

文章编号:1671-1637(2020)05-0058-15

智能网联汽车协同生态驾驶策略综述

杨 澜¹, 赵祥模¹, 吴国垣², 徐志刚¹, MATTHEW Barth², 惠 飞¹,
郝 鹏², 韩梦杰¹, 赵周桥², 房 山¹, 景首才¹

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 加利福尼亚大学河滨分校 环境研究与技术中心,
加利福尼亚 河滨 CA 92521)

摘 要:为了跟踪近年来智能网联汽车(CAV)协同生态驾驶策略的研究进展,分析了车辆、驾驶行为、交通网络和社会这 4 类因素对 CAV 能耗的影响程度,以车辆、基础设施和旅行者对象对目前 CAV 生态研究进行分类,重点分析了信号交叉口生态驶入与离开、生态协同自适应巡航控制、匝道合流区生态协同驾驶、生态协同换道轨迹规划和生态路由 5 种典型车辆协同生态驾驶应用场景的研究现状。分析结果表明:相比人类驾驶方式,在任何交通流量 CAV 100%渗透率的条件下和低交通流量 CAV 部分渗透率的条件下,CAV 油耗节省效果显著,最高可达 63%,而具有部分智能化和网联化等级的 CAV 油耗可至少节省 7%;现有研究较少考虑人机共驾情况下,驾驶人反应延迟和自动控制器传输延迟导致的轨迹跟踪偏离;现有研究将车车通信/车路通信假定为理想数据交互过程,未考虑通信拓扑、传输时延、通信失效与基站切换等因素对 CAV 生态协同驾驶策略的影响;现有研究较少探讨多车道、交叉口转向-直行共用车道和 U 型车道等交通场景,以及不同智能网联等级 CAV 与人类驾驶汽车、行人、自行车等共存的混合交通条件下的生态驾驶策略;受限于自动驾驶技术和基础设施尚未成熟和完善,真实交通场景下的测试验证工作尚未开展;车辆控制、车车通信、多车协同、混合交通流场景、半实物仿真测试和真实交通场景测试等方面将是 CAV 协同生态驾驶策略的进一步发展方向。

关键词:智能网联汽车;生态驾驶;信号交叉口;自适应巡航控制;匝道合流;换道轨迹规划;生态路由;综述

中图分类号:U491 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.05.004

Review on connected and automated vehicles based cooperative eco-driving strategies

YANG Lan¹, ZHAO Xiang-mo¹, WU Guo-yuan², XU Zhi-gang¹, MATTHEW Barth², HUI Fei¹,
HAO Peng², HAN Meng-jie¹, ZHAO Zhou-qiao², FANG Shan¹, JING Shou-cai¹

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Center for Environmental Research and Technology, University of California at Riverside,
Riverside CA 92521, California, USA)

Abstract: To track the research progress of connected and automated vehicles (CAV) based cooperative eco-driving strategies in recent years, the influences of four factors, including the

收稿日期:2020-04-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1600604);国家自然科学基金项目(61703053, 61973045);中国博士后科学基金项目(2017M623091);陕西省重点研发计划项目(2018ZDCXL-GY-05-01);陕西省博士后科研课题项目(2018BSHYDZZ64);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ6035);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102240203)

作者简介:杨 澜(1985-),女,陕西咸阳人,长安大学高级工程师,工学博士,从事车联网及其应用技术研究。

通讯作者:吴国垣(1979-),男,河南南阳人,加利福尼亚大学河滨分校副研究员,工学博士。

引用格式:杨 澜,赵祥模,吴国垣,等.智能网联汽车协同生态驾驶策略综述[J].交通运输工程学报,2020,20(5):58-72.

Citation: YANG Lan, ZHAO Xiang-mo, WU Guo-yuan, et al. Review on connected and automated vehicles based cooperative eco-driving strategies[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(5): 58-72.

vehicle, driver behavior, traffic network and social factor on the energy consumption of CAV were analyzed. The current ecological studies on CAV were classified with vehicle, infrastructure and traveler as objects. The status-quo of 5 representative types of cooperative eco-driving scenarios were emphatically analyzed, including the eco-approach and departure at the signalized intersection, eco-cooperative adaptive cruise control, eco-cooperative driving in the ramp merging area, eco-cooperative lane changing trajectory planning and eco-routing. Analysis result shows that compared with the human driving mode, CAVs can save up to 63% fuel consumption at any traffic flow with 100% penetration rate of CAV as well as in the light traffic condition with partial penetration rate of CAV. CAVs with partial automated and connected levels can save at least 7% fuel consumption. Few existing studies consider the trajectory tracking deviation caused by the driver's response delay and automatic controller transmission delay in the case of human-machine co-driving. The existing researches assume the vehicle-to-vehicle communication (V2V) and vehicle-to-infrastructure communication (V2I) as the ideal data interaction processes. The impacts of factors such as the communication topology, transmission delay, communication failure and packet loss on the CAV based cooperative eco-driving strategies are ignored. Few existing studies discuss the eco-driving strategies in these traffic scenarios, such as the multi-lanes, shared lanes for turning and through at intersection, U-turn, as well as the mixed traffic conditions of different automated and connected level CAVs coexisting with human-driven vehicles, pedestrians and bicycles. Limited by the immaturity and imperfection of automatic driving technology and infrastructure, the test and verification work in real traffic scenarios is not carried out. The vehicle control, V2V communication, multi-vehicles collaboration, mixed traffic flow scenario, hardware-in-the-loop simulation test and real traffic scenario test will be the further development direction of CAV based cooperative eco-driving strategies. 2 tabs, 8 figs, 111 refs.

Key words: connected and automated vehicle; eco-driving; signal intersection; adaptive cruise control; ramp merging; lane changing trajectory planning; eco-routing; review

Author resumes: YANG Lan (1985-), female, senior engineer, PhD, lanyang@chd.edu.cn; WU Guo-yuan (1979-), male, associate professor, PhD, gywu@cert.ucr.edu.

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2018YFB1600604); National Natural Science Foundation of China (61703053, 61973045); China Postdoctoral Science Foundation (2017M623091); Shaanxi Province Key Research and Development Program (2018ZDCXL-GY-05-01); Shaanxi Province Postdoctoral Science Foundation (2018BSHYDZZ64); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2018JQ6035); Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102240203)

0 引言

近年来,全球能源和环保问题日益严重。2018年,中国道路交通运输业消耗了全国60.1%的石油,产生了14%的温室气体^[1]。美国交通运输行业消耗了70%的石油,产生了33.6%的温室气体^[2]。根据石油输出国组织(Organization of Petroleum Exporting Countries, OPEC)的预测,2016~2040年,交通运输行业的能源消耗将占全球总量的66.7%,成为高能耗行业^[3-5]。

相比于传统的交通规划管理、改变出行结构以及开发新节能等方法,生态驾驶通过从根本上改变驾驶行为(采用缓慢加/减速、合理换挡、保持车速稳定等操作),可以达到交通节能减排的持续性效果。20世纪90年代,Brookhuis等^[6]提出了车辆智能速度提示(Intelligent Speed Advisory, ISA)系统,后续很多文献采用不同方法实际测试了ISA系统,结果表明该类生态驾驶系统可节省能耗5%~15%^[7-9]。传统生态驾驶是在不改变已有车辆动力结构的前提下,通过辅助措施或驾驶培训等方式优

化驾驶行为与车辆行驶轨迹,较少考虑与其他车辆、基础设施、交通路网的信息交互,节能效果有限。近年来,通信技术和自动驾驶技术的迅猛发展加速了生态驾驶从传统方式向先进的智能网联汽车(Connected and Automated Vehicle, CAV)协同生态驾驶方式转变。CAV 通过在车辆上搭载感知传感器、通信模块与自动控制器等,利用 V2V/V2I 建立人-车-路之间的交互感知与信息共享,以降低车辆能耗为最主要目标,在不同道路场景下优化控制车辆速度轨迹和动力系统,实现单车或车辆队列的协同生态驾驶^[10-11]。在该研究过程中,CAV 生态驾驶经历了从简单场景的单车纵向控制研究到复杂场景车辆队列的横纵向控制研究,国内外学者为此展开了大量研究,并取得了显著进步和阶段性成果。

2000 年以来,为了提升全球交通能源效率,减少温室气体排放,美国、日本、德国和荷兰等国家政府部门和车企积极投入资金,助力交通节能减排研究,如欧洲 ECOMove、ecoDriver 和 Horizon 2020 项目、美国 AERIS(Applications for Environment: Real-Time Information Synthesis)项目和 SPaT(Signal Phase and Timing)挑战项目、日本 Energy-Saving ITS(Intelligent Transportation Systems)项目等^[12-16]。中国开展的项目有国家重点研发计划项目“综合交通运输与智能交通”、国家自然科学基金重点项目“智能车联网基础理论与共性关键技术”等^[17]。《中国制造 2025》重点领域技术路线中指出:预计到 2020 年,通过智能驾驶辅助技术,中国将减少 30% 的交通事故,交通效率提升 10%,油耗与排放降低 5%;2025 年,自动网联驾驶汽车装配率达到 30%,油耗和排放减少 20%;到 2030 年,汽车联网率接近 100%,高度自动驾驶、完全自动驾驶新车装配率达到 10%,实现部分区域“零伤亡、零拥堵”,全国范围能耗排放大幅降低^[18]。

目前 CAV 生态驾驶相关研究主要集中于方法研究、效果影响以及政策制定等方面,较少系统归纳与总结 CAV 协同生态驾驶策略的研究现状与发展趋势。鉴于此,本文系统分析了 CAV 能源消耗的主要影响因素,综述了 CAV 协同生态驾驶策略中 5 种典型应用场景的研究现状,系统总结和归纳了相关技术和方法,指出了研究中仍存在的问题,并展望了该领域的下一步研究方向。

1 CAV 能源消耗影响因素

影响 CAV 能源消耗的因素较多,本文按照影

响层次将其分为:车辆因素、驾驶行为、交通网络和社会因素,如图 1 所示。这 4 类因素在交通环境下共同存在且相互影响。

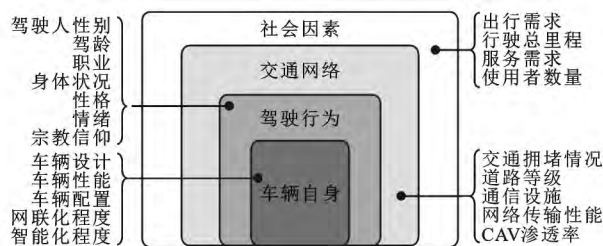


图 1 CAV 能源消耗的影响因素

Fig. 1 Factors influencing energy consumption of CAV

1.1 车辆自身

车辆自身因素包括车辆的设计、性能、配置、网联化和智能化程度等,是决定燃油消耗的核心因素。车辆设计中,发动机、自重、外形、整车动力和传动系统匹配、汽车附属设备和轮胎都直接影响能源消耗。根据不同工况优化车辆和发动机配置,可使车辆在行驶过程中具有良好的技术性能,使车辆传动系统效率对燃油消耗的作用提高约 10%。与重型车辆相比,轻型车辆加速到相同速度消耗的能源更少^[19]。在风阻和滚动阻力不变的情况下,其质量每减轻 100 kg,汽车每百公里耗油减少 0.6~0.7 L,若使用轻型材料质量则可减少 10%,燃油经济性提高 6%~8%^[20]。作为承载车辆质量直接与地面接触的轮胎,在正常速度行驶时所造成的油耗占整个汽车油耗的 20%。

目前,车辆上具有多种附属设备以满足不同需要,其功率和能耗成为车辆整体能耗的重要组成部分,如空调消耗的发动机功率占整个发动机功率的 10%~12%,使发动机燃油消耗增加 10%~20%。如图 2 所示,CAV 配置的各类感知设备和通信设备如 GPS、惯性导航系统、激光雷达、摄像头、红外传感器等,需要车辆提供辅助功率,间接增加了 CAV 的整体能耗。这些设备大多附着在车身表面,导致车辆高速行驶时空气阻力增加,带来额外能源消耗。目前尚无研究表明附加设备对空气动力学和能耗的影响,但其影响可以利用行李架对普通车辆的影响近似得到,即行李架会增加车辆 25% 的燃油消耗^[21]。CAV 的智能化程度不同,其燃油消耗也会不同,即智能化和网络集成度越高,节能效果越明显。Wu 等^[22]的研究表明,具有部分智能化和网联化功能的 CAV 可以较好地遵循建议速度曲线,与人类驾驶车辆相比,可减少 7% 的燃油消耗。

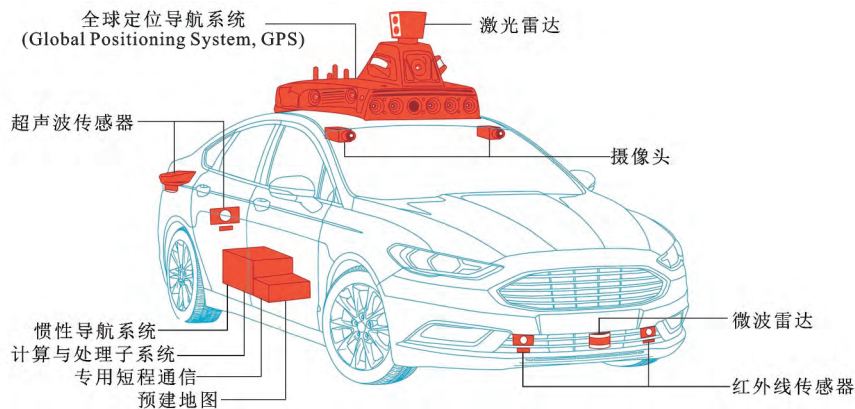


图 2 CAV 感知与通信设备配置

Fig. 2 CAV configuration equipment for sensing and communication

1.2 驾驶行为

在未实现高级自动驾驶之前,不同智能化、网联化等级的 CAV 将与人类驾驶汽车组成混合式交通,共享有限的道路资源,因此,驾驶人的驾驶行为与车辆燃油消耗密切相关。驾驶行为受多种因素影响,包括驾驶人性别、驾龄、职业、身体状况、性格、情绪、宗教信仰等生理与心理状况^[23]。这些因素的差异决定了不同驾驶人在受到相同外部环境影响时做出不同的驾驶决策。Devlieger 等^[24]定义了温和驾驶(速度为 $1.00\sim1.45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、正常驾驶($1.45\sim1.90\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和激进驾驶($1.90\sim2.45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)3 种与燃油消耗相关的驾驶行为;Zorrofi 等^[25]研究了驾驶行为对车辆燃油消耗的影响,指出激进驾驶行为在高速公路上增加了 33% 的油耗,在城镇道路上增加了 5% 的油耗;Jeffrey 等^[26]通过轻型车的试验发现,城市道路中不同驾驶习惯和风格可引起约 30% 的燃油消耗变化,高速公路会引起约 20% 的燃油消耗变化,通过改变驾驶风格,激进驾驶行为可以减少 20% 的燃油消耗,温和驾驶行为可以减少 5%~10% 燃油消耗。

如果在驾驶过程中为驾驶人提供有效的速度提示和建议,改变驾驶行为,减少频繁的速度波动,消除不必要的停车,能够明显降低油耗,即使在 CAV 渗透率不高的交通环境下,在不增加行驶时间的基础上可提高 20% 的燃油效率。

1.3 交通网络

交通网络因素主要包括交通拥堵情况、道路等级、通信设施、网络传输性能和 CAV 渗透率等。交通拥堵和车辆空转会加剧燃油消耗和污染物排放。Shankar 等^[27]研究表明,如果交通拥堵程度降低,能源消耗将明显降低。CAV 通过降低车辆碰撞事故率,可以减少 4.5% 的交通拥堵^[28]。道路类型决定

了速度、加速度和减速度曲线,高坡度道路使车辆频繁地在高负荷情况下行驶,导致油耗增加。国家标准《载客汽车运行燃料消耗量》(GB 4353—2007)中将道路分为 6 类(表 1)。有研究结果表明^[20],以 1 类道路油耗为基数,车辆在 2~6 类道路上的行驶油耗分别高出 10%、25%、35%、45% 和 70%。网络传输性能在信息交互方面尤为重要,传输信号的强弱和快慢影响 CAV 计算模块的预测和处理能力,决定着事件能否被及时处理。Tu 等^[29]指出提高网络吞吐量会降低燃油消耗和温室气体排放,但会增加 NO₂ 的排放浓度。随着 CAV 渗透率的提高,交通能源效率越明显。Rios-Torres 等^[30]研究了匝道合流区低、中、高交通流量下不同 CAV 渗透率的燃油消耗情况,试验结果证明,在任何交通流量 CAV 100% 渗透率和低交通流量部分 CAV 渗透率条件下都能达到节油效果,尤其是在中交通流量 CAV 60% 渗透率条件下,最高可以减少 63% 的燃油消耗。

表 1 道路类别

Tab. 1 Road categories

道路类别	公路	城市道路
1	平原、微丘地形的高速公路与一、二级公路	
2	平原、微丘地形的三、四级公路,山岭、重丘地形的高速公路	平原、微丘地形的一~四级道路
3	山岭、重丘地形的一~三级公路	重丘地形的一~四级道路
4	平原、微丘地形的级外公路	级外道路
5	山岭、重丘地形的四级公路	
6	山岭、重丘地形的级外公路	

1.4 社会因素

社会因素主要是指随着 CAV 高度智能化和

网联化带来的各种社会需求,如出行需求、车辆行驶总里程(Vehicle Miles Traveled, VMT)、新的服务需求、使用人群的增加等。更多的空车运输货物、旅行需求、车辆娱乐系统的设计会引起 VMT 增加,直接影响能源消耗反增,且增长程度具有不确定性。有研究估计了因 CAV 引起的能源反弹效应,评估了 CAV 带来 VMT 增加的弹性,研究结果表明,因出行成本降低,将会增加 4%~60% 的行驶总里程^[31]。

社会因素对能源消耗影响的不确定性最高。由于使用人群的增加、出行成本的降低、车辆功能的增加也可能对能源问题带来负面效果。Wadud 等^[32]分析了 CAV 不同机制对能源影响程度,结果表明,CAV 对能源的潜在影响有正面也有负面(图 3,其中纵轴上半部分和下半部分分别为能源消耗降低和增加的百分比范围)。未来应增加在车辆编队、生态驾驶、交通协调优化、车辆轻量化、车辆适当精简、基础设施覆盖率等方面的政策投入,以引导 CAV 朝节能减排的积极方向发展。

2 典型 CAV 协同生态驾驶策略

目前 CAV 的研究主要针对行车安全、通行效率和节能环保这 3 个目标进行优化,不同研究在优化目标的权衡中各有侧重。本文整理了 CAV 面向生态环保的大量文献,按照车辆、基础设施和旅行者 3 种应

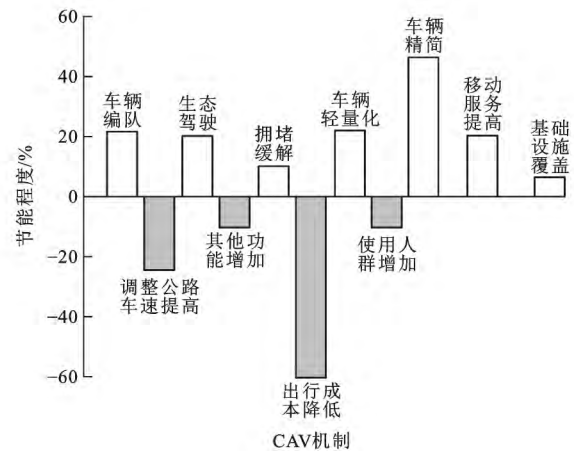


图 3 不同 CAV 机制的节能程度^[32]

Fig. 3 Energy savings of different CAV mechanisms

用对象对这些研究进行分类,见图 4。每类研究在考虑环保的同时,也考虑了安全性和通行效率^[33]。

本文选择目前被广泛研究的信号交叉口生态驶入与离开、生态协同自适应巡航控制、匝道合流区生态协同控制、生态协同换道轨迹规划和生态路由这 5 种典型 CAV 生态协同驾驶策略展开研究。

2.1 信号交叉口生态驶入与离开

信号交叉口作为城市路网中连续交通流与间断交通流相互转化的关键节点,频繁的车辆启停及加减速变换行为极易引发能源消耗与通行率降低,因此,信号交叉口车辆行为优化控制问题一直是学术研究的重点之一。如图 5 所示,信号交叉口生态驶

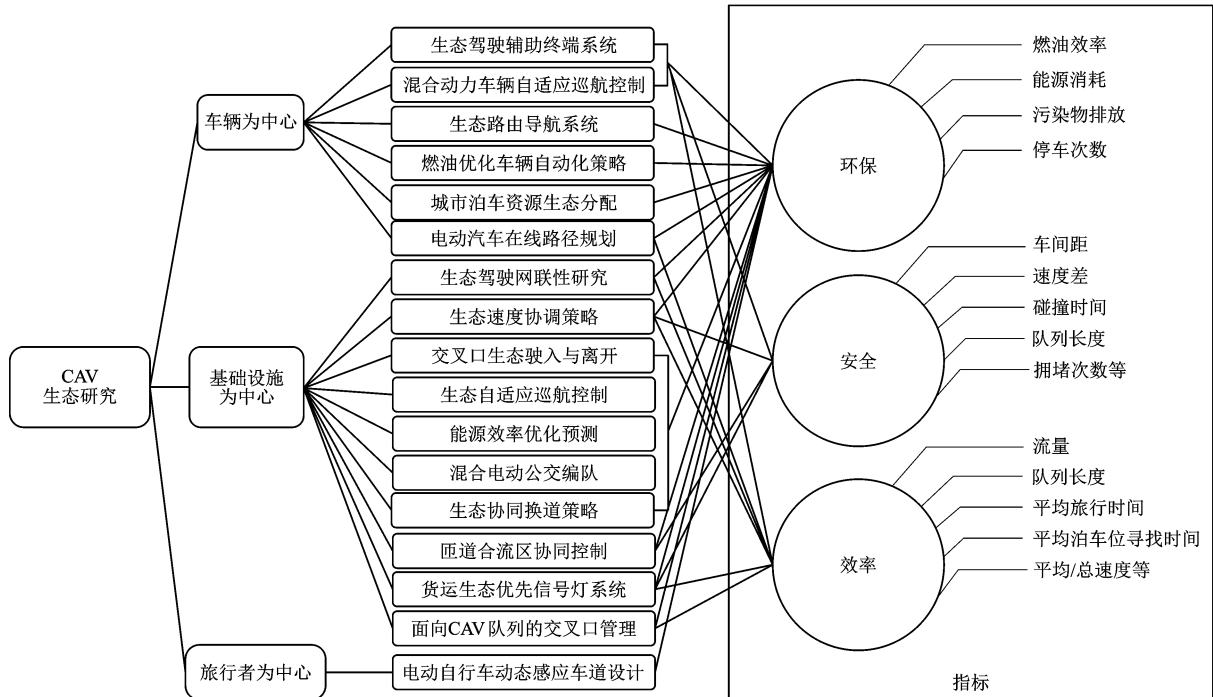


图 4 CAV 生态研究分类

Fig. 4 Classification of CAV ecological research

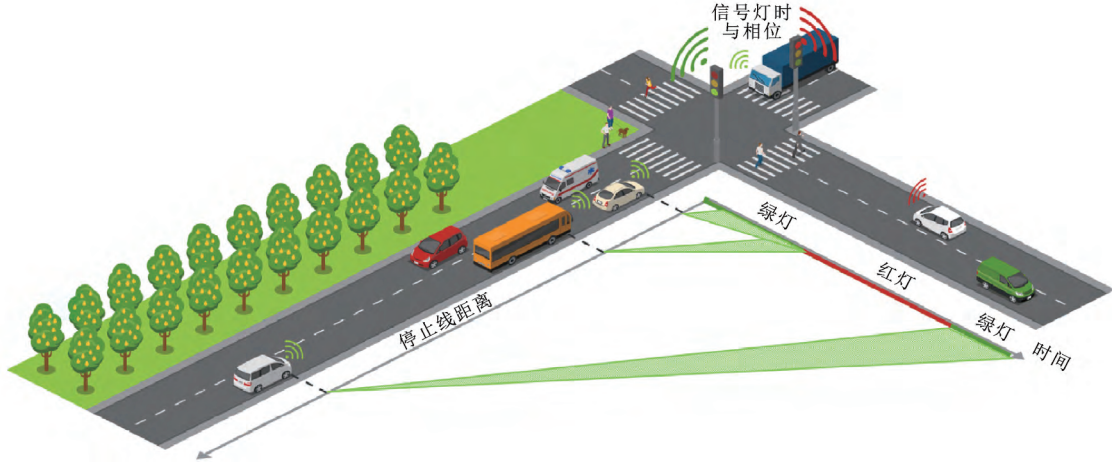


图 5 单信号交叉口 EAD 策略

Fig. 5 EAD method at single signalized intersection

入与离开(Eco-Approach and Departure, EAD)是 CAV 通过 V2X 获取交叉口信号灯相位、配时和周围车辆的运动信息,以车辆燃油经济性为主要目标,在交通约束条件下优化车辆的速度轨迹,避免车辆急加/减速,减少怠速时间,降低车辆油耗。

目前,信号交叉口 EAD 研究根据决策方法可分为:基于规则的 CAV 控制方法和基于优化的 CAV 控制方法。基于规则的 CAV 控制方法是通过 V2I 通信获取信号灯配时信息,采用预定规则计算车辆通过一个或者多个交叉口、避免停车的建议车速。Asadi 等^[34-36]采用匀速车辆模型求解了通过交叉口的生态车速;Rakha 等^[37-39]采用匀加速-匀速车辆模型求解了车辆通过交叉口的最优车速;Barth 等^[40-42]基于三角函数模型,根据车辆瞬时速度引导车辆不停车通过交叉口。该模型通过信号灯配时和车辆距交叉口停止线的剩余路程计算车辆目标平均速度,再依据车辆的瞬时速度引导车辆加/减速不停车通过交叉口,模型数学表达式为

$$v = \begin{cases} v_1 - v_2 \cos(st) & 0 \leq t < \frac{\pi}{2s} \\ v_1 - v_2 \frac{s}{a} \cos \left[a \left(t - \frac{\pi}{2s} + \frac{\pi}{2a} \right) \right] & \frac{\pi}{2s} \leq t < \frac{\pi}{2a} + \frac{\pi}{2s} \\ v_1 + v_2 \frac{s}{a} & \frac{\pi}{2a} + \frac{\pi}{2s} \leq t \leq \frac{d}{v_1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 为目标车速; v_1 和 v_2 分别为目标平均速度和速度差; t 为时间; d 为车辆与信号交叉口的目标距离; s 和 a 为在满足最大功率、最大加速度或冲击等内在约束情况下,对能耗进行优化的 2 个控制变量,不同的 s 和 a 对应不同的减速度和变加速度。

该模型将车辆的目标速度分为 3 段:加/减速段、减/加速段和匀速段,具有模型简单、曲线平滑、

便于部署等优点。王建强等^[43-45]基于匀加速-匀速车辆模型,综合考虑车辆通过多个交叉口的总油耗,计算了通过连续交叉口的生态车速轨迹;赵贺锋^[46]基于二阶多智能体方程建立了城市道路车辆编队控制模型,引导车辆不停车通过交叉口,提高了交叉口整体燃油经济性;靳秋思等^[47]将信号灯相位分为 6 种场景,考虑交叉口上下游整体油耗建立了协同生态驾驶策略模型,结果表明,该方法能够降低排放 20%~30%;Fang 等^[48]提出了一种适应于信号交叉口的混联车辆队列控制算法,仿真结果表明该算法能够降低车辆 15%~20%的油耗以及污染物排放。

基于优化的控制方法主要考虑车辆动力学模型和若干约束条件,以燃油效率为目标构造优化模型,求解得到车辆最优控制轨迹。在优化模型的目标函数方面,Seredynski 等^[49]基于全局规划法对多个信号交叉口路段进行分段,以车辆通过交叉口的速度波动最小为目标函数,构建了交叉口绿灯最优速度提示系统;Mahler 等^[50]在终端状态的损失函数中考虑了车辆通过交叉口的总时间和车辆的加速度和通过交叉口的概率,使车辆以最大概率通过绿灯;Alsabaan 等^[51-54]以车辆通过交叉口的油耗和排放为目标优化函数计算车辆最佳速度,使车辆以不停车、平缓加/减/速方式通过交叉口;廖若桦^[55]以低油耗为优化目标,构建了车路协同环境下信号交叉口车队协同生态驾驶模型,研究结果表明,该模型可有效降低车队通过交叉口的平均油耗和停车次数。

信号灯-车辆协同控制方法也是该领域的研究热点,即通过车辆轨迹时空和信号配时关系推导车辆纵向控制曲线,根据车辆到达时间优化绿灯配时,间接引导车辆前行^[56]。Tong 等^[57]提出了一种针

对信号交叉口过饱和流量的随机规划模型,通过动态调整信号灯的配时方法达到最小化期望车辆延时的目的;Yu等^[58]提出了网联车辆轨迹规划与信号灯配时的混合整数线性规划方法,试验结果表明,该方法能降低车辆排放和怠速等待时间。

目前,EAD研究主要针对信号交叉口直行车道,少有研究针对转向-直行共用车道和U形掉头车道等交通场景的CAV生态驾驶策略;少有文献研究驾驶人反应延迟和自动控制器传输延迟导致的轨迹跟踪偏离问题;交通流量增加时,拥堵和排队不可避免,少有文献研究考虑车辆排队影响的信号交叉口车辆队列通行问题。

2.2 生态协同自适应巡航控制

近年来,为了提高车辆队列的燃油效率,学者在自适应巡航控制(Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC)策略中考虑节能因素,提出了生态协同自适应巡航控制(Eco-Cooperative Adaptive Cruise Control, Eco-CACC),见图6。CAV车辆基于V2V通信与网络中其他车辆共享信息,通过自动控制调节车辆速度,将目标车辆与前车保持某个确定的跟车距离,能够将平均跟驰时间间隔从人类驾驶的1.4 s减少到CAV驾驶的0.7 s,提高了高速公路的车道容量。尤其对于重型卡车,Tsugawa等^[59]研究表明,Eco-CACC通过V2V和自动控制技术缩短了跟车距离,空气动力阻力系数更小,使重型卡车节能5%~15%。

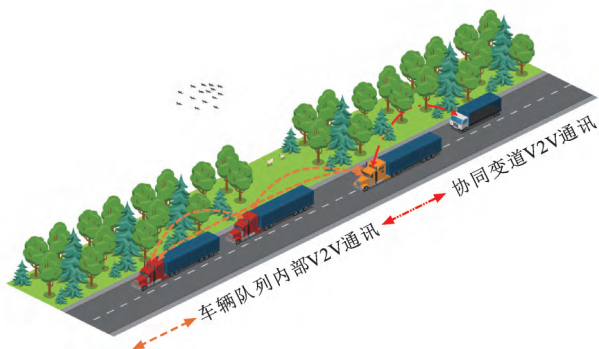


图6 重型卡车 Eco-CACC

Fig. 6 Eco-CACC for heavy trucks

Van Dehoef等^[60]为了协调一个重型卡车队列的既定行驶路线,提出了一种具有车辆动力学约束的凸优化问题,试验证明该算法可以用于规划数千辆卡车的行驶轨迹,显著节省燃料;Wang等^[61]提出了一种基于分布式一致性理论的Eco-CACC系统,在车辆动力学约束下最小化车辆队列的能源消耗和污染物排放,其核心算法为

$$\ddot{x}(t) = -[x_i(t) - x_j(t - \tau_{ij}(t)) + c_j + \dot{x}_j(t - \tau_{ij}(t)) \cdot d_{ij}b_i] - \gamma[\dot{x}_i(t) - \dot{x}_j(t - \tau_{ij}(t))] \quad (2)$$

式中: $x_i(t)$ 和 $x_j(t)$ 分别为车辆*i*和前车*j*在*t*时刻的位置; c_j 为车辆*j*的长度; $\tau_{ij}(t)$ 为车辆*i*与前车*j*之间的通信延迟; γ 为阻尼项; b_i 为车辆*i*的刹车系数; d_{ij} 为车辆*i*和前车*j*的期望间距。

式(2)主要基于车辆*i*和前车*j*的位置差和速度差计算车辆*i*的加速度,该研究采用PTV-VISSIM软件对美国加州河滨市实际交通数据进行仿真,结果表明,当CAV渗透率为100%时,可以降低7%以上的能耗和59%的污染物排放。Hao等^[62]提出了一个双层整数规划模型,用于确定最节能的车辆队列,在底层模型中制定队列连接和分离问题,找出间隙打开和闭合的最小能耗,在上层模型中优化车辆加入队列的位置,以确定最节能顺序,仿真结果表明,该方法可节省51%~77%的间隙打开和关闭消耗的能量;Turri等^[63]提出了一种双层控制结构的重型车辆队列协调控制方案,采用动态规划方法计算车辆队列的燃油最优速度分布,建立分布式模型预测控制框架,在交通安全和机动性约束下寻求最优发动机转速,使燃油消耗最小化,试验结果表明,与普通车辆队列相比,采用该方法的车辆队列可节省12%的油耗;Vajedi等^[64]提出了一种插电混合动力车辆的Eco-CACC控制器,采用非线性预测控制模型优化控制车辆速度,利用庞特里亚金最小原理求解巡航控制问题的全局最优解,模拟了爬坡和跟车等不同驾驶场景,结果表明该方法可将总能耗(燃料和电力成本)降低19%。

Eco-CACC策略也被应用于不停车通行多个信号交叉口的交通场景。Almutairi等^[65]提出了一种用于通过多个信号交叉口的Eco-CACC系统,该系统考虑了交叉口上下游信息,并利用信号灯配时和车辆动力学数据计算最优加减速和巡航速度,使车辆不停车通过信号交叉口,结果表明,在CAV 100%渗透率情况下,Eco-CACC系统减少了13.8%燃料消耗;Yang等^[66]考虑周围交通情况,基于V2I通信提出了Eco-CACC方法,为每个交叉口上、下游车辆提供了速度建议,优化了信号交叉口区域的燃油消耗。

上述大部分研究仅考虑单个车辆队列,实际中大规模车辆被分成一系列沿路行驶的车辆队列,在这种情况下,不仅要求同一队列内的车辆协同驾驶,还应考虑不同排车辆队列的协同、避撞等问题。车辆间的通信损耗、延迟、安全问题等均会影响Eco-

CACC 的性能,因此,通信拓扑、传输时延、通信失效与道路物理环境变化等多对排队列 Eco-CACC 的影响还有待探讨。

2.3 匝道合流区生态协同控制

在高速公路匝道合流区域,匝道车辆需要汇入主流车流,不可避免地会影响主路段和匝道交通流的稳定性,引发合流区的交通混乱,因此,高速公路匝道合流区车辆协同控制问题一直是学术研究的热点之一。如图7所示,CAV 匝道合流区生态协同合流(Eco-Ramp Merging)是利用 V2X 通信技术采集和传输合流区附近车辆位置、速度等信息,计算并预测主路和匝道车辆到达合流区会引发的安全冲突和干扰,通过控制协调算法提前调整主路或匝道车辆的驾驶行为,提高车辆安全性、能源效率和通行效率。

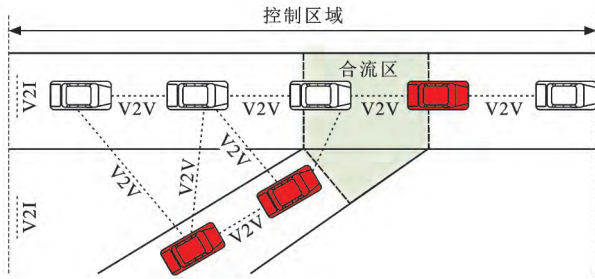


图7 单匝道合流区 CAV 合流

Fig.7 Eco-ramp merging in single ramp

匝道合流区生态协同控制方法根据控制策略可分为2类:集中式方法和分布式方法。集中式方法是任务和控制命令由路边路侧设施和交通管理部门全局管理。系统中每个 CAV 不具有全局信息,也不能在本地消耗大量计算能力和较长计算时间。在集中式方法中,任务和控制命令通过集中控制器的不同层控制器来执行。Schmidt 等^[67]由非线性系统动力学行为观察提出了基于启发式规则的双层协调系统,上层负责顺序控制,下层负责车辆的运动控制;Rios-Torres 等^[68-69]提出了一种 CAV 车辆加速曲线在线优化框架,即

$$F = \min_{u_i} \frac{1}{2} \int_{t_i}^{T_i} u_i^2 dt \quad u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max} \quad (3)$$

式中: F 为目标函数; u_i 为车辆 i 的加速度; u_{\min} 和 u_{\max} 分别为车辆的最小和最大加速度; t_i 和 T_i 分别为车辆 i 进入控制区域的时间和离开合流区的时间。

该方法在匝道合流区域协调车辆,使其不停车合并,可降低合流区车辆 50% 的油耗。Awal 等^[70]提出了减少匝道处合流时间的优化问题,减少了合流区瓶颈;Jing 等^[71]提出了一种基于博弈论的合流区最优合流序列与优化纵向轨迹控制策略,减少了

合流区车辆燃油消耗;Xie 等^[72]将此问题转化为非线性优化问题,在 VISSIM 中采用 MATLAB 和 Car2X 模块进行仿真评估;王东柱等^[73]针对合流区存在的安全事故隐患,通过车路协同和提示屏实时对合流区车辆发布安全控制预警。

在分布式方法中,CAV 车辆间通过 V2V 进行局部协同决策,与集中式方法相比,该方法具有通信需求低、可扩展性高等优点。Uno 等^[74]提出了虚拟匝道车辆协同方法,在实际匝道合流前将虚拟车辆映射到高速公路主干道上,使车辆能够更安全、平稳地合流;Lu 等^[75]应用类似的思想,针对2种不同道路几何布局描述合流问题,提出了一种闭环自适应控制方法,控制了合流 CAV 车辆的纵向速度;Zhou 等^[76]提出了一种用于匝道 CAV 协调的车辆轨迹规划方法,将匝道车辆和主干线车辆的规划任务看作2个相关的分布式优化问题来制定 CAV 车辆轨迹;Wang 等^[77]基于 Agent 方法,在 Unity3D 中对 CAV 匝道协调系统进行建模和仿真,并将其与驾驶人在环仿真结果进行对比,以评估其在移动性和燃油消耗方面的优势;张存保等^[78]基于 V2V 和 V2I 实时获取车辆运行状态,建立了高速公路入口匝道车辆引导方法和模型,提高了匝道的通行效率和稳定性。

目前,合流区车辆协同控制场景主要是针对双车道场景的车辆纵向控制,未考虑合流过程中的车道变化、混合交通条件下的 CAV 与人类驾驶车辆的协同,尤其是未充分研究多车道场景下的车辆横向控制。多车道合流是实际中更常见的一种合流场景,需进一步研究如何利用多车道特征控制车辆纵横向协同,提升多车道合流的交通效率,降低车辆燃油消耗。

2.4 生态协同换道轨迹规划

生态协同换道轨迹规划(Eco-Cooperative Lane-Changing Trajectory Planning)是在 CAV 决定换道后以单车道或相邻两车道为规划空间,规划一个或多个参考换道轨迹,以实现驾驶安全,减少交通流扰动,减少燃油消耗,提高驾驶舒适性等多个目标(图8)。

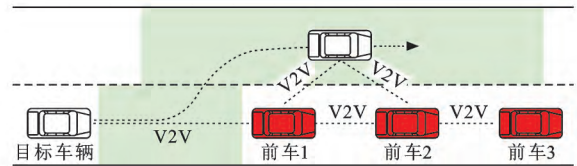


图8 CAV 车辆生态协同换道轨迹规划

Fig.8 Eco-cooperative lane-changing trajectory planning

CAV 换道轨迹规划策略大致可以分为 4 种:基于搜索的轨迹规划、基于特定函数的轨迹规划、基于人工势场的轨迹规划和基于深度学习的轨迹规划。在车速不高的情况下,基于搜索的轨迹规划是一种有效的车辆变道轨迹规划方法。Lan 等^[79]提出了一种基于快速扩展随机树的 CAV 变道轨迹规划模型,同时针对环境突变情况考虑了轨迹重新规划方法,能够实时快速地找到安全节能的换道轨迹;Yang 等^[80]基于改进 Dijkstra 算法确定了最短车辆变道规划轨迹,该方法主要用于静态环境;Ziegler 等^[81]针对 CAV 动态环境的车辆变道情况,将车道空间和时间划分为多个网格,使用 A* 算法搜索最优车辆换道轨迹曲线,提高了换道效率。

基于特定函数的轨迹规划是应用最广泛的方法,适用于移动障碍环境;Luo 等^[82]以五次多项式作为轨迹函数,将 CAV 换道问题转化为约束优化问题,建立了集安全性、舒适性、交通效率约束的成本函数,提出了一种动态换道轨迹规划和跟踪算法,可以输出正常换道、紧急换道和换道受阻后驶回原车道的行驶轨迹;Li 等^[83-84]提出了均衡计算速度和质量的兩阶段 CAV 多车协同换道方法,并提出了基于增量约束动态优化的 CAV 换道运动规划计算框架,提高了 CAV 多车协同换道的安全性和效率。

人工势场法通过为障碍物、道路结构和目标点分配合理的势场函数,规划车辆的换道轨迹。Huang 等^[85]利用人工势场法描述了车辆与周围环境的相互作用和协同特性,基于模型预测控制器建立了多目标多约束优化的 CAV 换道轨迹规划模型,该方法可以在复杂交通环境中实现 CAV 换道路径规划和操作过程;Xu 等^[86]采用人工势场法提出了驾驶人横向加速度决策模型,以规划换道轨迹。

基于深度学习的轨迹规划采用端到端学习方式从传感器感知信息中产生一个控制输入,集成了感知、决策和路径规划的整个过程。Hoel 等^[87]模拟训练了 Deep Q-Network 算法,以处理卡车-拖车组合的换道决策算法;Wang 等^[88]提出了一种基于强化学习的方法来训练车辆的自动换道行为,使其能在多种情况下智能换道;Liu 等^[89]提出了将元胞自动机交通流模型与 BP(Back Propagation)神经网络相结合的微观换道模型,该模型可很好地捕捉到交通流的平均速度和换道次数等重要特征。

上述换道策略中,道路几何线形只规划了直线或曲线上的变道轨迹,没有考虑多种道路线形的组合方式,这与真实交通环境并不一致。除此之外,换

道过程中需要充分考虑目标车道上车流密集导致间距狭窄的情况。

2.5 生态路由

生态路由(Eco-Routing)能够帮助驾驶人在出行前或旅途中根据道路状况和当前交通状况规划行驶路径。尤其对于电动汽车来说,其行驶里程有限,需要准确估计每条路径的能源成本,找到能源成本或环境影响最低的路线。研究结果表明,生态路由策略可以有效降低整个交通网络的燃料消耗和排放水平,与典型的行程时间最小化路由策略相比,可节省燃油消耗 3.3%~9.3%^[90]。

现有的生态路由模型按照 3 种因素分类:模型聚合级别、模型应用规模和优化目标数量^[91]。按照交通和油耗/排放模型的聚合级别可分为微观模型、宏观模型、中观模型和混合模型。微观模型用于估计交通和排放指标的高粒度空间和时间分辨率,交通流和排放/燃料微观模型很少用于大规模研究;宏观模型反映时空分辨率的水平,准确性比微观模型低;中观模型在聚集水平上介于微观模型和宏观模型之间;混合模型是对交通和排放模型使用不同级别聚合的模型。

按照模型的应用规模可分为大规模和小规模。前者是指 1 个城市或地区的中心区域,后者是指 1 段普通公路、高速公路或含有限个交叉口的区域。

按照优化目标数量划分,包括单目标优化和多目标优化。前者优化目标可以是旅行时间、距离、温室气体或氮氧化物。后者是途中可选择不同优化组合,通常会优先考虑旅行时间,其次结合 1 个或多个其他目标,如排放、距离和燃料等。由于目标之间的矛盾和复杂性,通常采用单一目标优化。

本文按照模型聚合级别、模型应用规模和优化目标数量总结了近年来部分生态路由研究,见表 2。CAV 生态路由的协同方式可分为集中式和分布式。Elbery 等^[100]提出了基于 V2I 通信的生态路由集中模型,试验证明了通信特性对该模型的影响;Houshmand 等^[101]研究了生态路由对不同拥堵水平和不同 CAV 渗透率的影响;Boriboonsomsin 等^[102]提出了一种生态路由导航系统,包括实时道路网络数据库、能源/排放运行参数集、网络路由器和用户界面,该系统可以根据旅行起点和目的地之间的最低燃料消耗或排放找到最环保的行驶路线,试验证明了生态路由的有效性和该生态路由系统的可操作性。集中式路由方式存在以下缺点:需要大量投资,系统故障高度敏感,信息与特定行程缺乏相关性,与

表 2 生态路由研究的部分案例
Tab. 2 Some cases of eco-routing research

研究者	模型聚合级别		模型应用规模	一次优化目标
	交通模型	油耗/排放模型		
Rakha 等 ^[92]	微观交通模型	微观排放模型	2 个小型案例	油耗或排放
Sun 等 ^[93]	微观交通模型	微观排放模型	20 个信号交叉口小案例	时间或效率
Bandeira 等 ^[94]	微观交通模型	微观排放模型	葡萄牙某 77 700 人口城市	排放
Tzeng 等 ^[95]	宏观交通模型	宏观交通模型	台北市城市道路	油耗和排放
Luo 等 ^[96]	宏观交通模型	微观排放模型	8 条链路的交通网络	时间或者油耗和排放
Long 等 ^[97]	中观交通模型	宏观排放模型	24 条链路的大型案例	时间和排放
Azizh 等 ^[98]	中观交通模型	宏观平均速度排放模型	2 个小型案例	时间和排放
Guo 等 ^[99]	微观模型、宏观模型	宏观排放模型	尼亚加拉地区	油耗和排放

分布式路由系统相比更新系统时复杂度较高。

CAV 渗透率提高之后,一般采用多目标分布式路由方式对交通和排放模型进行微观层次聚合,可以在大规模网络中实时运行。Alfaseeh 等^[103]提出了一种 CAV 车辆端到端动态分布式路径规划系统(End-to-End Dynamic Distributed Routing System, E2EDDRS),并在加拿大多伦多市不同条件下进行了测试;Djavadian 等^[104]验证了 E2EDDRS 系统的吞吐量、旅行时间、密度和流量的有效性,研究结果表明,在交通非常拥堵的条件下,100%渗透率下 CAV 平均行车时间减少约 18%;Tu 等^[29]从环境角度评估了 E2EDDRS 分布式动态路由系统对环境的影响,研究了不同渗透率和不同需求水平之间的关系,即高渗透率 CAV 交通网络中的总温室气体排放量较低,最优的 CAV 渗透率会随需求水平而变化。在非拥堵和高度拥堵的交通条件下,最优 CAV 渗透率是 70%,可有助于降低 5%的温室气体和 41%的氮氧化物;在拥堵交通条件下,CAV 渗透率 100%的情况下可减少 40%的总温室气体和 12%的氮氧化物。

目前,多数研究采用不同层次的交通模型和油耗模型进行聚合,如采用宏观交通模型与微观排放模型聚合、中观交通模型与宏观排放模型聚合等方式来评估某路段或区域的油耗排放程度,未考虑不同层次模型在聚合过程中由于参数间转换和近似而产生的误差问题;多数研究在路径优化问题建模过程中,1 次仅优化 1 个目标,未考虑 2 个以上目标的多目标优化问题。

3 总结与展望

3.1 总 结

(1)根据自动驾驶技术发展趋势和道路基础设

施的普及率,未来一段时间将一直处于 CAV 与人类驾驶、不同网联化智能化程度 CAV 共存的混合交通状态。目前大部分研究通常假设一些与现实不符的限定条件,如所有车辆均具有网联通信和协同驾驶功能,忽略驾驶人反应延迟和通信延迟等问题,这些假设有失偏颇,使分析结果与实际条件产生较大差异。

(2)多数研究关注于 CAV 在高速公路和城市道路单车道、双车道以及交叉口直行车道的协同生态驾驶场景,少有论文研究多辆 CAV 在多车道、交叉口左转、右转车道、U 型车道等具有较大扰动情况下的协同生态驾驶策略。

(3)受限于传感器技术、地图数据、基础设施联网以及通信技术的不成熟和不完善,现阶段 CAV 生态协同驾驶尚处于模型研究和软件仿真阶段,考虑到实际交通中多车试验的应用成本高、变量不可控和安全性等问题,真实交通场景下的模型测试与验证工作尚未进行。

3.2 展 望

(1)车辆控制方面,在尚不能实现完全自动驾驶之前,需研究人机共驾情形下驾驶人或车辆自动控制器不能完全跟踪建议速度的跟踪偏离问题。考虑对驾驶人行行为进行建模,以实时预测和补偿车辆速度的跟踪误差^[105];考虑车辆下层跟踪控制的车辆非线性动力学特性、执行器响应延迟和驱动误差等影响,研究较低级别的鲁棒跟踪控制器,提高车辆下层协同控制的鲁棒性和稳定性。

(2)车车通信方面,研究协同控制复杂交通环境下的 CAV 抗干扰问题,考虑信息传输时延、通信失效及网络基站切换等对车辆协同控制稳定性的影响,利用反馈控制提高抗干扰能力。

(3)多车协同方面,研究多辆 CAV 在多车道协

同生态驾驶的轨迹规划问题,考虑车辆队列稳定性约束条件,尤其对于 CAV 换道策略,利用多车道特征控制多辆 CAV 通过信息交互协同调整各自轨迹曲线,实现多车道流量分布均衡,降低区域车辆油耗。

(4)混合交通流场景方面,研究不同智能化网联化程度 CAV 与人类驾驶车辆、行人、自行车等共存的复杂混合交通环境生态协同驾驶轨迹规划问题,考虑混合交通流车辆空间分布的随机性、渗透率对区域交通流的影响以及驾驶人决策的交互影响。

(5)半实物仿真测试方面,以微观交通仿真软件为基础,搭建基于虚实结合的 CAV 测试平台是目前 CAV 性能测试的方法之一。已有很多高校和机构研发了相关测试平台,比如美国密歇根大学 M-city 的增强现实环境^[106]、美国加州大学河滨分校的 Dyno-in-the-Loop 测试平台^[107]、长安大学自动驾驶汽车室内快速测试平台^[108]。将复杂道路环境、交通环境、通信环境等因素纳入测试平台的虚拟场景中,验证 CAV 在不同环境和不同工况下不同驾驶策略的性能,为大范围真实交通场景下的 CAV 性能测试提供有力技术支撑。

(6)真实交通场景测试方面,目前仅有一些封闭测试场地(如美国密歇根大学 M-city、瑞典 Astazero 综合试验场、长安大学 CAVTEST 测试基地等)和具有自动驾驶测试资质的路段可以开展 CAV 实车测试,非封闭真实交通场景的基础设施建设迫在眉睫。高速公路与城市低速区作为 CAV 协同生态驾驶率先应用测试的 2 个场景,需加快建设部署各项基础设施,如交通环境监测系统、V2X 通信系统、高精度辅助定位、网联信号交叉口、地感线圈、交通标志标线等,以促进 CAV 协同生态驾驶早日落地,实现“智能的车、智慧的路”^[109-111]。

参考文献:

References:

- [1] 郑 昕, FRIDLEY D, 周 南, 等. 国际石油消费趋势与政策回顾[R]. 旧金山: 劳伦斯伯克利国家实验室, 2019.
ZHENG Xin, FRIDLEY D, ZHOU Nan, et al. Review of international oil consumption trends and policies[R]. San Francisco: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019. (in Chinese)
- [2] ERSAL T, KOLMANOVSKY I, MASOUD N, et al. Connected and automated road vehicles: state of the art and future challenges[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(5): 672-704.
- [3] GARCIA-CASTRO A, MONZON A, VALDES C, et al. Modeling different penetration rates of eco-driving in urban areas: impacts on traffic flow and emissions[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2017, 11(4): 282-294.

- [4] XU Zhi-gang, WEI Tao, EASA S, et al. Modelling relationship between truck fuel consumption and driving behavior using data from internet of vehicles[J]. Computer-Aid Civil and Infrastructure Engineering, 2018, 33: 209-219.
- [5] 付 锐, 张雅丽, 袁 伟. 生态驾驶研究现状及展望[J]. 中国公路学报, 2019, 32(3): 1-12.
FU Rui, ZHANG Ya-li, YUAN Wei. Progress and prospect in research on eco-driving[J]. China Journal of Highway Transport, 2019, 32(3): 1-12. (in Chinese)
- [6] BROOKHUIS K, DE WAARD D. Limiting speed, towards an intelligent speed adapter (ISA) [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 1999, 2(2): 81-90.
- [7] CHEN Yu-zhong, FENG Yong-qin, YIN Yan, et al. Improvement in design and manufacture of automobile based on ergonomics theory[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 505-506: 292-296.
- [8] BARKENBUS J N. Eco-driving: an overlooked climate change initiative[J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 762-769.
- [9] BARTH M, BORIBOONSOMISIN K. Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2009, 14(6): 400-410.
- [10] TAIEBAT M, BROWN A L, SAFFORD H R, et al. A review on energy, environmental, and sustainability implications of connected and automated vehicles[J]. Environmental Science and Technology, 2018, 52: 11449-11465.
- [11] 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 Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1): 1-14. (in Chinese)
- [12] PANDAZIS J. eCoMove: cooperative ITS for green mobility[C]// IEEE. 18th European Wireless Conference. New York: IEEE, 2012: 1-5.
- [13] PACHECO-TORGAL F. Eco-efficient construction and building materials research under the EU framework programme horizon 2020[J]. Construction and Building Materials, 2014, 51: 151-162.
- [14] MILLER K, DRUMWRIGHT L G, KOSTREBA A, et al. Applications for the environment: real-time information synthesis (AERIS)[R]. Washington DC: U. S. Department of Transportation, 2011.
- [15] LIU Xian-bing, YAMAMOTO R, SUK S. A survey of company's awareness and approval of market-based instruments for energy saving in Japan[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 78: 35-47.
- [16] XIA Hai-tao, BORIBOONSOMSIN K, SCHWEIZER F, et al. Field operational testing of eco-approach technology at a fixed-time signalized intersection[C]// IEEE. 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.

- New York: IEEE, 2012: 188-193.
- [17] 郭嘉文. 国家“十三五”交通领域科技创新专项规划发布[J]. 广东交通, 2017, 3: 33-34.
- GUO Jia-wen. Release of special fund for traffic scientific and technological innovation of the “national 13th five-year plan”[J]. Guangdong Transportation, 2017, 3: 33-34. (in Chinese)
- [18] 黎 丽, 谢 伟, 魏书传, 等. 中国制造 2025[J]. 金融经济, 2015(13): 10-15.
- LI Li, XIE Wei, WEI Shu-chuan, et al. Made in China 2025 strategy[J]. Financial Economy, 2015(13): 10-15. (in Chinese)
- [19] HOEKMAN S K, BROCH A, LIU Xiao-wei. Environmental implications of higher ethanol production and use in the U. S. : a literature review. Part I —impacts on water, soil, and air quality[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 3159-3177.
- [20] 毛保华, 贾顺平, 孙启鹏, 等. 不同交通方式能耗与排放因子及其可比性研究[R]. 北京: 中国综合交通研究中心, 2009.
- MAO Bao-hua, JIA Shun-ping, SUN Qi-peng. Energy consumption, emissions and their comparison among different transport modes[R]. Beijing: Integrated Transport Research Center of China, 2009. (in Chinese)
- [21] CHEN Yu-che, MEIER A. Fuel consumption impacts of auto roof racks[J]. Energy Policy, 2016, 92, 325-333.
- [22] WU Guo-yuan, BORIBOONSOMSIN K, XIA Hai-tao, et al. Supplementary benefits from partial vehicle automation in an ecoapproach and departure application at signalized intersections[J]. Transportation Research Record. 2014(2424): 66-75.
- [23] MUSLIM N H, KEYVANFAR A, SHAFAGHAT A, et al. Green driver: travel behaviors revisited on fuel saving and less emission[J]. Sustainability, 2018, 10: 1-30.
- [24] DEVLIEGER I, DE KEUKELEERE D, KRETZSCHMAR J G. Environmental effects of driving behavior and congestion related to passenger cars[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(27): 4649-4655.
- [25] ZORROFI S, FILIZADEH S, ZANETEL P. A simulation study of the impact of driving patterns and driver behavior on fuel economy of hybrid transit buses[C]//IEEE. Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference. New York: IEEE, 2009: 572-577.
- [26] JEFFREY G, MATTHEW E, WITT S. Analyzing vehicle fuel saving opportunities through intelligent driver feedback[J]. SAE International Journal of Passenger Cars, 2012, 5(2): 450-461.
- [27] SHANKAR R, MARCO J. Method for estimating the energy consumption of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles under real-world driving conditions[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2013, 7(1): 138-150.
- [28] FAGNANT D J, KOCKELMAN K. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 77: 167-181.
- [29] TU Ran, ALFASEEH L, DJAVADIAN S, et al. Quantifying the impacts of dynamic control in connected and automated vehicles on greenhouse gas emissions and urban NO₂ concentrations[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 73: 142-151.
- [30] RIOS-TORRES J, MALIKOPOULOS A A. Impact of partial penetrations of connected and automated vehicles on fuel consumption and traffic flow [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2018; 3(4): 453-462.
- [31] SCHITO P, BRAGHIN F. Numerical and experimental investigation on vehicles in platoon[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2012, 5(1): 63-71.
- [32] 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.
- [33] TIAN Dan-yang, WU Guo-yuan, BORIBOONSOMSIN K, et al. Performance measurement evaluation framework and co-benefit/tradeoff analysis for connected and automated vehicles (CAV) applications: a survey[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2018, 10(3): 110-122.
- [34] ASADI B, VAHIDI A. Predictive cruise control: utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 707-714.
- [35] HOMCHAUDHURI B, VAHIDI A, PISU P, et al. Fast model predictive control-based fuel efficient control strategy for a group of connected vehicles in urban road conditions[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(2): 760-767.
- [36] HOMCHAUDHURI B, VAHIDI A, PISU P. A fuel economic model predictive control strategy for a group of connected vehicles in urban roads[C]//IEEE. Proceedings of the American Control Conference. New York: IEEE, 2015: 2741-2746.
- [37] RAKHA H, KAMALANATHSHARMA R K. Eco-driving at signalized intersections using V2I communication[C]//IEEE. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2011: 341-346.
- [38] ALA M V, YANG Hao, RAKHA H. Modeling evaluation of eco-cooperative adaptive cruise control in vicinity of signalized intersections[J]. Transportation Research Record, 2016(2559): 108-119.
- [39] YANG Hao, RAKHA H, ALA M V. Eco-cooperative adaptive cruise control at signalized intersections considering queue effects[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(6): 1575-1585.
- [40] BARTH M, MANDAVA S, BORIBOONSOMSIN K, et al. Dynamic eco-driving for arterial corridors[C]//IEEE. 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems. New York: IEEE, 2011: 182-188.
- [41] YE Fei, HAO Peng, QI Xue-wei, et al. Prediction-based eco-

- approach and departure at signalized intersections with speed forecasting on preceding vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(4): 1378-1389.
- [42] ALTAN O D, WU Guo-yuan, BARTH M J, et al. Glide path: eco-friendly automated approach and departure at signalized intersections[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(4): 266-277.
- [43] 王建强,王海鹏,刘佳熙,等. 基于车路一体化的交叉口车辆驾驶辅助系统[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 169-175, 183. WANG Jian-qiang, WANG Hai-peng, LIU Jia-xi, et al. Intersection vehicle driving assistance system based on vehicle-to-infrastructure communication[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 169-175, 183. (in Chinese)
- [44] XU Biao, ZHANG Fang, WANG Jian-qiang, et al. B&B algorithm-based green light optimal speed advisory applied to contiguous intersections[C]//COTA. International Conference of Transportation Professional. Beijing: COTA, 2015: 363-375.
- [45] 徐彪,张放,王建强. 连续交叉路口通行辅助系统[J]. 汽车工程, 2016, 38(11): 1344-1350. XU Biao, ZHANG Fang, WANG Jian-qiang. An assistance system for crossing successive intersections[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(11): 1344-1350. (in Chinese)
- [46] 赵贺锋. 车路协作式交叉口车速引导技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017. ZHAO He-feng. Research on speed guidance technology of cooperative vehicle infrastructure system intersection [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [47] 靳秋思,宋国华,叶蒙蒙,等. 车辆通过交叉口的生态驾驶轨迹优化研究[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(3): 75-82. JIN Qiu-si, SONG Guo-hua, YE Meng-meng, et al. Optimization of eco-driving trajectories at intersections for energy saving and emission reduction[J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(3): 75-82. (in Chinese)
- [48] FANG Shan, YANG Lan, WANG Tian-qi, et al. Trajectory planning method for mixed vehicles considering traffic stability and fuel consumption at the signalized intersection[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 11: 1-10.
- [49] SEREDYNSKI M, MAZURCZYK W, KHADRAOUI D. Multi-segment green light optimal speed advisory[C]//IEEE. IEEE 27th International Symposium on Parallel and Distributed Processing Workshops and PhD Forum. New York: IEEE, 2013: 459-465.
- [50] MAHLER G, VAHIDI A. An optimal velocity-planning scheme for vehicle energy efficiency through probabilistic prediction of traffic-signal timing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(6): 2516-2523.
- [51] ALSABAAN M, NAIK K, KHALIFA T. Optimization of fuel cost and emissions using V2V communication[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(3): 1449-1461.
- [52] LI Jin-jian, DRIDI M, EL-MOUDNI A. Multi-vehicles green light optimal speed advisory based on the augmented lagrangian genetic algorithm[C]//IEEE. 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2014: 2434-2439.
- [53] HE Xiao-zheng, LIU H X, LIU Xiao-bo. Optimal vehicle speed trajectory on a signalized arterial with consideration of queue[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 61: 106-120.
- [54] WAN Nian-feng, VAHIDI A, LUCKOW A. Optimal speed advisory for connected vehicles in arterial roads and the impact on mixed traffic[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 69: 548-563.
- [55] 廖若桦. 车路协同环境下信号交叉口车队生态驾驶研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018. LIAO Ruo-hua. Eco-driving of vehicle platoons in cooperative vehicle-infrastructure system at signalized intersections[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [56] XIA H, BORIBOONSOMSIN K, BARTH M. Dynamic eco-driving for signalized arterial corridors and its indirect network-wide energy/emissions benefits[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2013, 17(1): 31-41.
- [57] TONG Yue, ZHAO Lei, LI Li, et al. Stochastic programming model for oversaturated intersection signal timing[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 58: 474-486.
- [58] YU Chun-hui, FENG Yi-heng, LIU H X, et al. Integrated optimization of traffic signals and vehicle trajectories at isolated urban intersections[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 112: 89-112.
- [59] TSUGAWA S, JESCHKE S, SHLADOVER S E. A review of truck platooning projects for energy savings[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(1): 68-77.
- [60] VAN DEHOEF S, JOHANSSON K H, DIMAROGONAS D V. Fuel efficient en route formation of truck platoons[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(1): 102-112.
- [61] WANG Zi-ran, WU Guo-yuan, BARTH M J. Cooperative eco-driving at signalized intersections in a partially connected and automated vehicle environment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(5): 2029-2038.
- [62] HAO Peng, WANG Zi-ran, WU Guo-yuan, et al. Intra-platoon vehicle sequence optimization for eco-cooperative adaptive cruise control[C]//IEEE. IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2017: 1-6.
- [63] TURRI V, BESSELINK B, JOHANSSON K H. Cooperative look-ahead control for fuel-efficient and safe heavy-duty vehicle platooning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(1): 12-28.
- [64] VAJEDI M, AZAD N L. Ecological adaptive cruise controller for plug-in hybrid electric vehicles using nonlinear model predictive control[J]. IEEE Transactions on Intelligent

- Transportation Systems, 2016, 17(1): 113-122.
- [65] ALMUTAIRI F, YANG Hao, RAKHA H. Eco-cooperative adaptive cruise control at multiple signalized intersections; network-wide evaluation and sensitivity analysis[C]//IEEE. 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS). New York: IEEE, 2017: 520-525.
- [66] YANG Hao, ALMUTAIRI F, ALA M V. Eco-cooperative adaptive cruise control at multiple signalized intersections[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(6): 1575-1585.
- [67] SCHMIDT G K, POSCH B. A two-layer control scheme for merging of automated vehicles[C]//IEEE. The 22nd IEEE Conference on Decision and Control. New York: IEEE, 1983: 495-500.
- [68] RIOS-TORRES J, MALIKOPOULOS A A, PISU P. Online optimal control of connected vehicles for efficient traffic flow at merging roads[C]//IEEE. IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2015: 2432-2437.
- [69] RIOS-TORRES J, MALIKOPOULOS A A. Automated and cooperative vehicle merging at highway on-ramps[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(4): 780-789.
- [70] AWAL T, KULIK L, RAMAMOHANRAO K. Optimal traffic merging strategy for communication - and sensor-enabled vehicles[C]//IEEE. 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2013: 1468-1474.
- [71] JING Shou-cai, HUI Fei, ZHAO Xiang-mo, et al. Cooperative game approach to optimal merging sequence and on-ramp merging control of connected and automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(11): 4234-4244.
- [72] XIE Yuan-chang, ZHANG Hui-xing, GARTNER N H, et al. Collaborative merging strategy for freeway ramp operations in a connected and autonomous vehicles environment[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, 21(2): 136-147.
- [73] 王东柱,陈艳艳,马建明.车联网环境下的高速公路合流区协调控制方法及效果评价[J].公路交通科技,2016,33(9):99-105.
- WANG Dong-zhu, CHEN Yan-yan, MA Jian-ming. A method for coordinated controlling vehicles in expressway merge area in connected vehicles environment and evaluation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(9): 99-105. (in Chinese)
- [74] UNO A, SAKAGUCHI T, TSUGAWA S. A merging control algorithm based on inter-vehicle communication[C]//IEEE. Proceedings of IEEE/IEEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 1999: 783-787.
- [75] LU Xiao-yun, HEDRICK K J. Longitudinal control algorithm for automated vehicle merging[C]//IEEE. Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. New York: IEEE, 2000: 450-455.
- [76] ZHOU Yu, CHOLETTE M E, BHASKAR A, et al. Optimal vehicle trajectory planning with control constraints and recursive implementation for automated on-ramp merging[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 20(9): 1-12.
- [77] WANG Zi-ran, WU Guo-yuan, BORIBOONSOMSIN K, et al. Cooperative ramp merging system: agent-based modeling and simulation using game engine[J]. SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles, 2019, 2(2): 115-128.
- [78] 张存保,李劲松,黄传明,等.基于车路协同的高速公路入口匝道车辆汇入引导方法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2017,41(4):537-542.
- ZHANG Cun-bao, LI Jin-song, HUANG Chuan-ming, et al. The method of vehicle merging guidance at freeway on-ramp based on cooperative vehicle infrastructure system[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2017, 41(4): 537-542. (in Chinese)
- [79] LAN Xiao-dong, CAIRANO S D. Continuous curvature path planning for semi-autonomous vehicle maneuvers using RRT[C]//IEEE. 2015 European Control Conference (ECC). New York: IEEE, 2015: 2360-2365.
- [80] YANG I, KIM H J, JEON W H, et al. Development of realistic shortest path algorithm considering lane changes[J]. Journal of Advanced Transportation, 2016, 50(4): 541-551.
- [81] ZIEGLER J, STILLER C. Spatiotemporal state lattices for fast trajectory planning in dynamic on-road driving scenarios[J]. Intelligent Robots and Systems, 2009, 5: 1879-1884.
- [82] LUO Yu-gong, XIANG Yong, CAO Kun, et al. A dynamic automated lane change maneuver based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 62: 87-102.
- [83] LI Bai, ZHANG You-min, FENG Yi-heng, et al. Balancing computation speed and quality: a decentralized motion planning method for cooperative lane changes of connected and automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2018, 3 (3), 340-350.
- [84] LI Bai, JIA Ning, LI Pu, et al. Incrementally constrained dynamic optimization: a computational framework for lane change motion planning of connected and automated vehicles[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2019, 23(6): 1-12.
- [85] HUANG Zi-chao, WU Qing-qing, MA Jie, et al. An APF and MPC combined collaborative driving controller using vehicular communication technologies[J]. Chaos Solitons and Fractals, 2016, 89: 232-242.
- [86] XU Guo-qing, LIU Li, OU Yong-sheng, et al. Dynamic modeling of driver control strategy of lane-change behavior and trajectory planning for collision prediction [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2012, 13(3): 1138-1155.
- [87] HOEL C J, WOL K, LAINE L. Automated speed and lane

- change decision making using deep reinforcement learning[C]//IEEE. IEEE 21th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE, 2018; 2148-2155.
- [88] WANG Pin, CHAN C Y, DE LA FORTELLE A. A reinforcement learning based approach for automated lane change maneuvers[C]//IEEE. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2018; 1379-1384.
- [89] LIU Mei, SHI Jing. A cellular automata traffic flow model combined with a BP neural network based microscopic lane changing decision model[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2019, 23(4): 309-318.
- [90] AHN K, RAKHA H A. Network-wide impacts of eco-routing strategies: a large-scale case study[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2013, 25: 119-130.
- [91] ALFASEEH L, FAROOQ B. Multi-factor taxonomy of eco-routing models and future outlook[J]. Journal of Sensors, 2020, 3: 1-10.
- [92] RAKHA H A, AHN K, MORAN K. Integration framework for modeling eco-routing strategies: logic and preliminary results[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2012, 1(3): 259-274.
- [93] SUN Jie, LIU H X. Stochastic eco-routing in a signalized traffic network[J]. Transportation Research Procedia, 2015, 7: 110-128.
- [94] BANDEIRA J M, FERNANDES P, FONTES T, et al. Exploring multiple eco-routing guidance strategies in a commuting corridor[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2018, 12(1): 53-65.
- [95] TZENG G H, CHEN C H. Multi objective decision making for traffic assignment[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 1993, 40(2): 180-187.
- [96] LUO Li-hua, GE Ying-en, ZHANG Fang-wei, et al. Real-time route diversion control in a model predictive control framework with multiple objectives: traffic efficiency, emission reduction and fuel economy[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, 48: 332-356.
- [97] LONG Jian-cheng, CHEN Jia-xu, SZETO W Y, et al. Link-based system optimum dynamic traffic assignment problems with environmental objectives[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 60: 56-75.
- [98] AZIZH M A, UKKUSURI S V. Integration of environmental objectives in a system optimal dynamic traffic assignment model[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2012, 27(7): 494-511.
- [99] GUO Li-ya, HUANG Shan, SADEK A W. an evaluation of environmental benefits of time-dependent green routing in the greater Buffalo-Niagara region[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2013, 17(1): 18-30.
- [100] ELBERY A, RAKHA H, EL-NAINAY M, et al. Eco-routing using V2I communication: system evaluation[C]//IEEE. IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2015; 71-76.
- [101] HOUSHMAND A, WOLLENSTEIN-BETECH S, CASSANDRAS C G. The penetration rate effect of connected and automated vehicles in mixed traffic routing[C]//IEEE. 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). New York: IEEE, 1755-1760.
- [102] BORIBOONSOMSIN K, BARTH M J, ZHU Wei-hua, et al. Eco-routing navigation system based on multisource historical and real-time traffic information[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(4): 1694-1704.
- [103] ALFASEEH L, DJAVADIAN S, FAROOQ B. Impact of distributed routing of intelligent vehicles on urban traffic[C]//IEEE. 2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2). New York: IEEE, 2018; 1-7.
- [104] DJAVADIAN S, FAROOQ B. Distributed dynamic routing using network of intelligent intersections[C]//IEEE. ITS Canada ACGM. New York: IEEE, 2018; 56-63.
- [105] WANG Zi-ran, LIAO Xi-shun, WANG Chao, et al. Driver behavior modeling using game engine and real vehicle: a learning-based approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 1: 1-12.
- [106] FENG Yi-heng, YU Chun-hui, XU Shao-bing, et al. An augmented reality environment for connected and automated vehicle testing and evaluation[C]//IEEE. IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2018; 1549-1554.
- [107] WU Guo-yuan, BROWN D, ZHAO Zhuo-qiao, et al. Dyno-in-the-loop: an innovative hardware-in-the-loop development and testing platform for emerging mobility technologies[J]. SAE Technical Paper, 2020, 1: 1-10.
- [108] 赵祥模, 承靖钧, 徐志刚, 等. 基于整车在环仿真的自动驾驶汽车室内快速测试平台[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 124-136.
- ZHAO Xiang-mo, CHENG Jing-jun, XU Zhi-gang, et al. An indoor rapid-testing platform for autonomous vehicle based on vehicle-in-the-loop simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 124-136. (in Chinese)
- [109] 徐志刚, 李金龙, 赵祥模, 等. 智能公路发展现状与关键技术[J]. 中国公路学报, 2019, 32(8): 1-24.
- XU Zhi-gang, LI Jin-long, ZHAO Xiang-mo, et al. A review on intelligent road and its related key technologies[J]. China Journal of Highway Transport, 2019, 32(8): 1-24. (in Chinese)
- [110] 吴 兵, 王文璇, 李林波, 等. 多前车影响的智能网联车辆纵向控制模型[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 184-194.
- WU Bing, WANG Wen-xuan, LI Lin-bo, et al. Longitudinal control model for connected autonomous vehicles influenced by multiple preceding vehicles [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2): 184-194. (in Chinese)
- [111] ELLIOTT D, KEEN W, MIAO Lei. Recent advances in connected and automated vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2019, 6(2): 109-131.