

考虑车与车互联通讯技术的交通流跟驰模型

华雪东 王炜 王昊

A car-following model with the consideration of vehicle-to-vehicle communication technology

Hua Xue-Dong Wang Wei Wang Hao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 010502 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.010502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.010502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间关联白噪声影响下小世界神经元网络系统的同步动力学

[Synchronous dynamics of small-world neuronal network system with spatially correlated white noise](#)

物理学报.2015, 64(22): 220503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.220503>

考虑前后车效应的反馈控制跟驰模型

[A car-following model with considering control signals from front and rear](#)

物理学报.2014, 63(11): 110504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110504>

亚稳相的纳米尺度稳定化: 热力学模型与实验研究

[Nanoscale stabilization of metastable phase: thermodynamic model and experimental studies](#)

物理学报.2012, 61(20): 200510 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.200510>

具有空间因素的社会网络上的舆论形成

[Opinion formation on the social networks with geographic structure](#)

物理学报.2012, 61(19): 190509 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.190509>

用Weiss分子场理论对有外电场时铁电体系相变特征的研究

[Study on the phase transitions of ferroelectric systems by Weiss's molecular field theory with an external field](#)

物理学报.2012, 61(14): 140501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.140501>

考虑车与车互联通讯技术的交通流跟驰模型*

华雪东 王炜† 王昊

(东南大学交通学院, 江苏省城市智能交通重点实验室, 南京 210096)

(现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 南京 210096)

(2015年9月1日收到; 2015年10月13日收到修改稿)

基于Newell跟驰模型, 建立考虑车与车互联 (vehicle-to-vehicle, V2V) 通讯技术的单车道跟驰模型. 根据V2V技术的特征, 引入参数 α 以表征驾驶员在收到V2V技术所提供的实时交通信息后的提前反应程度. 根据线性稳定分析方法, 得到V2V跟驰模型的中性稳定条件. 通过计算机的模拟, 研究V2V技术对交通流运行的影响, 分析小扰动下V2V跟驰模型对参数变化的敏感性, 研究不同 α 取值下交通流密度波及迟滞回环的变化. 研究发现: 1) 与全速度差跟驰模型相比, 在引入V2V后, 交通流在加速起步、减速刹车及遇到突发事件时, 车辆运行的安全性和舒适性均得到不同程度的提升; 2) V2V跟驰模型对参数 α 及 T 的变化较为敏感, 且在交通流较为拥堵时, V2V技术的引入可以提升交通流的平均速度; 3) 参数 α 的增大、 T 的减小可以有效提升V2V跟驰模型在不同交通环境下的运行稳定性. 由于可以实时地获取交通流运行的状态并针对性地改变车辆自身的运行, V2V交通流跟驰模型提升了交通流运行的稳定性.

关键词: 跟驰模型, 车与车互联技术, 线性分析, 数值模拟**PACS:** 05.70.Fh, 05.45.-a**DOI:** 10.7498/aps.65.010502

1 引言

自20世纪初起, 随着欧美等西方国家机动化和城市化水平的逐渐提升, 在促进了机动化交通行为及交通活动增长的同时, 越来越多的交通问题也随之产生, 困扰着城市管理者及交通工程师^[1]. 为了更加合理地理解、模拟与预测城市交通网络中可能出现的各种交通现象 (如换道、跟驰、拥堵、相变等), 有效地应对城市发展过程中出现的各种交通问题, 包括物理学、数学等在内的多学科的研究者试图通过建模来深入研究并分析交通流^[2,3]. 大体来说, 交通流模型可以分为^[4]宏观模型 (一阶连续Lighthill-Whitham-Richards模型、各向异性模型、小波模型等)^[5-18]和微观模型 (元胞自动机模型、细胞传输模型、跟驰模型等)^[19-34]两类. 其中,

交通流微观模型着重关注交通流的微观特性, 如换道、超车、车辆行驶轨迹等; 而宏观模型则重点研究流体的宏观特征, 例如交通流基本图、交通流的分布与演进规律、交通流三参数间的关系等.

由于可以较为精确地刻画交通流运行时车辆的跟随特性, 自从20世纪50年代跟驰模型的概念被提出以来, 相关方面的研究一直受到学者的关注^[19-27,35-39]. 跟驰模型的建立需要满足如下两点交通流运行的要求: 第一, 保持车辆间的相对速度最小; 第二, 保证车辆间的距离合适. 1961年, Newell^[36]首次提出了基于速度的单车道跟驰模型, 如(1)式所示:

$$\frac{dx_n(t+T)}{dt} = V(\Delta x_n(t)), \quad (1)$$

其中, $\Delta x_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t)$, $V(\Delta x_n(t))$ 为最优速度函数. Newell模型表明了驾驶员会在时间

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB725402)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 51338003)、国家自然科学基金 (批准号: 51478113) 和东南大学优秀博士学位论文基金 (批准号: YBJJ1345) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangwei@seu.edu.cn

间隔 T 之后调整其车辆的行驶速度至时间 t 时刻的最优行驶速度 $V(\Delta x_n(t))$. 后续有多种模型, 例如最优速度 (OV) 模型 (2) 式、全速度差 (FVD) 模型 (3) 式等均可以在 Newell 模型的基础上通过演变得到 [36–39].

$$\frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} = \frac{1}{T} \left(V(\Delta x_n(t)) - \frac{dx_n(t)}{dt} \right), \quad (2)$$

$$\frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} = \frac{1}{T} \left(V(\Delta x_n(t)) - \frac{dx_n(t)}{dt} \right) + \lambda \frac{d\Delta x_n(t)}{dt} (t). \quad (3)$$

近年来, 随着科学技术, 特别是互联网、通讯、自动化控制技术的发展, 机动车搭载了越来越多的科技辅助功能及相关设备, 例如行车电脑、定速巡航、自适应巡航、自动制动设备等. 这些新技术的应用会在一定程度上影响交通流的运行, 造成交通流特征的变化. 车与车互联 (vehicle-to-vehicle, 简称 V2V, 又名 IVC) 通讯技术便是其中非常有前景的一项. 根据美国交通部 2014 年的提案, V2V 车载通讯系统利用车上所搭载的传输单元以每秒 10 次为单位通过高速无线网络发出信息, 这些信息包括车辆当时的车速、方向、地理位置、路线等. 由于驾驶员可以借助 V2V 通讯设备实时地接收到前车的交通运行状态, 并针对性地调整其驾驶行为, 这必然会导致驾驶员驾驶行为的变化. 针对 V2V 通讯设备对交通流可能造成的影响, 学者们建立了多种模型以揭示 V2V 设备引入后交通流的特征 [40–43]. 但是, 目前已有的研究均是从宏观的角度出发, 并不能揭示 V2V 对交通流的微观影响.

本文基于 Newell 交通流跟驰模型, 针对 V2V 通讯设备及其技术的特性, 提出了一种考虑 V2V 影响下的交通流跟驰模型; 该模型考虑了引入 V2V 设备后, 由于驾驶员驾驶行为的变化所引起交通流的变化; 通过计算机程序对本文模型进行不同交通状况下的数值模拟, 分析 V2V 技术对交通流运行的影响.

2 模型的建立

2.1 V2V 对交通流的影响

根据 Newell 及 FVD 跟驰模型, 驾驶员在获取得到 t 时刻时车辆与前车间的距离 $\Delta x_n(t)$ 、速度差 $\Delta v_n(t)$ 等交通流数据后, 会通过 T 时间的调整, 使

得汽车达到最优行驶速度 $V(\Delta x_n(t))$. 以往的研究表明, T 的大小将会影响 (甚至很大程度上决定) 交通流的运行稳定性. 我们通常将 T 的倒数 $a = 1/T$ 记为交通系统的敏感度: a 越大, 则驾驶员对交通变化的反应越快, 交通流的运行也会越趋向于稳定; 反之也成立. 在跟驰模型中, 影响 a 的主要因素有: 第一是驾驶员的反应速度; 第二则是驾驶员对交通流各项参数估计的误差. 在实际交通流的运行中, 第 n 辆车的驾驶员对于前车的各项交通数据, 如速度 v_{n+1} 、位置 x_{n+1} 、加减速度等的估计与实际存在一定的差距, 这必然会导致驾驶员得到的 $\Delta x_n(t)'$, $\Delta v_n(t)'$ 估计值不同于跟驰模型中采用的精确 $\Delta x_n(t)$, $\Delta v_n(t)$ 数值. 为了更好地模拟实际的交通流, 当跟驰模型中 $\Delta x_n(t)$, $\Delta v_n(t)$ 等交通参数值大于实际中驾驶员的估计值, 则在跟驰模型的标定过程中, 适当地减小 T 的值, 反之则增大 T 的值.

在引入 V2V 设备后, 一方面, 驾驶员可以精确地获取前车的各项交通运行状态, 如前车的实时速度、加减速度, 车辆与前车的距离等. 另一方面, 由于不需要通过人工估计来获取前车的运行状态及其变化, 驾驶员可以将驾驶的重心更多地放在对车辆的操作方面. 这种情况下, 交通流的运行出现如下的两种变化趋势: 1) 引入 V2V 技术后可以提高交通系统的敏感度 a (即反应时间 T 变短), 敏感度的提高程度与驾驶员对 V2V 设备的适应程度有关; 2) 驾驶员会一定程度地提前预判交通流的变化, 并随之改变车辆的状态. 在没有 V2V 设备时, 驾驶员对于车辆的操作是依据车辆间距离的变化来进行的: $\Delta x_n(t)$ 变大时加速, 反之减速. 而在引入了 V2V 后, 驾驶员在实时且精确地获取了前车的各项交通状态变化时 (例如前车开始加速但 $\Delta x_n(t)$ 并未发生变化时), 就可以立刻做出加减速操作. 此时驾驶员相当于对交通流的变化进行了预判, 并做出了相应的反应.

在引入 V2V 技术后, 可将 Newell 跟驰模型改写为

$$\frac{dx_n(t+T)}{dt} = V(\Delta x_n(t + \alpha T)), \quad (4)$$

式中, α 为驾驶员对交通流运行状况的提前反应程度, αT 为提前反应时间. 考虑到 α 取值的不同, 可能会出现 3 种不同的情况: 最开始时, 由于对新引入 V2V 设备并不熟悉, 驾驶员需要更多的时间去获取前车的行驶状态, 此时 $\alpha \leq 0$; 随着对 V2V 设

备的逐步熟悉, 驾驶员可以在实时且精确把握前车交通运行状态的同时, 对 T 时间间隔内的交通流运行状况进行一定程度的预判, 此时 $0 < \alpha < 1$; 随着 V2V 通讯技术的发展, $\alpha = 1$ 时, 驾驶者可以没有时间差别地改变车辆的状态. 此外, 还有一种可能存在的情况, 即 $\alpha > 1$ 时, 驾驶者可以根据交通状态的变化规律提前预测未来交通流的运行, 并提前改变车辆的运行状态.

实际上, 在不考虑车辆自动控制与自动驾驶的前提下, α 的取值范围是不大于 1 的. 在本文中, 车辆的所有状态改变均由驾驶员来人为操作, 并不涉及自动驾驶汽车的范畴, 因而在后文中明确 $\alpha \in (0, 1)$.

2.2 考虑 V2V 影响的跟驰模型建模

由于 V2V 的引入, 可以精确地知道前车的实时速度和加速度, 进而获得两车间的实时速度和加速度差. 在 t 时刻, 驾驶员获取了车辆间交通状态的差异后, 其所选择的加速度为 $\frac{d^2\Delta x_n(t)}{dt^2}$. 由于 αT 的取值相对较小, 因而保证了驾驶员在熟悉了 V2V 设备后, 可以在该段时间内很好地维持住加速度在 $\frac{d^2\Delta x_n(t)}{dt^2}$ 附近微小波动. 此时可以假定在 αT 时间范围内, V2V 模型中的加速度保持恒定. 根据牛顿运动定律, (4) 式中的两车间的距离 $\Delta x_n(t + \alpha T)$ 可以改写为

$$\Delta x_n(t + \alpha T) = \Delta x_n(t) + \frac{d\Delta x_n(t)}{dt}\alpha T + \frac{1}{2} \frac{d^2\Delta x_n(t)}{dt^2}\alpha^2 T^2. \quad (5)$$

将 (5) 式代入到 (4) 式的右侧, 并将其在 $\Delta x_n(t)$ 处做泰勒展开, 保留至第二项 (即加速度项), 可以得到

$$\begin{aligned} & V(\Delta x_n(t + \alpha T)) \\ &= V\left(\Delta x_n(t) + \frac{d\Delta x_n(t)}{dt}\alpha T + \frac{1}{2} \frac{d^2\Delta x_n(t)}{dt^2}\alpha^2 T^2\right) \\ &= V(\Delta x_n(t)) + \alpha TV'(\Delta x_n(t))\frac{d\Delta x_n(t)}{dt} \\ & \quad + \frac{\alpha^2 T^2}{2} V''(\Delta x_n(t))\frac{d^2\Delta x_n(t)}{dt^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $V'(\Delta x_n(t))$ 为最优速度函数 $V(x)$ 在 $x = \Delta x_n(t)$ 处的导数.

同样地, 对 (4) 式的左边在 t 处进行泰勒展开, 保留至距离的二次偏导项可得

$$\frac{dx_n(t + T)}{dt} = \frac{dx_n(t)}{dt} + T \frac{d^2x_n(t)}{dt^2}. \quad (7)$$

将 (6) 和 (7) 式代入 (4) 式, 可以得到考虑 V2V 通讯技术的跟驰模型, 如 (8) 式所示:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x_n(t)}{dt^2} &= \frac{1}{T} \left(V(\Delta x_n(t)) - \frac{dx_n(t)}{dt} \right) \\ & \quad + \alpha V'(\Delta x_n(t)) \frac{d\Delta x_n(t)}{dt} \\ & \quad + \frac{\alpha^2 T}{2} V''(\Delta x_n(t)) \frac{d^2\Delta x_n(t)}{dt^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

若同样令 $a = 1/T$, $\lambda = \alpha V'(\Delta x_n(t))$, (8) 式可以改写为

$$\begin{aligned} \frac{d^2x_n(t)}{dt^2} &= a \left(V(\Delta x_n(t)) - \frac{dx_n(t)}{dt} \right) + \lambda \frac{d\Delta x_n(t)}{dt} \\ & \quad + \frac{\lambda^2}{aV''(\Delta x_n(t))} \frac{d^2\Delta x_n(t)}{dt^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

可以看出, 若 $\alpha = 0$, (9) 式引入 V2V 技术后的跟驰模型将退化为 OV 模型.

将 (9) 式与 FVD 模型对比, 可以发现, 考虑 V2V 影响后的模型比 FVD 模型多了一项 $\frac{\lambda^2}{aV''(\Delta x_n(t))} \frac{d^2\Delta x_n(t)}{dt^2}$, 即新模型考虑了车辆与前车的加速度差对车辆状态改变的影响. 前车的加速度会影响跟随车辆的交通运行状态, 这与 2.1 节中得出的结论一致.

对 (9) 式进一步整理, 合并相同的加速度项后可以得到考虑 V2V 影响的最终跟驰模型, 如 (10) 式所示:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x_n(t)}{dt^2} &= a' \left(V(\Delta x_n(t)) - \frac{dx_n(t)}{dt} \right) \\ & \quad + \lambda' \frac{d\Delta x_n(t)}{dt} + \beta' \frac{d^2x_{n+1}(t)}{dt^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中,

$$\begin{aligned} a' &= \frac{2}{2T + \alpha^2 T^2 V''(\Delta x_n(t))}, \\ \lambda' &= \frac{2\alpha V'(\Delta x_n(t))}{2 + \alpha^2 T V''(\Delta x_n(t))}, \\ \beta' &= \frac{\alpha^2 T V''(\Delta x_n(t))}{2 + \alpha^2 T V''(\Delta x_n(t))}. \end{aligned}$$

特别地, 上述跟驰模型中的最优行驶速度函数 $V(\Delta x_n(t))$, 采用 Helbing 和 Tilch^[44] 在 1998 年提出的基于三角函数的 $V(\Delta x_n(t))$, 如下所示:

$$V(\Delta x_n(t)) = V_1 + V_2 \tanh[C_1(\Delta x_n(t) - l_c) - C_2], \quad (11)$$

其中, $V_1 = 6.75 \text{ m/s}$, $V_2 = 7.91 \text{ m/s}$, $C_1 = 0.13 \text{ m}^{-1}$, $C_2 = 1.57$, l_c 为车长.

3 线性分析

采用线性稳定理论分析考虑 V2V 通讯影响下跟驰交通系统的运行稳定性. 首先假定车辆均以标准的车头间距 h_0 在道路上行驶, 且所有车辆的行驶速度均为 $V(h_0)$. 此时, 交通系统处于完全的稳定状态. 在 t 时刻第 n 辆车的位置 $x_n^{(0)}(t)$ 可以由 (12) 式得到

$$x_n^{(0)}(t) = h_0 n + V(h_0)t. \quad (12)$$

若在 t 时刻给交通系统施加一个小扰动 $y_n(t)$, 则在扰动下 t 时刻第 n 辆车的位置 $x_n(t)$ 可以由下式得到

$$x_n(t) = h_0 n + V(h_0)t + y_n(t). \quad (13)$$

将 (13) 式代入 (10) 式, 整理后得到关于扰动 $y_n(t)$ 的公式, 如下所示:

$$\frac{d^2 y_n(t)}{dt^2} = a' \left(V'(h_0) \Delta y_n(t) - \frac{dy_n(t)}{dt} \right) + \lambda' \frac{d \Delta y_n(t)}{dt} + \beta' \frac{d^2 y_{n+1}(t)}{dt^2}, \quad (14)$$

式中 $V'(h_0)$ 为最优速度函数 $V(x)$ 在 $x = h_0$ 处的导数.

将 $y_n(t) = \exp(ikz + zt)$ 代入 (14) 式, 整理后得到关于 z 的方程, 如下式所示:

$$z^2(1 - \beta e^{ik}) + [a - \lambda(e^{ik} - 1)]z - aV'(h_0)(e^{ik} - 1) = 0, \quad (15)$$

其中, $z = z_1(ik) + z_2(ik)^2 + \dots$, 将 (15) 式中的 z 展开, 并保留至 ik 的第二项, 整理后可以得到

$$z_1 = V'(h_0), \quad (16a)$$

$$z_2 = V'(h_0) \left[\frac{1}{2} + \frac{V'(h_0)(\beta' - 1) + \lambda'}{a'} \right]. \quad (16b)$$

当 $z_2 > 0$ 时, 交通系统将处于稳定状态; 否则当 $z_2 < 0$, 交通流的运行将不稳定, 任何一个小的扰动将可能造成交通流的局部或全局拥堵. 因此, 当且仅当交通系统的敏感度 a 满足 (17) 式的要求时, 交通流可以保持在小扰动下的稳定运行:

$$a > 2V'(h_0) - 2\alpha V'(h_0). \quad (17)$$

在考虑 V2V 通讯技术的影响后, 交通流系统的中性稳定条件为

$$a_s = 2V'(h_0) - 2\alpha V'(h_0). \quad (18)$$

图 1 所示为考虑 V2V 通讯技术的影响后, 不同 α 取值下的中性稳定线. 可以发现, 引入 V2V 之后, 交通流的中性稳定线为对称图形. 图中, 位于中性稳定线上方的区域交通流的运行非常稳定, 不会出现交通拥堵的现象; 而在中性稳定线的下方, 交通流的运行相对不稳定, 会出现交通波现象及部分区域的交通拥堵. 由图 1 可以看出, 随着新引入的变量 α 的增大, 交通流的运行也越来越稳定. 这表明在引入了 V2V 后, 驾驶员对交通流变化的提前反应对维持交通流的稳定是积极的: 驾驶员对交通流的变化越敏感、反应越提前, 交通流的运行也将越趋于稳定; 反之若驾驶员对交通流变化的反应较为迟疑, 交通流的运行则会向不稳定的方向发展. 驾驶员对于交通流变化的提前反应的程度, 一方面受到驾驶员的性格 (如性格激进、安稳等) 影响, 另外一方面也可以通过长时间的使用与适应 V2V 通讯设备来提升.

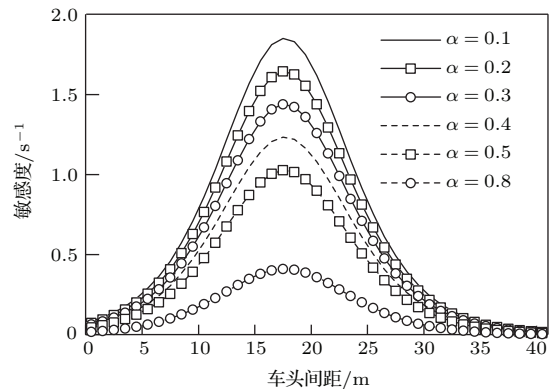


图 1 不同 α 下的中位稳定线

Fig. 1. Neutral stability lines with different α .

根据 Zhou^[45] 以及 Zhao 和 Gao^[46,47] 研究得到的 FVD 跟驰模型的稳定性条件 ($a > 2V'(h_0) - 2\lambda$), 通过与 (17) 式对比可以发现, 当 $\alpha V'(h_0) > \lambda$ 时, V2V 跟驰模型将比 FVD 模型更加稳定. 图 2 所示为 V2V 模型和 FVD 模型的中位稳定线的对比. 由图 2 可知: 在交通流的车头间距处于中等大小区域时, V2V 模型的中性稳定线较低, 说明 V2V 技术的引入在该区域内增强了交通流系统的稳定性; 但是当交通流系统的车头间距较小或者较大时, V2V 跟驰模型的稳定性小于 FVD 模型. 这种稳定性的

减弱可能是由于在车头间距较小或者较大时, V2V 所提供的前车交通流运行信息使得驾驶员过多地提前改变自身的车辆状态所致. 考虑到 V2V 技术引入且驾驶员熟悉后, 跟驰模型的参数取值 α 及 $1/T$ 均会增大, 因而可以认为在实际的使用过程中, V2V 技术的引入增强了交通流的运行稳定性.

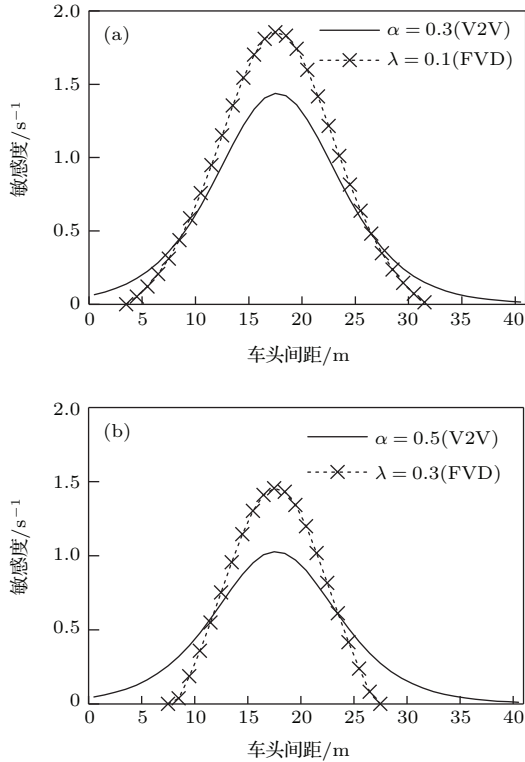


图2 中位稳定线对比 (a) $\alpha = 0.3$ (V2V), $\lambda = 0.1$ (FVD); (b) $\alpha = 0.5$ (V2V), $\lambda = 0.3$ (FVD)
 Fig. 2. Neutral stability line comparison: (a) $\alpha = 0.3$ (V2V), $\lambda = 0.1$ (FVD); (b) $\alpha = 0.5$ (V2V), $\lambda = 0.3$ (FVD).

4 数值分析

为验证本文所提出的考虑 V2V 影响下的交通流跟驰模型(如(10)式所示), 采用数值模拟的方式分析引入 V2V 通讯设备后交通流特征的变化. 在进行数值模拟时, 采用 0.1 s 作为交通流状态的更新时间间隔, 这与 V2V 通讯设备的更新频率保持一致. 在数值模拟中, 车辆的长度全部取为 5 m. 为了保证数值模拟结果的精确性与模拟过程的可重复性, 采用 MATLAB 2010a 编程实现数值模拟及其分析过程.

4.1 起步和刹车过程

首先验证在引入 V2V 通讯设备后, 交通流在交叉口遇到红绿灯相互转换时的车队起步和刹车行为. 采用与文献[39]类似的模拟方法: 1) 在最开始时, 信号灯为红灯, 此时停车线前停有 11 辆车, 车辆间的间距均为 7.4 m; 2) 在时间 $t = 0$ s 时, 信号灯由红灯转换为绿灯. 此时 11 辆车加速起步, 开始向下游行驶; 3) 在信号灯的下流 627 m 处同样设置一个下游信号灯, 在 $t = 40$ s 时该下游信号灯由绿灯转换为红灯. 此时车辆开始逐步减速, 并停止在下游的信号灯前.

为了验证 V2V 通讯设备引入后交通流特性的变化, 在 4.1 与 4.2 节中, 将 V2V 模型在起步和刹车过程中的表现与 FVD 模型进行对比. 为了保证模型间的可比性尽可能大, 通过标定跟驰模型的参数, 使得两个模型的启动损失时间 δt 及启动波 C_j 的波速相同, 如表 1 所列. 通过模型标定后, 两个模型的最终参数分别为: V2V 模型起步时 $T = 2.5$, $\alpha = 0.5$, 刹车时 $T = 1.2$, $\alpha = 0.5$; FVD 模型起步时 $T = 2.5$, $\lambda = 0.3$, 刹车时 $T = 1.2$, $\lambda = 0.3$.

表1 两种模型的启动损失时间及启动波速
 Table 1. Start-up lost time and kinematic wave speed at jam density.

模型	$\delta t/s$	$C_j/km \cdot h^{-1}$
FVD	2.47	10.79
V2V	2.47	10.79

图 3 所示为 V2V 模型和 FVD 模型在起步阶段的速度和加速度随时间的变化. 图 3 中, 实线表示头车(即第一辆车), 虚线依次为后续的十辆跟随车. 对比 V2V 模型和 FVD 模型在起步阶段的交通流特征, 可以发现: 1) 从加速的时间来看, 引入 V2V 通讯技术后, 跟随车辆开始加速的时间更早, 这说明 V2V 通讯设备可以让车辆更早地获取前车的交通状态变化, 随之改变自身的交通运行状态; 2) 从加速的强度来看, 引入 V2V 通讯技术后, 跟随车辆的加速强度相较没有 V2V 技术时要小, 由于 V2V 技术的引入, 导致车辆可以有更为充裕的时间改变本身的速度和加速度, 因而其加速度就可以适当地降低.

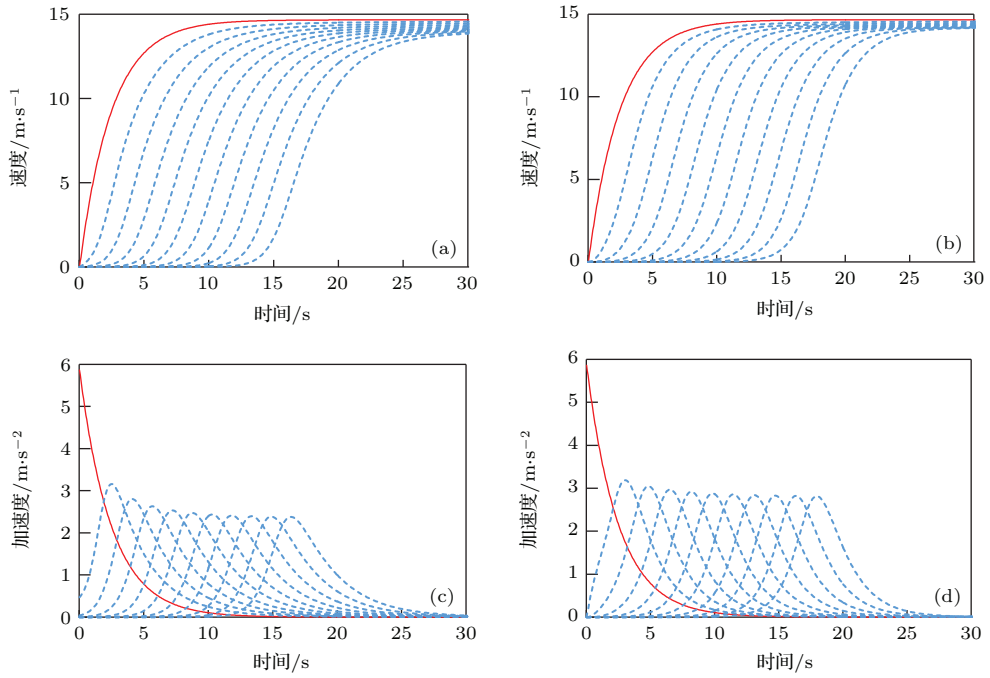


图3 (网刊彩色) 起步过程的速度和加速度 (a) 速度 (V2V 模型); (b) 速度 (FVD 模型); (c) 加速度 (V2V 模型); (d) 加速度 (FVD 模型).
 Fig. 3. (color online) Speed and acceleration during start-up process: (a) Speed (V2V model), (b) speed (FVD model); (c) acceleration (V2V model); (d) acceleration (FVD model).

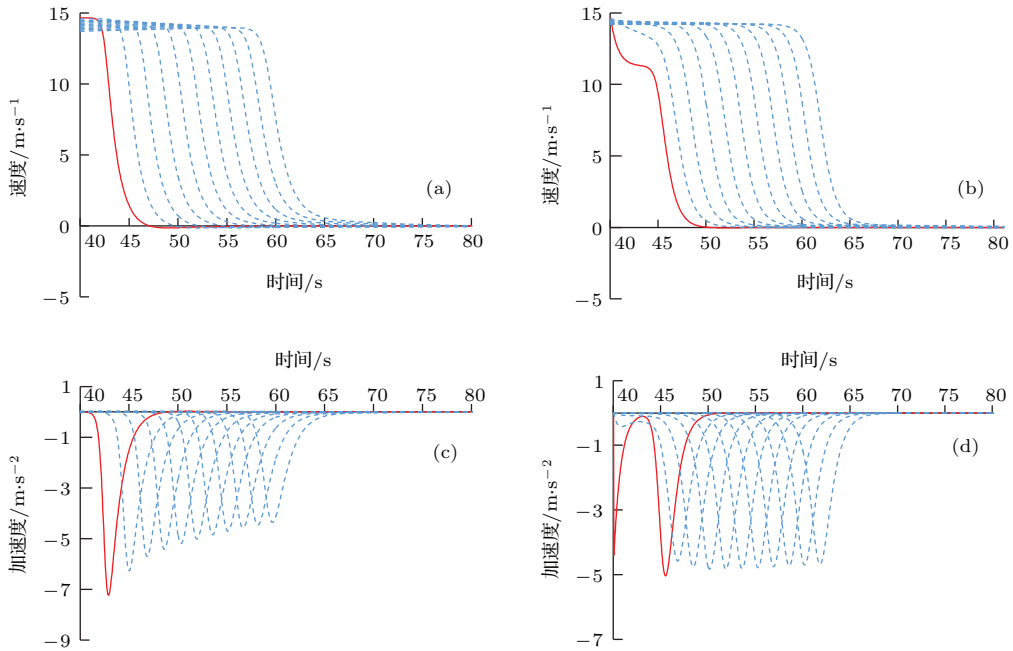


图4 (网刊彩色) 刹车过程的速度和减速度 (a) 速度 (V2V 模型); (b) 速度 (FVD 模型); (c) 减速度 (V2V 模型); (d) 减速度 (FVD 模型).
 Fig. 4. (color online) Speed and deceleration during brake process: (a) Speed (V2V model); (b) speed (FVD model); (c) deceleration (V2V model); (d) deceleration (FVD model).

图4所示为V2V模型和FVD模型在刹车阶段的速度和加速度随时间的变化. 相比于起步阶段, 两个模型在遇到红灯时的刹车行为差异更大. 1) 对于FVD模型, 头车的减速并不流畅, 分为两个

阶段, 即车辆先瞬间将减速度提到次大值, 随后减小至趋近零, 之后车辆减速度逐步加大至最大值, 最后降为零; 而V2V跟驰模型在接收到红灯信号后, 逐步将减速度加至最大值, 随后将之减小为零.

2) 与加速阶段相似, 在 V2V 模型中, 跟随车辆的减速行为开始得更早, 且减速度更大.

总而言之, 无论是在起步加速阶段还是减速刹车阶段, 由于 V2V 通讯设备的存在, 使得车辆一方面可以更早地进行加、减速操作, 从而获得更多的加、减速时间, 提升交通流运行的安全性; 另一方面也可以平缓车辆的加、减速过程, 进而提升交通流运行的舒适性. 无论从安全性和舒适性来说, V2V 模型的表现都优于 FVD 模型.

4.2 意外事件对交通流的影响

意外事件在交通流的运行中非常常见, 例如前车的突然减速、其他车辆的汇入等. 这些意外事件的发生都会引起交通流的突变. 在以往的研究中, 学者较多地关注了跟驰模型在交通事故情况下的表现, 很少分析研究模型在交通事件影响下的交通流变化.

图 5 所示为跟驰模型在起步稳定后遇到意外事件的交通流表现: 在 45 s 时信号灯下游 650 m 处突然有一辆车以低速汇入, 并逐步加速到最大速度. 由图 5 可以看出, 在车辆汇入以后, 由于汇入车辆的速度低, 迫使包含头车在内的车辆全部开始减速. 待汇入车辆的速度加速至超过头车的速度后, 车队随即开始加速. 因而头车及跟随车的加速度呈现出先负后正的现象. 对比 FVD 模型可以发现: 1) V2V 跟驰模型的最小速度更大而速度的波动更小, 说明 V2V 技术的引入可以更好地维持交通流在意外事件下的速度, 降低速度的意外波动; 2) V2V 模型下, 车辆速度变化的全过程(最大速度-减速-最大速度)耗时更长, 这保证了车辆速度的变化更加平缓, 提升了跟驰模型下车辆运行的舒适性. 总体来说, V2V 模型在意外事件的影响下的表现优于传统 FVD 模型.

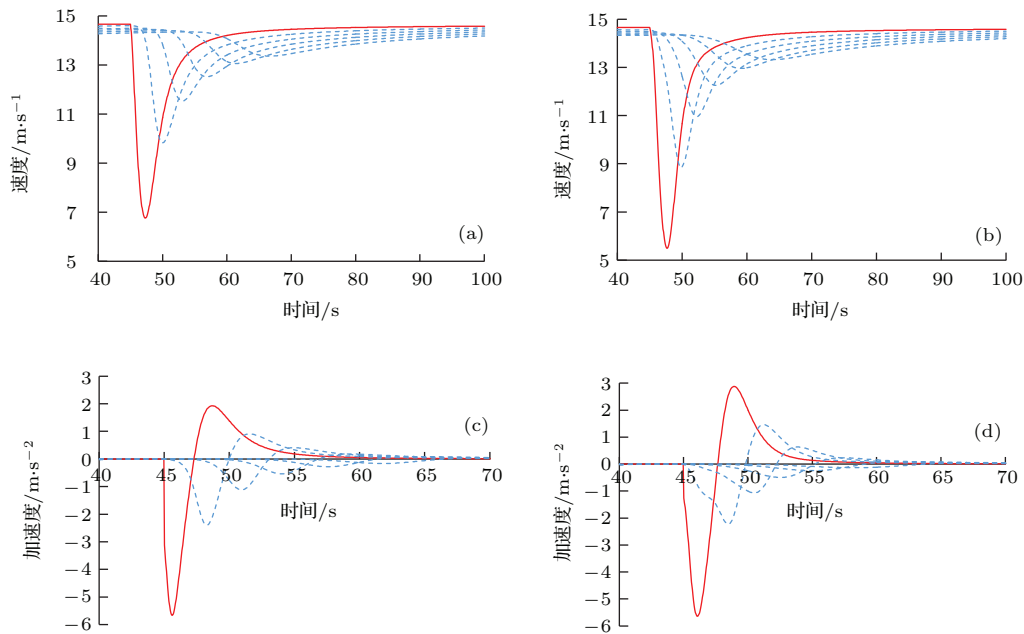


图 5 (网刊彩色) 意外事件下的速度和加速度 (a) 速度 (V2V 模型); (b) 速度 (FVD 模型); (c) 加速度 (V2V 模型); (d) 加速度 (FVD 模型)

Fig. 5. (color online) Speed and acceleration during incidents: (a) Speed (V2V model); (b) speed (FVD model); (c) acceleration (V2V model); (d) acceleration (FVD model).

4.3 敏感性分析

根据 V2V 跟驰模型的稳定条件 (18) 式, 交通流在一定的小扰动下会出现(局部)拥堵或保持稳定. 在 4.3 及 4.4 节中, 通过 V2V 模型在不同参数 α 和 T 的取值下交通流平均速度以及车头间距变化

的情况, 分析小扰动下 V2V 跟驰模型的敏感性, 研究交通流密度波的传播.

首先对 V2V 跟驰模型在小扰动下的敏感性进行分析: 假定模拟的道路长度 $L = 1500$ m, 在道路上行驶的车辆数为 N . 选择周期性边界作为模拟交通系统的边界条件, 即视 L 长的道路为一条环形

道路, N 辆车永远行驶在该道路上. 为了分析引入 V2V 后, 跟驰模型在不同参数下交通流受到小扰动的影响, 给予交通系统的初始值以小扰动:

$$v_n(0) = V(\Delta x_n(0)),$$

$$x_n(0) = \begin{cases} 1, & \text{if } n = 1, \\ (n-1)L/N, & \text{if } n > 1. \end{cases}$$

在进行敏感性分析时, 修改 N , α 和 T 的取值, 并在交通流运行稳定 (10^4 s) 后, 记录交通流运行的平均速度.

图 6 所示为小扰动下, 当 $T = 0.8, 1.0, 1.2, 1.3$ s 时, 不同 α 取值下速度随车辆数 N 的变化. 通过对比可以发现: 1) 在 T 保持固定的情况下, 随着 α 取值的增大, 初始小扰动对稳定后的交通流运行的影响将逐渐降低, 当 $\alpha > 0.5$ 时, 在 $T \in (0.8, 1.3)$ 范围内, 初始小扰动对跟驰交通系统的影响则很不显著, 交通流的运行较为稳定; 2) 在 α 保持固定的情况下, 随着 T 的增大, 初始小扰动对交通流运行的影响逐渐增大. 上述两点的变化趋势与前述通过线性稳定条件 (18) 式的理论分析结论一致.

更为重要的是, 对图 6 中的任一子图进行分析可以发现: 当跟驰交通系统中的车辆非常少时, 交通系统的速度波动非常小, 可以认为此时的交通流运行是稳定的; 随着交通系统中的车辆逐渐增多, 初始小扰动开始影响交通流的运行, 交通系统开始变得不稳定; 随着系统中的车辆数增加到一定的程度, 初始小扰动的影响开始减小并最终逐渐消失. 并且, 在初始小扰动的影响区域内, 初始小扰动对交通流的影响呈现出两个不同阶段: 在开始时, 小扰动的影响使得交通流的运行平均速度降低, 但降低的幅度较小; 在经过某一平衡点后 (该点交通流又趋向于稳定, 速度的变化幅度小, 在图 6 中的平衡点为 $N = 90$), 初始小扰动的影响使得交通流的运行平均速度增大, 且速度增大的幅度非常大.

通过敏感性分析可以发现, V2V 跟驰模型对 α 和 T 的取值均敏感. 交通流系统在不同的 α 和 T 的取值下稳定性表现符合线性稳定条件 (18) 式. 可以认为, V2V 技术的引入可以在一定程度上提升整体交通流运行的速度, 特别是在交通流较为拥挤的情况下.

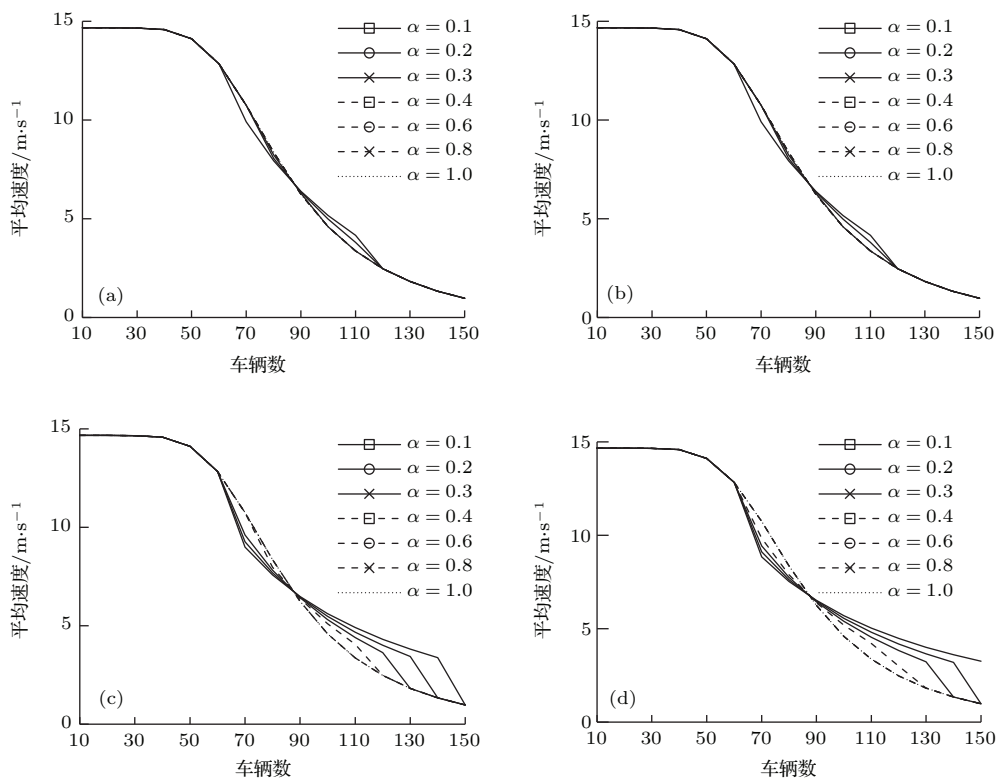


图 6 不同 α 和 T 下的交通流平均速度 (a) $T = 0.8$ s; (b) $T = 1.0$ s; (c) $T = 1.2$ s; (d) $T = 1.3$ s

Fig. 6. Average speed under different α and T : (a) $T = 0.8$ s; (b) $T = 1.0$ s; (c) $T = 1.2$ s; (d) $T = 1.3$ s.

4.4 密度波

在小扰动下交通系统的非线性密度波的传播是非常常见的交通流体现象. 同样采用与4.3节类似的模拟方法来研究初始小扰动存在下的V2V跟驰系统的密度波的传播. 数值模拟的初始条件为: 假定模拟的道路长度 $L = 1700$ m, 在道路上行驶的车辆数固定为 $N = 100$, 其余数值模拟的条件与4.3节一致. 在进行密度波的传播分析时, 修改 α 的取值, 并在交通流运行稳定后, 记录各车辆与前车的车头间距数值.

图7所示为当 $T = 1.2$ s 时 α 取 0.3, 0.5 及 0.7 时, 经过 10^5 s 后, N 辆车的车头间距的变化. 根据

线性稳定条件(18)式及图1的分析, 在 $T = 1.2$ s 时, 若 $\alpha = 0.3$ 或 0.5, 在小扰动下交通系统的运行将不稳定. 而若 $\alpha = 0.7$ 时, 即使存在小扰动, 交通流也将稳定运行. 由图7(a)、图7(c)及图7(e)可以看出, 在 $\alpha = 0.3$ 时交通流系统的波动较大, 车头间距在 7.5 m 与 26 m 之间变动, 交通系统会出现局部的拥堵情况, 且拥堵并不会随着时间而消逝. 随着 α 的变大, 交通流的运行越来越稳定, 车头间距的波动范围越来越小. 在图7(e)中 ($\alpha = 0.7$), 交通流的运行完全没有受到小扰动的影响, 这与前述通过线性稳定条件(18)式理论分析的结论一致. 图7(b)、图7(d)及图7(f)则具体给出了当 $t = 1.14 \times 10^5$ s 时刻的密度波波形.

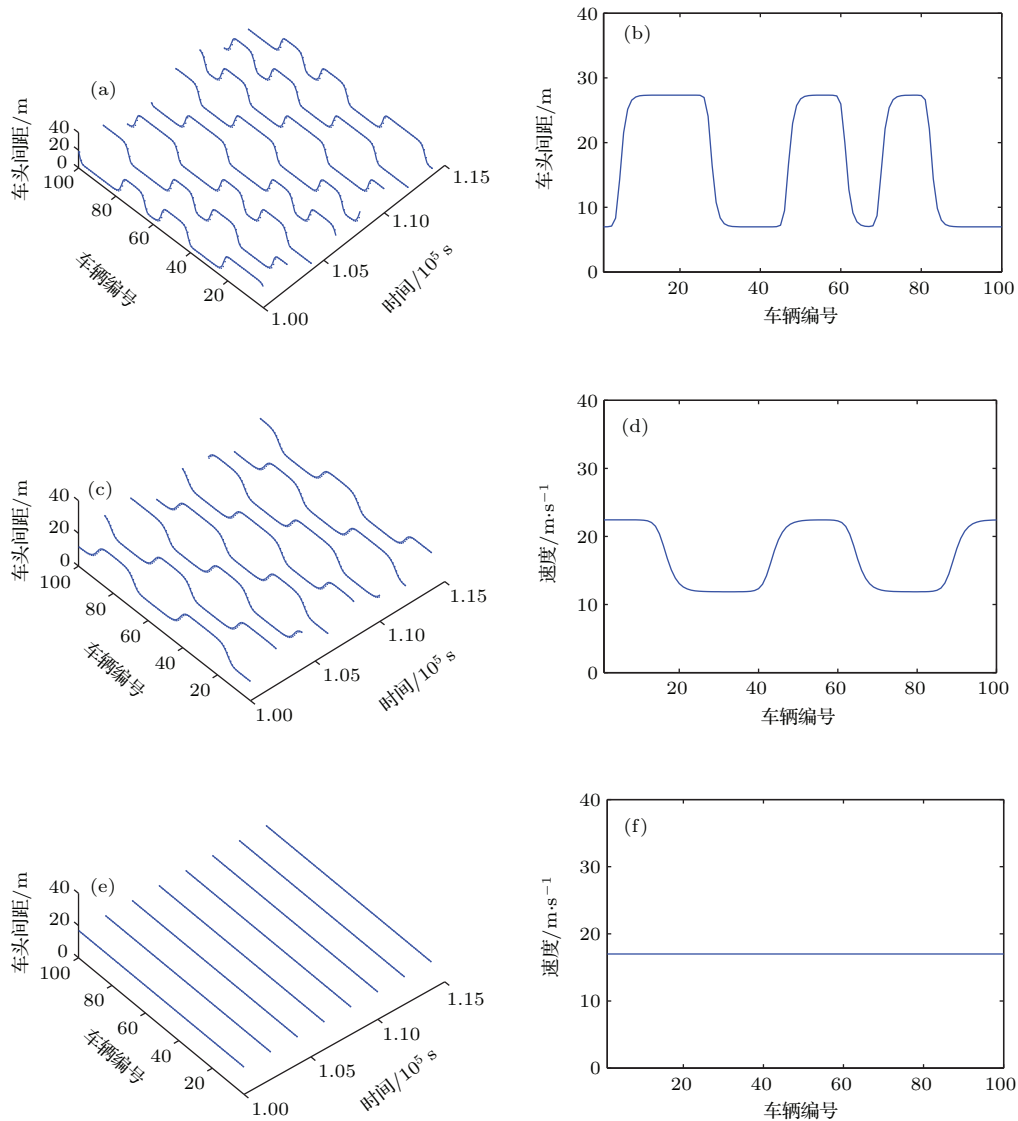


图7 密度波的变化 (a) 密度波传播 ($\alpha = 0.3$); (b) 密度波波形 ($\alpha = 0.3$); (c) 密度波传播 ($\alpha = 0.5$); (d) 密度波波形 ($\alpha = 0.5$); (e) 密度波传播 ($\alpha = 0.7$); (f) 密度波波形 ($\alpha = 0.7$)

Fig. 7. Density wave with different α : (a) Density wave ($\alpha = 0.3$); (b) waveform ($\alpha = 0.3$); (c) density wave ($\alpha = 0.5$); (d) waveform ($\alpha = 0.5$); (e) density wave ($\alpha = 0.7$); (f) waveform ($\alpha = 0.7$).

4.5 迟滞回环

迟滞回环是由不同车头间距下交通流运行时最大及最小车速所围成的曲线. 在回环上的相同横坐标的两个点 (x, y_s) , (x, y_L) 分别表示当车头间距为 x 时, 交通流的可能最小及最大速度. 迟滞回环的大小可以表征交通流的稳定性: 迟滞回环越大则交通流系统的稳定性越差, 受到扰动后的波动越大; 反之则交通流越稳定, 交通流的波动越小. 图 8 所示为 $T = 1.2$ s 时不同参数 α 取值下的迟滞回环曲线. 在图 8 中, 实线(点)表示不同 α 取值下的迟滞回环曲线, 虚线为最优速度曲线. 由图 8 可知, 随着 α 的增大, 迟滞回环的面积变小, 交通系统的运行越稳定. 可以看出, 迟滞回环的结果与中性稳定条件 (18) 式所得到的结论是一致的.

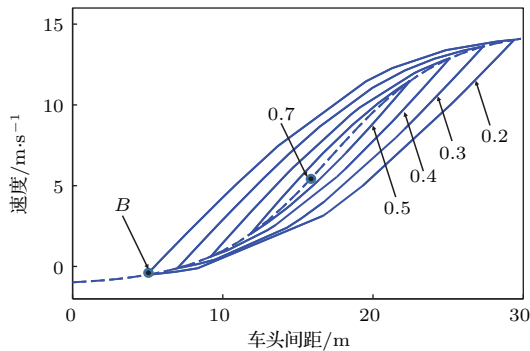


图 8 (网刊彩色) 不同 α 取值下的迟滞回环

Fig. 8. (color online) Hysteresis loops with different α .

此外在图 8 中, 有两类点需要特别注意. 当 $\alpha = 0.2$ 时, 其对应的回环上部分点的速度小于 0 (如点 B). 此时, 相邻车辆间的间距将小于最小间距, 这与实际的交通流运行间存在一定的差异. 文献 [39] 中提出, 点 B 的出现可能是由于有限尺寸效应所造成的, 这种情况需要后续的研究加以确认. 另外当 $\alpha = 0.7$ 时, 回环退化为最优速度曲线上的一个点. 此时, 交通流的运行稳定, 在小扰动下也不会出现交通流的拥堵现象.

5 结 论

本文在 Newell 跟驰模型的基础上, 建立了考虑 V2V 通讯技术影响的单车道跟驰模型, 研究了 V2V 技术对交通流运行的影响. 根据 V2V 设备可实时地提供交通信息的特征, 在 Newell 跟驰模型中

引入了反映驾驶员在收到 V2V 提供的交通信息后的提前反应程度的参数 α : α 越大表示驾驶员在接收到交通信息后的提前反应越快, 反之则提前反应越慢. 通过泰勒展开至加速度项, 获取了考虑 V2V 的跟驰模型. 根据线性稳定分析方法, 得到 V2V 跟驰模型的中性稳定条件. 最后通过数值模拟, 研究 V2V 技术对交通流运行的影响, 分析不同 α 取值下交通流密度波及迟滞回环的变化.

本文的研究表明: 在引入 V2V 后, 交通流在加速起步、减速刹车及遇到突发事件时, 车辆运行的安全性和舒适性均得到不同程度的提升; 参数 α 的增大可以有效提升 V2V 跟驰模型在不同交通环境下的运行稳定性. 此外, 密度波及迟滞回环的模拟结果也与中性稳定条件保持一致. 和 FVD 跟驰模型相比, 本文提出的跟驰模型可以很好地模拟引入 V2V 设备后交通流的变化趋势.

最后需要指出的是, 本研究中引入的 V2V 车与车互联通讯技术还处于 V2V 的第一阶段, 即通过 V2V 向驾驶者实时地提供交通运行的必要信息. 未来随着以无人驾驶汽车为代表的研究的深入, V2V 将不仅仅提供信息给驾驶者, 而是基于交通运行信息实现部分无人驾驶的功能. 在这种情况下, 交通流的运行必然将呈现出新的特征. 因此, 在未来的研究中, 有必要在现有的跟驰模型中考虑此种影响.

参考文献

- [1] Hua X D, Wang W, Wang H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084502 (in Chinese) [华雪东, 王伟, 王昊 2011 物理学报 **60** 084502]
- [2] Chowdhury D, Santen L, Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199
- [3] Helbing D 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 1067
- [4] Tang T Q, Shi W F, Shang H Y, Wang Y P 2014 *Non-linear Dyn.* **76** 2017
- [5] Lighthill M J, Whitham G B 1955 *Proc. Roy. Soc. Ser. A* **22** 317
- [6] Richards P I 1956 *Oper. Res.* **4** 42
- [7] Pipes L A 1969 *Transp. Res.* **3** 229
- [8] Payne H J 1971 *Models of Freeway Traffic and Control: Mathematical Models of Public Systems* **1** 51
- [9] Kuhne R D 1984 *Proceeding 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory* Delft, Netherlands, July 11–13, 1984 p21
- [10] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J 2002 *Transp. Res. B* **36** 405
- [11] Xue Y, Dai S Q 2003 *Phys. Rev. E* **68** 066123

- [12] Tang T Q, Caccetta L, Wu Y H, Huang H J, Yang X B 2014 *J. Adv. Transp.* **48** 304
- [13] Tang T Q, Shi W F, Yang X B, Wang Y P, Lu G Q 2013 *Physica A* **392** 6300
- [14] Peng G H, Song W, Peng Y J, Wang S H 2014 *Physica A* **398** 76
- [15] Redhu P, Gupta A K 2015 *Physica A* **421** 249
- [16] Gupta A K, Sharma S 2010 *Chin. Phys. B* **19** 110503
- [17] Gupta A K, Sharma S 2012 *Chin. Phys. B* **21** 015201
- [18] Peng G H, Cai X H, Cao B F, Liu C Q 2012 *Physica A* **391** 656
- [19] He Z C, Sun W B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 108901 (in Chinese) [何兆成, 孙文博 2013 物理学报 **62** 108901]
- [20] Tang T Q, He J, Yang S C, Shang H Y 2014 *Physica A* **413** 583
- [21] Yu L, Shi Z K, Li T 2014 *Phys. Lett. A* **378** 348
- [22] Ge H X, Meng X P, Zhu H B, Li Z P 2014 *Physica A* **408** 28
- [23] Koutsopoulos H N, Farah H 2012 *Transp. Res. B* **46** 563
- [24] Ge H X, Yu J, Lo S M 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 50502
- [25] Ge H X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 090502
- [26] Zhou T, Sun L H, Zhao M, Li H M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 090205
- [27] Punzo V, Ciuffo B, Montanino M 2012 *Transp. Res. Rec.* **2315** 11
- [28] Lakouari N, Bentaleb K, Ez-Zahraouy H, Benyoussef A 2015 *Physica A* **439** 132
- [29] Yang D, Qiu X P, Yu D, Sun R X, Pu Y 2015 *Physica A* **424** 62
- [30] Jing M, Deng W, Wang H, Ji Y J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 244502 (in Chinese) [敬明, 邓卫, 王昊, 季彦婕 2012 物理学报 **61** 244502]
- [31] Feng S M, Li J Y, Ding N, Nie C 2015 *Physica A* **428** 90
- [32] Lárraga M E, Alvarez-Icaza L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 050701
- [33] Qian Y S, Shi P J, Zeng Q, Ma C X, Lin F, Sun P, Wang H L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 048201
- [34] Ez-Zahraouy H, Jetto K, Benyoussef A 2006 *Chin. J. Phys.* **44** 486
- [35] Gazis D C, Herman R, Potts R B 1959 *Oper. Res.* **7** 499
- [36] Newell G F 1961 *Oper. Res.* **9** 209
- [37] Herman R, Montroll E W, Potts R B, Rothery R W 1959 *Oper. Res.* **7** 86
- [38] Bando M, Hasebe K, Nakayama A, Shibata A, Sugiyama Y 1995 *Phys. Rev. E* **51** 1035
- [39] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J 2001 *Phys. Rev.* **64** 017101
- [40] Knorr F, Schreckenberg M 2012 *Physica A* **391** 2225
- [41] Jin W L, Recker W W 2006 *Transp. Res. B* **40** 230
- [42] Kerner B S, Klenov S L, Brakemeier A 2008 *Intelligent Vehicles Symposium (IEEE)* Eindhoven, Netherlands, June 4–6, 2008 p180
- [43] Ngoduy D, Hoogendoorn S P, Liu R 2009 *Physica A* **388** 2705
- [44] Helbing D, Tilch B 1998 *Phys. Rev. E* **58** 133
- [45] Zhou J 2015 *Nonlinear Dyn.* **81** 549
- [46] Zhao X, Gao Z Y 2005 *Eur. Phys. J. B* **47** 145
- [47] Zhao X, Gao Z Y 2007 *Physica A* **375** 679

A car-following model with the consideration of vehicle-to-vehicle communication technology*

Hua Xue-Dong Wang Wei[†] Wang Hao

(Jiangsu Key Laboratory of Urban ITS, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(Jiangsu Province Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies, Nanjing 210096, China)

(Received 1 September 2015; revised manuscript received 13 October 2015)

Abstract

Recently, the research on traffic flow system based on some classical models, such as cellular automata and car-following models, has attracted much attention. Some meaningful achievements have been obtained in the past few years by scholars from various fields. This paper starts with literature review on traffic flow theory studies. Car-following models, including the initial model proposed by Newell in 1961 (Newell G F 1961 *Oper. Res.* **9** 209) and some later modified ones (e.g. full velocity difference model, or FVD model for short) have been deeply investigated. Based on Newell's car-following model, an extension of car-following model with consideration of vehicle-to-vehicle (V2V) communication is then developed. The vehicle-to-vehicle communication technology, which was proposed in the early 2000s, enable vehicles to collect traffic condition information from other vehicles (e.g. speed, headway, position, acceleration, etc.) and provide them for drivers in almost real time. Compared with those without V2V devices, drivers with information from V2V devices can react to traffic flow fluctuation timelier and more precisely. To represent the pre-reaction of drivers to traffic flow information provided by V2V devices, a parameter, α , is newly introduced into Newell's car-following model. Then by second-order Taylor series expansion, a new car-following model with the influence of V2V (called V2V model) is proposed. Neutral stability condition of V2V model as well as phase diagram is derived theoretically with linear analysis method. The phase diagram of linear stability condition is divided into stable and unstable regions. By analyzing stability performance of the proposed model, it is evident that V2V communication technology can improve the stability of traffic flow system. Numerical simulation is demonstrated to study the influence of V2V devices on traffic flow on the one hand, and to acquire density waves as well as hysteresis loops under different values of parameter α on the other hand. The sensitive analysis method are adopted as well.

The numerical simulation results indicate that: 1) when compared with FVD model, V2V model can make vehicles react to traffic flow fluctuation earlier and reduce the speed changes under start-up, brake and incident conditions; this indicates that the consideration of V2V devices can improve the safety and ride comfort of traffic flow system; 2) the V2V model is sensitive to the value changes of parameter α and T ; the stability of traffic flow can be improved if the value of parameter α increases, or parameter T decreases; this outcome precisely agrees with the above theoretical analysis; 3) the characteristics of traffic flow can influence the performance of V2V technology: compared with under low density condition, V2V communication technology can significantly increase the average speed of traffic flow under high density condition.

Keywords: car-following model, vehicle-to-vehicle technology, linear analysis, numerical simulation

PACS: 05.70.Fh, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.65.010502

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB725402), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51338003), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51478113), and the Scientific Research Foundation of Graduate School of Southeast University, China (Grant No. YBJJ1345).

[†] Corresponding author. E-mail: wangwei@seu.edu.cn