

文章编号:1671-1637(2022)01-0250-13

考虑多前车作用势的混行交通流车辆跟驰模型

宗芳¹,王猛¹,曾梦²,石佩鑫¹,王力³

(1. 吉林大学 交通学院,吉林 长春 130022; 2. 浙江师范大学 工学院,浙江 金华 321004;

3. 北方工业大学 城市道路交通智能控制技术北京市重点实验室,北京 100144)

摘要:基于自动驾驶车辆(AV)和常规人驾车辆(RV)混合行驶的情况,在全速度差(FVD)模型的基础上考虑了多前车和一辆后车的车头间距、速度、速度差、加速度差等因素,建立了适用于AV和RV 2种车辆的混行车辆跟驰模型;引入分子动力学理论量化表达了周围车辆对主体车辆的影响程度;利用RV和AV混行场景跟车数据,以模型拟合精度最高为目标,对所有参数遍历寻优,进行标定;对比分析了混行车辆跟驰模型和FVD模型控制下交通流的稳定性,解析了车速对交通流稳定性的影响;设计了数值仿真试验,模拟了城市道路和高速公路2种常见场景,分析了混行车辆跟驰模型的拟合精度。研究表明:考虑周围多车信息有利于提高交通流的稳定性;车辆速度越低交通流稳定性越差;考虑多车信息的分子动力学混行车辆跟驰模型可以提前获得整个车队的运行趋势,更好地模拟AV的动力学特征;与FVD模型相比,在城市道路条件下混行车辆跟驰模型中的RV平均最大误差与平均误差分别减小了 $0.18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和13.12%,拟合精度提高了4.47%;与PATH实验室的ACC模型相比,在高速公路条件下混行车辆跟驰模型中的AV平均最大误差和平均误差分别减小了7.78%和26.79%,拟合精度提高了1.21%。可见,该模型可用于混行环境下AV的跟驰控制与队列控制,以及AV和RV的跟驰仿真。

关键词:交通控制;混行交通流;车辆跟驰模型;交通仿真;自动驾驶车辆;常规人驾车辆

中图分类号:U491.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2022.01.021

Vehicle-following model in mixed traffic flow considering interaction potential of multiple front vehicles

ZONG Fang¹, WANG Meng¹, ZENG Meng², SHI Pei-xin¹, WANG Li³

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, Jilin, China; 2. College of Engineering,

Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China; 3. Beijing Key Lab of Urban Intelligent

Traffic Control Technology, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: The mixed traffic flow consisting of automated vehicle (AV) and regular vehicle (RV) was analyzed. Based on the full velocity difference (FVD) model, a vehicle-following model for two types of vehicles (AV and RV) in mixed traffic flow was constructed by considering the factors of the headway, velocity, velocity difference and acceleration difference of multiple front vehicles and one rear vehicle. By introducing the molecular dynamics, the model also quantitatively expressed the influence degree of a surrounding vehicle on the host vehicle.

收稿日期:2021-08-01

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1600500);国家自然科学基金项目(61873109)

作者简介:宗芳(1979-),女,吉林长春人,吉林大学教授,工学博士,从事交通流理论研究。

通讯作者:王力(1978-),男,安徽肥东人,北方工业大学教授,工学博士。

引用格式:宗芳,王猛,曾梦,等.考虑多前车作用势的混行交通流车辆跟驰模型[J].交通运输工程学报,2022,22(1):250-262.

Citation: 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.

According to the data collected from the vehicle-following field test mixed with AVs and RVs, the model parameters were globally optimized to obtain the highest accuracy. The stability of traffic flow for the vehicle-following model and FVD model was compared, and the influence of velocity on the stability of traffic flow was analyzed. Numerical simulation was designed to simulate the common traffic scenarios including urban areas and expressways, and the accuracy of the proposed model was analyzed. Simulation results indicate that the stability of traffic flow improves by considering the information from surrounding multiple vehicles, and the small velocity can reduce the stability. The proposed model can respond to the behaviours of the whole platoon in advance and simulate the dynamics characteristics of AVs better. In urban areas, compared with the FVD model, the average maximum error and average error of RV for the proposed model reduce by $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and 13.12%, respectively, and the accuracy improves by 4.47%. In expressways, compared with the adaptive cruise control (ACC) model provided by PATH Laboratory, the average maximum error and average error of AV for the proposed model reduce by 7.78% and 26.79%, respectively, and the accuracy improves by 1.12%. In addition to providing model basis for AV-following control and queue control in mixed traffic flow, the proposed model can be utilized in vehicle-following behavior simulation for AV and RV. 1 tab, 7 figs, 38 refs.

Key words: traffic control; mixed traffic flow; vehicle-following model; traffic simulation; automated vehicle; regular vehicle

Author resumes: ZONG Fang(1971-), female, professor, PhD, zongfang@jlu.edu.cn; WANG Li(1978-), male, professor, PhD, Li.wang@ncut.edu.cn.

Foundation items: National Key Research and Development Program of China(2018YFB1600500); National Natural Science Foundation of China(61873109)

0 引言

跟驰是一种常见的微观驾驶行为,描述了在单行道中两相邻车辆间的相互作用^[1]。跟驰行为对车辆的运行效率、道路通行效率以及交通流稳定性有重要影响^[2-3],因此,车辆跟驰行为建模一直是微观交通流建模领域的研究热点之一。随着自动驾驶技术的发展,通过安装车载传感器、激光雷达和测量天线等设备,车辆能够获取到更多、更精确的周围车辆的实时数据,并实现驾驶操作的辅助与智能决策^[4-5]。然而,根据最新研究,到2045年,四级自动驾驶车辆在城市道路中的渗透率仅为24.8%^[6]。这表明未来很长一段时间内,常规人驾车辆(Regular Vehicle, RV)与不同等级自动驾驶车辆(Automated Vehicle, AV)存在混合行驶的情况。通过分析RV和AV的混行车辆跟驰行为,对混行交通流进行建模和仿真,有利于优化车辆的跟驰行为,提升车辆的运行效率,增强交通流稳定性。

混行交通流的车辆跟驰建模研究是智能网联环境下微观交通仿真研究的一大热点。学者们主要从

基于传统车辆跟驰模型的改进以及自动驾驶车辆跟驰行为建模两个角度进行了研究。

在自动驾驶车辆的跟驰行为建模方面,近期研究主要采用现有车辆跟驰模型对混行交通流的车辆跟驰特性进行具体分析。Xie等^[7]提出了一个通用的车辆跟驰框架,并推导出异质流稳定性条件,仿真结果表明,AV的加入可以增强交通流的稳定性,尤其是在交通拥堵时,能够显著提高交通效率,但是模型中并未考虑周围车辆对主体车辆运动状态的影响;Ngoduy^[8]通过对全速度差(Full Velocity Difference, FVD)模型和智能驾驶模型(Intelligent Driver Model, IDM)进行线性稳定性分析,找到了异质流稳定性阈值,进而得到不同AV渗透率对交通流稳定性的影响,其中FVD模型中驾驶人的反应时间根据经验得到一个定值,该模型并未考虑驾驶人的反应时间与速度的关系,同时也没有考虑周围车辆对主体车辆的影响;Zhu等^[9]使用最优速度(Optimal Velocity, OV)模型研究了混合交通流的基本图和密度波;宗芳等^[10]构建了一个考虑前后多车车头间距、多前车速度差、加速度差和多前后车与

目标车辆相对位置等信息的混行车辆跟驰模型,数据分析结果表明,考虑前后多车的信息有利于优化车辆的跟驰行为,提高模型仿真精度,并且混流中自动驾驶车辆的增加对于交通流运行效率和稳定性都有积极影响,但是该模型采用不同车辆的位置粗略地表达对主体车辆的影响权重,没有考虑不同车辆的速度和车辆间距等因素。

在对传统车辆模型的改进方面,针对基于自动驾驶技术特征进行改进是目前研究的主要切入点。唐亮等^[11]基于多期望速度与速度差改进了 FVD 模型,已应用到混行交通流 RV 仿真;Tang 等^[12]提出考虑车辆间通信的跟驰模型以克服 FVD 模型在碰撞事故方面的缺陷;Ou 等^[13]将车辆间的通信功能应用于双车道交通系统实现了对发生事故时车辆运行状况的实时分析;Li 等^[14]提出基于多前车车头间距、速度差和加速度差的车辆跟驰模型,仿真结果表明,该模型通过获得周围车辆的信息,能够提前改变主体车辆的运动状态,提高车队的运行效率,但是该模型并没有考虑驾驶人的反应时间,也没有考虑不同车辆的速度和车辆间距对权重的影响;华雪东等^[15]基于 Newell 跟驰模型,引入参数表达驾驶人收到车车信息后的提前反应程度,提出单车道跟驰模型;曲大义等^[16]首次应用分子动力学研究了车辆跟驰特性,并对跟驰模型的多个刺激项的反应权重进行赋值,数值结果表明,分子跟驰模型能够有效弥补速度跟驰的不足,对跟驰状态的描述更加真实,但是该模型没有考虑驾驶人的反应时间,也没有考虑主体车辆的速度、速度差等信息;李娟等^[17]基于分子动力学构建车辆相互作用势,结合刺激-反应模型建立了基于相互作用势函数的分子跟驰模型,仿真结果表明,考虑车辆间的相互作用有利于提高模型拟合精度,但是该模型没有考虑主体车辆的速度差和加速度差等信息,也没有考虑驾驶人的反应时间与速度的关系;Milanés 等^[18]基于车辆间距与期望车辆间距的误差、车辆间距误差权重、速度差权重和车辆间距误差微分权重等参数,提出了可搭载自适应巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)的跟驰模型,但是,ACC 跟驰模型没有考虑周围车辆对主体车辆的运动状态的影响,也没有分析速度的变化对混行交通流稳定性的影响;秦严严等^[19]从基于自动驾驶的跟驰模型、PATH 实验室跟驰模型和基于控制论的跟驰模型 3 个角度,对混行交通流进行了解析。

在对混流环境下交通流稳定性研究方面,Yao 等^[20]采用 FVD 模型和 ACC 模型分别描述 RV 和 AV 的

驾驶行为,同时分析了混流环境下交通流的稳定性,得到了不同 AV 比例下混行交通流的稳定性条件,数据分析结果表明:随着车队中 AV 比例不断提高,路段的通行能力和交通流的稳定逐渐增加,但是没有考虑模型中不同参数(期望车辆间距、速度等)对交通流稳定性的影响;Hu 等^[21]应用 IDM 模型和 ACC 模型分别描述 RV 和 AV 的驾驶行为,同时分析了跟驰模型中期望车头时距对交通流的稳定和交通安全的影响,仿真结果表明:期望车头时距是反映 AV 驾驶行为的重要参数,并且降低期望时距可以在很大程度上提高混行交通流的通行能力,然而没有进一步考虑速度对混行交通流稳定性的影响。

纵观以上混行车辆跟驰行为建模的相关研究,其中关于描述混行交通流中不同类型车辆的跟驰行为的普适性模型较少。此外,AV 的响应驾驶策略是基于速度传感器、激光测距仪等仪器获得本车和周围车辆的速度和车辆间距等信息,进行加速度的计算,从而实现对 AV 的控制。由于不同品牌、不同等级 AV 的控制算法是不同的,因此,无法使用不同 AV 驾驶策略建立 AV 模型,需要构建满足 AV 基本跟驰特性的普适性模型代表 AV 跟驰策略。目前,混行跟驰模型较少考虑驾驶人的反应时间与速度的关系以及速度的变化对交通流稳定性的影响,在表达不同前车对主体车辆的影响权重时也没有考虑前车的速度和车辆间距等因素。本文将在分析 RV 和 AV 跟驰行为基础上构建一种同时适用于 RV 和 AV 的普适性混行跟驰模型;在表达多前车对主体车辆的不同影响权重时,将考虑多前车对主体车辆的吸引和排斥作用力,以及车辆的速度和车辆间距等因素。

1 混行车辆跟驰行为分析

本文考虑由 RV 和 AV 组成的混行交通流环境,其中,RV 在行驶过程中,驾驶人通过直观感受判断前车运动状态和周围行车环境,做出驾驶决策。一般来说,驾驶人对前后车辆加速度的变化并不敏感,因此,RV 在模型构建中仅考虑紧邻前车的车头间距与速度差信息。另外,驾驶人作为处理信息的判断者和决策者,其反应时间是影响跟驰行为的重要因素,因此,在模型构建中,需要考虑驾驶人的反应时间 t 。如图 1 所示,本文获得了 20 辆人驾实车不同跟车速度 v 下驾驶人的反应时间。通过分析图像发现,低速状态下,驾驶人的反应时间较长,但是随着车辆速度的增加,反应时间缩短较快;当车速达

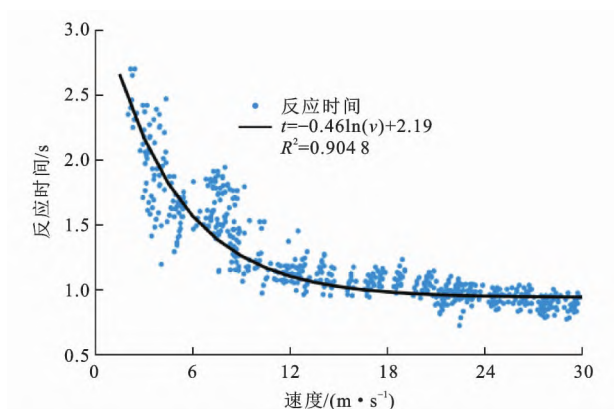


图1 反应时间-速度关系

Fig. 1 Relationship between reaction time and velocity

到 $10 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 驾驶人的反应时间继续缩短, 但是整体下降趋势变缓; 当车速大于 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 即高速路况下, 驾驶人的平均反应时间为 0.88 s , 且反应时间相对于低速情况下波动幅度更小。通过对该数据进行拟合, 得到了驾驶人的反应时间为 $t = -0.46\ln(v) + 2.19$, 决定系数 R^2 为 0.9048 。该反应时间指驾驶人一般变速过程的反应时间, 既包括 RV 加速过程, 也包括减速过程。分析结果表明, 不同跟车速度下驾驶人的反应时间规律是相似的, 即反应时间与速度的关系呈现对数曲线趋势。

AV 指依靠车载探测设备, 实时获取周围多车运动状态信息, 并能够通过加速度优化算法进行控制的车辆, 因此, AV 除了能够实时获得紧邻前后车的车辆间距、速度、速度差信息, 还能获得加速度信息, 并对获得的信息进行处理, 得到本车与紧邻前后车间的加速度差。与 RV 模型不同的是, AV 模型还要考虑前后车的加速度差信息。在实际跟车过程中, 由于 AV 能够直接获得周围车辆的加速度信息, 相比 RV, AV 拥有更快的启动和制动能力。Zhao 等^[22]利用前后车辆的加速度差数据, 对车辆的实际跟驰行为进行仿真, 结果表明, 考虑前后车辆的加速度差 (Full Velocity and Acceleration Difference, FVAD) 模型初始阶段的启动速度要比 FVD 模型更快, 同时还可以准确描述车辆在紧急情况下的制动行为, 避免出现不切实际的减速情况。

在实际行驶过程中, AV 通过激光雷达、测距仪等车载探测设备, 不仅能够获得紧邻前车和后车的运动状态, 同时还能获得多前车的速度、加速度、与本车的速度差和车辆间距等信息, 并通过加速度优化算法对 AV 进行控制。例如, 当前方车辆突然减速时, AV 能够及时获得减速信息, 并提前减速, 从而保证整个驾驶过程的平稳运行, 减少不必要的干

扰, 降低碰撞的可能性。类似的, 当前方车辆突然加速, 在保证安全距离的情况下, AV 利用多前车加速的信息, 逐渐开始加速, 进而提高整个车队的通行效率。研究结果表明^[10,14], 考虑多前车的信息有利于优化车辆的跟驰行为, 提高模型仿真精度。而且不同位置的多前车对主体车辆的影响程度不同, 所以需要量化表达出不同车辆对主体车辆的影响程度。以前的研究^[23]主要根据前车的不同位置 (即在主体车辆前的位置排序) 计算多前车对主体车辆的影响程度。在实际驾驶过程中, 前车的位置、与主体车辆之间的距离以及不同车速都会对主体车辆产生不同的影响^[24-26]。例如, 随着前车与主体车辆之间的距离增加, 前车对主体车辆的影响逐渐减小; 相同车辆间距下, 车辆速度越快, 前车运动状态的改变对主体车辆的影响程度越大, 所以在量化表达不同车辆对主体车辆的影响程度时, 还要考虑不同车辆的速度和车辆间距等因素。在实际行驶过程中, AV 作为处理交通信息的判断者和决策者, 反应时间为信息处理时间。蔡晓禹^[27]等在车联网环境驾驶人反应时间的研究中指出, 在车联网环境驾驶人简单反应时间的均值为 0.97 s 。

2 混行车辆跟驰建模

2.1 改进 FVD 的混行车辆跟驰模型

在行驶过程中, RV 通过驾驶人观察判断, 可得到本车的速度, 以及本车与前车的车辆间距和速度差。而 AV 通过速度传感器、激光测距仪等仪器能够获得本车和周围车辆的速度、加速度、车辆间距和速度差等信息, 通过计算加速度实现 AV 的驾驶决策。由于车载传感器无法感知多前车的类型, 因此, 在构建混行车辆跟驰模型时, 本文不考虑多前车的类型和排序。另外, 不同品牌、不同等级 AV 的车载设备对车速、车辆间距等信息的感知判断一定会存在误差, 这是不可避免的, 所以本文构建的普适性模型忽略该误差可能带来的累积效应。基于速度、速度差与车辆间距等信息, 本文以 FVD 模型为基础^[28], 结合后续学者对该模型的改进, 包括 FVAD 模型^[22]、考虑后视效应和速度差信息 (Backward Looking and Velocity Difference, BLVD) 跟驰模型^[29]、基于多车头间距、速度和加速度差 (Multiple Headway, Velocity and Acceleration Difference, MHVAD) 跟驰模型^[14]等, 提出了考虑多前车和一辆后车的车辆间距、速度差、加速度差等信息的普适性混行车辆跟驰模型, 跟驰车辆加速度的表达式为

$$\begin{aligned} \frac{dv_n(t)}{dt} = & \alpha_I \left\{ P_I V_F \left[\sum_{i=1}^q \beta_i \Delta x_{n+i-1}(t) \right] + \right. \\ & (1 - P_I) V_R [\Delta x_{n-1}(t)] - v_n(t) \left. \right\} + \\ & \lambda_I \left[\tau_I \sum_{i=1}^q \beta_i \Delta v_{n+i-1}(t) + (1 - \tau_I) \Delta v_{n-1}(t) \right] + \\ & k_I \left[\zeta_I \sum_{i=1}^q \beta_i \Delta a_{n+i-1}(t) + (1 - \zeta_I) \Delta a_{n-1}(t) \right] \quad (1) \end{aligned}$$

式中: $V_F(\cdot)$ 与 $V_R(\cdot)$ 分别为目标车辆 n 前方与后方车辆的最优速度函数; $\Delta x_{n+i-1}(t)$ 为 t 时刻目标车辆 n 与前方第 i 辆车之间的车头间距; $\Delta x_{n-1}(t)$ 为 t 时刻目标车辆 n 与后方最邻近车辆之间的车头间距; $v_n(t)$ 为目标车辆 n 在 t 时刻的速度; $\Delta v_{n+i-1}(t)$ 为 t 时刻目标车辆 n 与前方第 i 辆车之间的速度差; $\Delta v_{n-1}(t)$ 为 t 时刻目标车辆 n 与最邻近后方车辆的速度差; $\Delta a_{n+i-1}(t)$ 为 t 时刻目标车辆 n 与前方第 i 辆车之间的加速度差; $\Delta a_{n-1}(t)$ 为 t 时刻目标车辆 n 与最邻近后方车辆的加速度差; q 为目标车辆可感知的前方车辆数; λ_I 和 k_I 分别为不同类型车辆对速度差和加速度差敏感系数, 均为量纲为 1 的参数, $I = 1, 2$ 分别为 RV 和 AV; α_I 为不同类型车辆对车辆间距的敏感系数, $\alpha_I > 0$ 且与反应时间成倒数关系^[27], 同时, 当 $I = 1$ 时, 由于 RV 驾驶人对于前后车辆加速度信息不敏感, 因此, 设定 $k_I = 0, \alpha_I = \frac{1}{-0.46 \ln[v_n(t)] + 2.19}$, 当 $I = 2$ 时, $\alpha_I = \frac{1}{0.97}$; P_I 、 τ_I 和 ζ_I 分别为前方车辆对主体车辆最优速度、速度差和加速度差的权重系数, 均为量纲为 1 的参数; β_i 为前方第 i 辆车对主体车辆的权重系数, 并且和车辆间距、速度差和加速度差有关, $\beta_i \geq 0$, 且 $\sum_{i=1}^q \beta_i = 1$ 。

分子动力学理论^[30-31]认为, 分子间存在吸引和排斥的作用。随着间距的减小, 分子相互间引力逐渐加强, 当间距靠近到一定距离以内时, 分子相互间会产生强烈的斥力作用。而且在相同间距下, 分子运动越剧烈, 相互间产生的作用力越强。如果将车辆视作分子, 当前车与主体车辆相距较远时, 前车有吸引主体车辆的趋势, 且随着两车逐渐接近, 引力逐渐减小; 而当前车与主体车辆相距较近时, 前车有排斥主体车辆的趋势, 且随着距离缩小斥力逐渐增强。由于不同位置的前车与主体车辆的距离不同, 所以每一辆前车对主体车辆的作用势不同。可见, 前车与跟驰车辆之间的相互作用关系类似于分子间的作用势, 所以本文引入分子动力学理论量化表达不同前车对主体车辆的影响程度。 β_i 的赋值方式如下

$$\begin{cases} \beta_i = \frac{U_i}{\sum_{i=1}^q U_i} \\ U_i = A_1 \left\{ \frac{f[v_i(t)]}{\Delta x_i(t)} \right\}^{12} - A_2 \left\{ \frac{f[v_i(t)]}{\Delta x_i(t)} \right\}^6 \\ f[v_i(t)] = bv_i(t) + a[v_i(t)]^2 + c \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_i 为主体车辆受到第 i 辆前车运动影响的吸引或排斥势能函数, 与第 i 辆车的速度和所在位置有关; $\sum_{i=1}^q U_i$ 为主体车辆受到 q 辆前车运动影响的总势能值; A_1 、 A_2 为场强度参数, 需由实测数据标定; $A_1 \left\{ \frac{f[v_i(t)]}{\Delta x_i(t)} \right\}^{12}$ 为主体车辆受到第 i 辆前车运动影响的强相互作用势能; $A_2 \left\{ \frac{f[v_i(t)]}{\Delta x_i(t)} \right\}^6$ 为主体车辆受到第 i 辆前车运动影响的弱相互作用势能; 2 种势能叠加的势能值为主体车辆与第 i 辆前车的吸引或排斥势能; $f[v_i(t)]$ 为第 i 辆车的速度函数, 表达第 i 辆车的速度对主体车辆的影响, 通常用二次多项式表达^[32]; $\Delta x_i(t)$ 为 t 时刻主体车辆与第 i 辆车之间的车辆间距; a 、 b 、 c 为数量级参数, 需由实测数据标定。

根据实测车辆轨迹数据^[33], 分别对道路的法向场增益系数和终点场增益系数进行标定。在完成各自增益系数的标定后, 将初步标定结果和样本数据放入同一仿真程序中, 以 0.01 s 的步长遍历整体轨迹, 获得最优轨迹下的最优参数取值。

式(2)中: $A_1 = A_2 = -9 \times 10^{-7} \bar{v}^3 + 0.0002 \bar{v}^2 - 0.02 \bar{v} + 0.59$, \bar{v} 为路段平均速度; $a = \frac{1}{2a_i(t)}$, $b = 1.2$ s, $c = 2.5$ m, $a_i(t)$ 为 t 时刻第 i 辆前车的加速度。

其中跟驰车辆相对于前车的的速度函数 $V_F(\cdot)$ 和跟驰车辆相对于后车的的速度函数 $V_R(\cdot)$ 分别表示为^[24]

$$V_F[\Delta x_n(t)] = V_1 + V_2 \tanh \left\{ C_1 [\Delta x_n(t) - l] - C_2 \right\} \quad (3)$$

$$V_R[\Delta x_{n-1}(t)] = - \left\{ V_1 + V_2 \tanh \left(C_1 [\Delta x_{n-1}(t) - l] - C_2 \right) \right\} \quad (4)$$

式中: l 为车身长度; V_1 、 V_2 、 C_1 、 C_2 均为需要标定的参数^[34]; $V_F[\Delta x_n(t)]$ 为随 $\Delta x_n(t)$ 增加而增大的单调增函数; $V_R[\Delta x_{n-1}(t)]$ 为随 $\Delta x_{n-1}(t)$ 增大而减小的单调减函数。

最优速度函数参数的选取依据 Helbing 和 Tich 的实车标定函数,其中, $V_1 = 6.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $V_2 = 7.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $C_1 = 0.13 \text{ m}^{-1}$, $C_2 = 1.57$, $l = 5 \text{ m}$ [35]。

2.2 不同类型车辆的跟驰模型

2.2.1 目标车辆为常规人驾车辆

当 $I = 1$ 时,此时车辆的类型为 RV,由于 RV 驾驶人对于前后车辆加速度信息不敏感,因此,无法感知前后车的加速度差,即 $k_1 = 0$,跟驰模型中 RV 仅考虑紧邻前车的运动状态,式(1)可表示为

$$F_1(t) = \frac{dv_n(t)}{dt} = \frac{V_F[\Delta x_n(t)] - v_n(t)}{-0.46 \ln[v_n(t)] + 2.19} + \lambda_1 \Delta v_n(t) \quad (5)$$

$$F_2(t) = \frac{dv_n(t)}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{0.97} \left\{ P_2 V_F[\Delta x_n(t)] + (1 - P_2) V_R[\Delta x_{n-1}(t)] - v_n(t) \right\} + \lambda_2 \left[\tau_2 \Delta v_n(t) + (1 - \tau_2) \Delta v_{n-1}(t) \right] + k_2 [\zeta_2 \Delta a_n(t) + (1 - \zeta_2) \Delta a_{n-1}(t)] & a_{n+i-1}(t) \geq 0 \\ \frac{1}{0.97} \left\{ P_2 V_F \left[\sum_{i=1}^q \beta_i \Delta x_{n+i-1}(t) \right] + (1 - P_2) V_R[\Delta x_{n-1}(t)] - v_n(t) \right\} + \lambda_2 \left[\tau_2 \sum_{i=1}^q \beta_i \Delta v_{n+i-1}(t) + (1 - \tau_2) \Delta v_{n-1}(t) \right] + k_2 \left[\zeta_2 \sum_{i=1}^q \beta_i \Delta a_{n+i-1}(t) + (1 - \zeta_2) \Delta a_{n-1}(t) \right] & a_{n+i-1}(t) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

当车辆间距 $\Delta x_n(t)$ 大于 AV 的最小制动距离 s_0 时,无论多前车加速或减速,AV 在保证行车安全情况下,都有足够距离进行相应的加速或减速。此

$$F_2(t) = \frac{dv_n(t)}{dt} = \frac{1}{0.97} \left\{ P_2 V_F \left[\sum_{i=1}^q \beta_i \Delta x_{n+i-1}(t) \right] + (1 - P_2) V_R[\Delta x_{n-1}(t)] - v_n(t) \right\} + \lambda_2 \left[\tau_2 \sum_{i=1}^q \beta_i \Delta v_{n+i-1}(t) + (1 - \tau_2) \Delta v_{n-1}(t) \right] + k_2 \left[\zeta_2 \sum_{i=1}^q \beta_i \Delta a_{n+i-1}(t) + (1 - \zeta_2) \Delta a_{n-1}(t) \right] \quad (7)$$

3 参数标定

3.1 RV 模型参数标定

本文共提取样本中的 50 辆人驾实车的混行跟车数据,对 RV 模型的 λ_1 进行标定。该数据来自于国家智能网联车辆应用(北方)示范区的混行场景跟车数据调查结果。参考 FVD 模型中 λ_1 的取值为 0.1,本文设定 λ_1 的取值范围为 $[0.01, 0.20]$,并以 0.01 为步长进行仿真寻优。第 20 位驾驶人不同 λ_1 取值下仿真结果如图 2 所示。通过对图像定性分析发现:在加速阶段,随着 λ_1 的变化,仿真图像发生明显变化,原因是在 RV 模型中, λ_1 设定为速度差权重,在加速阶段,前后车速度差逐渐增大,所以此时 λ_1 对速度影响较大;当前后车速度相同时, λ_1 对跟驰速度没有影响。

为了量化 λ_1 计算的最优值,本文计算了 RV 模型在不同 λ_1 下的跟车速度和实际跟车速度之间的误差,并进行单因素方差分析。表 1 为不同 λ_1 对应的拟合误差数据,通过分析发现:当 λ_1 小于 0.13

式中: $\Delta v_n(t)$ 为第 n 辆车与紧邻前车之间的速度差。

2.2.2 目标车辆为自动驾驶车辆

当 $I = 2$ 时,此时车辆的类型为 AV,其可以借助激光测距仪、传感器等设备精确获得多前车和后车的速度、速度差、车辆间距和加速度差信息。另外,当车辆间距 $\Delta x_n(t)$ 小于等于 AV 的最小制动距离 s_0 时,此时非紧邻多前车加速对 AV 没有影响,原因是在保证行车安全的情况下,AV 无法加速,所以 AV 跟驰行为仅受紧邻前后车运动状态的影响。但是若非紧邻前车减速时,AV 为保证行车安全需要进行减速,此时 AV 受多前车运动状态的影响,其跟驰模型为

时 AV 不仅受紧邻前车运动状态变化的影响,还会受到其他前车的影响,因此,混行跟驰模型中 AV 模型为

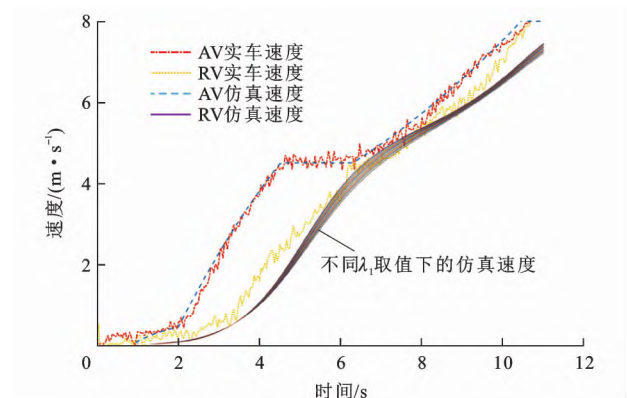


图2 不同 λ_1 取值下 RV 的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of RV at different λ_1

时,随着 λ_1 逐渐增加,仿真拟合精度逐渐增加;当 λ_1 大于 0.13,随着 λ_1 的增加,仿真拟合精度下降,原因是在一定取值范围内,随着 λ_1 的逐渐增加,考虑前后车的速度差有利于模型精度的提高,但是模型中过多地考虑前后车速度差,会增加后车对前车速度的敏感程度,导致轻微的速度差就会给后车带来较大的速度波动,进而带来拟合精度的下降;

表 1 不同 λ_1 参数对应的拟合结果分析
Table 1 Analysis of fitting results at different λ_1

λ_1	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16
平均最大误差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.826 4	0.812 8	0.822 8	0.798 7	0.802 5
平均误差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	-0.181 5	-0.181 1	-0.188 0	-0.189 7	-0.202 2
均方误差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.100 7	0.097 4	0.100 2	0.089 0	0.103 4
平均绝对误差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.242 6	0.238 0	0.248 1	0.244 8	0.248 8
决定系数	0.988 570	0.991 012	0.989 011	0.989 892	0.987 921
差异指标	0.621 5	0.636 4	0.619 7	0.623 2	0.630 3
组间均方	0.244 2	0.240 7	0.243 1	0.247 7	0.251 1
组间均方临界值	3.877 4	3.877 4	3.877 4	3.877 4	3.877 4

当 λ_1 为 0.13 时,平均最大误差和平均误差分别为 0.81 和 $-0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均决定系数为 0.991 0,相比较 λ_1 在其他取值情况下,此时仿真误差最小。另外,在单因素方差分析中,本文得到此时对应的平均差异指标为 0.64,组间均方为 0.24,远小于组间均方临界值。如图 3 所示,当 $\lambda_1 = 0.13$ 时,该模型拟合效果最优。

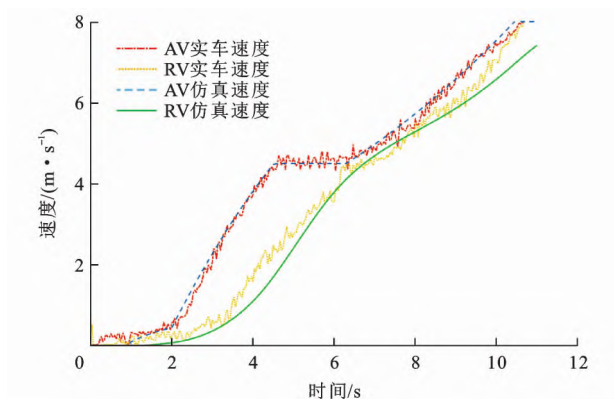


图 3 $\lambda_1 = 0.13$ 时的 RV 仿真结果

Fig. 3 Simulation result of RV at $\lambda_1 = 0.13$

综上所述,RV 模型的表达式为

$$\frac{dv_n(t)}{dt} = \frac{V_F[\Delta x_n(t)] - v_n(t) + 0.13\Delta v_n(t)}{-0.46\ln[v_n(t)] + 2.19} \quad (8)$$

3.2 AV 参数标定

本文 AV 模型参数标定场景与 PATH 实验室 AV 跟驰 RV 场景相同。同时,PATH 实验室的跟车数据量和精度都能够满足本文模型的标定需求。另外,为方便本文对 2 种模型的拟合精度进行对比,采用 PATH 实验室 AV 跟驰 RV 的实车数据^[18],对 AV 模型的参数 P_2 、 λ_2 、 τ_2 、 k_2 和 ζ_2 进行标定。根据文献[14], P_2 、 τ_2 和 ζ_2 取值范围设定为 $[0.90, 0.99]$, λ_2 和 k_2 取值范围设定为 $[0.01, 0.30]$ 。本文参数标定过程中以模型拟合精度最高为目标,以 0.01 为步长对所有参数进行遍历寻优。为提高参

数寻优效率,本文采用遗传算法增加寻优速度,最终得到拟合精度最高轨迹下的各个最优参数值。当 $P_2 = 0.95$, $\lambda_2 = 0.23$, $\tau_2 = 0.93$, $k_2 = 0.08$, $\zeta_2 = 0.96$ 时,AV 模型拟合结果如图 4 所示。本文定量化计算了该参数下对应的仿真速度和实际 AV 速度之间的误差,并进行单因素方差分析,最大误差为 $2.44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均误差为 $-0.004 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,决定系数为 0.996 9。相比较其他取值情况下,此时仿真误差最小。通过对该数据进行单因素方差分析,得到此时差异指标为 0.98,更接近 1 且远大于 0.05,组间均方为 0.003,远小于组间均方临界值。数据表明,此时该模型拟合精度最高。

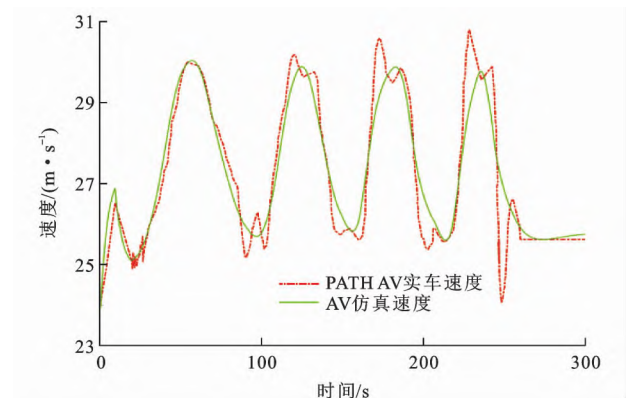


图 4 混行跟驰模型 AV 速度曲线

Fig. 4 Velocity curves of AV in mixed-vehicle-following model

此时,混行跟驰模型中 AV 的表达式为

$$\begin{aligned} \frac{dv_n(t)}{dt} = & 1.02 \left\{ 0.95V_F \left[\sum_{i=1}^q \beta_i \Delta x_{n+i-1}(t) \right] + \right. \\ & 0.05V_R[\Delta x_{n-1}(t)] - v_n(t) \left. \right\} + \\ & 0.23 \left[0.93 \sum_{i=1}^q \beta_i \Delta v_{n+i-1}(t) + 0.07\Delta v_{n-1}(t) \right] + \\ & 0.08 \left[0.96 \sum_{i=1}^q \beta_i \Delta a_{n+i-1}(t) + \right. \\ & \left. 0.04\Delta a_{n-1}(t) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

4 稳定性分析

本文将跟驰模型表达为一般性的模型,即

$$a_n(t) = f_n \left[v_n(t), \beta_1 \Delta x_{n+q-1}(t), \beta_2 \Delta x_{n+q-2}(t), \dots, \right. \\ \left. \beta_{q-1} \Delta x_{n+1}(t), \beta_q \Delta x_n(t), \Delta x_{n-1}(t), \right. \\ \left. \beta_1 \Delta v_{n+q-1}(t), \beta_2 \Delta v_{n+q-2}(t), \dots, \right. \\ \left. \beta_{q-1} \Delta v_{n+1}(t), \beta_q \Delta v_n(t), \Delta v_{n-1}(t), \right. \\ \left. \beta_1 \Delta a_{n+q-1}(t), \beta_2 \Delta a_{n+q-2}(t), \dots, \right. \\ \left. \beta_{q-1} \Delta a_{n+1}(t), \beta_q \Delta a_n(t), \Delta a_{n-1}(t) \right] \quad (10)$$

式中: $a_n(t)$ 为目标车辆 n 在 t 时刻的加速度; $f_n(\cdot)$ 为加速度函数。

应用一阶泰勒公式,对跟驰模型的一般性模型式(10)在平衡态进行线性化,得

$$a_n(t) = f_n^{v_n(t)} [v_n(t) - \bar{v}] + f_n^{\Delta x_n(t)} \beta_1 [\Delta x_{n+q-1}(t) - \Delta \bar{x}] + f_n^{\Delta x_n(t)} \beta_2 [\Delta x_{n+q-2}(t) - \Delta \bar{x}] + \dots \\ + f_n^{\Delta x_n(t)} \beta_{q-1} [\Delta x_{n+1}(t) - \Delta \bar{x}] + \\ f_n^{\Delta x_n(t)} \beta_q [\Delta x_n(t) - \Delta \bar{x}] + \\ f_n^{\Delta x_n(t)} [\Delta x_{n-1}(t) - \Delta \bar{x}] + f_n^{\Delta v_n(t)} \beta_1 \Delta v_{n+q-1}(t) + \\ f_n^{\Delta v_n(t)} \beta_2 \Delta v_{n+q-2}(t) + \dots + f_n^{\Delta v_n(t)} \beta_{q-1} \Delta v_{n+1}(t) + \\ f_n^{\Delta v_n(t)} \beta_q \Delta v_n(t) + f_n^{\Delta v_n(t)} \Delta v_{n-1}(t) + \\ f_n^{\Delta a_n(t)} \beta_1 \Delta a_{n+q-1}(t) + f_n^{\Delta a_n(t)} \beta_2 \Delta a_{n+q-2}(t) + \dots + \\ f_n^{\Delta a_n(t)} \beta_{q-1} \Delta a_{n+1}(t) + f_n^{\Delta a_n(t)} \beta_q \Delta a_n(t) + \\ f_n^{\Delta a_n(t)} \Delta a_{n-1}(t) \quad (11)$$

式中: $f_n^{v_n(t)}$ 、 $f_n^{\Delta x_n(t)}$ 、 $f_n^{\Delta v_n(t)}$ 和 $f_n^{\Delta a_n(t)}$ 分别为车辆跟驰模型在平衡态对车辆的速度、车辆间距、速度差与加速度差的偏微分项; \bar{v} 和 $\Delta \bar{x}$ 分别为平衡状态下的速度和车辆间距。

定义平衡态交通流的速度扰动与车辆间距扰动分别为

$$\omega_n(t) = v_n(t) - \bar{v} \rightarrow 0 \quad (12)$$

$$y_n(t) = \Delta x_n(t) - \Delta \bar{x} \rightarrow 0 \quad (13)$$

$$y_{n-1}(t) = \Delta x_{n-1}(t) - \Delta \bar{x} \rightarrow 0 \quad (14)$$

式中: $\omega_n(t)$ 为平衡态的速度扰动; $y_n(t)$ 和 $y_{n-1}(t)$ 分别为车辆 n 达到平衡状态时前车和后车的扰动。

将式(12)~(14)代入(11)中,计算得到关于扰动的微分方程为

$$\dot{\omega}_n(t) = f_n^{v_n(t)} \omega_n(t) + f_n^{\Delta v_n(t)} \beta_1 \Delta \omega_{n+q-1}(t) + \\ f_n^{\Delta v_n(t)} \beta_2 \Delta \omega_{n+q-2}(t) + \dots + f_n^{\Delta v_n(t)} \beta_{q-1} \Delta \omega_{n+1}(t) + \\ f_n^{\Delta v_n(t)} \beta_q \Delta \omega_n(t) + f_n^{\Delta v_n(t)} \Delta \omega_{n-1}(t) + \\ f_n^{\Delta x_n(t)} \beta_1 y_{n+q-1}(t) + f_n^{\Delta x_n(t)} \beta_2 y_{n+q-2}(t) + \dots + \\ f_n^{\Delta x_n(t)} \beta_{q-1} y_{n+1}(t) + f_n^{\Delta x_n(t)} \beta_q y_n(t) + \\ f_n^{\Delta x_n(t)} y_{n-1}(t) + f_n^{\Delta a_n(t)} \beta_1 \Delta \dot{\omega}_{n+q-1}(t) +$$

$$f_n^{\Delta a_n(t)} \beta_2 \Delta \dot{\omega}_{n+q-2}(t) + \dots + f_n^{\Delta a_n(t)} \beta_{q-1} \Delta \dot{\omega}_{n+1}(t) + \\ f_n^{\Delta a_n(t)} \beta_q \Delta \dot{\omega}_n(t) + f_n^{\Delta a_n(t)} \Delta \dot{\omega}_{n-1}(t) \quad (15)$$

对式(15)进行拉普拉斯变换,得到扰动在交通流传播时的传递函数为

$$G(s) = \left\{ 2 \left[f_n^{\Delta v_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i s + f_n^{\Delta x_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i + \right. \right. \\ \left. \left. f_n^{\Delta a_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i s^2 \right] \right\} / \left\{ s^2 \left[1 + 2 f_n^{\Delta a_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i \right] + \right. \\ \left. \left[2 f_n^{\Delta v_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i - f_n^{v_n(t)} \right] s + 2 f_n^{\Delta x_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i \right\} \quad (16)$$

式中: $G(s)$ 为速度扰动的传递函数, s 为拉普拉斯域。

针对本文混行跟驰模型和 FVD 模型,分别用 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 表示混行跟驰模型扰动传递函数和 FVD 模型扰动传递函数,即

$$G_1(s) = \left\{ 2 \left[f_{n_1}^{\Delta v_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i s + f_{n_1}^{\Delta x_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i + \right. \right. \\ \left. \left. f_{n_1}^{\Delta a_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i s^2 \right] \right\} / \left\{ s^2 \left[1 + 2 f_{n_1}^{\Delta a_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i \right] + \right. \\ \left. \left[2 f_{n_1}^{\Delta v_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i - f_{n_1}^{v_n(t)} \right] s + 2 f_{n_1}^{\Delta x_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i \right\} \quad (17)$$

$$G_2(s) = \left\{ 2 \left[f_{n_2}^{\Delta v_n(t)} s + f_{n_2}^{\Delta x_n(t)} + f_{n_2}^{\Delta a_n(t)} s^2 \right] \right\} \cdot \\ \left\{ s^2 \left[1 + 2 f_{n_2}^{\Delta a_n(t)} \right] + \left[2 f_{n_2}^{\Delta v_n(t)} - f_{n_2}^{v_n(t)} \right] s + \right. \\ \left. 2 f_{n_2}^{\Delta x_n(t)} \right\}^{-1} \quad (18)$$

式中: n_1 和 n_2 分别为混行跟驰模型和 FVD 模型控制下的第 n 辆车。

将式(8)、(9)转换至频域为

$$G_1(j\omega) = \left\{ 2 \left[f_{n_1}^{\Delta v_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i j\omega + f_{n_1}^{\Delta x_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i - \right. \right. \\ \left. \left. f_{n_1}^{\Delta a_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i \omega^2 \right] \right\} / \left\{ -\omega^2 \left[1 + 2 f_{n_1}^{\Delta a_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i \right] + \right. \\ \left. \left[2 f_{n_1}^{\Delta v_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i - f_{n_1}^{v_n(t)} \right] j\omega + 2 f_{n_1}^{\Delta x_n(t)} \sum_{i=1}^q \beta_i \right\} \quad (19)$$

$$G_2(j\omega) = \left\{ 2 \left[f_{n_2}^{\Delta v_n(t)} j\omega + f_{n_2}^{\Delta x_n(t)} - f_{n_2}^{\Delta a_n(t)} \omega^2 \right] \right\} \cdot \\ \left\{ -\omega^2 \left[1 + 2 f_{n_2}^{\Delta a_n(t)} \right] + \left[2 f_{n_2}^{\Delta v_n(t)} - f_{n_2}^{v_n(t)} \right] j\omega + \right. \\ \left. 2 f_{n_2}^{\Delta x_n(t)} \right\}^{-1} \quad (20)$$

式中: j 和 ω 分别为频率域的虚数和频率。

接下来对 2 种模型在平衡状态下的速度、车辆间距、速度差以及加速度差求偏微分,得

$$f_{n_1}^{v_n(t)} = -\alpha_1 \quad (21)$$

$$f_{n_1}^{\Delta v_n(t)} = -\lambda_1 \quad (22)$$

$$f_{n_1}^{\Delta a_n(t)} = -k_1 \quad (23)$$

$$f_{n_1}^{\Delta x_n(t)} = \frac{4\alpha_1 V_2 C_1}{e^{\theta_1} + e^{\theta_2}} \quad (24)$$

$$\theta_1 = C_1 \left\{ \left[\operatorname{arctanh} \left(\frac{v_n(t) - V_1}{V_2} \right) + C_2 \right] / C_1 - l \right\} - C_2$$

$$\theta_2 = C_2 - C_1 \left\{ \left[\operatorname{arctanh} \left(\frac{v_n(t) - V_1}{V_2} \right) + C_2 \right] / C_1 - l \right\}$$

$$f_{n_2}^{v_n(t)} = -\alpha_2 \quad (25)$$

$$f_{n_2}^{\Delta v_n(t)} = -\lambda_2 \quad (26)$$

$$f_{n_2}^{\Delta a_n(t)} = 0 \quad (27)$$

$$f_{n_2}^{\Delta x_n(t)} = \frac{4(2P_2 - 1)\alpha_2 V_2 C_1}{e^{\varphi_1} + e^{\varphi_2}} \quad (28)$$

$$\varphi_1 = C_1 \left\{ \left[\operatorname{arctanh} \left(\frac{v_n(t) - (2P_2 - 1)V_1}{V_2(2P_2 - 1)} \right) + C_2 \right] \cdot C_1^{-1} - l \right\} - C_2$$

$$\varphi_2 = C_2 - C_1 \left\{ \left[\operatorname{arctanh} \left(\frac{v_n(t) - (2P_2 - 1)V_1}{V_2(2P_2 - 1)} \right) + C_2 \right] / C_1 - l \right\}$$

分别将式(21)~(24)代入式(19)与式(25)~(28)代入式(20),得

$$G_1(j\omega) = 2 \left(-\lambda_1 j\omega + \frac{4\alpha_1 V_2 C_1}{e^{\theta_1} + e^{\theta_2}} + k_1 \omega^2 \right) / \left[-\omega^2 + (-2\lambda_1 + \alpha_1)j\omega + \frac{8\alpha_1 V_2 C_1}{e^{\theta_1} + e^{\theta_2}} \right] \quad (29)$$

$$G_2(j\omega) = 2 \left[-\lambda_2 j\omega + \frac{4(2P_2 - 1)\alpha_2 V_2 C_1}{e^{\varphi_1} + e^{\varphi_2}} \right] / \left[-\omega^2 + (-2\lambda_2 + \alpha_2)j\omega + \frac{8(2P_2 - 1)\alpha_2 V_2 C_1}{e^{\varphi_1} + e^{\varphi_2}} \right] \quad (30)$$

在考虑多前车的情况下,利用实车数据,本文在 3.2 节中得到了混行跟驰模型在平衡状态下的速度、车辆间距、速度差与加速度差的偏微分。根据式(29)、(30),分别绘制混行跟驰模型和 FVD 模型的传递函数在速度区间为 $0 \sim 33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下的幅相特性如图 5 所示。

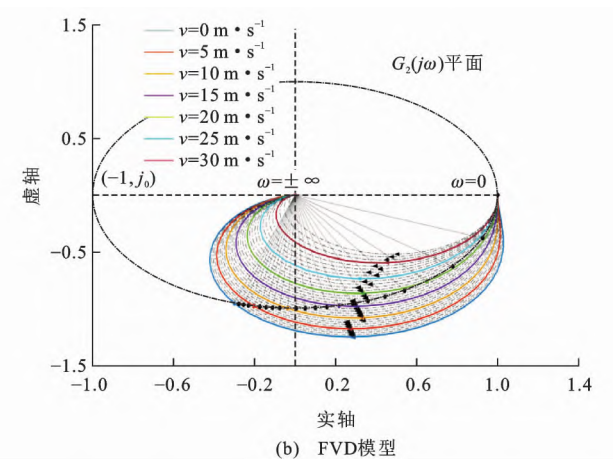
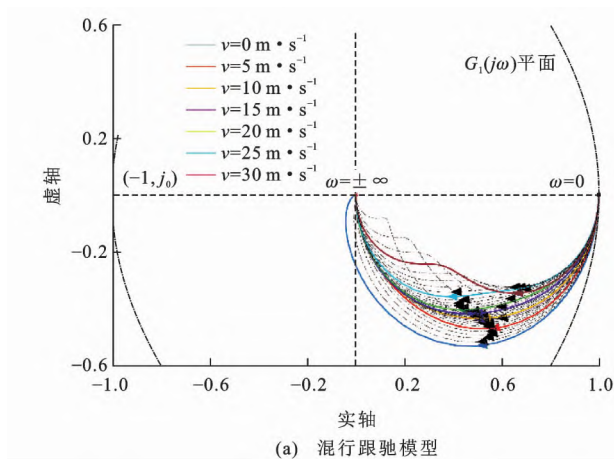


图 5 车辆在不同速度下的开环幅相特性

Fig. 5 Open loop amplitude-phase characteristics of vehicles at different velocities

如图 5(a)所示,混行跟驰模型的传递函数为闭环系统,其中,不同速度下的开环幅相特性曲线箭头方向为系统相对稳定性低的方向;点 $(-1, j_0)$ 为奈奎斯特判据点,是实轴-1与虚轴 j_0 的交点,代表稳定区和不稳定区的分界点。当开环幅相特性曲线在右半平面上没有极点,且不通过点 $(-1, j_0)$ 时,根据奈奎斯特稳定性判据,系统是稳定的。相反,如果开环幅相特性曲线通过点 $(-1, j_0)$,则系统不稳定。此外,幅相特性曲线逐渐远离点 $(-1, j_0)$,这意味着系统不容易出现阶跃响应振荡,即系统稳定性逐渐增加,所以本文构建的混行跟驰模型传递函数在该速度范围内一直是稳定的。另外,通过分析不同速

度下的开环幅相特性曲线发现:当速度为 0 时,此时的幅相特性曲线越接近点 $(-1, j_0)$,这意味着模型越容易出现阶跃响应振荡,即系统的相对稳定性越低;随着速度的不断增加,幅相特性曲线逐渐远离点 $(-1, j_0)$,即模型相对稳定性逐渐增加。原因是:当车辆的行驶速度变慢时,往往会增加短时间内的车流密度,较大的车流量更容易增加干扰的产生和传播,并在一定范围内增加扰动的幅度,随着时间的增加形成走走停停的波,最终导致交通拥堵的发生。相反,在自由流状态下,车辆的速度往往较高,较低的车流量能够抑制干扰的产生,并加快扰动的消散,从而有利于交通系统的稳定性。另外,由于混行跟

驰模型考虑多前车的运动信息,所以在一定范围内接收更多前车信息的情况下,车辆能够提前获得整个车队的运行趋势,并做出更加有效的跟驰策略,从而达到平稳运行的效果。这有利于降低周围车辆对主体车辆的干扰强度,加快扰动的消散,进而提高交通流的稳定性。但是,在实际的行驶过程中,AV没有必要考虑前方所有车辆的信息。当前车到主体车辆的距离足够大时,前车带来的影响逐渐减小,直到接近为零。此外,过多的信息会增加车辆的感知、处理和做出决定所需的时间,所以当考虑前车的数量过多时,反而会降低交通流的稳定性。图5(b)显示FVD模型的传递函数也是稳定的闭环系统。其中,开环幅相特性上幅值为1的截止频率点围成的圆形代表系统的相对稳定性。它与不同速度下开环幅相特性曲线相交的黑点代表系统是否相对稳定的分界点。圆形以内的系统不容易出现阶跃响应震荡,即系统的相对稳定性较高;相反,圆形以外的系统容易出现阶跃响应震荡,即系统的相对稳定性较低。通过分析开环幅相特性的频率域特征指标发现:FVD模型闭环系统的稳定程度与速度关系较大,且整体稳定性比混行跟驰模型较差。例如,当速度为0时,对应 $G_2(j\omega)$ 曲线的截止频率为 $0.954 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,相位裕量为 72.6° ,对应的时间域指标超调量为 1.5% ;当速度为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,对应 $G_2(j\omega)$ 曲线的截止频率为 $0.138 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,相位裕量为 158° ,对应的时间域指标超调量小于 0.05% 。数据表明:随着速度的逐渐增加,时间域指标超调量逐渐减小,这表明系统的稳定性越逐渐增强;当速度大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $G_2(j\omega)$ 曲线不存在截止频率,即系统达到最稳定状态。另外,当频率大于截止频率时,RV开环幅相特性曲线更接近点 $(-1, j_0)$,此时系统的相对稳定性较低;相反的,当频率小于截止频率时,RV开环幅相特性曲线逐渐远离点 $(-1, j_0)$,此时系统的相对稳定性逐渐增强。特别是当稳定闭环系统下的开环幅相特性曲线不存在截止频率时,系统的稳定性最佳。可见,从整体稳定性角度分析,混行跟驰模型的稳定性优于FVD模型。

5 数值仿真与模型验证

5.1 RV模型验证

为体现本文混行跟驰模型RV与传统FVD模型在数值仿真应用中的差异性,本文选取上述用于标定的50辆实车数据对2种模型进行验证。根据头车运动轨迹,以 0.01 s 为步长,通过MATLAB

进行仿真,验证模型拟合精度。RV模型验证结果如图6所示。为了精确获得模型拟合精度,本文分别计算了50辆车的实际数据与2种模型的仿真数据的相关误差。其中,混行跟驰模型RV的平均最大误差为 $0.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相较于FVD模型平均最大误差减小了 $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;该模型的平均误差为 $-0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均决定系数为 0.9964 ;FVD模型的平均误差为 $-0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均决定系数为 0.9517 。通过对比发现:本文所建混行跟驰模型RV拟合精度更高。另外,本文还对2组数据在置信区间等于 0.05 下进行了单因素方差分析,计算结果为:本文模型拟合数据的平均差异指标为 0.97 ,组间均方为 0.002 ,组间均方临界值为 3.88 ;FVD模型拟合数据的平均差异指标为 0.84 ,组间均方为 0.31 ,组间均方临界值为 1.03 。通过数据分析可以发现:相较于FVD模型,在实际数据拟合过程中,本文所建混行跟驰模型RV的差异指标更接近1,并远大于 0.05 ,并且组间均方值更小,且接近0,这表明仿真结果和实际数据无明显差异。综上所述,相比较于FVD模型,本文所建混行跟驰模型RV更能真实反映实际跟车情况。

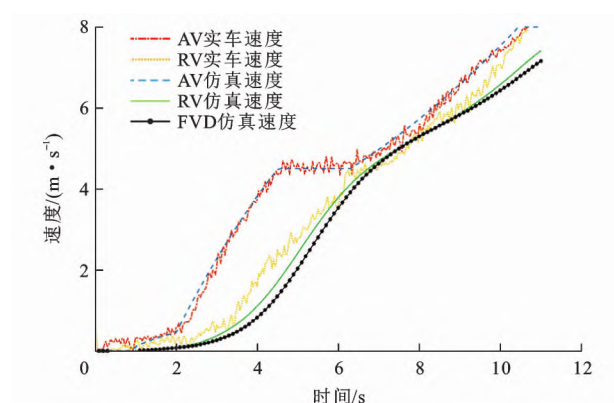


图6 RV模型验证结果

Fig. 6 Validation result of RV model

5.2 AV模型验证

目前,对于带有ACC车辆跟驰模型较为典型的为加州大学伯克利分校PATH实验室的ACC车辆跟驰模型^[18,34-38],其结构简单,并经过实车验证。

为验证本文所建混行车辆跟驰模型对AV跟驰控制的优越性,本文根据上述ACC实车数据,应用PATH实验室提出的ACC模型进行仿真,计算仿真数据相对实车数据的误差,并与本文所建混行车辆跟驰模型AV跟驰误差进行对比。2种模型仿真结果如图7所示。

通过分析2种AV模型在相同跟车场景下的

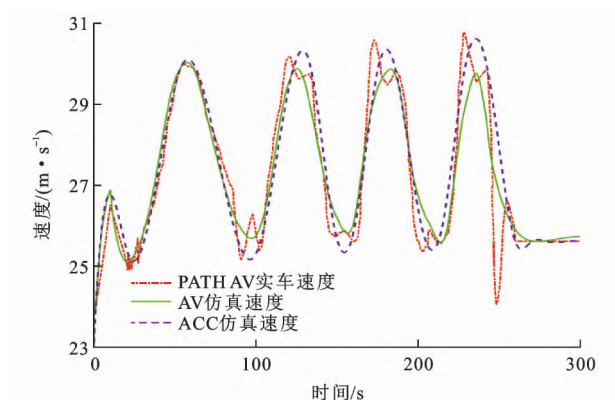


图 7 AV 模型验证结果

Fig. 7 Validation result of AV model

仿真结果发现:2 种模型的仿真结果都能较好地拟合实际跟车数据,不同的是 2 种模型在速度达到峰值阶段的加速策略不同,其中,ACC 模型在速度即将达到峰值时选择继续加速,从而保证模型控制下的车辆速度与实际车速相同;同样的,在减速过程中,当速度即将达到最低速度时,该模型控制下的车辆继续减速,保证仿真速度与实际车速相同。原因是 ACC 模型的加速度控制策略主要是由车辆间距、速度和速度差决定的,所以当前后车的速度差不为 0 时,该模型控制下的车辆仍然加速或减速,直到达到期望的最高或最低速度。与上述模型不同的是,本文提出的 AV 模型除了考虑车辆间距、速度和速度差,还考虑了前后车的加速度差。通过对比发现:在加速过程中,当速度即将达到峰值时,该模型控制下的车辆并没有选择继续加速,而是降低加速度,特别是在实际车速抖动较大的情况下,仿真车辆的加速度策略更加平缓;同样的,在减速过程中,当速度即将达到最小值时,仿真车辆逐渐降低减速度,从而使整个减速过程更加平稳。为了对比 2 种模型拟合的精度,本文计算了 ACC 模型仿真数据与实际数据的相关误差。其中最大误差为 $2.63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均误差为 $-0.006 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均大于本文 AV 的最大误差 $2.44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和平均误差 $-0.004 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同时该模型的决定系数为 0.9848 ,小于本文 AV 的 0.9969 。通过对比发现:相较于 ACC 模型,本文建立的混行跟驰模型 AV 在实车数据拟合方面效果更好。

6 结 语

(1)本文以 FVD 模型为基础,提出了一种适用于 AV 和 RV 的考虑多前车和一辆后车的车头间距、速度差、加速度差等信息的普适性混行车辆跟驰模型。

(2)驾驶人的反应时间与速度的关系呈现对数函数趋势,并且随着车辆速度的不断增加,反应时间逐渐减小。采用 RV 跟驰 AV 的实车数据对 RV 模型进行了参数标定,结果表明,通过引入驾驶人反应时间与速度的表达式,RV 模型能够更加真实地拟合实际跟车情况。

(3)利用分子动力学理论,通过考虑不同前车的速度和车辆间距,定量化表达出不同前车对主体车辆的影响程度,但是在实际的行驶过程中,AV 没有必要考虑前方所有车辆的信息,过多的信息会增加车辆的感知、处理和做出决定所需的时间,甚至可能会降低交通流的稳定性。

(4)稳定性分析结果表明,FVD 模型的稳定程度与车辆速度关系较大,并且整体稳定性相比混行车辆跟驰模型较差。混行跟驰模型在一定范围内能够接收更多前车的信息,车辆提前获得整个车队的运行趋势,并做出更加有效的跟驰策略,从而达到平稳运行的效果,这有利于降低周围车辆对主体车辆的干扰强度,加快扰动的消散,从而提高了整个交通流的稳定性。

(5)数值仿真与模型验证结果表明,与 ACC 模型相比,混行车辆跟驰模型的拟合精度提高了 1.21% ,该结果不仅验证了模型的准确性,表示该模型与 ACC 模型一样能够满足仿真 AV 实车跟驰行为的要求,同时在 AV 仿真方面对实车数据具有更好的拟合效果。

(6)本文建立的模型可应用于由 2 种车辆任意排列所组成均质流或混行车队的队列控制。此外,在目前 AV 实车试验受限的条件下,可通过该模型进行混行车辆跟驰行为仿真,从而为未来 AV 和 RV 混行交通流的道路交通管理和基础设施布设等提供理论依据或模型基础。

(7)不同类型车辆渗透比例对于交通流稳定性的影响在未来研究中需要关注,多前车的类型和序列对 AV 跟驰行为的影响也需要进一步研究。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 王殿海,金 盛. 车辆跟驰行为建模的回顾与展望[J]. 中国公路学报,2012,25(1):115-127.
WANG Dian-hai, JIN Sheng. Review and outlook of modeling of car following behavior[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 115-127. (in Chinese)
- [2] TOLEDO T. Driving behaviour: model and challenges[J]. Transport Reviews, 2007, 27(1): 65-84.

- [3] CHAI Chen, WONG Y D. Micro-simulation of vehicle conflicts involving right-turn vehicles at signalized intersections based on cellular automata[J]. Accident Analysis and Prevention, 2014, 63: 94-103.
- [4] 李克强,戴一凡,李升波,等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报,2017,8(1):1-14.
LI Ke-qiang, DAI Yi-fan, LI Sheng-bo, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1): 1-14. (in Chinese)
- [5] 王祺,谢娜,侯德藻,等. 自适应巡航及协同式巡航对交通流的影响分析[J]. 中国公路学报,2019,32(6):188-197,205.
WANG Qi, XIE Na, HOU De-zao, et al. Effects of adaptive cruise control and cooperative adaptive cruise control on traffic flow[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 188-197, 205. (in Chinese)
- [6] BANSAL P, KOCKELMAN K M. Forecasting Americans' long-term adoption of connected and autonomous vehicle technologies[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 95(1): 49-63.
- [7] XIE Dong-fan, ZHAO Xiao-mei, HE Zheng-bing. Heterogeneous traffic mixing regular and connected vehicles: modeling and stabilization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(6): 2060-2071.
- [8] NGODUY D. Analytical studies on the instabilities of heterogeneous intelligent traffic flow[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2013, 18(10): 2699-2706.
- [9] ZHU Wen-xing, ZHANG H M. Analysis of mixed traffic flow with human-driving and autonomous cars based on car-following model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 496: 274-285.
- [10] ZONG Fang, WANG Meng, TANG Ming, et al. An improved intelligent driver model considering the information of multiple front and rear vehicles[J]. IEEE Access, 2021, 9: 66241-66252
- [11] 唐亮,孙隽华,彭光含. 基于多车信息的交通流跟驰模型与数值仿真[J]. 系统仿真学报,2012,24(2):293-296.
TANG Liang, SUN Di-hua, PENG Guang-han. Car-following model of traffic flow and numerical simulation based on multiple information of preceding cars[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(2): 293-296. (in Chinese)
- [12] TANG Tie-qiao, SHI Wei-fang, SHANG Hua-yan, et al. A new car-following model with consideration of inter-vehicle communication[J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 76(4): 2017-2023.
- [13] OU Hui, TANG Tie-qiao. An extended two-lane car-following model accounting for inter-vehicle communication[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 495: 260-268.
- [14] LI Yong-fu, SUN Di-hua, LIU Wei-ning, et al. Modeling and simulation for microscopic traffic flow based on multiple headway, velocity and acceleration difference[J]. Nonlinear Dynamics, 2011, 66(1/2): 15-28.
- [15] 华雪东,王炜,王昊. 考虑车与车互联互通技术的交通流跟驰模型[J]. 物理学报,2016,65(1):52-63.
HUA Xue-dong, WANG Wei, WANG Hao. A car-following model with the consideration of vehicle-to-vehicle communication technology[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(1): 52-63. (in Chinese)
- [16] 曲大义,祁其春,贾彦峰,等. 基于分子动力学的车辆换道交互行为特性及其模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2019,19(3):68-74.
QU Da-yi, BING Qi-chun, JIA Yan-feng, et al. Molecular dynamics characteristics and models of vehicle lane changing interaction behavior[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(3): 68-74. (in Chinese)
- [17] 李娟,曲大义,刘聪,等. 基于分子动力学的跟驰特性及其模型[J]. 公路交通科技,2018,35(3):126-131.
LI Juan, QU Da-yi, LIU Cong, et al. Car-following characteristics and its models based on molecular dynamics[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(3): 126-131. (in Chinese)
- [18] MILANÉS V, SHLADOVER S E. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 48(11): 285-300.
- [19] 秦严严,王昊,王炜,等. 混有CACC车辆和ACC车辆的异质交通流基本图模型[J]. 中国公路学报,2017,30(10):127-136.
QIN Yan-yan, WANG Hao, WANG Wei, et al. Fundamental diagram model of heterogeneous traffic flow mixed with cooperative adaptive cruise control vehicles and adaptive cruise control vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 127-136. (in Chinese)
- [20] YAO Zhi-hong, HU Rong, WANG Yi, et al. Stability analysis and the fundamental diagram for mixed connected automated and human-driven vehicles[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 533: 121931.
- [21] HU Rong, YAO Zhi-hong, JIANG Yang-sheng, et al. Stability and safety evaluation of mixed traffic flow with connected automated vehicles on expressways[J]. Journal of Safety Research, 2020, 75: 262-274.
- [22] ZHAO Xiao-mei, GAO Zi-you. A new car-following model: full velocity and acceleration difference model[J]. The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems, 2005, 47(1): 145-150.
- [23] PENG Guang-han. Stabilisation analysis of multiple car-following model in traffic flow[J]. Chinese Physics B, 2010, 19(5): 434-441.
- [24] 李林恒,甘婧,曲栩,等. 智能网联环境下基于安全势场理论的车辆跟驰模型[J]. 中国公路学报,2019,32(12):76-87.
LI Lin-heng, GAN Jing, QU Xu, et al. Car-following model based on safety potential field theory under connected and

- automated vehicle environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 76-87. (in Chinese)
- [25] 杨凯, 龙佳, 马雪燕, 等. 移动机器人改进人工势场的路径规划方法研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(7): 141-145.
- YANG Kai, LONG Jia, MA Xue-yan, et al. Research on mobile robot path planning method based on improved artificial potential field[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(7): 141-145. (in Chinese)
- [26] 王建强, 吴剑, 李洋. 基于人-车-路协同的行车风险场概念、原理及建模[J]. 中国公路学报, 2016, 29(1): 105-114.
- WANG Jian-qiang, WU Jian, LI Yang. Concept, principle and modeling of driving risk field based on driver-vehicle-road interaction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(1): 105-114. (in Chinese)
- [27] 蔡晓禹, 蔡明, 张有节, 等. 基于车联网环境的驾驶员反应时间研究[J]. 计算机应用, 2017, 37(S2): 270-273.
- CAI Xiao-yu, CAI Ming, ZHANG You-jie, et al. Research on driver reaction time in Internet of vehicles environment[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(S2): 270-273. (in Chinese)
- [28] JIANG Rui, WU Qing-song, ZHU Zuan-jian. Full velocity difference model for a car-following theory[J]. Physical Review E, 2001, 64(1): 017101.
- [29] 孙棣华, 张建厂, 赵敏, 等. 考虑后视效应和速度差信息的跟驰模型[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2012, 49(1): 115-120.
- SUN Di-hua, ZHANG Jian-chang, ZHAO Min, et al. Effect of backward looking and velocity difference in an extended car following model[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2012, 49(1): 115-120. (in Chinese)
- [30] 陈秀锋. 基于分子动力学的车辆运行安全特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- CHEN Xiu-feng. A study on vehicle operating safety characteristics based on molecular dynamics[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [31] 曲大义, 杨建, 陈秀锋, 等. 车辆跟驰的分子动力学特性及其模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(5): 1198-1202.
- QU Da-yi, YANG Jian, CHEN Xiu-feng, et al. Molecular kinetics behavior of car-following and its model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(5): 1198-1202. (in Chinese)
- [32] 李萌萌. 微通道气体流动的分子动力学模拟[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- LI Meng-meng. Molecule dynamics simulation on gas flow in microchannels[D]. Xi'an: Xidian University, 2005. (in Chinese)
- [33] 石蕊. 信号控制交叉口行车场建立及车辆通行行为优化[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- SHI Rui. The construction of risk field and optimization of driving behaviors for signalized intersections[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [34] 曲昭伟, 潘昭天, 陈永恒, 等. 基于最优速度模型的改进安全距离跟驰模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1092-1099.
- QU Shao-wei, PAN Shao-tian, CHEN Yong-heng, et al. Car-following model with improving safety distance based on optimal velocity model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(4): 1092-1099. (in Chinese)
- [35] HELBING D, TILCH B. Generalized force model of traffic dynamics[J]. Physical Review E, 1998, 58(1): 133-138.
- [36] 秦严严, 王昊, 王炜, 等. 自适应巡航控制车辆跟驰模型综述[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(3): 121-130.
- QIN Yan-yan, WANG Hao, WANG Wei, et al. Review of car-following models of adaptive cruise control[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(3): 121-130. (in Chinese)
- [37] SHLADOVER S E, SU Dong-yan, LU Xiao-yun. Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow[J]. Transportation Research Record, 2012, 2324: 63-70.
- [38] VANDERWERF J, SHLADOVER S, KOURJANSKAIA N, et al. Modeling effects of driver control assistance systems on traffic[J]. Transportation Research Record, 2001, 1748: 167-174.