W G. A speed-based model for crowd simulation considering walking preferences[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2021, 95: 105624.
- [15] Huang C L, Hu Y H, Zhang S N, Yang L N, Xia L, Zhang J, Song W G, Lo S M. A collision-free model on the interaction between pedestrians and cyclists on a shared road[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2021: 103408.
- [16] Polack P, Altche F, d'Andrea-Novet B, de La Fortelle A. The kinematic bicycle model: A consistent model for planning feasible trajectories for autonomous vehicles?[C]//2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE, 2017: 812-818.
- [17] Ailon A, Arogeti S. Trajectory tracking control for a kinematic bicycle model[C]//2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), IEEE, 2020: 526-531.
- [18] Wang Q, Chen J, Ma J. Experimental study on individual level interaction between bicycle and pedestrian [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2021: 093403.

A pedestrian-bicycle mixed evacuation model based on social force and its simulation

YANG Longnan, SONG Weiguo, ZHANG Jun, ZHANG Sainan,
WANG Qiao, JIANG Kechun, XU Han

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: When a public safety incident occurs, the use of bicycles is an important way for evacuation. In view of this situation, pedestrian bicycle mixed evacuation modeling and simulation were carried out. To better quantify the overtaking behavior of the bicycle, the temporary expected movement direction is introduced to change the self-driving force of the bicycle to achieve a detailed description of overtaking behavior of the bicycle. The bicycle model is modified to update the bicycle movement, and a multi-level bicycle movement sub-model is established. By combining this model with the pedestrian social force model, a pedestrian-bicycle mixed evacuation model "MixSF" based on social force is obtained. The simulation shows that the MixSF can better reproduce the overtaking behavior in mixed evacuation. Under the experimental conditions in this paper, it is found that when the individual density is less than $0.548 \text{ pedestrian}/\text{m}^2$, the increase of bicycle proportion can accelerate evacuation. And when the relative density is greater than 0.81, the bicycle loses the advantage of evacuation speed.

Keywords: Social force model; Pedestrian; Bicycle; Mixed evacuation; Evacuation efficiency