

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.005

引用格式: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[J].重庆大学学报,2025,48(8): 40-53.



考虑换道压力增益的高速公路分流区跟驰模型

杨龙海, 车婷婷, 马文奎, 章锡俏, 陈霖
(哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要:为了更精确地描述高速公路分流区内车辆的跟驰行为,基于全速度差模型(full velocity difference model, FVDM)引入换道压力增益因子构建考虑换道压力和换道行为的跟驰模型。首先,对改进后的模型进行线性稳定性分析,发现随着换道增益因子的增大,高速公路分流区的稳定区域变小。其次,基于NGSIM数据集中提取的92辆换道车辆的轨迹数据标定改进的跟驰模型,并通过仿真分析表明,改进后的模型能够更好地模拟车辆的速度和位置,与FVDM相比,所构建的考虑换道压力增益的全速度差跟驰模型(pressure-based FVDM, P-FVDM)的仿真误差降低了16%;与换道全速度差模型(lane pressure FVDM, LP-FVDM)相比,所构建的考虑换道压力增益和换道驶出间距增益的全速度差模型(pressure-lane pressure FVDM, PLP-FVDM)的仿真误差降低了12%。最后,利用改进的跟驰模型仿真分析分流区内的交通震荡现象,发现车辆的换道行为能够引发交通震荡,在较高的行驶速度下交通震荡的振幅会衰减,当行驶速度较低时,速度标准差沿车队向上游呈现凹增长趋势;换道位置离出口匝道越近所引发的交通震荡越严重;换道持续时间越短越有利于抑制交通震荡。

关键词:交通工程;跟驰模型;交通震荡;换道压力;高速公路分流区;数值仿真

中图分类号:U491.265

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)08-040-14

Research on car-following model for freeway diversion area considering lane-changing pressure gain

YANG Longhai, CHE Tingting, MA Wenkui, ZHANG Xiqiao, CHEN Lin

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

Abstract: To more accurately capture vehicle-following behavior in freeway diversion areas, this study proposes an enhanced car-following model by incorporating a lane-changing pressure gain factor into the full velocity difference model (FVDM). The proposed model accounts for both lane-changing pressure and lane-changing behavior. First, a linear stability analysis reveals that the stability region of the freeway diversion area diminishes as the lane-changing pressure gain factor increases. Second, using trajectory data from 92 lane-changing vehicles extracted from the NGSIM dataset, the improved car-following model is calibrated and validated. Simulation

收稿日期:2024-01-16 网络出版日期:2024-03-15

基金项目:黑龙江省自然科学基金(LH2019E052)。

Supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China (LH2019E052).

作者简介:杨龙海(1970—),男,副教授,硕士生导师,主要从事交通流理论、交通规划、交通仿真方向研究,(E-mail) yanglonghai@hit.edu.cn。

通信作者:章锡俏(1978—),男,副教授,硕士生导师,(E-mail)zxqjuly@hit.edu.cn。

results demonstrate that the improved model more accurately reproduces vehicle speed and position. Compared with the original FVDM, the simulation error of the proposed pressure-based FVDM (P-FVDM) is reduced by 16%. Compared with the lane pressure FVDM(LP-FVDM), the proposed pressure-lane pressure FVDM(PLP-FVDM) reduces error by 12%. Finally, the improved model is used to simulate traffic oscillation in the diversion area. Results show that lane changing behavior can trigger traffic oscillations. Higher driving speeds attenuate oscillation amplitudes, while lower speeds result in a concave growth pattern of speed standard deviation along the vehicle platoon in the upstream direction. Furthermore, lane changes occurring closer to the exit ramp exacerbate oscillations, whereas shorter lane-changing duration help suppress them.

Keywords: transportation engineering; car-following model; traffic oscillation; lane-changing pressure; freeway diversion area; numerical simulation

“交通震荡”^[1]是一种车辆“走走停停”的现象^[2],对交通流的运行有严重的负面影响,如:燃料消耗加剧、有害气体排放量大、安全风险剧增、增加行车延误等。换道行为是高速公路中非常普遍的现象,是引发交通震荡的一个重要诱因^[3-4],具有非常高的研究价值,由于其过程的复杂性,目前的定量研究相对较少。

换道行为研究主要是从驾驶员行为和道路交通状况的角度研究城市和高速公路的变道特征和影响因素。Moridpour等^[5]描述了车辆换道的过程,主要包括换道动机的产生、换道时机的选择及换道的执行过程。根据研究动机,可将变道行为分为强制性变道和任意性变道。张颖达等^[6]利用Next Generation Simulation (NGSIM)^[7]数据集中的轨迹数据,提出半对数和多项式模型来研究强制型和自由型换道行为的换道时间差异。换道行为中换道位置距离交叉口的距离、行驶速度和换道持续时间对交通流的稳定性有一定的影响^[8-11]。Toledo等^[12]分析了换道时间的分布范围,发现了对换道时间产生影响的最主要因素是具有换道行为车辆与当前车道前后相邻车辆的速度差值和与目标车道前后相邻车辆的间距值。

影响交通震荡的因素包括纵向相互作用的不稳定性、跟驰和换道行为、加减速不对称特性、驾驶员类型以及道路线形等^[13-14]。高速公路分流区域频发的换道行为比交通流纵向不稳定性更易诱发交通震荡^[15]。Mauch等^[16]通过研究高速公路交通流轨迹数据发现换道行为对交通震荡的生成和发展有着非常大的影响。张娟^[17]采用累积移动序列法研究上海市快速路匝道交通震荡的特性发现,震荡传播超越驶入匝道后,振幅被削弱,穿过驶出匝道后被放大。黄永现^[18]为探究交通震荡的发展特点,进行了3次实车实验,大致计算出车队临界速度的区间为30~40 km/h,并将其用来度量交通流的稳定性。Yao等^[19]利用现场试验发现,2辆连续车辆之间的时间间隔与前车的速度标准差和后车的初始速度呈负相关,且与前车的平均速度和初始间距呈正相关。这些发现为更深入的理解交通震荡现象提供了基础。

1 数据来源与筛选

1.1 数据来源

NGSIM数据集是对摄像机获得的视频数据应用技术手段提取而得到的,收集了详细、高质量的交通流数据,精度较高,多次被研究者们应用于微观驾驶行为分析、模型参数标定等研究。NGSIM数据集包括Peachtree、Lankershim Boulevard、I-80和US-101共4条路段的数据,其中,前面2条是城市主干道,后面2条是高速公路。

为研究高速公路分流区的交通震荡现象,选取的数据采集区域位于加利福尼亚州的US-101高速公路路段,道路渠化信息如图1所示。该区域道路长约2 100 ft(约640.08 m),共有8条车道(主路车道5条,减速车道1条,匝道2条),每条车道的宽度为3.66 m,最高限速112.65 km/h。数据采集于2005年6月15日早晨07:50~08:05、08:05~08:20和08:20~08:35共3个时间段,采集对象为固定时间段和固定路段上的全部车辆,数据采集间隔0.1 s,即1 s产生10条数据。

研究选取分流区内换道车辆的驶出路线为从主路最右侧车道5换道到减速车道6最后再到出口匝道车8,换道驶出车辆必须在车道5进行强制换道,主要以车道5、车道6和车道8的车辆数据为基础进行研究。

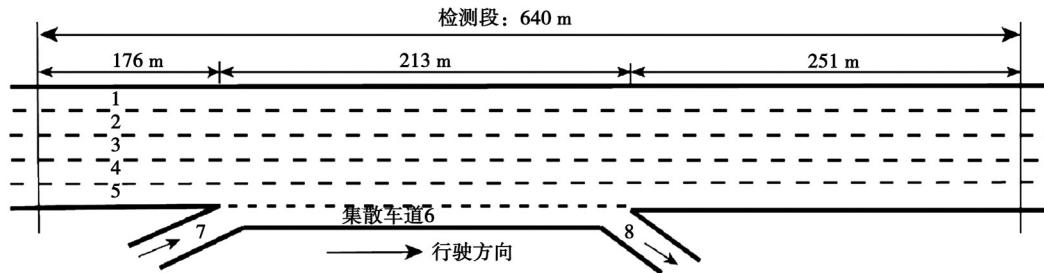


图1 US-101采集路段示意图

Fig. 1 Schematic diagram of US-101 collection section

1.2 数据处理

1.2.1 数据筛选

选择的数据处理工具为python编程语言,对数据进行初步预处理,具体步骤及原则如下。

1)以从车道5换道驶入车道6时车辆跨越车道线的时刻为依据,提取此时刻前后15 s(150条)的数据作为换道车辆行为分析的原始数据。

2)提取具有换道行为的车辆轨迹数据。车辆的换道行为必须从车道5开始,换道至车道6,最后从出口匝道车道8驶出。剔除既没有换道行为,也没有对车辆的换道行为产生影响的车辆。

3)剔除发生连续多次换道和换道失败等行为的数据,提取从车道5至车道6时只发生一次换道行为的车辆数据。

4)换道开始时须保证车道6的上游匝道无车辆,否则将会对换道车辆的换道行为产生影响,进而会对研究分流区交通震荡现象产生影响。

经上述筛选后,共提取出符合研究需求的换道车辆92辆。为研究换道驶出车辆的换道位置距出口匝道鼻端的距离和换道时间长度对分流区交通震荡的影响,需提取换道车辆的换道时间和换道位置进行分析,如图2所示。由图2可知,大部分车辆的换道行为都在3~12 s完成,只有极少数车辆的换道时间大于12 s,同时可以发现当换道起始点距出口匝道鼻端较近时,驾驶员完成换道行为的时间较短;当距鼻端较远时,换道时间较长。大部分驾驶员的换道时间大于4 s,只有极少数的驾驶员能够在较短时间内完成换道。因此,可以得出,大多数驾驶员会尽可能地选择距出口匝道鼻端较远的位置进行换道。综上,出口匝道换道可能会对分流区内驾驶员的心理产生影响,与普通路段的换道行为有明显的差异。

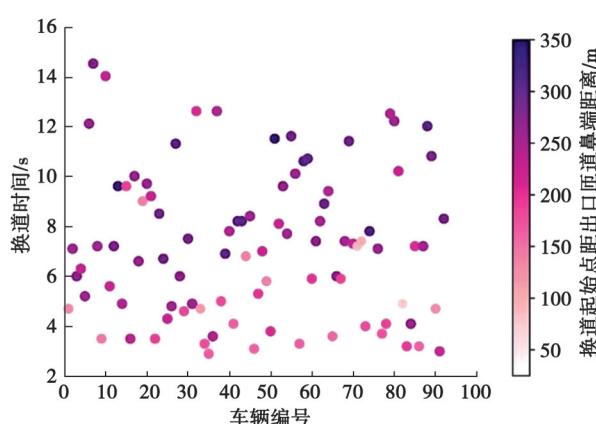


图2 车辆换道时间-位置图

Fig. 2 Time-location diagram of vehicle lane change

1.2.2 数据修正

NGSIM数据通过视频拍摄的方式获取,在拍摄过程中存在被前车遮挡、光线强度变化、周围环境颜色突变以及图像识别不准确(黑色车和阴影、白色车辆和标志标线等现象无法区分)等现象,造成数据中有部分缺失。此外,其速度值是由纵向位置数据求一阶倒数获得,存在突变误差,研究采取一阶差分修正数据中的异常值。

根据已有研究,满足车辆性能和人体所能承受极限的加速度值为 $-8\sim5\text{ m/s}^2$ ^[20],同时,轨迹数据集中位移、速度和加速度相邻帧之间的数据差值应符合运动学的规律,相邻帧的差值大约相等,即

$$x_t - x_{t-1} \approx x_{t-1} - x_{t-2}, \quad (1)$$

式中: x_t 为当前帧轨迹数据; x_{t-1} 为前1帧轨迹数据; x_{t-2} 为前2帧轨迹数据。

利用前1帧和前2帧的数据差值来估算当前帧的轨迹数据值,计算方式如式(2)所示。

$$x_t^* \approx x_{t-1} + (x_{t-1} - x_{t-2}), \quad (2)$$

式中, x_t^* 为当前帧轨迹数据的预测值。

根据确定的加速度范围确定误差范围 Δx ,当预测值和采样值的差值超出误差范围 Δx 时,确定当前时间帧的轨迹数据采样值为异常值,然后将 x_t^* 重新替换为 x_t 。要规避异常值为预测起始点的情况,即要满足式(3)。

$$|(x_t - x_{t-1}) + (x_{t-1} - x_{t-2})| \leq \Delta x. \quad (3)$$

当连续出现3个异常值时,应重新选取起始点进行预测。以104号车的速度数据为例演示异常值修正效果,如图3所示。

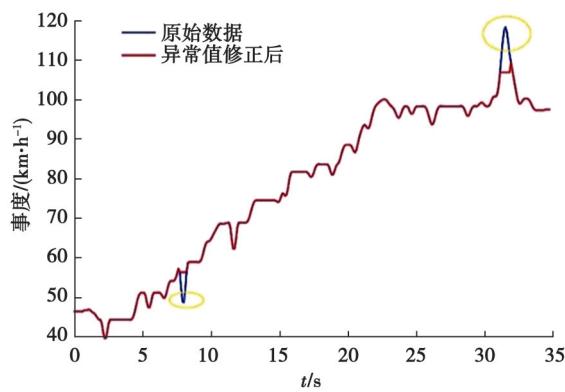


图3 104号车速度修正效果图

Fig. 3 Speed correction effect of car 104

图3中,蓝色线条表示的是车辆的原始轨迹数据,红色线条为车辆修正突变误差之后的轨迹数据。从图中可以看到被黄色圆圈标注的异常值已经被剔除并替换,正常值未发生变化,修复后的速度数据与前后速度变化趋势一致。数据从视频中提取和误差修正时,技术处理会带来一定的误差,造成与真实数据差距较大,因此,还需将测量误差和数据处理误差应用滤波方法进行去噪处理。

2 考虑换道压力增益的跟驰模型

2.1 换道压力增益因子构建

换道压力^[21]是指外部因素对车辆换道行为的影响程度,与离最迟换道位置的距离有关,越靠近最迟换道位置压力越大,车辆换道的概率越大。

为研究高速公路分流区出口匝道对换道行为的影响,提取US-101路段中92辆车换道起始点距出口匝道鼻端的距离。绘制换道起始点距出口匝道鼻端距离 L 的分布频率图,如图4所示。经拟合发现换道起始点距出口匝道鼻端距离 L 的频率分布图符合正态分布曲线,取置信区间为95%,可得出 L 的分布区间为120~344 m。定义换道压力增益因子 $K(L_{n-1})$ 衡量换道压力对驾驶员心理的影响,即

$$K(L_{n-1}) = u \frac{L_{\max} - L_{n-1}}{L_{\max} - L_{\min}}, \quad (4)$$

式中: μ 为换道压力敏感系数,取值范围为[0,1]; L_{n-1} 为换道车辆换道位置距出口匝道鼻端的距离; L_{\max} 和 L_{\min} 为换道车辆换道位置距出口匝道鼻端的最远距离和最近距离。如图5所示, L_{\max} 为344 m, L_{\min} 为120 m,后文将 $K(L_{n-1})$ 简化为 $K(\cdot)$ 。

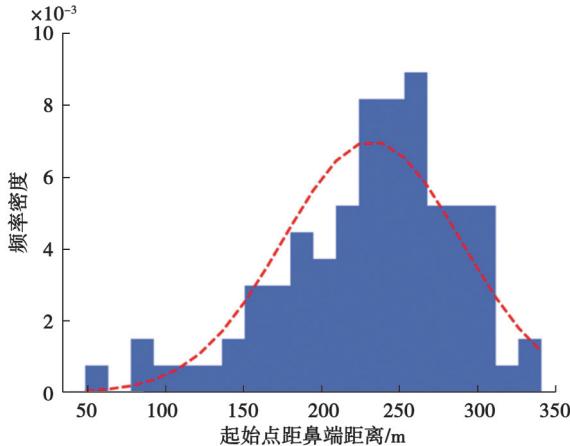


图4 换道起始点距离出口匝道鼻端距离分布频率直方图

Fig. 4 Frequency of the distance from the start of the lane change to the nose end of the exit ramp

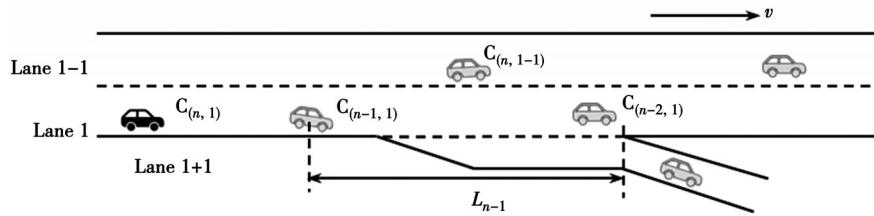


图5 换道车辆距出口匝道鼻端距离

Fig. 5 Distance from the nose of the exit ramp for lane change vehicles

2.2 改进跟驰模型

全速度差模型(full velocity difference model, FVDM)^[22]是在广义力模型的基础上,考虑了前后车正、负速度差对驾驶员的影响所建立的应用广泛的跟驰模型之一。换道车辆到达出口匝道影响范围之前车辆的行驶采用FVDM,根据前后2辆车的速度差和间距差调整自身加速度,改变自身的驾驶状态。

当前车行驶到出口匝道影响范围时,可能发生换道驶出行为,会刺激后车集中注意力,有意识的去调整驾驶状态,跟驰车辆的驾驶行为受前车和后车的间距差 $\Delta x_{n, n-1}(t)$ 、第n辆车在t时刻与前车的速度差 $\Delta v_{n, n-1}(t)$ 及 L_{n-1} 的影响。结合式FVDM的基本形式,建立考虑换道压力增益的全速度差跟驰模型(pressure-full velocity difference model, P-FVDM)

$$\frac{dv_n(t)}{dt} = \alpha(V(\Delta x_{n, n-1}, L_{n-1}) - v_n(t)) + \kappa \Delta v_{n, n-1}(t), \quad L_{n-1} < L_{\max}, \quad (5)$$

$$\alpha = 1/\tau, \quad (6)$$

$$\kappa = \lambda/\tau. \quad (7)$$

速度优化函数可表示为

$$V(\Delta x_{n, n-1}, L_{n-1}) = V((1 + K(L_{n-1})) \Delta x_{n, n-1}), \quad (8)$$

$$V(\Delta x) = V_1 + V_2 \tanh [C_1(\Delta x - l_c) - C_2]. \quad (9)$$

式中: $\frac{dv_n(t)}{dt}$ 为跟驰车辆 n 在 t 时刻的加速度, m/s^2 ; α 为间距差敏感系数; τ 为驾驶员反应时间, s ; $v_n(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻的速度, m/s ; κ 为速度差敏感系数; λ 为敏感系数常量; l_c 为P-FVDM中车辆的最小安全间距, m ; C_1 和 C_2 为常数项。

前车行驶一定距离后,开始发生换道驶出行为,此时转向灯亮起,开始发生横向偏移,如图5所示。此时跟驰车辆的驾驶行为受 $\Delta x_{n,n+1}$ 、 $\Delta v_{n,n+1}$ 、横向偏移 $\Delta W_{n,n+1}$ 及后车距出口匝道鼻端的距离 L_{n+1} 的影响。应用双车道跟驰模型理论,在FVDM的基础之上,考虑前车驶离当前车道时产生的横向偏移对后车的跟驰行为的影响,王玄金^[23]建立换道全速度差模型(lane pass-full velocity difference model, LP-FVDM)。结合LP-FVDM的基本形式,建立考虑换道压力增益和换道驶出间距增益的全速度差模型(pressure lane pass-full velocity difference model, PLP-FVDM)

$$\frac{dv_n(t)}{dt} = \alpha(V(\Delta x_{n,n-1}, L_{n-1}, \Delta W_{n,n-1}) - v_n(t)) + \kappa \Delta v_{n,n-1}(t), \quad \Delta W_{n,n-1} < \Delta W_{\max} \quad (10)$$

速度优化函数可表示为

$$V(\Delta x_{n,n+1}, L_{n+1}, \Delta W_{n,n+1}) = V((1+K(L_{n-1})+G(\Delta W_{n,n-1}))\Delta x_{n,n+1}), \quad (11)$$

$$G(\Delta W_{n,n-1}) = \rho \frac{\Delta W_{n,n-1}}{\Delta W_{\max}}, \quad (12)$$

式中: ρ 为横向间距敏感系数; $G(\cdot)$ 为横向间距增益因子; ΔW_{\max} 为车道宽度, m 。

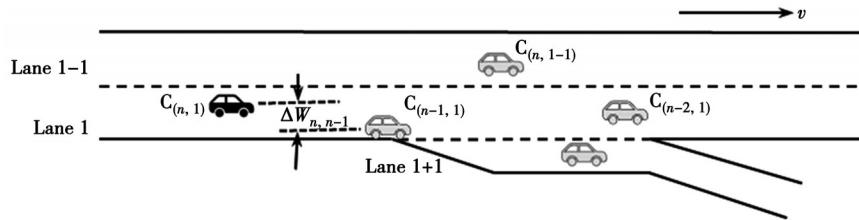


图6 横向偏移示意图

Fig. 6 Schematic diagram of lateral offset

2.3 线性稳定性分析

假设在初始状态下,车队的车头间距都相同为 p , m ,车辆运行速度为优化速度 $V((1+G(\cdot)+K(\cdot))p)$,则得到各车辆的初始位置为

$$x_n^{(0)}(t) = pn + V((1+G(\cdot)+K(\cdot))p)t. \quad (13)$$

假设车辆 n 在 t 时刻由于小的扰动,产生偏离,定义为 $y_n(t)$,有

$$x_n(t) = x_n^{(0)}(t) + y_n(t). \quad (14)$$

将式(11)和式(12)带入到式(10)中,可得

$$\frac{d^2 y_n(t)}{dt^2} = \alpha \left[(1+G(\cdot)+K(\cdot))V'((1+G(\cdot)+K(\cdot))\Delta y_{n,n-1}) - \frac{dy_n(t)}{dt} \right] + \kappa \frac{d\Delta y_n(t)}{dt}, \quad (15)$$

式中

$$\Delta y_n(t) = y_{n-1}(t) - y_n(t). \quad (16)$$

令

$$y_n(t) = A e^{(ikn+z)t}, \quad (17)$$

将式(17)带入到式(15)中,并将其进行展开,得到关于 z 的方程

$$z^2 = \alpha [(1+G(\cdot)+K(\cdot))V'((1+G(\cdot)+K(\cdot))(e^{ik}-1)-z)] + \kappa(e^{ik}-1)z. \quad (18)$$

令:

$$z = z_1(i\kappa) + z_2(i\kappa)^2 + \dots. \quad (19)$$

将式(19)带入式(18)中,计算得 $i\kappa$ 的一阶、二阶项的系数分别为

$$z_1 = \dot{V}((1+G(\cdot)+K(\cdot))p)(1+G(\cdot)+K(\cdot)), \quad (20)$$

$$z_2 = \frac{z_1}{2} + \lambda z_1 - \tau z_1^2. \quad (21)$$

当 $z_2 > 0$ 时, 均匀交通流会逐渐演变为稳定状态; 当 $z_2 < 0$ 时, 均匀交通流会逐渐演变为不稳定状态。当 $z_2 = 0$ 时扰动衰减, 此时可得模型的中性稳定条件为

$$\kappa > \frac{2\lambda(1+G(\cdot)+K(\cdot))\dot{V}((1+G(\cdot)+K(\cdot))p)}{1+2\lambda}. \quad (22)$$

为更好的分析 $K(\cdot)$ 对模型稳定性的影响, 分别令 $\lambda = 0.5$ 、 $G(\cdot) = 0.3$ 做出压力增益因子取不同值时的临界稳定曲线图, 如图 7 所示。

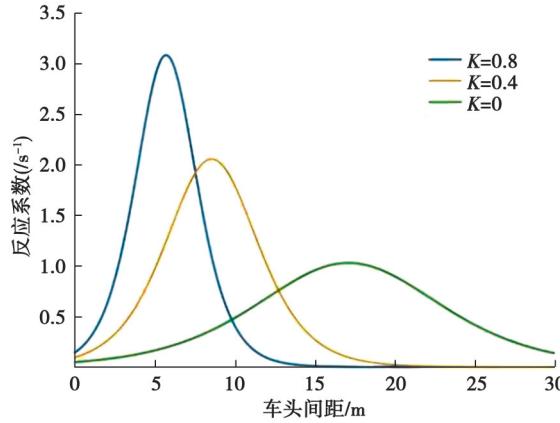


图 7 $\lambda=0.5$ 、 $G(\cdot)=0.3$ 的稳定性临界图

Fig. 7 Stability criticality diagram for $\lambda=0.5$ and $G(\cdot)=0.3$

图 7 中, 随着 $K(\cdot)$ 的增大, 临界曲线向左上方移动, 反应系数的最大值升高, 稳定区域范围变小, 此时交通流能够在相对较小的车头间距下稳定运行, 但要求驾驶员的反应时间足够小。在临界曲线附近更容易出现交通流不稳定的现象, 表明出口匝道对交通流的运行有较大影响, 在分流区内交通流的稳定性下降, 换道驶出的车辆对主路车流的影响较大, 极易引发交通震荡不断向上游传播。

当 $G(\cdot)=0$ 时, 式(19)退化为 P-FVDM 的稳定性条件, 同样可以得出随着 $K(\cdot)$ 值的增大, 模型的稳定区域变小, 对驾驶员反应能力的要求更高, 更易引发交通震荡。

3 改进跟驰模型精度验证

3.1 模型参数标定

利用前文得到的换道车辆和其跟驰车辆的轨迹数据对改进模型的参数进行标定, 结合基础模型的参数值确定标定参数的取值范围, 见表 1 所示。标定方法选取遗传算法, 遗传算法的参数设置见表 2。

表 1 参数取值范围
Table 1 Parameters range of values

参数	参考值	P-FVDM 参数范围	PLP-FVDM 参数范围
α	0.85	[0,1]	[0,1]
κ	0.20	[0,1]	[0,1]
V_1	6.75	[0,20]	[0,20]
V_2	7.91	[0,20]	[0,20]
C_1	0.13	[0,1]	[0,1]
C_2	1.57	[0,10]	[0,10]
ρ	—	[0,1]	[0,1]
μ	—	—	[0,1]

表 2 遗传算法参数

Table 2 Parameters of the genetic algorithm

参数	设置值
种群规模	100.0
最大迭代数	200.0
停滞代数	100.0
交叉概率	0.8
变异概率	0.2

研究选取的性能指标为跟驰车辆的加速度, 使用 RMSE 作为拟合优度函数

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{obs},i} - X_{\text{model},i})^2}{N}}, \quad (23)$$

式中: $X_{\text{obs},i}$ 为实际值; $X_{\text{model},i}$ 为模型计算值; N 为样本量。

经 GA 参数标定后, P-FVDM 和 PLP-FVDM 的模型参数的均值、中值、最大值、最小值和标准差分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 P-FVDM 标定结果

Table 3 Calibration results of the P-FVDM model

参数	均值	中值	最大值	最小值	标准差
α	0.61	0.59	0.78	0.46	0.13
κ	0.32	0.34	0.63	0.18	0.11
V_1	5.83	5.55	7.23	3.95	0.18
V_2	8.35	7.38	9.84	6.64	0.12
C_1	0.24	0.26	0.46	0.16	0.23
C_2	1.83	1.58	2.32	1.32	0.06
ρ	0.53	0.51	0.73	0.41	0.09

表 4 PLP-FVDM 标定结果

Table 4 Calibration results of PLP-FVDM model

参数	均值	中值	最大值	最小值	标准差
α	0.57	0.61	0.76	0.43	0.17
κ	0.11	0.10	0.43	0.05	0.19
V_1	6.23	6.41	7.95	5.34	0.09
V_2	7.31	8.03	9.01	6.36	0.14
C_1	0.18	0.24	0.45	0.14	0.11
C_2	1.76	1.81	3.44	0.85	0.17
ρ	0.34	0.31	0.57	0.19	0.13
μ	0.45	0.48	0.65	0.33	0.08

3.2 模型仿真

为了验证 P-FVDM 和 PLP-FVDM 的效果, 选取车辆 ID 为 13、1226 共 2 辆车的轨迹数据, 利用 P-FVDM 和 PLP-FVDM 对其进行速度和位置的仿真, 与实际轨迹数据对比分析。用原始轨迹中的初始车辆速度和位置,

利用模型计算出加速度,由此可以计算出车辆的仿真速度和位置。速度仿真效果和位置仿真效果分别如图 8 和 9 所示。

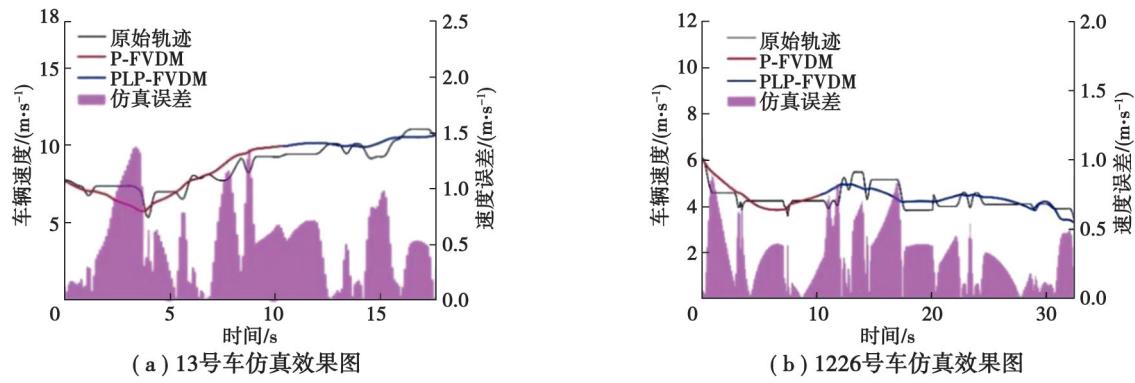


图 8 车辆速度仿真效果图

Fig. 8 Vehicle speed simulation

由图 8 可知,P-FVDM 与 PLP-FVDM 对车辆速度的模拟效果良好,其中 1226 号车的速度仿真误差在 1 m/s 范围内,13 号车的速度仿真误差在 1.5 m/s 范围内。综上,P-FVDM 和 PLP-FVDM 速度仿真误差都在 1.5 m/s 以内,误差范围较小,虽然当车辆速度突变的程度较大时仿真效果相对较差,但总体与车辆的速度变化趋势是相符的,能够再现分流区真实交通流的速度信息。

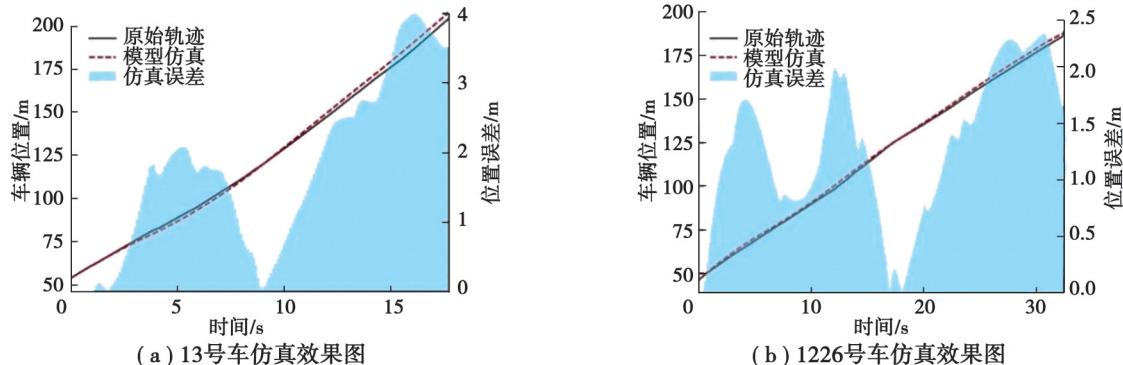


图 9 车辆位置仿真效果图

Fig. 9 Vehicle position simulation

由图 9 可知,1226 号车位置仿真误差范围在 3 m 内;13 号车的位置仿真误差范围在 4 m 内。因此,模型对车辆位置的仿真效果总体较好,总体位置仿真误差范围在 4 m 内,P-FVDM 和 PLP-FVDM 能够较好的预测车辆的位置,能够再现真实交通流中车辆的位置信息,进一步验证了模型的准确性。

3.3 模型有效性验证

为检验模型的有效性,对比 P-FVDM 和 FVDM、PLP-FVDM 和 LP-FVDM 的速度仿真效果,分别计算 13、48、100、359、703 和 1226 号车辆改进前和改进后模型的仿真速度的均方根百分比误差值,即 RMSPE,计算公式为式(24),结果分别如图 10 和 11 所示。

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((X_{\text{obs},i} - X_{\text{model},i}) / X_{\text{obs},i})^2}, \quad (24)$$

由图 10 可知,与 FVDM 相比,在换道车辆进入到出口匝道影响区域时,P-FVDM 所控制的跟驰车辆的仿真误差比 FVDM 的误差减小,其中 703 号车的仿真误差减小的最多(约为 32%),359 号车的仿真误差减小的

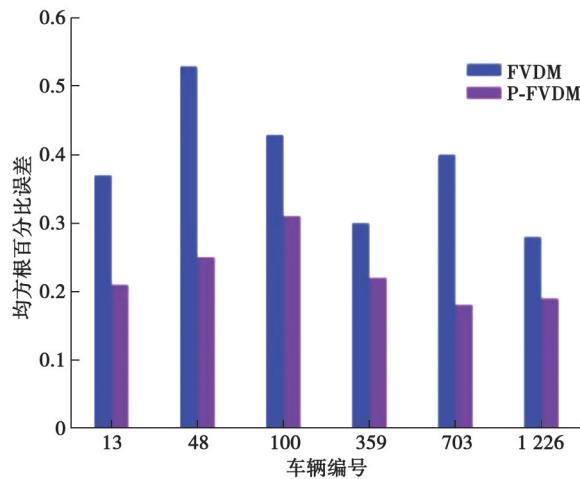


图 10 P-FVDM 效果对比

Fig. 10 Comparison of the effect of P-FVDM model

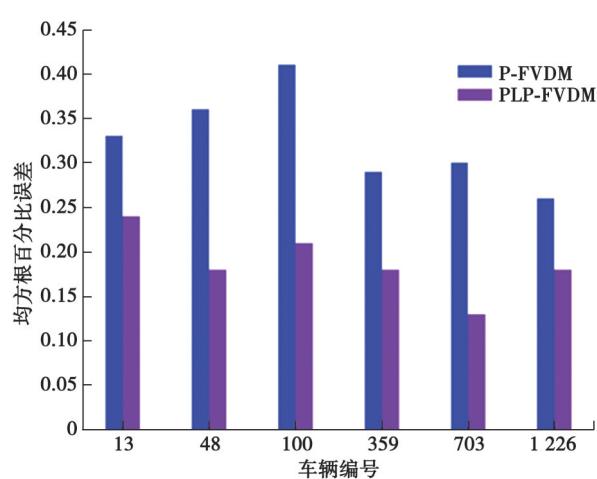


图 11 PLP-FVDM 效果对比

Fig. 11 Comparison of the effect of PLP-FVDM model

最少(约为 8%), 模型的总体提升约 16%。因此, P-FVDM 能够更加精准的反映换道车辆进入出口匝道影响区发生换道行为之前主路跟驰车辆的驾驶情况。由图 11 可知, 与 LP-FVDM 相比, 在换道车辆发生换道行为过程中, PLP-FVDM 所控制的跟驰车辆的速度仿真误差与真实值的误差有所减小, 模型的精度总体提升约 12%, 能够更加精准的反映换道车辆换道过程中主路跟驰车辆的驾驶情况。

综上, 提出的模型对分流区交通流的模拟效果更好。

4 交通震荡仿真研究

4.1 仿真条件

采用城市交通模拟系统(simulation of urban mobility, SUMO)^[24]仿真软件模拟换道车辆驶出时的分流区内交通震荡, 初始状态设定换道车辆后面由 20 辆车组成的车队跟驰行驶, 所有车辆之间的跟驰模型为 FVDM, 给定初始速度和初始间距使车队行驶至稳定状态。

$t=0$ s 时, 换道驶出车辆到达出口匝道影响区域的起点, 换道驶出车辆和车队第一辆车之间的控制模型改为 P-FVDM, 车队内部的车辆控制模型始终为 FVDM, 保持不变。在 $t=21$ s 时, 换道驶出车辆开始换道, 发生横向偏移, 换道时间为 6 s。此时换道驶出车辆和车队第一辆车之间的控制模型改变为 PLP-FVDM。换道车辆沿道路纵向的行驶速度不变, 横向偏移的方式由车辆的换道时间和车道宽度(3.66 m)计算得知, 在前 2.5 s 内车辆匀加速, 速度达到最大时车辆横向位置到达主路车道和减速车道的车道线, 在后 2.5 s 内车辆横向速度开始均匀减速, 当横向速度减为 0 m/s 时, 车辆到达减速车道的中心线, 此时完成换道行为。在 $t=26$ s 时, 换道驶出车辆完成换道, 此时对车队的第一辆车不产生影响, 车队第一辆车以当前速度继续行驶。

选取速度序列的标准差作为衡量震荡振幅的指标

$$v_{\text{std}} = \sqrt{\frac{\sum_{t \in I_n} [v(t) - v_m]^2}{n - 1}}, \quad (25)$$

式中: $v(t)$ 为当前车辆的速度采集值; v_m 为速度序列的平均值; n 为一辆车的仿真数据点数; I_n 为仿真的时间序列。

4.2 交通流速度对交通震荡的影响

为研究不同交通流速度对交通震荡的影响, 结合高速公路出口匝道附近车辆运行特性, 设定换道驶出车辆和车队的运行速度为 30、40、50 km/h, 初始车头间距由 FVDM 计算得出, 如表 5 所示。为了使交通震荡现象更加便于观察, 绘制出了车队中车辆的速度标准差分布图, 仿真结果如图 12 所示。

表5 不同车速对应的车头间距
Table 5 The head spacing corresponding to different vehicle speeds

初始速度/(km·h ⁻¹)	初始车头间距/m
30	18.634
40	21.830
50	28.500

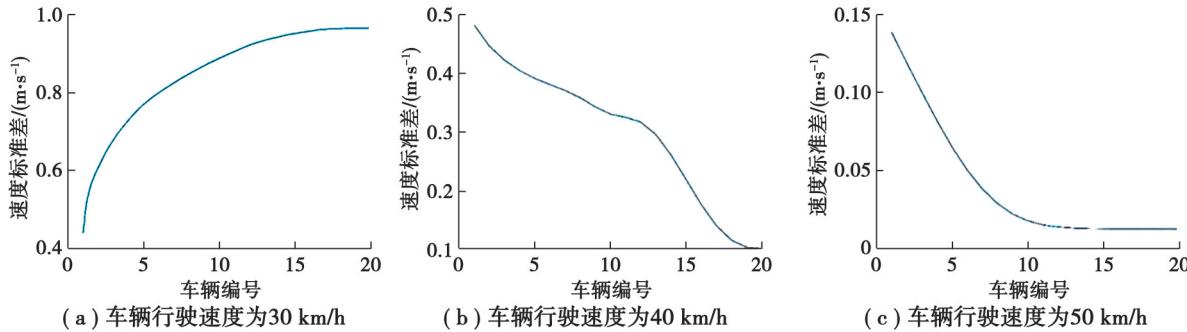


图12 车队速度标准差图

Fig. 12 Diagram of standard deviation of vehicle fleet speed

由图12可知,车队以30 km/h匀速行驶时,车流内部产生扰动,随着震荡沿车队向上游传播,车队中车辆的速度标准差呈现凹增长的模式。位于车队上游的车辆速度标准差较大,即速度变化较大,震荡振幅增大,震荡现象更明显,且随着传播过程快速增长。随着震荡不断向上游传播,车辆的速度标准差的增长幅度逐渐减缓,甚至呈现降低趋势,即此时震荡的增长开始趋于饱和。当车队以40 km/h匀速行驶时,所有车辆的速度标准差非常小,均小于0.5,且沿车队向上游传播过程中迅速减小,即交通震荡在传播过程中逐渐消散。当车队以50 km/h匀速行驶时,车辆速度标准差更小,均小于0.15,且降低速度更快,即交通震荡消散的更快。

车队以30 km/h匀速行驶时,交通流内部不稳定和换道车辆的换道行为共同作用,产生交通震荡。车队分别以40、50 km/h匀速行驶时,换道车辆的换道行为引起了交通震荡,但此时车辆的车头间距较大,前方出现扰动时后方驾驶员有更多的时间对车辆进行调控,因此,交通震荡在向上游传播的过程中逐渐消散。

综上所述,车辆换道行为能够引发交通震荡,但是当行驶速度较高时震荡会衰减,当行驶速度较低时速度标准差沿车队向上游呈凹增长趋势增长。

4.3 换道位置对交通震荡的影响

初始条件下,让换道驶出车辆和跟驰车队均以50 km/h的速度匀速行驶,车头间距为28.5 m,所有车辆均以FVDM跟驰行驶,在到达出口匝道影响区域之前使交通流达到稳定状态。 $t=0$ s时,换道驶出车辆到达匝道影响区域的起点,设定换道驶出车辆的加速度的值为 -0.2 m/s^2 ,分别在 $t=21$ s, $t=23$ s和 $t=25$ s开始换道,换道时间均为6 s,其余仿真设置与4.2节设置相同。

车队车辆的速度标准差仿真结果如图13所示。换道时刻越晚,表示换道车辆的换道起始点的位置距出口匝道鼻端的距离越近。由图13可以看出,换道车辆在不同的位置换道驶出时,均发生了明显的交通震荡现象,并向车队上游不断传播。分析发现,换道车辆在不同位置换道驶出时,车辆速度标准差都以凹增长的方式增加,与以往研究相符。随着换道起始点距出口匝道鼻端距离减小,换道车辆的换道行为对后方跟驰车辆形成的影响越大,同一辆车的速度标准差增大,沿车队向上游传播的速度标准差的增加幅度也随之增大。即换道车辆越早发生换道驶出行为对交通流的稳定越有利。

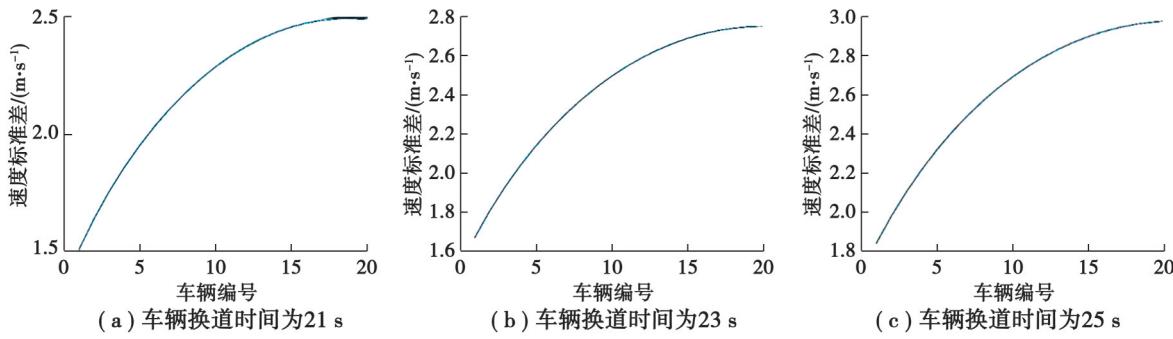


图13 车队速度标准差图

Fig. 13 Diagram of standard deviation of vehicle fleet speed

4.4 换道时长对交通震荡的影响分析

初始条件下,让换道驶出车辆和跟驰车队均以50 km/h的速度匀速行驶,车头间距为28.5 m,所有车辆均以FVDM跟驰,达到稳定状态。

$t=0$ s时,换道驶出车辆到达出口匝道影响区域的起点,设定换道驶出车辆的加速度的值为 -0.2 m/s^2 ,在 $t=21$ s时开始换道,产生横向位移,分别在 $t=26$ s, $t=28$ s和 $t=30$ s时完成换道,即换道时间为5 s, 7 s和9 s,其余仿真设置与文中设置相同。车队中车辆的速度标准差仿真结果如图14所示。

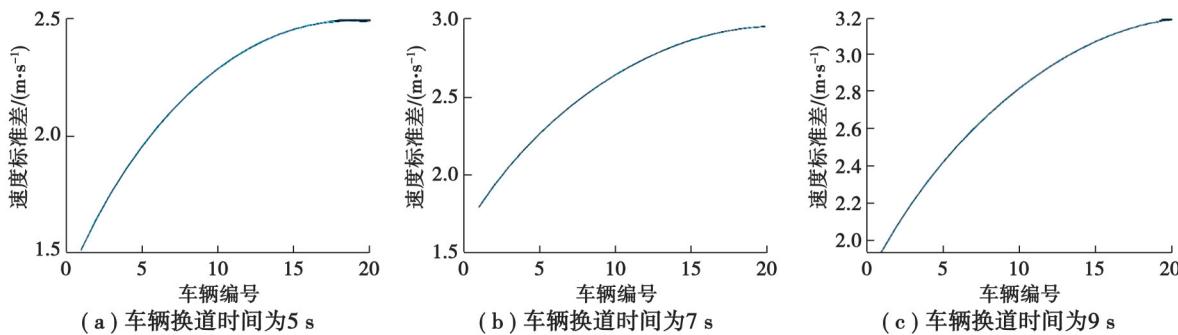


图14 车队速度标准差图

Fig. 14 Diagram of standard deviation of vehicle fleet speed

从图14中可以发现,换道时间越长,换道行为对后方车辆的影响越大,速度标准差沿车队向上游传播增长的越快,同时单个车辆的速度标准差更大,震荡更加明显。因此,换道时间越短对交通流的稳定性越有利。

5 结束语

以NGSIM数据集的US-101路段数据为数据源,对数据处理后发现,分流区内换道驶出车辆的换道时间范围为3~12 s,换道位置距出口匝道鼻端的距离为50~350 m,换道位置和换道时间之间具有一定的关系。

通过构建高速公路分流区换道压力增益因子对模型进行改进,并进行稳定性分析,发现换道压力敏感系数越高,模型的稳定区域越小。利用重构后的轨迹数据对模型进行参数标定,仿真分析发现,改进后的模型能够更好地模拟车辆的速度和位置,P-FVDM的仿真精度提升了16%,PLP-FVDM的仿真精度提升了12%。利用改进后的模型对高速公路分流区内的交通震荡进行仿真,研究结果表明,车速为30 km/h时产生明显的交通震荡现象,并呈凹增长趋势,车速为40和50 km/h时交通震荡在向后传播过程中逐渐消散;随着换道位置距离出口匝道鼻端距离变小、换道时间变长,速度标准差更大,即交通震荡振幅更大,交通流的稳定性更差。

研究采用的数据集来自美国,不同国家的交通环境和人文因素相差较大,因此,交通流也存在一定差异,提出的模型仍需要中国的交通流数据进行进一步的验证。再者,研究只考虑了分流区内一辆车换道驶出对

主路交通流的影响,后续可考虑多辆车连续或间断驶出时对主路交通流的影响。

参考文献

- [1] Edie L C. Car-following and steady-state theory for noncongested traffic[J]. Operations Research, 1961, 9(1): 66-76.
- [2] Yeo H, Skabardonis A. Understanding stop-and-go traffic in view of asymmetric traffic theory[M]//Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee. Boston, MA: Springer US, 2009: 99-115.
- [3] Kerner B S, Rehborn H. Experimental features and characteristics of traffic jams[J]. Physical Review E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 1996, 53(2): R1297-R1300.
- [4] Ahn S, Cassidy M J. Freeway traffic oscillations and vehicle lane-change maneuvers[C]//Proceedings of the 17th International Symposium on Traffic and Transportation Theory. July 23-25, 2007, London, UK. Amsterdam: Elsevier, 2007: 691-710.
- [5] Moridpour S, Rose G, Sarvi M. Modelling the heavy vehicle drivers' lane changing decision under heavy traffic conditions[J]. Road & Transport Research, 2009, 18(4): 49-57.
- [6] 张颖达, 邵春福, 李慧轩, 等. 基于NGSIM轨迹数据的换道行为微观特性分析[J]. 交通信息与安全, 2015, 33(6): 19-24, 32.
Zhang Y D, Shao C F, Li H X, et al. Microscopic characteristics of lane-change maneuvers based on NGSIM[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33(6): 19-24, 32.(in Chinese)
- [7] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA). Next generation simulation fact sheet [EB/OL]. (2011-05-27) [2023-12-06]. <http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/ngsim.htm>.
- [8] Susilawati S, Tan K Y, Samad K M A, et al. The study of location specific lane change impacts on traffic delay using extended cell transmission model[C]//Proceedings of the 2018 EUREKA International Conference on Engineering, Technology and Construction (EUREKA 2018). April 24-26, 2018, Kuching, Sarawak, Malaysia. Les Ulis: EDP Sciences, 2018, 203: 05008. DOI: 10.1051/matecconf/201820305008.
- [9] Li X P, Cui J X, An S, et al. Stop-and-go traffic analysis: theoretical properties, environmental impacts and oscillation mitigation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 70: 319-339.
- [10] 郑淑欣, 李振龙, 赵晓华. 雾天高速公路换道行为特性研究[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(1): 35-42, 51.
Zheng S X, Li Z L, Zhao X H. Behavioral characteristics of lane-changing on highway in foggy weather[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(1): 35-42, 51.(in Chinese)
- [11] Zheng S T, Jiang R, Tian J F, et al. Empirical and experimental study on the growth pattern of traffic oscillations upstream of fixed bottleneck and model test[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 140: 103729.
- [12] Toledo T, Zohar D. Modeling duration of lane changes[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 1999(1): 71-78.
- [13] Jiang R, Hu M B, Zhang H M, et al. On some experimental features of car-following behavior and how to model them[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 80: 338-354.
- [14] Jiang R, Jin C J, Zhang H M, et al. Experimental and empirical investigations of traffic flow instability[C]//Proceedings of the 6th International Symposium of the Transport and Traffic Science Forum (HEART 2016). May 17-20, 2016, Xi'an, China. Amsterdam: Elsevier, 2017, 23: 157-173. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.011.
- [15] 贺玉龙, 刘磊, 迟佳欣. 高速公路车辆换道行为风险研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(4): 26-33.
He Y L, Liu L, Chi J X. Risk of vehicle lane change behavior on highway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(4): 26-33.(in Chinese)
- [16] Mauch M, Cassidy M. Freeway traffic: oscillations observations and predictions[M]//Transportation and Traffic Theory in the 21st Century. Amsterdam: Elsevier, 2002: 653-673.
- [17] 张娟. 城市快速路瓶颈交通震荡特性研究[J]. 交通信息与安全, 2015, 33(5): 43-48.
Zhang J. A study of traffic oscillations at the bottlenecks on urban expressways[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33(5): 43-48.(in Chinese)
- [18] 黄永现. 交通震荡演化特性的实验研究和建模仿真[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2019.
Huang Y X. Experimental research and modeling on the evolution of traffic oscillation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)

- [19] Yao H D, Li Q W, Li X P. A study of relationships in traffic oscillation features based on field experiments[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 141: 339-355.
- [20] 马艳锋. 基于NGSIM数据的高速公路出入口强制换道车辆执行及后调整行为研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
Ma Y F. Research on vehicles' mandatory lane change behavior in execution and post-adjustment period on multi-lane freeway based on NGSIM trajectory data[D]. Xi'an; Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [21] 刘有军, 曹珊. 基于元胞自动机的强制换道模型研究[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(3): 78-80.
Liu Y J, Cao S. Compulsory lane-changing traffic model based on cellular automaton[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2009, 27(3): 78-80.(in Chinese)
- [22] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J. Full velocity difference model for a car-following theory[J]. *Physical Review E*, 2001, 64: 017101.
- [23] 王玄金. 考虑前车换道过程的跟驰模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
Wang X J. Research on car following model considering preceding vehicle's lane-changing process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [24] Barceló J. Fundamentals of traffic simulation[M]. New York: Springer, 2010. (International Series in Operations Research & Management Science, vol 145).

(编辑 吕建斌)