



智能双通道交通流系统中的先进信息反馈策略

董川飞^{①②*}, 马旭^{①③}, 汪秉宏^{①④*}^① 中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026^② School of Earth and Atmospheric Sciences, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA^③ Department of Physics, Syracuse University, Syracuse, NY 13244, USA^④ 上海理工大学复杂系统科学研究中心, 上海系统科学研究院, 上海 200093

* 通信作者. E-mail: dcfy@gatech.edu; bhwang@ustc.edu.cn

收稿日期: 2009-09-28; 接受日期: 2010-05-11

国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB705500)、国家自然科学基金 (批准号: 10975126, 10635040) 和高校博士点专项基金 (批准号: 20093402110032) 资助项目

摘要 尽管智能车辆交通流之实时交通信息的动力学行为已经被详细地研究, 但寻找一个可以应用于实际双通道选择交通流之管理与控制的有效的信息反馈策略仍然是交通科学当务之急的一个重要问题. 最近, 一些实时反馈信息策略已经被提出, 如旅行时间信息反馈策略 (TTFS)、平均速度信息反馈策略 (MVFS) 和堵塞系数信息反馈策略 (CCFS), 以上 3 种策略中的最佳策略 (堵塞系数信息反馈策略, CCFS) 仍然有进一步改善之余地. 文中提出一种称为车辆数反馈策略 (VNFS) 的新的交通信息控制策略. 策略之关键在于只反馈每条通道上最前面某一路段的车辆数目信息. 模拟计算表明这一新策略在整个双通道交通系统的通行流量和通行速度上表现出了很高的优越性.

关键词

元胞自动机模型

智能车辆

双通道选择交通流

车辆数信息反馈策略

1 引言

由于交通流研究多变的复杂性, 它的相关问题在最近几年极大地引起了物理学界的关注^[1~4]. 因此, 物理学家提出了一系列的理论模型去研究交通流中所存在的现象, 比如车辆跟驰模型^[5]、动理论模型^[6~10]和粒子跃迁模型^[11~13]. 尽管智能车辆交通流之实时交通信息的动力学行为已经被详细地研究^[14~19], 但寻找一个可以应用于实际双通道选择交通流之管理与控制的有效的信息反馈策略仍然是交通科学当务之急的一个重要问题. 近年来, 一些实时反馈策略已经被提出, 如旅行时间信息反馈策略 (travel time feedback strategy, TTFS)^[14,20]、平均速度信息反馈策略 (mean velocity feedback strategy, MVFS)^[14,21]和堵塞系数信息反馈策略 (congestion coefficient feedback strategy, CCFS)^[14,22]. 已经证明, 在改善道路交通方面, MVFS 比 TTFS 有效^[21], 而 CCFS 比 MVFS 有效^[22]. 然而, CCFS 仍然不是最好的信息反馈策略, 因为对于入口处的进车而言, 其实整条道路上的车辆情况并不能真实地反映出入口处的车辆情况. 为了给司机更好的指导, 我们提出了一种叫做车辆数信息反馈策略 (vehicle number feedback strategy, VNFS) 的新策略. 本文讨论了一个在双车道模型下, 运用 4 种不同的信息

反馈策略的数值结果, 这里需要说明的是, 每一条车道都遵循 NS 模型.

本文安排如下: 在第 2 部分将会简要的介绍一下 NS 模型和双车道模型, 同时还会介绍一下 4 种不同的信息反馈策略: TTFS, MVFS, CCFS 和 VNFS. 在第 3 部分, 根据 4 种不同的信息反馈策略, 一些数值结果将被展示和讨论. 最后一部分将给出总结和讨论.

2 模型和反馈策略

2.1 NS 机制

为了模拟车辆的加速行为和由于司机对环境反应的不同引起的车辆随机延迟行为, 德国学者 Nagel 和 Schreckenberg 在 1992 年提出了一维交通流元胞自动机模型 (NS 模型). NS 模型是目前为止最受欢迎的, 同时也是用于分析交通流最简单的元胞自动机模型^[1~3,12,23~26]. 在这个部分, 我们将简要的介绍一下 NS 机制.

道路被细分为一些元胞, 每一个元胞长 $\Delta x = 7.5$ m. 设 N 为一条长度为 L 的道路上的车辆总数, 那么, 车辆密度可以写成 $\rho = N/L$. $g_n(t)$ 被定义为在时间 t 时, 在第 n 辆车之前的空格数, $v_n(t)$ 定义为第 n 辆车的速度. 在 NS 模型中, 我们将最大速度定义为 $v_{\max} = M$. 本文中, 为简单起见, 假设 $M = 3$.

NS 机制可以被划分为以下 4 条规则 (并行动力学):

规则 1. 加速过程: $v_i \leftarrow \min(v_i + 1, M)$.

规则 2. 安全刹车过程: $v'_i \leftarrow \min(v_i, g_i)$.

规则 3. 随机慢化过程 (以随机慢化概率 p): $v''_i \leftarrow \max(v'_i - 1, 0)$.

规则 4. 位置更新: $x_i \leftarrow x_i + v''_i$.

2.2 双车道模型简介

Wahle 等^[20] 首先研究了双车道模型. 模型中, 道路使用者根据实时信息反馈选择双车道中的一条. 在双车道模型中, 假设两条道路分支 A 和 B 有相同的长度 L . 每一个时间步, 一辆新的车辆将在双车道入口处产生并且选择其中一条道路进入. 如果一辆车进入了其中一条道路, 它的动力学行为将遵循 NS 模型. 这里要注意一点, 如果一辆新车不能进入期望的道路, 它将会被删除. 当然, 当车辆到达道路出口时, 它也会被删除.

另外, 我们将介绍两种类型的车: 动态车和静态车. 如果一辆车被叫做动态车, 那么它将通过反馈的信息选择要进入的道路分支^[20], 而静态车将随机的选择要进入的道路分支并忽略信息反馈. 动态车与静态车的密度分别设为 S_{dyn} 和 $1 - S_{\text{dyn}}$.

本文中, 根据以下步骤进行模拟: 首先, 将道路上的车辆数和反馈信息的信息牌清零; 然后, 在车辆进入道路分支之后的每一个时间步, 根据 4 种不同的信息反馈策略, 信息将被产生, 传达, 显示在信息牌上; 最后, 动态车会根据信息牌上的信息选择道路状况好的分支进入.

2.3 相关定义

道路的状况可以用两条道路分支的流量来标示, 流量定义如下:

$$F = V_{\text{mean}}\rho = V_{\text{mean}}N/L, \quad (2.1)$$

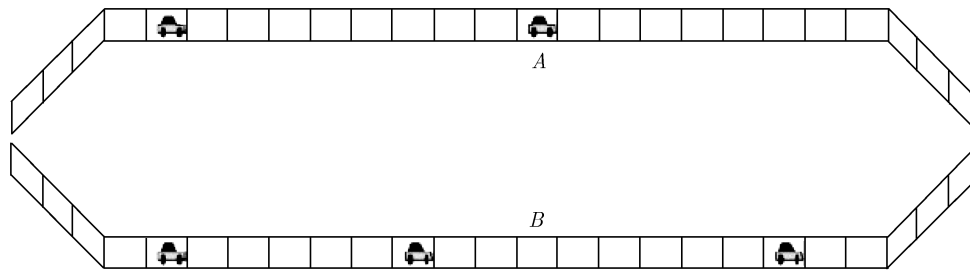


图 1 单入口单出口双通道道路模型

这里 V_{mean} 为一条道路分支上的所有车辆的平均速度, N 为每条道路分支上的车辆数, L 为每条道路分支的长度. 接下来, 我们将描述 4 种不同的信息反馈策略.

旅行时间信息反馈策略 (TTFS): 一开始, 每条道路分支都是空的并且信息反馈牌上的通过时间设成相同. 每个司机在进入一条道路分支时, 将会被记录时间. 一旦车辆离开双车道系统时, 反馈信息牌上将显示这辆车的通过时间. 与此同时, 一辆新的动态车将根据反馈信息牌上的信息, 选择进入显示时间短的道路.

平均速度信息反馈策略 (MVFS): 每一个时间步, 道路上的每一辆车将传送它的速度给交通控制中心, 他们将会处理这些信息, 并且在每条道路分支的信息反馈牌上显示这条道路上的车辆平均速度. 双车道入口处的道路使用者将选择平均速度大的道路分支进入.

堵塞系数信息反馈策略 (CCFS): 每一个时间步, 每一辆车把信号传送给卫星, 然后导航系统 (GPS) 将处理这些信息并计算每一辆车的位置, 这些数据将被传送到交通控制中心. 交通控制中心的工作就是计算每条道路分支上的堵塞系数并将它显示在反馈信息牌上. 入口处的道路使用者将选择堵塞系数小的道路分支进入.

车辆数信息反馈策略 (VNFS): 在每条道路分支的入口处和第 500 个元胞处各安装一个传感器. 每一个时间步, 车辆通过第一个传感器, 相应道路上的反馈信息牌上的车辆数加一, 而通过第二个传感器时, 相应道路上的反馈信息牌上的车辆数减一, 即将前 500 元胞内的车辆数目作为反馈依据. 入口处的道路使用者将选择车辆数小的道路分支进入.

这样做的原因是: 整条道路的道路状况并不能真实的反映出入口处的情况. 例如, A 道路前面很宽敞, 但总的车辆数却比 B 道路多, 但是 B 道路前面很拥挤而后面相对很宽敞, 当出现这种情况时, 我们的新策略就能明显改善道路状况. 因为它能更好的反应出道路入口处的状况.

相比以前工作^[20~22]中的单入口双出口双车道系统, 本文中的双车道道路系统只有一个路口和一个出口, 如图 1 所示. 这样的道路模型更贴近现实.

双车道出口处的出车规则如下:

- (1) 在出口处, 两条车道上, 离出口近的那辆车先出;
- (2) 在出口处, 如果两条车道上的两辆车离出口相同的距离, 那么车速快的那辆车先出;
- (3) 在出口处, 如果两条车道上的两辆车离出口距离相同并且速度也相同, 那么, 所在车道上车量数多的那辆车先出;
- (4) 在出口处, 如果条件 (1)~(3) 同时满足, 那么车辆随机出.

在接下来的这部分, 4 种不同策略的结果将被展示和进一步讨论.

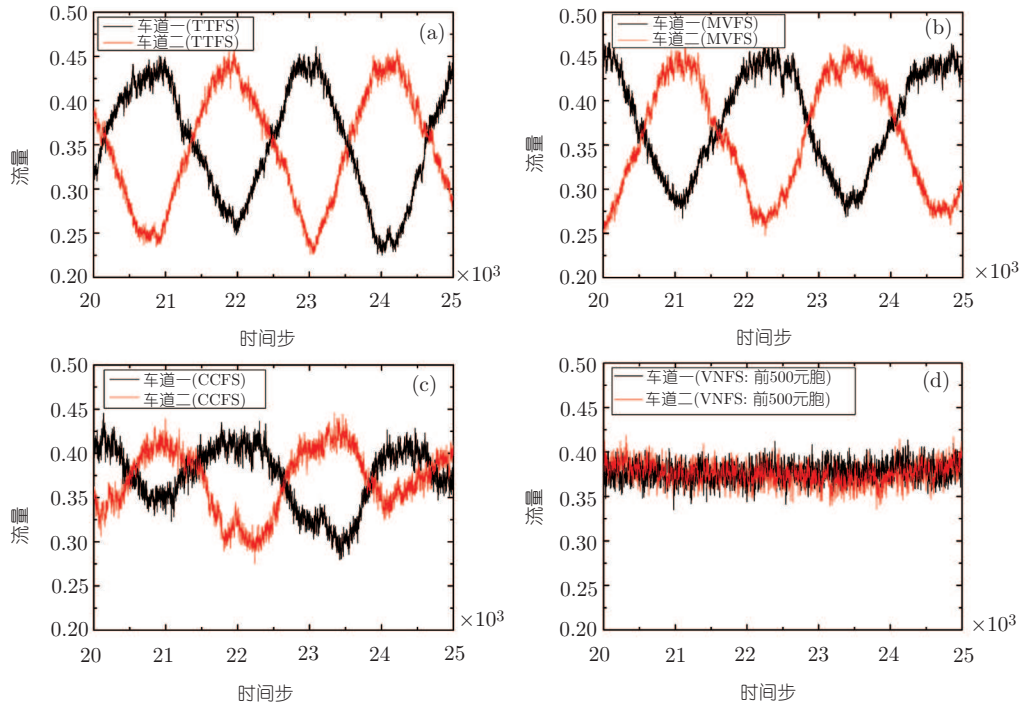


图 2

(a) 采用旅行时间信息反馈策略时, 每条道路流量; (b) 采用平均速度信息反馈策略时, 每条道路流量; (c) 采用堵塞系数信息反馈策略时, 每条道路流量; (d) 采用车辆数信息反馈策略时, 每条道路流量. 参数的设置为 $L=2000$,

$$p=0.25, S_{\text{dyn}}=0.5$$

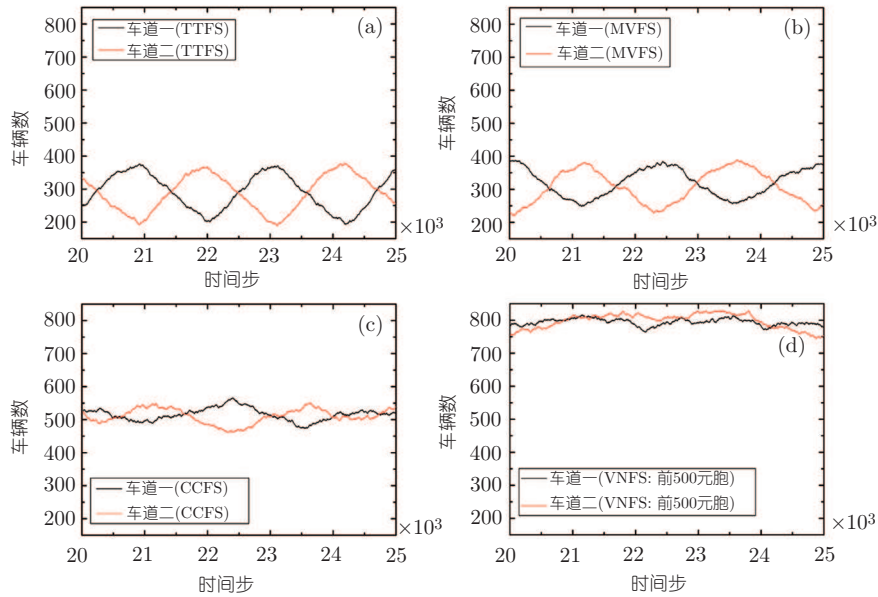


图 3

(a) 采用旅行时间信息反馈策略时, 每条道路的车辆数目; (b) 采用平均速度信息反馈策略时, 每条道路的车辆数目; (c) 采用堵塞系数反馈策略时, 每条道路的车辆数目; (d) 采用车辆数反馈策略时, 每条道路的车辆数目. 参数的设置与图 2 的相同

3 数值结果

这里的所有模拟结果都是通过总共取 25000 个时间步, 并同时去掉最初 5000 个时间步来模拟的.

和 VNFS 相比, 采用 CCFS, MVFS 和 TTFS 时, 两条道路上的流量有着明显的振荡 (见图 2), 这是由于信息延迟所导致的^[22]. 这种延迟是可以被理解的, 因为他们都无法反映出道路入口处的真实情况. 而我们的新策略相当于将出口设置提前了, 一定程度上相当于预测了道路将来的情况. 和 CCFS 相比, 采用 VNFS 的优点不仅表现在流量值上, 更表现在了流量值的稳定性上. 因此, 就流量而言 VNFS 是最好的.

在图 3 中, 车辆数随时间的变化趋势与图 2 中流量的趋势基本保持一致. 道路容纳车的数目与 TTFS 相比, 从 290 增加到 800. 因此采用 VNFS 时, 高的流量可能主要来自于车辆数的增加. 也许有些人会问: 为什么同样用原来的策略, 图 2 中的车辆数比之前的文献中的数值要大^[22]? 那是因为现在在双车道出口处, 每一个时间步, 系统只允许出一辆车.

在图 4 中, 尽管采用新的策略时, 速度的值很稳定, 但却是 4 种策略里最低的. 原因是采用新的策略使得道路上的车辆数大大的增加了, 但道路系统却只有一个出口, 从而导致了道路上的车量数越大, 相应道路上的速度就越小. 幸运的是, 流量有两部分组成, 平均速度与车辆密度. 因此, 只要后者足够大 (由于车辆 $\rho = N/L$ 固定为 2000, 所以 $\rho \propto$ 车辆数 (N)), 相应的流量还是能够变得最大.

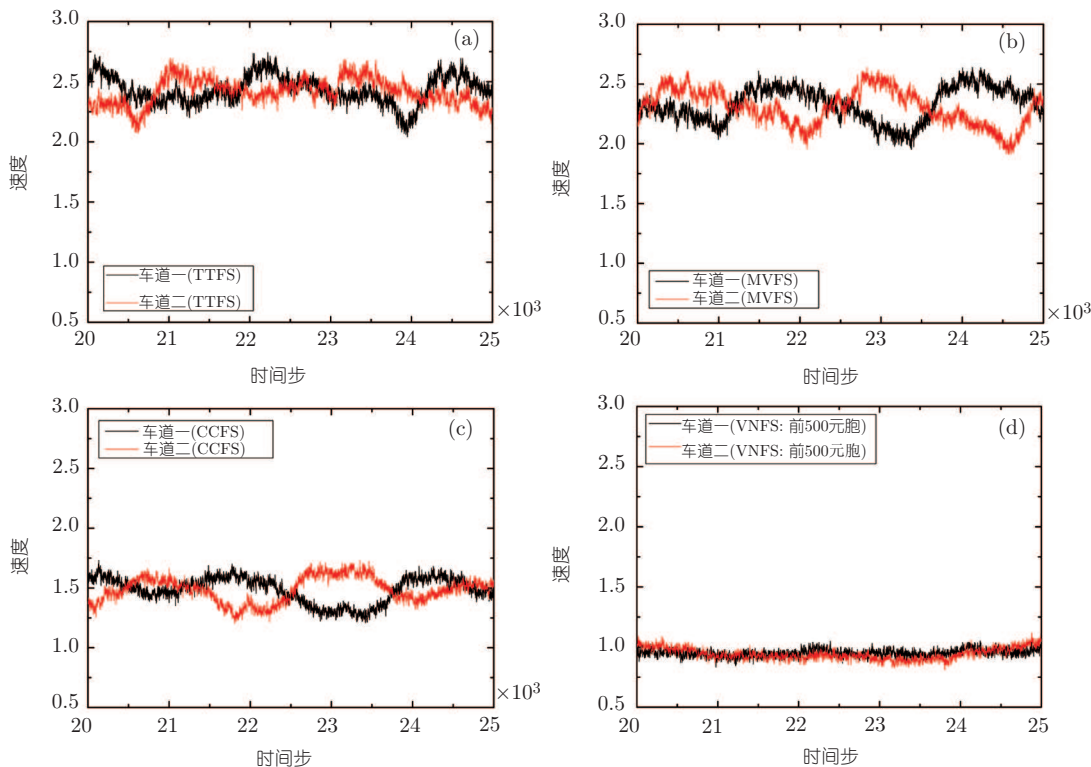


图 4

(a) 采用旅行时间信息反馈策略时, 每条道路上车辆的平均速度; (b) 采用平均速度信息反馈策略时, 每条道路上车辆的平均速度; (c) 采用堵塞系数信息反馈策略时, 每条道路上车辆的平均速度; (d) 采用车辆数信息反馈策略时, 每条道路上车辆的平均速度. 参数的设置与图 2 的相同

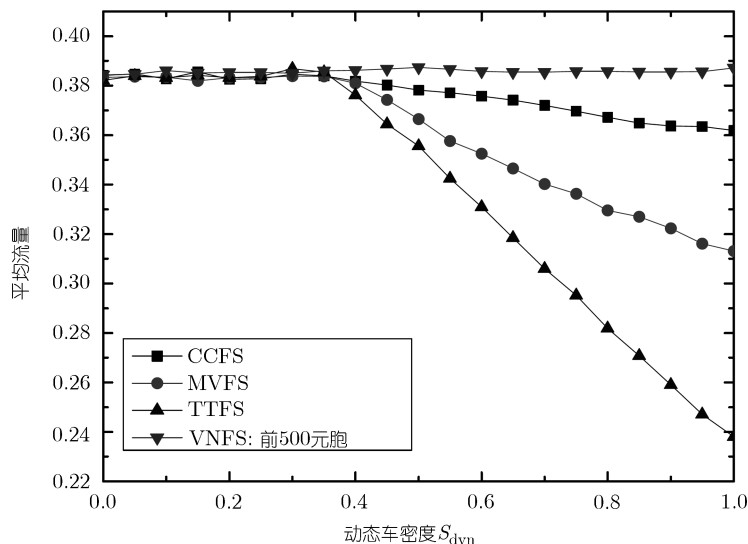


图 5 在不同信息反馈策略下, 道路平均流量随动态车密度的变化关系; L 固定为 2000

图 5 展示了利用不同信息反馈策略时, 平均流量随动态车密度增加的变化关系. 就道路容纳车的能力而言, 新的策略是最合适的, 因为它在每一个 S_{dyn} 值处所对应的平均流量都是最大的, 而且随着动态车的增加平均流量基本保持不变并且有微弱的增加. 也许有人会问, 为什么这里采用 TTFS, MVFS 和 CCFS 时, 平均流量相比之前的工作 [22] 有所降低? 这是因为这里的双车道系统与之前的不同. 相比之前, 本文中的双车道系统只有一个出口, 所以道路的平均流量下降是可以理解的.

4 总结

我们得到了采用 4 种不同信息反馈策略的模拟结果, 即, TTFS, MVFS, CCFS 和 VNFS 在一个双车道模型下的流量、车辆数、速度以及平均流量随着 S_{dyn} 的变化趋势. 结果展示了 VNFS 在一个单入口单出口双车道系统里的效果比之前的其他 3 种策略都好. 相对其他 3 个老的策略, VNFS 对于道路状况可以带来巨大的改善, 包括车辆数和流量数值的增加以及振荡的减少, 平均流量随着 S_{dyn} 的增加基本保持不变.

由于快速发展的现代科学技术, 要实现 VNFS 并不困难. 只要在道路上装一些传感器就能实现我们的方案, 而且这花费的钱比 CCFS 要少得多. 考虑到合理的花费和有效地提高了道路的利用效率, 我们认为这种策略是合理的.

参考文献

- 1 Chowdhury D, Santen L, Schadschneider A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. Phys Rep, 2000, 329: 199–329
- 2 Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems. Rev Mod Phys, 2001, 73: 1067–1141
- 3 Nagatani T. The physics of traffic jams. Rep Prog Phys, 2002, 65: 1331–1386
- 4 Long J C, Gao Z Y, Ren H L, et al. Urban traffic congestion propagation and bottleneck identification. Sci China Ser F-Inf Sci, 2008, 51: 948–964

- 5 Rothery R W. Traffic flow theory. In: Gartner N, Messner C J, Rathi A J, eds. Transportation Research Board Special Report, Vol. 165. Washington, DC: Transportation Research Board, 1992. Chap. 4
- 6 Pavari-Fontana S L. Boltzmann-like treatments for traffic flow—critical review of basic model and an alternative proposal for dilute traffic analysis. *Transp Res*, 1975, 9: 225–235
- 7 Lehmann H. Distribution function properties and the fundamental diagram in kinetic traffic flow theory. *Phys Rev E*, 1996, 54: 6058–6064
- 8 Wagner C, Hoffmann C, Sollacher R, et al. Second-order continuum traffic flow model. *Phys Rev E*, 1996, 54: 5073–5085
- 9 Helbing D. Gas-kinetic derivation of Navier-Stokes-like traffic equations. *Phys Rev E*, 1996, 53: 2366–2381
- 10 Helbing D, Treiber M. Gas-kinetic-based traffic model explaining observed hysteretic phase transition. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 3042–3045
- 11 Dong L F, Shu Y T, Chen H M, et al. Packet delay analysis on IEEE 802.11 DCF under finite load traffic in multi-hop ad hoc networks. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2008, 51: 408–416
- 12 Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic. *J Phys I*, 1992, 2: 2221–2229
- 13 Biham O, Middleton A A, Levine D. Self-organization and a dynamic transition in traffic-flow models. *Phys Rev A*, 1992, 46: R6124–R6127
- 14 Yokoya Y. Dynamics of traffic flow with real-time traffic information. *Phys Rev E*, 2004, 69: 016121
- 15 Friesz T L, Luque J, Tobin R L, et al. Dynamic network traffic assignment considered as a continuous-time optimal-control problem. *Oper Res*, 1989, 37: 893–901
- 16 Ben-Akiva M, De Palma A, Kaysi I. Dynamic network models and driver information-systems. *Transp Res Part A*, 1991, 25: 251–266
- 17 Dong C F, Ma X, Wang B H. Weighted congestion coefficient feedback in intelligent transportation systems. *Phys Lett A*, 2010, 374: 1326–1331
- 18 Arnott R, de Palma A, Lindsey R. Does providing information to drivers reduce traffic congestion. *Transp Res Part A*, 1991, 25: 309–318
- 19 Kachroo P, Özbay K. Real time dynamic traffic routing-based on fuzzy feedback control methodology. *Transp Res Rec*, 1996, 1556: 137–146
- 20 Wahle J, Bazzan A L C, Klügl F, et al. Decision dynamics in a traffic scenario. *Phys A*, 2000, 287: 669–681
- 21 Lee K, Hui P M, Wang B H, et al. Effects of announcing global information in a two-route traffic flow model. *J Phys Soc Jpn*, 2001, 70: 3507–3510
- 22 Wang W X, Wang B H, Zheng W C, et al. Advanced information feedback in intelligent traffic systems. *Phys Rev E*, 2005, 72: 066702
- 23 Wang B H, Mao D, Hui P M. The two-way decision traffic flow model: mean field theory. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Complexity Science*, Shanghai, 2002. 204–204
- 24 Wang B H, Wang L, Xu B M, et al. The gradual accelerating traffic flow cellular automaton model in which only high speed car can be delayed. *Acta Phys Sin*, 2000, 49: 1926–1932
- 25 Fu C J, Wang B H, Ying C Y, et al. Intelligent decision-making in a two-route traffic flow model. *Acta Phys Sin*, 2006, 55: 4032–4038
- 26 Peng L J, Kang R. One-dimensional cellular automaton model of traffic flow considering drivers' features. *Acta Phys Sin*, 2009, 58: 830–835