

中心护栏对行人交通流的影响研究*

Effect of Central Barrier on Pedestrian Traffic Flow

白克钊, 蔡美静, 许志鹏, 邝 华**

BAI Ke-zhao, CAI Mei-jing, XU Zhi-peng, KUANG Hua

(广西师范大学物理科学与技术学院, 广西桂林 541004)

(College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要:【目的】研究不同博弈行为、中心分隔护栏的长度和位置布局对行人流动力学的影响。【方法】考虑行人运动过程中的心理变化, 引入博弈和学习策略, 用以刻画行人在面对位置冲突时所采取的决策行为, 分别建立相应的单向和相向行人流格子气模型。【结果】在单向行人流中, 中心护栏长度对行人流无影响; 而在相向行人流中, 中心护栏的长度和位置布局对行人运动效率具有明显的影响。【结论】在单向行人流的通道中设置中心护栏不会影响行人流的宏观特性, 也不会提高行人的整体运动效率; 而在相向行人流的通道中, 设置中心护栏可以提高行人运动效率, 且设置有空隙的两个中心护栏比设置无空隙的单一中心护栏更能提高行人的整体移动效率。

关键词: 行人流 中心护栏 格子气模型 博弈心理

中图分类号: O550 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)04-0368-05

Abstract:【Objective】Considering the psychological changes of pedestrian, the game behaviors and learning strategies are introduced to describe decision-making behavior of pedestrians when they meet location conflicts.【Methods】The corresponding unidirectional and bidirectional pedestrian flow lattice gas models are established to simulate pedestrian movement, respectively. The influences of different game behaviors, the length and position of central barrier on pedestrian flow are studied via numerical simulation.【Results】The length of central barrier has almost no effect on the movement efficiency of the unidirectional pedestrian flow. However, it has an obvious influence on the bidirectional pedestrian flow.【Conclusion】The central barrier has no effect on the unidirectional pedestrian flow, but it can improve movement efficiency on the bidirectional pedestrian flow. In addition, two central barriers are more effective to improve the total movement efficiency of pedestrian flow than that of one central barrier.

Key words: pedestrian flow, central barrier, lattice gas model, game psychology

收稿日期: 2015-05-10

修回日期: 2015-05-18

作者简介: 白克钊 (1977-), 男, 副教授, 主要从事计算物理在交通流中的应用研究。

* 国家自然科学基金项目(11262005), 广西自然科学基金项目(2014GXNSFAA118007), 广西高校科研一般项目(YB2014034)和广西研究生教育创新项目(YCSZ2015089)资助。

** 通讯作者: 邝 华 (1978-), 男, 教授, 主要从事交通流理论、复杂系统及非线性物理的应用研究, E-mail: khphy@gxnu.edu.cn.

0 引言

【研究意义】在地下通道、地铁中转站等行人交通枢纽处, 经常观察到相向行人流的运动被中心护栏隔离。因此, 是否设立中心护栏以及如何设置, 对于城市道路交通管理、行人设施和道路的规划设计都有着重要的现实意义。【前人研究进展】文献[1]首次建立了偏向格子气模型, 并在开放边界条件下对通道内的相向行人运动进行了研究。数值模拟发现当行人密

度超过某一临界阈值时,会发生从自由流到阻塞流的相变。文献[2]考虑视野效应,建立了扩展的格子气模型,数值模拟再现了相向行人流的分层现象。文献[3]和文献[4]发现道路分割线对相向行人流具有重要的影响作用,它能导致临界密度的增大。文献[5]研究了行人的侧身运动对相向行人流的影响,结果表明侧身运动可以导致临界密度减小,从而有效地缓解了行人堵塞的发生。文献[6]研究了周围环境的变化和违反交通规则的行为对相向行人流的影响。文献[7]基于并行格子气方法,研究了单向行人流的复杂动态特性。随着行人交通流的进一步研究,许多学者还针对不同的环境、行人运动特性及行为方式等情况进行了探讨。例如,行人的潜意识效应^[8,9],混合偏向强度效应^[10,11],体型大小差异^[12]和跟随效应^[13]等。【本研究切入点】纵观以往的研究,关于通道内如何设置护栏等隔离设施以及护栏如何对行人流产生影响作用的理论研究较少。此外,行人在运动过程中,会根据自身的心理特点和别人的心理特征选择自己下一时刻的行走策略,而且每个人还会学习别人的策略实时地调整自己的策略。因此,本文考虑行人运动过程中的博弈心理特点,引入收益矩阵和学习策略,以刻画行人在面对位置冲突时所采取的一种决策行为,建立了相应的单向和相向行人交通流格子气模型。【拟解决的关键问题】数值模拟研究了不同博弈心理、中心分隔护栏的长短和位置布局对行人流动力学的影响,并对典型的时空动力学特征进行了讨论。

1 行人流格子气模型

1.1 模型设置

行人流模型建立在一个大小为 $W \times L$ 的二维正方形网格的离散系统内。其中 W 和 L 分别代表道路宽度和长度方向上的格子数。我们把行人分为两类:性格温和、谦让的行人是“合作者”;性格急躁、霸道的行人是“背叛者”。单向和相向行人流模型的示意图分别如图 1a 和 1b 所示。其中,实心圆代表右行人中的背叛者,空心圆代表右行人中的合作者,实心三角形代表左行人中的背叛者,空心三角形代表左行人中的合作者,道路中央为护栏(图 1 标注 B),两护栏之间的距离为 k ,上下边界为封闭性边界(如通道两侧的墙壁)。模型中禁止行人穿越和通过边界及护栏。

模型中行人行走时考虑以下规则:

(1) 运动规则

行人按照 Muramatsu 偏向随机行走格子气模型的演化规则运动^[1]。

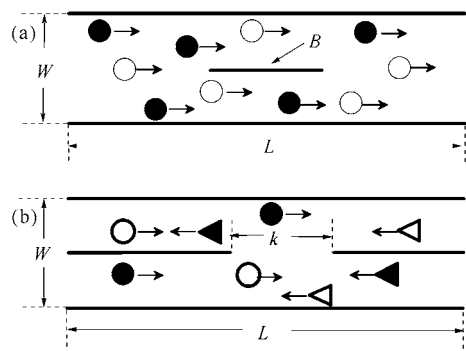


图 1 行人流模型示意图

Fig. 1 Sketch of pedestrian flow models

(a) 单向行人流, (b) 相向行人流。 (a) Unidirectional pedestrian flow, (b) Bidirectional pedestrian flow.

(2) 博弈规则

行人在运动过程中会存在多个行人均向同一目标格子运动的情况,从而导致位置冲突问题。现采用与文献[14]一致的博弈规则来解决以上冲突。图 2 为 2 人、3 人和 4 人博弈的收益矩阵,反映了行人 A_1 与其他行人发生位置冲突时的博弈情况。图 2 中合作者标记为 C , 背叛者标记为 D 。从图 2a 可以看出,当产生冲突的 2 个人均为合作者时,则各自以 $1/2$ 的概率进入目标空格子;若 1 个是合作者,另 1 个是背叛者时,则背叛者以概率 1 进入目标空格子;若 2 个人均为背叛者,则他们各自以概率 p 进入目标空位。当 3 个人试图运动到同一目标空格时(图 2b),若 3 个人均是合作者,则各自以 $1/3$ 的概率进入目标空格;若 1 个是背叛者,另 2 个是合作者,则背叛者以概率 1 进入目标空格;若 1 个是合作者,另 2 个是背叛者,则合作者静止,而 2 个背叛者会各自以概率 p 进入目标空格;若 3 个人均为背叛者,则各自以概率 q 进入目标空格。同理,当 4 个人试图运动到同一目标空位时(图 2c),若 4 个人均是合作者,则各自以 $1/4$ 的概率进入目标空格;若 1 个是背叛者,另 3 个是合作者,则背叛者会以概率 1 进入目标空格;若 2 个是背叛者,另 2 个是合作者,则合作者静止,而 2 个背叛者会各自以概率 p 进入目标空格;若 3 个人是背叛者,1 个是合作者,则 3 个背叛者各自以概率 q 进入目标空格,而合作者静止;若 4 个人均为背叛者,则各自以概率 r 进入目标空格,这里 $p > q > r$ 。

(3) 学习策略规则

行人在运动过程中,一般会根据周围人的运动策略改变自身的运动策略,即合作者和背叛者可以相互转化。本文中当发生位置冲突的行人全部为合作者时,他们不改变自己的运动策略;当参加博弈的人中背叛者和合作者同时存在时,则背叛者不改变自身策略,而合作者在下一时刻会转变为背叛者;当参加

博弈的人全为背叛者时,则他们在下一时刻均会转变为合作者。

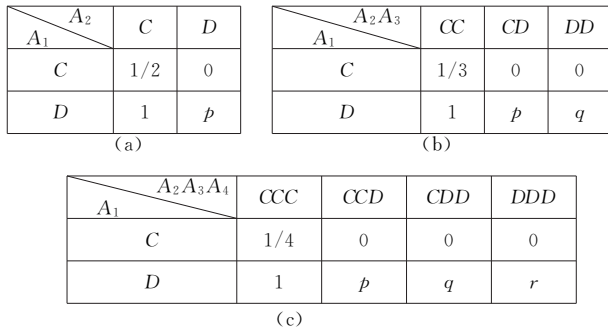


图2 收益矩阵

Fig. 2 The payoff matrix

(a)2人博弈,(b)3人博弈,(c)4人博弈。(a)Two-person game,(b)Three-person game,(c)Four-person game.

1.2 数值模拟条件设置

采用周期性边界条件,初始时刻,行人随机地分布在系统里,行人位置更新采用并行的方法。行人流的密度定义为系统内的行人总数与系统内总格子数的比值;行人流的平均速度定义为单位时步内行人运动的速度之和与行人总数的比值;行人流的平均流量定义为单位时间步长内通过系统宽度的行人数量。为了探讨护栏长度对行人流的影响,引入无量纲参数 $d = l/L$, l 为护栏的长度, d 越大,表明护栏长度越长。为了反映行人的冲突,引入平均冲突率 R ,将其定义为单位时间步长内行人发生所有冲突的次数之和与行人总数的比值。为简化分析,取向左和向右运动的行人数量相等,且初始合作频率 $f_c = 0.5$ (即左行人和右行人中合作者所占的比例)。为了研究中心护栏对相向行人流运动的影响,引入参数 $h = k/L$ 来表示护栏之间的距离占通道长度的比例, h 越大,表明护栏之间的距离越大。当 $h = 0$ 时,表明两护栏相互连接;当 $h = 1$ 时,表明系统中无护栏。在数值模拟中,若无特殊说明,相关参数的取值如下: $W = 20$, $L = 100$, $D = 1$, $p = 0.3$, $q = 0.2$ 和 $r = 0.1$ 。每个样本运行 20000 时步,系统平均速度和系统平均流量均取最后 2000 时步的数据做统计平均,为消除初始位形的随机性对结果的影响,取 20 个样本平均。

2 结果与分析

2.1 中心护栏对单向行人流的影响

从图 3 可以明显地看出,当行人密度 ρ 小于临界密度 ρ_c 时,平均流量随着行人密度的增加而呈线性增加,且速度基本保持不变。这表明在图 3 的 I 区域中,系统的行人均处于自由运动状态,此时行人之间的相互作用较小,且均以最大速度运动。当行人密度

ρ 大于临界密度 ρ_c 时,自由空间相对较小,行人之间的相互作用加强,位置冲突增大,从而阻碍了行人的运动,发生了由自由流向拥堵流的转变,系统处于堵塞状态(图 3 II 区域)。此时,行人的平均流量和速度均随着密度的增加逐渐减小到零。此外,我们发现不论 d 取何值,平均流量和平均速度几乎完全重合。这表明在单向行人流的通道中设置中心护栏不会影响行人流的宏观特性,也不会提高行人的整体运动效率。

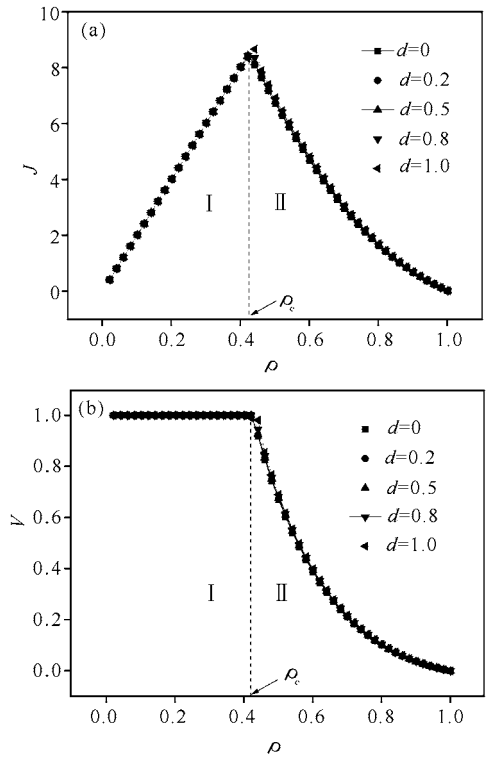


图3 单向行人流的基本图

Fig. 3 The fundamental diagram of unidirectional pedestrian flow with different d

(a) J 与 ρ 关系,(b) V 与 ρ 关系。(a)Plot of J against ρ , (b)Plot of V against ρ .

由图 4a 和 4b 对比可知,在低密度 $\rho = 0.2$ 下,护栏的长度(如 $d = 0.2$ 和 $d = 0.5$)对单向行人流的宏观特性无影响,单向行人流均为自由流状态。这是因为中心护栏仅对单向行人流起到同向分离的作用,即把一个大的单向流分成了两股小的单向流,故不改变单向流的整体宏观效应。此时,行人密度成为影响行人流宏观状态的主要因素。在高密度 $\rho = 0.6$ 下(图 4c 和 4d),单向行人流均为拥堵状态,护栏的长度对单向行人流的宏观特性也无影响。

2.2 中心护栏对相向行人流的影响

图 5a 和 5b 分别给出了 $h = 0, 0.2, 0.5, 0.8, 1$ 时,系统的平均流量 J 、平均速度 V 与行人总密度 ρ 的变化关系图。图 6 给出了不同 h 时,系统的平均冲

突率 R 与系统内行人密度 ρ 关系图。图 7 为 $h = 0.5$ 时,不同密度下的相向行人流典型时空演化斑图。

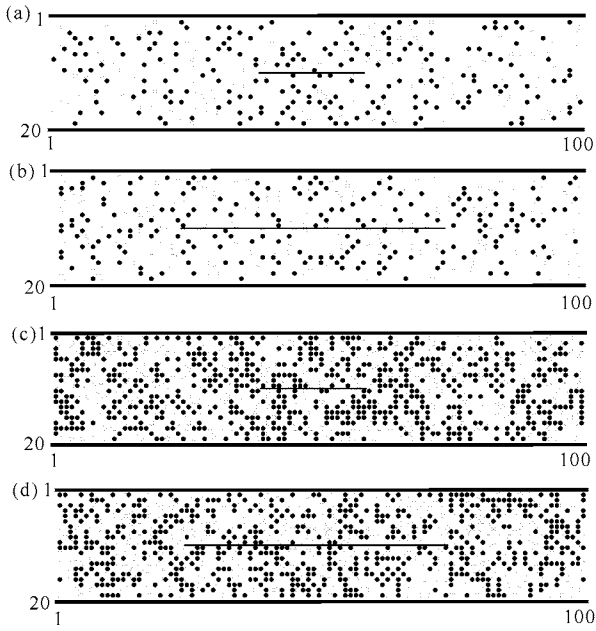


图 4 单向行人流的时空演化

Fig. 4 The space-time pattern of unidirectional pedestrian flow

(a) $\rho = 0.2, d = 0.2$; (b) $\rho = 0.2, d = 0.5$; (c) $\rho = 0.6, d = 0.2$; (d) $\rho = 0.6, d = 0.5$.

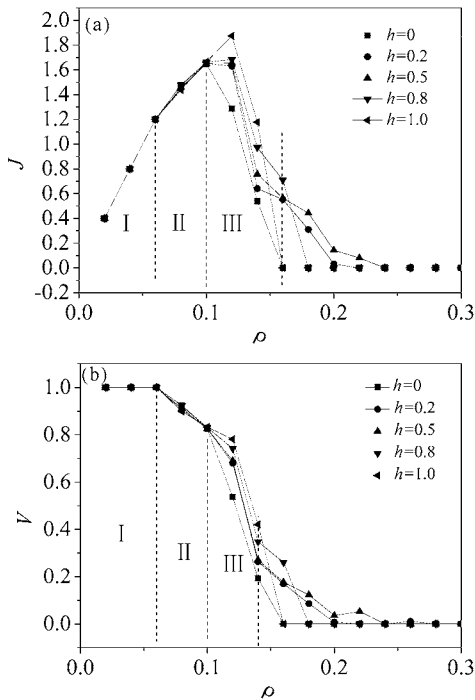


图 5 不同 h 条件下相向行人流的基本图

Fig. 5 The fundamental diagram of bidirectional pedestrian flow with different h

(a) J 与 ρ 关系, (b) V 与 ρ 关系。 (a) Plot of J against ρ , (b) Plot of V against ρ

从图 5a 可以清楚地看出,随着行人密度的增大,

系统的平均流量是先逐渐增大然后减小并趋于零。这是因为行人在低密度下(图 5a I 区域),行人间的相互作用较小,行人以最大速度运动(图 5b)。此时,行人流处于自由运动状态,没有堵塞现象发生(图 7a),且行人在运动过程中也不存在位置冲突,故冲突所导致的博弈行为次数为 0 的现象(图 6);当行人密度逐渐增加(图 5a II 区域)时,平均流量也随之增加,但此时行人的平均速度却逐渐减小(图 5b)。这是因为相向行人在运动中不可避免的会发生相互阻碍及位置冲突等问题(图 7b 圆圈所示),从而导致系统内行人间的冲突率迅速增加(图 6),使得行人的平均速度减小。随着行人密度的进一步增加,相向行人间的冲突越来越多(图 7c 圆圈所示),从而严重阻碍了行人的运动,系统内发生了堵塞现象,进而导致平均流量和平均速度进一步减小。

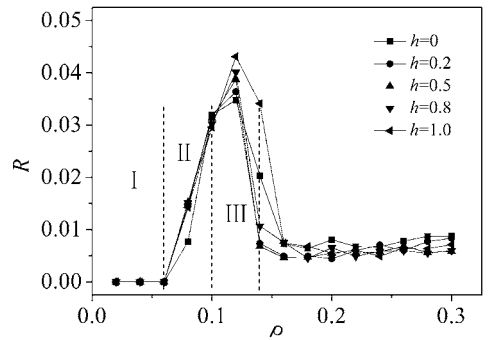


图 6 R 与 ρ 的关系

Fig. 6 Plot of R against ρ with different h

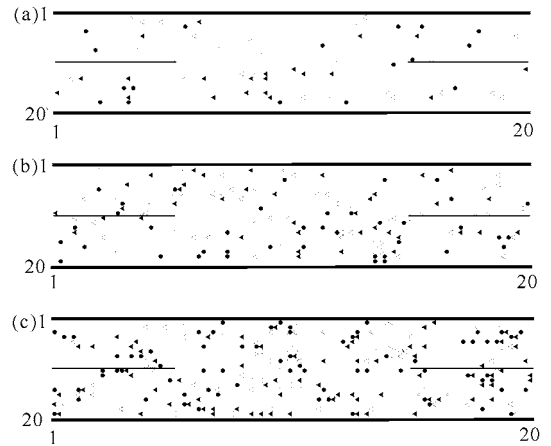


图 7 不同密度 ρ 下的相向行人流典型时空演化斑图 ($h = 0.5$)

Fig. 7 The typical space-time patterns of bidirectional pedestrian flow with different ρ , where $h = 0.5$

(a) $\rho = 0.04$, (b) $\rho = 0.08$, (c) $\rho = 0.12$.

此外,由图 5 可知,在低密度下(图 5 I、II 区域),不论 h 取何值,平均流量和平均速度随密度的变化曲线几乎完全重合。这表明低密度下,中心护栏对相向行人流的移动效率无影响。然而,在中高密度

下, $h > 0$ 且 $h \neq 1$ (两中心护栏间有空隙) 情况均比 $h = 0$ (两中心护栏相连接) 时的平均流量和平均速度高。这是因为两中心护栏的存在, 不仅可以部分的使运动方向相反的行人分离, 减少了相向行人之间的相互干扰和阻碍, 而且由于两中心护栏间距的存在, 导致发生冲突的相向行人可以通过护栏间的空隙运动到另一空间区域, 从而减少了行人拥堵的发生。基于以上分析表明, 我们认为对于相向行人流设置有空隙的两个中心护栏要比设置无空隙的单一中心护栏更能提高行人的整体移动效率。

3 结论

本文在格子模型的基础上, 引入博弈行为和学习策略, 模拟了当行人运动发生位置冲突时的心理和决策行为变化, 同时考虑中心护栏对单向和相向行人流的影响, 分别建立了单向和相向行人流格子气模型。数值模拟研究不同博弈行为、中心分隔护栏的长度和位置布局对行人流的影响, 并着重探讨了以上因素对行人运动效率的影响, 主要结论如下:

(1) 在单向行人流中, 设置中心护栏不会影响行人流的宏观特性, 也不会提高行人的整体运动效率。

(2) 在相向行人流中, 中心护栏的设置对行人流的影响较显著。在低密度下, 中心护栏对相向行人流的移动效率无影响, 而在中高密度下, 设置有空隙的两个中心护栏要比设置无空隙的单一中心护栏更能提高行人的整体移动效率。

本文的研究可为一些地下通道, 商业步行街护栏的设置提供一定的理论依据。

参考文献:

[1] Masakuni M, Tunemasa I, Takashi N. Jamming transition in pedestrian counter flow[J]. *Physica A*, 1999, 267(3-4):487-498.

[2] Yusuke T, Kouhei T, Takashi N. Pattern formation and jamming transition in pedestrian counter flow[J]. *Physica A*, 2002, 313(3-4):709-723.

[3] Kouhei T, Yusuke T, Takashi N. Effect of partition line on jamming transition in pedestrian counter flow[J].

Physica A, 2002, 308(1-4):460-470.

[4] Yu Y F, Song W G. Effect of traffic rule breaking behavior on pedestrian counter flow in channel with a partition line[J]. *Physical Review E*, 2007, 76(2):026102.

[5] Fukamachi M, Nagatani T. Sidle effect on pedestrian counter flow[J]. *Physica A*, 2007, 377(1):269-278.

[6] Yu Y F, Song W G. Cellular automaton simulation of pedestrian counter flow considering the surrounding environment[J]. *Physical Review E*, 2007, 75(4):046112.

[7] Hao Q Y, Cheng X Q, Song W G. Pedestrian flow in a lattice gas-model with parallel update[J]. *Physical Review E*, 2010, 82(2):026113.

[8] Kuang H, Song T, Dai S, et al. Subconscious effect on pedestrian counter flow in a modified lattice gas model with the variable transition probability[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2009, 20(12):1945-1961.

[9] 岑华舵, 薛郁. 视距和潜意识行为对行人交通流的影响[J]. *广西科学*, 2012, 19(4):332-336.

Cen H D, Xue Y. Effects of sight distance and subconscious behavior on pedestrians in counter flow [J]. *Guangxi Sciences*, 2012, 19(4):332-336.

[10] Fukamachi M, Kuwajima R, Imanishi Y, et al. Velocity enhancement of slow particles in lattice-gas binary mixture[J]. *Physica A*, 2007, 383(2):425-434.

[11] Imanishi Y, Kuwajima R, Nagatani T. Transition from homogeneous to inhomogeneous flows in a lattice-gas binary mixture of slender particles [J]. *Physica A*, 2008, 387(10):2337-2352.

[12] Shang H Y, Huang H J, Zhang Y M. An extended mobile lattice gas model allowing pedestrian step size variable[J]. *Physica A*, 2015, 424:283-293.

[13] Kuang H, Li X L, Wei Y F, et al. Effect of following strength on pedestrian counter flow[J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(7):070517.

[14] Hao Q Y, Jiang R, Hu M B, et al. Pedestrian flow dynamics in a lattice gas model coupled with an evolutionary game [J]. *Physical Review E*, 2011, 84(3):036107-8.

(责任编辑:竺利波)