

文章编号:1672-9331(2021)03-0062-07

车联网环境下考虑侧向间距的跟驰模型

张志勇^{1,2}, 刘 振¹, 蒋 理¹

(1. 长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 重庆理工大学 汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室, 重庆 400054)

摘 要: 为了更好地刻画车辆的跟驰行为, 改善交通流的稳定性, 在车联网环境下, 根据侧向间距确定车辆受前车运动信息的影响程度, 提出了一个改进的跟驰模型。首先, 利用微小扰动法得到了模型的临界稳定条件, 将改进模型的稳定区域与最优速度模型、全速度差模型的稳定区域进行了对比。其次, 分析了在不同侧向间距和速度差敏感系数下模型稳定区域的变化情况。最后, 在周期性边界条件下, 考察了模型所描述的交通流在受到初始扰动后的演化过程, 得到了不同侧向间距和速度差敏感系数下交通流的仿真结果。理论分析和仿真结果均表明: 考虑侧向间距和前车运动信息能有效增强交通流的稳定性; 改进的跟驰模型能有效地改善交通流的稳定性, 并能在一定程度上缓解交通拥堵, 增大道路容量, 提高通行效率。

关键词: 交通流; 跟驰模型; 车联网环境; 侧向间距; 微小扰动法

中图分类号: U491.2⁺5

文献标志码: A

A car-following model considering lateral gap in vehicle networking environment

ZHANG Zhi-yong^{1,2}, LIU Zhen¹, JIANG Li¹

(1. School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology,

Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Advanced Manufacture Technology for Automobile

Parts of Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: In order to better depict the car-following behavior and improve the stability of traffic flow, an improved car-following model was proposed by using the lateral gap to determine the influence degree by the motion information of the front vehicles in the vehicle networking environment. Firstly, the critical stability conditions of the model were obtained by using the small perturbation method, and the stable region of the model was compared with that of the optimal velocity model and the full velocity difference model. Secondly, the changes of the stability region of the model under different lateral gaps and sensitivity coefficients of velocity difference were analyzed. Finally, under periodic boundary conditions, the evolution process of traffic flow described by the model after initial disturbance was investigated, and the simulation results of traffic flow under different lateral gaps and sensitivity coefficients of velocity difference were obtained. Both theoretical analysis and simulation results show that the traffic flow stability can be effectively enhanced by consid-

收稿日期: 2021-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675057); 重庆理工大学汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室开放课题基金资助项目(2020KLMT03)

通讯作者: 张志勇(1976—), 男, 副教授, 主要从事智能汽车和电动汽车技术方面的研究。E-mail: zzy04@163.com

ering the lateral gap and the motion information of the front vehicles. The improved car-following model can effectively enhance the stability of traffic flow, alleviate traffic congestion to a certain extent, and improve road capacity and traffic efficiency.

Key words: traffic flow; car-following model; vehicle networking environment; lateral gap; small perturbation method

近年来,随着城市化进程的加快,城市交通拥堵的现象日趋严重,极大地影响了人们的出行效率。为了更好地进行交通管理,缓解交通拥堵,需要对形成这一交通现象的内在机理进行科学的研究^[1]。为此,国内外学者提出了不同种类的交通流模型,研究交通流拥堵形成的原因^[2]。其中,跟驰模型作为交通流研究中的主要模型,建立了微观驾驶行为和宏观交通流之间的联系。跟驰模型通过刻画前后两车之间的相互作用关系来描述车辆的跟驰行为,揭示交通流的演化过程^[3],这有助于认识交通拥堵的形成原因,并能起到指导交通规划和管理、改善交通运行环境的作用。此外,由于车联网技术具有缓解交通拥堵、提升交通运行效率的特点,在车联网环境下对车辆的跟驰行为进行建模已成为学者们研究的热点。

跟驰理论认为,后车会遵循某种规则对前车运动状态的变化做出反应,并通过加速或减速来调整自身的运动状态。这里的规则一般是指每辆车针对不同的车头间距有一个对应的最优速度。基于此,BANDO等^[4]给出了车头间距和最优速度之间的函数关系,提出了最优速度模型(optimal velocity, OV)。HELBING等^[5]在OV模型的基础上加入了前后两车负的速度差,确保在后车的速度大于前车时车辆能产生较大的减速度以避免碰撞。但实际上,当后车车速小于前车时,后车同样会对正的速度差做出响应。因此,JIANG等^[6]在完全考虑前后车车速大小关系的基础上,提出了全速度差(full velocity difference, FVD)模型。随着车联网技术的应用,车辆可以通过车间通信获得周围车辆的运动信息,如速度、加速度和车头间距等^[7-8]。据此,GE等^[9]提出了考虑前车速度差的双速度差(two-velocity difference, TVD)模型;纪艺等^[10]、安树科等^[11]提出了考虑多前车信息的跟驰模型。但是上述模型并未完整地考虑前车运动信息对车辆跟驰行为的影响,且表征前车运动信息对车辆跟驰行为影响程度的权重系数都

是按照经验进行选取的,缺乏相关的理论支撑。

在跟驰理论中,假定所有车辆都行驶在车道中心线上,且只受前方一辆车的影响^[12]。但在实际的交通环境中,当车道线模糊或车道结构不清晰时,都有可能车辆偏离车道中心线行驶。因此,JIN等^[13]、LI等^[14]分别提出了非车道环境下考虑单边和双边侧向间距的跟驰模型。同样地,在车联网环境下,车辆也会偏离车道中心线,产生侧向间距。此时,驾驶员视野中将出现两辆前车,后车开始关注前车的运动状态,并通过车间通信获得准确的车间间距和前车的运动信息。当侧向间距变化时,车辆受前车运动信息的影响程度也会随之改变。因此,本研究用车辆的侧向间距参数定性地表征车辆受前车运动信息的影响程度,用侧向间距与车道宽的比值定量地确定车辆受前车运动信息的影响程度。

本研究在车联网环境下,利用车间通信获取车辆的侧向间距以及前车最优速度和速度差信息,并由车辆的侧向间距与车道宽的比值确定前车运动信息对车辆跟驰行为的影响程度,提出了一个改进的跟驰模型,根据微小扰动法得到了模型的临界稳定条件,最后在周期性边界条件下对模型的稳定性进行了仿真验证。

1 改进的跟驰模型

BANDO等^[4]认为每辆车都有一个适应于前后车跟车距离的最优速度,并提出了OV模型,其表达式为:

$$a_n(t) = \kappa (V(\Delta x_n(t)) - v_n(t)) \quad (1)$$

式中: $x_n(t)$, $v_n(t)$, $a_n(t)$ 分别为车辆 n 在 t 时刻的位置、速度和加速度; $\Delta x_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t)$ 为 t 时刻 n 车与 $n+1$ 车的车头间距; κ 为敏感系数,且 $\kappa = 1/\tau$, τ 为驾驶员反应时间; $V(\Delta x_n(t))$ 为最优速度函数。

HELBING等^[5]在OV模型的基础上加入了

速度差(只考虑后车车速大于前车的情形),提出了广义力模型(general force, GF):

$$a_n(t) = \kappa(V(\Delta x_n(t)) - v_n(t)) + \lambda H(-\Delta v_n(t)) \Delta v_n(t) \quad (2)$$

$$H(-\Delta v_n(t)) = \begin{cases} 0, & (-\Delta v_n(t)) < 0 \\ 1, & (-\Delta v_n(t)) \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(2)~(3)中: $\Delta v_n(t) = v_{n+1}(t) - v_n(t)$ 为 t 时刻 $n+1$ 车与 n 车的速度差; λ 为速度差的敏感系数; $H(x)$ 为 Heaviside 函数,即单位阶跃函数。当后车车速小于前车时,Heaviside 函数的值为 0,此时可忽略速度差;当后车车速大于前车时,式(2)中的速度差为负,此时 GF 模型的减速度比 OV 模型的更大,因而后车能及时减速,避免碰撞。

但在实际的交通环境中,还存在后车车速小于前车的情形。此时,两车之间的间距逐渐增大,这将刺激后车驾驶员加速行驶。JIANG 等^[6]指出,正是由于 GF 模型没有考虑前后车正速度差的影响,其在反映车辆运动延迟和堵塞密度下的运动波速等方面表现较差。为此,JIANG 等^[6]在完全考虑前后车车速大小关系的基础上,提出了 FVD 模型:

$$a_n(t) = \kappa(V(\Delta x_n(t)) - v_n(t)) + \lambda \Delta v_n(t) \quad (4)$$

FVD 模型拥有较优的稳定性和动态性能,能够在微观上合理地刻画前车对相邻后车的刺激作用以及后车对前车的跟驰行为,并能准确地描述交通流的整体行为特性。但受限于技术水平, FVD 模型没有考虑除前车外其他车辆的运动信息,也不能准确地反映车联网环境下车辆的跟驰行为。在车联网环境下,车辆驾驶员可以通过车间通信实时地获得周围车辆的关键运动信息并及时调整自身的行驶状态,这对提升车辆对前车运动状态变化的响应速度,增加交通流量、缓解交通拥堵具有重要意义。GE 等^[9]利用前车的速度差信息,提出了 TVD 模型:

$$a_n(t) = \kappa(V(\Delta x_n(t)) - v_n(t)) + \lambda G(\Delta v_n(t), \Delta v_{n+1}(t)) \quad (5)$$

$$G(\Delta v_n(t), \Delta v_{n+1}(t)) = p \Delta v_n(t) + (1-p) \Delta v_{n+1}(t) \quad (6)$$

式中: $\Delta v_{n+1}(t) = v_{n+2}(t) - v_{n+1}(t)$ 为 t 时刻 $n+1$ 车与 $n+2$ 车的速度差; p 为权重系数,且 $0 \leq p \leq 1$, p 越大,说明车辆受前车速度的影响越小。

仿真结果表明,TVD 模型能够消除 FVD 模型中出现的过大的减速度。但 TVD 模型仅说明了前车速度差对车辆的影响随间距的增大而逐渐减小,并没有明确给出权重系数 p 的确定方法。

综上所述,在车联网环境下,当车辆偏离车道中心线时,可以利用侧向间距与车道宽的比值定性地表征车辆受前车运动信息的影响程度,即权重系数可由车辆的侧向间距确定。

此外,除了前车的速度差,前车的最优速度对后车的影响也不可忽略。因为前车的最优速度直接影响着前车的运动状态。若能够通过车间通信及时获得前车的最优速度,则后车可以更快地调整行驶速度以适应前车运动状态的变化。

因此,本研究提出了一个车联网环境下考虑侧向间距的跟驰模型(lateral gap under vehicle networking car-following, LG-VNCF),该模型的建模环境如图 1 所示。

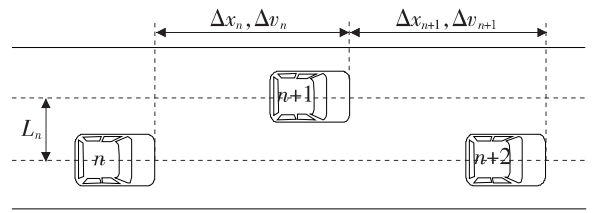


图 1 侧向间距交通流场景

Fig. 1 Traffic flow scenario with lateral gaps

$$a_n(t) = \kappa[(1-p_n)V(\Delta x_n(t)) + p_n V(\Delta x_{n+1}(t)) - v_n(t)] + \lambda G(\Delta v_n(t), \Delta v_{n+1}(t)) \quad (7)$$

$$G(\Delta v_n(t), \Delta v_{n+1}(t)) = (1-p_n) \Delta v_n(t) + p_n \Delta v_{n+1}(t) \quad (8)$$

$$p_n = \frac{L_n}{H} \quad (9)$$

式(7)~(9)中: $\Delta x_{n+1}(t) = x_{n+2}(t) - x_{n+1}(t)$ 为 t 时刻 $n+1$ 车与 $n+2$ 车的车头间距; p_n 为侧向距离的效用参数; L_n 为 n 车与 $n+1$ 车之间的侧向间距; H 为车道宽, $H = 3.6$ m。

最优速度函数的表达式为:

$$V(\Delta x_n(t)) = \frac{v_{\max}}{2} (\tanh(\Delta x_n(t) - h_c) + \tanh(h_c)) \quad (10)$$

式中: $v_{\max}$ 为车辆的最大速度; h_c 为安全间距。

假定各车驾驶员能通过车间通信获得其与相邻前车之间的侧向间距。参数 p_n 代表后车受前车运动信息(最优速度和速度差)的影响程度。当

n 车与 $n+1$ 车(前车)之间没有侧向间距时,即 $L_n = 0$,由式(9)可得 $p_n = 0$ 。再结合式(7)~(8)可知,此时 n 车不受 $n+1$ 车最优速度和速度差的影响, LG-VNCF 模型退化为 FVD 模型。需要指出的是,当车辆跟驰前车时,与前车的侧向间距一般不会有太大,因此规定 $p_n \leq 0.2$ 。

2 跟驰模型稳定性分析

本研究利用微小扰动法对 LG-VNCF 模型进行线性稳定性分析。为简化计算,规定所有车辆与其前车的侧向间距都相同,令 $p_n = p$ 。假定在施加扰动之前, LG-VNCF 模型稳定。此时车辆的车头间距为 h ,车速为 $(1-p)V(h) + pV(h)$,速度差 $\Delta v_n(t), \Delta v_{n+1}(t)$ 为 0。对此,有:

$$x_n^0(t) = [(1-p)V(h) + pV(h)]t + hn \quad (11)$$

式中: $x_n^0(t)$ 为 t 时刻 n 车处于稳态时的位置。

令 $y_n(t) = \exp(zt + \theta ni)$ 为 t 时刻施加在 n 车上的微小扰动,且:

$$\begin{cases} \dot{y}_n(t) = ze^{zt+\theta ni} \\ \ddot{y}_n(t) = z^2 e^{zt+\theta ni} \\ \Delta y_n(t) = e^{zt+\theta ni} (e^{\theta i} - 1) \\ |\Delta \dot{y}_n(t)| = ze^{zt+\theta ni} (e^{\theta i} - 1) \end{cases} \quad (12)$$

则 n 车在 t 时刻受到扰动后的实际位置为:

$$x_n(t) = x_n^0(t) + y_n(t) \quad (13)$$

将式(13)代入式(7),并用泰勒公式展开得:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_n(t) = & \kappa [(1-p)(V(h) + V'(h)\Delta y_n(t)) + \\ & p(V(h) + V'(h)\Delta y_{n+1}(t)) - \dot{y}_n(t) - \\ & V(h)] + \lambda [(1-p)\Delta \dot{y}_n(t) + p\Delta \dot{y}_{n+1}(t)] \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $\Delta y_n(t) = y_{n+1}(t) - y_n(t)$; $\Delta y_{n+1}(t) =$

$$y_{n+2}(t) - y_{n+1}(t); V'(h) = \left. \frac{dV(x)}{dx} \right|_{\Delta x=h}。$$

将式(12)代入式(14)可得:

$$\begin{aligned} z^2 = & \kappa [(1-p)V'(h)(e^{\theta i} - 1) + \\ & pV'(h)(e^{\theta i} - 1)e^{\theta i} - z] + \\ & \lambda [(1-p)z(e^{\theta i} - 1) + pz(e^{\theta i} - 1)e^{\theta i}] \end{aligned} \quad (15)$$

令 $z = z_1(\theta i) + z_2(\theta i)^2 + \dots$, 并将其代入式(15)可得:

$$\begin{aligned} & \kappa(V'(h) - z_1)(\theta i) + \\ & \left(\kappa p V'(h) + \frac{\kappa}{2} V'(h) - \kappa z_2 + \lambda z_1 - z_1^2 \right) (\theta i)^2 = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

对式(16)进行化简,并令 (θi) 和 $(\theta i)^2$ 的系数为 0,可得:

$$\begin{cases} z_1 = V'(h) \\ z_2 = \frac{V'(h)}{2} + \frac{\lambda V'(h) - (V'(h))^2}{\kappa} + p V'(h) \end{cases} \quad (17)$$

当 $z_1, z_2 > 0$ 时, LG-VNCF 模型稳定。因此, LG-VNCF 模型的临界稳定条件为:

$$\kappa = \frac{2(V'(h) - \lambda)}{1 + 2p} \quad (18)$$

LG-VNCF 模型的稳定区域为:

$$\kappa > \frac{2(V'(h) - \lambda)}{1 + 2p} \quad (19)$$

由式(19)可知,在最优速度函数相同时,参数 λ 和 p 的取值不同会改变 LG-VNCF 模型的稳定区域,进而影响该模型的稳定性。若不考虑与前车的侧向间距 ($p=0$), LG-VNCF 模型的稳定区域与 FVD 模型的一致^[6];若不考虑与前车的侧向间距和速度项 ($p=0, \lambda=0$), LG-VNCF 模型的稳定区域与 OV 模型的一致^[4]。图 2 所示为 OV, FVD 和 LG-VNCF 模型的临界稳定曲线。

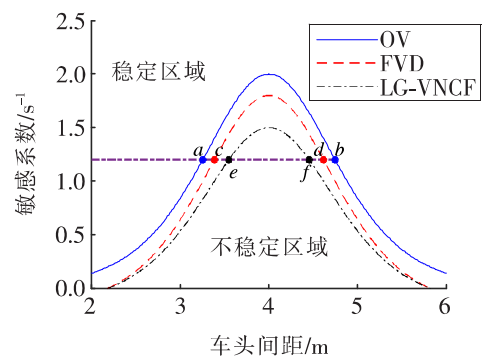


图 2 OV, FVD 和 LG-VNCF 模型的临界稳定曲线

Fig. 2 Critical stability curves of OV, FVD and LG-VNCF model

在图 2 中,不同模型的临界稳定曲线都将平面分成了两部分。由式(19)可知,曲线的上、下方分别为模型的稳定区域和不稳定区域。当敏感系数 κ 和车头间距 h 的取值组合落在曲线下时,模型在受到随机扰动后,扰动的幅值将随着交通流的演化而增大,各车的车头间距不再保持一致,车辆会出现走走停停的现象;当敏感系数 κ 和车

头间距 h 的取值组合落在曲线上方时,模型在受到随机扰动后,扰动的幅值将随着交通流的演化而减小,最终衰减至 0,各车的车头间距仍保持一致,交通流重新回到稳定状态。例如,当 $\kappa = 1.2 \text{ s}^{-1}$ 时,OV 模型($\lambda=0, p=0$)的不稳定区间为(a, b),FVD 模型($\lambda=0.1, p=0$)的不稳定区间为(c, d),LG-VNCF 模型($\lambda=0.1, p=0.1$)的不稳定区间为(e, f),显然 LG-VNCF 模型的不稳定区间最小。由图 2 可知,与 FVD 和 OV 模型相比,LG-VNCF 模型的临界稳定曲线的顶点最低,不稳定区域最小,说明 LG-VNCF 模型改善了跟驰模型的稳定性。

图 3 所示为参数 λ 和 p 取不同值时 LG-VNCF 模型稳定区域的变化情况。

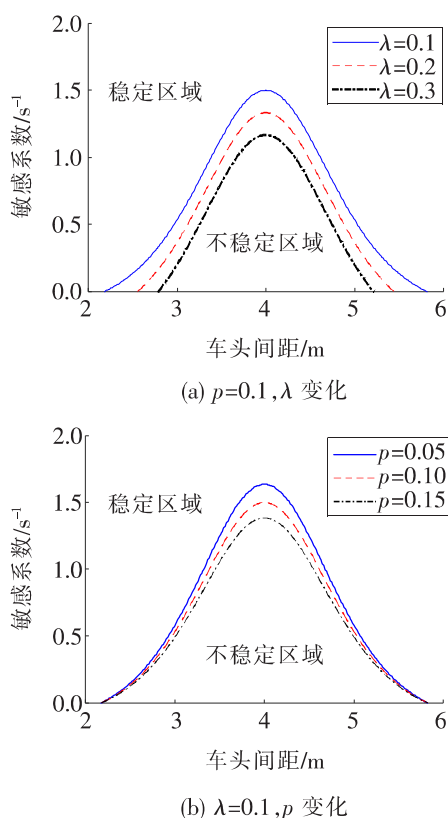


图 3 参数的不同取值对 LG-VNCF 模型稳定性的影响

Fig. 3 Influence of different values of parameters on the stability of LG-VNCF model

由图 3(a)可知,在侧向间距 p 固定的情况下,当车速差的敏感系数 λ 增大时,模型的临界稳定曲线逐渐下降,不稳定区域逐渐缩小;由图 3(b)可知,在 λ 固定的情况下,当 p 增大时,模型的临界稳定曲线逐渐下降,不稳定区域逐渐缩小。由此可见,考虑前车的运动信息及车辆行驶过程中的侧向间距均对提升跟驰模型的稳定性具有积极的作用。

3 交通流数值仿真

本节分析了在周期性边界条件下 LG-VNCF 模型所描述的交通流在受到扰动后的演化过程,验证了侧向间距和前车运动信息对扰动的抑制作用。在周期性边界条件下, N 辆车等间距依次排列在长度为 L 的环形道路上,所有车辆的侧向间距都相等。在初始时刻,车辆停在车道上,同时给定微小扰动。车辆位置设置如下:

当 $n \neq 0.5N$, 且 $n \neq 0.5N+1$ 时:

$$\Delta x_n(t) \big|_{t=0} = \Delta x_n(t) \big|_{t=1} = \frac{L}{N} \quad (20)$$

当 $n = 0.5N$ 时:

$$\Delta x_n(t) \big|_{t=0} = \Delta x_n(t) \big|_{t=1} = \frac{L}{N} - 0.5 \quad (21)$$

当 $n = 0.5N+1$ 时:

$$\Delta x_n(t) \big|_{t=0} = \Delta x_n(t) \big|_{t=1} = \frac{L}{N} + 0.5 \quad (22)$$

模型其他参数的取值分别为: $N=100, L=400 \text{ m}, \kappa=1.2 \text{ s}^{-1}, v_{\max}=2 \text{ m/s}, h_c=4 \text{ m}$ 。为了体现侧向间距和前车运动信息对交通流演化的影响,在参数的不同取值条件下分析车头间距随交通流的演化过程。为使交通流充分演化,给出 10 000 s 以后车头间距演化的仿真结果,如图 4 所示。

由图 4(a)可知,当 $p=0.00, \lambda=0.1$ 时,初始时刻施加在稳定交通流上的微小扰动在交通流的演化过程中被放大,车辆出现走走停停的现象,交通发生拥堵,交通流处于十分不稳定的状态;由图 4(b)可知,当 $p=0.10, \lambda=0.1$ 时,扰动同样随交通流的演化而被放大,出现了拥堵现象,但交通流的稳定程度强于图 4(a)中所示的交通流;由图 4(c)可知,当 $p=0.10, \lambda=0.2$ 时,交通流的拥堵现象明显减弱,受扰动的影响程度也明显小于图 4(a)和图 4(b)所示的交通流,但此时的交通流仍处于不稳定的状态;由图 4(d)可知,当 $p=0.15, \lambda=0.2$ 时,扰动随交通流的演化而减弱,最终完全消失,即交通流处于稳定状态。对比图 4(b)与 4(c)可知,当参数 λ 增大,即对车速差的敏感度增大时,交通流的稳定性会有所提升;对比图 4(a)与 4(b)、图 4(c)与 4(d)可知,当参数 p 增大,即充分地考虑侧向间距的影响时,扰动对交通流的影响却随之减弱。以上仿真结果说明,车辆侧向间距和前车运动信息起到了稳定交通流的作用。

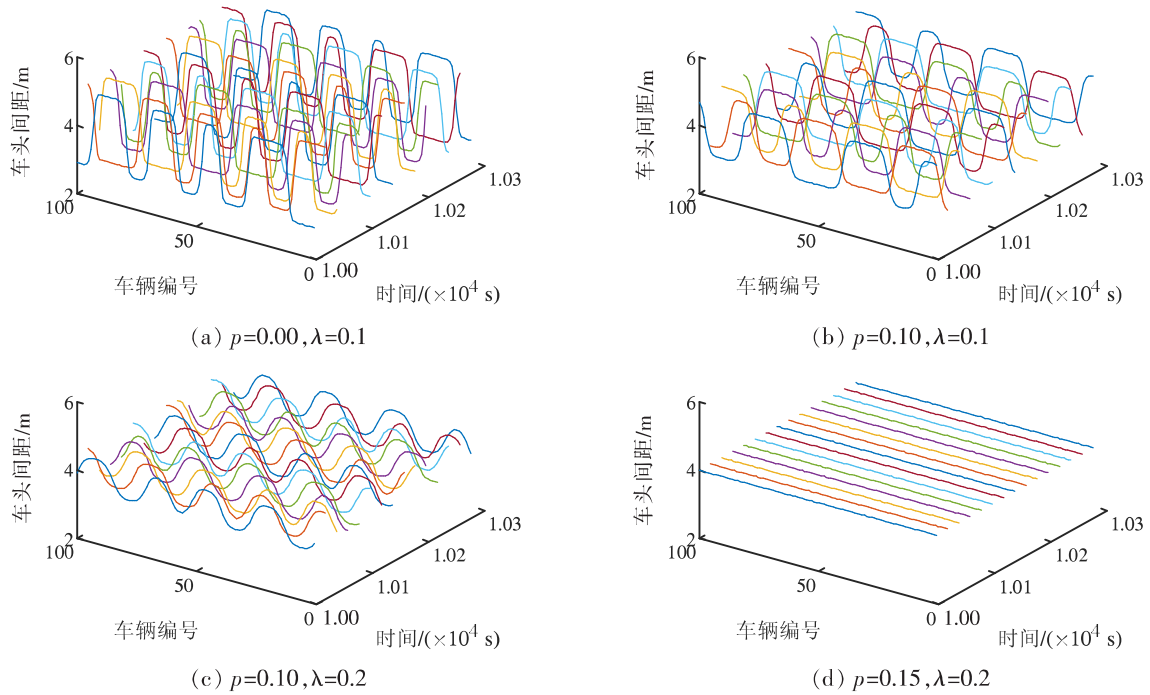
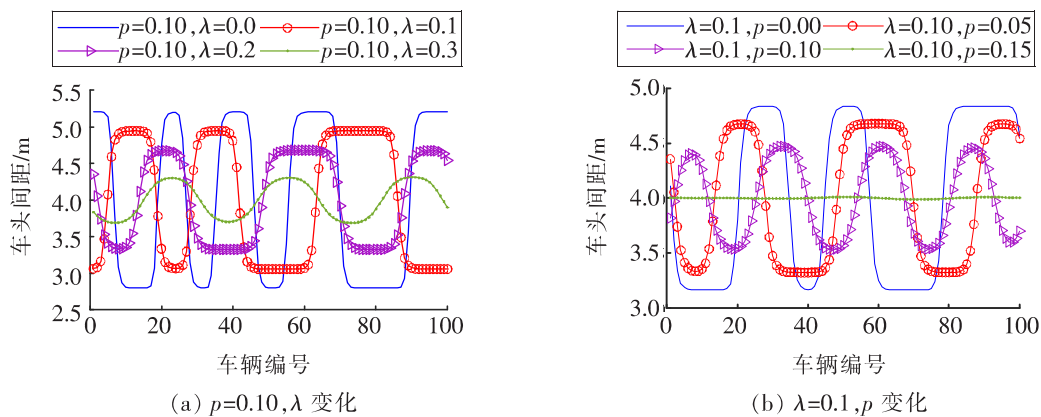
图 4 车头间距演化的仿真结果($t > 10\ 000\ \text{s}$)Fig. 4 Simulation results of distance headway evolution($t > 10\ 000\ \text{s}$)

图 5 所示为车辆在 $10\ 300\ \text{s}$ 时受参数 p 和 λ 的影响车头间距的分布情况。由图 5(a)可知,当固定 p 时,随着 λ 的增大,车头间距的波动幅度逐渐减小,交通流受扰动影响的程度也逐渐减弱,其稳定性得到了一定的提升,但交通流仍处于不稳定状态;由图 5(b)可知,当固定 λ 时,在 $p = 0.00, 0.05, 0.10$ 的情况下,车头间距的波动幅度逐渐减小,但初始的微小扰动均随交通流的演化而被放

大,交通流处于不稳定状态。当 $p = 0.15$ 时,初始的微小扰动不复存在,各车的车头间距与初始状态相同,几乎没有波动,此时交通流处于稳定状态。这说明考虑侧向间距和前车运动信息能提高交通流的稳定性。对比图 5(a)与 5(b)可知,图 5(b)所示的车头间距的波动幅度均小于图 5(a),即侧向间距对扰动有抑制作用,说明考虑侧向间距的影响能使交通流趋于稳定。

图 5 车头间距剖面($t = 10\ 300\ \text{s}$)Fig. 5 Distance headway profiles($t = 10\ 300\ \text{s}$)

综上所述,在 LG-VNCF 模型中引入车辆侧向间距及前车运动信息,可以有效地抑制扰动在交通流中的传播,增强交通流的稳定性。

4 结论

本研究从提升交通流稳定性的角度出发,考

虑实际交通特性的影响,提出了一种在车联网环境下考虑侧向间距的 LG-VNCF 模型,并得出如下结论:

1) 利用微小扰动法得到了 LG-VNCF 模型的临界稳定条件,通过对比不同模型的稳定性可知, LG-VNCF 模型的稳定性明显优于 OV 模型和 FVD 模型。通过分析 LG-VNCF 模型中不同参数

的取值对稳定性的影响可知,考虑侧向间距和前车运动信息能够有效扩大模型的稳定区域,增强模型的稳定性。

2) 周期性边界条件下的仿真结果表明, LG-VNCF 模型能够抑制扰动在交通流中的传播,在一定程度上减缓交通拥堵。

3) 与既有的跟驰模型相比,通过侧向间距确定受前车运动信息影响程度的 LG-VNCF 模型能够更准确地反映车联网环境下车辆之间的跟驰关系,进而能够在一定程度上缓解交通拥堵,增大道路容量,提高通行效率。

〔参考文献〕

- [1] 吕小峰,周骞,赵星. 基于跟驰模型的多车型混合车流道路通行能力[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2016,13(2):26-32.
LYU Xiao-feng, ZHOU Qian, ZHAO Xing. Road capacity of multi-type vehicle mixed traffic flow based on the car following model[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 13(2): 26-32.
- [2] 杨龙海,张春,仇晓赞,等. 车辆跟驰模型研究进展[J]. 交通运输工程学报,2019,19(5):125-138.
YANG Long-hai, ZHANG Chun, QIU Xiao-yun, et al. Research progress on car-following models[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(5): 125-138.
- [3] 李硕,李景密,汪猛. 跟驰状态下城市主干道交通流特征研究[J]. 公路工程,2017,42(2):52-55,62.
LI Shuo, LI Jing-mi, WANG Meng. Research on traffic flow characteristics of urban arterials under the following state[J]. Highway Engineering, 2017, 42(2): 52-55, 62.
- [4] BANDO M, HASEBE K, NAKAYAMA A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation[J]. Physical Review E, 1995, 51(2): 1 035-1 042.
- [5] HELBIG D, TILCH B. Generalized force model of traffic dynamics[J]. Physical Review E, 1998, 58(1): 133-138.
- [6] JIANG R, WU Q, ZHU Z. Full velocity difference model for a car-following theory[J]. Physical Review E, 2001, 64(1): 017101.
- [7] 李林恒,甘婧,曲栩,等. 智能网联环境下基于安全势场理论的车辆跟驰模型[J]. 中国公路学报,2019, 32(12):80-91.
LI Lin-heng, GAN Jing, QU Xu, et al. Car-following model based on safety potential field theory under connected and automated vehicle environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 80-91.
- [8] 冉斌,谭华春,张健,等. 智能网联交通技术发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报,2018,9(2):119-130.
RAN Bin, TAN Hua-chun, ZHANG Jian, et al. Development status and trend of connected automated vehicle highway system[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2018, 9(2): 119-130.
- [9] GE H, CHENG R, LI Z. Two velocity difference model for a car following theory[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2008, 387(21): 5 239-5 245.
- [10] 纪艺,史昕,赵祥模. 基于多前车信息融合的智能网联车辆跟驰模型[J]. 计算机应用,2019,39(12): 3 685-3 690.
JI Yi, SHI Xin, ZHAO Xiang-mo. Car-following model for intelligent connected vehicles based on multiple headway information fusion[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(12): 3 685-3 690.
- [11] 安树科,徐良杰,钱良辉,等. 考虑前方多车优化速度信息的车辆跟驰模型[J]. 东南大学学报(自然科学版),2020,50(6):169-175.
AN Shu-ke, XU Liang-jie, QIAN Liang-hui, et al. Car-following model with optimal velocity information of multiple-vehicle ahead[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(6): 169-175.
- [12] ZHU M, WANG X, TARKO A, et al. Modeling car-following behavior on urban expressways in Shanghai: a naturalistic driving study[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 93: 425-445.
- [13] JIN S, WANG D, TAO P, et al. Non-lane-based full velocity difference car following model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(21): 4 654-4 662.
- [14] LI Y, ZHANG L, PEETA S, et al. Non-lane-discipline-based car-following model considering the effects of two-sided lateral gaps [J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 80(1): 227-238.