

城市静态网络交通流研究*

Traffic Flow for City Static Networks

唐智权¹,朱留华²,吕集尔²,郑容森²

TANG Zhi-quan¹,ZHU Liu-hua²,LV Ji-er²,ZHENG Rong-sen²

(1. 梧州学院电子信息工程系, 广西梧州 543002; 2. 玉林师范学院物理科学与工程技术学院, 广西玉林 537000)

(1. Department of Electronic Information Engineering, Wuzhou College, Wuzhou, Guangxi, 543002, China; 2. Institute of Physics Science and Engineering Technology, Yulin Normal College, Yulin, Guangxi, 537000, China)

摘要:基于 BML 模型,将城市道路设置为 10×10 条道路的二维静态网络,在开放性边界条件下,研究不同消失概率、车辆长度、最大速度及红绿灯周期与绿信比等影响因素对东西向车道和整个网络交通流特性的影响,再现与实际交通相一致的非线性现象。

关键词:交通流 静态网络 元胞自动机 BML 模型

中图分类号:U491 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2012)04-0327-05

Abstract:Based on the BML model, the two-dimensional static network model with 10 west-east-orientation roadways and 10 south-north-orientation ones is established. Under the open boundary condition, the characters of west-east-orientation roadways and the whole network for traffic flow are analyzed with the conditions of different disappearance probability, vehicle length, maximum velocity, traffic lights period and green-signal ratio. Moreover, the nonlinear phenomena are reproduced according with the real traffic.

Key words: traffic flow, static network, cellular automaton, BML model

近年来,交通流问题由于其高度的非线性及实测中观察到的非平衡相变,引起了物理界的普遍关注^[1~11]。研究城市交通的主要目的就是为了解决城市交通网络的机动性等问题,提高交通流量,为城市交通的建设和管理提供科学的理论依据。

1992年, Balham, Middleton 和 Levine 提出一个理想的二维元胞自动机交通流模型(以下简称 BML 模型)^[1],模拟城市交通网络,揭示车辆从自由运动相向阻塞相转变的临界行为。此后, Nagatani 等人研究由于交通事故造成的堵塞对二维系统相变的影响^[2]。吕晓阳等人则引入转向概率,研究能够改变运动方向的交通流 CA 模型^[3]。Horiguchi 等人通过布置格点研究交叉口之间的距离对交通的影响,提出了一个二维主干道交通流模型,用计算机模拟方法研究

了影响主干道车流速度及流量的因素,如刹车、转向、交通灯等并讨论了城市交通系统中自组织合作现象^[4]。Brockfeld 等人研究了红绿灯控制的城市交通 CA 模型^[5]。谭惠丽等人研究了红绿灯的周期对城市主干道交通流的影响^[6];彭麟等人对城市双车道不同速度车辆,在红绿灯及车站位置的影响下进行了研究^[7]。这些研究对城市交通网络的管理和合理利用道路资源提供了科学的依据。本文采用 10×10 条道路组成二维静态网络来模拟城市交通网。车道上所有的车辆运行都遵循 NaSch 模型演化规则^[8],在开放边界条件下研究消失概率、混合比例及红绿灯周期和绿信比等对城市网络的影响。

1 模型及演化规则

图 1 为模拟的城市交通网络的结构示意图,由东西向和南北向长度为 L 的 10 条格点链组成,各条道路在网络中是等价的。用变量 $a_{i,k}(t)$ ($k=1 \sim 10$) 来表示 t 时刻东西向车道上车辆的占据状态,其值取 $\{0, 1, 2\}$ (1 表示慢车、2 表示快车、0 表示没有车),南

收稿日期:2012-07-16

修回日期:2012-08-22

作者简介:唐智权(1966-),男,讲师,主要从事非线性动力学、交通建模的研究。

*国家自然科学基金项目(批准号:11162019,11047003)资助。

广西科学 2012年11月 第19卷第4期

327

北向车道上车辆的占据状态用变量 $b_{j,k}(t)$ ($k=1\sim 10$) 表示。交叉口满足排斥规则: $a_{i,k}(t) \times b_{j,k}(t) = 0$, 即交叉口只能被一辆东西向车辆或一辆南北车辆占据, 或者为空。各道上的车辆分为慢车和快车, 快车为短车, 占 1 个格点, 慢车为长车, 占 2 个格点, 用 d_i 表示车辆所占据的格点数。

慢车速度取集合 $\{0, 1, \dots, V_{\max 1}\}$ 中的某一值, 快车速度取 $\{0, 1, \dots, V_{\max 2}\}$ 的某一值。红绿灯信号控制道路交叉口的车辆运行。红绿灯周期由 T 个时步组成, $T = T_G + T_R$, T_G 是绿灯周期, T_R 为红灯周期, 绿信比用 $f = T_G/T$ 表示。红绿灯信号对整个网络所有的交叉口实施同步控制。在交叉口处, 任何一条道的车辆若遇到绿灯周期, 指示车辆可以通过交叉口, 该车道上的车辆按照 NaSch 模型演化规则向前运行, 也可以按一定的转向概率在交叉口处转到另一条道上; 如果不能实现转向, 继续前行。但是在绿灯周期的最后一个时步, 车辆不允许占据交叉口, 即 $gap_{i,k}(t) = \min(X_{i+1,k}(t-1) - X_{i,k}(t-1) - d_{i+1}, S_{i,k} - X_{i,k}(t-1) - 1)$ 时, 不允许车辆占据交叉口, 以免影响另一车道的通行。

其中, $S_{i,k}$ 表示 k 车道上第 i 辆车到前方交叉口的间距, $X_{i,k}(t)$ 表示 k 车道上第 i 辆车 t 时刻所处的位置。本文模型演化规则如下:

- (1) 确定性加速: $V_i[t + \frac{1}{3}] = \min(V_i[t] + 1, V_{\max})$;
 - (2) 确定性减速: $V_i[t + \frac{2}{3}] = \min(V_i[t + \frac{1}{3}], gap_i[t])$;
 - (3) 随机减速: $V_i[t + 1] = \max(V_i[t + \frac{2}{3}] - 1, 0)$, 以概率 P 发生;
 - (4) 位置更新: $X_i[t + 1] = X_i[t] + V_i[t + 1]$ 。
- 在每一演化时步, 道路上所有的车辆, 均按上述规则进行同步更新。

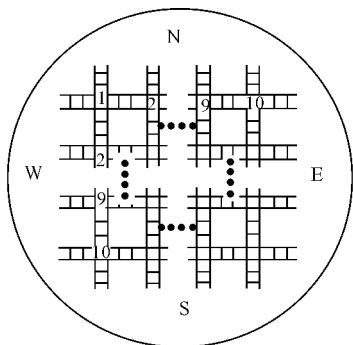


图 1 城市交通网络示意

Fig. 1 Sketch map of traffic network of the city

2 数值模拟

由于对称性, 我们只对东西向车道上车辆的运行状态进行研究。模拟时采用开放性边界条件, 设每一格点长 5m, 车道上的车辆总数为 N , 相应的全局车流密度为 $\rho = N/10L$; 另设长车(即慢车)的数量为 N_1 , 则其车道占有率为 $C_1 = 2N_1/10L$; 短车(即快车)数量为 N_2 , 则其车道占有率 $C_2 = N_2/10L$ 。全局占有率即为 $C = C_1 + C_2$ 。通过引入混合比例系数 n , 来反映车流的混合程度, $n = N_1/(N_1 + N_2)$, 即长车数量与车辆总数的比值。 t 时刻的车辆平均速度定义为: $\bar{V}_t = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{10} \sum_{i=1}^N V_{i,k}(t)$; 平均车流量 $J_t = \bar{V}_t \rho$ 。

本模型中, 不同长度车辆的最大速度分别取 $V_{\max 1} = 3\text{cells/s}$, 对应实际车速 54km/h, $V_{\max 2} = 5\text{cells/s}$ 对应实际车速 90km/h。每一时步, 在 0 格位以产生概率 α , 按混合比例 n 产生一辆长车或短车, 其速度分别为对应的最大速度 $V_{\max 1}$ 或 $V_{\max 2}$; 而在 $L+1$ 格点以产生概率 $(1-\beta)$ 产生一辆速度为零的短车, 作为阻挡车。这种规则对所有的道路都一样。每一条车道的演化时步取 60000, 最初的 40000 时步不做统计, 其后的 20000 时步取时间平均可获得

1 次运行的平均速度 $\bar{V} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} \bar{V}_t$, 为消除随机初始化对结果的影响, 取样本数为 30。

2.1 消失概率对交通流的影响

图 2 是系统在车辆混合比 $n=0.5$, 红绿灯周期 $T=20$, 绿信比 $f=0.5$, 交叉口之间的距离取 100 个格点的条件下, 消失概率 β 取不同的值时, 系统的平均速度、流量和占有率的变化关系。从图 2(a) 可以看出, 对于相同的消失概率, 随着产生概率的增加, 平均速度逐渐下降, 到达一定的临界点后速度就保持不变, 出现一个平台。消失概率 $\beta=0.2$ 对系统的影响较大, 在产生概率 $\alpha=0.1$ 处就迅速下降, 平均速度变得很小。而当消失概率 $\beta=0.6, 0.8, 1.0$ 时, 消失概率对系统平均速度的影响变得一致了, 不同 β 值的曲线重叠在一起。从图 2(b)、(c) 可以看出, 消失概率取不同的数值时, 随着产生概率的增加系统的流量和道路的占有率逐渐升高, 到达一定的临界点后流量和占有率就饱和了, 出现一个平台。消失概率 $\beta=0.2$, 系统出现平台时, 道路占有率很高而流量却很低, 系统处于宽幅阻塞相之中, 消失概率影响着所有的路口。而当消失概率 $\beta=0.6, 0.8, 1.0$ 时, 消失概率对系统流量和占有率的影响变得一致了, 各条不同的 β 曲线重叠在一起。系统的流量和占有率已经不

受消失概率的制约,改由红绿灯周期、绿信比等因素决定。

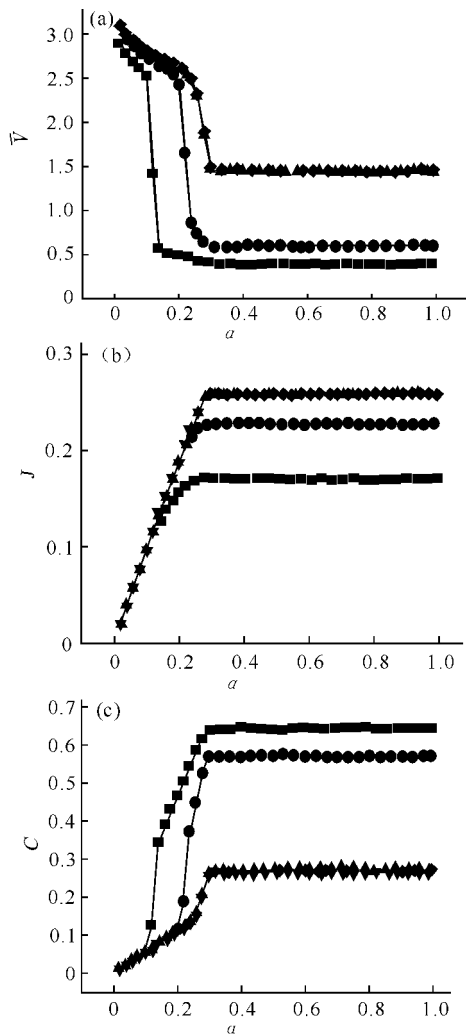


图2 东西向车道上平均速度(a)、流量(b)和占有率(c)与产生概率的关系

Fig. 2 Relationships between mean velocity (a), flow (b), occupancy rate (c) and generating probability on east-west-orientation lanes

$n=0.5, T=20, f=0.5$; \blacksquare : $\beta=0.2$, \bullet : $\beta=0.4$, \blacktriangle : $\beta=0.6$, \blacktriangledown : $\beta=0.8$, \blacklozenge : $\beta=1.0$.

2.2 混合比例对交通流的影响

图3(a)、(b)是两种不同类型的车辆在不同混合比例下,系统的占有率和流量与产生概率的关系。对于相同的混合比例,系统的占有率和流量随着产生概率的增加而变大,当产生概率增大到一定值时,流量和占有率出现一个平台,其值饱和,即产生概率对它已经没有影响。当混合比 $n=0.0$ 时,即系统中只有最大速度为 5cells/s ,长度为1的快车。这时系统的占有率最低,流量可以实现最大值。当混合比 $n=1.0$ 时,即系统中只有最大速度为 3cells/s ,长度为2的慢车。这时系统的占有率最高,流量却取得最小值。

接着仅考虑车辆的长度对系统的影响,把两种不同类型的车辆的长度都设置为 $V_{\max}=5\text{cells/s}$ 。图4(a)、(b)是两种不同类型的车辆在不同的混合比例下,系统的占有率和流量与产生概率的关系。系统的流量和占有率与图3(a)、(b)的变化趋势是一致的。当混合比 $n=0.0$ 时,系统中只有最大速度为 $V_{\max}=5\text{cells/s}$,长度为1的短车。这时系统的占有率最低,流量获得最大值。其值与图3(a)、(b)的值相等。当混合比 $n=1.0$ 时,系统中只有最大速度为 $V_{\max}=5\text{cells/s}$,长度为2的长车。这时系统的占有率最高,而流量取得最小值。因此可以说,车辆的长度起了决定性作用。当混合比为 $0.0 < n < 1.0$ 之间的值时,系统的占有率和流量就介于最大值和最小值之间。

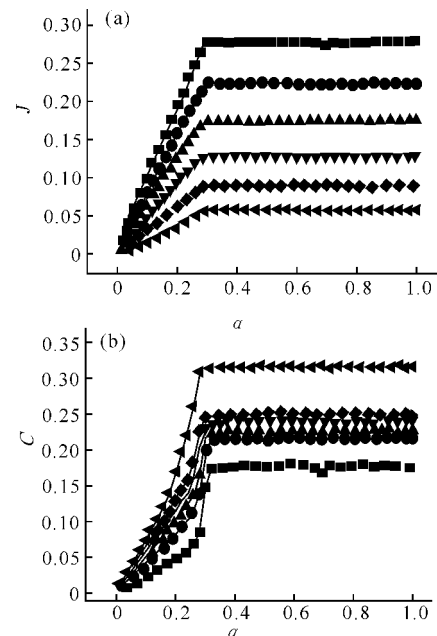


图3 不同混合比例下东西向车道上流量(a)和占有率(b)与产生概率的关系

Fig. 3 Relationships between flow (a), occupancy rate (b) and generating probability for different mixture ratio on east-west-orientation lanes

$T=20, f=0.5, \beta=1.0$; \blacksquare : $n=0.0$, \bullet : $n=0.2$, \blacktriangle : $n=0.4$, \blacktriangledown : $n=0.6$, \blacklozenge : $n=0.8$, \blacktriangleleft : $n=1.0$.

2.3 信号灯周期对交通流的影响

图5(a)、(b)为红绿灯周期对系统的影响。系统设计的绿信比为 $f=0.5$,混合比 $n=0.5$,消失概率 $\beta=1.0$ 。图5(a)是在不同的产生概率下,东西向车道的流量与红绿灯周期的关系。当产生概率 $\alpha=0.3, 0.5, 0.7$ 时,道路占有率的曲线重合并且随着红绿灯周期的增加而增加,在 $T=40$ 的地方增加到最大值,而后缓慢下降;从图5(b)中可以看到,当 $\alpha=$

0.3, 0.5, 0.7 时, 占有率的 3 条曲线也重合在一起, 随着红绿灯周期的增加而增加, 当 $T=80$ 时, 占有率取得最大值, 然后随着红绿灯周期的增加逐渐下降。

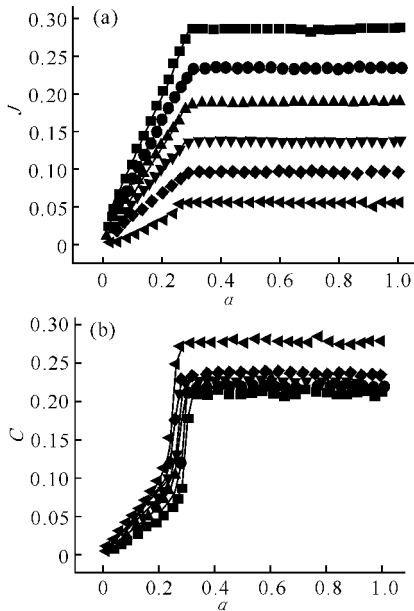


图 4 不同长度混合比条件下东西向车道上流量(a)和占有率(b)与产生概率的关系

Fig. 4 Relationships between flow (a), occupancy rate (b) and generating probability for mixture ratio of different length on east-west-orientation lanes

$T=20, f=0.5, \beta=1.0, V_{max}=5\text{cells/s}$; ■: $n=0.0$, ●: $n=0.2$, ▲: $n=0.4$, ▼: $n=0.6$, ◆: $n=0.8$, ◀: $n=1.0$.

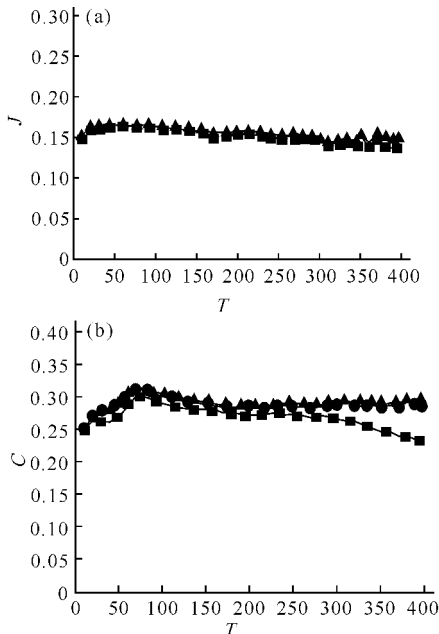


图 5 东西向车道上流量(a)和占有率(b)与红绿灯周期的关系

Fig. 5 Relationships between flow (a), occupancy rate (b) and alternating period of red and green lights on east-west-orientation lanes

$n=0.5, f=0.5, \beta=1.0$; ■: $\alpha=0.3$, ●: $\alpha=0.5$, ▲: $\alpha=0.7$.

2.4 信号灯绿信比对交通流的影响

图 6 为绿信比对交通系统的影响。系统设计的红绿灯周期 $T=20$, 混合比 $n=0.5$, 消失概率 $\beta=1.0$ 。图 6(a) 是东西向车道的流量随着产生概率的变化曲线。当 $f=0.2$ 时, 东西向车道的流量随着产生概率的升高而逐渐增加, 在 $\alpha=0.5$ 时达到饱和, 脱离产生概率的影响; $f=0.4, 0.6$ 时, 这 2 条曲线重合在一起, 流量随着产生概率的升高而逐渐增加, 在 $\alpha=0.2$ 处达到饱和, 摆脱产生概率的影响, 当 $f=0.2$ 时, 也能取得较大的流量。可见绿信比接近中间值时能提高单向车道的流量, 单靠提高绿灯周期来增加交通流量, 并不是最佳方案。

图 6(b) 是不同的绿信比之下, 系统的东西向车道上的占有率与产生概率的关系。当 $f=0.2$ 时, 即绿灯周期 $T_G=4$, 红灯周期 $T_R=16$, 系统东西向车道的占有率随着产生概率的升高而逐渐升高, 在 $\alpha=0.5$ 处进入一个平台, 占有率不再变化, 脱离了产生概率的影响。 $f=0.5$ 可为视变化趋势的分界下, f 低于或高于此值可获得变化趋势相仿的曲线。

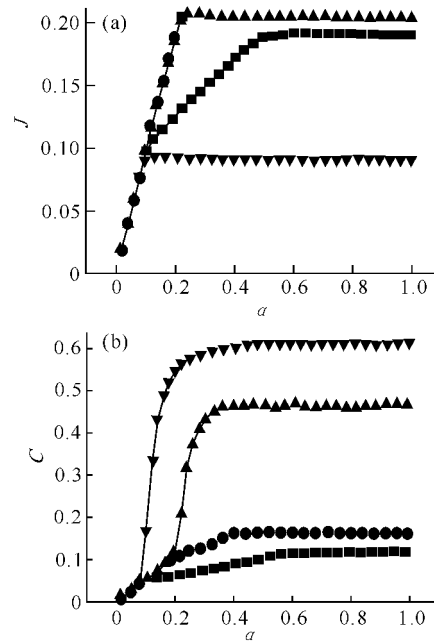


图 6 东西向车道流量(a)和占有率(b)与产生概率的关系

Fig. 6 Relationships between flow (a), occupancy rate (b) and generating probability on east-west-orientation lanes

$T=20, n=0.5, \beta=1.0$; ■: $f=0.2$, ●: $f=0.4$, ▲: $f=0.6$, ▼: $f=0.8$.

图 7 为整个网络系统的流量及占有率与产生概率的关系。从图 7(a) 中可以看出, 整个系统的流量按绿信比分成两组, $f=0.2, f=0.8$ 为一组, $f=0.4, f=0.6$ 为一组。后面一组随着产生概率的增加而上升, 在临界处饱和, 随后脱离产生概率的影响; 前面一组的变化趋势跟后面一组的一样, 只是最大值要

小很多。可见绿信比接近 0.5 时可以实现最大的流量。从图 7(b) 可以看出, 整个系统的道路占有率与系统流量的变化一样, 也同样可分为两组, $f = 0.2, f = 0.8$ 为一组, $f = 0.4, f = 0.6$ 为一组, 道路占有率和系统流量的走势具有相似的变化规律。

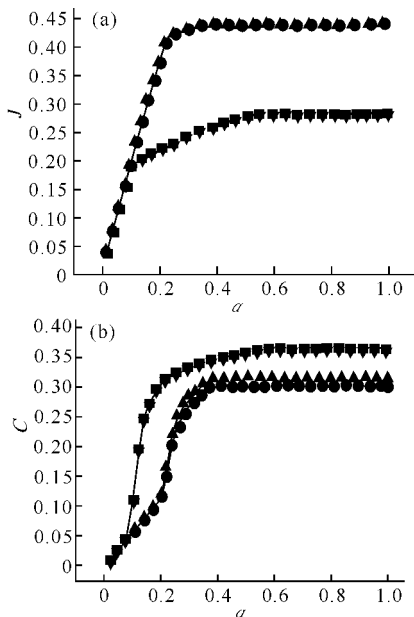


图 7 整个网络的流量(a)和占有率(b)与产生概率的关系

Fig. 7 Relationships between flow (a), occupancy rate (b) and generating probability on the whole network

$T = 20, n = 0.5, \beta = 1.0$; (a) \blacksquare : $f = 0.2, \bullet$: $f = 0.4, \blacktriangle$: $f = 0.6, \blacktriangledown$: $f = 0.8$; (b) \blacksquare : $f = 0.8, \bullet$: $f = 0.6, \blacktriangle$: $f = 0.4, \blacktriangledown$: $f = 0.2$.

3 结束语

城市交通网络是一个很复杂的系统, 它受到众多因素的影响, 而且这些因素又是相互影响、相互制约的, 具有很强的关联性。本文基于 BML 模型, 将城市道路设置为 10×10 条道路的二维静态网络, 在开放性边界条件下, 研究不同消失概率、不同消失概率、混合比例、红绿灯周期及绿信比对东西向车道和整个

网络交通流特性的影响, 得出一些结论, 虽然仅仅是初步的、浅层次的, 但是这些方法和结论对于研究实际的城市交通问题具有参考价值, 可供借鉴。

参考文献:

- [1] Balham O, Middleton A A, Levine D. Self-organization and a dynamic transition in traffic flow models[J]. Phys Rev A, 1992, 46: R6124-R6127.
- [2] Nagatani T. Effect of traffic accident on jamming transition in traffic flow model[J]. J Phys A, 1993, 26: 1015-1020.
- [3] 吕晓阳, 陈若航, 刘慕仁, 等. CA 交通流模型的演化方程与转向概率效应[J]. 物理学报, 1997, 46(3): 0435-0441.
- [4] Horiguchi T, Sakakibara T. Numerical simulations for traffic flow models on a decorated square lattice[J]. Phys A, 1998, 252: 388-404.
- [5] Brockfeld E, Barlovic R, Schadschneider A, et al. Optimizing traffic lights in a cellular automaton model for city traffic[J]. Phys Rev E, 2001, 64: 056132-056135.
- [6] 谭惠丽, 黄兵花, 李华兵, 等. 交通灯控制下主干道的交通流研究[J]. 物理学报, 2003, 52(5): 1127-1131.
- [7] 彭麟, 谭惠丽, 吴大艳, 等. 交通灯控制下城市主干道双车道多速元胞自动机交通流模型研究[J]. 物理学报, 2004, 53(9): 2899-2904.
- [8] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. J Phys I France, 1992, 2: 2221-2229.
- [9] 李新刚, 高自友, 赵小梅, 等. 混合非机动车流的多值元胞机模型模拟研究[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 4777-4785.
- [10] 贾斌, 李新刚, 姜锐, 等. 公交车站对交通流影响模拟分析[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 6845-6851.
- [11] 田欢欢, 薛郁, 康三军, 等. 元胞自动机混合交通流模型的能耗研究[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4506-4513.

(责任编辑: 邓大玉)