

城市道路场景中车辆驾驶行为分析及统一建模

王可栋^{1,2a}, 曲含章³, 马敏^{4,5,*}, 崔善柠^{2b}, 康爱平^{2a,6}

(1. 青岛黄海学院 智能制造学院, 青岛 266427; 2. 青岛理工大学 a. 机械与汽车工程学院; b. 土木工程学院, 青岛 266525;
3. 长安大学 长安都柏林国际交通学院, 西安 710064; 4. 青岛环球重工科技有限公司, 青岛 266400;
5. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 青岛 266590; 6. 兰州现代职业学院 财经商贸学院, 兰州 730300)

摘要:为提高城市道路微观交通流的仿真精度和效率,以信号交叉口进口道换道车辆及其目标车道上跟驰车辆作为研究对象,提出一种考虑车辆驾驶员行为特征的统一建模方法。以驾驶员多向多车预期能力为基础,引入侧向车辆影响系数,将全速度差跟驰模型拓展为描述换道过程中换道车辆和跟驰车辆纵向行驶动作的微观交通流模型,通过改进跟驰模型中的优化车速函数,将交通控制信号和换道类型对驾驶员决策的影响纳入模型中。研究表明:换道过程中侧向行驶车辆运动状态和换道类型变化对跟驰行为的影响要高于换道行为;不同类型换道场景中驾驶人对外界刺激的主要关注点会发生变化;全速度差模型比 Gipps 模型更适合作为基础模型用来模拟城市道路微观交通流。

关键词: 驾驶行为; 统一建模; 换道模型; 跟驰模型; 多向多车预期能力

中图分类号: U491.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)04-0154-09

Vehicle driving behavior analysis and unified modeling in urban road scenarios

WANG Kedong^{1,2a}, QU Hanzhang³, MA Min^{4,5,*}, CUI Shanning^{2b}, KANG Aiping^{2a,6}

(1. Intelligent Manufacturing Institute, Qingdao Huanghai University, Qingdao 266427, China; 2. a. School of Mechanical and Automotive Engineering; b. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;
3. Chang'an Dublin International College of Transportation, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
4. Qingdao Hicorp Heavy Industry Science & Technology Co. Ltd., Qingdao 266400, China; 5. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
6. College of Business and Economics, Lanzhou Modern Vocational College, Lanzhou 730300, China)

Abstract: In order to improve the simulation accuracy and efficiency of microscopic urban traffic, a unified modeling method considering the behavioral characteristics of vehicle drivers is proposed by taking the lane-changing vehicles on the inlet lanes of signalized intersections and the following vehicles on the target lanes as the research objects. Based on the driver's multidirectional multi-vehicle anticipation capability and introducing lateral vehicle influence coefficients, the full velocity difference car following model was extended to the microscopic traffic model that can describe the longitudinal movements of lane-changing ve-

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52272311); 西海岸新区高校校长基金(GXXZJJ202301)

作者简介: 王可栋(1986—), 男, 山东潍坊人。博士, 副教授, 主要从事人机共驾理论及技术方面的研究。

E-mail: 18661831717@163.com。

* 通信作者: 马敏(1985—), 女, 山东济宁人。硕士, 高级工程师, 主要从事机电工程、建筑交通方面的研究。

E-mail: 18663981858@163.com。

hicles and following vehicles during lane changing. The influence of traffic control signals and types of lane changing on drivers' decisions were integrated into the model by reformulating the optimal velocity function of the basic car following model. Results show that in the process of lane changing car following behavior is more sensitive to the status of lateral moving vehicles and the change of lane-changing types than to the lane changing behavior, and the driver's chief attention to external stimuli changes in different types of lane change scenarios. Compared with Gipps model, full velocity difference car following model is more suitable to be taken as the basic model to simulate microscopic urban traffic.

Key words: driving behavior; unified modeling; lane changing model; car following model; multi-direction multi-vehicle anticipation capability

车辆换道是引发交通震荡、交通流失效和道路通行能力下降等宏观交通流现象的诱因^[1-3]。换道车辆对周边车辆的影响程度与交通瓶颈的形成、持续时间和消散速度直接相关。在模拟交通流密度较大的换道场景时,不少微观交通流仿真软件会输出异常车辆轨迹,呈现出车辆从原车道换道“闪现”至目标车道现象,导致后方车辆频繁加减速,进而引发车道交通流异常波动^[4-6]。部分学者考虑到忽略换道过程中驾驶人决策行为和车辆动作的连续性会对交通流仿真精度产生影响,因此对连续交通流仿真过程进行了深入研究^[7-9]。少量研究构建微观交通流模型描述了换道车辆连续行驶动作,但现有各类微观交通流模型并不包括“跟驰”和“换道”两种状态之间的一致切换规则,导致相当部分跟驰模型难以反映换道车辆对临近跟驰驾驶员的持续影响及跟驰驾驶员的主动调整能力。

相较于连续交通流,除间断交通流的行驶环境更为复杂及影响因素更多外,驾驶员在上述两类交通流环境中的决策行为机制并无本质区别。优化车速模型及 Gipps 等跟驰模型常被扩展成各类驾驶场景下的微观交通流模型^[10-12],现有的车辆跟驰和换道模型分离度较高,仅能模拟单一驾驶员的行为机制,模型变量从驾驶员的视角出发进行测量,反映的是单一驾驶员的行为特征。考虑到城市道路换道场景中车辆受多车交互影响较为明显,本文以城市道路信号控制交叉口进口道上参与同一个换道过程的多个驾驶员行为作为研究对象,研究人车路多维要素对不同驾驶员的影响机制及其与宏观交通流运行现象的关系,了解换道过程中外界因素对驾驶行为及驾驶行为调整方式的影响。

1 驾驶行为分析

1.1 驾驶场景分析

图1显示了参与换道过程的车辆空间位置,其中换道车辆(lane changing vehicle, LCV)、目标车道潜在跟驰车辆(potential following vehicle, PFV)和潜在领先车辆(potential leading vehicle, PLV)相互影响较为显著。由于 LCV 和 PFV 始终在 PLV 后方行驶,因此假设 PLV 驾驶员不受二者影响,但 PLV 的动作会影响 LCV 和 PFV 驾驶员决策。作为换道发起者,LCV 驾驶员需要根据 PLV 和 PFV 的行驶状况决定侧向插入的位置和时机,PFV 驾驶员应对 LCV 插入的调整动作直接影响其后方车辆的运动状态,其调整幅度决定了换道车辆对目标车道交通流的扰动程度。与 PFV 驾驶员类似,换道过程中 LCV 驾驶员受到其余两辆车平行和垂直于车道方向行驶状态变化的影响。

1.2 侧向行驶车辆对驾驶行为的影响

1.2.1 考虑侧向车辆影响的跟驰模型

研究发现,车道侧向净空不足或车道宽度过大等道路几何因素会对跟驰车辆纵向行驶稳定性产生影响。近年来部分学者通过建模分析跟驰驾驶员应对前方交叉行驶车辆的行为,使用 Gipps 模型模拟驾驶

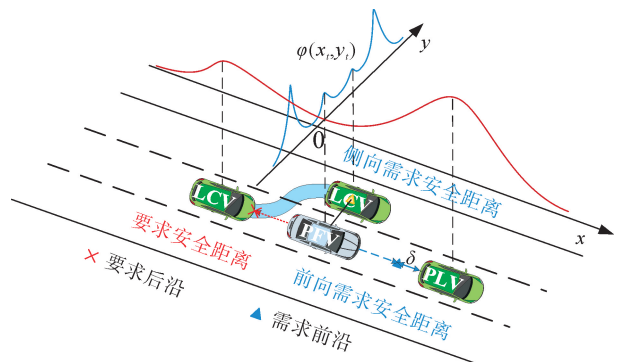


图1 车-车交互作用关系

员利用本车道间隙躲避前车减速,或利用相邻车道绕过前车的避让驾驶行为,分析了车道宽度对跟随车速和两车偏移程度对跟随距离的影响。

1.2.2 考虑侧向车辆影响的换道模型

绝大多数换道模型中均包含反映目标车道上侧向行驶车辆状态变化的变量,然而现有研究主要关注目标车道上 LCV 驾驶员在 PFV 和 PLV 影响下的换道决策机制及其在原车道上的换道准备动作,仅有少量研究构建了能够完整描绘换道准备、插入目标车道直至完成换道等连续动作的微观交通流模型。作为较早开展此方向研究的代表,MORIDPOUR 等^[11]通过拓展 GM 模型模拟了换道车辆从原车道转移至目标车道行驶全过程的纵向加减速行为:

$$\begin{cases} c_i(t+\tau_i) = \mu_0 v_i(t+\tau_i)^{\mu_1} \frac{[v_{i+1}(t) - v_i(t)]^{\mu_2}}{[x_{i-1}(t) - x_i(t)]^{\mu_3}} \\ d_i(t+\tau_i) = \mu_0 v_i(t+\tau_i)^{\mu_1} \frac{[v_{i+2}(t) - v_i(t)]^{\mu_2}}{[x_{i-1}(t) - x_i(t)]^{\mu_3}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $v_i(t)$ 、 $v_{i+1}(t)$ 、 $v_{i+2}(t)$ 和 $v_{i-1}(t)$ 分别为 t 时刻车辆 i 、 $i+1$ 、 $i+2$ 和 $i-1$ 的车速; $x_{i-1}(t)$ 和 $x_i(t)$ 分别为 t 时刻车辆 $i-1$ 和 i 的位置; $c_i(t+\tau_i)$ 和 $d_i(t+\tau_i)$ 分别为 $t+\tau_i$ 时刻换道车辆 i 的纵向加速度和减速度; τ_i 为车辆 i 驾驶员的反应时间; μ_0 、 μ_1 、 μ_2 和 μ_3 为参数。

根据换道车辆 i 纵向车速和转向角确定其横向车速,以 OV 模型作为基础引入时变侧向影响系数 $\theta_i(t)$ 模拟车辆 $i-1$ 和 $i-2$ 对车辆 i 纵向加速度的影响:

$$v_i(t+\tau_i) = \theta_i(t)v_{i-1}(t+\tau_i) + [1 - \theta_i(t)]v_{i-2}(t+\tau_i) \quad (2)$$

式中: $v_{i-1}(t+\tau_i)$ 和 $v_{i-2}(t+\tau_i)$ 分别为 $t+\tau_i$ 时刻换道驾驶员根据 t 时刻车辆 $i-1$ 和 $i-2$ 的动作使用 OV 模型计算出的车速调整值; $\theta_i(t)$ 用于表征车辆 $i-1$ 和 $i-2$ 对换道驾驶员的影响权重。

将换道场景分为协作换道和受迫换道两种,协作换道场景中沿用式(2)的模型结构改造 Gipps 模型来描述换道车辆 i 的纵向行驶动作,受迫换道场景中则进一步将式(2)拓展为

$$v_i(t+\tau_i) = \theta_i(t)v_{i-1}(t+\tau_i) + [1 - \theta_i(t)]\{\varphi_i(t)v_{i-2}(t+\tau_i) + [1 - \varphi_i(t)]v_{i+2}(t+\tau_i)\} \quad (3)$$

式中: $v_{i+2}(t+\tau_i)$ 为 $t+\tau_i$ 时刻换道驾驶员根据 t 时刻车辆 $i+2$ 动作而调整后的车速;侧向影响系数 $\varphi_i(t)$ 表征车辆 $i-2$ 和 $i+2$ 对换道驾驶员的影响权重。

1.3 车辆交互作用关系分析

如图 2 所示,对车辆之间的行驶关系进行如下总结:PFV 和 LCV 构成换道关系,PFV 和 PLV 构成纵向跟驰关系,LCV 和 PLV 构成侧向跟驰关系。假设 LCV 驾驶员能够较好控制车辆侧向偏移程度,且 PFV 驾驶员能够准确观测到 LCV 侧向偏移程度,

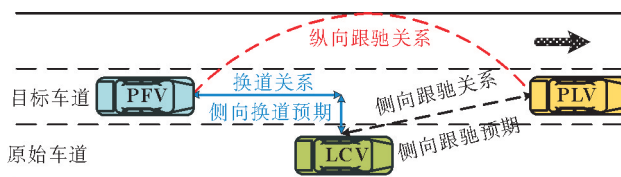


图 2 换道场景交互关系分析

将换道场景划分为图 3 所示的超车换道、让车换道和一般换道三种类型。为保证 LCV 和 PFV 驾驶员的多向多车预期能力在研究时段内同时发挥作用,三类场景中换道过程起止时刻分别定义为 PFV 和 LCV 前保险杠平齐、PLV 和 LCV 后保险杠平齐、LCV 转向灯启亮或车头开始侧向偏移的时刻,换道结束时刻统一定义为 LCV 进入目标车道后车身与车道分隔线恢复平行状态的时刻。

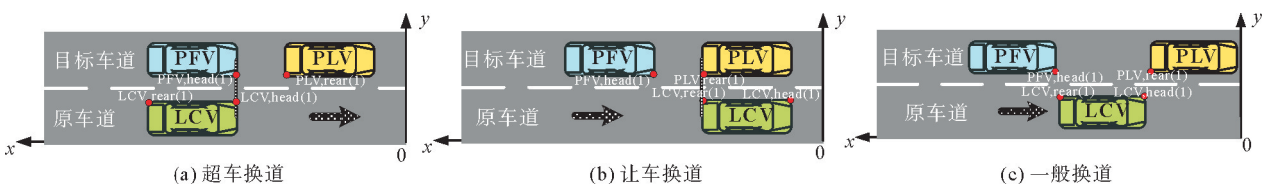


图 3 起始时刻($t=1$)车辆换道场景

2 试验方案与数据采集

选取青岛市海尔快速路某一长度约 220 m 的路段为研究地点,路段限速 60 km/h 且上下游设有信号控制交叉口,假设驾驶员可以观察到下游路口信号灯状态。如图 4 所示,在路侧高层建筑拍摄交通流运行视频,从中提取 250 组车辆轨迹数据,通过人工观测并记录交叉口信号灯色和目标车辆的换道类型,基于雷达测速仪获得车辆行驶速度,图 5 所示为典型目标车辆 LCV 的侧向移动轨迹。



图4 车辆轨迹数据采集场景

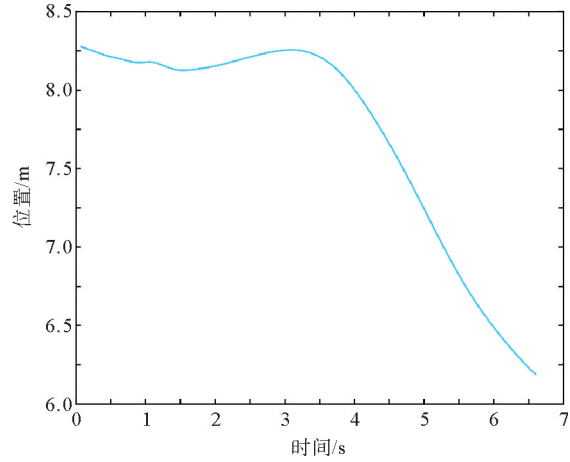


图5 车辆侧向移动轨迹

3 驾驶行为统一建模

3.1 驾驶行为模型

行驶在城市道路交叉口进口道上的车辆具有平均速度较低和加减速频繁的特点。全速度差(full velocity difference, FVD)模型能较好模拟车辆非线性加减速动作,以此为基础对换道过程中 LCV 和 PFV 的纵向行驶动作进行统一建模:

$$a_i(t) = \beta_i [V_i(\Delta x_i(t)) - v_i(t)] + \lambda_i \Delta v_i(t) \quad (4)$$

式中: $a_i(t)$ 为 t 时刻车辆 i 的加速度; $\Delta x_i(t)$ 为 t 时刻车辆 i 与前车车头间距; $v_i(t)$ 为 t 时刻车辆 i 的速度; $V_i(\cdot)$ 为车辆 i 驾驶员认定的优化车速函数; β_i 为车辆 i 驾驶员对 $V_i(\cdot)$ 与 $v_i(t)$ 差值的敏感度系数; $\Delta v_i(t)$ 为车辆 i 与前车的速度差; λ_i 为车辆 i 驾驶员对 $\Delta v_i(t)$ 的敏感度。

FVD 模型可进一步扩展为纵向多车跟驰模型:

$$a_i(t + \tau_i) = \beta_i [V_i(\sum_{j=1}^J \delta_j \Delta x_{ij}(t)) - v_i(t)] + \sum_{j=1}^J \lambda_j \Delta v_{ij}(t) \quad (5)$$

式中: J 为影响车辆 i 的前方车辆数; $\Delta x_{ij}(t)$ 为 t 时刻车辆 i 与车辆 j 的间距; δ_j 为 $\Delta x_{ij}(t)$ 对车辆 i 驾驶员的影响系数, $\sum \delta_j = 1$; $\Delta v_{ij}(t)$ 为 t 时刻车辆 i 与车辆 j 的速度差; λ_j 为 $\Delta v_{ij}(t)$ 对车辆 i 驾驶员的影响系数, $\sum \lambda_j = 1$ 。

$V_i(\cdot)$ 的定义为

$$V_i(\Delta x_i(t)) = V_{i1} + V_{i2} \tanh(C_{i1} \Delta x_i(t) - C_{i2}) \quad (6)$$

式中: V_{i1} 、 V_{i2} 、 C_{i1} 和 C_{i2} 为待标定参数。

3.2 跟驰模型

通过考虑驾驶员多向多车预期能力、交通信号和换道类型等因素综合影响,将纵向多车跟驰模型表示为

$$a_{\text{PFV}}(t + \tau_{\text{PFV}}) = \beta_{\text{PFV}} [V_{\text{PFV}}(F_{\text{PFV}, \Delta x}(\cdot)) - v_{\text{PFV}}(t)] + F_{\text{PFV}, \Delta v}(\cdot) \quad (7)$$

式中: τ_{PFV} 为 PFV 驾驶员反应时间; $a_{\text{PFV}}(t + \tau_{\text{PFV}})$ 为 $t + \tau_{\text{PFV}}$ 时刻 PFV 的纵向加速度; $V_{\text{PFV}}(\cdot)$ 为优化车速函数; β_{PFV} 为 t 时刻跟驰驾驶员对车速 $v_{\text{PFV}}(t)$ 和优化车速差值的敏感度系数; $F_{\text{PFV}, \Delta x}(\cdot)$ 为车辆间距变量组合函数; $F_{\text{PFV}, \Delta v}(\cdot)$ 为车速差变量组合函数。

绿灯相位中 $F_{\text{PFV}, \Delta x}(\cdot)$ 和 $F_{\text{PFV}, \Delta v}(\cdot)$ 分别定义为

$$\begin{cases} F_{\text{PFV}, \Delta x}(\cdot) = \xi_{\text{LCV}, \Delta v} \theta_{\text{PFV}}(t) \Delta x_{\text{LCV}}(t) + \xi_{\text{PLV}^*, \Delta x} [1 - \theta_{\text{PFV}}(t)] \Delta x_{\text{PLV}^*}(t) \\ F_{\text{PFV}, \Delta v}(\cdot) = \xi_{\text{LCV}, \Delta v} \theta_{\text{PFV}}(t) \Delta v_{\text{LCV}}(t) + \xi_{\text{PLV}^*, \Delta v} [1 - \theta_{\text{PFV}}(t)] \Delta v_{\text{PLV}^*}(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\theta_{PFV}(t)$ 为跟驰模型的侧向影响系数; $\Delta x_{LCV}(t)$ 和 $\Delta x_{PLV^*}(t)$ 分别为 t 时刻 PFV 与 LCV 和 PLV 的间距; $\Delta v_{LCV}(t)$ 和 $\Delta v_{PLV^*}(t)$ 分别为 t 时刻 PFV 与 LCV 和 PLV 的车速差。

$\theta_{PFV}(t)$ 的具体形式将根据模型标定结果而定:

$$\begin{cases} \theta_{PFV1}(t) = k_{PFV} \cdot P_{LCV}(t) \\ \theta_{PFV2}(t) = \tan(P_{LCV}(t)) / k_{PFV} \\ \theta_{PFV3}(t) = \tanh(P_{LCV}(t)) / k_{PFV} \end{cases} \quad (9)$$

式中: k_{PFV} 为待定参数; $P_{LCV}(t)$ 为侧向偏移量。

红灯相位时段中 $F_{PFV,\Delta x}(\cdot)$ 的定义改为

$$F_{PFV,\Delta x}(\cdot) = \xi_{LCV,\Delta x} \theta_{PFV}(t) \Delta x_{LCVs}(t) + \xi_{PLV^*,\Delta x} [1 - \theta_{PFV}(t)] \Delta x_{PLVs}(t) \quad (10)$$

式中: $\Delta x_{LCVs}(t)$ 为 t 时刻 LCV 与停车线的距离; $\xi_{LCV,\Delta x}$ 、 $\xi_{PLV^*,\Delta x}$ 为主动换道场景中 PFV 驾驶员对 LCV 与 PLV 间距敏感系数 ($\xi_{PFV,\Delta x} + \xi_{PLV,\Delta x} = 1$), 车速差敏感系数需满足 $\xi_{LCV,\Delta v} + \xi_{PLV^*,\Delta v} = 1$ 。

3.3 考虑多向多车预期能力影响的车辆换道模型

借鉴 YANG 等^[13]的建模方法, 将式(5)所示纵向多车跟驰模型优化为考虑 LCV 驾驶员多向多车预期能力的换道模型, 并引入交通控制信号和换道类型:

$$a_{LCV}(t + \tau_{LCV}) = \beta_{LCV} [V_{LCV}(F_{LCV,\Delta x}(\cdot)) - v_{LCV}(t)] + F_{LCV,\Delta v}(\cdot) \quad (11)$$

式中: $a_{LCV}(t + \tau_{LCV})$ 为 $t + \tau_{LCV}$ 时刻 LCV 的纵向加速度; τ_{LCV} 为 LCV 驾驶员反应时间; β_{LCV} 是 LCV 对 t 时刻车速 $v_{LCV}(t)$ 和优化车速 $V_{LCV}(\cdot)$ 差值的敏感系数。

车辆间距变量函数 $F_{LCV,\Delta x}(\cdot)$ 和车速差变量函数 $F_{LCV,\Delta v}(\cdot)$ 分别定义为

$$\begin{cases} F_{LCV,\Delta x}(\cdot) = \xi_{PFV,\Delta x} \theta_{LCV}(\cdot) \Delta x_{PFV}(\cdot) + \xi_{PLV,\Delta x} [1 - \theta_{LCV}(\cdot)] \Delta x_{PLV}(\cdot) \\ F_{LCV,\Delta v}(\cdot) = \xi_{PFV,\Delta v} \theta_{LCV}(\cdot) \Delta v_{PFV}(\cdot) + \xi_{PLV,\Delta v} [1 - \theta_{LCV}(\cdot)] \Delta v_{PLV}(\cdot) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\theta_{LCV}(t)$ 为换道模型中的侧向影响系数; $\Delta x_{PFV}(t)$ 和 $\Delta x_{PLV}(t)$ 分别为 t 时刻 LCV 与 PFV 和 PLV 的间距; $\Delta v_{PFV}(t)$ 和 $\Delta v_{PLV}(t)$ 分别为 t 时刻 LCV 与 PFV 和 PLV 的车速差。

$\theta_{LCV}(t)$ 的具体形式将根据换道模型标定结果从式(9)中获取:

$$\begin{cases} \theta_{LCV1}(t) = k_{LCV} \cdot P_{LCV}(t) \\ \theta_{LCV2}(t) = \tan(P_{LCV}(t)) / k_{LCV} \\ \theta_{LCV3}(t) = \tanh(P_{LCV}(t)) / k_{LCV} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\tan(\cdot)$ 和 $\tanh(\cdot)$ 分别为正切函数和双曲正切函数; k_{LCV} 为待定参数;

$P_{LCV}(t)$ 为 t 时刻 LCV 的侧向偏移量:

$$P_{LCV}(t) = \left| \frac{y_{LCV,h}(t) - y_{LCV,h}(n)}{\max(y_{LCV,h}(t)) - \min(y_{LCV,h}(t))} \right| \quad (14)$$

式中: $y_{LCV,h}(t)$ 为 t 时刻 LCV 车头角点(图3中 LCV,head 点)的纵坐标; n 为换道结束时刻; $\max(y_{LCV,h}(t))$ 和 $\min(y_{LCV,h}(t))$ 分别为 $y_{LCV,h}(t)$ 的最大值和最小值。

绿灯相位时段中 PFV、LCV 和 PLV 均会尽快通过交叉口, 而在红灯相位时段中它们均需减速停车。

LCV 驾驶员会根据此趋势调整其对车速的预期, 此行为机制可通过调整优化车速函数 $V_{LCV}(\cdot)$ 中的 $F_{LCV,\Delta x}(\cdot)$ 来描述。绿灯相位时段中仍沿用式(8)定义的 $F_{PFV,\Delta x}(\cdot)$, 即假设 LCV 的优化车速取决于其与 PFV 和 PLV 的间距。假设红灯相位时段中 LCV 的期望车速取决于 t 时刻 PFV 和 PLV 与停车线的距离 $\Delta x_{PFVs}(t)$ 和 $\Delta x_{PLVs}(t)$, 二者定义见图6, 其中 x_{safe} 为完全停车时两车的安全距离, L 为车身长度, 此时 $F_{LCV,\Delta x}(\cdot)$ 的定义改为

$$F_{LCV,\Delta x}(\cdot) = \xi_{PFV,\Delta x} \theta_{LCV}(t) \Delta x_{PFVs}(t) + \xi_{PLV,\Delta x} [1 - \theta_{LCV}(t)] \Delta x_{PLVs}(t) \quad (15)$$

式中: $\xi_{PFV,\Delta x}$ 、 $\xi_{PLV,\Delta x}$ 为换道驾驶员对 PFV 和 PLV 间距的敏感系数 ($\xi_{PFV,\Delta x} + \xi_{PLV,\Delta x} = 1$), 同样车速差敏

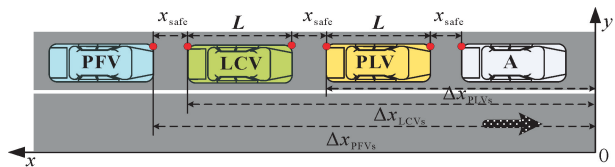


图6 信号交叉口车辆排队状态

感系数也需满足 $\xi_{\text{PFV},\Delta v} + \xi_{\text{PLV},\Delta v} = 1$ 。

4 模型标定与评价

4.1 模型标定

模型标定主要分为三步:①确定驾驶员反应时间 $\tau_{\text{LCV}}, \tau_{\text{PFV}}$;②确定计算侧向影响系数 $\theta_{\text{LCV}}(t)$ 、 $\theta_{\text{PFV}}(t)$ 的方法;③确定模型中剩余参数。选择 Theil 函数作为优化目标函数^[14]:

$$U = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^M (a_{\text{real}_m} - a_{\text{sim}_m})^2}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M (a_{\text{real}_m})^2} + \sqrt{\sum_{m=1}^M (a_{\text{sim}_m})^2}} \quad (16)$$

式中: M 为样本量; m 为样本编号; a_{real_m} 、 a_{sim_m} 分别为采用原始数据和仿真模型得出的车辆纵向加速度; U 为 Theil 函数的不相等系数, U 值越趋近于 0 则表明其拟合度越好。

使用 MATLAB 中遗传算法工具箱进行求解,参考文献[15]进行参数设置:种群大小 50、最大迭代次数 300、交叉概率 0.8、迁移间隔 20、迁移率 0.2、初始惩罚因子 10、最小误差 10^{-6} 。

4.2 模型评价

4.2.1 评价指标

利用平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)对标定后的模型进行评价,方法如下:

$$\begin{cases} E_{\text{ME}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (a_{\text{real}_m} - a_{\text{sim}_m}) \\ E_{\text{MAE}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |a_{\text{real}_m} - a_{\text{sim}_m}| \\ E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (a_{\text{real}_m} - a_{\text{sim}_m})^2} \end{cases} \quad (17)$$

式中: E_{ME} 为平均误差; E_{MAE} 为平均绝对误差; E_{RMSE} 为均方根误差。

4.2.2 试验模型

通过构建 4 组试验模型,并将其结果与研究模型进行比较,试验过程如下:

试验换道模型 1 和试验跟驰模型 1:假设 LCV 与 PFV 驾驶员仅考虑对方纵向行驶状态,则式(8)和式(12)表示为

$$\begin{cases} F_{\text{LCV},\Delta x}(\cdot) = \Delta x_{\text{PFV}}(t) \\ F_{\text{LCV},\Delta v}(\cdot) = \Delta v_{\text{PFV}}(t) \\ F_{\text{PFV},\Delta x}(\cdot) = \Delta x_{\text{LCV}}(t) \\ F_{\text{PFV},\Delta v}(\cdot) = \Delta v_{\text{LCV}}(t) \end{cases} \quad (18)$$

试验换道模型 2 和试验跟驰模型 2:假设 LCV 与 PFV 驾驶员受侧向行驶车辆和换道类型改变的影响,则式(8)和式(12)表示为

$$\begin{cases} F_{\text{LCV},\Delta x}(\cdot) = \xi_{\text{PFV},\Delta x} \theta_{\text{LCV}}(t) \Delta x_{\text{PFV}}(t) \\ F_{\text{LCV},\Delta v}(\cdot) = \xi_{\text{PFV},\Delta v} \theta_{\text{LCV}}(t) \Delta v_{\text{PFV}}(t) \\ F_{\text{PFV},\Delta x}(\cdot) = \xi_{\text{LCV},\Delta x} \theta_{\text{PFV}}(t) \Delta x_{\text{LCV}}(t) \\ F_{\text{PFV},\Delta v}(\cdot) = \xi_{\text{LCV},\Delta v} \theta_{\text{PFV}}(t) \Delta v_{\text{LCV}}(t) \end{cases} \quad (19)$$

试验换道模型 3 和试验跟驰模型 3:假设 LCV 与 PFV 驾驶员均只关注目标车道上 PLV 行驶状态,则式(8)和式(12)表示为

$$\begin{cases} F_{\text{LCV},\Delta x}(\cdot) = \xi_{\text{PLV},\Delta x} [1 - \theta_{\text{LCV}}(t)] \Delta x_{\text{PLV}}(t) \\ F_{\text{LCV},\Delta v}(\cdot) = \xi_{\text{PLV},\Delta v} [1 - \theta_{\text{LCV}}(t)] \Delta v_{\text{PLV}}(t) \\ F_{\text{PFV},\Delta x}(\cdot) = \Delta x_{\text{PLV}}(t) \\ F_{\text{PFV},\Delta v}(\cdot) = \Delta v_{\text{PLV}}(t) \end{cases} \quad (20)$$

试验换道模型4和试验跟驰模型4:假设LCV与PFV驾驶员不受换道类型变化的影响,则式(8)和式(12)表示为

$$\begin{cases} F_{\text{LCV},\Delta x}(\cdot) = \theta_{\text{LCV}}(t)\Delta x_{\text{PFV}}(t) + [1 - \theta_{\text{LCV}}(t)]\Delta x_{\text{PLV}}(t) \\ F_{\text{LCV},\Delta v}(\cdot) = \theta_{\text{LCV}}(t)\Delta v_{\text{PFV}}(t) + [1 - \theta_{\text{LCV}}(t)]\Delta v_{\text{PLV}}(t) \\ F_{\text{PFV},\Delta x}(\cdot) = \theta_{\text{PFV}}(t)\Delta x_{\text{LCV}}(t) + [1 - \theta_{\text{PFV}}(t)]\Delta x_{\text{PLV}^*}(t) \\ F_{\text{PFV},\Delta v}(\cdot) = \theta_{\text{PFV}}(t)\Delta v_{\text{LCV}}(t) + [1 - \theta_{\text{PFV}}(t)]\Delta v_{\text{PLV}^*}(t) \end{cases} \quad (21)$$

4.2.3 对照模型

采用YANG建模方法构造对照换道模型和对照跟驰模型,通过对比试验模型4和对照模型的评价结果,可以获知基础模型性能差异对研究结果的影响,对照换道模型为

$$v_{\text{LCV}}(t + \tau_{\text{LCV}}) = \theta_{\text{LCV}}v_{\text{PFV}}(t + \tau_{\text{LCV}}) + (1 - \theta_{\text{LCV}})v_{\text{PLV}}(t + \tau_{\text{LCV}}) \quad (22)$$

$$v_{\text{PLV}}(t + \tau_{\text{LCV}}) = d_{\text{LCV}}\tau_{\text{LCV}} + \sqrt{(d_{\text{LCV}}\tau_{\text{LCV}})^2 - d_{\text{LCV}}[2\Delta x_{\text{LCV},\text{PLV}}(t) - v_{\text{LCV}}(t)\tau_{\text{LCV}} - v_{\text{PLV}}^2(t)/d_{\text{PLV}}]} \quad (23)$$

$$v_{\text{PFV}}(t + \tau_{\text{LCV}}) = 0.5d_{\text{LCV}}\tau_{\text{LCV}} + \sqrt{(0.5d_{\text{LCV}}\tau_{\text{LCV}})^2 + d_{\text{LCV}}[2\Delta x_{\text{LCV},\text{PFV}}(t) + v_{\text{LCV}}(t)\tau_{\text{LCV}} - 2v_{\text{PFV}}(t)\tau_{\text{LCV}} + v_{\text{PFV}}^2(t)/d_{\text{PFV}}]} \quad (24)$$

式中: d_{LCV} 、 d_{PLV} 和 d_{PFV} 分别为LCV、PLV和PFV的最大减速度, m/s^2 , d_{LCV} 的取值范围设为 $(-11.2, -3)$, d_{PLV} 和 d_{PFV} 的取值范围为 $(-13, -3)$ 。

虽然YANG的研究中并未说明PFV驾驶员行为的建模方法,仍可借鉴其方法构建对照跟驰模型:

$$v_{\text{PFV}}(t + \tau_{\text{PFV}}) = \theta_{\text{PFV}}v_{\text{LCV}}(t + \tau_{\text{PFV}}) + (1 - \theta_{\text{PFV}})v_{\text{PLV}}(t + \tau_{\text{PFV}}) \quad (25)$$

$$v_{\text{LCV}}(t + \tau_{\text{PFV}}) = d_{\text{PFV}}\tau_{\text{PFV}} + \sqrt{(d_{\text{PFV}}\tau_{\text{PFV}})^2 - d_{\text{PFV}}[2\Delta x_{\text{PFV},\text{LCV}}(t) - v_{\text{PFV}}(t)\tau_{\text{PFV}} - v_{\text{LCV}}^2(t)/d_{\text{LCV}}]} \quad (26)$$

$$v_{\text{PLV}}(t + \tau_{\text{PFV}}) = d_{\text{PFV}}\tau_{\text{PFV}} + \sqrt{(d_{\text{PFV}}\tau_{\text{PFV}})^2 - d_{\text{LCV}}[2\Delta x_{\text{PFV},\text{PLV}}(t) - v_{\text{PFV}}(t)\tau_{\text{PFV}} - v_{\text{PLV}}^2(t)/d_{\text{PLV}}]} \quad (27)$$

4.3 模型参数分析

4.3.1 驾驶员反应时间

目前轨迹数据采集频率为10 Hz,驾驶员最短反应时间不少于0.2 s,因此将区间设置为 $[0.2, 1]$,并以0.1 s为间隔逐一将 τ_{LCV} 和 τ_{PFV} 的值代入模型中,结果如表1所示。

根据表1可知,当 $\tau_{\text{LCV}} = 1$ s和 $\tau_{\text{PFV}} = 0.7$ s时,两模型的拟合度最高。同时 $\tau_{\text{PFV}} < \tau_{\text{LCV}}$,则表明在换道中相较于LCV驾驶员而言,PFV驾驶员对外界刺激的敏感度更高。

4.3.2 侧向影响系数

基于 τ_{LCV} 和 τ_{PFV} ,确定 $\theta_{\text{LCV}}(t)$ 和 $\theta_{\text{PFV}}(t)$ 的计算结果(见表2)。

由图7可知,LCV越趋近换道结束位置, $P_{\text{LCV}}(t)$ 越小,这会导致 $\theta_{\text{LCV}}(t)$ 和 $\theta_{\text{PFV}}(t)$ 的值逐渐减小且相互接近。由式(13)模型可知, $\theta_{\text{LCV}}(t)$ 变小表示LCV受PFV的影响逐渐降低,受PLV的影响逐渐增大; $\theta_{\text{PFV}}(t)$ 变小意味着PFV受PLV的影响逐渐降低,受LCV的影响逐渐增大。由此可得出随着LCV逐渐进入目标车道,其对PFV的影响呈线性增长。

表1 驾驶员反应时间

驾驶员反应 时间/s			驾驶员反应 时间/s		
$U(\tau_{\text{LCV}}(t))$	$U(\tau_{\text{PFV}}(t))$		$U(\tau_{\text{LCV}}(t))$	$U(\tau_{\text{PFV}}(t))$	
0.2	0.6022	0.6389	0.7	0.6031	0.6301
0.3	0.5994	0.6392	0.8	0.6003	0.6313
0.4	0.5964	0.6422	0.9	0.5987	0.6341
0.5	0.6017	0.6380	1.0	0.5886	0.6326
0.6	0.5964	0.6369			

表2 侧向影响系数

$\theta_{\text{LCV}}(t)$	$U(\theta_{\text{LCV}}(t))$	$\theta_{\text{PFV}}(t)$	$U(\theta_{\text{PFV}}(t))$
$\theta_{\text{LCV1}}(t)$	0.5900	$\theta_{\text{PFV1}}(t)$	0.6360
$\theta_{\text{LCV2}}(t)$	0.5923	$\theta_{\text{PFV2}}(t)$	0.6384
$\theta_{\text{LCV3}}(t)$	0.5834	$\theta_{\text{PFV3}}(t)$	0.6419

4.3.3 其他参数

将 τ_{LCV} , τ_{PFV} 和 $\theta_{LCV}(t)$, $\theta_{PFV}(t)$ 代入模型,标定结果如表 3 所示。对比 β_{PFV} , β_{LCV} 的值可知,PFV 驾驶员对最优车速与当前车速之差更敏感。与强制换道场景相比,主动换道场景中 LCV 对其与 PLV 间距的关注胜过 PFV,此场景下 LCV 受到与 PFV 车速差的影响要大于 PLV。

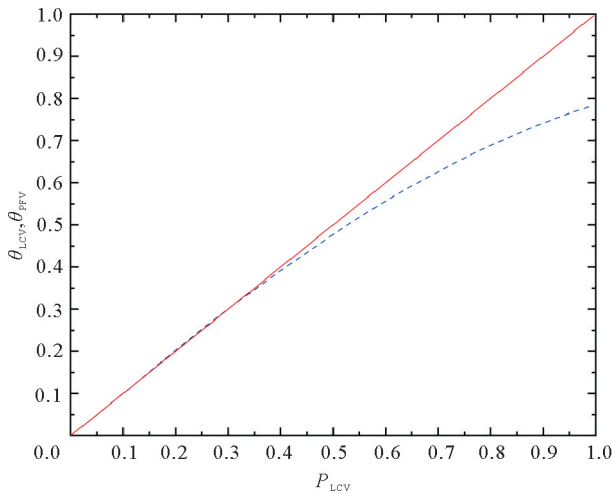


图 7 P_{LCV} 与 θ_{LCV} 和 θ_{PFV} 的关系
— PFV; - - - LCV

表 3 模型标定结果

跟驰模型		换道模型	
参数名称	标定结果	参数名称	标定结果
β_{PFV}	0.114	β_{LCV}	0.086
k_{PFV}	0.218	k_{LCV}	0.942
$\xi_{LCV, \Delta r}$	0.344	$\xi_{PFV, \Delta r}$	0.241
$\xi_{PLV^*, \Delta r}$	0.656	$\xi_{PLV, \Delta r}$	0.759
$\xi_{LCV, \Delta v}$	0.129	$\xi_{PFV, \Delta v}$	0.601
$\xi_{PLV^*, \Delta v}$	0.869	$\xi_{PLV, \Delta v}$	0.398
V_{PFV1}	-20.245	V_{LCV1}	7.637
V_{PFV2}	25.840	V_{LCV2}	36.938
C_{PFV1}	1.055	C_{LCV1}	0.285
C_{PFV2}	5.249	C_{LCV2}	0.543

4.4 模型评价结果

将式(7)和式(11)中的模型分别称为研究换道模型和研究跟驰模型,各模型评价结果如表 4 所示,各模型的拟合度和精度表现良好。在跟驰模型研究中,研究跟驰模型的平均误差最低,表明考虑驾驶员多向多车预期能力、交通信号和换道类型等因素综合影响的模型与真实数据更加吻合,相比于 Gipps 跟驰模型,拓展全速度差模型能更好地模拟城市道路上车辆运行状态。在换道模型研究中,试验跟驰模型 2 的平均误差显著小于其他模型,表明驾驶员受侧向行驶车辆和换道类型改变的影响显著且更加符合实际场景。

表 4 模型评价结果

模型	评价指标	研究模型	试验模型 1	试验模型 2	试验模型 3	试验模型 4	对照模型
跟驰模型	ME	0.404	1.200	1.082	2.095	0.856	1.476
	MAE	3.279	3.366	2.677	3.659	3.296	3.643
	RMSE	4.142	4.187	3.333	4.367	4.223	4.357
换道模型	ME	-1.100	-1.185	-1.024	-2.667	-1.143	-1.768
	MAE	2.572	2.987	2.585	3.689	2.580	2.589
	RMSE	3.290	3.723	3.249	4.569	3.437	4.432

5 结束语

车辆跟驰和换道行为均具有预期多向多车行驶状况的能力,对驾驶行为实行统一建模,以提高微观交通流仿真精度与效率。本文以全速度差模型为基础,将其拓展为考虑驾驶员多向多车预期能力的换道模型和跟驰模型,并将交通信号、换道类型等因素考虑在内。由于各模型结构统一,通过不同模型的参数可以对比了解驾驶员面对外界刺激的不同方式,以及不同基础研究对模型性能的影响。

在车辆换道和跟驰模型中考虑侧向行驶车辆的影响会显著改善模型性能,侧向行驶车辆运动状态和换道类型变化对跟驰驾驶员的影响比换道车辆大。与 Gipps 模型相比,拓展全速度差模型能更好地模拟

城市道路上车辆运行状态。对比换道行为,跟驰行为对外界刺激更加敏感。随着换道车辆逐渐进入目标车道,其对跟驰驾驶员的影响呈线性增长,而跟驰车辆对换道驾驶员的影响会持续更长时间。

车辆换道和跟驰行为受到众多交通因素影响,后续研究还需考虑更多影响因素来提高模型精度和准确性,充分探讨不同模型参数对驾驶员决策行为的影响。

参考文献(References):

- [1] 张可琨, 曲大义, 宋慧, 等. 自动驾驶汽车换道决策行为分析及分子相互作用势建模[J]. 青岛理工大学学报, 2023, 44(5): 150-159.
ZHANG Kekun, QU Dayi, SONG Hui, et al. Analysis of lane-changing decision-making behavior and molecular interaction potential modeling for autonomous vehicles[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2023, 44(5): 150-159.
- [2] 刘浩敏, 曲大义, 王少杰, 等. 快速路交织区车辆换道行为对交通流的影响分析[J]. 青岛理工大学学报, 2022, 43(4): 126-131.
LIU Haomin, QU Dayi, WANG Shaojie, et al. Analysis of influence of lane-changing behavior on traffic flow of expressway weaving section[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2022, 43(4): 126-131.
- [3] ZHOU M F, YU Y, QU X B. Development of an efficient driving strategy for connected and automated vehicles at signalized intersections: A reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(1): 433-443.
- [4] CHEN Q, ZHOU Y, AHN S, et al. Robustly string stable longitudinal control for vehicle platoons under communication failures: A generalized extended state observer-based control approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2022, 8(1): 159-171.
- [5] 洪家乐, 曲大义, 贾彦峰, 等. 基于驾驶人反应特性的车辆跟驰行为及模型[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(4): 108-114.
HONG Jiale, QU Dayi, JIA Yanfeng, et al. Car-following behavior and model based on driver response characteristics[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2021, 42(4): 108-114.
- [6] 曲大义. 车流运行动态特性及其控制[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
QU Dayi. Dynamic characterization of traffic operation and control[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [7] KESTING A, TREIBER M, HELBING D. General lane changing model MOBIL for car following models[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2007, 1999(1): 86-94.
- [8] DI Xuan, SHI Rongye. A survey on autonomous vehicle control in the era of mixed-autonomy: From physics-based to AI-guided driving policy learning[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 125: 103008.
- [9] 杨龙海, 张春, 仇晓赟, 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 Longhai, ZHANG Chun, QIU Xiaoyun, et al. Research progress on car-following models[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(5): 125-138.
- [10] CHEN K, KNOOP V L, LIU P, et al. Modeling the impact of lane-changing's anticipation on car-following behavior[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 150: 104110.
- [11] MORIDPOUR S, SARVI M, ROSE G. Modeling the lane changing execution of multiclass vehicles under heavy traffic conditions[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2161(1): 11-19.
- [12] 王少杰, 曲大义, 刘浩敏, 等. 面向数据驱动的车辆跟驰行为建模[J]. 公路交通科技, 2023, 40(11): 222-228.
WANG Shaojie, QU Dayi, LIU Haomin, et al. Modeling of car-following behavior based on data-driven method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(11): 222-228.
- [13] YANG Da, ZHU Liling, RAN B, et al. Modeling and analysis of the lane changing execution in longitudinal direction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(10): 1-9.
- [14] 曲大义, 杨晶茹, 邴其春, 等. 基于干线车流排队特性的相位差优化模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(6): 1685-1693.
QU Dayi, YANG Jingru, BING Qichun, et al. Arterial traffic offset optimization based on queue characteristics at adjacent intersections[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2018, 48(6): 1685-1693.
- [15] LI Li, CHEN Xiqun, ZHANG Lei. A global optimization algorithm for trajectory data based car following model calibration[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 68: 311-332.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)