

信号灯随机更新的城市交通网络模型*

Signal Controlled Urban Traffic Network Model with Random Update Rule

盘薇^{1,2}, 贾丽斯³, 薛郁^{2**}

PAN Wei^{1,2}, JIA Lisi³, XUE Yu²

(1. 香港城市大学建筑学及土木工程学系, 香港; 2. 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西南宁 530004; 3. 广西大学行健文理学院, 广西南宁 530005)

(1. Department of Architectural and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong, China; 2. College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. Xingjian College of Science and Liberal Arts, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530005, China)

摘要:【目的】改进二维元胞自动机模型(BML模型),使其更好模拟实际城市交通网络。【方法】利用元胞自动机方法,建立信号灯随机更新的城市交通网络模型。【结果】数值模拟发现,信号灯的同步对城市交通网络的影响较大,且随机更新的引入使得网络系统的临界密度大幅度降低。【结论】同时调整信号灯的分布和信号变换周期能有效控制交通网络,解决由于信号灯随机更新所造成的系统临界密度变小的问题。

关键词:元胞自动机 城市交通网络 随机更新

中图分类号:U491 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2016)03-0189-05

Abstract:【Objective】An improved two-dimensional cellular automaton model (BML model) was proposed to better simulate real urban traffic network. 【Methods】Aiming at the urban traffic congestion problem and using the cellular automata method, a traffic signal model with random update rule was established to study the urban traffic network. 【Results】Simulation results showed that the synchronization of the traffic signal has great influence on the traffic system, and the introduction of random update rule significantly reduces the critical density of phase transition. 【Conclusion】When the roads are crowded by cars, simultaneous adjusting of signal arrangements and periods provides a possible way for relaxing the traffic congestion.

Key words:cellular automata, urban traffic network, random update

0 引言

【研究意义】随着城市化进程的加速,交通拥堵及其所造成的一系列连锁问题日显突出。城市交通拥堵导致的最直接后果就是浪费时间,《中国新型城市化报告2012》指出,中国50个超百万人口的城市中居民上班途中平均消耗时间为39 min(文献[1])。此外,交通拥堵还造成能源浪费并加剧环境污染。【前人研究进展】交通流作为一门交叉学科,已引起众多领域学者的关注^[2-10]。由于规划滞后,城市道路一

收稿日期:2016-03-15

修回日期:2016-03-26

作者简介:盘薇(1989-),女,博士研究生,主要从事交通流动力学及其颗粒物排放研究。

* 国家自然科学基金项目(11262003),广西自然科学基金项目(20140593)和广西研究生创新项目(YCSZ2012013)资助。

** 通讯作者:薛郁(1963-),男,博士生导师,教授,主要从事交通流动力学研究,E-mail:yuxuegxu@gxu.edu.cn。

般分布复杂,给研究带来了一定的困难。1992年, Biham等^[3]首次提出用于模拟城市交通网络的二维元胞自动机模型(BML模型)。从整体上看,BML模型是一个简单的确定性模型,它唯一的随机性体现在两种沿不同方向行驶的车辆初始随机分布。由于BML模型能够通过简单的规则演化模拟出城市交通流从自由流相到堵塞相的两相变化,已受到学术界的广泛关注^[11-16]。【本研究切入点】在原始BML模型的演化规则中,所有信号灯采用并行更新方式,而这种交通灯同步模式过于理想化,在实际的城市交通网络中很难实现^[17]。因而信号灯分布^[18-19]和随机更新的问题^[20]还需要进一步探讨。【拟解决的关键问题】在原始BML模型的基础上,继续研究随机更新规则下信号灯的分布及其信号变换周期长短对城市交通网络的影响。

1 建模

新模型建立在 $L \times L$ 的二维网格中,并采用周期性边界条件。首先,以一定的总密度 ρ 在二维正方形网格上等概率的随机分布两种类型的车辆:向右行驶(RD)和向上行驶(UD)的车辆。与原始的BML模型相同,每一个网格可以有3种占据状态:被一辆向右行驶的车辆占据或被一辆向上行驶的车辆占据,或者没有车辆(为空)。车辆的行驶方向及其所在的行(或列)在演化过程中始终保持不变,即模型中每种类型的车辆数都是守恒的。初始分布时,每个网格 (i, j) 除了具有上述3种可能的占据状态之外,还应具有两种可能的信号状态: $S^{i,j}(t) = 0$ 或1。图1是Watanabe^[18]给出的信号灯在初始化时可能存在的4种分布情况(A、B、C、D),其中实心 and 空心网格分别表示初始信号为0和1的信号灯。当 $S^{i,j}(t) = 0$ 时,表示该网格的信号灯在 t 时刻只允许向上行驶的车辆通行,此时向右行驶的车辆只能呆在原地不动;而当 $S^{i,j}(t) = 1$ 时情况则刚好相反,此时只有向右行驶的车辆能通过网格 (i, j) 。信号灯每 T 个演化时步进行一次集体的信号反转变换。

不同于文献[18-19],新模型参考文献[20]提出的随机更新方式。在周期边界条件下,如果用 $\tau(i, j)$ 表示网格 (i, j) 的占据状态,以下操作在每个Monte Carlo时步中需重复 $L/2$ 次:

- 1) 随机选择一个格点 (i, j) ;
- 2) 如果 $\tau(i, j) = 0$,网格中没有车辆,则不进行任何操作;
- 3) 如果 $\tau(i, j) = 1$ 且 $S^{i,j}(t) = 1$,即网格 (i, j) 被向右行驶的车辆占据且向右行驶的信号灯亮起,此

时若 $\tau(i, j + 1) = 0$,则该向右行驶车辆可以向前移动;

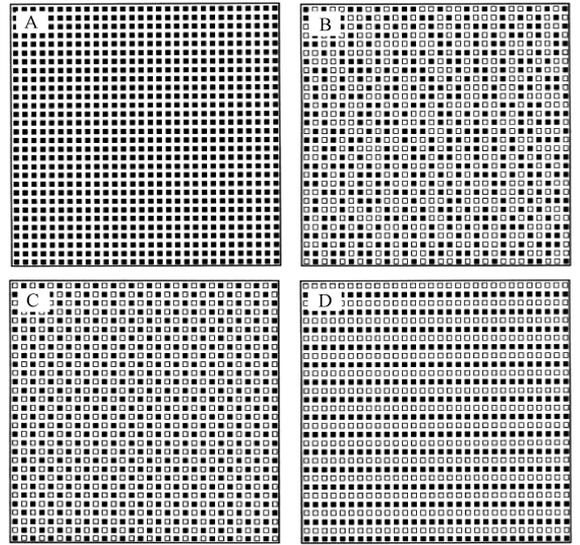


图1 4种信号分布图例^[18]

Fig.1 Schematic illustrations of system signal arrangements^[18]

4) 如果 $\tau(i, j) = -1$ 且 $S^{i,j}(t) = 0$,即网格 (i, j) 被向上行驶的车辆占据且向上行驶的信号灯亮起时,若 $\tau(i + 1, j) = 0$,则该向上行驶车辆可以向前移动;

5) 其它情况下,不进行任何操作。

所有信号灯的信号在每 T 个Monte Carlo时步后全部进行一次反转变换。采用的平均速度 $\langle v \rangle$ 的计算公式为

$$\langle v \rangle = \frac{1}{n} \frac{1}{T_s} \sum_{i=1}^n \sum_t^T \left(\frac{V_{\text{right}}(t)}{N_{\text{right}}} + \frac{V_{\text{up}}(t)}{N_{\text{up}}} \right), \quad (1)$$

其中, n 和 t 分别代表统计的样本数(一般取 $n = 100$)和统计时间, $V_{\text{right}}(t)$ (或 $V_{\text{up}}(t)$)表示在第 t 个统计时步中向右(或向上)行驶车辆的速度之和,而 N_{right} (或 N_{up})表示向右(或向上)行驶的车辆数。

2 模拟结果与分析

根据不同的信号灯变换周期 T 对图1中给出的4种信号灯分布情况进行模拟。模拟时采用的网格大小 $L = 100$,每次模拟的前 9×10^5 个Monte Carlo时步作为暂态时间舍去,后 10^5 个Monte Carlo时步进行统计取平均。

2.1 $T=1$ 的情况

从图2可以发现,在变换周期 $T = 1$ 且采用并行更新进行演化的情况下,Watanabe模型中4种不同信号分布对城市交通网络的影响不同(图2b)。其中,当所有信号灯的信号完全间隔分布时(分布C),模型具有与原始BML模型类似的速度-密度关系。

而当信号分布呈现奇数行和偶数行信号相反时(分布 D),系统的临界密度最高;系统的最低临界密度出现在信号灯信号随机分布的情况下(分布 B)。比较发现,信号灯全部相同时(分布 A),系统尽管在自由流相中的平均速度较小,却拥有相对较高的临界密度。然而,在采用随机更新的演化规则后,上述 4 种信号分布所对应的系统临界密度的差异性消失,表现为 4 条几乎重合在一起的速度-密度关系曲线(图 2a)。说明,在不考虑信号灯周期及其他因素影响的条件下,随机更新的演化规则使得信号灯分布对系统临界密度的影响被大幅度减弱。

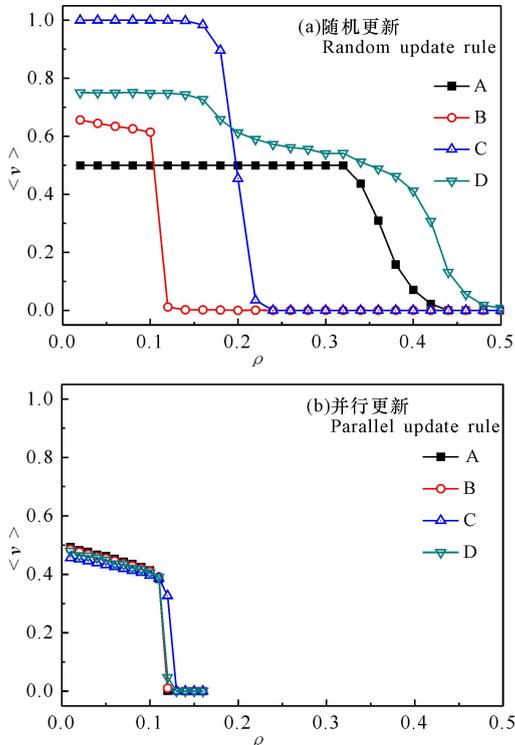


图 2 $T = 1$ 时 4 种不同初始信号灯分布的速度-密度关系

Fig. 2 The variation of the velocity versus the density for different initial signal arrangements in the case of $T = 1$

通过对变换周期 $T = 1$ 的情况进行模拟和分析得出:作为一个独立的影响因素来说,信号灯的随机更新比信号灯的分布对城市交通网络的影响更大。此外,对于分布 A、C 和 D 而言,在随机更新的条件下,自由流相在并行更新时会出现的平台也消失,取而代之的平均速度随着密度的增大在慢慢变小。而这个变化趋势与文献[18]的变化趋势是一致的。

2.2 多变换周期的情况

对变换 $T = 1$ 的情况进行模拟发现同步问题严重影响城市交通网络的整体通行能力,且这种影响是

无法通过改变信号灯分布来减弱。因此,有必要考虑多变换周期($T = 1, 2, 3, 5, 10$)的情况。

对比图 3a 和图 3b 可以发现,在并行更新条件下系统的临界密度随着变换周期的增大,不断变小,且在自由流相中平均速度总有一个平台出现。而在受随机更新影响的模型中,改变信号灯的变换周期对系统临界密度几乎没有影响,其自由流相中的平均速度随着密度的增大而下降,且下降的斜率随着变换周期的增大而慢慢增大。

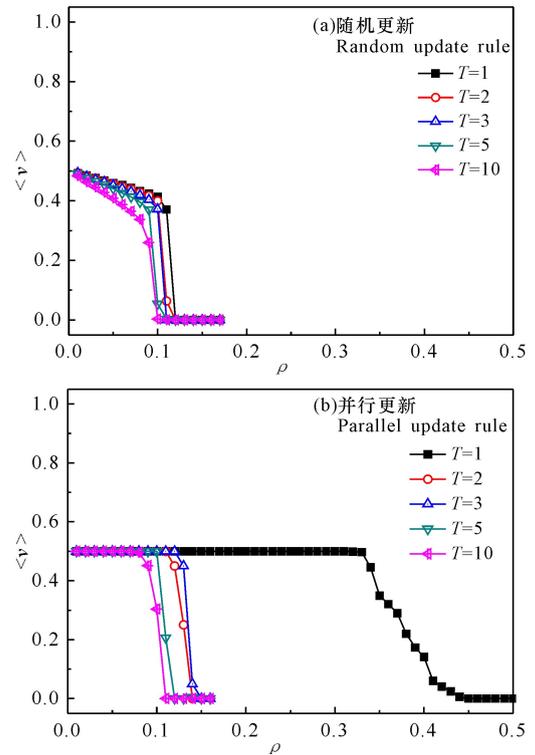


图 3 不同变换周期下,分布 A 的速度-密度关系
Fig. 3 The variation of the velocity versus the density under different signal periods for case A

从图 4 可以看出,更新规则和信号灯变换周期的改变只对系统在自由流相中平均速度的初始值产生影响,而对系统相应的临界密度没有影响。即分布 B 所对应的系统表现出了一种较强“稳定性”,其临界密度几乎不受更新规则和信号灯变换周期的影响。

由图 5 可以看出,尽管分布 C 在受到随机更新规则影响时,其系统的临界密度和相应的初始平均速度依然会减小,但是这种影响是可以通过延长信号灯的变换周期得到改善。而且延长信号变换周期的方法不仅适用于随机更新下的系统,对并行更新下的系统影响更大。

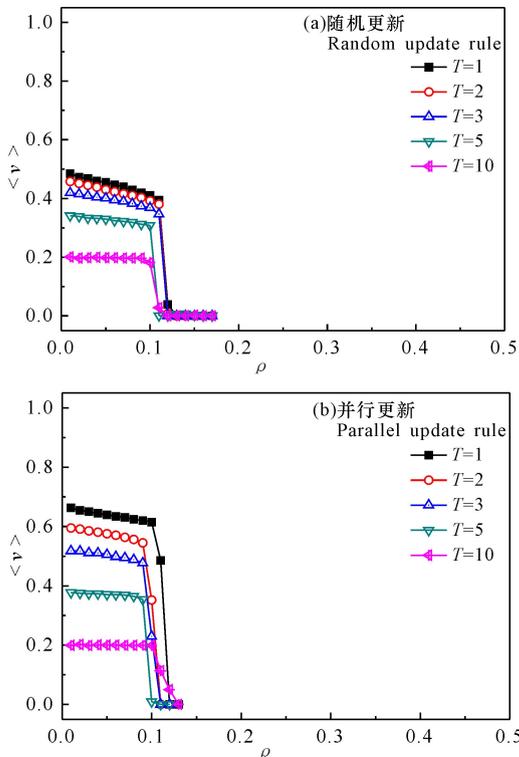


图 4 不同变换周期下,分布 B 的速度-密度关系

Fig. 4 The variation of the velocity versus the density under different signal periods for case B

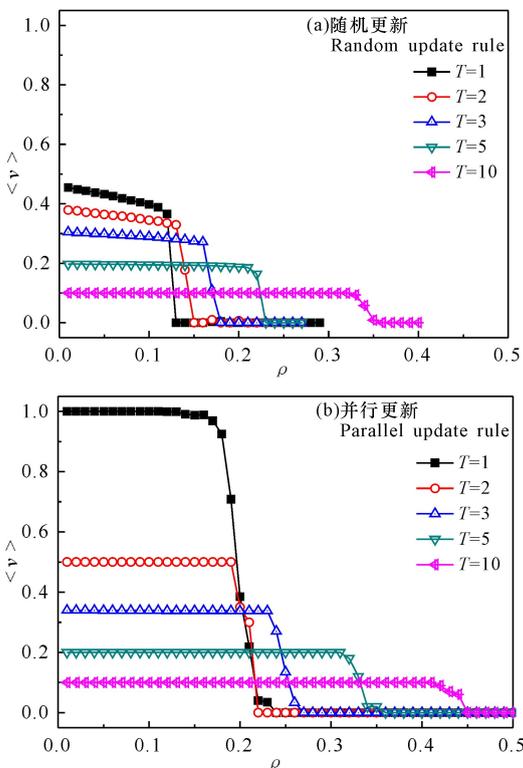


图 5 不同变换周期下,分布 C 的速度-密度关系

Fig. 5 The variation of the velocity versus the density under different signal periods for case C

从受到并行更新规则影响(图 6b)看,分布 D 在

变换周期较短时是比较理想的分布,表现为较大的自由流平均速度和高临界密度。但在随机更新的条件下,上述优势消失且临界密度变小,其系统临界密度的变化趋势变化与分布 A、B 一样,信号灯变换周期的长短对临界点没有影响。

在对多变换周期的模拟发现,采用并行更新演化规则的模型中,分布 A、B 和 D 的系统临界密度都是随着周期的增长而减小(图 3b,图 4b 和图 6b),只有分布 C 的临界密度表现为随着变换周期的增长而增大(图 5b)。因此,Watanabe^[18]认为信号灯的间隔分布与长变换周期相结合的控制方法可以有效缓解交通拥堵。而当采用随机更新规则之后,虽然系统在分布 A、B 和 D(图 3a,图 4a 和图 6a)的自由流平均速度和相应的临界密度都有所降低,但信号灯变换周期的增大对系统的临界密度影响不大,这与 Watanabe 的模型结果不同。与其它 3 种分布不同的是,分布 C(图 5a)即使在随机更新的条件下,其系统的临界密度依然保持随着变换周期的增大而增大的趋势,且相应的临界密度值都大于其他 3 种分布。

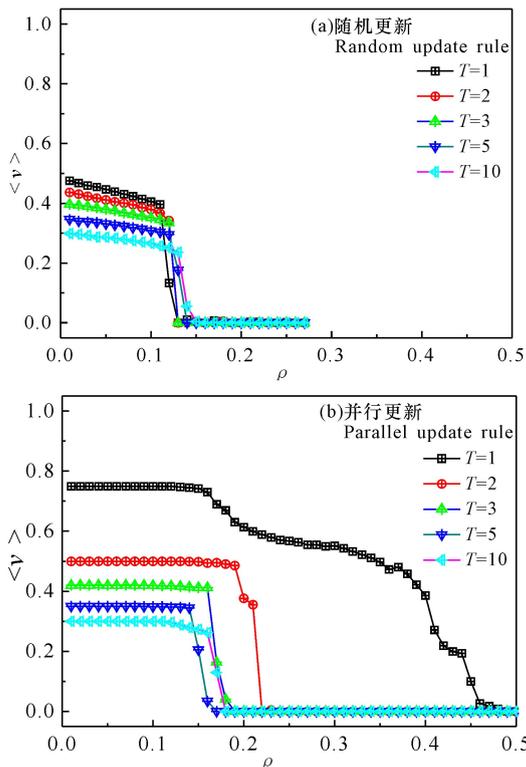


图 6 不同变换周期下,分布 D 的速度-密度关系

Fig. 6 The variation of the velocity versus the density under different signal periods for case D

通过研究 $T = 1$ 的情况发现,仅仅通过控制信号灯的分布缓解交通拥堵不可行。而在对多变换周期的情况进行模拟发现,分布 C 的临界密度最高,且信号灯的变换周期对其临界密度的影响较为显著。

所以在随机更新的条件下,只有同时调节信号灯的间隔分布和使用长变换周期才能较好的缓解城市交通网络的压力,提高系统的临界密度。这与 Watanabe 在信号灯并行更新调节下得到的结论相同。

3 结论

本研究在 4 种信号灯分布的 BML 模型的基础上,通过引入随机更新规则,建立了信号灯随机更新的城市交通网络模型,并研究信号灯的分布及其变换周期长短对城市交通网络的影响。模拟结果表明,信号灯的同步对城市交通网络产生了较大的影响,且随机更新的引入使得网络系统的临界密度大幅度降低。此外发现,不论城市交通路网中的信号灯采用何种方式进行更新(并行更新或随机更新),只有同时调节信号灯的分布和控制信号灯变换周期才能有效地控制城市交通网络,进而改善交通拥堵问题。

参考文献:

[1] 牛文元. 中国新型城市化报告 2012[M]. 北京:科学出版社,2012.
NIU W Y, China's New Urbanization Report 2012[M]. Beijing: Science Press, 2012.

[2] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal Dephysique I, 1992, 2(12): 2221-2229.

[3] BIHAM O, MIDDLETON A A, LEVINE D. Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models[J]. Physical Review A, 1992, 46(10): R6124-R6127.

[4] DAGANZO C F. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1994, 28(4): 269-287.

[5] DAGANZO C F. The cell transmission model, part II: Network traffic[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1995, 29(2): 79-93.

[6] FUKUI M, ISHIBASHI Y. Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1996, 65(6): 1868-1870.

[7] KERNER B S. Experimental features of self-organization in traffic flow[J]. Physical Review Letters, 1998, 81(17): 3797-3800.

[8] CHOWDHURY D, SANTEN L, SCHADSCHNEIDER A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems[J]. Physics Reports, 2000, 329(4): 199-329.

[9] NAGATANI T. The physics of traffic jams[J]. Reports on Progress in Physics, 2002, 65(9): 1331-1386.

[10] 戴喜生, 杨峰, 郭亚君, 等. 快速路交通流常微分模型的 PD 型迭代学习控制[J]. 广西科技大学学报, 2014, 25(3): 21-25, 31.
DAI X S, YANG F, GUO Y J, et al. PD-type iterative learning control for freeway traffic flow ordinary differential equation model[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2014, 25(3): 21-25, 31.

[11] MAERIVOET S, DE MOOR B L R. Cellular automata models of road traffic[J]. Physics Reports, 2005, 419(1): 1-99.

[12] D'SOUZA R M. Coexisting phases and lattice dependence of a cellular automaton model for traffic flow[J]. Physical Review E, 2005, 71(6): 066112.

[13] PERC M. Premature seizure of traffic flow due to the introduction of evolutionary games[J]. New Journal of Physics, 2007, 9(1): 3.

[14] DING Z J, JIANG R, GAO Z Y, et al. Effect of overpasses in the Biham-Middleton-Levine traffic flow model with random and parallel update rule[J]. Physical Review E, 2013, 88(2): 022809.

[15] KUANG H, ZHANG G X, LI X L, et al. Effect of slow-to-start in the extended BML model with four-directional traffic[J]. Physics Letters A, 2014, 378(21): 1455-1460.

[16] LI Q L, JIANG R, DING Z J, et al. Effect of vehicles' changing lanes in the Biham-Middleton-Levine traffic flow model[J]. International Journal of Modern Physics C, 2015, 26(3): 1550032.

[17] 顾国庆, 许伯铭, 汪秉宏, 等. 随机化交通灯的二维元胞自动机交通模型[J]. 应用数学和力学, 1998, 19(9): 753-758.
GU G Q, XU B M, WANG B H, et al. Two-dimensional cellular automaton traffic model with randomly switching traffic lights[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1998, 19(9): 753-758.

[18] WATANABE M S. Dynamical behavior of a two-dimensional cellular automaton with signal processing[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2003, 324(3): 707-716.

[19] WATANABE M S. Dynamical behavior of a two-dimensional cellular automaton with signal processing (II). Effect of signal period[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2003, 328(1): 251-260.

[20] DING Z J, JIANG R, WANG B H. Traffic flow in the Biham-Middleton-Levine model with random update rule[J]. Physical Review E, 2011, 83(4): 047101.

(责任编辑:尹 闯)