考虑前后车辆综合效应的跟驰模型及其稳定性分析

唐 毅^{1,2}, 刘卫宁¹, 孙棣华³, 唐 亮³, 张建厂³

(1.重庆大学 计算机学院, 400044 重庆; 2.重庆高速公路集团有限公司, 401121 重庆; 3.重庆大学 自动化学院, 400030 重庆)

摘 要:为了进一步增强车流的稳定性,通过分析后视效应和前车优化速度差信息的综合作用,在 FVD 模型基础上,建 立新的 BL&OVD 模型.通过线性稳定性分析,得到新模型的稳定性判据.采用非线性分析方法,推导出 mKdV 方程用于描 述系统临界稳定点附近的交通拥塞演变规律.数值仿真结果表明,综合考虑后视效应和最优速度差信息能有效抑制车流 随机干扰信号在车流中传播放大,提高车流稳定性,从而舒缓交通拥堵.该模型对车流有进一步的致稳作用,有助于车辆 自动驾驶系统中驾驶策略的设计.

关键词:交通流;跟驰模型;综合效应;非线性分析

中图分类号: TP13 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2014)02-0115-06

A new car following model with considering the synergy effect of ahead-backward vehicles and its stability analysis

TANG Yi^{1,2}, LIU Weining¹, SUN Dihua³, TANG Liang³, ZHANG Jianchang³

(1. College of Computer Science, Chongqing University, 400044 Chongqing, China; 2. Chongqing Expressway Group Co., Ltd., 401121 Congqing, China; 3. College of Automation, Chongqing University, 400030 Chongqing, China)

Abstract: To enhance further the stability of traffic flow, based on the FVD (full velocity difference) model, a new car following model named BL&OVD model is proposed by incorporating the synergy effect of backward looking and optimal velocity difference information. By applying the linear stability theory, the linear stability condition of the new model is obtained and the modified Korteweg-de Vries (mKdV) equation is established with nonlinear analysis to describe the propagating behavior of traffic jam near the critical point. The simulation results show that the amplification of random disturbance signal in traffic flow can be reduced effectively with the new consideration, which means that the proposed approach can stabilize the traffic flow and suppress the traffic congestion. The new model can stabilize the traffic flow further, and help to design the vehicle driving strategy in the autopilot system.

Keywords: traffic flow; car following model; comprehensive effect; nonlinear analysis

交通堵塞是交通系统中车辆相互作用而形成 的复杂非线性现象,而交通流理论作为探讨车流 的时空演化规律的工具,在揭示交通现象拥堵机 理方面已取得了许多重要成果^[1-8].1995 年 Bando 等^[9]提出了著名的优化速度(OV)模型.该模型不 仅形式简单,且能再现实际交通中的时停时走等

收稿日期: 2013-03-05.

孙棣华(1962—),男,教授,博士生导师. 通信作者: 唐 毅,tangyi1983219@163.com. [10]对 OV 模型进行参数标定与识别,会出现不 切实际的加速度与减速问题.基于 OV 模型, Helbing 和 Tilch 认为应考虑车辆的负速度差效 应^[10],而在 OV 模型中并未考虑此因素,基于此, 他们提出了广义力 GF 模型.GF 模型虽然克服了 OV 模型中存在的问题,然而 GF 模型无法解释 当车头间距小于安全距离,前车比跟驰车辆快时, 跟驰车辆不会减速的现象.2001 年,姜锐等^[11]提 出了全速度差(FVD)模型.仿真结果表明 FVD 模 型比 OV 模型和 GF 模型更符合实测数据.探索多

许多现象,受到了广泛关注.然而,1998年,文献

基金项目:教育部博士点专项基金资助项目(20090191110022).

作者简介: 唐 毅(1983—),男,博士研究生;

刘卫宁(1962—),女,教授,博士生导师;

车交互信息对交通阻塞的抑制作用已成为交通流 理论研究的前沿.为此,文献[12-13]的 OV 扩展 模型研究了车辆位置信息在交通流稳定性增强上 的作用.文献[2,14]的扩展模型则利用多车速度 差信息来提高交通系统的稳定性.文献[15-16] 则同时考虑了两者对交通流稳定性的共同作用效 应.上述 OV 改进模型证明增强交通流稳定性可 以通过考虑多车信息来实现.

文献[17]利用 ITS 系统在保持交通流稳定性 方面作了大量研究.在 FVD 模型之上,通过获取 多前导非邻近的车辆信息,提出了基于前向观测 的最优速度差(OVD)模型;通过考虑后向跟随车 辆信息,提出了基于后向观测的 BLVD 模型^[18]. 研究结果表明两个模型从不同的角度均提高了交 通流的稳定性.但是,考虑前后车辆综合信息效用 下的交通流特性并未在 OVD 和 BLVD 模型中得 到体现.当前,借助智能交通系统,驾驶员可以同 时获得前车和跟随车信息,因此,车辆的操控必然 是在周围车辆信息综合刺激作用下实现的.鉴于 此,本文在上述研究基础上,进一步探索后视效应 和前车最优速度差信息对车流的综合作用,提出 一个新的跟驰模型,并对新模型进行线性和非线 性特性研究,并用数值仿真实验验证了理论研究 结果的正确性.

1 模型描述

1.1 FVD 模型、OVD 模型和 BLVD 模型

在 FVD 模型中,车辆运动方程为

$$\frac{\mathrm{d}v_n(t)}{\mathrm{d}t} = a \left[V_{\mathrm{F}}(\Delta x_n) - v_n \right] + k \Delta v_n. \tag{1}$$

其中: $a = 1/\tau$ 为对前车的敏感系数, τ 为总体反应 延迟时间; $\Delta x_n = x_{n+1} - x_n$ 为第n辆车在t时刻的车 头距; $\Delta v_n = v_{n+1} - v_n$ 为第n辆车在t时刻的速度 差; x_n 和 v_n 分别为第n辆车的位置和速度;k为对 当前车与头车速度差项的反应系数; V_F 为前车的 优化速度函数.

FVD 模型能够成功地模拟车辆行驶的延迟时间以及启动速度,与实测数据结果吻合.在FVD 模型基础上,进一步采用非邻近车辆的优化速度 差信息来优化车流,本文提出 OVD 模型.其车辆 运动方程为

$$\frac{\mathrm{d}v_n(t)}{\mathrm{d}t} = a \left[V_{\mathrm{F}}(\Delta x_n(t)) + r(V_{\mathrm{F}}(\Delta x_{n+2}(t)) - V_{\mathrm{F}}(\Delta x_n(t))) - v_n(t) \right] + \lambda \Delta v_n(t).$$
(2)

其中:参数r为驾驶员对次前方车最优速度差信

息的注意程度, $V_{F}(\Delta x_{n+2}(t)) - V_{F}(\Delta x_{n}(t))$ 为次 前方车的最优速度差信息.

FVD 模型和 OVD 模型证明了保持交通流处 于稳定状态可通过考虑多个邻近前车的信息来实 现.但在实际情况中,跟随车的信息一样会对保持 车流稳定具有积极作用,通过考虑后视效应,本文 提出了 BLVD 模型为

$$\frac{\mathrm{d}v_n(t)}{\mathrm{d}t} = a[pV_{\mathrm{F}}(\Delta x_n) + (1 - p)V_{\mathrm{B}}(\Delta x_{n-1}) - v_n(t)] + k\Delta v_n(t).$$
(3)

其中: $V_{\rm B}(\cdot)$ 为后向观测的最优速度; 0.5 < $p \leq 1, p$ 越大表示前方车对当前车辆的影响比跟随车大, 当p = 1 时, BLVD 模型退化为 FVD 模型.

1.2 BL&OVD 模型

基于 FVD 模型,OVD 模型和 BLVD 模型分别 考虑了向前观测的最优速度差信息和后视效应, 并未同时考虑前后车辆的综合作用会对交通流的 稳定性造成何种影响.当前,伴随交通流量的不断 增加,前后车辆之间的相互作用更加明显,尤其是 在 IT 技术快速发展的现在,通过车载智能终端可 实现车辆信息的实时交互.因此,任何车辆均可获 得前后相邻车辆的信息,用来调整自身运行状态 达到最优.本文提出改进跟驰模型为

$$\frac{Av_{n}(t)}{dt} = a[pV_{F}(\Delta x_{n}) + (1 - p)V_{B}(\Delta x_{n-1}) - v_{n}(t)] + k\Delta v_{n}(t) + r(V_{F}(\Delta x_{n+2}) - V_{F}(\Delta x_{n})).$$
(4)

其中,当前车加速度是由前向观测的车头距 $\Delta x_n, \Delta x_{n+2},$ 当前车速度 $v_n,$ 速度差 $\Delta v_n,$ 最优速度 $V_F,$ 后视观测信息 V_B 以及最优速度差 $V_F(\Delta x_{n+2})$ - $V_F(\Delta x_n)$ 信息共同影响决定的. 通过考虑后视 效应和最优速度差信息的综合作用,将该模型称 为后向观测最优速度差跟驰模型(BL&OVD).

其中选用的最优速度函数[19]为

$$V_{\rm F}(\Delta x_n) = \alpha' [\tanh(\Delta x_n - \beta) + \tanh\beta]; (5)$$
$$V_{\rm B}(\Delta x_{n-1}) = -\alpha'' [\tanh(\Delta x_{n-1} - \beta) + \tanh\beta].$$
(6)

其中: $\alpha' = 1, \alpha'' = 1, \beta = 4.$

当 *p* = 1,*r* = 0 时,则上述模型变型为 FVD 模型;当 *p* = 1 时,BL&OVD 模型变型为 OVD 模型; 当 *r* = 0 时,BL&OVD 模型变型为 BLVD 模型.因此,FVD 模型、OVD 模型、BLVD 模型都 是 BL&OVD 模型的特例.

2 线性稳定性条件推导

假设当前交通流状体为稳定状态,车流中车

与车的距离定义为b = L/N,其最优化速度定义为 $pV_{F}(b) + (1 - p)V_{B}(b)$.此时,稳定状态车流的车 辆位置解为

$$x_{n}^{(0)}(t) = bn + (pV_{\rm F}(b) + (1-p)V_{\rm B}(b))t.$$
(7)

施加小扰动 $y_n(t) = e^{ikn+zt}$ 添加到的式(7)中, 可以得出

$$x_n(t) = x_n^{(0)}(t) + y_n(t).$$
 (8)
将式(8)代人式(4),并线性化得到

$$\frac{d^{2}y_{n}(t)}{dt^{2}} = a \left[p V_{F}'(b) \Delta y_{n} + (1-p) V_{B}'(b) \Delta y_{n-1} - \frac{dy_{n}(t)}{dt} \right] + k \frac{d\Delta y_{n}(t)}{dt} + r V_{F}'(b) (\Delta y_{n+2} - \Delta y_{n}).$$
(9)

式中: $V_{\mathrm{F}}'(b) = \mathrm{d}V(\Delta x_n)/\mathrm{d}\Delta x_n \Big|_{\Delta x_n = b}, V_{\mathrm{B}}'(b) =$

 $dV_{B}(\Delta x_{n-1})/d\Delta x_{n-1} \Big|_{\Delta x_{n-1}=b}$,将式(9)中的 y_{n} 按傅 里叶级数展开,得到

$$z^{2} = a \left[pV_{F}'(b) \left(e^{ik} - 1 \right) + (1 - p)V_{B}'(b) \left(1 - e^{-ik} \right) - z \right] + \lambda z \left(\left(e^{ik} - 1 \right) \right) + rV_{F}'(b) \left(e^{3ki} - e^{2ki} - e^{ki} + 1 \right).$$
(10)

将参数z展开为 $z = z_1(ik) + z_2(ik)^2 + \cdots$ 代入 式(10)得

$$z_{1} = pV_{\rm F}'(b) + (1-p)V_{\rm B}'(b), \quad (11)$$

 $z_{2} = \frac{1}{2} [pV_{F}'(b) - (1-p)V_{B}'(b)] - \tau z_{1}^{2} + \lambda z_{1} + 2r\tau V_{F}'(b).$ (12)

如果 z₂ < 0,将会造成初始状态均匀的车流 在小扰动下变得不稳定,反之车流会演化为稳定 均衡状态.因此, BL&OVD 模型的中性稳定条 件为

$$\tau = \frac{pV_{\rm F}'(b) - (1-p)V_{\rm B}'(b) + 2\lambda[pV_{\rm F}'(b) + (1-p)V_{\rm B}'(b)]}{2[pV_{\rm F}'(b) + (1-p)V_{\rm B}'(b)]^2 - 4rV_{\rm F}'(b)}.$$
(13)

对于长波模式的小扰动,BL&OVD 模型使得 车流保持稳定的条件为

$$\tau < \frac{pV_{\rm F}'(b) - (1-p)V_{\rm B}'(b) + 2\lambda[pV_{\rm F}'(b) + (1-p)V_{\rm B}'(b)]}{2[pV_{\rm F}'(b) + (1-p)V_{\rm B}'(b)]^2 - 4rV_{\rm F}'(b)}.$$
(14)

当 *p* = 1 时,表征没有考虑后视效应作用,得 到与 OVD 模型一致的稳定性条件为

$$\tau < \frac{1+2\lambda}{2V_{\rm F}'(b) - 4r}.$$
 (15)

当 r = 0 时,表征没有考虑最优速度差作用, 得到与 BLVD 模型一致的稳定性条件为

$$\tau < \frac{pV_{\rm F}'(b) - (1-p)V_{\rm B}'(b) + 2\lambda[pV_{\rm F}'(b) + (1-p)V_{\rm B}'(b)]}{2[pV_{\rm F}'(b) + (1-p)V_{\rm B}'(b)]^2}.$$
(16)

当 *p* = 1,*r* = 0 时,得到与 FVD 模型一致的稳 定性条件,此处表征最优速度差和后视效应作用 均未考虑

$$\tau < \frac{1+2\lambda}{2V_{\rm F}'(b)}.\tag{17}$$

在参数($\Delta x, a$)中,图1清晰地给出了 λ = 0.3时,FVD模型(p = 1,r = 0)、BLVD模型(p = 0.9,r = 0)和BL&OVD模型的临界稳定曲线,并 用实线表示.图1中的虚线表征mKdV方程描述的 共存曲线.从图1可见,将($\Delta x, a$)参数空间分为 稳定、亚稳定和不稳定3个区域.在稳定区域,车 头间距波动幅度虽然受到随机干扰,但随着时间 推移,其幅度逐渐减弱并最后回到稳定的初始车 流状态.此外,在亚稳定和不稳定区域,会造成交 通流时走时停的情况,这是由于小干绕在车流中 传播放大,形成了交通拥堵.

从图 1 中稳定区域大小可知, BLVD (p = 0.9, r = 0)模型的稳定区域大于 FVD 模型 (p = 1, r = 0),这表明考虑后视效应对提升交通流的稳定性有正向作用.同时, BL&OVD 模型 (p = 0.9, r = 0.1; p = 0.9, r = 0.2)的稳定区域大于FVD 和 BLVD 模型,这表明综合考虑后视效应和最优速度差信息作用,对交通流具有更为显著的稳定效果.这说明本文提出的模型优化是有价值的.





3 非线性分析及 mKdV 方程推导

当稳定车流遇见一个随机干扰时,在临界点 附近交通流状态的变化情况会以密度波形式向上 游传递.本节为了分析非邻近双前车的最优速度 差信息和后视效应综合信息下的交通流变化特 性,利用约化摄动方法分析 BL&OVD 模型在临界 点(*a*_e,*h*_e)附近的缓变行为.因此,将式(4)改写 为车头距的形式为

$$\frac{d^{2}(\Delta x_{n}(t))}{dt^{2}} = a \left[p(V_{F}(\Delta x_{n+1}) - V_{F}(\Delta x_{n})) + (1 - p)(V_{B}(\Delta x_{n}) - V_{B}(\Delta x_{n-1})) \right] - a \frac{d\Delta x_{n}(t)}{dt} + \lambda a \left(\frac{d\Delta x_{n+1}(t)}{dt} - \frac{d\Delta x_{n}(t)}{dt} \right) + r(V_{F}(\Delta x_{n+3}) - V_{F}(\Delta x_{n+2}) - V_{F}(\Delta x_{n+1}) + V_{F}(\Delta x_{n})).$$
(18)
$$\exists | \lambda \text{tr} | \text{tr} | \sum \varphi | \text{tr} | \nabla \varphi | \text{tr} | \sum \chi | X = \varepsilon (j + bt), T = \varepsilon^{3} t, 0 < \varepsilon \leq 1.$$
(19)
$$\exists \text{tr} : b \text{ b} \text{tr} | \varepsilon | \text{tr} h_{c} + \varepsilon R(X, T).$$
(20)

将式(18)利用 Taylor 展开到 ε^5 项,得

 $\mathrm{d}^{3}V(\Delta x)/\mathrm{d}\Delta x^{3}\mid_{\Delta x=h_{c}}.$

在临界点 $(a_{\epsilon},h_{\epsilon})$ 周围,取 $b = pV_{F}' + (1 - p)V_{B}', \tau = (1 + \varepsilon^{2})\tau_{\epsilon}$,则能消去式(21)中 ϵ 的二 阶项和三阶项,由此,式(21)可简化为

 $\partial_T R - g_1 \partial_X^3 R + g_2 \partial_X R^3 + \varepsilon \left[g_3 \partial_X^2 R + g_4 \partial_X^4 R + g_5 \partial_X^2 R^3 \right] = 0$ (22)

$$g_{1} = \frac{1}{6} \left[pV_{\rm F}' + (1-p)V_{\rm B}' \right] + \frac{1}{2}\lambda b + 3r\tau_{c}V_{\rm F}',$$

$$g_2 = -\frac{1}{6} \left[p V_{\rm F}^{\prime\prime\prime} + (1-p) V_{\rm B}^{\prime\prime\prime} \right], \qquad (24)$$

$$g_{3} = b^{2} \tau_{c} - 2r \tau_{c} V_{F}', \qquad (25)$$

$$g_{4} = \frac{4(2b\tau_{c} - \lambda)[pV_{F}' + (1 - p)V_{B}' + 18\tau_{c}V' + 3\lambda b]}{24} - \frac{[pV_{F}' - (1 - p)V_{B}' + 64r\tau_{c}V_{F}' + 4\lambda b]}{[pV_{F}' - (1 - p)V_{B}' + 64r\tau_{c}V_{F}' + 4\lambda b]}$$

$$\frac{-(1-p)v_{\rm B} + 64r\tau_c v_{\rm F} + 4\lambda b \rfloor}{24},$$
(26)

$$g_{5} = \{ (4b\tau_{c} - 2\lambda) [pV_{F}''' + (1 - p)V_{B}'''] - [pV_{F}''' - (1 - p)V_{B}'''] - 4r\tau_{c}V_{F}'''\}/12.$$
(27)

$$\forall \vec{x}(22) (f \mu T h) \notin \phi, f = 0$$

$$T' = g_1 T, R = \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} R'.$$

得到含有校正项 $O(\varepsilon)$ 的 mKdV 方程为

$$\partial_T R' - \partial_X^2 R' + \partial_X R'^3 + \varepsilon M \lfloor R' \rfloor = 0.$$
(28)
$$M[R'] = \sqrt{\frac{1}{g_1}} \left[g_3 \partial_X^2 R' + \frac{g_1 g_5}{g_2} \partial_X^2 R'^3 + g_4 \partial_X^4 R' \right].$$
(29)

去除 $O(\varepsilon)$,式(28)变成 mKdV 方程,进而求 得扭结波与反扭结波的解为

$$R'_{0}(X,T') = \sqrt{c} \tanh \sqrt{\frac{c}{2}} (X - cT'). \quad (30)$$

为得到密度板的传播速度 c, R'₀(X, T') 必须 满足可解性条件

$$(R'_{0}, M[R'_{0}]) = \int_{-\infty}^{+\infty} dX R'_{0}(X, T') M[R'_{0}(X, T')] = 0.$$
(31)

根据文献[20]提供的方法,可以计算

 $c = 5g_2g_3/(2g_2g_4 - 3g_1g_5).$ (32)

因此, 车头间距的密度波(V' = 1, V" = -2) 解为

$$\Delta x_n(t) = \sqrt{\frac{g_1 c}{g_2} \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1\right)} \tanh \sqrt{\frac{c}{2} \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1\right)} \left[j + \left(1 - cg_1 \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1\right)\right)t\right] + h_c.$$
(33)

从而得出其密度波解的振幅 A 为

$$A = \sqrt{\frac{g_1 c}{g_2} \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1\right)}.$$
 (34)

因此,通过 mKdV 方程进行描述,可知交通流 状态临界阻塞相变行为会在临界点 (a_e, h_e) 附近 发生,利用 $\Delta x(t) = h_e + A$ 和 $\Delta x(t) = h_e - A$ 表示 阻塞相和自由流相下的共存曲线,如图 1 虚线所 示. 其中具体包含高车辆密度下的阻塞相和低车 辆密度下的自由流相.

4 数值仿真

为直观分析后视效应与最优速度差信息对车 流稳定性的综合作用,现进行数字仿真验证 BL&OVD 模型的合理性.设周期边界条件 L =400 m,车辆数 N = 100.车辆的初始条件为

 $x_n(0) = (n-1)L/N(n=2,3,\dots,N).$ (35)

 $v_n(0) = V(L/N) (n = 1, 2, \dots, N).$ (36)

对头车施加小扰动 $x_1(0) = L/N + 1$, 研究车 流的演化情况.

图 2 为当 λ = 0.3 时, FVD 和 BLVD (p = 0.9)模型在不同时刻时的所有车辆速度分布,设 r = 0即不考虑最优速度差信息,得到 BLVD (p = 0.9)与 FVD 模型在 $a = 0.85 \text{ s}^{-1}$, $\lambda = 0.3$ 时所有 车辆速度分布数字仿真结果.由图 2 可知在 FVD 模型中,稳定车流最终演变成交通阻塞,是由小扰 动随着时间不断扩大引起的,如图 2(a)所示.其 车速在 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间持续波动,如图 2(b)所示. 但是,由于考虑了后视效应,BLVD 模型在相同条 件下的车辆速度为 $v_0 = 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随时间几乎没 有变化,其速度波动幅度也小于 FVD 模型,这说明 考虑后视效应对交通流的稳定性具有增强作用.

另外,为了证明最优速度差信息在车流稳定性 方面的积极作用,设p = 1即不考滤后视效应,得 到 FVD 模型 (r = 0)和 OVD 模型 (r = 0.1, 0.2) 所有车辆速度分布数字仿真结果.图 3 为 OVD 模 型由于考虑了最优速度差信息,相比 FVD 模型中 车辆速度幅度平稳许多,这充分说明最优速度差信 息对提高车流稳定性具有相同的正向作用.



图 2 λ=0.3 时, FVD 和 BLVD (p=0.9) 模型在不同时 刻时的所有车辆速度分布

图 2、3 仿真结果表明,分别考虑后视效应和 最优速度差信息均能有效提升车流运行过程中的 抗干扰能力.在图 4 中,取 $a = 0.85 \text{ s}^{-1}$,曲线表示 车头间距-速度运行轨迹,即迟滞环.FVD、BLVD 和 BL&OVD 模型的迟滞环如图 4 所示,其结果进 一步证明了后视效应与最优速度差信息的综合作 用,对交通流具有更为出色的稳定作用.由图可 知,FVD 模型 ($\lambda = 0.2, p = 1, r = 0$)的迟滞环出现 不切实际的负速度现象,见图 4 中点 *G*. BLVD 模型 ($\lambda = 0.2, p = 0.9, r = 0$)通过考虑后视效应,未 出现负速度现象,而 BL&OVD 模型 ($\lambda = 0.2, p = 0.9, r = 0.1$)则可利用 *p* 值的变化来改变其迟滞 环的大小,进而调整车速波动振幅.





在图 4 中,车辆运动越稳定,其模型的迟滞环 就越小.与 BLVD 模型比较,BL&OVD 模型综合了 考虑后视效应和最优速度差信息,以此来降低车 速波动幅度,使其迟滞环演变成一点 (p = 0.9, $\lambda = 0.2, r = 0.1$ 所指向的点),迟滞环消失,说明 此时所有车辆保持平稳速度行驶,交通流状态趋 于稳定.综上所述,BL&OVD 模型仿真结果与理论 研究结果一致.



图 4 在 λ = 0.2 时,不同 p 值、r 值下, FVD、BLVD, BL&OVD 模型的迟滞环

5 结 论

1)结合现有跟驰模型的优缺点,提出了 一种新的 BL&OVD 跟驰模型,可有效抑制交通阻 塞.通过线性稳定性分析,得到新模型的稳定性 判据.

2)采用非线性分析方法,推导出 mKdV 方程 用于描述系统临界稳定点附近的交通拥塞 演变规律.在周期边界条件下,运用数值仿真验证 了理论研究结果的正确性.充分证明了通过综合 考虑后视效应和最优速度差信息,可使得车流达 到最佳协同行驶,有效减少系统内部负作用,最大 程度使得车流运行行为趋于一致,提高了车流稳 定性.

3)研究结果在理论上揭示了前后车信息综 合利用时的交通阻塞传播和消散规律,可对车辆 自动驾驶系统中驾驶策略的设计进行指导. 下一步需利用实测数据对模型参数进行标定与识 别,以提高模型定量刻画实际交通运行规律的 能力.

参考文献

- [1] 崔建勋,安实,崔娜.基于元胞传输模型的区域疏散
 动态交通分配[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42
 (1):123-127.
- [2] 马国胜, 马万经. 两相位交叉口左转交通流冲突延误 改进模型[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012,44(10): 75-78.
- [3] GE H X, DAI S Q, XUE Y L, et al. Stabilization analysis and modified Korteweg-de Vries equation in a cooperative driving system [J]. Phys Rev E, 2005, 71: 66119.
- [4] LI Zhipeng, LIU Yuncai, LIU Fuqiang. A dynamical model with next-nearest-neighbor interaction in relative velocity [J]. International Journal of Modern Physics C, 2007, 18(5):819-832.
- [5] LEI Yu, SHI Zhonghe. Nonlinear analysis of an extended traffic flow model in ITS environment [J]. Chaos, Solutions and Fractals, 2008, 36:550-558.
- [6] GE H X, CHENG R J, LI Z P. Two velocity difference model for a car following theory [J]. Physica A, 2008, 360:1-7.

- [7] XIE D F, GAO Z Y, ZHAO X M. Stabilization of traffic flow based on the multiple information of preceding cars
 [J]. Communications in Computational Physics, 2008, 3:899-912.
- [8] GE H X, HAN X L. Density viscous continuum traffic flow model [J]. Physica A,2006, 371: 667-673.
- [9] BANDO M, HASEBE K, NAKAYAMA A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation [J]. Phys Rev E, 1995, 51(2):1035-1042.
- [10] HELBING D, TILCH B. Generalized force model of traffic dynamics [J]. Phys Rev E, 1998, 58(1):133-138.
- [11] JIANG Rui, WU Qingsong, ZHU Zuojin. Full velocity difference model for a car-following theory [J]. Phys Rev E,2001, 64:17010.
- [12] HASEBE K, NAKAYAMA A, SUGIYAMA Y. Dynamical model of a cooperative driving system for freeway traffic [J]. Phys Rev E,2003, 68(2):26102.
- [13] WAGNER C. Asymptotic solution for a multianticipative car-following model [J]. Physica A, 1998, 260: 218-224.
- [14] 王涛,高自友,赵小梅. 多速度差模型及稳定性分析 [J]. 物理学报,2006,55(2):634-640.
- [15] LI Yongfu, SUN Dihua, LIU Weining, et al. Modeling and simulation for microscopic traffic flow based on multiple headway, velocity and acceleration difference
 [J]. Nonlinear Dynamics, 2011, 66(1/2):15-28.
- [16] PENG Guanghan, SUN Dihua. A dynamical model of car-following with the consideration of the multiple information of preceding cars [J]. Physics Letters A, 2010, 374: 1694-1698.
- [17]孙棣华,张建厂,廖孝勇,等.非邻近车辆最优速度 差模型[J].交通运输工程学报,2011,11(6):114-118.
- [18]孙棣华,张建厂,赵敏,等.考虑后视效应和速度差信 息的跟驰模型[J].四川大学学报:自然科学版, 2012,49(1):115-120.
- [19] GE H X, ZHU H B, DAI S Q. Effect of looking backward on traffic flow in a cooperative driving car following model
 [J]. Eur Phys J B,2006, 54:503-507.
- [20] GE H X, CHENG R J, DAI S Q. KdV and kink-antikink solitons in car-following models [J]. Physica A,2005, 357: 466-476.

(编辑 魏希柱)