

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.06.018

考虑预估驾驶行为的跟驰模型及其稳定性分析

周 桐^{1,2}, 郑林江², 刘卫宁²

(1.重庆工程职业技术学院 信息工程学院, 重庆 402260; 2.重庆大学 计算机学院, 重庆 400044)

摘要:在 OV 模型的基础上,进一步考虑预估驾驶行为对车流的影响,提出一个新的跟驰模型以获得预估驾驶行为与交通拥堵的关系。通过对新模型进行稳定性分析得到了系统的临界稳定条件。数值仿真结果表明:新模型能够模拟诸如时停时走、系统临界相变等实际交通现象,较 OV 模型更贴近于实际。同时,预估驾驶行为增强了交通流稳定性能,提高了车流陷入交通阻塞状态的阈值。最后以车速的平滑度和波动幅度最小为评价指标得到了新模型中预估参数的最优取值范围。

关键词:交通流;交通拥堵;跟驰模型;预估驾驶行为

中图分类号:U491.112

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)06-141-07

A new car-following model with consideration of anticipation driving behavior and its stability analysis

ZHOU Tong^{1,2}, ZHENG Linjiang², LIU Weining²

(1.School of Information Engineering, The Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 402260, P.R.China; 2.College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: Based on the OV model, a new microscopic anticipation driving car-following model was proposed to study the relationship between anticipation driving behavior and traffic congestion. The stability criterion was derived by using stability theory. The simulation results show that the new model can simulate practical traffic phenomena, such as stop-and-go, system critical phrase transition, etc., and its simulation results are more close to practical value than that of the OV model under the open boundary conditions. At the same time, the anticipation driving effect can enhance the stability performance of traffic flow, improve the threshold of density which the state of traffic flow will turn into congestion state and reduce the effect scope of congestion, finally the optimal value range of anticipation parameter in the new model is obtained under the open boundary conditions when viewing the minimum smoothness and minimum fluctuation amplitude of speed as the evaluation index.

Keywords: traffic flow; traffic congestion; car-following model; anticipation driving behavior

收稿日期:2016-07-20

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(cstc2016jcyjA0565);中国博士后面向资助项目(2015M572450);重庆市教委科学技术项目(KJ1503301)和重庆博士后特别资助项目(Xm2015056)。

Supported by the Natural Science Foundation of Chongqing Science & Technology Commission (cstc2016jcyjA0565), China Postdoctoral Science Foundation Funded Project(2015M572450), Chongqing Postdoctoral Science Foundation Project(xm2015056) and Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission(KJ1503301).

作者简介:周桐(1985-),男,副教授,重庆大学博士后,主要从事智能交通系统,车辆智能控制研究,(Tel)13658324495,(E-mail)zhoutong851217@163.com。

跟驰模型是为从微观层面上研究驾驶行为与交通拥堵的关系提供理论依据。跟驰模型经过几十年的发展,提出了多种描述形式,也获得了许多重要的研究成果。其中,1995年 Bando 等^[1]提出的 OV 模型是一个形式简单且被广泛关注的模型,研究表明 OV 模型可以模拟实际交通的许多定性特征,如时停时走,交通迟滞、交通阻塞传播等现象。国内外学者利用 OV 模型,通过考虑多前车和尾车的位置信息和相对速度对当前车运动状态的影响,提出了一系列改进微观跟驰模型^[2-5]。研究表明,考虑大范围内多车的运动状态信息有利于增强交通流的稳定性。

上述模型均能很好地提高车流的稳定性和准确地描述实际的交通现象,然而这些模型均未考虑预估驾驶行为对交通拥堵状态的影响。事实上,车辆运动状态的改变不仅依靠当前时刻车头间距信息和前后车的速度信息来调节车速,还要依据预估的前后车距离来对车速进行实时动态微调节,预估调节时间越长,小扰动抑制效果越好,车辆运行越稳定,抑制交通拥堵越明显。笔者在 OV 模型的基础上,进一步考虑预估驾驶行为对跟驰车的影响,提出了一个扩展的微观跟驰模型—预估驾驶(anticipation driving car-following, ADCF)模型。利用线性控制系统理论导出了 ADCF 模型的稳定性条件,通过设置不同的预估驾驶强度,来研究交通拥堵的影响范围大小,并在开放边界条件下对 ADCF 模型进行数值模拟,以验证其合理性。

1 跟驰模型

1961年,Newell 基于 California 模型,提出了一个新的跟驰模型。模型中假定:车辆在 $t + \tau$ 时刻的速度依赖于 t 时刻车间距,以及在延迟时间 τ 内能够调整到的最优速度 $V(\Delta x_n(t))$ 决定。其演化方程如下^[2]

$$v_j(t + \tau) = V(\Delta x_j(t)), \quad (1)$$

最优速度 $V(\Delta x_n(t))$ 为

$$V(\Delta x_n(t)) = V_0 \{1 - \exp[-(\Delta x_n - x_c)/(v_0 T_f)]\}, \quad (2)$$

式中: τ 为车辆的延迟时间; V_0 是期望速度; T_f 表示在高密度交通情况下跟驰车辆间的安全时距; x_c 是前后车安全距离。

1990年,Whitham 对该模型作了进一步研究^[3],Nagatani^[4]为了便于数值仿真,对方程(1)左边的项写成差分形式,得到了如下的差分方程

$$x_j(t + 2\tau) - x_j(t + \tau) = \tau V(\Delta x_j(t)), \quad (3)$$

式中: $x_j(t + 2\tau)$ 表示第 j 辆车在 $t + 2\tau$ 时刻的位置; $\Delta x_j(t) = x_{j+1}(t) - x_j(t)$ 表示 t 时刻第 j 辆车与第 $j + 1$ 辆车之间的距离。但由于式(3)是对车辆速度变量建立的关系式,当交通信号灯由红变绿瞬间,车辆在 t 时刻的加速度将变得无穷大,因此,该模型不适宜用来模拟交通灯由红变绿时的车流演化状况。

针对 Newell 跟驰模型的缺陷,1995年 Bando 等^[1]提出了优化速度模型

$$\frac{dv_j(t)}{dt} = a [V(\Delta x_j(t)) - v_j(t)], \quad (4)$$

式中: $a = 1/\tau$ 是驾驶员的敏感系数, τ 为调节车速至最优车速的时间, $v_j(t)$ 为在 t 时刻 j 辆车的速度, $V(\Delta x_j)$ 为车辆从 t 时刻到 $t + \tau$ 时刻内驾驶员控制车辆能够达到的最优速度,是车头距 Δx_n 的函数。最优速度 $V(\Delta x_j)$ 形式为

$$V(\Delta x_j(t)) = \frac{V_{\max}}{2} [\tan h(\Delta x_j - h_c) + \tanh(h_c)], \quad (5)$$

式中: V_{\max} 是车辆行驶的最大速度; h_c 是车辆之间的安全间距。一般地,当 $\Delta x_j \rightarrow 0$ 时, $V(\Delta x_j) \rightarrow 0$,即避免车辆碰撞;当 $\Delta x_j \rightarrow \infty$ 时, $V(\Delta x_j) = V_{\max}$,即车辆处于自由流状态,车辆间相互作用几乎没有,车辆以 V_{\max} 向前方运行。OV 模型可以克服 Newell 跟驰模型中交通灯由红变绿时车辆无限加速缺陷,同时该模型可以模拟实际交通时停时走等交通阻塞现象。随后在 OV 模型的基础上,一系列模型被相继提出^[6-12]。

上述模型均能够在一定程度上刻画驾驶行为与交通拥堵的关系,但这些模型均基于相同的建模思想,即 $t + \tau$ 时刻的速度是依据 t 时刻当前车的车头间距在延迟时间 τ 内通过调节车速达到最优的速度决定的,并假定在延迟时间 τ 内前车车速不变,然而在实际情况下,前车的车速是在不断变化的,因此在车速调节过程中前后车的距离是在 t 时刻车头间距附近波动,这样在延迟时间 τ 内不能均以 t 时刻车头间距来调节车速。而且在调节过程中还应该依据当前时刻前后车的车速预估未来时刻前后车的扰动距离,从而对当前车的车速

进行实时动态微调节,使车辆车速保持在最优速度状态。鉴于上述论述,考虑预估驾驶行为对车流演化特性的影响,提出一个新的跟驰模型—预估驾驶(anticipation driving car-following, ADCF)模型,其演化微分方程为

$$\frac{dv_j(t)}{dt} = a \{V[\Delta x_j(t) + p\Delta v_j(t)] - v_j(t)\}, \quad (6)$$

式中: p 为预测时间,单位 s; $p\Delta v_j(t)$ 表示预估车头距。改进模型的思想为第 j 辆车车速的调节不仅与 t 时刻的车间距 $\Delta x_j(t)$ 相关,同时还依赖于预估的车头距 $p\Delta v_j(t)$ 。因此,该模型可以在一定程度上用来研究由预估驾驶行为引起的交通流演化规律。当 $p=0$ 时,模型将不考虑预估驾驶效应对车流的影响,ADCF 模型简化为 OV 模型。

2 稳定性分析

研究从控制系统角度出发,研究预估驾驶行为对车流稳定性的影响。为了简单起见,将 ADCF 模型看作一个简单的交通系统,离散化后得到的运动学方程为

$$\begin{aligned} v_j(n+1) &= \alpha_j [V_j^{OP}(\Delta x_j(n) + p\Delta v_j(n)) - v_j(n)]T + v_j(n), \\ \Delta x_j(n+1) &= v_{j+1}T - v_j(n)T + \Delta x_j(n). \end{aligned} \quad (7)$$

系统(7)的稳态为

$$[v_j^*, \Delta x_j^*]^T = [v_0, \mathbf{V}^{-1}(v_0)]^T. \quad (8)$$

将式(8)在稳态附近进行线性化,则 ADCF 模型的扰动模型为

$$\begin{aligned} \delta v_j(n+1) &= \alpha_j [r_j \delta(\Delta x_j(n) + p\Delta v_j(n)) - \delta v_j(n)]T + \delta v_j(n), \\ \delta \Delta x_j(n+1) &= \delta v_{j+1}T - \delta v_j(n)T + \delta \Delta x_j(n), \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \delta v_j(n) &= v_j(n) - v_0, \delta v_j(n+1) = v_j(n+1) - v_0, \delta \Delta x_j(n) = \Delta x_j(n) - \mathbf{V}^{-1}(v_0), \\ \delta \Delta v_j(n) &= \Delta v_{j+1}(n) - \Delta v_j(n). \end{aligned}$$

r_j 为 OV 函数在 $\Delta x_j(n) - \mathbf{V}^{-1}(v_0)$ 处的斜率。扰动模型式(9)的空间表达式为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \delta v_i(n+1) \\ \delta \Delta x_j(n+1) \end{bmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 - \alpha_i T - p\alpha_i r_i T & \alpha_i r_i T \\ -T & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_i(n) \\ \delta \Delta x_j(n) \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} p\alpha_i r_i T \\ T \end{pmatrix} \delta v_{i+1}(n), \\ \delta v_i(n) &= (1 \ 0) \begin{bmatrix} \delta v_i(n) \\ \delta \Delta x_j(n) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

从 $\delta v_{i+1}(n)$ 到 $\delta v_i(n)$ 的传递函数 $G_i(z)$ 为

$$\begin{aligned} G_i(z) &= (1 \ 0) \begin{pmatrix} z - 1 + \alpha_i T + p\alpha_i r_i T & -\alpha_i r_i T \\ T & z - 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} p\alpha_i r_i T \\ T \end{pmatrix} = \\ &= \frac{p\alpha_i r_i T(z - 1) + \alpha_i r_i T^2}{P_i(z)}, \end{aligned} \quad (11)$$

其中

$$P_i(z) = z^2 + a_i z + b_i, a_i = \alpha_i T + p\alpha_i r_i T - 2, b_i = 1 - \alpha_i T - p\alpha_i r_i T + \alpha_i r_i T^2.$$

下面给出系统(7)在小扰动作用下保持稳定的一个充要条件。

引理 1 当系统(7)特征方程 $P_i(z) = 0$ 的所有根都在单位圆内且 $\max_{|z|=1} |G_i(z)| \leq 1$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 时^[5], 则系统(7)是稳定的。

定理 1 当 ADCF 模型的稳定条件满足

当

$$1 - \alpha_i T - p\alpha_i r_i T + \alpha_i r_i T^2 < 0, \quad (12)$$

则

$$\max \left\{ \frac{-\alpha_i T + \alpha_i r_i T^2}{\alpha_i r_i T}, \frac{-4 + 4\alpha_i T - \alpha_i^2 T^2 + \alpha_i^2 r_i T^3 - 2\alpha_i r_i T^2}{2\alpha_i^2 r_i T^2 + \alpha_i^2 r_i^2 T^3 - 4\alpha_i r_i T} \right\} < p < \frac{4 - 2\alpha_i T + \alpha_i r_i T^2}{2\alpha_i r_i T}, \quad (13)$$

当

$$1 - \alpha_i T - p\alpha_i r_i T + \alpha_i r_i T^2 > 0, \quad (14)$$

则

$$\max \left\{ \frac{-\alpha_i T + \alpha_i r_i T^2}{\alpha_i r_i T}, \frac{-\alpha_i^2 T_i^2 + \alpha_i^2 r_i T^3 - 2\alpha_i r_i T^2}{2\alpha_i^2 r_i T^2 + \alpha_i^2 r_i^2 T^3} \right\} < p < \frac{4 - 2\alpha_i T + \alpha_i r_i T^2}{2\alpha_i r_i T}, \quad (15)$$

则 ADCF 模型中不会出现交通拥堵现象。

3 数值模拟

为了更直观分析 ADCF 模型在车流稳定性方面的作用,这里与 OV 模型作对比实验,从开放边界条件下来验证 ADCF 模型对拥堵的抑制作用。模拟中模型参数与文献[5]一致,即

$$\eta = 25.0 \text{ m}, \zeta = 23.3 \text{ m}, v_j^{\max} = 33.6 \text{ m/s}, \alpha_j = 2.0 \text{ s}^{-1}, v_0 = 20 \text{ m/s}, \\ T_1 = 0.1 \text{ s}, \Delta x^{\min} = 7.02 \text{ m}, r_j = v_j^{\max} / \zeta \approx 1.44 \text{ s}^{-1}.$$

主要研究车流在稳态附近的复杂演化状况。假设所有车辆的参数相同,初始条件为式(8)的稳态条件,初始位置和速度设置为

$$x_i(0) = \sum_{j=i+1}^N \Delta x_j^*, \Delta x_j(0) = \Delta x_j^*, v_i(0) = v_i^*, i = 1, 2, \dots, N. \quad (16)$$

在模拟过程中,首先使头车在 100 s、120 s、140 s 和 160 s 处分别停止 3 s 来观察车流演化情况。然后在初始条件下分别对 OV 跟驰模型和 ADCF 模型进行数值模拟。

为了验证上述 2 种模型的稳定性能,首先须求出模型中预估参数 p 的取值范围,通过计算得出模型的参数 α_i, r_i 和 T 值满足定理 1 中式(12)。将这些参数代入式(13),综合计算得到反馈增益的取值范围 $0 < p < 0.402$ 。反馈增益的设计程序可以参见文献[5]。

图 1~5 分别显示了不同 p 值(即 p 为 0、0.1、0.15、0.241、0.402)下 ADCF 模型的车辆时空分布图以及对应的第 1 辆车和第 100 辆车车速演化情况。当 $p=0$ 时,ADCF 模型退化成 OV 模型。由图 1(a)可见,车流波动程度严重,由外部干扰引起的波动向上游区域传播,且交通系统恢复稳定时间较长。从图 2(a), 3(a), 4(a)和 5(a)可以看出:车流波动程度降低,系统恢复稳定运行时间短,车头间距振荡较平和,未出现车头间距晶振现象。从图 1(b)容易看出,车速起伏很大,第 100 辆车在短时间内不停地加速或减速,最终出现时走时停现象。从图 2(b), 3(b), 4(b)和 5(b)可以得知:第 100 辆车的速度比较平滑地发生变化,波动幅度较小。仿真结果表明:考虑预估驾驶效应能够提高车流的稳定性,使车流稳定有序运行。

在开放性边界条件下,理论分析与数值仿真一致表明:ADCF 模型能模拟实际交通现象,其次预估驾驶行为对车流有进一步地致稳作用,更有效地抑制拥堵,验证了改进模型的合理性。

在此基础上,从图 2(a)~5(a)中看出:车间间距振荡逐渐变的柔和,特别当 p 在(0.241, 0.402)范围内,车间间距振荡程度几乎一致,而且均比较小。而在图 2(b)~5(b)中,当 $p \geq 0.241$ 时,第 100 辆车的车速波动幅度以及车速运行的平滑度几乎一致,均已达到最好效果;当 $p < 0.241$ 时,前面 2 幅图中车速波动幅度较大和平滑度较低。因此,当 $p=0.241$ s 为临界值,为 ADCF 模型中所选的临界预估参数值。

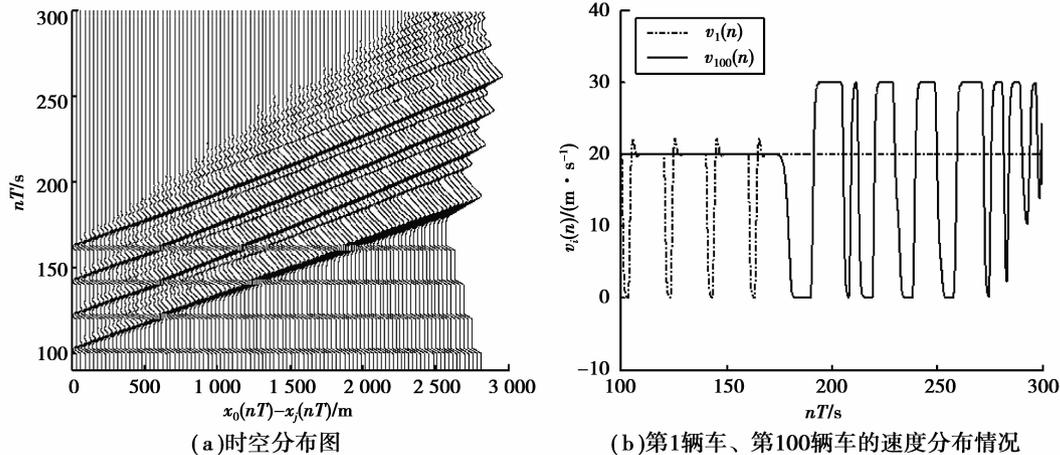


图 1 头车在 4 个时间段突然停止,OV 模型的数值仿真图

Fig.1 Numerical simulations for the CM model, the leading vehicle stops four times suddenly

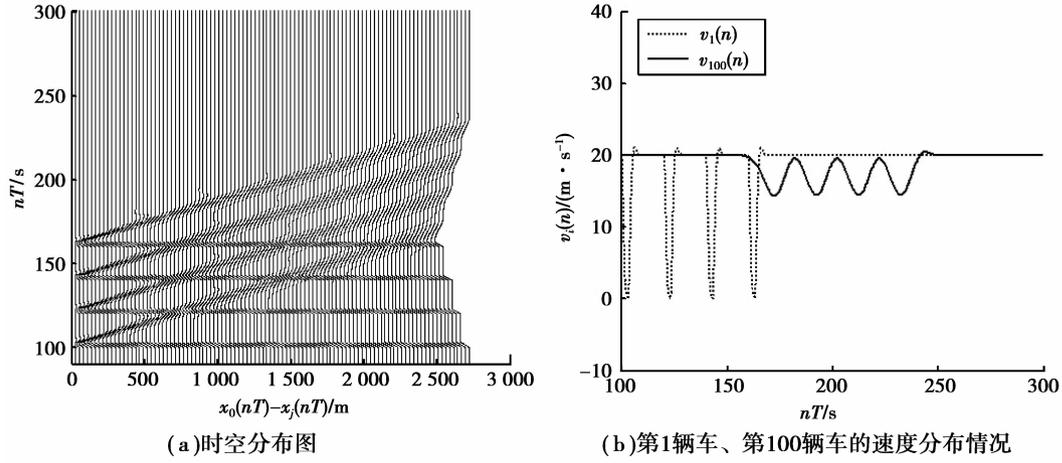


图 2 头车在 4 个时间段突然停止,ADCF 模型在 $p=0.1$ s 的数值仿真图

Fig.2 Numerical simulations for the ADCF model under $p=0.1$ s, the leading vehicle stops four times suddenly

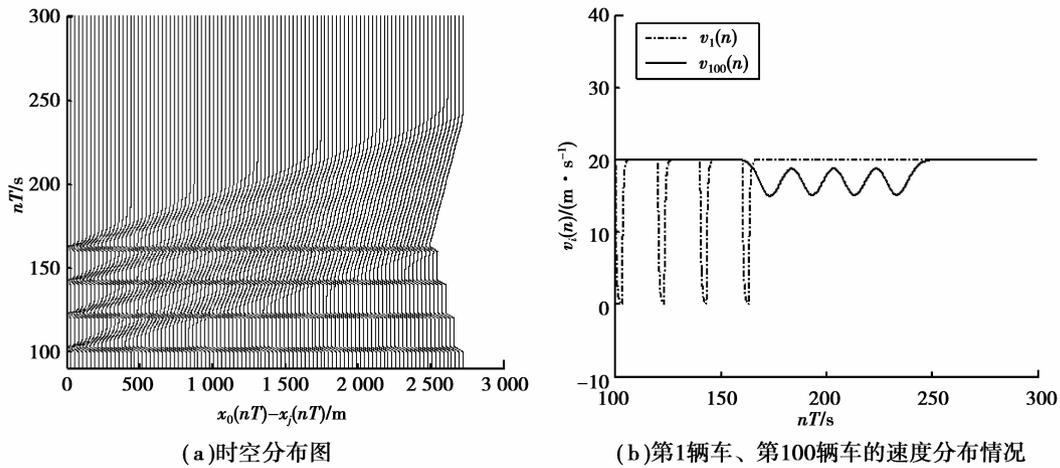


图 3 头车在 4 个时间段突然停止,ADCF 模型在 $p=0.15$ s 的数值仿真图

Fig.3 Numerical simulations for ADCF model under $p=0.15$ s, the leading vehicle stops four times suddenly

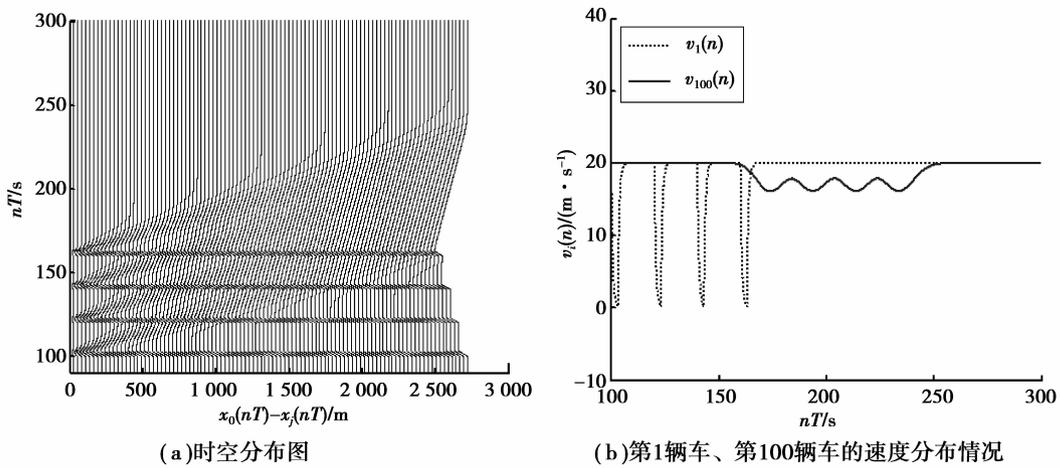


图 4 头车在 4 个时间段突然停止,ADCF 模型在 $p=0.241$ s 的数值仿真图

Fig.4 Numerical simulations for ADCF model under $p=0.241$ s, the leading vehicle stops four times suddenly

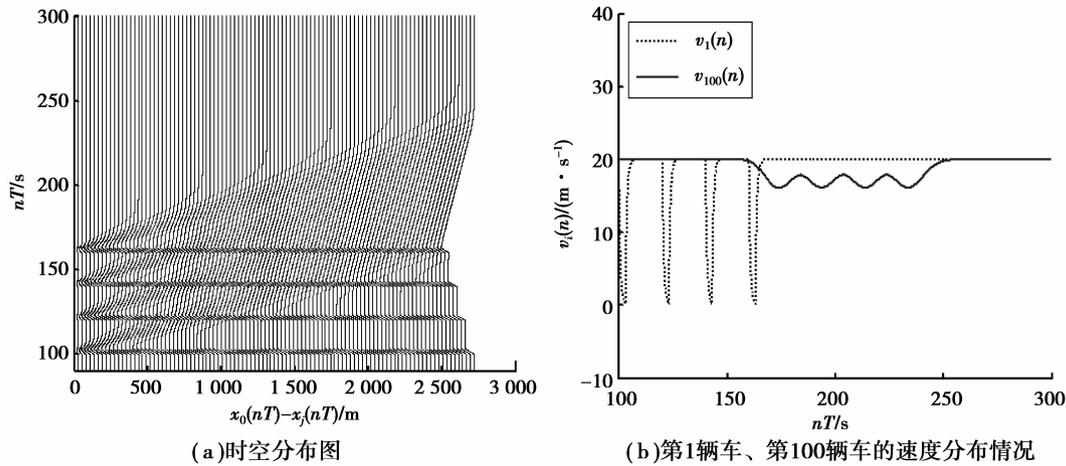


图 5 头车在 4 个时间段突然停止, ADCF 模型在 $p=0.402$ s 的数值仿真图

Fig. 5 Numerical simulations for ADCF model under $p=0.402$ s, the leading vehicle stops four times suddenly

为了验证 $p=0.241$ s 为 ADCF 模型选取的预估临界值, 这里定义 S 为第 100 辆车加速度的标准差, 表征为速度的平滑度; 定义 $(v_0 - v_{\min})$ 为第 100 辆车的最小速度与稳态速度的差值, 并以 S 和 $(v_0 - v_{\min})$ 最小为评价指标。通过图 6 所示, 可以看出: 随着 p 值的增加, S 和 $(v_0 - v_{\min})$ 不断减小, 直到 $p=0.241$ s 时, S 和 $(v_0 - v_{\min})$ 均达到最优值, 而当 $0.241 \leq p \leq 0.4$ 时, S 和 $(v_0 - v_{\min})$ 几乎没有变动。因此, 在开放边界条件下 ADCF 模型中的 p 的最优取值范围为 $0.241 \leq p \leq 0.4$, 即在该范围内, 拥堵抑制效果最好, 验证了预估参数取值的合理性。

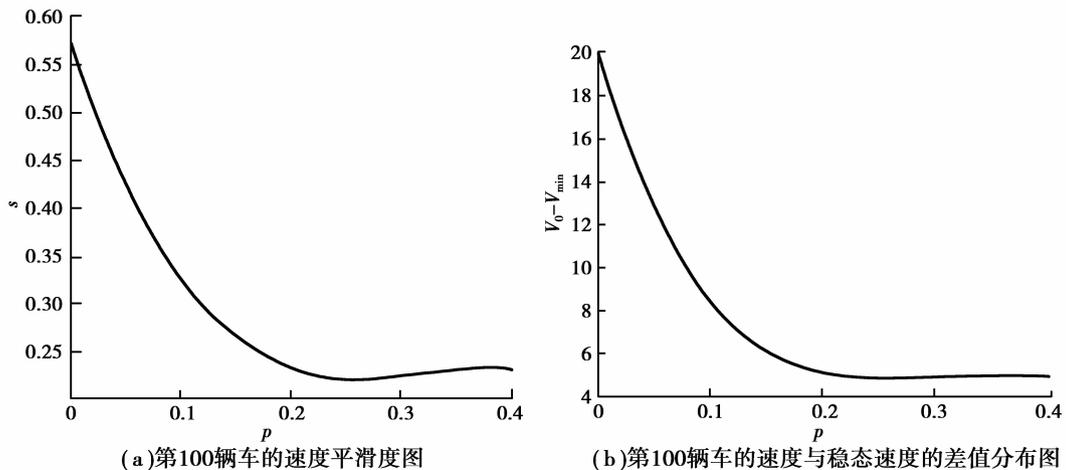


图 6 预估驾驶行为与评价指标的关系

Fig.6 The relationship between anticipation driving behavior and evaluation index

4 结 论

基于 OV 模型, 考虑了当前车的车速调节与即刻车头间距, 以及预估车头间距的依赖关系, 建立了更能准确认知预估驾驶行为与交通拥堵关系的 ADCF 模型。应用控制系统稳定性理论, 得到了系统中车辆运行稳定的临界条件。在开放边界条件下通过对 ADCF 模型的数值仿真, 验证了 ADCF 模型较 OV 模型更能准确和合理地描述一些定性的交通现象, 同时, 预估驾驶效应能增强车流的稳定性, 预估强度越大, 拥堵的影响范围越小。并在开放边界条件下得到了 ADCF 模型中预估参数的最优取值范围 $0.241 \leq p \leq 0.4$ 。

参考文献:

- [1] Bando M, Hasebe K, Nakayama A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation[J]. *Physical Review E*, 1995, 51(2):1035-1042.
- [2] Newell G F. Nonlinear effects in the dynamics of car following [J]. *Operations Research*, 1961, 9: 209-229.
- [3] Whitham G B. Exact solutions for a discrete system arising in traffic flow[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1990, 428:4.
- [4] Nagatani T, Nakanishi K, Emmerieh H. Phase transition in a difference equation model of traffic flow[J]. *Journal of Physics A-Mathematical and General*, 1998, 31:543.
- [5] Zhou T, Sun D, Li H, et al. A new coupled map car-following model considering drivers' steady desired speed [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 5:41-45.
- [6] Sun D H, Kang Y R, Yang S H. A novel car following model considering average speed of preceding vehicles group[J]. *Physica A*, 2015, 436: 103-109.
- [7] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J. Full velocity difference model for a car following theory[J]. *Physical Review E*, 2001, 64(1): 017101-1-017101-4.
- [8] Peng G H, Sun D H. Multiple car-following model of traffic flow and numerical simulation [J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(12): 5420-5430.
- [9] 王涛, 张晶. 多速度差模型的交通流特性分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2008, 10: 150-155.
Wang Tao, Zhang Jin. Property of analysis of the multiple velocity difference model [J]. *Systems Engineering-Theory&Practice*, 2008, 10: 150-155. (in chinese)
- [10] Tian J F, Jia B, Li X G, et al. A new car-following model considering velocity anticipation[J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(1):010511-1-010511-7.
- [11] Peng G H, Cai X H, Liu C Q, et al. Optimal velocity difference model for a car-following theory[J]. *Physics letters A*, 2011, 375(45): 3973-3977.
- [12] 周桐, 李雨宣, 杨智勇, 等. 考虑车辆机械惯性的跟驰模型及其数值模拟分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2015, 07: 114-118.
Zhou Tong, Li Yuxuan, Yang Zhiyong, et al. A new car following model with consideration of the vehicle's mechanical inertia effect and its analysis of numerical simulation[J]. *Journal of Zhengzhou University(Engineering Science)*, 2015, 07: 114-118. (in chinese)
- [13] 李修云, 周桐, 杨智勇, 等. 基于最紧邻前车加速度信息的跟驰模型[J]. *重庆大学学报*, 2015, 38(6):153-158.
Li Xiuyun, Zhou Tong, Yang Zhiyong, et al. Car-following model based on the information of the nearest-neighbor leading car's acceleration[J]. *Journal of Chongqing University*, 2015, 38(6):153-158. (in chinese)
- [14] Li Z P, Li W Z, Xu S Z, et al. Traffic behavior of mixed traffic flow with two kinds of different self-stabilizing control vehicles[J]. *Physica A*, 2015, 436:729-738.
- [15] Xu X H, Pang J, Monterola C. Asymmetric optimal-velocity car following model[J]. *Physica A*, 2015, 436: 565-571.

(编辑 侯湘)