

控制与决策

Control and Decision

基于车路云一体化的混合交通系统优化控制综述

左志强, 刘正璇, 王一晶

引用本文:

左志强, 刘正璇, 王一晶. 基于车路云一体化的混合交通系统优化控制综述[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3): 577–594.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1757>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

动态物理拓扑下基于CPS的混合交通牵制控制

CPS-based mixed traffic pinning control considering dynamic physical topology
控制与决策. 2023, 38(3): 729–737 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1275>

考虑时延的智能网联汽车混合交通流稳定性分析

Stability of mixed traffic flow with intelligent connected vehicles considering time delay
控制与决策. 2022, 37(6): 1505–1512 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1834>

电动汽车时代的电网-交通网协同优化综述

A survey of cooperative optimization of traffic-grid networks in the era of electric vehicles
控制与决策. 2021, 36(9): 2049–2062 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1736>

机器视觉在轨道交通系统状态检测中的应用综述

A survey of the application of machine vision in rail transit system inspection
控制与决策. 2021, 36(2): 257–282 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1199>

基于FWADE-ELM的短时交通流预测方法

Short-term traffic flow forecasting based on hybrid FWADE-ELM
控制与决策. 2021, 36(4): 925–932 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1103>

基于车路云一体化的混合交通系统优化控制综述

左志强[†], 刘正璇, 王一晶

(天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 汽车行业正在进行智能化与网联化的发展变革, 智能网联汽车的出现使交通管理者找到缓解交通拥堵、提高道路安全以及减少能源消耗的一种解决方案. 对此, 调研混合交通流模型、智能网联汽车协同控制、交通管理等领域的最新成果, 系统地论述基于车路云一体化的智慧交通系统优化控制的研究现状与进展. 首先, 分析基于车路云一体化的混合交通系统的框架, 梳理各部分的组成与作用; 其次, 总结混合交通流的建模方法, 探究交通现象本质, 归纳各类方法的特点、优势以及局限性; 再次, 探讨混合交通系统优化控制问题, 围绕交通流稳定性、交通安全、交通效率和绿色交通 4 个方面分析智能化与网联化在交通方面的潜能, 并梳理在不同交通场景下的控制对象与控制目标, 总结具有借鉴意义的控制方法; 最后, 对车路云一体化发展进程中存在的问题与挑战进行总结, 并对未来发展指明方向.

关键词: 智能化; 网联化; 智能网联汽车; 混合交通流; 协同控制; 交通管理; 车路云一体化

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1757

引用格式: 左志强, 刘正璇, 王一晶. 基于车路云一体化的混合交通系统优化控制综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 577-594.

A survey of optimal control for mixed traffic system with vehicle-road-cloud integration

ZUO Zhi-qiang[†], LIU Zheng-xuan, WANG Yi-jing

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The automotive industry is developing in the direction of intelligence and connectivity, and the emergence of connected and automated vehicles (CAVs) enables traffic managers to find a solution to alleviate traffic congestion, improve road safety and reduce energy consumption. Therefore, this paper investigates the latest achievements in the fields of mixed traffic flow models, cooperative control of CAVs and traffic management. And the research status and progress of intelligent transportation systems in terms of vehicle-road-cloud integration is systematically elaborated. First, the framework of mixed traffic systems based on vehicle-road-cloud integration is analyzed, and the composition and function of each part are sorted out. Second, the modelling methods of mixed traffic flow are summarized. And, the nature of traffic phenomena is explored. In addition, the characteristics, advantages and limitations of various methods are proposed. Then, the optimal control of mixed traffic system is discussed. Moreover, the potential of intelligent and connected traffic around four aspects of traffic flow, namely, stability, safety, efficiency and green transportation is detailed. The control plants and objectives in different traffic scenarios are sorted out, and the instructive control methods are summarized. Finally, the problems and challenges of vehicle-road-cloud integration are presented, and the future research directions are highlighted.

Keywords: intelligence; connectivity; connected and automated vehicle; mixed traffic flow; cooperative control; traffic management; vehicle-road-cloud integration

0 引言

为了缓解日益严重的交通安全、道路拥堵、能源消耗和环境污染等问题, 发展车路云一体化的智慧交通已成为越来越多国家的共识. 我国“十四五”交通领域科技创新规划^[1]明确指出, 将大力发展智慧交

通, 推动智能汽车技术、智慧道路技术和车路协同技术融合发展, 实现自动驾驶先导应用. 大力发展智慧交通, 减少能源消耗与汽车排放, 也是落实我国“碳达峰”与“碳中和”目标的有效举措.

自动驾驶技术自 20 世纪 80 年代由单车智能路

收稿日期: 2022-10-09; 录用日期: 2023-01-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62173243, 61933014).

[†]通讯作者. E-mail: zqzuo@tju.edu.cn.

线开始经历了多年的发展热潮,但仍存在若干技术瓶颈,如传感设备局限性导致场景理解错误、驾驶员行为不确定性导致安全性降低以及车辆对周围环境过于敏感造成能源消耗增加等.而网联技术可以在很大程度上改善上述问题,智能化与网联化融合已成为目前自动驾驶技术的发展主流.由于智能网联汽车能够更准确地感知道路交通环境,更有效地处理复杂信息以及更精准地执行控制策略,导致其从网联化道路中获益良多.研究表明,智能网联汽车在减少碰撞风险^[2],提高道路通行能力^[3],提升乘坐舒适性^[4]以及节省能源消耗^[5]等方面比非网联的自动驾驶汽车更具优势.基于云控系统的智能网联汽车充分利用云端强大的地图服务和云计算资源,可弥补单车智能路线的地图更新困难、控制成本高、实时性与准确性难以兼顾的缺陷^[6].

随着自动驾驶技术的逐步落地,未来一段时间将长期处于人工驾驶汽车与自动驾驶汽车(含智能网联汽车)共存的状态,同时借助于网联协同技术的发展,网联渗透率也在逐年提高,预计2030年将实现车载C-V2X(cellular-vehicle to everything)终端设备的全面普及^[7].相继出台的《智能汽车创新发展战略》^[8]《智能网联汽车技术路线图》^[7]《综合运输服务“十四五”发展规划》^[9]《数字交通“十四五”发展规划》^[10]《交通领域科技创新中长期发展规划纲要》^[11]等重要文件,充分体现我国发展网联协同赋能智能驾驶与智慧交通的决心.

基于网联化的灵活性,自动驾驶汽车可通过V2X技术获取更丰富的交通信息,其运动决策不仅受到邻近车辆状态的影响,还取决于整个路段乃至交通网络状态信息的约束.巨大的出行需求、交通参与者违反交通规则的行为、未适应交通需求的信号管控等因素将严重影响交通系统的稳定性.网联技术将车-车、车-路、车-云以及交通管理者有机关联到一起,而上述这种便利性使得探究智能网联汽车决策控制技术不再适合将智能网联汽车当作孤立的个体.此外,交通协同策略也能更大限度地激发智能网联汽车在改善交通方面的潜能^[12].

为了揭示交通的运行规律,即交通系统中车辆之间的交互以及交通系统的整体特征,对交通系统进行建模是十分必要的.然而,传统交通流模型(微观模型和宏观模型)已无法精确地描述混合交通系统,基于车路云一体化的交通模型需要进一步考虑智能网联汽车与人工驾驶汽车的差异性以及车辆之间的相互影响.目前,已有大量结果聚焦自动驾驶汽车(含智能

网联汽车)与人工驾驶汽车组成的混合交通流模型,涉及自动驾驶汽车对交通流稳定性、安全性、效率及能源消耗等方面的影响,并提出实现不同需求的智能驾驶策略.

借助仿真平台,可以深入探究混合交通系统的潜能并验证协同优化控制效果.混合交通系统仿真包含众多要素,目前虽未出现完整集成所有元素的仿真平台,但已有多种模拟器用于测试系统的各个功能,例如用于自动驾驶场景仿真的PreScan与CarSim,用于微观交通流建模的SUMO^[13]与VISSIM^[14],以及用于V2X通信设计的OMNeT++^[15]等.文献[16]通过交通控制接口连接SUMO、OMNET++与Webots,采用客户/服务模型部署实现混合驾驶综合仿真平台.研究人员可参考类似方案根据实际需求连接并集成多个模拟器,搭建实现特定功能的混合交通系统仿真平台.

本文旨在综述车路云一体化进程中混合交通系统优化控制的研究进展和最新成果,分析混合交通系统面临的问题与挑战,并对其未来发展趋势及研究方向进行展望.首先介绍基于车路云一体化的混合交通系统框架及其相关定义;然后综述混合交通系统建模技术的发展与局限性;接着围绕交通流稳定性、交通安全、交通效率与绿色交通论述混合交通系统优化控制策略与挑战;最后进行总结与展望.

1 基于车路云一体化的混合交通系统框架

基于车路云一体化的混合交通系统以云控平台为核心,以智能网联汽车和路侧基础设施为主要控制主体和交通感知来源媒介,以机动车辆、非机动车辆以及行人作为主要交通参与者,其基本框架如图1所示,有关该框架的技术细节可参见文献[17-18].

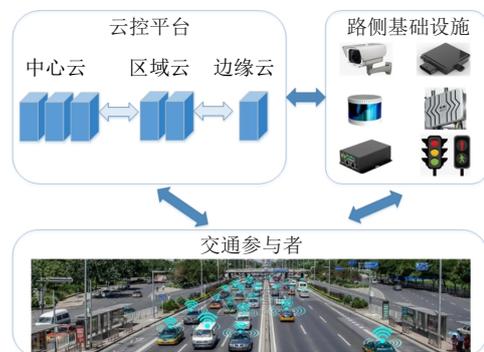


图1 基于车路云一体化的混合交通系统框架

云控平台基于通信技术连接交通系统中的每一个节点,实现车辆及其他交通参与者信息的采集和处理,构建物理世界在信息空间的数字映射,完成交通管理决策以提升混合交通系统的全局性能.云控平

台包含中心云、区域云和边缘云三级.其中:中心云提供多维度宏观交通数据分析的基础数据和数据增值服务,是多个区域云的汇聚点;区域云为交通运输和管理提供弱实时性或非实时性数据与计算等基础服务,是多个边缘云的汇聚点;边缘云贴近车辆及道路端,服务于实时性与弱实时性应用.云控系统需具备高效计算能力与多重备份方式,保障混合交通系统的实时性与可靠性^[19].

路侧基础设施包括感知设备(如摄像头、毫米波雷达、激光雷达等)、计算单元、通信设备和交通管控设施(如信号灯、数字化标志牌、信号机等).感知设备与计算单元实现对道路交通参与者的识别、跟踪和运动预测,还可辅助车辆进行定位;通信设备实现与车端、云端互联互通,传输交通信息和控制指令;交通管控设施可基于实时交通需求进行动态协调控制.

在混合交通系统中,主要交通参与者包含行人、非机动车辆和机动车辆,与传统交通系统不同的是,机动车辆(包含乘用车与商用车)按照自动驾驶等级和是否具备网联功能被细分为以下类别:

1) 传统汽车:指完全人工驾驶且未联网的汽车,这是目前国内交通的主体机动车辆类型;

2) 网联汽车:指具有联网功能的汽车,包括完全人工驾驶汽车(0级)与具备1~5级自动驾驶功能的汽车;

3) 自动驾驶汽车:指具备1~5级自动驾驶功能的汽车,但不一定具备网联功能;

4) 智能网联汽车:指具备1~5级自动驾驶功能且具备网联功能的汽车,因此智能网联汽车既是网联汽车又是自动驾驶汽车.

由于目前已有的混合交通流研究成果中车辆组成各不相同,混合交通流未出现统一的定义.在本文中,混合交通流指由两种及以上上述类别的机动车辆组成的交通流.

2 混合交通流建模

交通流建模的目的是揭示各个交通参与者之间的交互关系以及由此产生的交通流变化,以便交通管理者进行实时交通状态估计、预测与管控,制定和实施有效的控制策略,提高道路安全和效率,而混合交通流建模为基于车路云一体化的交通管理策略奠定了良好基础.

2.1 微观模型

微观模型广泛应用于传统交通流理论,微观层面的交通流模型详细刻画了汽车个体的运动变化以及汽车间的交互,适用于描述小规模的交通流或异质交

通流的特性.汽车的微观运动与交互在纵横向上的表现即为跟车行为和换道行为,同时综合考虑自动驾驶汽车与人工驾驶汽车的差异性,相关学者在传统微观模型的基础上提出了多种改进模型.面对混合交通流的不同车辆类型,其运动特征不同,难以用一种模型衡量所有车辆,在已有微观模型结果中对各类型汽车建立不同的模型表征其运动特性.

2.1.1 跟车模型

传统交通流理论包括多种跟车模型,如Gipps模型^[20]、Newell模型^[21]、最优速度模型(optimal velocity model, OVM)^[22]、智能驾驶员模型(intelligent driver model, IDM)^[23]、全速差分模型(full velocity different model, FVDM)^[24]等.之后随着汽车逐渐具备辅助驾驶功能(advanced driving assistance system, ADAS)与网联功能(如自适应巡航(adaptive cruise control, ACC)和协同自适应巡航(cooperation adaptive cruise control, CACC)),一些学者对以上模型进行了改进,ACC模型与CACC模型应运而生^[25-27].

IDM是最常见的跟车模型之一,可归结于刺激-反应式模型,描述了汽车根据前车的速度,两车之间的距离和相对速度等调整加速度的运动行为,有

$$\dot{v}(t) = a \left[1 - \left(\frac{v(t)}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v(t), \Delta v(t))}{s(t)} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

其中: v 、 \dot{v} 、 Δv 、 s 分别为本车的速度、加速度、与前车的相对速度、与前车的车间距离; a 、 v_0 为跟车运动参数,分别表示最大加速度和期望速度; δ 为指数系数,可体现无前车时车辆的速度变化趋势,该系数趋于无穷大时车辆的加速度过程接近于匀加速.此外, s^* 表示期望的车间距离,定义为

$$s^*(v(t), \Delta v(t)) = s_0 + \max \left(0, v(t)T + \frac{v(t)\Delta v(t)}{2\sqrt{ab}} \right). \quad (2)$$

这里也涉及3个跟车运动参数,分别是最小车间距离(静止时) s_0 、车间时距 T 和舒适减速度 b .IDM的传统形式多用于描述混合交通流中的人工驾驶汽车.由于人类驾驶员的驾驶行为较自动驾驶汽车反应延迟较大,在描述人工驾驶汽车时增加了人类驾驶员对于前车状态的反应延迟时间 τ ^[28],于是模型转变为

$$\dot{v}(t) = f(v(t - \tau_v), s(t - \tau_s), \Delta v(t - \tau_{\Delta v})). \quad (3)$$

其中 τ_v 、 τ_s 、 $\tau_{\Delta v}$ 分别为人类驾驶员面对本车速度变化、与前车的车间距离和相对速度的反应延迟.

对于具有ADAS功能的汽车或自动驾驶汽车,目前多数文献中指出其反应延迟时间较小,对此不同的研究学者采用了不同的处理方式.文献[28-29]认

为自动驾驶汽车与网联汽车的反应延迟与传统汽车相比过小,因此可忽略不计.文献[30]将网联汽车的反应延迟时间范围定义为 $0.1 \sim 3$ s,经过高级驾驶模拟器实验数据校准得到最有可能的反应延迟时间为 0.2 s.文献[31]评估了市面ACC汽车的实际响应时间,通过测试发现ACC汽车的响应时间通常处于 $0.8 \sim 1.2$ s这一范围,与已有研究的假设相差较大.需要指出的是,目前具有ADAS功能的汽车与自动驾驶汽车的生产厂家不同,其控制器参数与执行器均存在差异,具体的反应延迟时间还需根据实验数据进行统计分析.除此之外,采用传统IDM时所表现出的车辆间距较大,与ACC车辆和CACC车辆实际行为有所差别.文献[32]在传统IDM模型基础上引入无碰撞的最大加速度CAH(constant-acceleration heuristic)加速度表征ACC汽车的跟车行为.文献[33]提出了一种IDM改进形式以描述CACC汽车,这种形式与Gipps模型类似,数学表达为

$$\dot{v}(t) = a \cdot \min \left[1 - \left(\frac{v(t)}{v_0} \right)^\delta, 1 - \left(\frac{s^*(v(t), \Delta v(t))}{s} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

对于混合交通系统中的智能网联汽车,需要考虑延迟与多车合作,因此出现IDM延迟和多车合作变形^[34].文献[35]考虑智能网联汽车可以通过通信方式获取前方多辆车的信息,从网络物理融合的角度提出了一种混合模型.但以上IDM变形模型均基于一些假设,并未采用真实车辆数据进行验证.文献[30]通过高级驾驶模拟器实验中收集的网联汽车轨迹数据校准与IDM模型相结合的网联汽车驾驶策略,并融合驾驶员的遵从度,提出了CVDS-IDM(connected vehicle driving strategy integrated with IDM)模型.

OVM模型描述了汽车从实际速度到最优速度的适应过程,其数学形式类似IDM,即^[36]

$$\dot{v}(t) = f(v(t), s(t), \Delta v(t)). \quad (5)$$

基于多车信息,该函数可进行扩展,综合考虑前方多辆车的速度与间距变化,以获得对前方交通的预测能力,使车辆运行更为平稳,这种预测行为通常会增强交通的稳定性^[37].基于V2X技术所带来的信息丰富度与车辆驾驶记忆,文献[38]提出一种新型跟车模型MVCM(multiple vehicles changes with memory),与传统模型相比具有更好的抗干扰能力.考虑到通信的不确定性,文献[39]基于OVM模型引入通信概率以捕捉配备V2X通信的网联汽车的跟车行为.OVM模型涉及多个不同的改进形式,本文不在此进行详细阐述,读者可参考相关文献^[40-42].

CACC汽车可通过V2V(vehicle to vehicle)通信获得更丰富的信息,其运动也更为灵活.而基于传统跟车理论的改进模型往往采用了多种假设,并不能很准确地描述CACC汽车的驾驶特性,因此基于CACC汽车驾驶数据进行建模是十分必要的.美国加州大学伯克利分校的PATH实验室提出一种经过真实汽车数据验证的CACC模型^[26],该模型被多位学者用于混合交通流的稳定性与交通容量研究^[3,43].文献[44]同样根据实车数据得到一个经过验证的CACC汽车驾驶模型,并对不同交通需求下的汽车队列进行敏感性分析.由于目前市面的ACC与CACC车辆由不同厂家开发,表现各异,很难用统一的模型覆盖所有类型的车辆.另外,道路机动车辆因类型不同(如轿车与卡车)导致的加速与制动反应不同,在进行微观建模时需考虑异质车辆导致的模型参数不同,目前在混合交通流中考虑不同类型车辆的结果较少,设计思路可参见文献[45-46].

2.1.2 换道模型

研究表明,在拥堵交通下的换道行为会引发交通流的波动,加剧交通的不稳定性,因此换道行为对交通流的安全和效率产生消极影响^[47].在混合交通流中,除了探究人工驾驶汽车换道行为动机与过程的同时,还需为自动驾驶汽车设计安全高效的变道策略,避免产生对交通流的不利影响.

人工驾驶汽车的换道行为一般基于一定的规则,可通过决策树^[48]、效用理论^[49]、博弈论^[50]或基于数据驱动的方法^[51]进行刻画.目前应用较多的为基于数据驱动的方法,文献[52]提出了一个带有长短时记忆(long short-term memory, LSTM)单元的新型集合双向递归神经网络(recurrent neural network, RNN)模型,可实现人工驾驶汽车变道意图推理.

对于混合交通流中的网联汽车或自动驾驶汽车,自动变道决策大致分为3类^[53]:优化决策^[54]、部分可观察的马尔可夫决策^[55]和基于强化学习的方法^[56].文献[57]采用Delaunay三角剖分法识别变道过程的安全区域,进而将自动驾驶汽车的变道问题转化为多目标优化问题,综合衡量安全性、舒适性和稳定性,实现个性化的轨迹规划和变道控制.此外,基于博弈论的优化决策也被用于自动驾驶汽车的变道问题中.文献[58]基于Stackelberg均衡理论建立与周围车辆的博弈框架,同时估计目标车辆的攻击性,从而得到自动驾驶汽车的最佳变道时刻.面对交通参与者较多的复杂场景,优化决策与马尔可夫决策将产生较大的计算量,影响算法的实时性,因此基于强化学

习的方法在近几年受到开发者的广泛关注.文献[56]设计了一个具有封闭式贪婪策略的 Q 函数近似器,可提高算法效率.文献[59]将多重决策与强化学习相结合,提出一种新的变道决策模型,使用汽车动力学和预先收集的数据进行训练,并采用真实的交通数据进行评估.博弈论理论也可与强化学习或神经网络方法相结合,文献[60-62]基于上述思想提高算法效率,得到更类似人类驾驶的换道行为.基于强化学习的方法由于不具备可解释性,在面对极端场景或未经训练的复杂场景时可能会出现非预期的行为,因此如何提高基于强化学习方法的鲁棒性还需进一步探索.

智能网联汽车可通过V2V技术实现信息交互,其合作变道行为受到广泛关注.与上述变道决策方法类似,协同变道也可以从效用理论、优化决策与强化学习方法入手建立决策方案.文献[63]考虑相邻汽车附近跟随车辆的车道效用和跟车模型,重点评估了合作变道在高速公路匝道段混合交通流的影响.文献[64]基于优化理论推导出智能网联汽车与邻近智能网联汽车合作实施的高速公路变道最佳控制策略.文献[65]建立了一个动态规划策略求解所有智能网联汽车的建议变道间隙,同时采用非凸二次约束的规划问题表征轨迹求解问题.文献[66]提出一种基于混合模型预测控制(model predictive control, MPC)的协同变道控制,综合考虑了交通平稳性、驾驶舒适性和变道响应及时性等多个目标进行最优变道决策.文献[67]在强化学习的基础上开发了一种合作式变道策略,通过变道行为提升交通效率.文献[68]建立了一种合作变道框架,其中模型参数根据在线进化算法进行动态调整.在进行混合交通流微观仿真时,元胞自动机模型常被用来模拟汽车之间的交互,通过设计交通流中异质汽车的更新规则可区分人工驾驶汽车与自动驾驶汽车的运动差异.例如,文献[69]设计了四车道元胞自动机交通模型框架,基于此框架提出了3种合作变道策略:基准变道策略、促进队列策略和管理车道策略,分析结果表明采用不同的合作驾驶策略时,混合交通流在道路容量和交通拥堵改善方面表现出不同的特性.各类型的合作变道策略在仿真实验与实车测试中均证实了其提高交通安全与效率的有效性,但目前所提出的合作变道策略大多未考虑通信延迟、数据丢包以及网络攻击导致的信息不可靠性.

2.2 宏观模型

宏观层面上,可以将一段连续的交通或固定一段道路的交通看作一个整体或一段流体,这就是宏观

模型.在传统交通流理论中主要分为:基本图模型^[70]、Lighthill-Whitham-Richards(LWR)模型^[71-72]、元胞传输模型(cell transmission method, CTM)^[73]、Aw-Rascle-Zhang(ARZ)模型^[74]等.

基本图模型描述了交通流处于平衡态时,汽车之间平均间距与平均速度的关系,一般表示为密度-速度关系式或密度-流量关系式,可以通过数值模拟或者求解解析表达式得到.文献[3]分析不同渗透率下混合交通流的基本图模型,并探究了混合交通流基本图的影响因素.文献[75]建立了纯人工驾驶汽车交通与纯智能网联汽车交通的确定性基本图,进而在考虑智能网联汽车渗透率和排队强度的基础上构建混合交通流的基本图,同时采用高斯混合模型模拟随机车道,得到随机基本图模型.文献[76]采用不同的车间距离和自动驾驶汽车渗透率得到了混合交通流的基本图,以此分析自动驾驶汽车对道路容量的影响.以上研究均表明在只考虑纵向交通容量情况下,纯自动驾驶汽车交通的基本图曲线比纯人工驾驶汽车交通的曲线具有更大的临界密度和更高的峰值,而混合交通流的基本图曲线位于上述两者之间,自动驾驶汽车的渗透率越高,对应的曲线越接近纯自动驾驶汽车交通的基本图曲线.文献[77]采用宏观基本图与网络基本图描述智能网联汽车或自动驾驶汽车的转弯和换道动作对网络交通稳定性的影响,在仅考虑纵向交通的基本图曲线基础上,横向运动对宏观交通的影响表现为一系列散点.基本图模型在基本平衡的假设下,适用于粗略描述密度-速度关系,但无法刻画交通流中的非平衡现象,如拥堵路段的走走停停、交通波的不稳定等.LWR模型同样基于平衡态假设,本文不再赘述,感兴趣的读者可参阅文献[78-79].

元胞传输模型的基本思想是将路段划分为若干个等距的元胞,元胞中的汽车按照一定规则进行更新,以此描述交通流的变化,因此该模型可以反映交通流中出现的非平衡现象.文献[80]提出一种多类别元胞传输模型用以研究混合交通流,并依据此模型设计了动态交通分配框架与智能交叉口控制算法.文献[81]引用此模型建立了一个基于双队列的混合交通流模型用以描述道路动态以及路口的流量转换.文献[82]利用元胞传输模型进行宏观交通模拟以验证混合交通流的排队理论和稳定性理论.文献[83]建立了多级多车道元胞传输模型,同时融入基本图的变化,以探究智能网联汽车渗透率和道路限速控制的影响.文献[84]基于元胞传输模型模拟了一个多节点的城市街道网络,用来研究网络中的交通信

号配时与汽车协同速度优化。

与上述模型不同,ARZ模型通过加速率描述人类驾驶行为的非平衡连续交通流,是一个由反映流量守恒的连续性方程和规定人类驾驶员运动行为的动量方程组成的二阶双曲系统,在文献[85-86]中用以捕捉交通流中的不稳定性。

2.3 驾驶行为差异

在由人工驾驶汽车、自动驾驶汽车和智能网联汽车组成的混合交通流中,各类汽车表现为异质特性。同时,由于人工驾驶汽车个体表现存在差异,且不同车企所开发的自动驾驶策略也各不相同,同类汽车间也存在异质性。

人类驾驶员的驾驶行为差异较大,通常存在不确定性或随机性,可通过设置随机变量^[87]、划分驾驶风格^[88]或设置驾驶激进性等级^[89]描述人类驾驶员行为的不同。文献[90]将人工驾驶汽车的自由流速度、最小安全距离和速度-车间距关系斜率表示为随机变量。文献[91]在建立元胞自动机更新规则时即考虑随机因素,并重建了人工驾驶汽车的轨迹。通过分析NGSIM(next generation on simulation)数据集中的人工驾驶汽车轨迹,人类驾驶员可划分为多种驾驶风格,如谨慎型、常规型、激进型等^[88],其中激进型的驾驶员倾向于更高的速度、更大的加速度和更小的车间时距,而谨慎型的驾驶员与此相反,常规型驾驶员的行为介于两者之间。文献[92]基于这种分类方式为混合交通中的人工驾驶汽车设计了不同的博弈决策成本函数参数。类似地,在文献[93]中人工驾驶汽车被分为激进型和谨慎型。将差异大小不同的驾驶行为划分为有限类驾驶风格存在部分驾驶趋势模糊化的问题,并且每类驾驶特征的具体表述受分类样本数据的影响,采用驾驶激进性等级即可避免上述问题。文献[89]将人工驾驶汽车的驾驶激进性等级的取值范围定义为 $[-1, 1]$,并对应设置决策目标函数中的安全项与效率项的权重。

另一个重要的问题是车辆的控制权与驾驶员遵从度。在人机共驾阶段,网联汽车的驾驶员可随时完全接管或部分接管汽车控制权限,文献[29]即在通用跟车模型中设定取值为 $[0, 1]$ 的权重参数,当取为0时意味着自动驾驶控制,当取为1时则为人工驾驶控制,0~1之间为人机共享汽车控制权。这种权重参数的选取思路与文献[2,30]中的驾驶员遵从度类似。在自动驾驶车辆中,驾驶员所表现的驾驶遵从度描述了驾驶员面对自动驾驶策略时在多大程度上会完全遵循系统建议,但目前共享数据较少。随着深

度学习算法在自动驾驶汽车上的广泛应用,部分自动驾驶汽车具备自学习能力,在面对不同的交通场景时,自动驾驶汽车会自动调整规划与控制策略。文献[94]提出一种自动驾驶积极性(automated driving aggressiveness, AuDA)的概念,将自动驾驶汽车的驾驶行为划分取值为1~9的AuDA等级,并为每个等级设计跟车行为与换道行为的参数。路侧设备基于整个交通流的状态发布相应的AuDA信息,智能网联汽车收到此信息后自动调整汽车运动策略的相关参数。文献[95]将驾驶激进性等级也应用到自动驾驶汽车上,与人工驾驶汽车不同的是取值范围为 $[0, 1]$ 。

2.4 现有混合交通流模型局限性与研究建议

基于以上分析,已有模型的局限性总结如下:

1) 现有的混合交通流模型大多基于研究者给出的前期假设,忽略了一些交通细节,实际效果有限。

2) 在基于车路云一体化的混合交通系统中,通信机制起到关键作用,同时不可避免地出现通信延迟、数据丢包与网络攻击等缺陷。根据前期的调研,现有模型鲜有考虑以上不利因素。此外,研究者设计的通信条件并未与当前车路协同通信实际效果进行对比。

3) 人工驾驶汽车与自动驾驶汽车的驾驶差异性分析不完善,对于车辆驾驶行为的特征表达灵活性较差,且纵横向行为并未独立分析。

4) 在现有混合交通流模型中,传统汽车一般仍采用以往的交通模型,即传统交通描述。随着智能网联车辆渗透率逐渐增高,传统汽车的行为表现是否会发生变化?是否可以通过智能网联汽车引导人工驾驶车辆行为?以上问题还较少有相关报道。

针对上述4条局限性给出对应的研究建议:

1) 通过对公开数据集轨迹数据的分析可以挖掘更真实的交通细节^[96],建立更精准的微观交通流模型。目前可用的公开数据集有限,且尚未发布混合交通的公开数据集,因此迫切需要促进产业数据共享,为交通流建模提供可靠的依据。

2) 未来需实际评估通信设备的可靠性,建立车路云一体化交通系统中各环节通信机制与传输内容的相关标准,分析各环节不同通信设备的实际通信延迟与影响因素,明确通信安全隐患。

3) 将人工驾驶汽车与自动驾驶汽车的纵横向行为进行独立分析,深入挖掘纵横向行为特征的独立性和耦合性,建立更为真实的纵向运动激进性(积极性)模型和横向运动激进性(积极性)模型。

4) 人类驾驶员的驾驶习惯变化也是一种学习的过程,可基于神经网络建立人类驾驶员行为学习更新

模型,在虚拟仿真环境中模拟混合交通流运行演化趋势,统计分析人类驾驶员行为的前后变化。

3 混合交通系统的优化控制

交通控制问题离不开道路安全、交通拥堵和能源消耗,本文从交通流稳定性分析与改善开始,围绕交通安全、交通效率和绿色交通3个方面对近年来出现的混合交通优化控制成果进行总结。混合交通系统的控制本质上是一个多目标优化问题,且交通系统状态是时间不断演化的,因此可借鉴控制理论中的滚动优化与动态规划思想解决在不同场景下不同优化目标的控制问题。

3.1 交通流稳定性

在传统交通流理论中稳定性存在多种定义。文献[97]总结了传统交通流中跟车模型的稳定性,包括局部稳定性、弦稳定性(线性与非线性)、对流稳定性、扰动下的渐近稳定性和结构稳定性等。混合交通流的稳定性是在传统交通流理论的基础上进行了扩展与改进,其中局部稳定性和弦稳定性的讨论居多。本文回顾近年出现的混合交通流研究成果,围绕基于车路云一体化的混合交通流进行相关稳定性阐述。

定义1(局部稳定性) 在多辆车组成的队列中,两车间的间距变化和速度变化随时间的推移而衰减,则称该队列是局部稳定的。

文献[34]回顾了交通流局部稳定性的经典方法,包括基于特征方程的方法、基于Laplace变换的方法(与弦稳定性分析不同)和Lyapunov稳定性准则,并对混合交通流中可能产生的基本跟车模型、考虑时延的跟车模型和考虑协作的跟车模型进行了详细阐述。

定义2(弦稳定性) 在任意长度(有限长度或无限长度)的汽车队列中,局部扰动是有界的,且沿着队列传播为逐渐衰减,则称该交通流是弦稳定的。

需要指出的是,大多数文献均假设交通流存在局部小扰动,这种情况下所证明的系统稳定性为线性局部稳定性或线性弦稳定性。对于交通流中存在的大扰动(如急刹车或突然变道引发的交通事故)发展为持续的交通波,则认为系统存在非线性不稳定性^[97]。

分析混合交通流弦稳定性的基本方法,大致可分为基于传递函数的方法、基于特征方程的方法、基于Laplace变换的方法等^[34]。

引理1 对于一个包含 N 辆汽车的混合交通开环系统,其满足 L_2 弦稳定性的充分必要条件^[98]为

$$\left| \prod_{i=2}^N \Gamma_i(i\omega) \right| \leq 1, \forall \omega \in \mathbf{R}_0^+, \quad (6)$$

其中 Γ_i 为汽车 i 的传递函数。

文献[99]总结了弦稳定性的3个基本属性,即收敛性、有界性和可扩展性。类似于控制理论的稳定性定义,提出3种类型的弦稳定性概念,即Lyapunov、输入-输出和输入-状态弦稳定性,并明确了3种稳定性之间的联系。鉴于智能网联汽车可以接收来自前后汽车的信息,文献[100]提出一种具有双向信息流的系统弦稳定性,并将其定义为“链式稳定性”,以区分传统的单向跟车拓扑的弦稳定性。文献[101]进一步考虑了传统跟车队列与双向信息流队列混合的交通系统,分析了不同位置分布的混合交通流的弦稳定性。文献[102]提出了一个新的互联稳定性定义,命名为“弱环状稳定性”,并推导出混合交通队列稳定性的条件如下。

引理2 $\Gamma(s)$ 与 $\Gamma_{AV}(s)$ 分别表示人工驾驶汽车和自动驾驶汽车动态的传递函数,若满足

$$|\Gamma(j\omega)|^{1-\frac{1}{N}} \cdot |\Gamma_{AV}(j\omega)|^{\frac{1}{N}} \leq 1, \forall \omega \in \mathbf{R}, \quad (7)$$

则该系统是稳定的,其中 $1/N$ 为人工驾驶汽车与自动驾驶汽车的比例。

除弦稳定性外,文献[103]介绍了汽车系统中的其他常见定义,包括输入-输出稳定性和可扩展性。

已有的混合交通流稳定性研究得到一个共性的结论:智能网联汽车的存在有利于稳定混合交通,智能网联汽车渗透率的增加会使稳定效果更加明显,且智能网联汽车对人工驾驶汽车的反应越敏感,混合交通流越稳定^[86]。为进一步提高交通流的稳定性,可充分利用智能网联车辆的连通性,从车-车协同、车-路协同以及车-路-云协同的角度设计控制策略。

首先,基于车-车协同,文献[104]提出一种新型的汽车跟踪控制方案:先进的合作自适应巡航控制(ACACC)。该方案受益于V2V通信,可减小汽车间的距离,同时保持了队列的稳定性。文献[38]分析得到考虑更多前车的最佳速度可以增强交通流的稳定性。文献[87,105]通过分析由一辆智能网联汽车和多辆人工驾驶汽车组成的环形混合交通系统的弦稳定性探究智能网联汽车在抑制交通不稳定性和平滑交通流方面的潜力,并导出通过控制智能网联汽车可达到的交通速度的上界。文献[106]将此结论扩展到混合交通环境下的信号灯交叉口场景。文献[40]提出一种通信约束下的稳健控制策略,当存在不希望的干扰时能够平滑交通流。其次,基于车-路协同,文献[107]建立了一个安装在路侧的边缘服务器的交互式框架,可以估计非自动驾驶车辆在交叉口的当前轨迹和预测轨迹,以减少城市交叉口复杂环境带来的高不确定性。最后,基于车-路-云协同,文献[83]提出了一

种综合的高速公路交通流控制框架,在空间和时间维度引入对控制变量的限制,如限速波动和变道频率,以避免对驾驶员造成过度的干扰,同时保持交通流的稳定性。

虽然目前已有不少关于包含智能网联汽车的混合交通流研究,但涉及通信网络所引入的通信延迟、数据丢包和网络攻击等现象却鲜有成果。已有的考虑通信延迟的混合交通流稳定性结果普遍假设通信时延有界且为固定值(如文献[108]),但未有关于混合交通流所能承受的通信时延上界的报道。通过设计采样数据反馈控制器可以消除在特定道路场景下随机丢包和外部干扰的影响^[109],保证混合队列的稳定性,但对于弯曲道路与坡道场景的应用仍存在局限性。另外,文献[110]明确指出了ACC汽车对交通系统存在消极影响,可能会引发交通瘫痪。文献[111]通过评估美国市面上7款配备ACC功能汽车发现,这7款汽车模型都存在弦不稳定性,因此,对于未联网的自动驾驶汽车需谨慎设计控制策略。

3.2 交通安全

对于人类驾驶与自动驾驶而言,交通安全尤为重要。本节从不同交通场景出发对现有混合交通安全研究成果进行总结,并列举部分代表性文献。从汽车个体层面考虑,汽车安全表现为纵向跟车安全与横向避撞。在车路云一体化的混合交通背景下,纵向跟车安全因素变得更为复杂,主要包括:

1) 人类驾驶员存在行为不确定性,前方人工驾驶汽车可能出现非预期的急减速行为或相邻车道人工驾驶汽车出现突然切入行为;

2) 智能网联汽车所装备的传感器存在一定的感知误差与不确定性,对前方或相邻车道汽车的位置和速度检测出现错误;

3) 智能网联汽车可能出现通信延迟、数据丢包和网络攻击等情况。

第1种交通场景为仅考虑纵向的编队控制或高速公路/城市道路场景,纵向安全主要涉及调整跟车距离和速度以避免车辆碰撞,其优化对象即为车辆的跟车速度与距离,较为常见的解决思路有责任敏感度安全(responsibility-sensitive safety, RSS)模型^[112]和反馈控制思想^[113]。文献[112]在RSS模型的基础上考虑到周围汽车运动的不确定性和传感器测量的不准确性,设计了一种避免碰撞的跟车策略,旨在寻求交通安全与效率之间的平衡。文献[113]结合前馈控制和反馈控制提出一种排队控制框架,反馈控制可以缓解对周围汽车预测的不确定性,同时为前馈

控制设计了事件触发机制,以处理人工驾驶汽车的概率不确定性约束和多个外部干扰。在确定优化目标后,MPC常用于在每个控制周期实时规划自动驾驶汽车的轨迹,MPC的优势为其滚动优化特性和预测不确定性假设可将车辆状态偏差限制在一个合理的范围内,但同时对于网联汽车,MPC方法的计算和通信负担较大。文献[113]针对此问题设计了管式MPC(Tube MPC)策略,其思想是利用前馈控制确定一组序列(管),同时采用反馈控制动态减小偏差,以限制管内的实际跟踪误差,与传统方法不同的是管式MPC仅在新的外部干扰出现时才需要重新规划。另外,目前市面上较为成熟的纵向跟车功能为ACC功能和CACC功能,CACC即为车-车协同落地的典型,研究表明:受益于V2V通信,CACC功能的普及有利于道路交通安全^[114]。

第2种交通场景为考虑横向冲突的多车道高速公路/城市道路场景,强制变道、主动变道以及相邻车辆切入导致的横向避撞问题是该场景下的研究重点。变道行为的规划控制是一个典型的动态规划过程,涉及车辆横纵向的不同控制问题,优化对象即为变道位置、速度以及偏航角,并由此生成最优变道轨迹。变道冲突问题可基于变道安全区域计算^[57,115]、目标优化^[116]、风险评估^[117]和博弈论^[58]的思想提供解决方案。与上一场景相同,对于确定目标代价函数的优化问题,可采用MPC方法进行求解。文献[115]借鉴车-车协同思想,智能网联汽车可根据周围车辆的分布识别合适的变道间隙,测试显示随着智能网联渗透率的增加,高速公路上的交通冲突大幅降低,当智能网联渗透率达到100%时可减少90%~94%的道路冲突。文献[116]采用在目标函数中增加安全代价的方法,并基于MPC求解最小化控制函数,避免了与周围其他汽车发生碰撞。文献[117]设计采用动态势场和模糊推理模型的风险评估系统,进而评估人类驾驶员的驾驶意图和驾驶风险得到碰撞概率,在此基础上进行无碰撞的轨迹规划。文献[58]建立自动驾驶车辆在换道过程中与目标车辆的Stackelberg博弈问题,并估计目标车辆的攻击性,进而得到换道轨迹。

第3种交通场景为高速公路匝道合流/分流场景,车辆合流/分流同样会导致横向冲突,其研究问题、优化目标和控制方法与多车道场景类似,不同之处在于匝道场景可获得的周围车辆信息有限,因此匝道口安全决策设计面临更严峻的挑战。文献[39]提出了一种基于人工函数的横向控制算法,旨在提高在冲突区域的安全性,并使用四辆智能网联汽车完成汽

车合流与分流场景下的验证. 文献[118]提出了一种多层次的风险评估与预测策略,首先基于监督学习算法和贝叶斯模型进行评估预测和分类,进而采用抽样法对模型参数进行校正,最后基于交叉验证和后验预测对风险水平模型进行验证,该策略可促进智能网联车辆的谨慎驾驶,提高驾驶安全性. 博弈论思想适合用于描述车辆在匝道合流/分流时产生的对抗行为,文献[119]基于博弈论设计智能网联汽车在匝道路口的变道策略,通过确保安全的车间距离和协调交通流中智能网联汽车的速度来提高变道过程的安全性和效率. 文献[120]在车-车协同场景下提出基于MPC的联盟博弈方法,并在成本函数和决策约束中考虑安全指标,保证了智能网联车辆在匝道合流区的安全性, MPC用于求解成本最小的可行轨迹.

第4种交通场景为道路交叉口场景,来自不同方向的车辆在交叉口产生冲突,交通参与者的信息更为复杂,此场景中的优化对象为车辆通行顺序和轨迹. 文献[121]将交叉口的控制结构分为集中式和分布式,相应策略分为两大类:基于启发式规则的方法和多目标优化与控制的方法. 与上述多车道和匝道路口场景类似,存在交通冲突即可考虑采用博弈论的方法进行研究. 文献[95]在碰撞风险评估的基础上设计收益函数,并讨论了Nash均衡和Stackelberg均衡解. 面向车-车协同场景,智能网联汽车可采用联盟博弈^[122]或利他合作^[123]的思想进行决策,进而减少智能网联汽车在交叉口的潜在冲突. 基于车-路协同,文献[107]由边端服务器进行的交叉口人工驾驶汽车的轨迹预测也可帮助提高交叉口车辆的安全性.

网联环境下的车辆极易受到黑客的攻击,目前尚未出现讨论不同类型的网络攻击对混合交通系统的安全性影响的结果,已有的网络攻击研究仅关注由智能网联汽车组成的交通队列,感兴趣的读者可参阅文献[124-127].

3.3 交通效率

为提高交通效率,基于车路云一体化的混合交通系统可从由上到下逐级配合达到效率的最大提升,其基本思路为:首先由云端进行交通分配;其次由边端进行车道分配;进而通过车-路协同或车-车协同实现冲突场景的优化控制(如协作换道、匝道合流/分流以及经过交叉口等);最后基于车-路协同或车-车协同实现纵向队列的间距和速度调整.

在混合交通系统研究中,交通效率通常用道路容量衡量,即单位时间内道路某断面能通过车辆的能力. 影响混合交通道路容量的关键因素有^[128]:智能

网联汽车渗透率、智能网联汽车排队强度和混合交通车道设置. 此外,在涉及易发生交通冲突场景时,交通效率问题会变得更为复杂,还与汽车通过顺序有关^[129]. 随着智能网联汽车的逐步落地,结合车路云一体化的特点,在交通效率方面需关注以下问题:

1) 针对不同智能网联汽车渗透率与不同密度的混合交通,应如何进行交通分配达到各路段效率的均衡?

2) 当自动驾驶汽车渗透率达到多少时,设置自动驾驶专用车道是有利于提高交通效率的?

3) 在交通冲突区域,如何设计汽车通行顺序和速度从而获得效率与安全的双重保障?

4) 处于混合车道的智能网联汽车应如何设计自动驾驶策略(包括跟车与换道)可最大限度地提升交通容量?

由云端进行的混合交通流管理属于多类交通分配问题,一般可以处理成一个非线性互补性问题,通过求解该问题找到最优的交通管理策略^[130]. 文献[130]建立了当交通容量为自动驾驶汽车比例函数时的用户平衡交通分配模型,采用启发式算法寻找交通网络中的最佳策略. 文献[131]开发了一种基于路线交换概念的多类交通分配模型,其中人工驾驶汽车与智能网联汽车分别遵循交叉巢式Logit (cross-nested logit, CNL)模型和用户均衡(user equilibrium, UE)模型的原则. 文献[132]提出一个基于变量不等式的具有弹性需求的多类交通分配方案,考虑了人工驾驶汽车与智能网联汽车对交通状况的了解程度,使得路线选择建模行为更具真实性. 文献[133]研究了双层次的优化问题,上层寻求系统最优的自动驾驶汽车比例(随时间变化),下层提出一个基于混合平衡模拟的动态交通分配模型,根据上层得到的比例估计混合交通模式. 文献[81]将动态交通网络的链路动态和路口的流量转换描述为一个带有均衡约束的最优控制问题,同时开发了一种基于分解的启发式模型预测控制(heuristic model predictive control, HMPC)方法解决上述最优控制问题的非凸和非光滑特性.

由边端进行的车道分配帮助道路管理者确定是否需要设置自动驾驶专用车道. 文献[134]设计了管理车道得分矩阵,纳入传统指标(如流动性、安全性、公平性与环境影响)和CACC排队方式评估指标,通过仿真模拟得出车道设置建议:1)当CACC汽车市场渗透率低于30%时,不建议设置自动驾驶专用车道,因为一般用途车道上的交通状况会出现恶化;2)当CACC汽车市场渗透率达到40%以上时,建议设置自

动驾驶专用车道,为CACC汽车形成队列提供更多机会.另外,本文进一步指出,当CACC汽车市场渗透率达到中等水平(30%~55%)时,可以促进CACC汽车聚集并形成更多同质CACC交通,进而凸显智能网联汽车提高交通效率的优势.文献[135]基于宏观分析方法制定车道分配策略,用数值模拟量化各种情况下的吞吐量改善.文献[12]指出道路容量随着自动驾驶汽车的渗透率呈凸状增长,而适当的路权重分配策略可以显著提高道路容量.文献[136]设计了一个集中控制器可根据交通流量动态改变车道方向,并通过车辆与基础设施(vehicle to infrastructure, V2I)通信将车辆反转信息和流量控制动作发送给网联汽车,网联汽车可在到达交叉口前执行换道行为或调整速度.

通过车-路协同或车-车协同不仅可提高车辆在冲突区域的安全性,还能提升通行效率.交通效率的优化对象与安全一致,优化目标略有差别,因此控制方法大致相同.在合作变道场景下,文献[63]建立了合作变道模型,可通过调整模型中的冒险系数,在不降低交通安全的情况下提高交通容量.在交叉口场景下,需要解决的重点为减少车辆在交叉口的停留,从而使通行效率达到最大化.文献[137]提出一种适用于车载的分布式控制系统,基于全分布式MPC方法求解各个智能网联汽车的非凸最优控制问题,并通过车-车(vehicle to vehicle, V2V)通信交互优化轨迹,实现协调经过交叉口的智能网联汽车的功能.文献[138]综述了采用优化的信号控制技术在不同网联车辆渗透率情况下的应用,总结了基于V2I技术的交叉口实时数据处理、信号配时优化、车辆轨迹运动规划和评估框架,为交叉口信号控制与车辆轨迹规划策略的开发提供了很好的参考.当网联汽车渗透率达到100%时,可用通信传输的控制信号代替传统交通信号灯.文献[139]将互联和自主的概念应用于交叉口车辆到达和离开的协调和同步,形成一个“虚拟交通信号”系统,车辆可以完成近乎连续的运动,减少车辆在交叉口的延迟和停止.文献[140]将蒙特卡罗搜索与启发式规则相结合设计了一种在无信号灯十字路口的合作驾驶策略,可快速找到一个接近全局最优的汽车通过顺序.文献[141]的合作性交叉口最优通行管理策略采用MPC求解车辆的通行轨迹,使车辆在交叉口花费的时间最少,从而优化交叉口的交通吞吐量.文献[142]设计了合流区的分层控制框架,采用MPC方法处理系统中的不确定性和延迟,获得智能网联汽车最佳加速轨迹.

交通安全要求纵向车辆队列中应保持一定的

跟车距离以避免与前车发生碰撞,而在交通效率中则需要车辆间的间距尽可能小,以提高道路容量.由于人工驾驶汽车的运动具有随机性,自动驾驶汽车配合目标车辆轨迹预测方法可在保证安全性的同时尽可能缩小与人工驾驶汽车的间距或提高跟车速度.文献[143]考虑了在交叉口人工驾驶汽车运动的随机驾驶行为,提出了一个求解跟随人工驾驶汽车的网联汽车建议速度的优化策略.但受预测精度的限制,缩短自动驾驶汽车与人工驾驶汽车之间的间距或提高跟车速度还是较为冒险的,众多研究更倾向于通过车-车协同缩短网联汽车与网联汽车之间间距和协同速度,其解决策略可借鉴交通安全中纵向跟车场景中应用的方法.例如,文献[29]通过为智能网联汽车设计反馈控制器,当前方汽车同样为网联汽车时,可适当减小两车间的距离,以此提高整个路段的交通效率.文献[144]提出带有一阶近似的可部署MPC(deployable MPC with first-order approximation, DMPC-FOA)策略协调队列中智能网联汽车的跟车行为,使交通队列的性能最大化,这种策略解决了控制延迟问题,并准确描述了理想MPC策略的最优控制决策.

3.4 绿色交通

据调查,汽车自动化在乐观情况下可减少一半的能源使用和温室气体排放,在极端情况下也可能造成双倍的能源消耗和温室气体排放^[145].绿色交通可以从节能和减排两方面入手,需要说明的是减少能源消耗并不完全等同于减少排放^[146],最新研究成果指出的经济驾驶和生态驾驶均是指减少能源消耗的驾驶模式.

计算车辆燃油消耗时常采用VT-Micro模型^[147],其数学表达如下:

$$\ln(\text{MOE}_e) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 K_{i,j}^e v_n^i (\dot{v}_n)^j. \quad (8)$$

其中: MOE_e 为第 n 辆车的油耗和排放率, i 、 j 分别为该车的速度功率、加速度功率, v_n 、 \dot{v}_n 分别为第 n 辆车的瞬时速度、瞬时加速度, $K_{i,j}^e$ 为该车速度功率和加速度功率的回归系数.

通过深入分析燃油消耗模型可以看出,节省燃油消耗的本质为优化速度曲线,尽可能减小速度波动,并降低停顿波的影响.对于电动汽车或混合动力汽车,其单车节能本质也是如此.速度曲线的优化目标已知,在求解过程中也经常通过建立代价函数并采用MPC方法得到最优解.基于车-车协同可实现车辆队列的生态驾驶,文献[148]提出新的间距策略,基于

MPC方法优化驾驶速度曲线以减少能量消耗,要求队列中的所有CACC汽车跟踪节能的驾驶曲线,并将这种策略称为E-CACC.文献[149]基于庞特里亚金最小原理设计必要的优化条件,数值结果显示可提升汽车燃油经济性.在不同的交通状态下,获得智能网联汽车渗透率对整个交通总消耗的影响,文献[150]在此基础上设计了自动驾驶模式与自适应跟驰模式的能量最优轨迹.文献[151]为智能网联汽车的不同操作模式绘制出状态转换图,其中包括生态轨迹规划,仿真结果显示汽车油耗可减少3.9%~7.4%.文献[152]基于车-路协同充分利用信号灯、前方队列状态和对未来轨迹的估计,将上述因素引入到深度强化学习算法的奖励函数中,智能网联汽车可依此提前调整速度,达到抑制人工驾驶汽车在红灯阶段停车引发的振荡波的目的,进而降低整体的油耗.文献[153]提出一种基于车-路协同的生态驾驶算法,可以根据实时交通状况调整交叉口的车辆速度和信号配时,并为每辆自动驾驶汽车估计进入交叉口的时间点,使得车辆能够按照设定的控制速度在分配的时间进入交叉口,该算法不仅能够降低燃油消耗,而且可提高交叉口的吞吐量.文献[154]同样基于车-路协同,充分利用进入交叉口的车辆信息和交通灯的信息,将生态驾驶问题表述为最优控制问题,并获取实时在线解析解.文献[155]深入探讨电动汽车和混合动力汽车通过V2X技术实现节能的可能性,从运动的第一原理与最优控制的角度分析了节能驾驶的基本原理.文献[156]指出可联合优化电池充电与车辆速度轨迹,将在充电站的停留时间考虑到规划问题中,提出一个综合的智能网联汽车架构,可以准确预测生态驾驶区的未来电力需求,优化充电损耗.文献[157]不仅为智能网联汽车设计节能驾驶策略,减少在瞬态交通条件下不必要的制动和加速带来的燃油消耗,同时分析了该策略对人工驾驶车辆影响,综合统计数据显示即便在智能网联汽车渗透率较低的情况下,该策略也可对整体交通的能源效率产生积极影响.文献[158]考虑一个异质电动非线性自动驾驶汽车队列问题,设计了非线性MPC策略和分布式指数稳定鲁棒类PID协议,可以计算整个队列的最优生态轨迹和实现精确的轨迹跟踪,能够精确实现节能控制所需的瞬态行为.

在减少排放方面,文献[27]通过数值模拟研究智能网联汽车对混合交通流的燃料消耗和运输排放的影响,结果表明设计更小的期望车间距离可显著提高智能网联汽车节能减排的效果.减少车辆排放的解决思路也可以从优化速度曲线入手,但对于不同车型

的排放量需根据真实数据进行校准,关于此方向的研究成果较少.目前出现的智能网联汽车多为电动车,而电动车的排放模型与燃油车完全不同,对于电动智能网联汽车的能量消耗与排放还需进一步探究.

4 总结与展望

现阶段,混合交通系统的优化控制大多围绕智能网联汽车的策略展开,并逐步开始考虑与交通管控策略的协同.为了深入探讨车路云一体化进程所需的相关技术、研究现状和未来发展方向,本文对混合交通系统框架进行梳理,并围绕混合交通流建模及优化控制的新兴方法综述了基于车路云一体化的混合交通系统的最新研究成果.基于车路云一体化的混合交通系统优化控制还需投入更多的理论探索与工程实践,特别是在人工驾驶与自动驾驶的行为影响、通信缺陷处理机制、交通管理协同控制等方面:

1) 基于车路云一体化的混合交通系统建模以往多采用研究人员设计的假设条件或基于少数车辆组成的交通队列进行数据采集验证,得到的混合交通流模型泛化能力较差,应基于大量真实世界交通数据提高建模的准确度,因此亟需有关部门协调和促进混合交通数据集的采集、制定与公开,为混合交通流的模型发展提供依据和支撑.

2) 随着智能网联汽车的落地,其在交通系统中的渗透率逐步升高,这将为缓解交通拥堵、提高道路安全、减少能源消耗等方面提供更具体、更有效的解决方案.智能网联汽车由于具有对前方交通预测能力,其行为表现更为灵活、平稳和安全,由此智能网联汽车的行为会对人工驾驶车辆产生怎样的影响?智能网联汽车如何适应人工驾驶车辆的行为改变?这是未来需要研究的方向之一.

3) 车-路-云的良好连接离不开通信,实时交通信息的传递对通信效率和稳定性提出了较高的要求,车载网联设备与路侧、云端通信设备的可靠性和稳定性还需进行大量测试评估.在车端、路侧和云端存在的通信不稳定性(如通信延迟、数据丢包及网络攻击等)会对混合交通系统的运行造成怎样的影响目前还属于探索阶段.

4) 车路云一体化的智慧交通为现有的交通问题提供了新的解决思路,如何加强车-路-云之间的协同,辅助交通管理者制定更为高效可靠的管理策略,也是目前需要关注的问题.数字孪生技术可实现物理世界的完整映射,完成虚实结合的应用测试,基于数字孪生技术的协同控制也是未来研究的一种可行手段.

5) 过去对于智能网联汽车在节能减排方面的贡

献多聚焦燃油车模型,目前汽车行业正在朝着电气化发展,未来的智能网联汽车将以电动车为主流,电气能源消耗以及对应的排放模型还需进一步明确.另外,如何协同电网实现电能的高效利用也是值得关注的方向.

6)目前有关交通安全的决策大多集中于车与车之间的交互,很少涉及车辆与行人之间的交互,这一方面在于行人的检测与跟踪技术没有车辆检测和跟踪成熟,另一方面则是因为行人出现的场景较为复杂,对算法要求较高.随着行人轨迹预测研究的逐步深入^[159],可进一步探索混合交通系统中行人对于智能网联汽车的影响.

参考文献(References)

- [1] 交通运输部. “十四五”交通领域科技创新规划[R]. 北京: 交通运输部, 2022.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. The 14th five-year plan for science and technology innovation in the transportation sector[R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2022.)
- [2] Rahman M H, Abdel-Aty M, Wu Y N. A multi-vehicle communication system to assess the safety and mobility of connected and automated vehicles[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2021, 124: 102887.
- [3] Yao Z H, Hu R, Wang Y, 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.
- [4] Yao H D, Li X P. Lane-change-aware connected automated vehicle trajectory optimization at a signalized intersection with multi-lane roads[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2021, 129: 103182.
- [5] Goulet N, Ayalew B. Distributed maneuver planning with connected and automated vehicles for boosting traffic efficiency[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 10887-10901.
- [6] Li S Y, Wan K K, Gao B L, et al. Predictive cruise control for heavy trucks based on slope information under cloud control system[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2022, 33(4): 812-826.
- [7] 世界智能网联汽车大会. 智能网联汽车技术路线2.0[R]. 上海: 世界智能网联汽车大会, 2020.
(World Intelligent Connected Vehicles Conference. Roadmap of intelligent and connected vehicle 2.0[R]. Shanghai: World Intelligent Connected Vehicles Conference, 2020.)
- [8] 国家发展改革委. 关于印发《智能汽车创新发展战略》的通知[R]. 北京: 国家发展改革委, 2020.
(National Development and Reform Commission. Notice on the issuance of the strategy for the innovative development of intelligent vehicles[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2020.)
- [9] 交通运输部. 综合运输服务“十四五”发展规划[R]. 北京: 交通运输部, 2021.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. The 14th five-year plan for the development of comprehensive transport services[R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2021.)
- [10] 交通运输部. 数字交通“十四五”发展规划[R]. 北京: 交通运输部, 2021.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. The 14th Five-Year Development Plan for Digital Transportation[R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2021.)
- [11] 交通运输部. 交通领域科技创新中长期发展规划纲要[R]. 北京: 交通运输部, 2022.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Medium and long-term development plan for science and technology innovation in the field of transportation[R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2022.)
- [12] Li T, Guo F C, Krishnan R, et al. Right-of-way reallocation for mixed flow of autonomous vehicles and human driven vehicles[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2020, 115: 102630.
- [13] Behrisch M, Bieker L, Erdmann J, et al. SUMO-simulation of urban mobility: An overview[C]. *Proceedings of SIMUL: The 3rd International Conference on Advances in System Simulation*. Barcelona, 2011: 55-57.
- [14] Fellendorf M, Vortisch P. Microscopic traffic flow simulator VISSIM[M]. *International Series in Operations Research & Management Science*. New York: Springer, 2010: 63-93.
- [15] Varga A. OMNeT++[C]. *Modeling and Tools for Network Simulation*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 35-59.
- [16] Jia D Y, Sun J, Sharma A, et al. Integrated simulation platform for conventional, connected and automated driving: A design from cyber-physical systems perspective[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2021, 124: 102984.
- [17] 李克强, 常雪阳, 李家文, 等. 智能网联汽车云控系统及其实现[J]. *汽车工程*, 2020, 42(12): 1595-1605.
(Li K Q, Chang X Y, Li J W, et al. Cloud control system for intelligent and connected vehicles and its application[J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(12): 1595-1605.)
- [18] 李克强, 李家文, 常雪阳, 等. 智能网联汽车云控系统原理及其典型应用[J]. *汽车安全与节能学报*, 2020, 11(3): 261-275.
(Li K Q, Li J W, Chang X Y, et al. Principles and typical applications of cloud control system for intelligent and connected vehicles[J]. *Journal of Automotive Safety and*

- Energy, 2020, 11(3): 261-275.)
- [19] 崔明阳, 黄荷叶, 许庆, 等. 智能网联汽车架构、功能与应用关键技术[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2022, 62(3): 493-508.
(Cui M Y, Huang H Y, Xu Q, et al. Survey of intelligent and connected vehicle technologies: Architectures, functions and applications[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2022, 62(3): 493-508.)
- [20] Gipps P G. A behavioural car-following model for computer simulation[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 1981, 15(2): 105-111.
- [21] Newell G F. A simplified car-following theory: A lower order model[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2002, 36(3): 195-205.
- [22] 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.
- [23] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Physical Review E: Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 2000, 62(2): 1805-1824.
- [24] 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): 017101.
- [25] Chen J Z, Zhou Y, Liang H. Effects of ACC and CACC vehicles on traffic flow based on an improved variable time headway spacing strategy[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(9): 1365-1373.
- [26] Milanés V, Shladover S E, Spring J, et al. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(1): 296-305.
- [27] Yao Z H, Wang Y, Liu B, et al. Fuel consumption and transportation emissions evaluation of mixed traffic flow with connected automated vehicles and human-driven vehicles on expressway[J]. Energy, 2021, 230: 120766.
- [28] 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.
- [29] Xie D F, Zhao X M, He Z B. Heterogeneous traffic mixing regular and connected vehicles: Modeling and stabilization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(6): 2060-2071.
- [30] Sharma A, Zheng Z D, Bhaskar A, et al. Modelling car-following behaviour of connected vehicles with a focus on driver compliance[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2019, 126: 256-279.
- [31] Makridis M, Mattas K, Ciuffo B. Response time and time headway of an adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21(4): 1677-1686.
- [32] Kesting A, Treiber M, Helbing D. Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity[J]. Philosophical Transactions Series A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2010, 368(1928): 4585-4605.
- [33] Schakel W J, van Arem B, Netten B D. Effects of cooperative adaptive cruise control on traffic flow stability[C]. The 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Funchal, 2010: 759-764.
- [34] Sun J, Zheng Z D, Sun J. Stability analysis methods and their applicability to car-following models in conventional and connected environments[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2018, 109: 212-237.
- [35] Jin S, Sun D H, Zhao M, et al. Modeling and stability analysis of mixed traffic with conventional and connected automated vehicles from cyber physical perspective[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 551: 124217.
- [36] Ge J I, Orosz G. Optimal control of connected vehicle systems with communication delay and driver reaction time[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(8): 2056-2070.
- [37] Yu H Y, Jiang R, He Z B, et al. Automated vehicle-involved traffic flow studies: A survey of assumptions, models, speculations, and perspectives[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2021, 127: 103101.
- [38] Wang S Y, Yu B, Wu M Y. MVCM car-following model for connected vehicles and simulation-based traffic analysis in mixed traffic flow[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(6): 5267-5274.
- [39] Li Y F, Chen W B, Peeta S, et al. Platoon control of connected multi-vehicle systems under V2X communications: Design and experiments[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(5): 1891-1902.
- [40] Mousavi S S, Bahrami S, Kouvelas A. Output feedback controller design for a mixed traffic flow system moving in a loop[C]. 2021 American Control Conference. New Orleans, 2021: 192-197.
- [41] Ge J, Orosz G. Dynamics of connected vehicle systems with delayed acceleration feedback[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2014, 46: 46-64.
- [42] Jia D Y, Ngoduy D. Enhanced cooperative car-following traffic model with the combination of V2V and V2I communication[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2016, 90: 172-191.
- [43] Chang X, Li H J, Rong J, et al. Analysis on traffic stability and capacity for mixed traffic flow with platoons

- of intelligent connected vehicles[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 557: 124829.
- [44] Woo S, Skabardonis A. Flow-aware platoon formation of connected automated vehicles in a mixed traffic with human-driven vehicles[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2021, 133: 103442.
- [45] Ngoduy D. Effect of the car-following combinations on the instability of heterogeneous traffic flow[J]. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2015, 3(1): 44-58.
- [46] Cheng R J, Lyu H, Zheng Y X, et al. Modeling and stability analysis of cyberattack effects on heterogeneous intelligent traffic flow[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2022, 604: 127941.
- [47] Ali Y, Zheng Z D, Mazharul H M, et al. Understanding the discretionary lane-changing behaviour in the connected environment[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 137: 105463.
- [48] Zheng Z D. Recent developments and research needs in modeling lane changing[J]. *Transportation Research—Part B: Methodological*, 2014, 60: 16-32.
- [49] Toledo T, Choudhury C F, Ben-Akiva M E. Lane-changing model with explicit target lane choice[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2005, 1934(1): 157-165.
- [50] Ali Y, Zheng Z D, Haque M M, et al. A game theory-based approach for modelling mandatory lane-changing behaviour in a connected environment[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2019, 106: 220-242.
- [51] Xie D F, Fang Z Z, Jia B, et al. A data-driven lane-changing model based on deep learning[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2019, 106: 41-60.
- [52] Xing Y, Lv C, Wang H J, et al. An ensemble deep learning approach for driver lane change intention inference[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2020, 115: 102615.
- [53] Wang Y B, Wang L, Guo J Q, et al. Ego-efficient lane changes of connected and automated vehicles with impacts on traffic flow[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2022, 138: 103478.
- [54] Ye Y J, Zhang X H, Sun J. Automated vehicle's behavior decision making using deep reinforcement learning and high-fidelity simulation environment[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2019, 107: 155-170.
- [55] You C X, Lu J B, Filev D, et al. Autonomous planning and control for intelligent vehicles in traffic[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(6): 2339-2349.
- [56] Wang P, Chan C Y, de La Fortelle A. A reinforcement learning based approach for automated lane change maneuvers[C]. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Changshu, 2018: 1379-1384.
- [57] Huang C, Huang H L, Hang P, et al. Personalized trajectory planning and control of lane-change maneuvers for autonomous driving[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(6): 5511-5523.
- [58] Zhang Q Y, Langari R, Tseng H E, et al. A game theoretic model predictive controller with aggressiveness estimation for mandatory lane change[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2020, 5(1): 75-89.
- [59] Nishi T, Doshi P, Prokhorov D. Merging in congested freeway traffic using multipolicy decision making and passive actor-critic learning[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2019, 4(2): 287-297.
- [60] Lopez V G, Lewis F L, Liu M S, et al. Game-theoretic lane-changing decision making and payoff learning for autonomous vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(4): 3609-3620.
- [61] Wang G, Hu J M, Li Z H, et al. Harmonious lane changing via deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(5): 4642-4650.
- [62] Liu M S, Wan Y, Lewis F L, et al. A three-level game-theoretic decision-making framework for autonomous vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(11): 20298-20308.
- [63] Wang B J, Li W, Wen H S, et al. Modeling impacts of driving automation system on mixed traffic flow at off-ramp freeway facilities[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, 573: 125852.
- [64] Chen R, Cassandras C G, Tahmasbi-Sarvestani A. Time and energy-optimal lane change maneuvers for cooperating connected and automated vehicles[C]. IEEE 58th Conference on Decision and Control. Nice, 2020: 2220-2225.
- [65] Yang C, Chen X D, Lin X, et al. Coordinated trajectory planning for lane-changing in the weaving areas of dedicated lanes for connected and automated vehicles[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2022, 144: 103864.
- [66] Zhang H Y, Du L L, Shen J L. Hybrid MPC system for platoon based cooperative lane change control using machine learning aided distributed optimization[J]. *Transportation Research—Part B: Methodological*, 2022, 159: 104-142.
- [67] You C X, Lu J B, Filev D, et al. Autonomous planning and control for intelligent vehicles in traffic[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(6): 2339-2349.
- [68] Lombard A, Abbas-Turki A, El-Moudni A. V2V-based memetic optimization for improving traffic efficiency on multi-lane roads[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2020, 12(1): 35-46.

- [69] Zhou Y J, Zhu H B, Guo M M, et al. Impact of CACC vehicles' cooperative driving strategy on mixed four-lane highway traffic flow[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 540: 122721.
- [70] Greenshields B D, Bibbins J R, Channing W S, et al. A study of traffic capacity[C]. *Proceedings of the 14th Annual Meeting of the Highway Research*. New York, 1935: 448-477.
- [71] Lighthill M J, Whitham G B. On kinematic waves II: A theory of traffic flow in long crowded roads[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1955, 229(1178): 317-345.
- [72] Richards P I. Shock waves on the highway[J]. *Operations Research*, 1956, 4(1): 42-51.
- [73] Daganzo C F. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory[J]. *Transportation Research—Part B: Methodological*, 1994, 28(4): 269-287.
- [74] Aw A, Rascle M. Resurrection of “second order” models of traffic flow[J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2000, 60(3): 916-938.
- [75] Zhou J Z, Zhu F. Modeling the fundamental diagram of mixed human-driven and connected automated vehicles[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2020, 115: 102614.
- [76] Shi X W, Li X P. Constructing a fundamental diagram for traffic flow with automated vehicles: Methodology and demonstration[J]. *Transportation Research—Part B: Methodological*, 2021, 150: 279-292.
- [77] Gu Z Y, Wang Z L, Liu Z Y, et al. Network traffic instability with automated driving and cooperative merging[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2022, 138: 103626.
- [78] Hou Z S, Xu J X, Yan J W. An iterative learning approach for density control of freeway traffic flow via ramp metering[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2008, 16(1): 71-97.
- [79] Silgu M A, Erdağ İ G, Gökso G, et al. Combined control of freeway traffic involving cooperative adaptive cruise controlled and human driven vehicles using feedback control through SUMO[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 11011-11025.
- [80] Levin M W, Boyles S D. A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2016, 62: 103-116.
- [81] Guo Q Q, Ban X G, Aziz H M A. Mixed traffic flow of human driven vehicles and automated vehicles on dynamic transportation networks[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2021, 128: 103159.
- [82] Jin L, Čičić M, Johansson K H, et al. Analysis and design of vehicle platooning operations on mixed-traffic highways[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2021, 66(10): 4715-4730.
- [83] Pan T L, Guo R Z, Lam W H K, et al. Integrated optimal control strategies for freeway traffic mixed with connected automated vehicles: A model-based reinforcement learning approach[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2021, 123: 102987.
- [84] Tajalli M, Mehrabipour M, Hajbabaie A. Network-level coordinated speed optimization and traffic light control for connected and automated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 22(11): 6748-6759.
- [85] Huang K, Di X, Du Q, et al. Stabilizing traffic via autonomous vehicles: A continuum mean field game approach[C]. *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. Auckland, 2019: 3269-3274.
- [86] Huang K, Di X, Du Q, et al. Scalable traffic stability analysis in mixed-autonomy using continuum models[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2020, 111: 616-630.
- [87] Wang J W, Zheng Y, Xu Q, et al. Controllability analysis and optimal control of mixed traffic flow with human-driven and autonomous vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(12): 7445-7459.
- [88] Xing Y, Lv C, Cao D P, et al. Energy oriented driving behavior analysis and personalized prediction of vehicle states with joint time series modeling[J]. *Applied Energy*, 2020, 261: 114471.
- [89] Hang P, Huang C, Hu Z X, et al. Decision making for connected automated vehicles at urban intersections considering social and individual benefits[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(11): 22549-22562.
- [90] Zheng F F, Liu C, Liu X B, et al. Analyzing the impact of automated vehicles on uncertainty and stability of the mixed traffic flow[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2020, 112: 203-219.
- [91] Wang Y P, Wei L, Chen P. Trajectory reconstruction for freeway traffic mixed with human-driven vehicles and connected and automated vehicles[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2020, 111: 135-155.
- [92] Hang P, Lv C, Xing Y, et al. Human-like decision making for autonomous driving: A noncooperative game theoretic approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(4): 2076-2087.
- [93] Zhu H B, Zhou Y J, Wu W J. Modeling traffic flow mixed with automated vehicles considering drivers' character difference[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 549: 124337.
- [94] Lee S, Jeong E, Oh M, et al. Driving aggressiveness management policy to enhance the performance of mixed traffic conditions in automated driving environments[J]. *Transportation Research—Part A: Policy and Practice*,

- 2019, 121: 136-146.
- [95] Hang P, Huang C, Hu Z X, et al. Driving conflict resolution of autonomous vehicles at unsignalized intersections: A differential game approach[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(6): 5136-5146.
- [96] Li L, Jiang R, He Z B, et al. Trajectory data-based traffic flow studies: A revisit[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2020, 114: 225-240.
- [97] Treiber M, Kesting A. *Traffic flow dynamics*[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [98] Montanino M, Punzo V. On string stability of a mixed and heterogeneous traffic flow: A unifying modelling framework[J]. *Transportation Research—Part B: Methodological*, 2021, 144: 133-154.
- [99] Feng S, Zhang Y, Li S E, et al. String stability for vehicular platoon control: Definitions and analysis methods[J]. *Annual Reviews in Control*, 2019, 47: 81-97.
- [100] Wang L, Horn B K P. On the chain stability of bilateral control model[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(8): 3397-3408.
- [101] Wang L, Horn B K P. On the stability analysis of mixed traffic with vehicles under car-following and bilateral control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(7): 3076-3083.
- [102] Giammarino V, Baldi S, Frasca P, et al. Traffic flow on a ring with a single autonomous vehicle: An interconnected stability perspective[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(8): 4998-5008.
- [103] Monteil J, Bouroche M, Leith D J. \mathcal{L}_2 and \mathcal{L}_∞ stability analysis of heterogeneous traffic with application to parameter optimization for the control of automated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(3): 934-949.
- [104] 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.
- [105] Zheng Y, Wang J W, Li K Q. Smoothing traffic flow via control of autonomous vehicles[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(5): 3882-3896.
- [106] Chen C Y, Wang J W, Xu Q, et al. Mixed platoon control of automated and human-driven vehicles at a signalized intersection: Dynamical analysis and optimal control[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2021, 127: 103138.
- [107] Hwang Y, Choi S B. Awareness on present and future trajectory of vehicle using multiple hypotheses in the mixed traffic of intersection[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(10): 17690-17703.
- [108] 姚志洪, 顾秋凡, 徐桃让, 等. 考虑时延的智能网联汽车混合交通流稳定性分析[J]. *控制与决策*, 2022, 37(6): 1505-1512.
- (Yao Z H, Gu Q F, Xu T R, et al. Stability of mixed traffic flow with intelligent connected vehicles considering time delay[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(6): 1505-1512.)
- [109] Wen S X, Guo G. Communication topology assignment and control co-design for vehicle platoons in LTE-V2V network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(12): 12462-12476.
- [110] Kerner B S. Effect of autonomous driving on traffic breakdown in mixed traffic flow: A comparison of classical ACC with three-traffic-phase-ACC (TPACC)[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, 562: 125315.
- [111] Gunter G, Gloudemans D, Stern R E, et al. Are commercially implemented adaptive cruise control systems string stable?[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(11): 6992-7003.
- [112] Li L, Peng X Y, Wang F Y, et al. A situation-aware collision avoidance strategy for car-following[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2018, 5(5): 1012-1016.
- [113] Feng S, Song Z Y, Li Z J, et al. Robust platoon control in mixed traffic flow based on tube model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2021, 6(4): 711-722.
- [114] Yao Z H, Hu R, Jiang Y S, 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.
- [115] Papadoulis A, Quddus M, Imprialou M. Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 124: 12-22.
- [116] Typaldos P, Papageorgiou M, Papamichail I. Optimization-based path-planning for connected and non-connected automated vehicles[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2022, 134: 103487.
- [117] Huang C, Hang P, Hu Z X, et al. Collision-probability-aware human-machine cooperative planning for safe automated driving[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(10): 9752-9763.
- [118] Zhu J Y, Ma Y L, Lou Y N. Multi-vehicle interaction safety of connected automated vehicles in merging area: A real-time risk assessment approach[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2022, 166: 106546.
- [119] Liao X S, Zhao X P, Wang Z R, et al. Game theory-based ramp merging for mixed traffic with unity-SUMO co-simulation[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(9): 5746-5757.
- [120] Hang P, Lv C, Huang C, et al. Cooperative decision making of connected automated vehicles at multi-lane merging zone: A coalitional game approach[J]. *IEEE*

- Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(4): 3829-3841.
- [121] Rios-Torres J, Malikopoulos A A. A survey on the coordination of connected and automated vehicles at intersections and merging at highway on-ramps[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 18(5): 1066-1077.
- [122] Hang P, Huang C, Hu Z X, et al. Decision making of connected automated vehicles at an unsignalized round about considering personalized driving behaviours[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(5): 4051-4064.
- [123] Virdi N, Grzybowska H, Waller S T, et al. A safety assessment of mixed fleets with connected and autonomous vehicles using the surrogate safety assessment module[J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 131: 95-111.
- [124] Wang P C, Wu X K, He X Z. Modeling and analyzing cyberattack effects on connected automated vehicular platoons[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2020, 115: 102625.
- [125] Ju Z Y, Zhang H, Tan Y. Distributed deception attack detection in platoon-based connected vehicle systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(5): 4609-4620.
- [126] Zhang D, Shen Y P, Zhou S Q, et al. Distributed secure platoon control of connected vehicles subject to DoS attack: Theory and application[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(11): 7269-7278.
- [127] Xiao S Y, Ge X H, Han Q L, et al. Secure and collision-free multi-platoon control of automated vehicles under data falsification attacks[J]. Automatica, 2022, 145: 110531.
- [128] Ghiasi A, Hussain O, Qian Z, et al. A mixed traffic capacity analysis and lane management model for connected automated vehicles: A Markov chain method[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2017, 106: 266-292.
- [129] Meng Y, Li L, Wang F Y, et al. Analysis of cooperative driving strategies for nonsignalized intersections[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(4): 2900-2911.
- [130] Bahrami S, Roorda M J. Optimal traffic management policies for mixed human and automated traffic flows[J]. Transportation Research—Part A: Policy and Practice, 2020, 135: 130-143.
- [131] Wang J, Peeta S, He X Z. Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2019, 126: 139-168.
- [132] Wang J, Lu L L, Peeta S, et al. Optimal toll design problems under mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2021, 125: 102952.
- [133] Mansourianfar M H, Gu Z Y, Saberi M. Distance-based time-dependent optimal ratio control scheme (TORCS) in congested mixed autonomy networks[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2022, 141: 103760.
- [134] Zhong Z J, Lee J. The effectiveness of managed lane strategies for the near-term deployment of cooperative adaptive cruise control[J]. Transportation Research—Part A: Policy and Practice, 2019, 129: 257-270.
- [135] Nagalur Subraveti H H S, Srivastava A, Ahn S, et al. On lane assignment of connected automated vehicles: Strategies to improve traffic flow at diverge and weave bottlenecks[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2021, 127: 103126.
- [136] Chen S K, Wang H, Meng Q. An optimal dynamic lane reversal and traffic control strategy for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(4): 3804-3815.
- [137] Katriniok A, Rosarius B, Mähönen P. Fully distributed model predictive control of connected automated vehicles in intersections: Theory and vehicle experiments[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(10): 18288-18300.
- [138] Wu Z Y, Waterson B. Urban intersection management strategies for autonomous/connected/conventional vehicle fleet mixtures[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 12084-12093.
- [139] Zhang Z, Liu F, Wolshon B, et al. Virtual traffic signals: Safe, rapid, efficient and autonomous driving without traffic control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(11): 6954-6966.
- [140] Xu H L, Zhang Y, Li L, et al. Cooperative driving at unsignalized intersections using tree search[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(11): 4563-4571.
- [141] Morales M A I, Creemers F, Lefeber E, et al. Optimal access management for cooperative intersection control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(5): 2114-2127.
- [142] Karimi M, Roncoli C, Alecsandru C, et al. Cooperative merging control via trajectory optimization in mixed vehicular traffic[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2020, 116: 102663.
- [143] Xiong B K, Jiang R. Speed advice for connected vehicles at an isolated signalized intersection in a mixed traffic flow considering stochasticity of human driven vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 11261-11272.
- [144] Wang J, Gong S Y, Peeta S, et al. A real-time deployable model predictive control-based cooperative platooning approach for connected and autonomous vehicles[J].

- Transportation Research—Part B: Methodological, 2019, 128: 271-301.
- [145] Wadud Z, MacKenzie D, Leiby P. Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles[J]. Transportation Research—Part A: Policy and Practice, 2016, 86: 1-18.
- [146] Mensing F, Bideaux E, Trigui R, et al. Eco-driving: An economic or ecologic driving style?[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2014, 38: 110-121.
- [147] Qin Y Y, Wang H, Ran B. Stability analysis of connected and automated vehicles to reduce fuel consumption and emissions[J]. Journal of Transportation Engineering—Part A: Systems, 2018, 144(11): 04018068.
- [148] Hu Y Y, Chen C L, He J P, et al. Eco-platooning for cooperative automated vehicles under mixed traffic flow[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(4): 2023-2034.
- [149] Wang S A, Stern R, Levin M W. Optimal control of autonomous vehicles for traffic smoothing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(4): 3842-3852.
- [150] Zhang Y, Cassandras C G. An impact study of integrating connected automated vehicles with conventional traffic[J]. Annual Reviews in Control, 2019, 48: 347-356.
- [151] Yang Z, Feng Y H, Liu H X. A cooperative driving framework for urban arterials in mixed traffic conditions[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2021, 124: 102918.
- [152] Wang S P, Wang Z Y, Jiang R, et al. Trajectory jerking suppression for mixed traffic flow at a signalized intersection: A trajectory prediction based deep reinforcement learning method[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(10): 18989-19000.
- [153] Sun P Y, Nam D, Jayakrishnan R, et al. An eco-driving algorithm based on vehicle to infrastructure (V2I) communications for signalized intersections[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2022, 144: 103876.
- [154] Meng X Y, Cassandras C G. Eco-driving of autonomous vehicles for nonstop crossing of signalized intersections[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2022, 19(1): 320-331.
- [155] Vahidi A, Sciarretta A. Energy saving potentials of connected and automated vehicles[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2018, 95: 822-843.
- [156] Guanetti J, Kim Y, Borrelli F. Control of connected and automated vehicles: State of the art and future challenges[J]. Annual Reviews in Control, 2018, 45: 18-40.
- [157] Ma Y, Wang J M. Energetic impacts evaluation of eco-driving on mixed traffic with driver behavioral diversity[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(4): 3406-3417.
- [158] Coppola A, Lui D G, Petrillo A, et al. Eco-driving control architecture for platoons of uncertain heterogeneous nonlinear connected autonomous electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 24220-24234.
- [159] 孔玮, 刘云, 李辉, 等. 基于深度学习的行人轨迹预测方法综述[J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 2841-2850. (Kong W, Liu Y, Li H, et al. Survey of pedestrian trajectory prediction methods based on deep learning[J]. Control and Decision, 2021, 36(12): 2841-2850.)

作者简介

左志强(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事自动驾驶、智能交通系统优化与控制、复杂网络与多智能体系统的控制等研究, E-mail: zqzuo@tju.edu.cn;

刘正璇(1994—), 女, 博士生, 从事智能交通系统优化与控制的研究, E-mail: liuzhengxuan@tju.edu.cn;

王一晶(1976—), 女, 教授, 博士, 从事智能网联汽车规划与控制、多智能体系统控制等研究, E-mail: yjwang@tju.edu.cn.

科研团队简介

左志强教授科研团队立足于天津大学电气自动化与信息工程学院和天津大学智能驾驶交叉研究中心, 长期专注于自动驾驶领域。目前科研团队聚焦自动驾驶感知决策与控制技术、智能网联汽车协同控制、智能交通系统优化与控制、复杂网络与多智能体系统的控制等问题, 在以下方面开展科研工作: 自动驾驶环境感知与目标检测技术、城市复杂道路车辆交互性决策规划技术、车辆抗扰控制技术、人机共驾技术、多车编队与空地协同技术等。

课题组负责人左志强教授现任中国自动化学会理事、中国自动化学会控制理论专业委员会委员, 入选教育部新世纪优秀人才支持计划、天津市131创新人才计划, 担任国际期刊《Journal of The Franklin Institute》Associate Editor, 国内期刊《控制理论与应用》《控制与决策》等编委, 培养硕士和博士70余人。

团队主持承担国家自然科学基金重点项目与面上项目、天津市人工智能科技重大专项、教育部新世纪优秀人才支持计划项目以及多项企业横向项目。研究成果获天津市科技进步一等奖、天津市自然科学三等奖等, 授权国家发明专利10余项, 发表SCI论文100余篇。团队致力于开发适用于4级别自动驾驶汽车的关键算法, 近年连续参加世界智能驾驶挑战赛, 获得前瞻组(实车)金奖1项、银奖1项、铜奖1项以及仿真组一等奖3项、二等奖1项、三等奖1项, 并在2021年作为世界智能驾驶挑战赛官方聘请技术单位, 为仿真赛提供全程测试技术支持。

(责任编辑: 郑晓蕾)