

·智能网联汽车场景感知与智能体验技术专题·

车路云一体化智能网联汽车功能场景综述与研究展望

纪蕴家¹ 陈桂华¹ 公维洁^{1,2} 李晓龙¹

(1. 国汽(北京)智能网联汽车研究院有限公司,北京 100176; 2. 中国汽车工程学会,北京 100176)

【欢迎引用】纪蕴家,陈桂华,公维洁,等.车路云一体化智能网联汽车功能场景综述与研究展望[J].汽车文摘,2025(8):1-13.

【Cite this paper】JI Y J, CHEN G H, GONG W J, et al. A Review and Research Outlook on Functional Scenarios for Vehicle-Road-Cloud Integrated System of Intelligent Connected Vehicles[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(8): 1-13.

【摘要】随着汽车智能化与网联化融合发展的需求日益加剧,我国率先提出了车路云一体化系统建设方案,旨在加速车辆智能化与网联化的深度融合与探索。基于系统工程思维,以车路云一体化系统为研究框架,首先探讨了车路云一体化发展的优势,并评估基于应用场景解决现存技术问题的可行性。其次,从车路云一体化系统的网联化技术能力出发,对应用场景进行分类,并结合各国的研究与实践成果,梳理得出网联场景汇总表。然后,分析网联协同智能驾驶的3个发展阶段,基于网联场景汇总表生成配套的功能场景。最终,提出车路云一体化功能场景发展的推进路线,为未来技术的演进与实践提供指导。

关键词:智能网联汽车;车路云一体化;网联协同;车路协同;应用场景;C-V2X

中图分类号:U471.15 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250077

A Review and Research Outlook on Functional Scenarios for Vehicle-Road-Cloud Integrated System of Intelligent Connected Vehicles

Ji Yunjia¹, Chen Guihua¹, Gong Weijie^{1,2}, Li Xiaolong¹

(1. China Intelligent and Connected Vehicles (Beijing) Research Institute Co., Ltd., Beijing 100176; 2. China Society of Automotive Engineers, Beijing 100176)

【Abstract】With the growing demand for the integrated development of vehicle intelligence and connectivity, China has taken the lead in proposing the Vehicle-Road-Cloud integration development path, aiming to accelerate the deep integration and exploration of vehicle intelligence and connectivity. Grounded in systems engineering methodology, the paper adopts the Vehicle-Road-Cloud Integrated System (VRCIS) as its research framework. First, it explores the benefit of VRCIS development and evaluates the feasibility of application scenarios to address current technical problems. Secondly, it classifies the application scenarios, based on the connected capabilities of the VRCIS and summarizes the table of connected scenarios, by reviewing international research and practices. Thirdly, the paper analyzes the three developmental stages of cooperative connected autonomous driving and generates corresponding functional scenarios based on the summarized connected scenarios. Finally, the development path for the Vehicle-Road-Cloud integrated scenarios is proposed, guiding future technological evolution and implementation.

Key words: Intelligent and connected vehicles, Vehicle-Road-Cloud Integrated System (VRCIS), Cooperative connected autonomous driving, Vehicle-Road collaboration, Functional scenarios, C-V2X

0 引言

智能网联汽车单车智能经过多年发展已取得显著进展,L2级智能驾驶技术大规模商业应用,L4级智能驾驶技术示范逐渐落地。然而,单车智能仍然面临

大量安全事故、成本居高不下以及感知长尾的问题^[1]。

蜂窝车联网(Cellular Vehicle-To-Everything, C-V2X)技术经过学术界和产业界从仿真试验、实际道路测试等多渠道验证,可以达到辅助驾驶与自动驾驶的严苛数据交互要求^[2],以C-V2X技术为基础的

智能化网联化融合发展路径已成为我国实现高等级自动驾驶的重要支撑。我国C-V2X技术现阶段在关键技术攻关、标准体系构建、基础设施部署、应用服务推广及安全保障体系建设等方面取得了一系列显著成果^[2],已具备大规模部署及产业化的条件。同时我国C-V2X国家战略路径明确、信息通信产业基础强、交通基础设施保障有力,具有显著产业优势^[3]。

在过去发展进程中,汽车的网联化和智能化通常作为独立发展的技术,尚未形成二者融合发展的局面。针对网联系统的研究主要关注信息的娱乐与提醒功能,受限于分散架构下路侧设备性能与协作能力不足,网联系统在降低道路交通事故、提高交通效率以及促进节能减排方面的潜在效能未得到充分释放,进而阻碍了群体智能优化的实现^[4]。

在2024年1月,工业和信息化部、公安部、自然资源部、住房和城乡建设部、交通运输部联合发布了《关于开展智能网联汽车“车路云一体化”应用试点的通知》,行业广泛认为车路云一体化系统的大规模建设将是推动汽车智能化网联化融合发展的关键驱动力之一。

本文首先梳理了车路云一体化的发展现状,主要包括系统定义、优势特征以及面临的典型技术问题。其次,分析了车路云一体化系统网联化技术能力与应用场景。最后,进一步研判车路云一体化功能场景的发展路径,提出其演进的3个阶段,并对各类功能场景的未来发展趋势进行预测与展望。

1 车路云一体化发展路径及问题分析

1.1 车路云一体化系统概述

为研究服务智能驾驶的网联场景,需要实现人、车、路、网、云等源头数据的充分利用,并建立完整视角下的智能网联汽车信息物理系统架构。因此,站在人、车、路、网、云系统协同顶层设计,以及不同行业间业务数据打通融合的视角,本文沿用了《车路云一体化系统白皮书》^[5]提出的车路云一体化智能网联汽车系统架构。

车路云一体化智能网联汽车系统(Vehicle-Road-Cloud Integrated System, VRCIS,以下简称“车路云一体化系统”)包括智能网联汽车、智能化路侧基础设施、云控平台三大核心主体^[6]。此外,还涉及通信网络、安全体系、支撑平台等相关主体^[5]。以统一的架构和标准体系为支撑,将车路云各组成部分以安全、高效和可靠的方式进行有机联系,支持车路云一体化相关功能的实现,如图1所示。

1.2 车路云一体化发展的优势分析

在车联网技术早期发展阶段,主要通过建设路侧通信、感知和计算设施获得实时交通信息,以此为智能驾驶提供高维全局信息,支持其功能的高效实现。然而,实现百公里的智能化道路覆盖和信号灯路口改造,通常需要巨大的项目投资规模^[7]。若无法构建从生产建设到示范运营的完整价值链,相关建设成果难以实现可持续发展,甚至可能仅停留在理论层面。

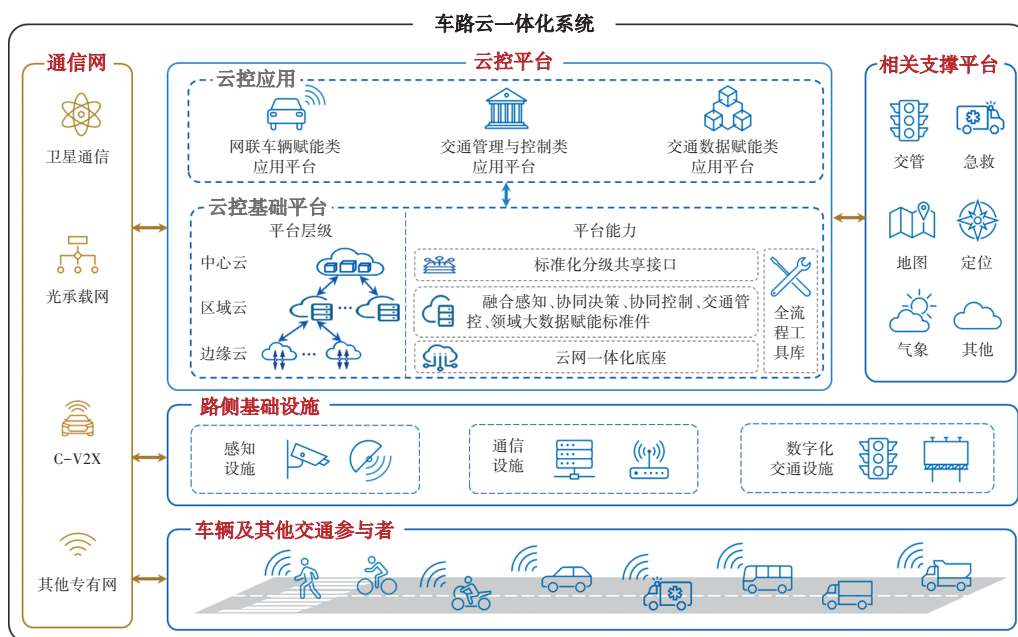


图1 车路云一体化智能网联汽车系统示意^[5]

相比之下,在车路云一体化的发展路径中,云控基础平台的加入显著增强了商业模式的闭环能力。云控基础平台采用“1+N”架构,具备“分层解耦、跨域共用”的特征,通过一个统一的云控基础平台支撑N个云控应用平台,打破了传统信息化系统的建设模式,实现了基础能力与业务功能的有效分离^[5]。随着云控基础平台连接的网联车辆和路侧设施规模逐步扩大,可以通过购买云控基础平台的服务获取云控应用平台所需的基础数据。在低时延、高可靠的服务场景(如自动驾驶)中,云控应用平台可依托云控基础平台的强大算力与网络资源,或由在云控平台注册的路侧通信单元提供服务。而在通信性能要求较低的大数据服务场景中,应用平台可以选择直接与用户进行交互,提升服务效率。

此外,云控基础平台的统一运营模式有效提升了资源管理与数据采集成本。由地方运营方负责统筹采集与购买动态交通数据与道路基础设施资源,显著降低了云控应用平台的技术复杂度和建设成本。同时,车路云一体化生态参与方的角色日益多样化。例如,路侧基础设施与网联车辆既是数据提供方也是服务接收方,部分云平台既是数据提供方也是应用服务提供商。上述多元关系将成为探索以数据产品、数据服务等标的物进行数据流通交易的基础,推动产品与服务形态的创新,进一步增强生态系统的可持续性与创新潜力。

1.3 车路云一体化系统现存技术问题分析

车路云一体化系统作为跨行业重大系统工程,涉及汽车、交通、通信、安全等多个领域,具有高度协同性和复杂性。在推进过程中,系统面临不同行业技术演进周期不一致、汽车安全缺乏有效保障以及云控平台建设复杂的问题。单一行业难以独立解决上述问题,需以应用场景为牵引,分等级、分阶段、分场景协同推进,推动各行业形成合力,共同攻克技术难题。

1.3.1 跨行业技术协同开发难度较大

智能网联汽车产业是通信技术、电子信息技术和汽车制造技术深度融合发展的新业态。目前,各行业形成了各自的体系架构、技术特征和开发周期,引起了技术演进节奏不匹配的问题。例如,信息通信技术(Information and Communications Technology, ICT)的演进速度明显快于垂直行业,2020年第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)已冻结基于新无线接入技术(New Radio, NR)的车用无线通信技术(NR Vehicle to Everything, NR-V2X)的第一个版

本R16,2024年冻结5G演进(5G-Advanced)的第一个版本R18^[8]。C-V2X技术在3GPP中大约每1.5~2年更新一个版本,人工智能和大数据等技术同样迅速迭代。相比之下,汽车行业的产品规划周期通常为5年,交通行业的规划周期通常为10~20年甚至更长。目前汽车、交通运输、住建等行业主要应用的车辆通信标准是3GPP在R14、R15版本中规定的仅满足基本道路安全服务和部分增强服务的基于长期演进(Long Term Evolution, LTE)的车用无线通信技术(LTE Vehicle to Everything, LTE-V2X)技术^[9]。因此,垂直行业对大规模投资研制基于LTE-V2X技术的产品或系统普遍存在顾虑。此外,汽车行业对高安全性和强实时性的要求尚未成为交通和城市治理等行业的共性需求,导致许多设备的升级迭代仅满足智能驾驶的业务需求,未能产生更广泛的经济和社会效益。

针对上述问题,可以通过以应用场景作为牵引,跨行业对齐演进节奏与服务能力进行解决。首先,探索能够满足汽车、交通、能源、城市治理等行业共性需求的应用场景在决定技术实现方式时,不单纯追求展示各行业的先进技术,而是从技术的实用性和稳定性等方面出发,结合智能驾驶场景中的时延、感知精度、可靠性等特定业务需求,实现通信技术与新型基础设施的按需部署,确保在汽车产品的整个生命周期内,能够跨区域、跨行业地提供持续且高效的服务保障。

1.3.2 车路云一体化技术引入新型安全问题

汽车的安全性是智能网联汽车市场化应用中面临的首要问题。随着汽车电子电气化程度的提高,以及车路云泛在互联的特征的出现,安全风险不仅源自汽车内部系统功能不足、性能局限和人为误操作可能引发的危害^[10],同时也存在诸多潜在可利用的信息安全漏洞中。为保障车辆运行安全,国际标准组织(International Standard Organization, ISO)发布了ISO 26262《道路车辆 功能安全》(Road Vehicles-Functional Safety)、ISO 21434《道路车辆 网络安全工程》(Road Vehicles-Cybersecurity Engineering)、ISO 21448《道路车辆 预期功能安全》(Road Vehicles-Safety of the Intended Functionality)等标准以指导新能源汽车、自动驾驶汽车以及传统汽车的技术和标准研究^[11-13]。随着网联技术的应用,车辆与外部通信交互更加频繁,安全技术研究范畴需从车辆本身扩展至与外部车辆或设备的通信、路侧设施、云平台、无线信道

等更广泛领域^[14]。然而,由于相应的方法论及关键技术尚不完善,导致部分主机厂及零部件供应商仍处于观望阶段,未能提出面向网联功能的具体安全需求,限制了网联技术的落地应用。

针对上述问题,应优先识别和探索具有关键赋能价值的网联应用场景,系统开展安全场景建模与危害分析,识别潜在风险后果及其影响范围。制定覆盖车端、路侧以及云端等环节的安全目标,进一步分解形成系统、软件、硬件等层面的安全要求,并开展设计与功能实现。通过对关键场景进行识别与验证,在测试资源有限的条件下,结合软件在环(Software-In-the-Loop, SIL)、硬件在环(Hardware-In-the-Loop, HIL)以及整车实测等手段,实现对潜在系统缺陷、功能偏差及攻击路径的快速识别与验证^[15],形成可重复、量化的安全评估依据。同时,推动形成面向整车企业、零部件企业、建设运营方产品及服务的安全管理要求、防护策略及审核评估机制。在此基础上,构建面向车端、路侧与云端深度融合的安全防护架构,强化通信链路、数据处理、感知决策控制等关键环节的安全能力,为实现智能网联汽车“零事故、零伤亡”的发展愿景提供坚实基础。

1.3.3 云控基础平台建设面临挑战

云控基础平台作为复杂的大系统,其结构组成庞大、物理实体众多、设计功能全面,实际开发过程中面临诸多挑战。尽管云控基础平台已在北京、重庆等地进行试点部署,但其赋能服务能力尚未达到预期效果,主要原因可归结为以下3点:(1)在参考架构方面,行业内尚未统一适用于车路云一体化系统的多视角、多层次、多维度的智能汽车云控基础平台参考架构及开发工具^[16],开发者难以使用共同的语言进行系统的理解、设计与开发。(2)在数据汇聚方面,当前相关行业云平台普遍存在相互独立、信息交互效率低、数据接口以及格式标准不统一的问题,导致整合和处理难度较大,进一步限制了系统协同能力的提升。(3)算力资源方面,国产人工智能算力芯片在技术完整度和生态丰富度方面仍有不足,并且在车路云协同大模型开发中,算法能力难以在真实道路交通环境中实现对交通参与者的高精度融合感知和准确的预测及决策建议。该局限性导致车端对云控平台数据和指令的采信程度不足。

针对上述问题,可通过明确平台服务场景,对云控基础平台功能进行裁剪,并采取分阶段建设的方式逐步解决。例如,在初期建设阶段裁剪云控基础平台

的系统能力,基于“自下而上”的场景需求,形成关键场景的功能逻辑架构^[16],并在此基础上结合系统设计需求和资源分配方案,优化物理组件的配置。同时,优先对接能够促进关键功能场景实现的行业平台,推动数据接口与格式的标准化。明确的应用场景还将有助于吸引电信运营商的参与,通过边缘云与区域云服务节点在运营商网络体系内的部署,提供高质量、确定性的算力网络支持。

2 车路云一体化系统网联化技术能力与应用场景分析

2.1 网联化技术现状

智能网联汽车作为车路云一体化系统的主要服务对象,各个自动化等级都迫切需要车路云一体化系统提供信息实时共享与交互、部分或全部的感知、决策和控制等相关支撑能力^[17]。根据网联信息在智能驾驶系统中的最终作用环节^[2],车路云一体化系统网联化技术能力可分为辅助信息交互、协同感知、协同决策和协同控制4个等级。目前,辅助信息交互以及部分协同感知级别的产品与功能已经在量产和示范中得到了广泛应用^[18-19]。表1汇总了当前已基本完成标准化的典型网联化技术信息。

2.1.1 辅助信息交互技术与应用

辅助信息交互作为车路云一体化系统最基础的功能,基本已经实现普及。车路云一体化系统能够向智能驾驶车辆提供导航、静态半静态道路信息^[4]和天气信息。此类信息对通信实时性、可靠性要求较低,主要服务交通管理并为驾驶员提供信息。例如能够发布突发自然灾害(如地震、洪灾等)等安全信息的车载无线广播接收系统^[20]、可以传递报警信息的车载事故紧急呼叫系统(eCall)^[21]。

2.1.2 网联协同感知技术与应用

单车传感器的环境感知受限于视角与物理环境,在面对复杂道路环境场景可能出现感知长尾、检测与反应延迟等局限,而路侧与云端的超视距信息对提升感知能力有巨大潜力^[22-23]。车路云一体化系统能够向智能驾驶车辆提供其他交通参与者运行状态信息(当前和历史状态)、行驶意图信息(未来状态)、交通环境感知信息和透传信息,车端基于对上述信息的理解,作为感知输入用于智能驾驶车辆的后续信息提示或决策、控制。

近年来,我国在协同感知交互领域取得了显著进展。路侧感知系统实现单点位性能优化基础上,正向

表1 网联化技术典型信息

等级名称	典型信息	基于LTE-V2X的典型消息内容
网联协同感知	车辆状态信息和行驶意图信息	BSM、ISM、VIR等 ^[35-36]
	路侧状态信息和未来趋势信息	SPAT、MAP、PAM、RSI等 ^[35, 37]
	车辆或路侧的业务公告能力	SAM等 ^[36]
	弱势交通参与者状态信息和行驶意图信息	PSM等 ^[37]
	车辆感知的其他交通参与者的状态信息	SSM等 ^[37]
	路侧感知的其他交通参与者的状态信息	SSM、RSM、RAM等 ^[36, 38]
网联协同决策	与其他交通参与者以产生决策为目的的交互信息,以及路径规划、车速引导等信息	RSC、CIM、CLPMM、COPMM等 ^[36, 37, 39]
网联协同控制	对其他交通参与者的指令信息	PCM、RSCV等 ^[38-39]

注:基本安全消息(Basic Safety Message, BSM)、意图共享消息(Intention Sharing Message, ISM)、车辆意图和请求(Vehicle Intention And Request, VIR)、信号灯消息(Signal Phase and Timing Message, SPAT)、地图消息(MAP)、停车场地图消息(Parking Area Map, PAM)、交通事件信息、交通标志信息(Road Side Information, RSI)、业务能力公告消息(Service Announcement Message, SAM)、个体安全消息(Personal Safety Message, PSM)、感知共享消息(Sensor Sharing Message, SSM)、路侧单元消息(Road Side Message, RSM)、路侧辅助自动驾驶消息(Roadside for Autonomous Driving Message, RAM)、路侧协调消息(Road Side Coordination, RSC)、协同交互消息(Collaborative Interaction Message, CIM)、编队管理消息(Connectionless Platooning Management Message, CLPMM)、面向连接的编队管理消息(Connection Oriented Platooning Management Message, COPMM)、编队控制消息(Platooning Control Message, PCM)、路侧控制车辆(RoadSide Control Vehicle, RSCV)

跨域感知、车路数据融合方向拓展。以百度发布的统一鸟瞰图(Uniform Bird's Eye View, UniBEV)车路一体解决方案为例^[24],基于BEV+Transformer感知方案,提升了路端感知的跨域融合能力,同时降低了不同视角和传感器之间的转换壁垒,从而实现更加高效的数据处理。此外,车端感知算法的快速迭代为路侧感知提供了新思路,通过深度学习驱动的多模态数据融合技术,将进一步提升多场景协同感知技术的准确性和鲁棒性,为其在复杂交通环境中的实际应用奠定了坚实基础。

2.1.3 网联协同决策技术与应用

当前自动驾驶发展到了临界点,除了感知长尾问题,无信号灯交叉口通行等混行交通博弈问题仍较难克服^[25],经常导致切换至人工驾驶,无法实现自动驾驶连续无接管安全运行。车路云一体化系统通过对车辆状态与意图信息、交通环境信息处理与分析,能够为智能驾驶车辆提供驾驶行为决策和动态路径规划信息,并能够作为决策输入进一步优化车辆控制^[26]。同时协同决策技术可以通过协调域内多车的驾驶行为,实现宏观交通系统的优化,提升道路交通整体安全与效率。

协同决策可分为分布式决策和集中式决策^[4]。分布式决策将决策任务分配至多个独立单元^[1],各单元基于局部信息自主制定决策策略,并通过协作机制与其他单元共享信息以优化整体决策过程。基于V2V、V2I的协作式交叉口通行、协作式变道等应用属于分布式决策。Li等^[27]提出基于V2I的关键转折点(Critical Turning Point, CTP)通行方法,车辆发送状态与意图信息,路侧基础设施进行车道预留并提供决

策与规划建议,车辆调整行驶轨迹以匹配分配时段。Maksimovski等^[28]提出合作式高速汇入场景,要求相关车辆与基础设施同时进入协商状态,按照协商的结果调整自身驾驶行为。集中式决策则将决策权集中于中心节点^[1],中心节点通过整合全量信息制定全局最优方案,旨在实现整体优化与群体效益最大化。在车路云一体化系统架构中,多层级云控基础平台负责实现群体最优与全局优化。尽管部分地区已在云控基础平台建设中开展了协同决策场景的示范应用,但多集中于简单交通场景下的车速、车道建议等,针对复杂交通环境下的协同决策仍处于探索阶段。

2.1.4 网联协同控制技术与应用

协同控制技术通过车-路-云-网-图的深度协作,旨在增强智能驾驶车辆对复杂及极端场景的适应能力,显著提升驾驶性能^[29]。同时,该技术有助于降低单车算力需求与开发成本,实现整体系统功能与效率的提升。在特定场景下,车路云一体化系统通过直接或间接(控制交通管理设施)方式向车辆下达控制指令或调度信息,智能驾驶系统按照指令完成驾驶任务。

车辆直接控制与协同决策技术在控制对象(如车速、加速度)、实现算法以及实现目标(如提升通行安全与效率)等方面存在一定相似性^[4]。但协同控制技术对交通系统整体的安全性和效率提升作用更为显著,能够以交通系统为整体优化对象,实现多目标的协同优化^[30]。然而,因为协同操控场景涉及多主体合作,责任分工和风险分担机制尚未完善,在一定程度上增加了企业和相关方的风险与成本,制约了协同操

控技术的商业化进程。

间接控制即通过控制交通基础设施(如信号灯、可变标识等),对交通运行状况进行诱导,从而间接实现对车辆行驶路径与速度的管理。Li等^[31]和Cui等^[32]研究了自适应交通信号灯控制,通过采集交通流量、路况等信息,动态调整配时方案,合理分配路网中各路段的交通流量。随着我国智能交通系统的持续发展,交通信号灯信息逐步实现数字化。公安部交通管理科学研究所发布的《道路交通管控设施信息交互接口规范》和《道路交通管理车路协同系统信息交互接口规范》等国家标准^[33-34],明确了信号灯信息的交互格式,并首次引入了交通指挥调度数字信号的概念,为无信号灯路口的协同管理提供了新的技术路径,有助

于避免因无明确通行规则而引发的交通博弈,从而减少通行冲突与拥堵延迟。

2.2 网联应用场景分析

鉴于世界各汽车强国均对网联化赋能场景开展深入研究,本文通过整理中国^[35-47]、美国^[48-54]、欧洲^[55-59]、日本^[60-61]及韩国^[62]范围内行业认可度较高的业务相关标准、产业发展报告、测试示范总结报告等,在不考虑场景的通信链路方式前提下,按照网联化技术等级进行分类,梳理出49项场景。由于本文聚焦于智能驾驶领域,因此不考虑符合法规要求的数据上报、违规警告、满足企业迭代需求的软件升级以及针对驾驶员设计的道路收费服务场景,将网联应用场景汇总如表2所示。

表2 网联应用场景汇总表

等级	场景	中	美	欧	日	韩
辅助信息交互	交通信息及路径推荐或全局路径引导	●		●		
	天气信息提醒	●	●	●	●	●
	标志标牌提醒(非动态信息)	●		●		
协同感知	前向碰撞预警	●	●	●	●	●
	交叉路口碰撞预警(有信号灯和无信号灯)	●	●	●	●	
	左转辅助	●	●	●	●	
	盲区预警/变道预警	●	●	●		
	逆向超车预警	●		●		
	紧急制动预警	●	●	●		●
	异常车辆提醒	●	●	●	●	●
	车辆失控预警	●	●	●		●
	道路危险状况提醒	●	●	●		●
	路面环境提醒	●		●		●
	动态管控信息提醒(可变车道、动态交通标志等)	●	●	●		●
	闯红灯预警/红绿灯信息提醒	●	●	●	●	●
	信号灯信息透传	●				
	弱势交通参与者碰撞预警	●	●	●		
	摩托车预警			●		
	有轨电车或火车预警			●	●	
	前方拥堵提醒或车道级交通信息提醒	●		●	●	●
	紧急车辆提醒	●	●	●	●	●
	感知数据共享	●	●	●		
	错误道路行驶预警	●	●			
	危险驾驶及违章行为预警	●				
	限制通过警告和绕道通知及施工区提醒	●	●	●		●
	急转弯提醒	●	●			
	驾驶员行为检测	●				
	渣土车车况检测	●				
	网联式自动紧急制动	●				
	协同自适应巡航控制	●		●	●	
	隧道监控与预警	●				
增强定位授时服务	●					
地图信息上报	●		●			

续表

等级	场景	中	美	欧	日	韩
协同感知、协同决策	协作式变道	●	●	●		
	协作式车辆汇入汇出	●	●	●		
	协作式交叉口通行	●		●		
	紧急情况下协作式机动			●		
	组启动(Group Start)			●		
	绿波车速引导	●		●	●	
	动态车道管理及车道级限速	●		●		
	协作式优先车辆通行	●	●	●		
	协作式弱势交通参与者通行	●	●	●		
	场站路径引导服务	●		●		
	编队行驶(车辆编队管理及编队行驶)	●		●		
	动态路径规划	●				
	协同领航辅助驾驶	●				
协同感知、协同决策、 协同控制	自主代客泊车	●		●		
	极端场景下车辆脱困	●				
	远程遥控驾驶(城市运营车、物流车、港口、高速、矿山)	●		●		

注:表中“●”表示该应用场景在该国家的标准、产业发展报告或测试示范项目明确提出。

3 车路云一体化功能场景及推进路线研究

3.1 车路云一体化功能场景发展阶段分析

上述网联场景以大系统级思维考虑网联信息的提供能力,未从车辆的角度与车辆智能化结合,可能导致网联信息应用难度高等问题。例如,由于不同智能化等级对驾驶员与自动化系统角色分配、动态驾驶任务、设计运行条件等要求不同,同一类网联信息需满足不同性能与安全要求以支持不同智能驾驶功能。并且,已量产的单车智能功能需多类网联信息共同支撑。因此,需要提出车辆智能化与网联化融合的功能场景。

本文根据专家调研和行业发展现状,初步把车辆智能化网联化融合归类为车路云一体化提醒预警、车路云一体化的辅助驾驶(Cooperative-Advanced Driving Assistance System, C-ADAS)、车路云一体化的自动驾驶(Cooperative-Automated Driving System, C-ADS)3个发展阶段进行功能场景分析。网联化技术等级与发展阶段的对照关系如表3所示。

3.1.1 车路云一体化提醒预警阶段功能场景研究

提醒预警阶段作为网联信息在车端应用的基础阶段,已实现量产应用。该阶段的实现不受车辆驾驶自动化等级及车载感知能力的限制。在该阶段,车载通信单元接收到网联提醒预警信息后,通过计算处理将信息呈现于人机交互界面,以提升驾驶员对潜在风险的感知能力。Xiang等^[63]提出了基于路侧摄像头和

激光雷达等多传感器融合的方案,通过V2X技术将交通对象的感知信息发送至车辆,实现盲区预警功能;Baek等^[64]设计了一种融合V2X通信和车辆多传感器数据处理的车辆碰撞预警系统,研究表明,融合V2X信息后,碰撞预警时间相较于仅依靠车载传感器显著缩短。基于V2X的提醒预警信息可通过多种方式向驾驶员呈现,包括抬头显示器、中控屏幕、转向盘振动、语音提示以及提示音等^[65],有效弥补了驾驶员和单车智能在感知能力方面存在的局限性。然而,对于协同决策和协同控制类信息,由于无法确保驾驶员会按决策建议及时响应,此类协作信息在提醒预警阶段不予考虑应用。

表3 网联化技术等级与发展阶段的对照关系

		车辆智能化网联化融合发展阶段		
		车路云一体化提醒预警	车路云一体化辅助驾驶	车路云一体化自动驾驶
网联化技术等级	辅助信息交互	▲	▲	▲
	协同感知	▲	▲	▲
	协同决策		▲	▲
	协同控制			▲

注:表中“▲”表示该车辆智能化网联化融合阶段可适用该类网联化技术等级,空白项表示该阶段不涉及该类网联化技术的应用。

通过筛选表2中对应提醒预警阶段的网联应用场景的可以发现,辅助信息交互技术等级的网联信息具有静态或半静态属性,该类信息可通过手机端或车机端的导航装置以更经济性的方式提供服务,且市场应

用效果良好。因此,在提醒预警阶段不再考虑辅助信息交互等级场景,仅归类了29项协同感知与协同决策技术等级的场景。考虑到部分场景具有共性特点,如发生的道路形态相同(例如交叉路口)、消息类型相同(例如如需车辆状态信息的紧急制动预警、异常车辆提醒),对现有场景进行整合后形成11个功能场景,分别为前向碰撞预警、交叉路口碰撞预警(含左转)、盲区预警或变道预警、异常车辆提醒、道路危险状况提醒、动态管控信息提醒、闯红灯预警、弱势交通参与者碰撞预警、前方拥堵提醒、紧急车辆提醒、绿波车速引导,针对功能场景的分析如表4所示。

3.1.2 车路云一体化的辅助驾驶阶段功能场景研究

在C-ADAS阶段,网联信息将作为车辆智能驾驶系统感知、决策的依据,支撑实现部分驾驶辅助(L1)及组合驾驶辅助(L2)的功能。在该阶段,网联信息不仅需提供多视角、多时间维度的感知信息,还需满足可靠性、准确度以及通信时延等方面的严苛要求。例如Vignarca等^[66]提出,协同自动紧急制动(Connected Autonomous Emergency Braking, C-AEB)功能的通信时延需保持在200 ms以内,否则会直接影响碰撞时间计算的准确性和制动决策的及时性。类似地,Wang等^[67]研究指出,协同自适应巡航控制(Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC)功能对V2X技术实时性与可靠性的要求,并且通信环境的不确定性将限制CACC性能表现,从而增加安全隐患。由于L1至L2级智能驾驶系统执行动态驾驶任务与后援时仍需依赖驾驶员实时监管与适当响应^[68],智能驾驶系统不具备执行全部动态驾驶任务的能力。因此,与自动驾驶阶段相比,协同控制信息并不适用,于此阶段网联信息重点在于赋能辅助驾驶系统的感知决策能力。

通过筛选表2中对应C-ADAS的网联应用场景,可归纳出13项协同感知与协同决策技术等级的场景。考虑到部分单一协作场景可共同服务于点到点的辅助驾驶(例如协同领航驾驶辅助),对现有场景进行整合与删减后形成7个功能场景,分别为网联式自动紧急制动或网联式自动紧急转向、协同自适应巡航控制、协同交叉口通行、高速车道级可变限速控制、协作式优先车辆通行、协作式弱势交通参与者通行、协同领航辅助驾驶,针对功能场景的分析如表4所示。

3.1.3 车路云一体化的自动驾驶阶段功能场景研究

C-ADS主要面向具备有条件自动驾驶(L3)及以上等级的车辆。当前融合V2X技术的自动驾驶系统的架构设计、技术方案以及适用性研究仍处于初步探

索阶段^[69]。然而,与C-ADAS阶段相比,C-ADS阶段对网联信息的需求将进一步提高,并对车路云一体化系统的安全性和可靠性提出更为严格要求。由于L3及以上等级的智能驾驶系统能够独立执行全部动态驾驶任务^[68],网联信息在此阶段的应用范围显著扩大。除了提供基础的环境感知信息外,还包括网联决策与控制信息,从而支持更复杂的自动驾驶场景。网联化技术能力的提升为实现群体智能奠定了基础,可通过结合多智能体强化学习算法(Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL)、分布式模型预测控制(Distributed Model Predictive Control, DMPC)、博弈论等先进算法,在人类驾驶与自动驾驶长期共存的交通环境中实现多车辆协作的优化控制^[30],逐步迈向兼顾全局效率与个体安全的智能交通发展目标。

通过筛选表2中对应自动驾驶(C-ADS)阶段的网联应用场景,可归纳出4项协同感知、协同决策和协同控制技术等级的场景。因部分协同控制类场景主要发生在特殊、极限的自动驾驶运行环境中,该场景是否触发也取决于各厂家自动驾驶系统的能力。为了提出更有普适性的功能,对现有场景进行整合与删减并形成4个功能场景,分别为自主代客泊车、限定场景车路云一体化高度自动驾驶、车路云一体化自动驾驶以及高速公路编队行驶,针对功能场景的分析如表4所示。

3.2 车路云一体化功能场景量产时间预测

车路云一体化智能网联汽车,不仅是发展汽车本身,更是协同发展由智能网联汽车、路侧基础设施、云控平台、通信网等共同组成的复杂信息物理系统^[4]。其融合应用的发展受到低时延高可靠通信系统、协同感知、决策、控制技术成熟度,路侧基础设施覆盖率、车载通信单元装配率的重要影响,其发展将是分阶段跃进的过程。

根据车路云一体化试点政策规划,试点建设预计于2026年完成。可以推断,在2025年至2026年短期内,网联信息面临的信息准确性、可靠性,以及各子系统软硬件的功能安全等关键问题难以彻底解决,无法作为支撑智能驾驶系统感知和决策的重要依据。因此,在2026年前后,车路云系统的主要功能研发仍将以面向驾驶员的提醒和预警信息为主,驾驶员需要对网联信息的准确性进行自主判断并有选择性的采纳,以避免潜在的安全风险。其中复杂场景例如交叉口碰撞预警、盲区碰撞预警、弱势交通参与者碰撞预警等功能的量产将取决于路侧感知技术

表4 车路云一体化功能场景分析

发展阶段	场景	合并或不筛选原因	功能场景
车路云一体化提醒预警功能	前向碰撞预警		前向碰撞预警
	交叉路口碰撞预警、左转辅助	此类应用针对交叉路口场景,通过接收并分析其他车辆的轨迹信息,判定是否存在碰撞风险	交叉路口碰撞预警(含左转)
	盲区预警/变道预警、逆向超车预警	此类应用通过分析他车状态信息,当判断存在碰撞危险时对本车驾驶员进行提醒,以盲区预警/变道预警场景为代表	盲区预警/变道预警
	异常车辆提醒、车辆失控预警、紧急制动预警	此类应用通过分析他车对外广播的车辆异常或紧急的状态信息,对本车驾驶员进行提醒,以异常车辆提醒场景为代表	异常车辆提醒
	道路危险状况提醒、路面环境提醒、急转弯提醒、限制通过警告/绕道通知/施工区提醒、隧道监控与预警	道路危险状况包括容易发生或临时性存在的道路危险状况如桥下积水、道路湿滑、前方急转弯、施工区、隧道等路段,因此可统一归类为道路危险状况提醒	道路危险状况提醒
	动态管控信息提醒(可变车道、动态交通标志)		动态管控信息提醒
	闯红灯预警/红绿灯信息推送	预警类比信息推送类应用对消息的时延和可靠性要求更高,因此可概括成闯红灯预警	闯红灯预警
	信号灯信息透传	此应用主要针对公交车等装配车尾标识牌的大型车辆,透传红绿灯信息避免造成对后车的遮挡。因为该功能对使用车型有限制,因此不列出	
	弱势交通参与者碰撞预警、摩托车预警	广义的弱势交通参与者包括摩托车,因此统称弱势交通参与者碰撞预警	弱势交通参与者碰撞预警
	有轨电车/火车预警	此类车辆运行于固定轨道有明确的运行时间,与社会车辆的行驶道路通常相互分离。在中国该类场景需求较少	
	前方拥堵提醒/车道级交通信息提醒	异常路面状况(施工区、路面遗撒、积水)或异常天气(如雨、雪、雾等)等的交通路况信息可包含在道路危险状况提醒场景中。此应用只需聚焦于交通流量或道路拥堵相关信息的交互	前方拥堵提醒
	紧急车辆提醒		紧急车辆提醒
	感知数据共享	此应用通过接收并分析他车及路侧通过感知设备探测的其他交通参与者或道路异常状况信息对本车驾驶员进行提醒,将支持如盲区预警、道路危险状况提醒等其他预警场景,因此不再单独列出	
	错误道路行驶预警	他车错误道路行驶:此应用一般出现于城市郊区单行道区域。若违章车辆在附近转弯处车道可与盲区预警合并,若违章车辆在同车道可与前向碰撞预警场景合并; 自车错误道路行驶:车道方向可通过导航更经济的显示,如因逆向行驶导致的碰撞等紧急事件可归类为逆向超车预警	
	危险驾驶及违章行为预警、驾驶员行为检测、渣土车车况检测	此类应用是通过路侧感知设备验证车辆及驾驶员是否违反《道路交通安全法》,辅助公安机关交通管理部门判罚,与智能网联功能的演进关联性较弱,因此不在本文讨论内范围	
	增强定位授时服务	此应用通过蜂窝通信、直连通信等方式向车端发送无线定位、无线授时服务,可应用于所有导航卫星信号弱的场景 ^[70] 。因此不再单独列出	
	地图信息上报	此应用利用车载、路侧传感器进行数据采集上传后进行高精地图制图及更新,高精地图信息将支持多种预警/辅助驾驶/自动驾驶场景,因此不再单独列出	
绿波车速引导		绿波车速引导	
车路云一体化辅助驾驶功能	网联式自动紧急制动	自动紧急制动与自动紧急转向均针对前方可能发生碰撞危险的情况,且需要的网联信息相同,因此进行功能扩展	网联式自动紧急制动/网联式自动紧急转向
	协同自适应巡航控制		协同自适应巡航控制
	协作式交叉口通行组启动	此类应用针对交叉路口场景,通过协作交互后形成驾驶建议信息,提升直行与左转汇入通过效率	协作式交叉口通行

续表

发展阶段	场景	合并或不筛选原因	功能场景
车路云一体化辅助驾驶功能	动态车道管理及车道级限速	根据道路交通安全法,高速公路针对不同气象条件、道路数量、车辆类型等规定了不同行驶速度要求。因此,此应用更适合高速公路路况	高速车道级可变限速控制
	协作式优先车辆通行		协作式优先车辆通行
	协作式弱势交通参与者通行		协作式弱势交通参与者通行
	场站路径引导服务	此应用通过向车辆提供停车场内部道路地图、车位信息、引导路径辅助车辆进行泊车,可归类为“自主代客泊车”功能中的一种实现方式	
	动态路径规划	此应用基于多源感知信息计算出车辆的推荐路线、建议车速、行驶目的地等信息,并可结合协作式信息实现更智能、完整的路径规划能力,支持协同领航辅助驾驶。因此不再单独列出	
	协同领航辅助驾驶、协作式变道、协作式车辆汇入汇出、紧急情况下协作式机动	领航辅助驾驶包括在城市道路或高速公路的自行换道、自行超车、自动上下匝道、障碍物避让、无保护/有保护路口通行等驾驶功能,系统运行中可涉及多种协作式网联场景	协同领航辅助驾驶
车路云一体化自动驾驶功能	自主代客泊车		自主代客泊车
	远程遥控驾驶(城市运营车、物流车、港口、高速、矿山)、极端场景下车辆脱困	此类应用可归类为通过车路云一体化系统协同控制技术扩展自动驾驶设计运行域限制,实现自动驾驶的连续运行。可分别提炼为限定场景(如港口、矿区、校园、物流园区)和全场景的车路云一体化自动驾驶	限定场景车路云一体化高度自动驾驶 车路云一体化自动驾驶
	编队行驶(车辆编队管理及编队行驶)	货运物流和长途运输等场景更能体现出编队行驶降低空气阻力、节省油耗、减少人工成本等的优势,因此明确为高速公路编队行驶	高速公路编队行驶

攻关的进展。

在2027-2030年的中期发展阶段,依赖他车状态信息即可实现的辅助驾驶与自动驾驶功能有望率先实现量产。随着车路云一体化系统功能安全方法论的逐步落地,部署在他车、路端及云端平台的电子电气系统将逐步纳入整车功能安全责任体系,承接相应的安全要求。这将为整车制造商提供更加明确的技术约束条件,进而推动网联式自动紧急制动、自动紧急转向、协同自适应巡航控制、高速公路编队行驶等关键功能的规模化应用。之后,随着技术与标准的进一步完善,路侧感知的覆盖范围和数据精度将逐步提升,智能算法在复杂动态场景中的处理能力和鲁棒性将显著增强,各子系统和平台间的数据协议有望实现标准化统一。此外,基于车路云一体化示范运行所积累的大量数据将推动数据生成、加工、传输和应用端的置信度算法研究取得阶段性突破。辅助驾驶和自动驾驶功能的发展将取决于上述技术的突破,逐步实现规模化落地。

4 总结与展望

4.1 总结

本文以车路云一体化系统为研究范围,提出了

车路云一体化系统的网联化技术等级与融合发展阶段。通过综合各国的研究成果和实践经验,研判车路云一体化场景发展路线图,为相关技术和应用的逐步落地和规模化提供了指导方向。图2示意性的提出了功能场景量产路线图以及各阶段技术层面亟待解决的挑战。

本文的研究仍存在一些不足:(1)研究重点集中于短中期内能够实现量产的功能场景,缺乏对长期功能场景演进趋势的系统性预测与探索。(2)由于数据获取和试点项目覆盖范围的局限性,难以全面评估跨平台、跨区域协同运行的复杂性及其对场景实现的潜在挑战。这些不足为未来研究提供了进一步的扩展方向与改进空间。

4.2 研究展望

随着提醒预警类场景的广泛应用,网联技术在提升道路交通安全性和通行效率方面的价值将更加凸显。伴随车路云一体化辅助驾驶功能的逐步落地,行业对车联网技术发展的信心也将显著增强。预计将进一步带动路侧感知与计算基础设施建设的投资增长,同时推动市场主体的逐步壮大,为车路云一体化自动驾驶功能的实现奠定基础。预计在2026年以后,具备自发经济效应的新型车路云一体化功能将持续

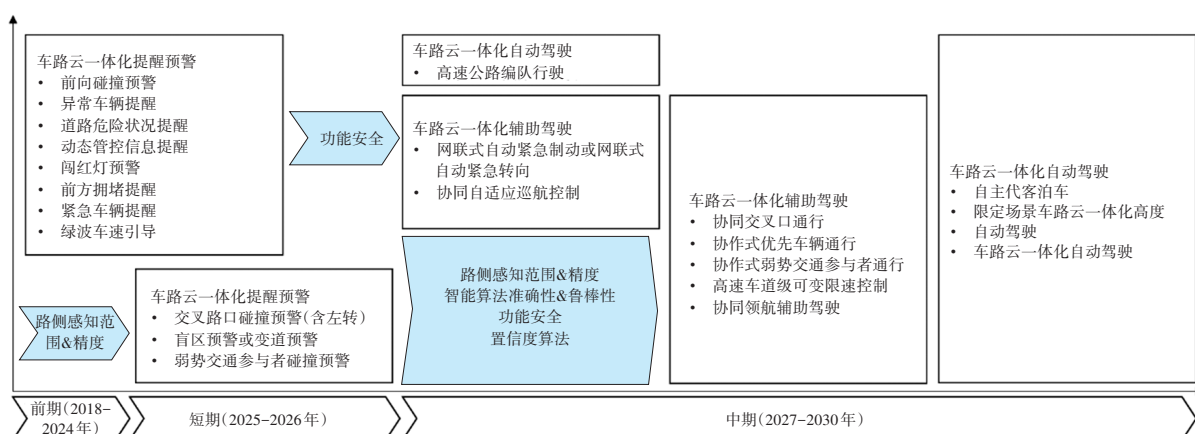


图2 车路云一体化智能网联汽车功能场景量产路线

涌现,展现出超出行业预期的增长潜力,车路云一体化技术创新与产业发展将得到进一步提升。

参考文献

- [1] 张亚勤, 李震宇, 尚国斌. 面向自动驾驶的车路云一体化框架[J]. 汽车安全与节能学报, 2023(3): 249-273.
- [2] 陈山枝, 葛雨明, 时岩. 蜂窝车联网(C-V2X)及其赋能智能网联汽车发展的辩思与建议[J]. 电信科学, 2022, 38(7): 1-17.
- [3] 中华人民共和国中央人民政府, 国家发展改革委, 中央网信办, 等. 关于印发《智能汽车创新发展战略》的通知[EB/OL]. (2020-02-10)[2024-08-16]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/24/content_5482655.htm.
- [4] 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.
- [5] 中国汽车工程学会, 国家智能网联汽车创新中心, 中国智能网联汽车产业创新联盟. 车路云一体化(中国方案)智能网联汽车发展白皮书[R]. 北京: 中国汽车工程学会, 2023.
- [6] 中国智能网联汽车产业创新联盟. 车路云一体化系统白皮书[R]. 北京: 中国智能网联汽车产业创新联盟, 2023.
- [7] 周东洋. 车联网可持续运营模式研究及建议[J]. 江苏通信, 2024, 40(1): 127-130.
- [8] 崔占伟, 黄云飞. 面向5G-A的标准发展及应用情况[J]. 移动通信, 2023, 47(1): 46-53.
- [9] 刘超凡, 李新, 耿钰. B5G车联网关键技术分析[J]. 电信快报, 2024(2): 31-35.
- [10] 全国汽车标准化技术委员会. 预期功能安全国际标准ISO 21448及中国实践白皮书[R]. 天津: 全国汽车标准化技术委员会, 2020.
- [11] International Organization for Standardization. Road Vehicles—Functional Safety: ISO 26262-1: 2018[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
- [12] International Organization for Standardization. Road Vehi-

cles—Safety of the Intended Functionality: ISO 21448: 2022[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2022.

- [13] International Organization for Standardization. Road Vehicles—Cybersecurity Engineering: ISO/SAE 21434: 2021[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2021.
- [14] IMT-2020(5G)推进组C-V2X工作组. C-V2X与单车智能融合功能及应用[R]. 北京: IMT-2020(5G)推进组C-V2X工作组, 2023.
- [15] 吴思宇, 于文浩, 邢星宇, 等. 基于关键场景的预期功能安全双闭环测试验证方法[J]. 汽车工程, 2023, 45(9): 1583-1607.
- [16] 中国汽车工程学会. 车路云一体化系统云控基础平台功能场景参考架构1.0[R]. 北京: 中国汽车工程学会, 2024.
- [17] 陈山枝, 葛雨明, 时岩. 蜂窝车联网(C-V2X)技术发展、应用及展望[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 1-12.
- [18] IMT-2020(5G)推进组C-V2X工作组. 车联网C-V2X“四跨”先导应用实践活动总结报告(2022)[R]. 北京: IMT-2020(5G)推进组C-V2X工作组, 2023.
- [19] 中国汽车工程学会, 中国智能网联汽车产业创新联盟. 车路云一体化实践应用白皮书[R]. 北京: 中国汽车工程学会, 2024.
- [20] 国家广播电视总局. 车载无线广播接收系统(报批稿)[S]. 北京: 国家广播电视总局, 2024.
- [21] 全国汽车标准化技术委员会. 车载事故紧急呼叫系统(送审稿)[S]. 天津: 全国汽车标准化技术委员会, 2024.
- [22] KARA PA, WIPPELHAUSER A, BALOGH T, et al. How I Met Your V2X Sensor Data: Analysis of Projection-Based Light Field Visualization for Vehicle-to-Everything Communication Protocols and Use Cases[J]. Sensors, 2023, 23(3): 1284.
- [23] HUANG T, LIU J, ZHOU X, et al. V2X Cooperative

- Perception for Autonomous Driving: Recent Advances and Challenges[J]. arXiv, 2024.
- [24] ZHU M, GONG Y, TIAN C, et al. A Systematic Survey of Transformer-Based 3D Object Detection for Autonomous Driving: Methods, Challenges and Trends[J]. Drones, 2024, 8(8): 412.
- [25] QIAN B, ZHOU H, LYU F, et al. Toward Collision-Free and Efficient Coordination for Automated Vehicles at Unsignalized Intersection[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 10408–10420.
- [26] FU S, FU H. Modeling and Topsis-gra Algorithm for Autonomous Driving Decision-Making Under 5G-V2X Infrastructure[J]. Cmc-Computers Materials & Continua, 2023, 75(1): 1051–1071.
- [27] LI S, SHU K, ZHOU Y, et al. Cooperative Critical Turning Point-Based Decision-Making and Planning for CAVH Intersection Management System[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 11062–11072.
- [28] MAKSIMOVSKI D, FACCHI C. Negotiation Patterns for V2X Cooperative Driving: How Complex Maneuver Coordination Can Be? [J]. 2023 IEEE 98th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Fall), 2023: 1–7.
- [29] BEJARBANEH E Y, DU H P, NAGHDY F. Exploring Shared Perception and Control in Cooperative Vehicle-Intersection Systems: A Review[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 25(11): 15247–15272.
- [30] XIE S, LI Z, ARVIN F, et al. A Review of Multi-Vehicle Cooperative Control System in Intelligent Transportation[J]. International Journal of Automotive Manufacturing and Materials, 2023, 2(3): 100011.
- [31] LI W Z, ZHU T H, FENG Y H. A Cooperative Perception Based Adaptive Signal Control Under Early Deployment of Connected and Automated Vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024(169): 104860.
- [32] CUI H, YUAN G, LIU N, et al. Convolutional Neural Network for Recognizing Highway Traffic Congestion[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2020, 24(3): 279–289.
- [33] 全国道路交通安全管理标准化技术委员会. 道路交通管控设施信息交互接口规范(征求意见稿)[S]. 无锡: 全国道路交通安全管理标准化技术委员会, 2024.
- [34] 全国道路交通安全管理标准化技术委员会. 道路交通安全管理车路协同系统信息交互接口规范(征求意见稿)[S]. 无锡: 全国道路交通安全管理标准化技术委员会, 2024.
- [35] 中国汽车工程学会. 合作式智能运输系统 车用通信系统应用层及应用数据交互标准(第一阶段): T/CSAE 53–2020[S]. 北京: 中国汽车工程学会, 2020.
- [36] 中国汽车工程学会. 合作式智能运输系统 应用层交互技术要求 第1部分: 意图共享与协作: T/CSAE 315.1–2023[S]. 北京: 中国汽车工程学会, 2023.
- [37] 中国汽车工程学会. 合作式智能运输系统 车用通信系统应用层及应用数据交互标准(第二阶段): T/CSAE 157–2020[S]. 北京: 中国汽车工程学会, 2020.
- [38] 中国汽车工程学会. 基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容: T/CSAE 158–2020[S]. 北京: 中国汽车工程学会, 2020.
- [39] 中国智能交通产业联盟. 营运车辆 合作式自动驾驶货车编队行驶第3部分: 车辆通讯应用层数据交互要求: T/ITS 0113.3–2021[S]. 北京: 中国智能交通产业联盟, 2021.
- [40] 中国汽车标准化技术委员会. 智能网联汽车 基于网联技术的信息辅助系统技术要求及试验方法(初稿)[S]. 天津: 全国汽车标准化技术委员会, 2024.
- [41] 中国通信标准化协会. 增强的V2X业务应用层交互数据要求: YD/T 3977–2021[S]. 北京: 中国通信标准化协会, 2021.
- [42] 中国通信标准化协会. 面向C-V2X的多接入边缘计算服务能力开放和接口技术要求(第一阶段): YD/T 4359–2023: [S]. 北京: 中国通信标准化协会, 2023.
- [43] 中国通信标准化协会. 基于移动互联网的车路协同应用场景及技术要求: YD/T 4777–2024: [S]. 北京: 中国通信标准化协会, 2024.
- [44] 中国通信标准化协会. 基于5G的远程遥控驾驶信息交互系统 总体技术要求: YD/T 2023–0620T [S]. 北京: 中国通信标准化协会, 2023.
- [45] 中国汽车工程学会. 车路云一体化系统 第2部分: 车云数据交互规范: T/CSAE 295.2–2023[S]. 北京: 中国汽车工程学会, 2023.
- [46] IMT–2020(5G)推进组 C–V2X工作组. 车联网经典应用案例集[R]. 北京: IMT–2020(5G)推进组 C–V2X工作组, 2023.
- [47] 中国信息通信研究院, 德国汽车工业协会. 中德车联网(智能网联汽车)C–V2X量产应用研究报告[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2022.
- [48] Society of Automotive Engineers. V2X Communications Message Set Dictionary: SAE J2735[S]. American: Society of Automotive Engineers, 2020.
- [49] Society of Automotive Engineers. On-Board System Requirements for V2V Safety Communications: SAE J2945[S]. American: Society of Automotive Engineers,

- 2020.
- [50] Society of Automotive Engineers. Application Protocol and Requirements for Maneuver Sharing and Coordinating Service: SAE J3186[S]. American: Society of Automotive Engineers, 2023.
- [51] Society of Automotive Engineers. V2X Sensor-Sharing for Cooperative and Automated Driving: SAE J3224[S]. American: Society of Automotive Engineers, 2022.
- [52] US Department of Transportation Federal Highway Administration. Saving Lives with connectivity: Accelerating V2X Deployment Program Grant Awards—Maricopa County[EB/OL]. (2024-06-20) [2024-10-15]. https://ops.fhwa.dot.gov/program_areas/maricopaCounty.htm.
- [53] US Department of Transportation Federal Highway Administration. Saving Lives with connectivity: Accelerating V2X Deployment Program Grant Awards—Texas A&M Transportation Institute[EB/OL]. (2024-06-20) [2024-10-15]. https://ops.fhwa.dot.gov/program_areas/texas.htm.
- [54] US Department of Transportation Federal Highway Administration. Saving Lives with connectivity: Accelerating V2X Deployment Program Grant Awards—Utah Department of Transportation[EB/OL]. (2024-06-20) [2024-10-15]. https://ops.fhwa.dot.gov/program_areas/utah.htm.
- [55] European Union. Directive(EU) 2023/2661 of the European Parliament and of the Council of 22 November 2023 amending Directive 2010/40/EU on the Framework for the Deployment of Intelligent Transport Systems In the Field of Road Transport and for Interfaces with Other Modes of Transport[EB/OL]. (2023-11-22) [2025-01-01]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2661/oj/eng>.
- [56] Car 2 Car Communication Consortium. Guidance for Day 2 and Beyond Roadmap[R]. Europe: Car 2 Car Communication Consortium, 2021.
- [57] 5G Automotive Association. A Visionary Roadmap for Advanced Driving Use Cases, Connectivity Technologies, and Radio Spectrum Needs[R]. German: 5G Automotive Association, 2020.
- [58] 5G Automotive Association. A Visionary Roadmap for Advanced Driving Use Cases, Connectivity Technologies, and Radio Spectrum Needs[R]. German: 5G Automotive Association, 2022.
- [59] 5G Automotive Association. C-V2X Use Cases and Service Level Requirements Volume I: TR 200111[R]. German: 5G Automotive Association, 2020.
- [60] SIP Cross-Ministerial Strategic Innovation Promotion Program. SIP 2nd Phase: Automated Driving for Universal Services Final Results Report (2018–2022)[R]. SIP Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program, 2022.
- [61] National Police Agency. ITS Developed by the Japanese Police [EB/OL]. (2025-07-15). https://www.npa.go.jp/english/Police_of_Japan/2020/POJcontents.html.
- [62] KNCAP. KNCAP Test and Assessment Protocol—V2X Communication Device Test Method and Evaluation Method [R]. KNCAP, 2024.
- [63] XIANG C, ZHANG L, XIE X, et al. Multi-Sensor Fusion Algorithm in Cooperative Vehicle-Infrastructure System for Blind Spot Warning[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2022, 18(5).
- [64] BAEK M, JEONG D, CHOI D, Lee S. Vehicle Trajectory Prediction and Collision Warning via Fusion of Multisensors and Wireless Vehicular Communications[J]. Sensors, 2020, 20(1):288.
- [65] BILIUS, L B, VATAVU R D, VANDERDONCKT J. Expanding V2X with V2DUIs: Distributed User Interfaces for Media Consumption in the Vehicle-to-Everything Era[J]. Proceedings of the 2024 ACM International Conference on Interactive Media Experiences, 2024, 394–401.
- [66] VIGNARCA D, ARRIGONI S, VIGNATI M, et al. Analysis of Communication Delays in Roadside Detection Systems for Cooperative AEB Implementation[J]. 2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Milan, Italy, 2023, 1–6.
- [67] WANG B, LUO Y, ZHONG Z, et al. Risk Reduction for Safety of the Intended Functionality of CACC with Complex Uncertainties: A Cooperative Robust Non-Fragile Fault-Tolerant Strategy[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 144.
- [68] 中国汽车标准化技术委员会. 汽车驾驶自动化分级 [S]. 天津: 全国汽车标准化技术委员会, 2021.
- [69] TAKACS A, HAIDEGGER T. A Method for Mapping V2X Communication Requirements to Highly Automated and Autonomous Vehicle Functions[J]. Future Internet. 2024, 16(4): 108.
- [70] 李晨鑫, 胡金玲, 赵锐, 等. 车联网定位技术现状及展望[J]. 移动通信, 2020, 44(11): 70–75.

(责任编辑 梵玲)