

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022120124041974

文章编号: 1674-599X(2024)02-0127-11

引用格式: 尹砚铎, 龙科军, 谷健. 考虑驾驶员记忆的多前车速度差跟驰模型研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(2): 127-137.

Citation: YIN Yanduo, LONG Kejun, GU Jian. Research on multi-front vehicle speed difference car-following model considering driver's memory [J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 127-137.

## 考虑驾驶员记忆的多前车速度差跟驰模型研究

尹砚铎, 龙科军, 谷健

(长沙理工大学 智能道路与车路协同湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为了探究驾驶员记忆和多前车速度差对交通流的影响, 本文基于全速度差模型(full velocity difference model, FVDM), 结合驾驶员记忆因素和多前车对跟驰车的作用, 构建了一种考虑了驾驶员记忆和多前车速度差的跟驰模型。通过改进模型的线性稳定性特征, 得出改进模型的稳定性条件。再对改进模型下的车流启动和制动过程进行仿真, 并与FVDM的仿真结果作对比。然后采用微小扰动法对改进模型进行数值仿真, 研究驾驶员记忆因素和多前车速度差对交通流稳定性的影响。最后, 利用下一代仿真(next generation simulation, NGSIM)数据标定了改进模型的参数, 并预测了其加速度。研究结果表明: 驾驶员记忆在一定程度上不利于交通流的稳定, 而多前车速度差对稳定交通流具有积极作用; 与FVDM相比, 改进模型的启动延迟和制动延迟分别降低了10.0%和19.0%, 预测精度更高, 均方根误差降低了24.3%。

**关键词:** 驾驶员记忆; 多前车速度差; 跟驰模型; 数值仿真

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

## Research on multi-front vehicle speed difference car-following model considering driver's memory

YIN Yanduo, LONG Kejun, GU Jian

(Hunan Key Laboratory of Smart Highway and Cooperative Vehicle Infrastructure System,  
Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** This study explores the effects of driver memory factors and multi-vehicle speed differences on traffic flow, constructing a model that integrates these elements based on the full velocity difference model (FVDM). The stability conditions of the model were derived by its linear stability characteristics. The traffic initiation and braking processes under the model were simulated and compared with the simulation results of FVDM. A numerical simulation employing the tiny perturbation method was conducted to analyze how driver memory and speed variance among vehicles affect the stability of traffic flow. Finally, the model's parameters were calibrated, and its predictive capability for acceleration was assessed using NGSIM data. The results show that driver memory factor slightly undermines traffic flow stability, while multi-vehicle speed differences has positive effects on

收稿日期: 2022-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52172313); 湖南省自然科学基金青年项目(2021JJ40577); 湖南省教育厅优秀青年项目(20B009)

通信作者: 龙科军(1974—), 男, 教授, 主要从事车路协同系统、交通系统规划与设计方面的研究。

E-mail: longkejun@csust.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

the stability of traffic flow. Compared to the FVDM, the proposed model reduces the start-up delay and braking delay by 10.0% and 19.0%, respectively, and achieves a higher prediction accuracy with a reduction of the root-mean-square error by 24.3%.

**Key words:** driver's memory; speed difference of multiple preceding vehicles; car-following model; numerical simulation

交通拥堵直接影响居民的出行质量和城市发展<sup>[1]</sup>,为解决这问题,研究者提出了许多模型来研究交通流。其中,跟驰模型为微观交通流模型中重要的组成部分,描述了驾驶员个体行为。

REUSCHEL<sup>[2-3]</sup>等从运动学角度提出了车辆跟驰的概念。BANDO等<sup>[4]</sup>提出了著名的最优速度模型(optimal velocity model, OVM),发现车辆速度会根据跟驰车与引导车之间的车头间距自动调节速度,以达到最佳速度。但该模型存在加减速度过大,不符合实际情况的缺陷。为了改进 OVM,JIANG等<sup>[5]</sup>在 OVM 的基础上考虑了正负速度差,并提出了全速度差模型(full velocity difference model, FVDM)。实际仿真结果表明,与 OVM 相比,FVDM 反映的实际车流运行轨迹和跟车行为会更准确。

随着车辆定位与车辆通信技术的发展,跟驰车辆能实时获取引导车辆的有效位置、速度和加速度等信息,为多车辆跟驰模型的研究提供了技术支持<sup>[6]</sup>,同时也为基于 FVDM 的拓展研究创造了条件<sup>[7-10]</sup>。钱宏等<sup>[11]</sup>综合考虑前后车优化速度和速度差影响,构建了跟驰模型。陈龙等<sup>[12]</sup>提出了车路协同环境下考虑坡度和前车信息的跟驰模型。宗芳等<sup>[13]</sup>在全速度差模型的基础上,考虑了多前车和后车的车头间距、速度等因素,提出了一种考虑多前车作用的混行交通流车辆跟驰模型。张兰芳等<sup>[14]</sup>对相邻车道影响主车跟驰行为的机理进行研究,构建了适合局部多车环境的跟驰模型。史昕等<sup>[15]</sup>考虑到多前车的加速度差变化特征,并优化了期望速度,提出一种基于多车状态变化特征的网联车跟驰模型。杨龙海等<sup>[16]</sup>提出了考虑换道压力和换道行为的跟驰模型。

驾驶员记忆对交通流的研究十分重要,ZHANG等<sup>[17]</sup>提出一个考虑驾驶员记忆的模型,发现驾驶员对车辆速度的控制会受到上一时刻车辆速度的影响。CAO等<sup>[18-19]</sup>通过在全速度函数中加入了驾驶员记忆,提出了一种改进跟驰模型,并将车头间距记忆和变化趋势加入原有模型中,提出了一种考

虑驾驶员记忆的改进跟驰模型。MA等<sup>[20]</sup>提出了一种基于全速度差模型,并考虑后视效应和车头时距随记忆变化的跟车模型。SUN等<sup>[21]</sup>提出了一种考虑了驾驶员记忆和多前车平速度影响的跟驰模型。宋慧等<sup>[22]</sup>考虑到前后车间距最优速度和最优速度记忆项等因素,构建了适用于网联混行车流的跟驰模型。WANG等<sup>[23]</sup>为研究交通流动态特性,提出了一个考虑车头时距记忆和后车影响的跟驰模型。MA等<sup>[24]</sup>研究出一种基于驾驶行为记忆的驾驶风格识别技术,构建了改进跟驰模型。PAN等<sup>[25]</sup>引入驾驶员对前方车辆的记忆作为影响驾驶行为的因素,提出了一种改进跟驰模型。根据以上研究可知,交通流稳定性会受到驾驶员记忆的影响,因此有必要对驾驶员记忆进行研究。

通过分析发现,引导车和跟驰车驾驶员记忆对跟车行为均有影响。已有研究从多前车的速度、位置、加速度等方面探讨了跟驰模型,虽证明了驾驶员的记忆对交通流稳定性的影响,但同时考虑了驾驶员的记忆和多前车的速度差的跟驰模型的研究鲜见。考虑到多前车对跟驰车的影响程度不同,本文基于 FVDM,提出了一种考虑驾驶员记忆和多前车速度差的跟驰模型。通过利用 NGSIM 数据标定模型参数,研究多前车情况下的跟驰特征。

## 1 模型

实际跟车环境中,跟驰车辆会受到前方多辆车的影响,并且驾驶员通常会保留对前一时刻引导车状态的记忆信息。因此,本文假设车辆可以实时获得前方多辆车(多前车)的速度、加速度等信息。在 FVDM 的基础上,提出了一种考虑驾驶员记忆和多前车速度差的跟驰模型,FVDM 如式(1)所示,改进模型如式(2)所示。

$$\frac{dv_n(t)}{dt} = a[V(\Delta x_n(t)) - v_n(t)] + \lambda \Delta v_n(t) \quad (1)$$

$$\frac{dv_n(t)}{dt} = a \left[ V \left( \frac{1}{\tau_0} \int_{t-\tau_0}^t \Delta x_n(u) du \right) - v_n(t) \right] + \lambda \sum_{l=1}^m \mu_l \Delta v_{n+l-1}(t) \quad (2)$$

式中: $v_n(t)$ 和 $x_n(t)$ 分别为第 $n$ 辆车在 $t$ 时刻的速度和位置; $\Delta x_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t)$ 为连续两辆车在 $t$ 时刻的车头间距; $a = 1/\tau$ 为最佳速度与当前速度之差的敏感系数; $\tau$ 为跟驰车速度的响应时间; $\tau_0$ 为驾驶员的记忆时间; $m$ 为前方可能引导的车辆数量,一般取值为3; $\lambda$ 为多前车速度差对跟驰车加速度的影响因子; $\mu_l$ 为不同位置前车影响的权重系数, $\mu_1$ 为第一辆前车对跟驰车的影响权重系数; $V(\cdot)$ 为最优速度函数。

HELBING等<sup>[5]</sup>提出最优速度函数公式(3),该公式广泛运用于跟驰模型研究中。

$$V(\Delta x_n(t)) = V_1 + V_2 \tanh [c_1(\Delta x_n(t) - l_c) - c_2] \quad (3)$$

式中: $l_c$ 为车辆长度,一般将其取为5.0 m。

其中, $V_1=6.75$  m/s,  $V_2=7.91$  m/s,  $c_1=0.13$ ,  $c_2=1.57$ 。

考虑公式中含有积分运算,不利于后续分析,根据积分中值定理,简化 $\frac{1}{\tau_0} \int_{t-\tau_0}^t \Delta x_n(u) du$ ,  $\tau_1 \in [t - \tau_0, t]$ ,得到式(4)。

$$\frac{1}{\tau_0} \int_{t-\tau_0}^t \Delta x_n(u) du = \Delta x_n(t - \tau_1) \quad (4)$$

将 $\Delta x_n(t - \tau_1)$ 进行泰勒展开,同时忽略非线性项,得到式(5)。

$$\Delta x_n(t - \tau_1) = \Delta x_n(t) - \tau_1 \frac{d\Delta x_n(t)}{dt} \quad (5)$$

因此,最优速度函数可以转换为式(6)。

$$V(\Delta x_n(t - \tau_1)) = V((\Delta x_n(t) - \tau_1 \Delta v_n(t)) V'(\Delta x_n(t))) \quad (6)$$

将式(6)带入式(2)中,可化为式(7)。

$$\frac{dv_n(t)}{dt} = a \left[ V(\Delta x_n(t)) - \tau_1 \Delta v_n(t) V'(\Delta x_n(t)) - v_n(t) \right] + \lambda \sum_{l=1}^m \mu_l \Delta v_{n+l-1}(t) \quad (7)$$

## 2 稳定性分析

为分析改进模型的线性稳定性,研究了驾驶员记忆和多前车速度差对交通流稳定性的影响。

为了简化计算过程,将式(7)改写为式(8):

$$\frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} = a \left[ V(\Delta x_n(t)) - \tau_1 \Delta v_n(t) V'(\Delta x_n(t)) - v_n(t) \right] + \lambda \sum_{l=1}^m \mu_l \Delta v_{n+l-1}(t) \quad (8)$$

其中, $l = 1, 2, \dots, m; m \ll N$ 。

假设车辆间的车头间距均为 $h$ ,对应的最优速度为 $V(h)$ 。此时,交通流处于稳定状态,则车辆位置为

$$x_n^0(t) = hn + y_n(t) \quad (9)$$

其中, $h = L/N$ ,  $L$ 为路段长度,  $N$ 为车辆总数。

将一个微小扰动加入稳定交通流中,即 $y_n(t) = \exp(ikn + zt)$ ,则有

$$x_n(t) = x_n^0(t) + y_n(t) \quad (10)$$

将式(9)~(10)带入式(8),得到

$$\frac{d^2 y_n(t)}{dt^2} = a \left[ V'(h) \Delta y_n(t) - \tau_1 V'(h) \Delta y'_n(t) - y'_n(t) \right] + \frac{\lambda \sum_{l=1}^m \mu_l d\Delta y_n(t)}{dt} \quad (11)$$

将式(11)泰勒展开,并将 $y_n(t) = \exp(ikn + zt)$ 代入,可得式(12)。

$$z^2 = a \left[ V'(h)(e^{ik} - 1) - p z \tau V'(h)(e^{ik} - 1) - z \right] + z \lambda \sum_{l=1}^m \mu_l (e^{ikl} - e^{ikl-ik}) \quad (12)$$

其中,  $V'(h) = (dV(\Delta x)/d(\Delta x))|_{\Delta x_n = h}$ ,  $\Delta y_n(t) = y_{n+1}(t) - y_n(t)$ 。为方便计算,令 $\tau_1 = p\tau$ ,  $p > 0$ ,  $p$ 为 $\tau_1$ 与 $\tau$ 的比例系数,代表驾驶员的记忆时间。

将参数 $z$ 展开为 $z = z_1(ik) + z_2(ik)^2$ ,  $ik$ 同幂系数相等,则

$$z_1 = V'(h) \quad (13)$$

$$z_2 = \frac{V'(h)}{2} - \frac{p[V'(h)]^2}{a} - \frac{[V'(h)]^2}{a} + \frac{\lambda \sum_{l=1}^m \mu_l V'(h)}{a} \quad (14)$$

若 $z_2$ 为负数,那么原本均匀的交通流将变得不稳定;若 $z_2$ 为正数,即使初始均匀的交通流受到小的干扰,但仍然可以保持稳定状态。临界稳定曲线的公式为

$$a = 2[(p+1)V'(h) - \lambda \sum_{l=1}^m \mu_l] \quad (15)$$

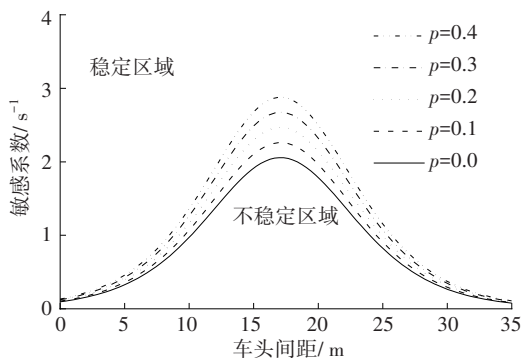
因为 $\mu_i$ 为不同位置前车的影响权重,所以

$$\sum_{i=1}^m \mu_i = 1, \text{则临界稳定曲线可改写为}$$

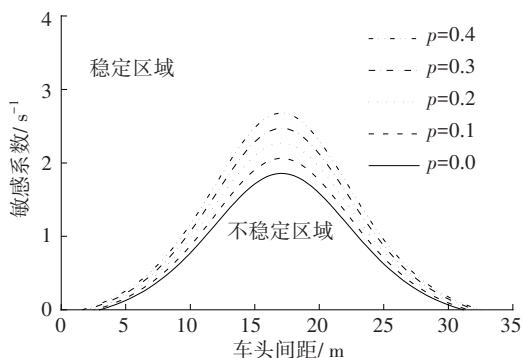
$$a = 2[(p+1)V'(h) - \lambda] \quad (16)$$

根据稳定性曲线公式,得到不同 $p$ 值和 $\lambda$ 值条件下的车头间距与敏感系数的曲线,如图1所示。在图1中,不同线形代表不同 $p$ 值和 $\lambda$ 值条件下的稳定曲线。曲线与横坐标围成的区域为不稳定区域。

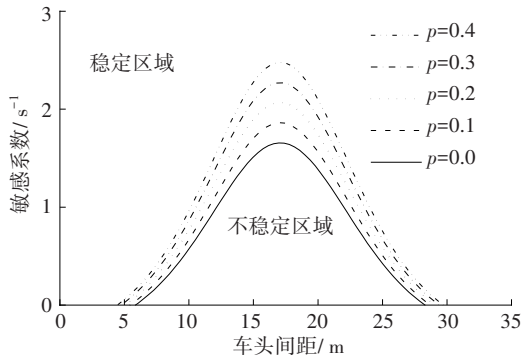
从图1可以看出,当 $\lambda$ 值固定时,随着 $p$ ( $p = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ )的增加,临界敏感度和不稳定区域面积逐渐增大,稳定区域逐渐减少。这表明,随着驾驶员记忆影响程度的增加,车流将变得不稳定。当 $\lambda$ 值不断增大,稳定区域逐渐扩大,车流也变得更加稳定。这表明,考虑了多前车速度差,可以有效地帮助稳定交通流,提升车流的稳定性。



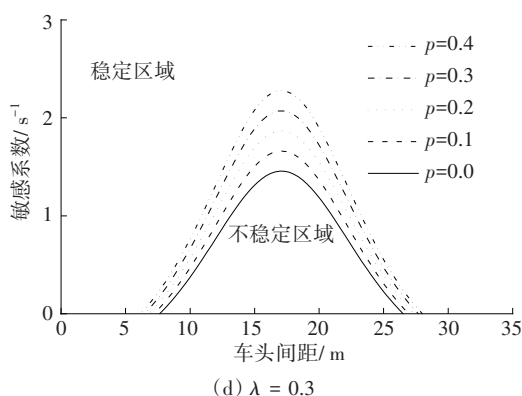
(a)  $\lambda = 0.0$



(b)  $\lambda = 0.1$



(c)  $\lambda = 0.2$



(d)  $\lambda = 0.3$

图1 不同 $p$ 值和 $\lambda$ 值条件下的稳定性曲线

Fig. 1 The stability curves with different values of  $p$  and  $\lambda$

### 3 数值仿真

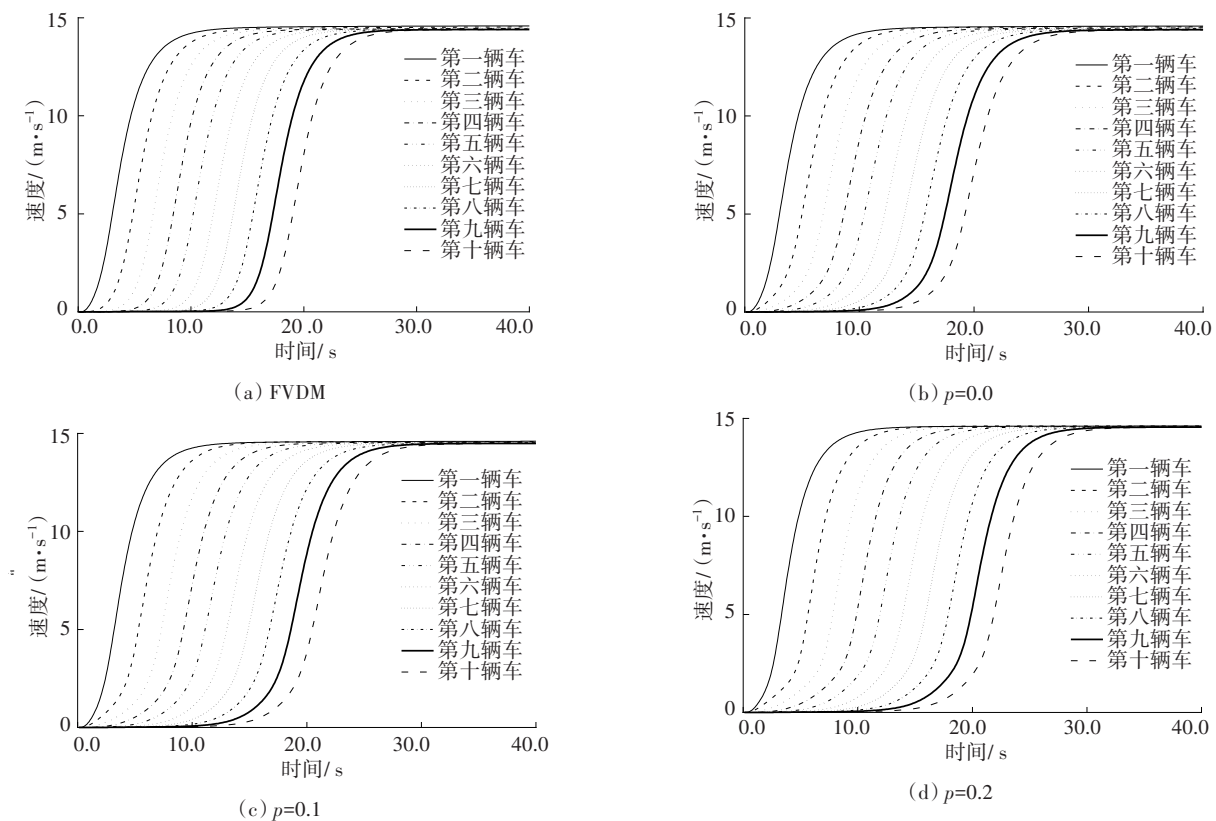
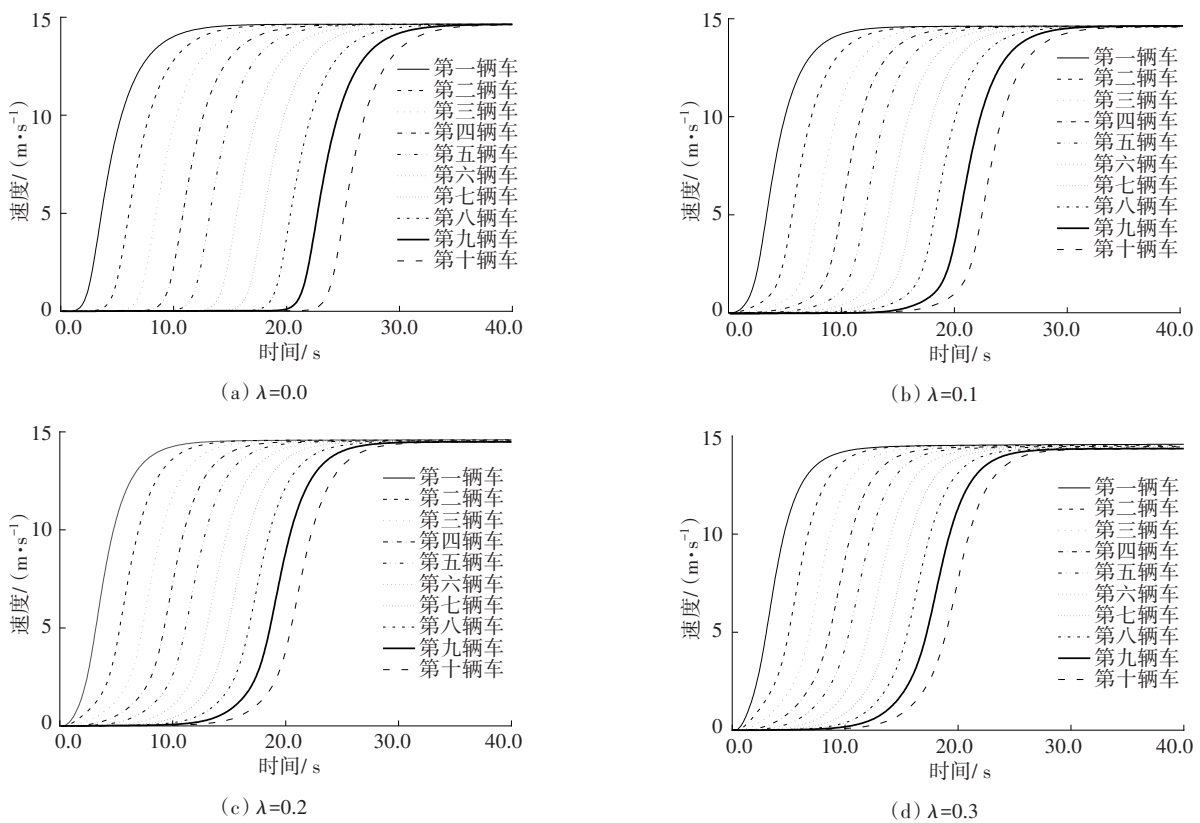
#### 3.1 车辆启动过程的数值仿真

本研究模拟了在改进模型下的车流启动过程,并与使用FVDM的车流启动过程进行了对比,同时考虑了驾驶员记忆和多前车速度差对车流启动的影响。具体仿真场景如下:假设有11辆车在红灯前等待,车辆间的车头间距为7.4 m,每辆车的初始速度都为0.00 m/s。当红灯转变为绿灯时,第一辆车开始加速,之后各辆车逐渐开始加速。本次模拟试验的时间步长为0.1 s,  $a = 0.41$ ,  $\mu_1 = 0.6$ ,  $\mu_2 = 0.3$ ,  $\mu_3 = 0.1$ 。

令 $\lambda = 0.2$ ,FVDM和改进模型在不同 $p$ 值情况下的模拟结果如图2所示。令 $p = 0.1$ ,不同 $\lambda$ 值情况下的模拟结果如图3所示。车辆启动过程中的加速度变化如图4所示。

10辆跟驰车在FVDM和不同 $p$ 值的改进模型下速度的变化规律如图2所示。根据仿真结果可知,使用FVDM的最后一辆车在第15.0 s时逐渐启动,而使用改进模型的最后一辆车分别在第12.0 s( $p = 0.0$ )、第12.7 s( $p = 0.1$ )、第13.5 s( $p = 0.2$ )开始启动。FVDM的启动延迟高于改进模型的启动延迟,改进模型的启动延迟比FVDM的至少降低了10%,因此改进模型比FVDM能获得更快的启动速度。但随着 $p$ 值的增加,改进模型的启动延迟逐渐增加,这表明驾驶员的记忆因素并不利于车流更快启动与车道的清空。



图2 跟驰车辆在FVDM和不同 $p$ 值的改进模型下启动过程中的速度变化Fig. 2 Following vehicles' speeds of the FVDM and the improved model with different  $p$  values during the startup process图3 跟驰车辆在不同 $\lambda$ 值的改进模型下启动过程中的速度变化Fig. 3 Following vehicles' speeds of the improved model with different  $\lambda$  values during the start process

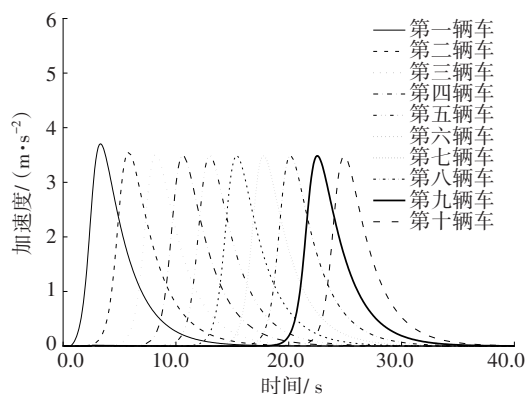
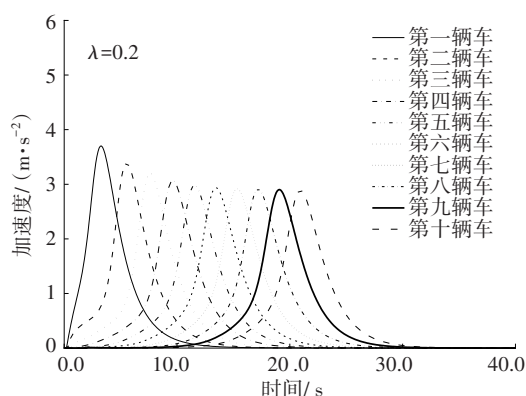
(a)  $\lambda=0.0$ (b)  $\lambda=0.2$ 

图4 跟驰车辆在不同 $\lambda$ 值的改进模型下启动过程中的加速度变化

Fig. 4 Acceleration of the following vehicles with different  $\lambda$  values during the start process

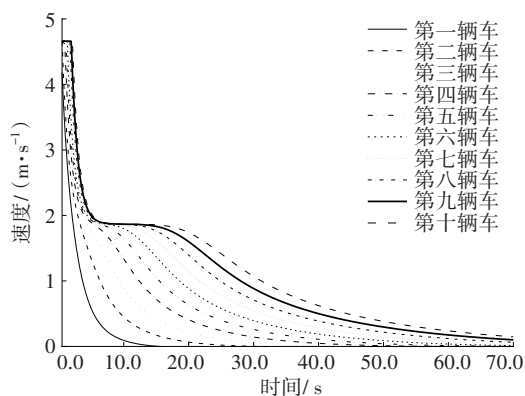
10辆跟驰车在不同 $\lambda$ 值的改进模型条件下启动过程的速度变化规律如图3所示。从图3可以看出,随着 $\lambda$ 值的增加,车辆的启动延迟逐渐减小,这表明车辆启动时的速度受到了多前车速度差的影响。因此,考虑多前车速度差,能够帮助车流更快启动与车道的清空。

10辆跟驰车车辆在 $p = 0.1$ ,  $\lambda = 0.0$ 和 $\lambda = 0.2$ 条件下,启动过程中的加速度变化规律如图4所示。从左至右依次为第1辆车和后续9辆车的加速度变化曲线。从图4可以看出, $\lambda = 0.0$ 时的加速度响应时间大于 $\lambda = 0.2$ 时的加速度响应时间。

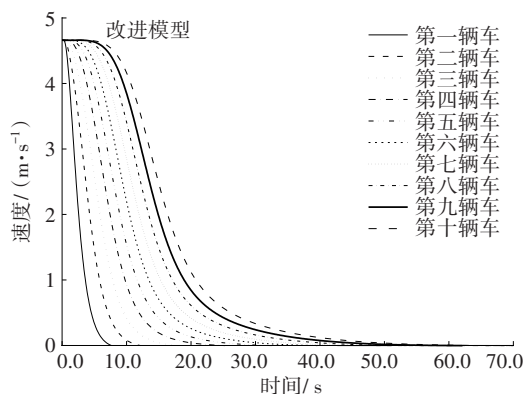
### 3.2 车辆制动过程的数值仿真

基于改进模型与FVDM,模拟车辆的制动过程。在本次模拟中,将全部车辆的初始速度设为 $4.66 \text{ m/s}$ ,车头间距设为 $15.0 \text{ m}$ ,其他条件与启动过程模拟时保持一致。

采用FVDM和改进模型模拟车辆制动过程的速度变化规律如图5所示。与FVDM相比,使用改进模型的车辆可以在更短的时间内停止。从图5可以看出,当使用FVDM模拟制动过程时,最后一辆车在第 $70.0 \text{ s}$ 时的速度仍大于 $0.00 \text{ m/s}$ ;而使用改进模型模拟时,最后一辆车在第 $57.0 \text{ s}$ 时速度已经降到 $0.00 \text{ m/s}$ 。这表明,相比于FVDM,使用改进模型的制动延迟降低了至少19%。



(a) FVDM

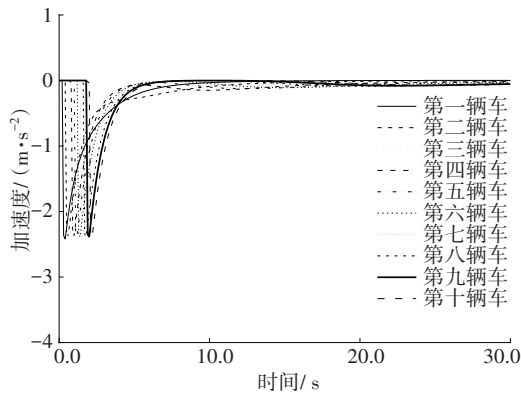


(b) 改进模型

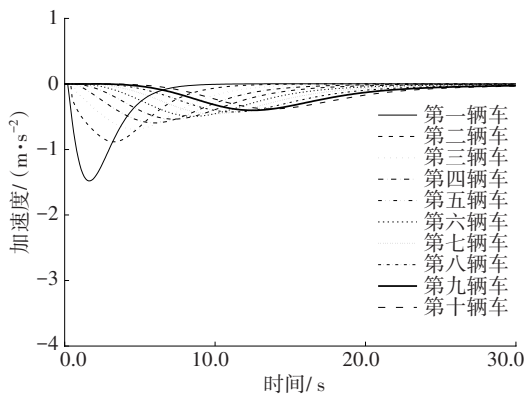
图5 制动过程在FVDM和改进模型条件下车辆的速度变化

Fig. 5 Vehicles' speeds of the FVDM and the improved model during the braking process

采用FVDM和改进模型模拟车辆制动过程的加速度变化规律,如图6所示。由于改进模型考虑到驾驶员记忆,因此其加速度变化比FVDM的加速度变化更平缓。在车辆开始制动 $15.0 \text{ s}$ 之后,使用FVDM的车辆加速度已经接近于 $0.00 \text{ m/s}^2$ ,但其速度仍大于 $0.00 \text{ m/s}$ ,而使用改进模型的车辆仍有加速度,因此,采用改进模型的车辆,其速度会比采用FVDM的更快降到 $0.00 \text{ m/s}$ (车辆完全停止)。



(a) FVDM



(b) 改进模型

图6 制动过程在FVDM和改进模型条件下车辆的加速度变化

Fig. 6 Vehicles' accelerations of the FVDM and the improved model during the braking process

### 3.3 车流环路行驶的数值仿真

为了进一步研究驾驶员记忆和多前车速度差对车流稳定性的影响,在周期性边界条件下,对改进模型进行数值模拟。数值模拟场景如下:100辆车行驶在长度为1 500.00 m的环形跑道上, $a = 2$ , $\mu_1 = 0.6$ , $\mu_2 = 0.3$ , $\mu_3 = 0.1$ 。

初始扰动条件设置如下:

$$v_n(0) = 4.66 \text{ m/s}, n = 1, 2, \dots, 100;$$

$$v_n(1) = 2.33 \text{ m/s}, n = 50;$$

$$v_n(1) = 4.66 \text{ m/s}, n \neq 50;$$

$$\Delta x_n(0) = \Delta x_0 = L/N, n = 1, 2, \dots, 100;$$

$$\Delta x_n(1) = \Delta x_0 = L/N, n \neq 50, n \neq 51;$$

$$\Delta x_n(1) = \Delta x_0 = L/N - 7.5, N = 49;$$

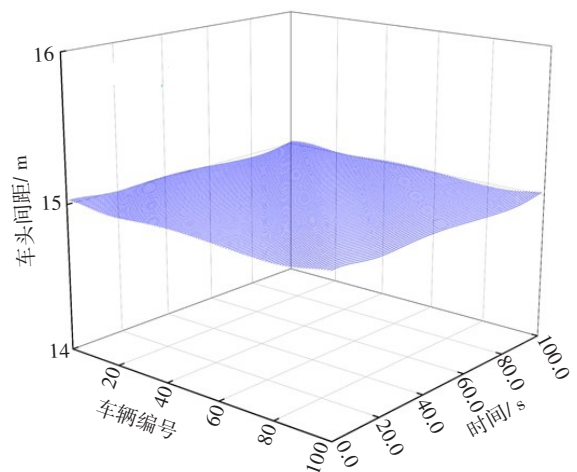
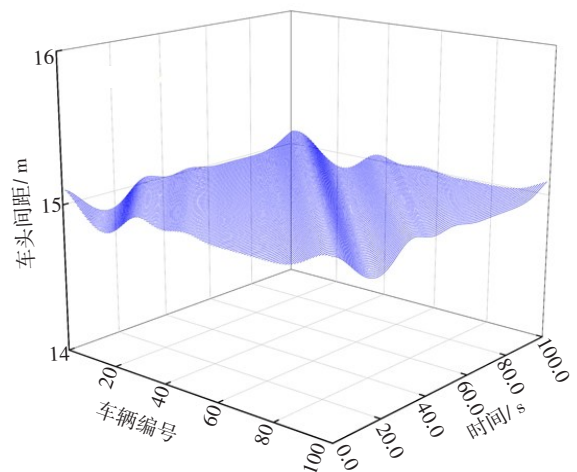
$$\Delta x_n(1) = \Delta x_0 = L/N - 7.5, N = 50。$$

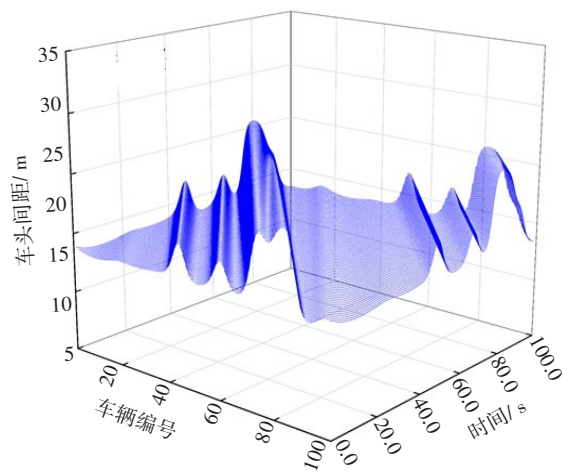
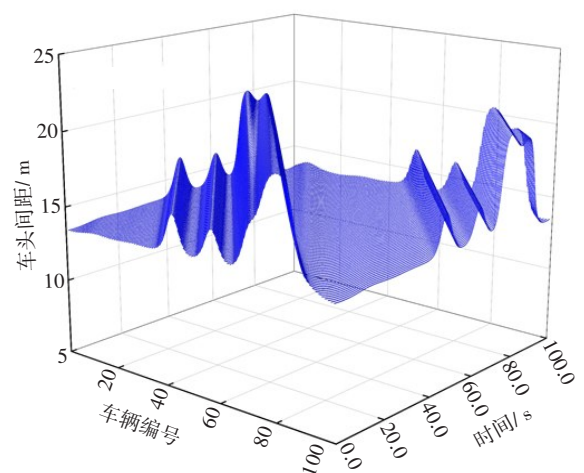
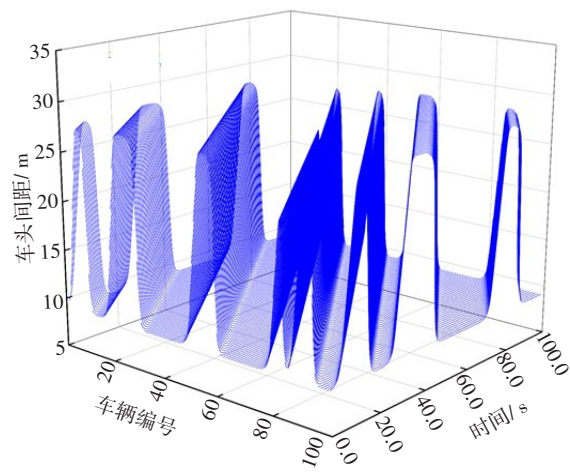
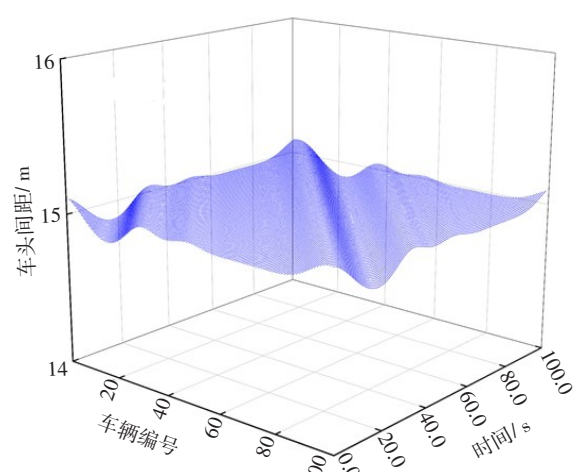
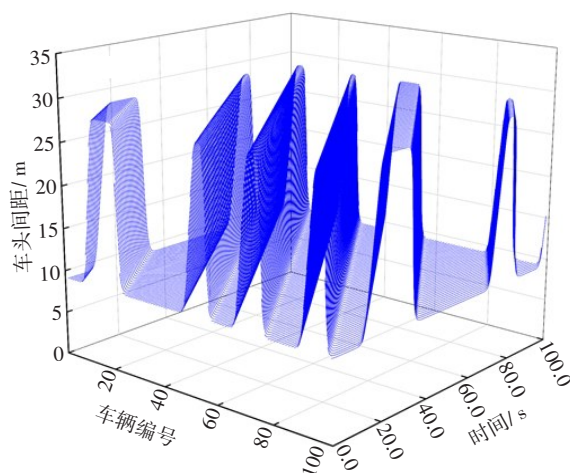
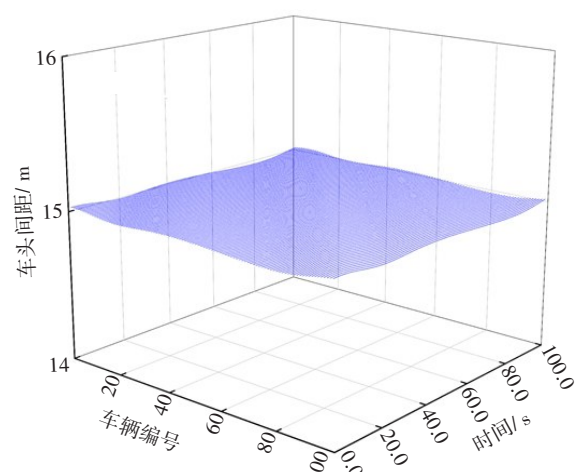
通过数值模拟,得到了车流在第900.0 s到第1 000.0 s内所有车辆间距的变化。

当 $\lambda = 0.2$ , $p$ 分别为0.1、0.2、0.3、0.4时,各车辆

之间的车头间距的变化规律如图7所示。从图7可以看出,车流在运行了1 000.0 s之后,当 $p=0.1$ 时,车辆之间的车头间距已经重新稳定在15.0 m左右。随着 $p$ 值的增加,车辆间的车头间距逐渐波动。当 $p=0.4$ 时,车辆间车头间距的峰值已经达到了30.0 m左右。当受驾驶员记忆影响后,车流之间开始出现走走停停的现象,并且这种现象随着 $p$ 值的增加而逐渐恶化。这表明,驾驶员记忆不利于交通流的稳定性,可能导致交通拥堵的发生。

当 $p = 0.2$ , $\lambda$ 分别为0.0、0.1、0.2、0.3时,各车辆之间的车头间距变化如图8所示。从图8可以看出,随着 $\lambda$ 值的增加,车辆间车头间距的波动范围逐渐减小,车流的运行状态也逐渐趋于稳定。原本车流中出现的走走停停现象也随着 $\lambda$ 值的增加而逐渐消失。这表明,考虑多前车速度差,有利于稳定交通流,也有利于抑制交通拥堵的发生。

(a)  $p=0.1$ (b)  $p=0.2$

(c)  $p=0.3$ (b)  $\lambda=0.1$ (d)  $p=0.4$ (c)  $\lambda=0.2$ 图7 不同 $p$ 值条件下车辆车头间距变化Fig. 7 Distances between vehicles' headway under different  $p$  values(a)  $\lambda=0.0$ (d)  $\lambda=0.3$ 图8 不同 $\lambda$ 值条件下车辆车头间距变化Fig. 8 Distances between vehicles' headway under different  $\lambda$  values



4 模型预测应用

为了测试模型在实际交通数据下的预测效果,本文选取了下一代仿真(next generation simulation, NGSIM)数据集中的I-80公路车辆轨迹数据,时间范围为17:00—17:15。为了确保车辆跟驰数据的合理性与有效性,本文对跟驰数据分别进行了筛选处理和去噪处理。在降噪过程中,采用小波分析(wavelet analysis, WA)技术,部分加速度降噪结果如图9所示。在车速小于30 km/h的情况下,改进模型拟合情况表现较好。

NGSIM数据的提取遵循以下规则:

- 1) 跟驰车和引导车均为小型车;
- 2) 车辆处于跟驰状态的时间大于15.0 s;
- 3) 车辆的速度小于30 km/h;
- 4) 车头间距小于20.0 m。

基于这些条件,提取了4 557条数据样本。利用提取出的数据样本,使用最小二乘法对改进模型参数和FVDM参数进行标定,具体结果见表1~2。本文采用平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、均方误差(mean square error, MSE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)作为评价指标。再使用标定后的改进模型和FVDM进行加速度预测,并将预测结果进行了对比,如图10和表3所示。

表1 改进模型参数标定结果

Table 1 Parameter calibration results of the improved model

$a$	$\tau_1$	$\lambda$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$V_1$	$V_2$	$c_1$	$c_2$
0.133	0.346	0.487	0.814	0.126	0.060	13.693	15.000	0.114	1.874

表2 FVDM参数标定结果

Table 2 Parameter calibration results of the FVDM

$a$	$\lambda$	$V_1$	$V_2$	$c_1$	$c_2$
0.160	0.157	12.538	15.000	0.087 9	1.473 0

表3 误差评价指标

Table 3 Error evaluation index

模型	平均绝对误差	均方误差	均方根误差
FVDM	0.388 9	0.224 9	0.474 3
改进模型	0.272 3	0.129 1	0.359 2

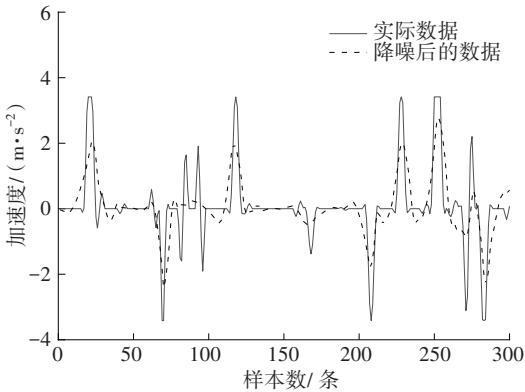


图9 样本降噪结果

Fig. 9 Noise reduction results of the samples

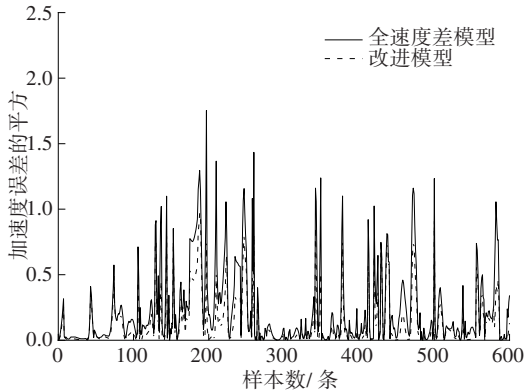


图10 加速度预测误差结果

Fig. 10 Errors results of acceleration prediction

由表1可知,  $\mu_1 > \mu_2 > \mu_3$ , 说明不同位置的前车对跟驰车的影响不同,第一辆引导车的权重值最大,这与数值仿真中的假设相吻合。

从图10可以看出,相比于FVDM,使用改进模型进行加速度预测得到的结果误差更小,更贴近采集数据。同时,由表3可知,改进模型样本的误差评价指标均优于FVDM的,改进模型的平均绝对误差、均方误差和均方根误差相比于FVDM,分别降低了30.0%、42.6%和24.3%,说明改进模型可以更好地描述速度在30 km/h以下时的车辆运动轨迹。

5 结论

本文研究了多前车速度差对跟驰车的影响,以及驾驶员记忆对交通流稳定性的作用。基于FVDM,提出了一种考虑驾驶员记忆的多前车速度差跟驰模型。通过稳定性分析、数值模拟、加速度预测以及误差分析,得出以下结论:

1) 驾驶员记忆时间的增加不利于交通流的稳定性,而多前车速度差则有利于提升交通流的稳定性。

2) 从车流的启动和制动模拟结果来看,与 FVDM 相比,改进模型在车辆启动过程中,可将启动延迟降低 10%,使车辆更快启动,并帮助车流更快地达到临界速度;在制动过程中,改进模型能更快地使车辆完全停止,制动延迟降低了 19%。

3) 利用 NGSIM 数据标定了改进模型参数,其结果表明,在多前车条件下,与跟驰车越接近的前车对跟驰车的影响权重越大,这与理论分析中的假设相吻合。

4) 通过改进模型和 FVDM 分别进行加速度预测,发现改进模型的均方根误差相比 FVDM 降低了 24.3%。这一结果表明,改进模型的预测结果更贴近实际数据。

#### 参考文献(References):

- [1] 张可可, 韩春阳, 周京, 等. 精准管控下的城市交通拥堵状态研判与建模[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(3): 113-120. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.009. ZHANG Keke, HAN Chunyang, ZHOU Jing, et al. Towards smart management and control: a novel approach to identify traffic congestion states in urban areas[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(3): 113-120. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.009.
- [2] REUSCHEL A. Vehicle movements in the column uniformly accelerated or delayed [J]. Oesterrich IngrArch, 1950, 4, 193-215.
- [3] PIPES L A. An operational analysis of traffic dynamics [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(3): 274-281. DOI: 10.1063/1.1721265.
- [4] BANDO M, HASEBE K, NAKAYAMA A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation [J]. Physical Review E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 1995, 51(2): 1035-1042. DOI: 10.1103/physreve.51.1035.
- [5] JIANG R, WU Q, ZHU Z. Full velocity difference model for a car-following theory [J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2001, 64(1 Pt. 2): 017101. DOI: 10.1103/PhysRevE.64.017101.
- [6] NAVAS F, MILANÉS V. Mixing V2V- and non-V2V-equipped vehicles in car following [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 108: 167-181. DOI: 10.1016/j.trc.2019.08.021.
- [7] LIU D W, SHI Z K, AI W H. Modeling for micro traffic flow with the consideration of lateral vehicle's influence [J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020: 8340283. DOI: 10.1155/2020/8340283.
- [8] GUO Y, XUE Y, SHI Y, et al. Mean-field velocity difference model considering the average effect of multi-vehicle interaction [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2018, 59: 553-564. DOI: 10.1016/j.cnsns.2017.11.026.
- [9] 张志勇, 刘振, 蒋理. 车联网环境下考虑侧向间距的跟驰模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(3): 62-68. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbzkb.2021.03.008. ZHANG Zhiyong, LIU Zhen, JIANG Li. A car-following model considering lateral gap in vehicle networking environment [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(3): 62-68. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbzkb.2021.03.008.
- [10] 史昕, 纪艺, 赵祥模, 等. 基于多前车最优速度与加速度的网联车跟驰模型[J]. 现代电子技术, 2020, 43(9): 135-140. DOI: 10.16652/j.issn.1004-373x.2020.09.032. SHI Xin, JI Yi, ZHAO Xiangmo, et al. Car-following model of connected vehicles based on multiple optimal velocities and accelerations [J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(9): 135-140. DOI: 10.16652/j.issn.1004-373x.2020.09.032.
- [11] 钱光宏, 张立东, 王小雷, 等. 基于后向和多前车效应的跟驰建模及仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 161-166. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2022.09.030. QIAN Guanghong, ZHANG Lidong, WANG Xiaolei, et al. Backward looking and multiple preceding vehicles effect car-following model and simulation [J]. Computer Simulation, 2022, 39(9): 161-166. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2022.09.030.
- [12] 陈龙, 刘孟协, 蔡英凤, 等. 车路协同环境下考虑坡度与前车信息的跟驰模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(4): 787-795. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2022.04.021. CHEN Long, LIU Mengxie, CAI Yingfeng, et al. Car-following model considering road gradient and preceding vehicle information in vehicle-infrastructure cooperation environment [J]. Journal of Southeast University

- (Natural Science Edition), 2022, 52 (4): 787-795.  
DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2022.04.021.
- [13] 宗芳,王猛,曾梦,等.考虑多前车作用势的混行交通车辆跟驰模型[J].交通运输工程学报,2022,22(1): 250-262. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2022.01.021.  
ZONG Fang, WANG Meng, ZENG Meng, et al. Vehicle-following model in mixed traffic flow considering interaction potential of multiple front vehicles [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22 (1): 250-262. DOI: 10.19818/j. cnki. 1671-1637.2022.01.021.
- [14] 张兰芳,李根泽,刘婷宇,等.局部多车影响下跟驰行为机理及建模[J/OL].吉林大学学报(工学版):1-11 [2024-04-15]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230584>.  
ZHANG Lanfang, LI Genze, LIU Tingyu, et al. Mechanism and modeling of car-following behavior under local multi-vehicle influence [J/OL]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition): 1-11 [2024-04-15]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230584>.
- [15] 史昕,朱健,赵祥模,等.基于多车状态变化特征的网联车跟驰模型[J].汽车工程,2023,45(8):1309-1319. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2023.08.002.  
SHI Xin, ZHU Jian, ZHAO Xiangmo, et al. Car-following model for connected vehicles based on multiple vehicles with state change features [J]. Automotive Engineering, 2023, 45 (8): 1309-1319. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2023.08.002.
- [16] 杨龙海,车婷婷,马文奎,等.考虑换道压力增益的高速公路分流区跟驰模型研究[J],重庆大学学报,2024.  
YANG Longhai, CHE Tingting, MA Wenkui, et al. Research on car-following model of freeway diversion area considering lane-changing pressure gain[J]. Journal of Chongqing University, 2024
- [17] ZHANG H M. Driver memory, traffic viscosity and a viscous vehicular traffic flow model [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37(1): 27-41. DOI: 10.1016/s0191-2615(01)00043-1.
- [18] CAO B G. A new car-following model considering driver's sensory memory [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2015, 427: 218-225. DOI: 10.1016/j.physa.2015.01.078.
- [19] CAO B G. A car-following dynamic model with headway memory and evolution trend [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 539: 122903. DOI: 10.1016/j.physa.2019.122903.
- [20] MA G Y, MA M H, LIANG S D, et al. Nonlinear analysis of the car-following model considering headway changes with memory and backward looking effect [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 562: 125303. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125303.
- [21] SUN Y Q, GE H X, CHENG R J. An extended car-following model considering driver's memory and average speed of preceding vehicles with control strategy [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 521: 752-761. DOI: 10.1016/j.physa.2019.01.092.
- [22] 宋慧,曲大义,王少杰,等.考虑多车响应的网联混行车流跟驰模型及稳态分析[J/OL].吉林大学学报(工学版):1-14 [2024-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20230407.1426.003.html>.  
SONG Hui, QU Dayi, WANG Shaojie, et al. Connected mixed traffic flow car-following model and stability analysis considering multiple vehicles response [J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition): 1-14 [2024-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20230407.1426.003.html>.
- [23] WANG W J, MA M H, LIANG S D, et al. Density waves in an improved car-following model under intelligent transportation system environment [J]. Modern Physics Letters B, 2022, 36 (15): 2250014. DOI: 10.1142/s0217984922500142.
- [24] MA L J, QU S R, SONG L J, et al. Human-like car-following modeling based on online driving style recognition [J]. Electronic Research Archive, 2023, 31 (6): 3264-3290. DOI: 10.3934/era.2023165.
- [25] PAN Y F, WANG Y J, MIAO B B, et al. Stabilization strategy of a novel car-following model with time delay and memory effect of the driver [J]. Sustainability, 2022, 14(12): 7281. DOI: 10.3390/su14127281.

(责任编辑:罗容;英文编辑:张洪)