

基于车路协同的智能驾驶研究综述

张云顺^{1,2} 华国栋¹ 李宁¹ 梁军² 谢铨帅² 郜铭磊²

(1. 江苏智行未来汽车研究院有限公司, 南京 211111; 2. 江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013)

【欢迎引用】张云顺, 华国栋, 李宁, 等. 基于车路协同的智能驾驶研究综述[J]. 汽车文摘, 2022(6): 49-57.

【Cite this paper】ZHANG Y S, HUA G D, LI N, et al. A Review of Research on Intelligent Driving Based on Vehicle-Road Collaboration[J]. Automotive Digest, 2022(6): 49-57.

【摘要】为了缓解日益增长的汽车保有量造成的交通事故多发, 国外提出了基于环境感知为主的单车智能化方案, 国内单车智能化研究的时间短, 而且道路环境复杂多变, 主要侧重于路侧基础设施智能化为主的车路协同方案。基于以上背景, 首先简要叙述了近几年车路协同的发展路径, 然后重点从智能网联汽车、车路协同关键技术、车路协同应用场景这3个方面详细叙述了国内外的研究进展, 并总结了研究的不足之处。其次阐述了现有技术存在的问题、瓶颈, 探讨了相应的解决方案, 最后展望了车路协同未来的发展方向。

主题词: 单车智能 路侧基础设施智能化 车路协同 智能网联车辆 应用场景

中图分类号: U495 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20210261

A Review of Research on Intelligent Driving Based on Vehicle-Road Collaboration

Zhang Yunshun^{1,2}, Hua Guodong¹, Li Ning¹, Liang Jun², Xie Qishuai², Gao Minglei²

(1. Jiangsu Smart Travel Future Automobile Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211111; 2. Automobile Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

【Abstract】To mitigate frequent increasingly traffic accidents due to the growing car ownership, foreign countries have proposed intelligent solutions for single vehicle based on environmental perception, while in domestic the time of researching on single vehicle intelligence is short and the road environment is complex as well as changeable, mainly focusing on vehicle-road collaboration solutions based on roadside infrastructure intelligence. Against the above background, firstly, the development path of vehicle-road collaboration in recent years is briefly described. Then from 3 aspects containing intelligent networked vehicles, key technologies of vehicle-road collaboration and application scenarios of vehicle-road collaboration, the research progress at home and abroad is described in detail, in addition, the shortcomings of research are summarized. Secondly, the problems and bottlenecks of existing technologies are explained, in the meanwhile, the corresponding solutions are discussed. Finally, the future development direction of vehicle-road collaboration is prospected.

Key words: Single vehicle intelligence, Roadside infrastructure intelligence, Vehicle-road collaboration, Intelligent and networked vehicle, Application scenario

缩略语		PVRCNN	Point Voxel Region Convolutional Neural Network
ICV	Intelligent Connected Vehicles	EALNS	Extended Adaptive Large Neighborhood Search
V2I	Vehicle to Infrastructure	C-V2X	Cellular Vehicle to Everything
RSU	Road Side Unit	LTE	Long Term Evolution
OBU	On Board Unit	5G	The 5th Generation Mobile Communication Technology
RGB	Red, Green, Blue		
V2V	Vehicle to Vehicle		

PC5	ProSe Communication Technology
RCU	Roadside Communication Unit
VNT	Vehicle Networking Terminal
NR	New Radio
CCAC	Cooperative Adaptive Cruise Control
PID	Proportion Integral Derivative
LGBM	Light Gradient Boosting Machine
CIDAS	China In-Depth Accident Study

1 引言

2016年百度最早布局车路协同的全栈研发,经过5年的摸索,车路协同技术得到了快速的发展。地方政府也投入了大量的资金来扶持车路协同方案,全国至今已建成4个国家级车联网先导区,包括江苏(无锡)车联网先导区、湖南(长沙)车联网先导区、天津(西青)车联网先导区和重庆(2江新区)车联网先导区,工信部对4家车联网先导区指定的任务目标基础一致,只存在细微差异。具体任务是,江苏(无锡)主要是路端建设方面的探索,天津(西青)主要是标准认证以及评价体系建设方面的探索,湖南(长沙)主要是场景创新和运营模式方面的探索,重庆(2江新区)主要是山地特色车路协同应用场景的研究^[1]。随着车路协同方案的演进,出现了多方面的问题,一些企业虽具备了场景搭建的能力,但是对实际的测试流程存在着争议;同时在车路协同技术实际应用过程中,最终结果与期望存在着较大的差距,比如烟台公安局发布了多源感知应用测试效果的报告,报告中指出以下4点不足:

(1)雷达视频融合效果有待提高,实际场景下经常发现多目标或少目标的情况;

(2)雷达对静止目标探测能力不足,排队数据可靠性一般,直接利用雷达排队数据做信号控制风险就很大;

(3)方案缺少对冗余安全性的考虑,要保证系统的可靠性,更要保证鲁棒性;

(4)系统配置比较繁琐,测试系统都必须厂家原厂人员配置才能完成。

以车路协同产业化发展为落脚点,现阶段车路协同的实际应用还处在初始阶段,但是近几年国内外学者对车路协同展开了深入的研究,大致可以分为智能网联汽车的研究^[2-11],车路协同关键技术的研究^[12-66],车路协同应用场景的研究^[67-74]。车路协同研究内容如图1所示。

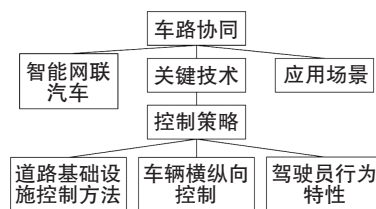


图1 车路协同研究内容概述

全文的内容布局如下:

第1章从产业和学术的角度分析了车路协同的发展路径,指出了现阶段国内外学者针对车路协同系统3个个方面的研究内容;

第2章分别详细介绍了智能网联汽车、车路协同关键技术、车路协同测试场景、这3个研究方向,并且提出了研究的不足之处;

第3章阐述了现有技术存在的问题、瓶颈,探讨了相应的解决方案;

第4章首先对全文做了总结,其次展望了车路协同未来的发展方向。

2 车路协同的研究内容

2.1 智能网联汽车

智能网联汽车技术能提升交通安全与效率,但也面临着来自真实交通环境的复杂挑战。清华大学崔明阳等^[3]提出基于智能网联汽车架构、功能与应用3方面关键技术,对用于单车自主式驾驶与网联协同式驾驶的智能网联汽车研究进行分析。网联化、智能化和电气化是提高未来交通效率和减少公路能源消耗的3大支柱。同济大学洪金龙等^[4]针对人-车-路-云多源异构环境下车辆行为协同节能关键科学问题,从经济驾驶、多车协同节能、道路交叉口车路协同节能和车云协同节能等方面详细介绍研究现状,并进一步介绍电气化高速公路系统E-Highway的前瞻性研究,说明融合智能化信息的E-Highway节能潜力和智能重型商用车协同节能的未来发展趋势。清华大学YANG等^[5]回顾了智能网联汽车(Intelligent Connected Vehicles, ICVs)的历史和发展历程,介绍了电气/电子结构、传感器和执行器的最新技术进展,重点介绍了决策中的算法。中国智能互联汽车(北京)研究院有限公司FENG等^[6]介绍了智能网联车辆的测试系统,测试内容包括自动驾驶计算平台测试、感知系统测试、网络连接与信息安全测试、人机界面与工效学评估、道路测试,涵盖了自动驾驶功能、安全性、舒适性和可靠性。因此,目前智能网联汽车研究集中在关键技术的研究,对于技术的可靠性,实用性缺乏实际应用测试。

智能网联汽车的发展路径最终是为了实现智能化与网联化相融合,也就是车路协同最终的目标是弥补单车智能感知的缺陷,降低自动驾驶的成本和减少安全隐患。北京交通大学白正伟^[7]实现了网联自动驾驶车辆在信号交叉口环境下的混合强化学习控制决策方法,构建了异构交通开放道路及信号交叉口道路环境,并验证了模型的有效性。同样,厦门理工学院王晖年^[9]提出了基于网联交叉口下自动驾驶车辆生态驾驶的车速控制策略,并在底盘测功机上完成了实车试验,试验结果表明该方案有效降低了车辆通过信号交叉口时的能耗排放。基于车路协同的自动驾驶是中国方案的最终目标,但现阶段的首要任务是基于车路协同的有人驾驶车辆、自动驾驶车辆以及普通车之间的博弈,很有必要对不同混合系数的车流进行仿真实验,为车路协同的有人驾驶车辆和自动驾驶车辆的试运行做好前期准备。DUAN等^[10]提出了环境感知框架 RGB-PVRCNN,利用 V2I 通信技术提高了十字路口无人驾驶汽车的环境意识,测试结果表明该方法可以有效地扩展自动驾驶车辆在交叉口的环境感知能力和行驶距离,在检测精度上优于 PointPillar 算法和 VoxelRCNN 算法。新加坡国立大学 KIM 等^[11]提利用镜像神经元激发的意图意识和合作感知的合作自动驾驶的概念,以及提出了一种基于镜像神经元的意图感知算法。车路协同的最终目标是实现自动驾驶,但是现阶段的车路协同处在辅助驾驶的阶段,而自动驾驶还处在单车智能的阶段,2者的融合、去冗余是今后的目标之一。

2.2 车路协同关键技术

车路协同基础设施组成架构如图2所示。智能道路设施包括交通信号灯、道路融合感知系统、微环境气象站、电子交通标志牌以及交通诱导屏。交通信号灯能够根据车流量科学调整信号切换时间,支持与路侧通信单元和平台进行通信,交通信号清晰且易于识别,提供冗余方案,针对宕机有完备的解决机制。道路融合感知系统采用视频检测、激光雷达、毫米波雷达等多种技术的融合感知方式,实时感知路况信息,交通参与者信息,适应不同的道路应用场景、时间段和气象环境;将道路感知数据进行融合处理后提供给路侧通信单元、边缘侧或云平台完成协同计算,向社会车辆提供交通信息服务。微环境气象站采集不同地理位置的气候变化数据,感知天气变化情况并发出告警,提出微环境气象影响区域的行驶建议。车联通信网络包括蜂窝车联网、路侧通信单元、车联网终端、5.9G 直连通信网、LTE 移动通信网、5G 移动通信网和

边缘计算组成。蜂窝通信网络由 RCU、VNT、边缘计算等设备设施组成,提供车-路、车-人、车-车、车-云之间的低时延、高可靠性、高安全性、高并发性的数据通信。路侧通信单元安装在路侧,与 VNT 车载终端进行通讯,采用有线、无线接入方式,支持加密通信,灵活连接交通信号机、交通电子标志牌、道路融合传感等道路设施。通过向汽车提供实时路况信息等服务,改善汽车驾驶和交通管理的安全性和效率。车联网终端通过远程移动通讯、高精度卫星定位、加速度传感功能,接收路侧通信单元或云平台发送的交通预警信息,并通过文字、图像和语音的方式,提示车辆驾驶员改进驾驶行为,降低交通事故发生率,提升道路通行率。5.9G 直连通信网采取专网通信组网方式,为车辆之间、车辆与交通基础设施之间提供低时延、高可靠、高密度的直连通信模式,保障各交通参与方之间进行有效的信息互通。LTE 移动通信网为第四代移动通信及其技术,分为两种双工模式,分别为 FDD LTE 和 TDD LTE, LTE 显著增加了频谱效率和数据传输速率,峰值速率能够达到上行 50 Mbps,下行 100 Mbps。5G 移动通信网为新一代蜂窝移动通信技术,实现网络架构扁平化、基站小型化,比 LTE/LTE 的峰值传输速率快 100 倍,具备超大带宽、超低时延、超高容量、超密站点、超可靠性的特点。边缘计算基于移动通信网络的全新分布式计算方式,构建在无线接入网的云服务环境,通过使特定网络应用服务功能脱离核心网络,实现节省成本,降低时延和往返时间,优化传输流量,增强物理安全和缓存效率等目标。

现阶段车路协同关键技术主要是基于雷视一体技术以及高精度定位等实现主动安全预警的功能,而对于智能网联汽车的信息交互还处在仿真模拟阶段,而且 RSU 与 OBU 之间的通信方式都用的是第 4 代通信技术(The 4th Generation Mobile Communication, 4G),采用第五代通信技术的芯片还处在研发阶段。南京邮电大学李远程^[12]针对 4G+网络 and GPS 的智能车路协同系统中通信以及定位的关键技术进行了研究,并对网络部署以及提升网络性能提出了策略建议。同样,姚海敏等^[16]从高精度地图及多传感器融合定位展开对车路协同应用实践的研究,综合场端及车端感知与定位技术,搭建融合感知平台,实现对园区道路、停车场场景可视化以及管控逻辑。毫米波雷达在车路协同系统中起着至关重要的作用,李原^[18]基于毫米波雷达感知技术搭建了交叉路口、高速/快速路、停车场 3 种典型场景下的车路协同框架,毫米波雷达在测距、测

速、目标识别、交通计数方面能有效提升交通管理水平、提高交通效率、保障交通安全。为了解决传统的云计算耗时、耗能的问题,大连理工大学胡芳亿^[20]对车路协同边缘云计算任务卸载问题进行了研究,通过仿真对比广义 Benders 分解算法和提出的 EALNS 算法的能耗优化对比,验证了 EALNS 算法的有效性。大部分车路协同关键技术的研究还处在仿真模拟阶段,且文献中所述的关键技术往往是超前的,很有必要说明在实际测试中所用到的关键技术的创新与缺陷。大唐电信科技产业集团 CHEN 等^[23]介绍了 C-V2X 的基础道路安全和高级应用需求、体系结构、关键技术和标准,突出了从 LTE-V2X 到 NR-V2X 的技术演进路径,最后介绍了国内的相关进展,展望了发展趋势。车路协同其中

一项关键技术是车内标志显示。东京大学中野研究室YANG等^[24-27]基于车内信号灯显示展开了一系列的研究。对于车内信号灯显示,YANG等比较了车内信号显示的2种方式,普通4.3英寸显示器和平视显示器对驾驶员行为的影响,最终得出驾驶员在平视显示的情况下的扫视时间明显短于正常显示的情况^[24]。YANG等随后又研究了基于车内信号灯显示对驾驶行为的影响,研究发现,车内信号灯显示可以显著降低跟随车辆的最大减速,即使跟随车辆没有安装该系统^[26]。显然,国内对车路协同关键技术的研究主要是通信方案的优化、图像识别算法的改进,而国外更加注重人机交互的合理性,需要着重对关键技术进行系列的研究,确保技术的普适性。

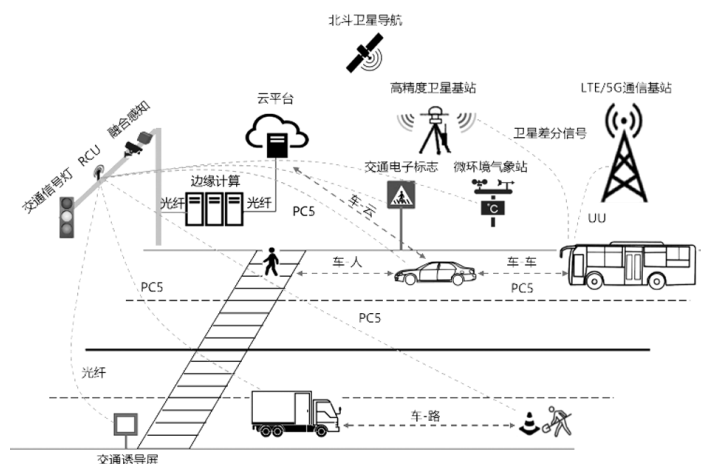


图2 车路协同应用场景及基础设施组成架构

车路协同技术改变了原来设施的控制策略,基于车路协同的控制策略大致可以分为道路基础设施控制方法的研究^[28-29]、车辆横纵向模型的研究^[30-56]和驾驶员行为特性的研究^[57-66]这3个方面。道路基础设施控制方法的研究主要是在交叉口场景下对交通信号的进行控制,吉林大学梁晶伟^[28]针对目前传统交叉口信号控制的缺点,基于间隙理论提出了安全-效率控制模型,给出了交叉口的优化控制方法,为智能网联汽车/非网联汽车的混行信号控制提供了思路。哈尔滨工业大学金宇^[29]同样基于车路协同环境下干线交通信号协调控制方法展开了研究,提出了一种以车速诱导和信号控制方案调整协同优化为目标的干线交通信号协调控制方法,并仿真验证了该方法的优越性。而新疆农业大学JI^[30]对车路协同场景下的交通信号控制进行了综述,指出针对协同环境下对车辆行驶影响的研究相对匮乏。传统的车辆横纵向模型包括预瞄跟踪模型、跟驰模型、换道模型,而车路协同技术拓宽了车辆的感知范围,车辆的横纵向模型也会不同于传统

模型。北京建筑大学焦朋朋等^[35]基于车路协同系统,提出了车队避让紧急车辆的换道引导策略,使不影响紧急车辆的速度情况下,与车队尾车的距离最短。长安大学王海霞^[38]建立了基于车路协同的换道模型,仿真结果表明,协同换道模型可以在目标车道有前车或目标车道有后车2种工况下满足约束条件地实现安全换道。为了缓解信号交叉口对交通流的阻断问题,武汉理工大学安树科等^[39]建立了基于车路协同技术的信号交叉口改进车辆跟驰模型,分析了引导区间长度对速度引导的影响,仿真结果表明改进的车辆跟驰模型要优于已有模型。基于车-车通信(Vehicle-to-Vehicle, V2V)技术,协同自适应巡航控制系统(Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC)能够使得车队内部的车辆以相互协调的车速运行以保持较小的车头时距/间距,从而能够提升道路的通行量并且能够增进车辆之间的安全性。克莱姆森大学DEY等^[45]回顾了CACC系统的3个基本要素:通信、驾驶员特性和控制策略,以及讨论了现有的CACC控制模块在考虑

接近理想驾驶工况时所面临的问题。密歇根大学ZHANG等^[46]设计了协同自适应巡航控制,以调节有人驾驶和自动驾驶汽车组成的混合交通中连接和自动驾驶汽车的纵向运动,利用道路实验采集的数据来模拟有人驾驶车辆的运动,并利用基于物理的车辆动力学模型来模拟自动驾驶车辆的运动,结果表明所提出的选择性CACC在提高车辆安全性和缓解混合交通扰动方面具有优势。吉林大学WU等^[57]提出了利用改进的混沌蚁群对PID控制器进行整定的方法,以达到提高驾驶舒适性、燃油消耗和减小最小安全距离的目的。现阶段的智能网联汽车是基于有人驾驶的,在实现系统功能的同时需要对驾驶员的行为特性进行研究,从而优化车路协同的方案。杨晶茹^[59]基于车路协同环境下研究了驾驶行为模型,在考虑期望安全间距的单车道跟驰模型基础上,分析了多车道驾驶行为的分子动力学特性,最终构建了换道和超车交互行为统一模型。调研车路协同的公众接受度有利于车路协同技术的推广,哈尔滨工业大学章锡俏等^[60]为了研究公众对车路协同系统的接受度以及在性别上的差异,并考虑心理因素,基于拓展的技术接受模型建立了车路协同系统接受度模型,通过网络问卷的形式得出女性更加注重车路协同的安全性,男性更加注重其的便利性。同样的,哈尔滨工业大学毛伟^[62]从驾驶员的心理出发研究了驾驶员对车路协同系统的适应性,通过模拟驾驶后驾驶人对车路协同系统的适应性有明显的提高。驾驶员行为特性往往跟驾驶员的生理指标有关。相关研究主要从脑电、肌电、皮电、心率和眼动这5个方面着手^[64-66],研究车路协同系统对驾驶员行为的影响往往是从本车驾驶人出发,但是在实际车路协同系统推广过程中,驾驶人对其的接收度是有差异的,这就很有必要研究车路协同系统对非本车驾驶员的影响。

2.3 车路协同应用场景

车路协同应用场景可以分为交通诱导类和道路感知类,如图3所示。而且主要围绕交通信号展开,包括绿波通行场景、车内信号灯显示场景、闯红灯预警场景。

湖南大学付沛沛^[67]展开了基于车路协同的无信号交叉路口的研究,主要提出了无信号交叉路口的协调模型,并在不同交通流量的情况下将该模型与法规中优先级方案和其他优先级方案的仿真结果对比分析,最终验证了该模型能够有效提高无信号交叉路口的通行效率。而张默可^[68]基于车路协同环境下对交通信号控制展开了研究,仿真验证了车速引导能降低10%的油耗,然后分别搭建了单交叉口和多交叉口交通信号控

制优化模型,验证了模型对城市交通效率的改善效果。一方面基于车路协同的交通信号控制优化能有效提高道路的通行效率,另一方面基于车路协同的可变车道方案也能缓解道路拥堵和双向交通流不平衡。东南大学MAO等^[71]提出了一种基于车路协同的实时动态可逆车道方案,与传统时间控制换道方式相比,该方案使车辆平均延迟降低了27.4%,减少了13.5%的道路容积,有效改善了交通流的不平衡。对于上述车路协同测试场景的研究,缺少对车路协同测试场景的优先级分类以及具体的测试规程,大多偏向于场景的实现。齐鲁大学ZHANG等^[72]首先回顾了车联网(Vehicle-to-Everything, V2X)性能测试的相关研究,分析了测试框架中的常用技术,然后以路侧单元(Road Side Unit, RSU)部署为例介绍设备部署,最后总结了典型用例及性能指标。国立台湾理工大学MIAO L等^[73]首先分析了C-V2X通信技术的优点,其次说明了C-V2X标准和C-V2X在汽车道路安全系统中的应用,最后说明了基于PC5的C-V2X在全球特别是台湾的部署情况和C-V2X发展面临的挑战。中国汽车技术研究中心有限公司DU等^[74]基于中国汽车技术研究中心的自然驾驶场景数据库,采用LGBM决策树模型提取场景的典型特征,并结合CIDAS事故场景和参数重组场景,提出了一种L3智能车功能测试的场景设计方法和评估方法,结果表明,该方法与实际车辆试验结果具有良好的一致性。目前车路协同应用场景的研究主要考虑触发场景的条件和对道路通行的影响,并没有考虑其对驾驶人行为特性的影响,及驾驶人对场景的适应性。

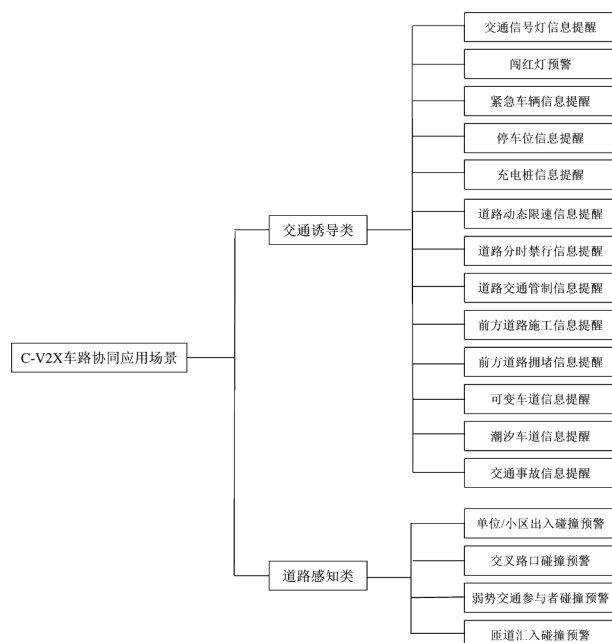


图3 车路协同应用场景体系框架

2.4 研究的不足之处

总体来说,现阶段车路协同的研究还不能同自动驾驶相适应。对于智能网联车方面,虽然已经不具备了智能化和网联化的条件,但还远远没有达到2者融合的程度,哪些场景需要依托于环境感知,而哪些场景需要依托于通信设备,这还没有明确的界定。对于车路协同技术方面,智能网联技术还不能代替驾驶人进行车辆控制,造成这个的主要有2个原因:一方面是道路基础设施智能化升级缓慢,另一方面是智能网联车辆的普及率还未达到智能网联控制的理想状态。对于车路协同场景方面,现阶段的应用场景往往路况简单、路线相对固定、车速相对较低、交通参与者较少,对于大范围不定线路场景、复杂交通环境场景和极端恶劣天气场景还未开展相应的研究。

3 智能网联汽车关键技术的探讨

3.1 现有技术问题

智能网联汽车关键技术主要分为3个大类,包括车辆关键技术,信息交互关键技术和基础支撑关键技术,表1为智能网联汽车关键技术概述。其中环境感知技术、智能决策技术、专用通信与网络技术、车路协同技术是不可或缺的。

表1 智能网联关键技术概述

第一层级	第二层级	第三层级
车辆关键技术	环境感知技术	·车载视觉技术 ·车载毫米波雷达技术 ·车载激光雷达技术 ·多源信息融合技术
	智能决策技术	·车辆决策与控制技术 ·多车协同控制技术
信息交互关键技术	专用通信与网络技术	·C-V2X 无线通信技术 ·直连通信技术
	车路协同技术	·车路协同决策自动驾驶 ·车路云一体化协同
基础支撑关键技术	测试评价技术	·测试评价方法与技术标准 ·示范区应用与推广
	标准法规	·标准体系与关键标准构建 ·标准技术试验验证

对于环境感知技术,其中又包括了车载视觉技术、车载毫米波雷达技术、车载激光雷达技术和多源信息融合技术。车载视觉发展情况基本符合预期目标,而车载毫米波雷达仍处在适用阶段,然而激光雷达已达到国际领先水平。但是总的来说,在传感器、处理器、融合算法、基于V2X的多源协同感知方面,与国际水平仍然有较大的差距。

对于智能决策技术,其中又包括了车辆决策与控制技术和多车协同控制技术。自动紧急制动、自适应巡航纵向驾驶辅助、车道保持辅助横向驾驶辅助以及自动泊车决策控制的核心决策控制算法都已经实现量产应用。而多车协同控制技术已经在虚拟测试平台进行了验证。总的来说,国内尚未完善通用的软件仿真平台和实车测试验证平台,缺乏有效的手段进行大规模测试验证,阻碍了智能决策技术的研发进展。

在专用通信与网络技术方面,国内C-V2X通信设备尚未经过大规模外场性能测试,真实场景下C-V2X通信性能尚未得到验证;C-V2X检测标准、规范尚不完善;尚未形成完整的C-V2X安全标准体系,C-V2X证书管理、相关数据接口及流程等技术要求尚未明确。

在车路协同技术方面,缺乏统一完善的顶层设计规划;标准体系不够完善;道路基础设施建设不足;缺乏成熟的项目落地经验^[75]。

3.2 可行的解决方案

虽然智能网联技术还存在着很多亟待解决的问题,但是相应的解决方案是比较明确。针对环境感知系统技术存在的问题,需要加强传感器领域的基础研发,开展处理器及芯片方面的技术攻关和加强算法技术方向的研究。针对智能决策系统技术存在的问题,需要构建智能决策控制技术策略开发、虚拟测试验证仿真平台,以及开发自动驾驶系统智能决策技术控制方法。针对专用通信与网络技术存在的问题,需要开展C-V2X通信技术性能验证测试,建立C-V2X检测认证体系,完善C-V2X通信安全标准体系,提高C-V2X通信安全检测能力等。针对车路协同技术存在的问题,需要建立完善的车路协同系统参考架构设计,积极开展基于车路协同技术的大规模测试示范,以及发挥产学研优势,加强跨行业协作,重点突破车路协同涉及的车车/车路信息交互、协同感知、协同预测、协同系统仿真测试等技术。

4 结语

本文从智能网联汽车、车路协同关键技术、车路协同测试场景这3个方面详细叙述了车路协同方案国内外的研究进展。对于车路协同系统未来的研究主要还是侧重在通信方式的可靠性研究、必要触发场景的研究、以及基于车路协同的自动驾驶的实际应用方面的研究。虽然现阶段基于有人驾驶的车路协同系统的成效不是很显著,但随着关键技术的突破和相关

法律的支持,以及经过各示范区不断开展互联互通的应用测试,车路协同的实际应用也是指日可待的。

现阶段,仍有问题亟待解决,如:单车智能与基于车路协同的无人驾驶是否能够共存,不同渗透率的智能网联汽车如何实现商业化的落地以及公众能否接受智能网联汽车。总体来说,车路协同演进不是一蹴而就的,需要以整车厂为首,围绕各示范区展开一系列的研究,从而完善车路协同的方案,而且技术的演进过程需要及时向公众反馈,过程中多听取道路交通参与者的意见。

参 考 文 献

- [1] 工业和信息化部,中国日报. 智慧交通一张网,我国已建四个国家级车联网先导区[EB/OL]. (2021-0717)[2022-04-11]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1705497889305216371.html>.
- [2] 吴霞. 基于智能网联车辆可控性的高速公路与城市道路混合交通流主动控制方法[D]. 西安:长安大学, 2020.
- [3] 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), 2021, 26(26): 1-16.
- [4] 洪金龙, 高炳钊, 董世营, 等. 智能网联汽车节能优化关键问题与研究进展[J]. 中国公路学报, 2021, 1437(2): 1-51.
- [5] YANG D G, JIANG K, ZHAO D, et al. Intelligent and Connected Vehicles: Current Status and Future Perspectives[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(10): 1446-1471.
- [6] FENG J C, SONG W X, ZHAN H T, et al. Research on Testing System for an Intelligent and Connected Vehicle[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1576(1): 24-26.
- [7] 白正伟. 基于深度强化学习的网联自动驾驶车辆决策控制方法[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
- [8] 孙雨奇, 王斐武. 5G车路协同自动驾驶应用研究[J]. 科学技术创新, 2021(17): 177-178.
- [9] 王晖年. 基于网联的信号交叉口下自动驾驶车辆生态驾驶车速控制策略[D]. 厦门:厦门理工学院, 2021.
- [10] DUAN X T, JIANG H, TIAN D X, et al. V2I based Environment Perception for Autonomous Vehicles at Intersections[J]. China Communications, 2021, 18(7): 1-12.
- [11] KIM S W, LIU W. Cooperative Autonomous Driving: a mirror Neuron Inspired Intention Awareness and Cooperative Perception Approach[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2016, 8(03): 23-32.
- [12] 李远程. 基于4G+网络和GPS的智能车路协同系统关键技术研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2018.
- [13] 缪立新, 王发平. V2X车联网关键技术研究及应用综述[J]. 汽车工程学报, 2020, 10(01): 1-12.
- [14] 郭荣斌, 朱永东, 朱凯男, 等. 车路协同C-V2X关键技术演进[C]. 第十五届中国智能交通年会, 2020:584-596.
- [15] 赵鹏. 车路协同的车辆定位系统关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2020.
- [16] 姚海敏, 陈建华. 基于高精度地图及多传感器融合定位的车路协同应用实践[J]. 测绘地理信息, 2022: 1-7. DOI: 10.14188/j.2095-6045.2020368.
- [17] 代磊磊, 何广进, 刘东波, 等. 公安交管视角下的车路协同技术探讨及应用[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2020, 26(1): 46-50.
- [18] 李原. 毫米波雷达在车路协同系统中的应用研究[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(1): 44-46+50.
- [19] 冯舒, 南洋, 董馨, 等. 基于车路协同C-V2X技术设计与应用研究[J]. 汽车文摘, 2020(8): 39-44.
- [20] 胡芳亿. 面向车路协同的边缘计算任务卸载研究[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
- [21] 伍毅平, 李海舰, 赵晓华, 等. 车路协同雾天预警系统对车辆运行生态特性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(4): 259-268.
- [22] FU S Y, LI W H, GE J L, et al. Review on the Application of CVIS Communication Technology on Freeway[C]// MATEC Web of Conferences, 2020: 01006.
- [23] CHEN S, HU J, SHI Y, et al. A vision of C-V2X: Technologies, Field testing, and Challenges with Chinese Development[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(5): 3872-3881.
- [24] YANG B, ZHENG R, SHIMONO K, et al. Analysis of Influence on Driver Behaviour While Using In-vehicle Traffic Lights with Application of Head-up Display. IET Intelligent Transport Systems, 2016, 10(5), 347-353.
- [25] YANG B, ZHENG R, SHIMONO K, et al. Evaluation of the Effects of In-vehicle Traffic Lights on Driving Performances for Unsignalised Intersections. IET Intelligent Transport Systems, 2017, 11(2):76-83.
- [26] YANG B, ZHENG R, KAIZUKA T, et al. Analysis of Driver Behaviors while Using In-Vehicle Traffic Light with Partial Deployment of V2I Communication[C]//2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2018:19-24.
- [27] YANG B, KAIZUKA T, NAKANO K. Drivers' Trust Model while Using In-Vehicle Traffic Lights in a Partial Deployment Scenario[C]//2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), 2019:1588-1593.
- [28] 梁晶伟. 车路协同条件下交叉口优化控制方法[D]. 长春:吉林大学, 2019.
- [29] 金宇. 车路协同环境下干线交通信号协调控制方法研究

- [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- [30] JI H J, XIE H W, LIU Z Q. Research on Urban Traffic Signal Control Methods under Vehicle-road Coordination Environment[J]. Journal of Research in Science and Engineering, 2020, 2(10): 1-5.
- [31] 谢川人. V2V条件下多车纵向协同避撞方法研究[D]. 重庆理工大学, 2020.
- [32] 郑义. 车联网环境下无信号交叉口车辆协同控制算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2020.
- [33] 唐嘉佳, 袁静. 车路协同环境下应急车辆信号优先策略研究[C]. 第十四届中国智能交通年会, 2019:132-142.
- [34] 赵琥, 冯树民, 廖嘉雯, 等. 车路协同环境下重叠线路公交车速诱导策略[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 42-53.
- [35] 焦朋朋, 杨紫煜, 洪玮琪, 等. 车路协同下车队避让紧急车辆的换道引导方法[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 95-104.
- [36] 孙生豪. 车路协同下信号交叉口车速诱导模型研究[D]. 舟山:浙江海洋大学, 2020.
- [37] 李倩莹. 车路协同中的局部路径规划研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020.
- [38] 王海霞. 基于车路协同技术的换道模型研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
- [39] 安树科, 徐良杰, 陈国俊, 等. 基于车路协同技术的信号交叉口改进车辆跟驰模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 169-174.
- [40] 卢凯, 张杰华, 邓兴栋, 等. 基于车速与信号协同优化的区域绿波协调控制模型[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 31-41.
- [41] 洪经纬. 基于前车速度预测的信号交叉口汽车生态驾驶控制策略研究[D]. 厦门:厦门理工学院, 2021.
- [42] 安树科, 徐良杰, 钱良辉, 等. 考虑前方多车优化速度信息的车辆跟驰模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 1156-1162.
- [43] 李秋艳. 群体车辆的诱导优化和协同运行方法[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
- [44] WU W J, SUN R C, LI Y X, et al. Cooperative U-Turn Merging Behaviors and Their Impacts on Road Traffic in CVIS Environment[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020(3):1-14.
- [45] DEY K C, YAN L, WANG X, et al. A Review of Communication, Driver Characteristics, and Controls Aspects of Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(2): 491-509.
- [46] ZHANG L J. Cooperative Adaptive Cruise Control in Mixed Traffic with Selective Use of Vehicle-to-vehicle Communication[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2018, 12(10): 1243-1254.
- [47] ZHANG J J, LIU M M, SU Z T. A Modified Mixed Car-following Model Considering that the Connected and Intelligent Vehicle and Non-connected Vehicle[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1910(1): 012019.
- [48] HAN J Y, ZHANG J L, WANG X Y, et al. An Extended Car-Following Model Considering Generalized Preceding Vehicles in V2X Environment[J]. Future Internet, 2020, 12(12): 216.
- [49] LI T L, HUI F, LIU C, ZHAO X M, et al. Analysis of V2V Messages for Car-Following Behavior with the Traffic Jerk Effect[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020(2020): 1-11.
- [50] AN S K, XU L J, QIAN L H, et al. Car-following model for autonomous vehicles and mixed traffic flow analysis based on discrete following interval[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 560(12): 125246.
- [51] JIE R. Improved Car Following Model Based on Supervised Learning[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2005(1): 012185.
- [52] NAIDU M B, NARAYANA N S, et al. Simulation Strategies for Mixed Traffic Conditions: A Review of Car-Following Models and Simulation Frameworks[J]. Journal of Engineering, 2020, 2020(10):1-12.
- [53] JIA B M, YANG D, ZHANG X B, et al. Car-following Model Considering the Lane-changing Prevention Effect and its Stability Analysis[J]. The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems, 2020, 93(8): 1-9.
- [54] HE L, AOUF N B, SONG B F. Explainable Deep Reinforcement Learning for UAV autonomous path planning[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 118(7): 107052.
- [55] YONG P, LIU S J, YU D. An Improved Car-following Model with Consideration of Multiple Preceding and Following Vehicles in a Driver's View[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 538(C): 122967.
- [56] ABED H M, EWADH H A. Coupling Visual Simulation Model (VISSIM) with Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) to Evaluate Safety at Signalized Intersections[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1973(1): 012234.
- [57] WU X C, QIN G H, YU H, et al. Using Improved Chaotic Ant Swarm to Tune PID Controller on Cooperative Adaptive Cruise Control[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(6): 3445-3450.
- [58] 田野, 裴华鑫, 晏松, 等. 车路协同环境下行车风险场模

- 型的扩展与应用[J].清华大学学报(自然科学版), 2021, 22(34): 1-11.
- [59] 杨晶茹. 车路协同环境下驾驶行为特性及其模型[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
- [60] 章锡俏, 毛伟, 洛玉乐, 等. 车路协同系统接受度建模及性别差异分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 177-187.
- [61] 李振龙, 邢冠仰, 李佳, 等. 基于扩展TAM的车路协同系统驾驶人接受度研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 188-200.
- [62] 毛伟. 基于人因因素的车路协同系统适应性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [63] 孙博华. 考虑驾驶能力及驾驶习性的个性化人机共驾策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [64] YANG X G, CHEN L, 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(3): 114474.1-114474.13.
- [65] MAO T Z, WHEN G H. Multiple Driving Behavior Analysis [C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, 2013.
- [66] LI W B, CUI Y D, MA Y T, et al. A Spontaneous Driver Emotion Facial Expression (DEFE) Dataset for Intelligent Vehicles: Emotions Triggered by Video-audio Clips in Driving Scenarios[M]. IEEE Transactions on Affective Computing, 2021.
- [67] 付沛沛. 基于车路协同的无信号交叉路口协调与驾驶辅助[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [68] 张默可. 基于车路协同环境下的生态城市交通信号控制研究[D]. 上海: 华东交通大学, 2020.
- [69] 朱弘戈, 朱晓东, 徐志刚, 等. 面向示范应用与可复制推广的智慧高速公路建设方案[J]. 公路, 2020, 65(10): 252-259.
- [70] 杜豫川, 刘成龙, 吴荻非, 等. 新一代智慧高速公路系统架构设计[J]. 中国公路学报, 2021, 1415(4): 1-19.
- [71] MAO L A, LI W Q, HU P S, et al. Design of Real-Time Dynamic Reversible Lane in Intelligent Cooperative Vehicle Infrastructure System[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020(2): 1-8.
- [72] ZHANG Z, YU L, FAN X, et al. A Survey of V2X Testing for Cooperative Connected and Automated Mobility[C]// 2021 IEEE 24th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). IEEE, 2021: 942-946.
- [73] MIAO L, VIRTUSIO J J, HUA K L. PC5-Based Cellular-V2X Evolution and Deployment[J]. Sensors, 2021, 21(3): 843.
- [74] DU Z, ZHANG L, ZHAO S, et al. Research on Test and Evaluation Method of L3 Intelligent Vehicle Based on Chinese Characteristics Scene[C]//2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2020: 26-32.
- [75] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图2.0 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.

【作者简介】

张云顺: 1988年出生, 男, 副教授, 现就职于江苏大学汽车工程研究院, 主要研究方向为车辆工程。

E-mail: zysgluck@ujs.edu.cn, zhangyunshun@hotmail.co.jp

华国栋: 1975年出生, 男, 院长/高级工程师, 现就职于江苏智行未来汽车研究院, 主要研究方向为电子信息工程。

E-mail: freehgd@126.com

李宁: 1989年出生, 男, 研究中心主任, 现就职于江苏智行未来汽车研究院, 主要研究方向为车路协同, 自动驾驶。

E-mail: lining_essorg@126.com

梁军: 1976年出生, 男, 所长/教授, 现就职于江苏大学汽车工程研究院, 主要研究方向为智能交通与智能车辆。

E-mail: liangjun@ujs.edu.cn

谢锴帅: 1995年出生, 男, 现就职于江苏大学汽车工程研究院, 主要研究方向为车辆工程。

E-mail: a1217728085@163.com

郜铭磊: 1997年出生, 男, 现就职于江苏大学汽车工程研究院, 主要研究方向为机械工程。

E-mail: ming999lei@163.com