

· 资助成果 ·

智能车联网基础理论与共性关键技术研究及应用

王云鹏^{1*} 鲁光泉¹ 陈鹏¹ 李增文²

1. 北京航空航天大学, 北京 100191

2. 重庆长安股份有限公司, 重庆 400023

[摘要] 车联网推动了智能汽车、智能交通与移动互联技术的深度融合,是继安全带、安全气囊之后的新一代安全技术,将对交通出行和驾驶模式产生深远影响,其潜在的经济、社会效益巨大。在国家自然科学基金—中国汽车产业创新发展联合基金项目(U1564212)的资助下,项目团队从网联汽车运动状态信息的协同感知、智能车联网通讯和动态自组网、绿色驾驶服务优化、多车协调安全驾驶决策优化、试验验证平台与测试验证方法等方面,突破了多车运动状态信息分层融合的高精度车辆定位、大规模异构车辆网络分层分布式组网及空口接入、车联网环境下的交通状态辨识、考虑定位误差的多车危险态势时空演化分析等基础理论及共性关键技术。项目成果广泛应用于车联网集成与应用示范区建设及网联应用场景开发,为智能车联网技术的产业化落地提供强有力支撑。

[关键词] 车联网;交通状态感知;车路协同;自组网;交通安全

随着无线通信技术的快速发展,车联网技术在本世纪开始起步,2010年以后得到快速发展,美国、日本和欧洲陆续开展了 IntelliDrive (Connected Vehicle)、MCity, Smartway, DRIVE C2X 等计划或项目推进车联网技术的研究^[1]。美国于2018年发布的《自动驾驶汽车 3.0》提出,将路车融合作为无人驾驶产业发展的方向,同时开放加州道路测试,推进无人驾驶的商业化进程;2020年1月发布的《自动驾驶汽车 4.0》则将“优先考虑安全和保障、推动创新以及一致的监管体系”作为三大核心发展领域。此外,欧盟发布的《网联式自动驾驶技术路线图》和日本发起的 Smartway 计划,同样指出要实现道路和车辆的融合交互,提升车辆驾驶的高效性和安全性。我国紧跟车路协同技术发展前沿,2011年科技部在国家 863 计划现代交通技术领域设立了“智能车路协同关键技术研究”的主题项目,开展了车联网技术的探索性研究,在智能车路协同关键技术研究方面取得了阶段性成果^[2]。2016年开始,工信部在上海、北京、重庆等五个城市建立了智能网联汽车测试区,目前正在一定范围开展规模化车辆的示范应用和评估。



王云鹏 北京航空航天大学教授、副校长,长江学者特聘教授,国家万人计划科技创新领军人才,车路协同与安全控制北京市重点实验室主任,特种车辆无人运输技术工业和信息化部重点实验室主任,科技部重点领域创新团队“智能交通技术创新团队”负责人。主要致力于车辆安全监测、路网协同控制、路车智能融合等基础理论与关键技术研究。承担国家自然科学基金、973 计划、863 计划、科技支撑、重点研发计划项目多项,获国家科技进步奖二等奖 2 项、省部级科技进步奖一等奖 5 项和二等奖 2 项。

车联网推动了智能汽车、智能交通与移动互联技术的深度融合,改变了交通信息获取、分析与发布的模式,为智能交通的发展开辟了新的道路^[3],是继安全带、安全气囊之后新一代安全技术,将对交通出行和驾驶模式产生深远影响,为便捷绿色出行提供支撑,其潜在的经济、社会效益巨大^[4]。尽管车联网技术已经成为智能交通研究的重要组成部分和前沿热点,部分技术也开始走向应用^[5],但在面向安全的车辆运动信息精准可靠感知、面对时变交通环境的动态自组网技术、以车辆运行数据为基础的绿色驾驶服务、具有良好体验的多车协调安全驾驶等方面

收稿日期: 2021-06-21; 修回日期: 2021-08-24

* 通信作者, Email: ypwang@buaa.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(U1564212)的资助。

的基础理论和关键技术仍有待突破。这些技术将为智能车联网技术深度应用提供强有力支撑^[6, 7]。在此背景下,项目团队受到国家自然科学基金—中国汽车产业创新发展联合基金项目“智能车联网基础理论与共性关键技术研究及应用”(U1564212)资助,取得一系列原创性研究成果。

1 研究成果

1.1 基础理论

(1) 智能车联网通讯和动态自组网

车联网通信网络系统是大型复杂化的无线通信网络系统。由于车辆移动速度快、位移变化频繁剧烈,网络拓扑结构多变,车联网通信环境遭受多普勒效应、大小尺度衰落、网络拓扑结构不稳定等现象的严重影响。针对车辆自组织网络信息传播鲁棒性机制及信息路由难题,借鉴流行病毒传播机制,提出了车辆自组织网络信息可信传播的仿生机理以及具有流行病传染鲁棒性的广播路由方法,增强了高速移动场景下车车自组网可靠性和路由效率。针对车联网异构网络资源的协同优化,建立了面向移动群体自适应决策的吸引力选择模型,提出了生物启发式异构车联网接入决策方法,使异构组网通信中资源分配和服务质量保障从单车层面提升到大规模群体车路层面(图1)。建立了基于车载自组网的协同内容传输调度优化方法平衡车辆移动性、信道衰落随机性以及群体竞争性三方面因素。针对车辆协作信息传输问题,将车辆群体竞争传输拓展为群智能体的势博弈范式,建立能量效率优化、保障传输数据速率需求的车辆协作传输模型,提出了基于分布式在线学

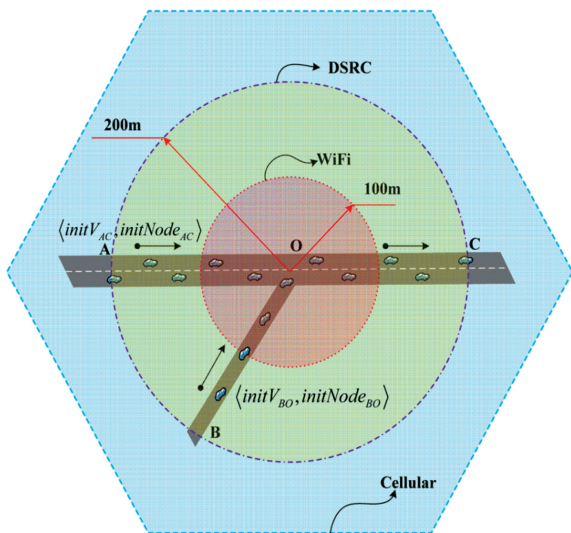


图1 异构车路仿真场景

习策略的车辆中继传输方法(图2),为提升车辆群体组网多输入输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)传输的整体能效提供了有效途径^[8-10]。

(2) 车联网状态下的绿色驾驶服务优化

合理的路径规划与车速引导可带来20%~40%的节油效果,绿色驾驶服务优化节能的空间和潜力巨大。综合考虑个人出行对行程时间可靠度的关注和社会对节能减排的要求,优化绿色出行驾驶服务是车联网应用亟需解决的关键问题。项目系统分析了车联网环境下微观个体出行者的路径选择行为,在此基础上,建立了出行者考虑油耗情况下的路径选择模型,分析出行者对油耗关注程度的差异性,并探讨了不同车联网渗透率对交通系统全局效率的影响(图3)。针对路网数据缺失的情况,分析了路网数据空间关联特性,提出了大规模路网交通流数据高精度空间插值方法。在路网交通状态预测上,利用二维时空矩阵描述交通流时空关系将交通时空动态转化为图片,并通过卷积神经网络提取时空特征(图4),较好地实现对路网交通状态的短/长期预测^[11-14]。

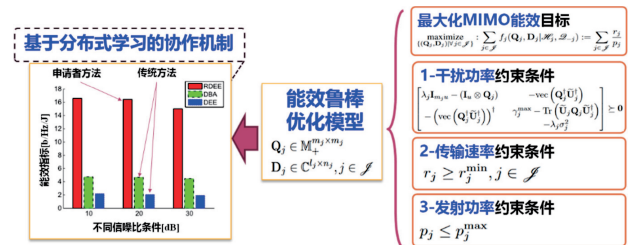


图2 车载协作通信与MIMO传输能效鲁棒优化方法

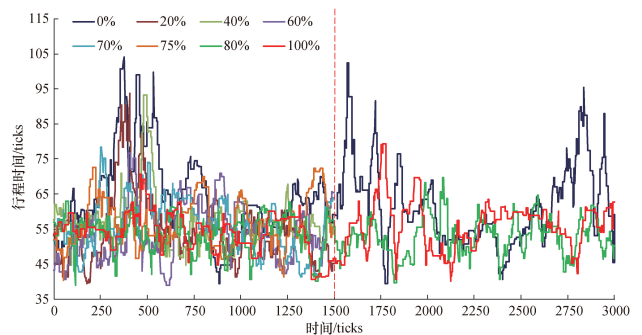


图3 不同车联网渗透率下某条道路的行程时间变化

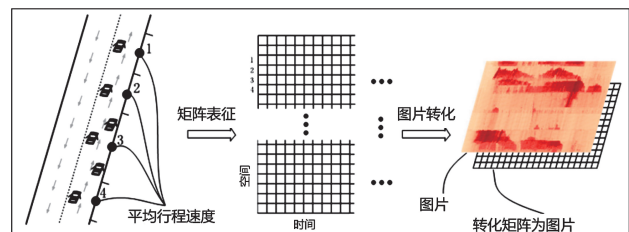


图4 交通时空动态通过时空二维矩阵转化为图像

(3) 基于车联网的多车协调安全驾驶决策优化

基于车联网的多车协调安全驾驶技术是车联网安全应用的重要组成部分,能够有效解决大部分车辆碰撞问题。但目前的研究只针对系统的安全性,而忽视了驾驶人的舒适性。如何使安全预警阈值及车辆控制过程更符合驾驶人的生理心理特征,提升驾驶人的驾驶体验,是亟需解决的关键问题。项目分析了驾驶人直弯道跟驰特性差异(图 5),基于风险补偿理论构建了符合驾驶人心理特性的直弯道跟驰模型;基于期望安全裕度模型,推导了队列稳定性条件,分析了驾驶人行为特性及风格比例对队列跟驰稳定性的影响,提出了队列稳定性控制方法;基于 SM 指数衰减的车辆追尾概率测度,分析了混合驾驶风格在不同比例下的车辆追尾碰撞的可能性,利用蒙特卡洛数值模拟方法估计了驾驶行为参数对车辆追尾碰撞的风险的敏感性,并构建了驾驶行为参数与车辆追尾碰撞风险之间的逻辑回归模型;分析了信号交叉口处车辆的运行特性以及跟驰特性,基于交通波理论建立了车联网环境下车辆排队长度预测模型,建立了单点信号交叉口的车速控制预判模型及车速控制方法并将其扩展至连续信号交叉口^[15];面向完全网联路网环境中混合行驶的人工驾驶车辆和自动驾驶车辆,从交叉口、路段、路网三个层面(图 6),以实现车辆安全、高效、节能行驶为目

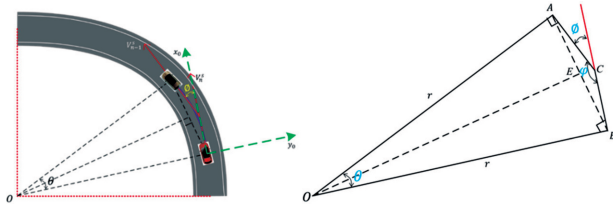


图 5 弯道跟驰几何特性分析

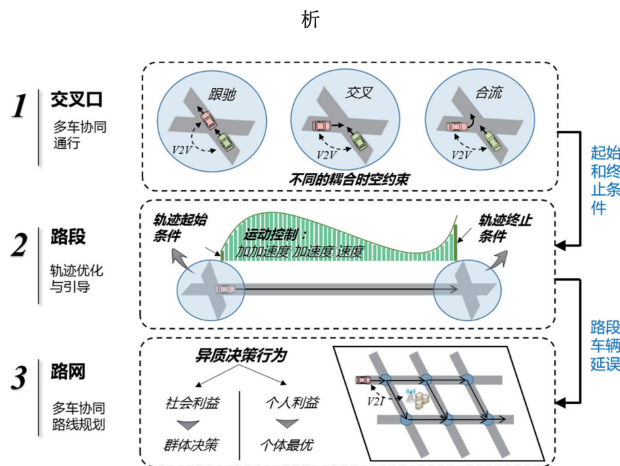


图 6 协作式自主交通组织方法框架

标,提出了车联网环境下的交叉口环境全息表达法,并利用启发式搜索+深度学习的算法实现交叉口的无信号自组织通行,可显著降低通行平均延误及延误车辆比例^[16]。

1.2 共性关键技术

(1) 网联汽车运动状态信息的协同感知技术

智能车联网中,高精度、高可靠的车辆位置、速度等运动状态信息是多车协调安全驾驶模型的基础。传统的测量与信息传输忽略了测量过程中误差及不确定度的影响。基于车辆实测及滤波数据,量化了 GPS、车速、加速度、转向角等信息与相关运动参数的不确定度水平,分析了不确定度传播机制,利用蒙特卡洛方法建立了相关车辆运动参数的分布模型及置信区间(图 7),设计了考虑感知安全裕度不确定度的滑模控制策略来控制队列稳定性。在多车运动状态信息分层融合上,基于车车通信技术构建了车间相对位置模型与几何约束关系,综合考虑车辆的定位数据和相对位置测量值的不确定度,设计容错性联邦卡尔曼滤波器,分析车辆连接数、连接距离、不确定度水平等对车车协同定位精度的影响,通过周围车辆信息分层融合得到更加准确的车车相对定位信息,尤其是提高了 GPS 信号衰弱的情况下的定位精度(图 8)^[17]。

(2) 车车交互式协同控制技术

车车交互式协同控制主要由自车信息采集系统、车车信息交互系统、车载控制器三个模块组成(图 9)。针对车辆状态信息采集特点,分析网联车辆信息粒度要求,利用联合卡尔曼滤波器实现导航定位、毫米波雷达、Mobileye、车身 CAN(Controller Area Network)等多传感器的信息融合,达到厘米级高精度定位。在分析车车信息交互场景需求的基础上,基于 LTE-V(Long Term Evolution-Vehicle)技术实现车辆组网及数据传输,传输内容包括车辆身份、位置、速度、加速度、转向信息等,数据交互频率

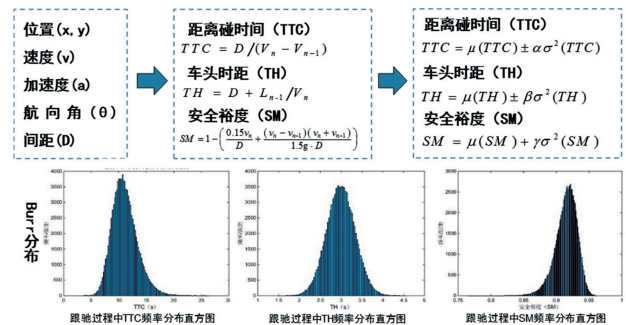


图 7 车辆相关参数的分布模型及置信区间

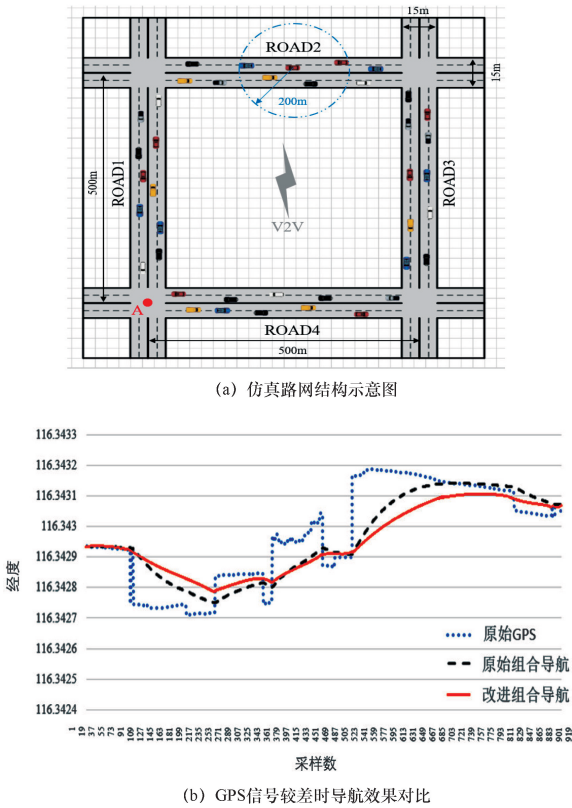


图8 仿真路网结构及测试结果

达 10 Hz, 通信范围达数百米。车载控制器主要包括车辆横向控制器与纵向控制器, 基于交互信息制定安全行车策略并控制车辆运动状态。在协同控制应用方面, 针对车辆跟驰场景, 完成速度控制机构算法设计并标定车载控制器具体控制性能参数; 以基于危险感知量化的跟车模型为核心算法设计车车交互式自适应跟驰系统的速度控制方法, 研究车联网环境下的跟车目标识别算法及速度控制依据; 分析驾驶人行为与车辆运动状态参数信息之间的关系, 研究驾驶人特性学习算法, 实现拟人化的自适应跟驰系统, 最后通过实车测试验证车车交互式自适应跟驰系统的有效性(图 10)。针对平时无信号交叉口安全通行场景, 根据相关交通法规及驾驶员行为特征, 建立车辆通行规则库, 确定冲突车辆的通行顺序; 从交通冲突定义出发, 确定冲突检测的判断条件, 明确冲突检测的数据需求, 针对路口信息已知和路口信息未知两种情况设计了冲突检测算法; 将车辆制动系统的绝对安全时间作为临界指标, 确定了基于冲突时间的严重程度量化方法及相应的冲突点避让车速调节策略; 最后通过实车测试验证算法有效性(图 11)。为了进一步保证安全行驶, 针对驾驶员视觉及传感器盲区, 基于车辆交互信息设计实现盲区辨识与预警算法。



图9 车车交互式协同控制车载系统

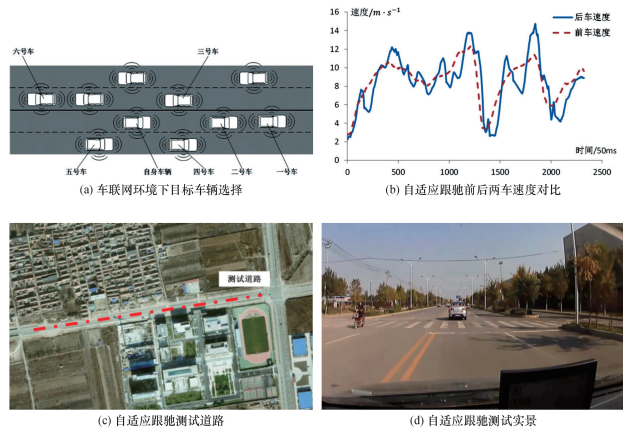


图10 车车交互式车辆跟驰场景

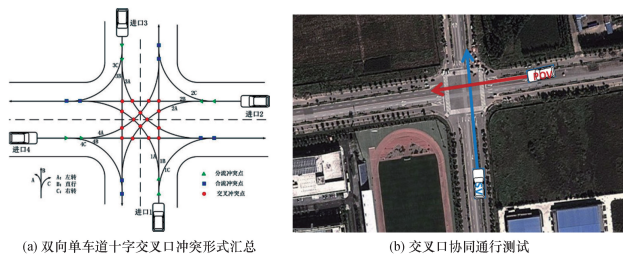


图11 平时无信号交叉口车车协同式安全通行场景

(3) 试验验证平台构建与测试验证技术

实验测试平台既是对车联网系统功能设计和技术可行性进行测试的平台, 也是对车联网理论开展深入研究的基础, 还是对车联网性能提升技术及可

靠性测试验证的工具。项目针对绿色驾驶服务优化,一方面以多智能体技术为支撑,基于 Netlogo 搭建了模拟仿真平台,另一方面搭建了以模型在环、硬件在环、车辆在环为主体的仿真测试架构及平台(图 12)。具体包括:首先完成 Carsim(车辆动力学模型)、Prescan(交通场景、传感器模型)、Simlink(自动驾驶核心算法)三个独立商业软件的集成联调,实现长安 CS55 车型模型在环仿真,其动力学模型整体精度达到 85%;其次沿用传感器模型、场景模型、动力学模型参数,在实时仿真机上延伸出硬件在环测试平台,并建立 MIL 与 HIL 在测试场景上的关联关系,达到测试案例可追溯的目的;最后利用 CarMaker 场景模拟软件、Xpack RoadBox 信号模拟设备、IPG 仿真管理软件以及真实车辆搭建整车虚拟测试平台。针对多车协调决策优化,在分析实车测试需求和测试方法,研究网联车辆的软硬件系统构架的基础上,长安汽车在鱼嘴全球研发中心打造了基于未来智能网联汽车+智慧交通+智慧出行大数据平台一体化的网联车测试平台(图 13),该平台可以实现 V2X(Vehicle to Everything)通信、智能泊车、智能驾驶的测试与研发、智能化园区管控等功能。主要包括 1 个数据资源中心,3 大板块(车端,路端,指挥中心),以及 11 个子系统,可实现不少于 35 种测试场景。

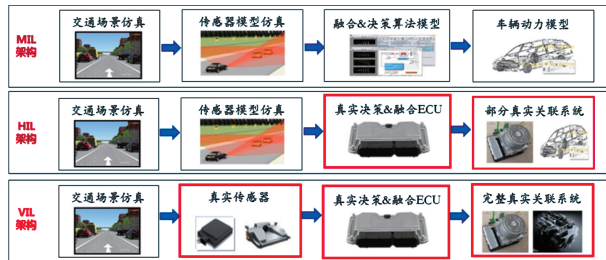


图 12 模型在环、硬件在环、车辆在环仿真测试架构



图 13 智能网联汽车实车测试场地平面图及看板图

2 成果应用与行业影响

2.1 成果应用

项目研发了支持多网络模式的车载及路侧单元,依托我国“基于宽带移动互联网的智能汽车与智慧交通应用示范”工程,以及北京、天津、长春、重庆、武汉、杭州等 5G 车联网示范区建设,搭建 V2X 车联网技术测试验证和服务示范环境,实现大规模车联网集成与应用示范。

本项目持续期间,完成 18 个网联应用场景开发,如表 1 所示,以安全预警和信息提示为主,覆盖中国 V2X 应用层一期应用,同时实现了网联式自动驾驶系统开发及示范运营,基于仿真测试平台和实车测试平台对各应用进行了仿真和实车测试。

项目研究成果有力支撑了长安汽车在相关技术的应用落地。2018 年智博会期间,长安汽车在重庆国博中心首次实现 L4 级自动驾驶技术商用示范体验运营。2018 年 9 月长安汽车参与了无锡 LTE-V2X 城市级示范活动,并与一汽、东风实现了不同车企之间 LTE-V2X 的互联互通演示。2019 年 7 月,实现 L4 级自动驾驶技术在开放道路场景下的示范运营(如图 14)。本项目在车辆协同定位和不确定

表 1 已实现的网联应用场景

序号	应用场景	序号	应用场景
1	前撞预警	2	紧急制动预警
3	交叉路口碰撞预警	4	盲区/换道预警
5	左转辅助	6	逆向超车碰撞预警
7	异常车辆提醒	8	车辆失控预警
9	道路危险状况提示	10	限速预警
11	闯红灯预警	12	弱势交通参与者碰撞预警
13	车速引导	14	车内标牌
15	前方拥堵提醒	16	紧急车辆提醒
17	基于 V2X 的虚拟现实场景重构	18	列队行驶



图 14 长安 L4 网联式自动驾驶汽车示范运营

定性分析、多车协调安全预警与安全辅助控制方法、试验验证平台与测试验证方法等方面的研究成果,为长安汽车自动驾驶技术的示范运营提供了技术支持。

2.2 行业影响

项目依托北京航空航天大学“智能交通技术”科技部重点领域创新团队及重庆长安汽车股份有限公司行业顶尖实验平台,在队伍建设、科研成果、重大应用、合作交流等方面都取得了突出的成绩:资助培养了五十余位青年教师及硕博研究生,其中包括青年长江学者1人,国家自然科学基金优秀青年基金项目获得者1人,中国科协青年人才托举工程入选者2人,北京市优秀青年人才1人。在 *Transportation Research Part A/B/C/D/F*、*Accident Analysis & Prevention*、*IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 等交通领域顶级期刊上发表具有影响力的高水平论文五十余篇,授权发明专利18项,另在发明专利28项,出版学术专著2部,获得国家级科技奖项1项,省部级科技奖励2项。资助成员参加国内外学术会议共63人次,包括TRB、COTA国家交通科技研讨会等;并邀请美国麻省大学、日本名古屋大学的国内外学者学术交流11次。项目取得了突出的创新性研究成果,搭建了面向仿真与实测的智能网联汽车测试平台,建设了智能网联汽车实车测试场地,构建了智能网联基础理论与共性关键技术体系,打造了一支始终在智能网联前沿理论与关键技术领域一线奋战的科研队伍,对于引领国内智能网联基础科学问题研究,持续开展车联网共性关键技术研究提供了重要支撑。项目对核心基础理论和关键技术的研究与突破,极大地促进了现代交通技术领域科技进步,有力支撑了我国智能交通产业发展。

项目积极参与国内外智能网联汽车行业组织的技术研讨、标准制定等相关工作。具体包括:参与汽标委智能网联汽车分标委相关标准制定工作,其中主持3项国标(《汽车驾驶自动化分级》、《智能网联汽车术语和定义》和《乘用车紧急转向辅助系统性能要求及试验方法》),同时参与多项相关网联汽车标准制修订工作;参与中国智能网联汽车产业创新联盟V2X工作组相关标准制定和联合演示活动,主笔团标《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》和《基于LTE的车联网无线通信技术 直接通信系统技术要求》的起草工作;联合产业上下游企业参与C-V2X“四跨”互联互通示范演示活动;加入5GAA组织,作为观察员单

位参与5GAA国际研讨会,与国外同行共同推动C-V2X技术产业化落地。

3 总结

项目面向智能车联网基础理论与共性关键技术,以实现高效绿色出行驾驶服务和安全的多车协调驾驶为目标,在系统分析国内外智能车联网研究现状的基础上,针对当前理论技术亟需解决的不足及问题,从网联汽车运动状态信息的协同感知、智能车联网通讯和动态自组网、车联网状态下的绿色驾驶服务优化、基于车联网的多车协调安全驾驶决策优化以及试验验证平台与测试验证方法五个方面开展研究,圆满完成项目预期计划任务。

课题的特色与创新之处主要体现在:(1)通过分层融合GPS/北斗、雷达、惯导、V2X等多源信息,提升了车辆运动状态感知的精度并分析和量化了其不确定度,为实现安全高效约束下的车联网应用模型精细化设计奠定基础;(2)建立适用于大规模、多层次、多业务需求的车联网通信系统的数据连接、通信链路、网络优化机制,整合各层次资源,实现车联网通信系统的性能全面提升;(3)构建综合考虑行程时间可靠性和油耗排放约束的出行路径选择模型,实现网联车辆高可靠且低油耗的出行;(4)建立主观危险量化的跟驰模型,实现拟人的直道与弯道工况下的多车协调安全控制,使安全预警阈值及车辆控制过程更符合驾驶人的生理心理特征,提升驾驶人的驾驶体验;(5)针对多车协调安全驾驶决策与绿色驾驶服务等重点分析场景,分别搭建实车和仿真测试平台,为深入开展车联网研究、提升车联网性能提供了基础条件。

项目对核心基础理论和关键技术的研究与突破,极大地促进现代交通技术领域科技进步,对于引领国内智能网联基础科学问题研究,持续开展车联网共性关键技术研究提供了重要支撑,有力促进了我国智能交通产业发展。

参 考 文 献

- [1] 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. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1—14.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通工程学术研究综述·2016. 中国公路学报, 2016, 29(6): 1—161.
- [3] 王云鹏,鲁光泉,于海洋. 车路协同环境下的交通工程. 中国工程科学, 2018, 20(2): 106—110.
- [4] 谢伯元,李克强,王建强,等. “三网融合”的车联网概念及其在汽车工业中的应用. 汽车安全与节能学报, 2013, 4(4): 348—355.

- [5] 张军, 王云鹏, 鲁光泉, 等. 中国综合交通工程科技 2035 发展战略研究. 中国工程科学, 2017, 19(1): 43—49.
- [6] 陈山枝, 胡金玲, 时岩, 等. LTE-V2X 车联网技术、标准与应用. 电信科学, 2018, 34(4): 1—11.
- [7] 刘宗巍, 匡旭, 赵福全. 中国车联网产业发展现状、瓶颈及应对策略. 科技管理研究, 2016, 36(4): 121—127.
- [8] Tian D, Zhou J, Sheng Z, et al. From cellular attractor selection to adaptive signal control for traffic networks. Scientific Reports, 2016, 6: 23048.
- [9] Tian D, Zhou J, Sheng Z, et al. Robust energy-efficient MIMO transmission for cognitive vehicular networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65 (6): 3845—3859.
- [10] Tian D, Zhou J, Wang Y, et al. Modeling chain collisions in vehicular networks with variable penetration rates. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 69:36—59.
- [11] Cai P, Wang Y, Lu G. Tunable and transferable RBF model for short-term traffic forecasting. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(11): 4134—4144.
- [12] Chen P, Tong R, Lu G, et al. The α -reliable path problem in stochastic road networks with link correlations: a moment-matching-based path finding algorithm. Expert Systems with Applications, 2018, 110: 20—32.
- [13] Dai R, Lu Y, Ding C, et al. A simulation-based approach to investigate the driver route choice behavior under the connected vehicle environment. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2018, 65: 548—563.
- [14] Dai Z, Liu X, Chen Z, et al. A predictive headway-based bus-holding strategy with dynamic control point selection: a cooperative game theory approach. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 125: 29—51.
- [15] Wang Y, Zhang J, Lu G. Influence of driving behaviors on the stability in car following. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 20(3): 1081—1098.
- [16] Wang Y, Cai P, Lu G. Cooperative autonomous traffic organization method for connected automated vehicles in multi-intersection road networks. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 111: 458—476.
- [17] Wang Y, Duan X, Tian D, et al. A DSRC-based vehicular positioning enhancement using a distributed multiple-model kalman filter. IEEE Access, 2016, 4: 8338—8350.

Research and Application of Fundamental Theories and Key Technologies of Intelligent Internet of Vehicles

Wang Yunpeng^{1*} Lu Guangquan¹ Chen Peng¹ Li Zengwen²

1. Beihang University, Beijing 100191

2. Chongqing Chang'an Automobile Company Limited, Chongqing 400023

Abstract The internet of vehicles serves as a new generation of safety technology after the seat belt and airbag, which brings together intelligent vehicles, ITS and mobile internet technologies. It has great potential economic and social benefits for improving personal travel and driving experience. Supported by the China Automobile Industry Innovation and Development Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (U1564212), this project was conducted through five aspects, i. e., traffic state sensing of connected vehicles, vehicular communication and VANETs construction, green driving service optimization, safe driving decision optimization, simulation platform construction and demonstration experiments. It has made key technological breakthroughs in high-precision vehicle positioning based on hierarchical fusion of multi-vehicle motion state information, hierarchical distributed communication network and access in large-scale heterogeneous vehicle network, traffic state estimation under V2V environment, spatial-temporal analysis of multi-vehicle hazard accounting for positioning errors. The project achievements have been widely applied in the construction of the Internet of vehicles integration and application demonstration zone and the development of Internet of vehicles application scenarios, providing strong support for the industrialization of intelligent Internet of vehicles technology.

Keywords internet of vehicles; traffic state sensing; cooperative vehicle infrastructure; ad-hoc network; traffic safety

(责任编辑 李华一)

* Corresponding Author, Email: ypwang@buaa.edu.cn