

智能网联汽车 (ICV) 技术的发展现状及趋势

李志强¹, 戴一凡², 李升波¹, 边明远¹

(1. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084, 中国;

2. 清华大学 苏州汽车研究院, 苏州 215200, 中国)

摘要: 综述了智能网联汽车 (ICV) 技术的发展现状及趋势。ICV 的体系架构包括价值链、技术链与产业链。ICV 的 4 个发展阶段是: 自主式驾驶辅助、网联式驾驶辅助、人机共驾、高度自动 / 无人驾驶; 关键技术有: 环境感知、智能决策、控制执行、人机共驾、通信与平台、信息安全等。由于 ICV 是未来汽车技术发展的一个重要方向, 其技术与产业发展是中国汽车工业转型升级的重要机遇; 因而, 中国要发展智能网联汽车, 就应该充分结合本国体制优势, 依托顶层设计。

关键词: 智能网联汽车 (ICV); 驾驶辅助; 人机共驾; 无人驾驶

中图分类号: U 469.79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1674-8484.2017.01.001

State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles

LI Keqiang¹, DAI Yifan², LI Shengbo¹, BIAN Mingyuan¹

(1. State Key Lab of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Suzhou Automotive Research Institute, Tsinghua University, Suzhou 215200, China)

Abstract: The state-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicle (ICV) are illustrated. The ICV system architecture included the value chain, technology chain and industrial chain. The four stages of ICVs were the advanced assistance, connected assistance, cooperative automation and highly/fully automated driving. Some key technologies of ICVs were introduced such as environmental perception, decision making, dynamical control, human-machine copilot, V2X communication and platform, cyber security. Therefore, China should develop the ICV industry rely on the top-down design by using the national institutional advantages because the ICV will be an important direction of the automotive technology in the future, and the ICV development is a great opportunity for the transformation and upgrading of China's automobile industry.

Key words: intelligent and connected vehicle (ICV); driver assistance; cooperative driving; driverless car

收稿日期 / Received : 2017-02-28。

基金项目 / Supported by : 国家重点研发计划 (2016YFB0101102, 2016YFB0100906)。

第一作者 / First author : 李志强 (1963—), 男 (汉), 四川, 教授, E-mail: likq@tsinghua.edu.cn。

以移动互联、大数据及云计算等技术为代表的新一轮科技革命方兴未艾。在此背景下,中国政府提出了“中国制造 2025”及“互联网+”发展战略,大力推动产业转型升级和结构优化调整。汽车产业作为国民经济的支柱产业,其自身规模大、带动效应强、国际化程度高、资金技术人才密集,必将成为新一轮科技革命以及中国制造业转型升级的重要支柱。

智能网联汽车 (intelligent and connected vehicle, ICV) 是指搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置,并融合现代通信与网络技术,实现车与 X(车、路、人、云等) 智能信息交换、共享,具备复杂环境感知、智能决策、协同控制等功能,可实现安全、高效、舒适、节能行驶,并最终实现替代人来操作的新一代汽车^[1]。智能网联汽车可以提供更安全、更节能、更环保、更便捷的出行方式和综合解决方案,是国际公认的未来发展方向和关注焦点。智能网联汽车、智能汽车与车联网、智能交通等概念间的相互关系如图 1 所示。智能汽车隶属于智能交通大系统,而智能网联汽车则属于智能汽车与车联网的交集。

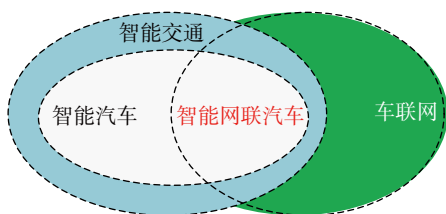


图 1 智能汽车、智能网联汽车与车联网等的相互关系

本文欲梳理智能网联汽车 (ICV) 的体系架构, 包括其价值链、技术链与产业链, 阐述 ICV 发展的 4 个阶段, 分析汽车智能化与网联化关键技术发展现状及其趋势, 并对中国 ICV 技术与产业发展提出思考与建议。

1 智能网联汽车 (ICV) 的体系架构

智能网联汽车 (ICV) 集中运用了汽车工程、人工智能、计算机、微电子、自动控制、通信与平台等技术, 是一个集环境感知、规划决策、控制执行、信息交互等于一体的高新技术综合体, 拥有相互依存的价值链、技术链和产业链体系。

1.1 智能网联汽车 (ICV) 的价值链

智能网联汽车 (ICV) 在提高行车安全、减轻驾驶员负担方面具有重要作用, 并有助于节能环保和提高交通效率。研究表明^[1], 在智能网联汽车的初级阶段, 通过先进智能驾驶辅助技术有助于减少 30% 左右的交通事故, 交通效率提升 10%, 油耗与排放分别降低 5%。进入智能网联汽车的终极阶段, 即完全自动驾驶阶段, 甚至可以完全避免交通事故, 提升交通效率 30% 以上, 并最终把人从枯燥的驾驶任务中解放出来, 这也是智能网联汽车最吸引人的价值魅力所在。

1.2 智能网联汽车 (ICV) 的技术链

从技术发展路径来说, 智能汽车分为 3 个发展方向: 网联式智能 (connected vehicle, CV)、自主式智能 (autonomous vehicle, AV), 及前二者的融合, 即智能网联汽车 (connected and automated vehicle, CAV 或 intelligent and connected vehicle, ICV), 如图 2 所示^[2]。

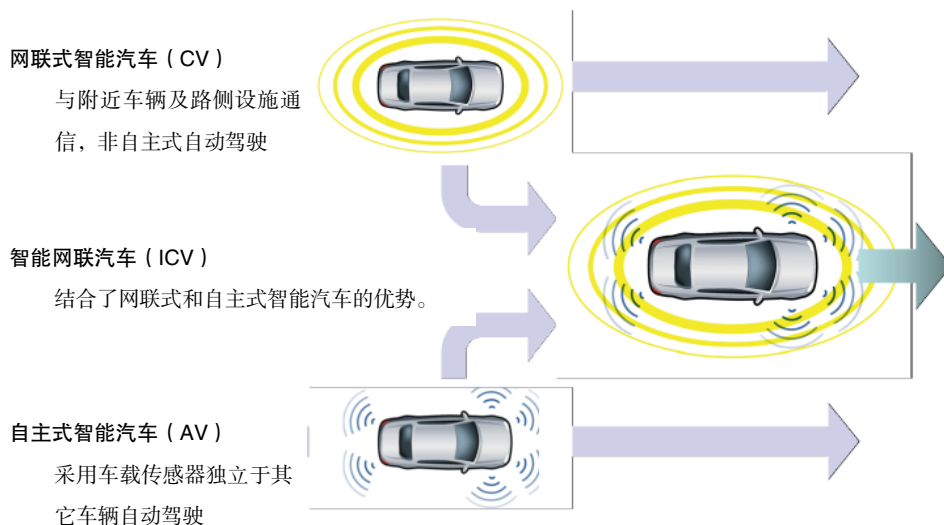


图 2 智能汽车的 3 种技术路径^[2]

智能网联汽车融合了自主式智能汽车与网联式智能汽车的技术优势, 涉及汽车、信息通信、交通等诸多领域, 其技术架构较为复杂, 可划分为“三横两纵”式技术架构: “三横”是指智能网联汽车主要涉及的车辆、信息交互与基础支撑 3 个领域技术, “两纵”是指支撑智能网联汽车发展的车载平台以及基础设施条件; 如图 3 所示^[1]。

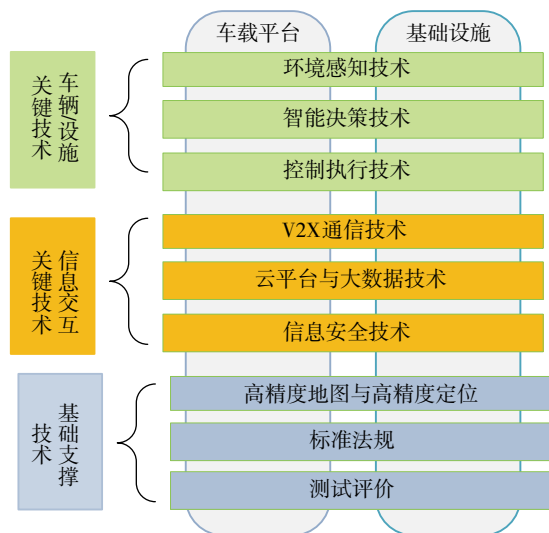


图 3 智能网联汽车“三横两纵”技术架构^[1]

ICV 的“三横”架构涉及的 3 个领域的关键技术可以细分为以下 9 种:

1) 环境感知技术, 包括利用机器视觉的图像识别技术, 利用雷达 (激光、毫米波、超声波) 的周边障碍物检测技术, 多源信息融合技术, 传感器冗余设计技术等。

2) 智能决策技术, 包括危险事态建模技术, 危险预警与控制优先级划分, 群体决策和协同技术, 局部轨迹规划, 驾驶员多样性影响分析等。

3) 控制执行技术, 包括面向驱动 / 制动的纵向运动控制, 面向转向的横向运动控制, 基于驱动 / 制动 / 转向 / 悬架的底盘一体化控制, 融合车联网 (V2X) 通信及车载传感器的多车队列协同和车路协同控制等。

4) V2X 通信技术, 包括车辆专用通信系统, 实现车车间信息共享与协同控制的通信保障机制, 移动自组织网络技术, 多模式通信融合技术等。

5) 云平台与大数据技术, 包括智能网联汽车云平台架构与数据交互标准, 云操作系统, 数据高效存储和检索技术, 大数据的关联分析和深度挖掘技术等。

6) 信息安全技术, 包括汽车信息安全建模技术, 数据存储、传输与应用三维度安全体系, 汽车信息安全测试方法, 信息安全漏洞应急响应机制等。

7) 高精度地图与高精度定位技术, 包括高精度地图数据模型与采集式样、交换格式和物理存储的标准化技术, 基于北斗地基增强的高精度定位技术, 多源辅助定位技术等。

8) 标准法规, 包括 ICV 整体标准体系以及设计汽车、交通、通信等各领域的关键技术标准。

9) 测试评价, 包括 ICV 测试评价方法与测试环境建设。

1.3 智能网联汽车 (ICV) 的产业链

ICV 的产品体系可分为传感系统、决策系统、执行系统 3 个层次, 分别可类比人类的感知器官、大脑以及手脚, 如图 4 所示。

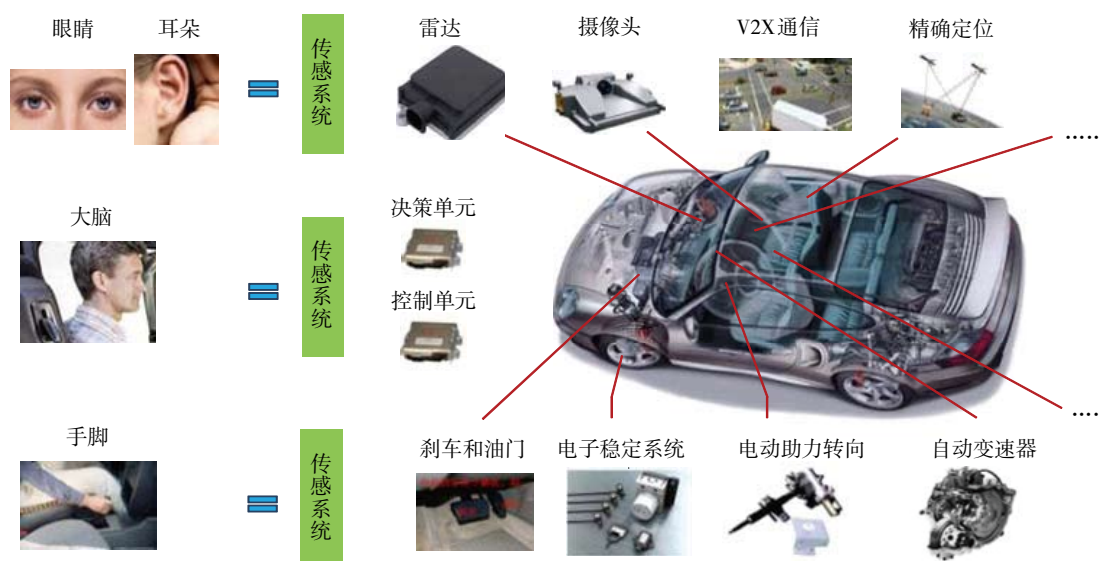


图 4 智能网联汽车的 3 个产品层次

ICV 的产业链涉及汽车、电子、通信、互联网、交通等多个领域,按照产业链上下游关系主要包括:

- 1) 芯片厂商,开发和提供车规级芯片系统,包括环境感知系统芯片、车辆控制系统芯片、通信芯片等。
- 2) 传感器厂商,开发和供应先进的传感器系统,包括机器视觉系统、雷达系统(激光、毫米波、超声波)等。
- 3) 汽车电子/通信系统供应商,能够提供智能驾驶技术研发和集成供应的企业,如自动紧急制动、自适应巡航、V2X 通信系统、高精度定位系统等。
- 4) 整车企业,提出产品需求,提供智能汽车平台,开放车辆信息接口,进行集成测试。
- 5) 平台开发与运营商,开发车联网服务平台、提供平台运营与数据挖掘分析服务。
- 6) 内容提供商,高精度地图、信息服务等的供应商。

2 智能网联汽车(ICV)发展的4个阶段

ICV 的发展可大致分为:自主式驾驶辅助(对应美国汽车工程师学会(SAE)分级 L1—L2)、网联式驾驶辅助(对应 SAE 分级 L1—L2)、人机共驾(对应 SAE 分级 L3)、高度自动/无人驾驶(对应 SAE 分级 L4—L5) 4 个阶段。目前在全球范围内,自主式驾驶辅助系统已经开始大规模产业化,网联化技术的应用已经进入大规模测试和产业化前期准备阶段,人机共驾技术和无人驾驶技术还处于研发和小规模测试阶段。

2.1 自主式驾驶辅助(ADAS)

自主式驾驶辅助系统(advanced driver assistance systems, ADAS)是指依靠车载传感系统进行环境感知并对驾驶员进行驾驶操作辅助的系统(广义上也包括网联式驾驶辅助系统),目前已经得到大规模产业化发展,主要可分为预警系统与控制系统两类^[3-5]。其中常见的预警类系统包括前向碰撞预警(forward collision warning, FCW)、车道偏离预警(lane departure warning, LDW)、盲区预警(blind spot detection, BSD)、驾驶员疲劳预警(driver fatigue warning, DFW)、全景环视(top view system, TVS)、胎压监测(tire pressure monitoring system, TPMS)等。常见的控制类系统包括车道保持系统(lane keeping system, LKS)、自动泊车辅助(auto parking system, APS)、自动紧急刹车(auto emergency braking, AEB)、自适应巡航(adaptive cruise control, ACC)^[6-10]等。

美日欧等发达国家和地区已经开始将 ADAS 系

统引入了其相应的新车评价体系。美国新车评价规程(United States New Car Assessment Program, US-NCAP)从 2011 年起引入 LDW 与 FCW 作为测试加分项,美国公路安全保险协会(IIHS)从 2013 年起将 FCW 系统作为评价指标之一;而欧洲新车评价规程(European New Car Assessment Program, E-NCAP)也从 2014 年起引入了 LDW/LKA 与 AEB 系统的评价,2016 年增加了行人防撞 AEB 的测试,并将在 2018 年加入自动车防撞 AEB 系统的测试。2014 年起,汽车驾驶辅助技术已经成为获取 E-NCAP 四星和五星的必要条件。中国的 C-NCAP 已将 LDW/FCW/AEB 等驾驶辅助系统纳入其评价体系之中。

在引入新车评价体系之外,各国也纷纷开始制定强制法规推动 ADAS 系统安装。2015 年 11 月开始,欧洲新生产的大型商用车将强制安装车道偏离警告系统(LDW)及车辆自动紧急制动系统(AEB)。2016 年 5 月起,美国各车企将被强制要求对其生产的 10% 的车辆安装后视摄像头,这一比例在随后 2 年中将快速提升至 40% 与 100%。而从 2017 年开始,中国也将逐步在大型客车上开始强制安装 LDW 与 AEB 系统。

从产业发展角度,目前 ADAS 核心技术与产品仍掌握在境外公司手中,尤其是在基础的车载传感器与执行器领域,博世、德尔福、天合、法雷奥等企业垄断了大部分国内市场,Mobileye 等新兴的高技术公司在环境感知系统方面占据了全球大部分市场;TTE 等一些中国台湾省企业也有一定市场份额。近年来,中国内地也涌现了一批 ADAS 领域的自主企业,在某些方面与境外品牌形成了一定竞争,但总体仍有较大差距。

2.2 网联式驾驶辅助

网联式驾驶辅助系统是指依靠信息通信技术(information communication technology, ICT)对车辆周边环境进行感知,并可对周围车辆未来运动进行预测^[11],进而对驾驶员进行驾驶操作辅助的系统^[12]。通过现代通信与网络技术,汽车、道路、行人等交通参与者都已经不再是孤岛,而是成为了智能交通系统中的信息节点。

在美国、欧洲、日本等汽车发达国家和地区,基于车—路通信(vehicle-to-infrastructure, V2I)/车—车通信(vehicle-to-vehicle, V2V)的网联式驾驶辅助系统正在进行实用性技术开发和大规模试验场测试。典型的是美国在密歇根安娜堡开展的示范测试,在美国交通部与密歇根大学等支持下, Safety Pilot 项目于 2013 年完成了第 1 期 3 000 辆车的示范测试,目前正在开展

第2期9 000辆以上规模的示范测试,并建设了智能汽车模拟城市(m-city),作为智能网联汽车的专用测试场。通过此示范测试,得到了车联网技术能够减少80%交通事故的结论,直接推动了美国政府宣布将强制安装车车通信系统以提高行驶安全,预计相关强制标准将于2020年左右开始实施。美国交通部在2015年递交国会的报告中预测,到2040年美国90%的轻型车辆将会安装专用短距离通信(dedicated short range communication, DSRC)系统^[13]。

除美国外,欧洲以及日本等都开展了大量对车联网技术的研究与应用示范。欧盟eCoMove项目展示了车联网技术对于降低排放和提高通行效率的作用,综合节油效果可达到20%,sim^{TD}项目2014年起开展“荷兰—德国—奥地利”之间的跨国高速公路测试,验证基于车联网的智能安全系统。日本Smartway系统2007年开始使用,可提供导航、不停车收费(electronic toll collection, ETC)、信息服务、驾驶辅助等多种功能,基于车路协同的驾驶安全支援系统(driving safety support systems, DSSS)2011年开始使用,可以提供盲区碰撞预警、信号灯预警、停止线预警等多种功能。

中国清华大学、同济大学、长安汽车等高校与企业合作,在国家“八六三”高新技术研究开发计划项目的支持下开展了车路协同技术应用研究,并进行了小规模示范测试,各汽车企业也在开展初步研究^[14-16]。2015年开始,在工业和信息化部支持下,上海、北京、重庆等多地都开始积极建设智能网联汽车测试示范区,网联式驾驶辅助系统均为测试区设计时考虑的重要因素。

中国华为、大唐等企业力推的车网通信长期演进技术(long term evolution-vehicle, LTE-V)系统相比DSRC具有兼容蜂窝网、可平稳过渡至5G系统等优势,目前已发展成为我国特色的车联网通信系统,并在国际市场与DSRC形成了竞争之势。但中国内地也存在缺少类似美日欧的大型国家项目支撑、各企业间未能形成合力等问题,导致网联式驾驶辅助系统发展相对较慢。

2.3 人机共驾

人机共驾指驾驶人和智能系统同时在环,分享车辆控制权,人机一体化协同完成驾驶任务。与一般的驾驶辅助系统相比,共驾型智能汽车由于人机同为控制实体,双方受控对象交联耦合,状态转移相互制约,具有双环并行的控制结构,因此要求系统具备更高的智能化水平。系统不仅可以识别驾驶人的意图,实现行车决策的步调一致,而且能够增强驾驶人的操纵能力,

减轻其操作负荷。

广义的人机共驾包含感知层、决策层和控制层3个层次。感知层主要是利用特定传感器(如:超声波雷达、摄像头、红外热释电等)向人提供环境信息,增强人的感知能力^[17-20]。例如:Mulder等通过方向盘的力反馈协助驾驶人进行车道保持,既减轻了驾驶负担又提高了车辆安全性^[17]。决策层主要技术包括驾驶人决策意图识别、驾驶决策辅助和轨迹引导^[20-21]。例如:Morris和Doshi等人采用多层压缩方法,建立基于实际道路的驾驶人换道意图预测模型,结果表明系统能够在实际换道行为发生前3s有效预测驾驶人换道意图^[21]。Thomas等人考虑交通管制和物理避障等约束,结合车辆非线性动力学特性,根据模型预测控制方法提出预测轨迹引导模型,辅助驾驶员决策并利用人机交互进行轨迹引导^[22]。人机共驾主要指控制层的控制互补,不同于传统驾驶过程,人机共驾中狭义的人和系统同时在环,驾驶人操控动力学与智能系统操控动力学互相交叉,交互耦合,具有双环交叉的特点。

2.4 高度自动/无人驾驶

处于高度自动/无人驾驶阶段的智能汽车,驾驶员不需要介入车辆操作,车辆将会自动完成所有工况下的自动驾驶。其中高度自动驾驶阶段(对应SAE分级L4),车辆在遇到无法处理的驾驶工况时,会提示驾驶员是否接管,如驾驶员不接管,车辆会采取如靠边停车等保守处理模式,保证安全。在无人驾驶阶段(对应SAE分级L5),车辆中可能已没有驾驶员或乘客,无人驾驶系统需要处理所有驾驶工况,并保证安全。目前以谷歌为代表的互联网技术公司,其发展思路是跨越人机共驾阶段,直接推广高度自动/无人驾驶系统,而传统汽车企业大多数还是按照渐进式发展路线逐级发展。

3 汽车智能化与网联化关键技术的发展现状

3.1 环境感知技术

环境感知系统的任务是利用摄像头、毫米波雷达、激光雷达、超声波等主要车载传感器以及V2X通信系统感知周围环境,通过提取路况信息、检测障碍物,为智能网联汽车提供决策依据。

由于车辆行驶环境复杂,当前感知技术在检测与识别精度方面无法满足自动驾驶发展需要,深度学习被证明在复杂环境感知方面有巨大优势^[23-27],许多学者采用“深度学习”方法对行人、自行车等传统算法识别较为困难的目标物的识别方法进行了研究^[28-33]。

在传感器领域,激光雷达由于具有分辨率高的优势,已经成为越来越多自动驾驶车辆的标配传感器,低成本小型化的固态激光雷达成为研发热点。此外,针对单一传感器感知能力有限,目前涌现了不同车载传感器融合的方案,用以获取丰富的周边环境信息,具有优良的环境适应能力。

高精度地图与定位也是车辆重要的环境信息来源。

目前中国内地几大图商都在积极推进建设面向自动驾驶的高精度地图。基于北斗地基增强系统的高精度定位系统也已在中国内地范围内开展应用,将为自动驾驶车辆提供低成本广覆盖的高精度定位方案。

针对复杂行驶环境下行人及骑车人的有效识别,清华大学研究团队建立了基于车载图像的行人及骑车人联合识别方法,其架构如图 5 所示^[28]。

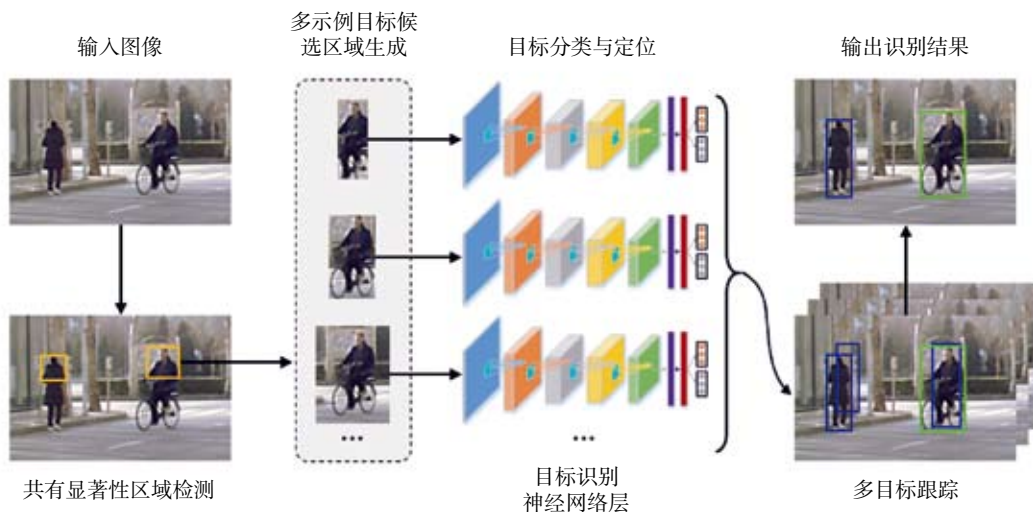


图 5 行人及骑车人联合识别架构^[28]

行人及骑车人的联合识别架构主要包括图像输入、目标候选区域选择、目标检测、多目标跟踪及结果输出等功能模块。目标候选区域选择模块的作用是从输入图像中选出可能包含待检测目标的区域,该过程要在尽量少地选择背景区域的前提下,保证较高的目标召回率。目标检测模块主要作用是在保证尽量少误检和漏检的同时,将这些候选区域正确分类为待检测目标与背景,并进一步优化目标定位。该模块基于快速区域卷积神经网络目标检测框架,使用综合考虑难例提取、多层特征融合、多目标候选区域输入等多种改进方法的网络结构模型,可以将输入目标候选区域对应的行人、骑车人及背景清楚区分,并实现检测目标定位的回归优化。多目标跟踪模块的作用是综合连续时间内的目标检测结果,先借助 P-N 专家在线学习方法,实现单个跟踪目标的在线学习与检测,再在粒子滤波目标跟踪方法的基础上,融合离线检测器及在线检测器的检测结果,实现多类型目标的长时间稳定跟踪。

为验证行人及骑车人算法效果,文献[28]建立了完整的行人及骑车人识别数据库。在划分的测试数据集上进行了充分的行人及骑车人识别算法对比验证。

3.2 自主决策技术

决策系统的任务是根据全局行车目标、自车状态及环境信息等,决定采用的驾驶行为及动作的时机。决策机制应在保证安全的前提下适应尽可能多的工况,进行舒适、节能、高效的正确决策。常用的决策方法包括有状态机、决策树、深度学习、增强学习等^[34-36]。

状态机是一种简便的决策方法,其用有向图表示决策机制。状态机的优点在于:具有高可读性,能清楚表达状态间的逻辑关系,在状态明确且较少时设计简单;缺点在于:需要人工设计,在状态复杂时性能不易保证,不能用机器学习。目前的自动驾驶系统多针对部分典型工况,状态迁移不是特别复杂,故采用状态机方法进行决策的案例较多。

决策树是一种简单但是广泛使用的分类器,从根到叶子节点实现分类,每个非叶子节点为一个属性上的测试,边为测试的结果。决策树具有可读的结构,同时可以通过样本数据的训练来建立,但是有过拟合的倾向,需要广泛的数据训练。在部分工况的自动驾驶上应用,效果与状态机类似。

深度学习与增强学习是热门的机器学习方法。在

处理自动驾驶决策方面, 它能够通过大量的学习实现对复杂工况的决策, 并能进行在线的学习优化; 但是其综合性能不易评价, 对未知工况的性能也不易明确。深度学习由于需要较多的计算资源, 一般是计算机与互联网领域研究自动驾驶采用的热门技术。

3.3 控制执行技术

控制系统的任务是控制车辆的速度与行驶方向, 使其跟踪规划的速度曲线与路径。现有自动驾驶汽车多数针对常规工况, 因而较多采用传统的控制方法, 如比例—积分—微分 (proportion-integral-derivative, PID) 控制、滑模控制、模糊控制、模型预测控制、自适应控制、鲁棒控制等^[37-40]。这些控制方法性能可靠、计算效率高, 已在主动安全系统中得到应用。对于现有的控制器, 工况适应性是一个难点, 可行的方法是: 根据工况参数进行控制器参数的适应性设计, 如根据车速规划与参考路径曲率调整控制器参数, 可灵活地调整不同工况下的性能。线控执行机构是实现车辆自动控制的关键所在。国内目前对制动、转向系统关键技术已有一定研发基础, 但是相比博世、德尔福等国外大型企业, 在控制稳定性、产品一致性和市场规模方面仍有较大差距。

1) 多目标协调式自适应巡航控制

自适应巡航控制系统中, 同时具备自动跟车行驶、低燃油消耗和符合驾驶员特性三类功能对于全面提升行车安全性、改善车辆燃油经济性、减轻驾驶疲劳强度具有重要的意义。目前的研究多针对单一功能的实现, 未考虑三者之间的制约关系, 以及车辆建模的不确定性和驾驶员行为的非线性, 这导致现有的线性最优控制方法难以解决三类功能之间的矛盾性。

针对此问题, 文献 [41-42] 的研究首次提出并建立了车辆多目标协调式自适应巡航控制 (multi-objective coordinated adaptive cruise control, MOCACC) 系统, 其控制架构如图 6 所示。

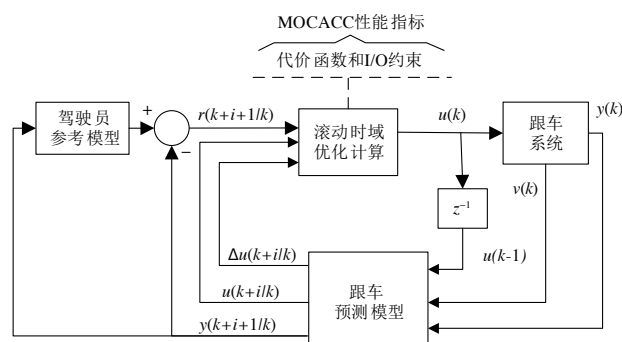


图6 MOCACC 控制构架

仿真与实车实验结果表明, 所开发的多目标协调式自适应巡航控制系统, 在保障跟踪性能的前提下可有效降低车辆油耗, 且符合期望车距、动态跟车和乘坐舒适性等多类驾驶员特性。图7是MOCACC系统与传统自适应巡航控制 (adaptive cruise control, ACC) 系统的性能对比图。其中: LQACC 为线性二次型自适应巡航控制系统。

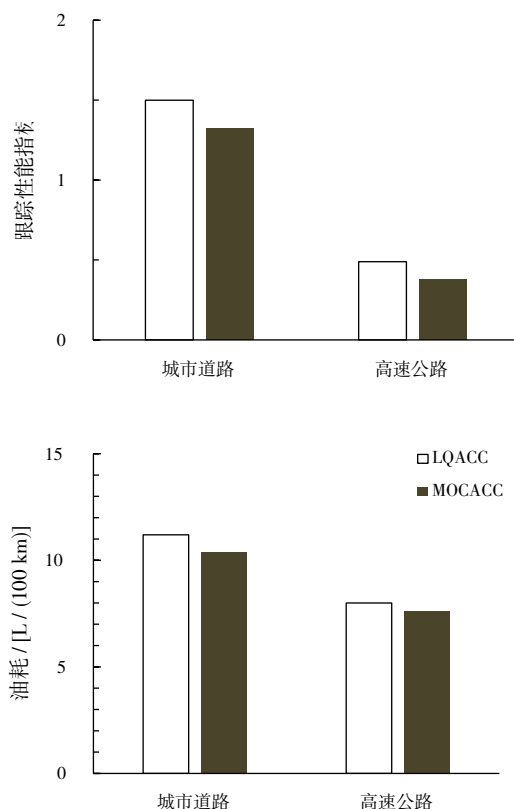


图7 MOCACC 的性能提升效果

2) 协同式多车队列控制

车辆队列化是将单一车道内的相邻车辆进行编队, 根据相邻车辆信息自动调整该车辆的纵向运动状态, 最终达到一致的行驶速度和期望的构型。一种行之有效的方法是多智能体系统 (multi-agent system, MAS) 方法。在控制领域中, 多智能体系统是由多个具有独立自主能力的智能体, 通过一定的信息拓扑结构相互作用而形成的一种动态系统。用多智能体系统方法来研究车辆队列的一种框架是“四元素”模型, 如图8所示^[43]。

车辆队列可以显著降低油耗、改善交通效率以及提高行车安全性。文献 [44] 设计了一类适用于中长距和中速工况需求, 对车辆位置控制的精度要求低 (车距误差 ± 5 m 即可), 而且整体节能效果不低于 10% 的周

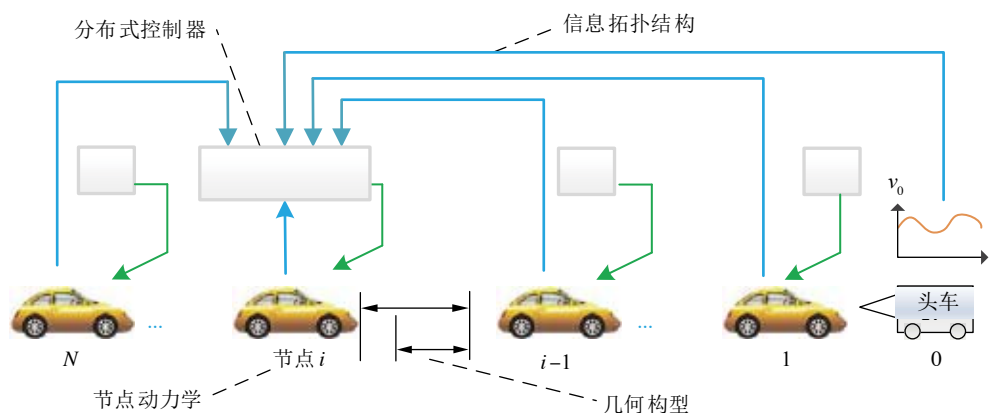


图8 车辆队列的“四元素”模型

期型节能控制方案。控制策略又称加速—滑行式策略 (pulse and gliding, PnG), 首先提升发动机负荷至最佳工作点, 使车辆加速至较高速度, 然后将发动机置于怠速状态, 让车辆滑行至原速度; 周期重复这一过程, 利用车身实现动能的存储与释放, 达到节能效果^[34]。对于车辆队列而言, 周期驾驶实现了车辆动力系特性与车辆运动状态的最佳动态匹配。

3.4 人机共驾技术

控制层的控制互补是目前人机共驾领域的核心关注点。人机共驾人机并行控制, 双方操控输入具有冗余和博弈特征。另一方面, 由于驾驶人行为特性 (如决策意图和操控发力等) 的研究不足以及周车环境信息的缺失, 传统动力学安全控制系统无法扩展至更广区域。因此, 在传统主动安全系统中融入驾驶决策识别及周车轨迹预测信息, 构建包含动力学稳定性风险和运动学碰撞性风险的双重安全包络控制系统, 是提高人机共驾行驶稳定性和主动安全性的核心。因此, 控制层的人机共驾技术按照系统功能, 可以分为共享型控制和包络型控制。

共享型控制指人机同时在线, 驾驶人与智能系统的控制权随场景转移, 人机控制并行存在。主要解决因控制冗余造成的人机冲突, 以及控制权分配不合理引起的负荷加重等问题。包络型控制指通过获取状态空间的安全区域和边界条件形成控制包络, 进而对行车安全进行监管, 当其判定可能发生风险时进行干预, 从而保证动力学稳定性和避免碰撞事故。德国亚琛工业大学学者, 模仿人车共驾过程, 提出了“松、紧”两种共驾模式, 探讨了控制权随场景转移的分配机制^[45]。美国斯坦福大学学者, 提出构造稳定性安全区域和碰撞性安全区域, 研究了共驾汽车临界危险的预防和干

预机制^[46]。中国的清华大学、吉林大学和第一汽车集团公司等高校与企业合作, 开展了共享控制型的人机共驾研究^[47]。人机共驾技术属于智能汽车领域的新研究方向, 国内外研究多数停留于原理论证与概念演示阶段, 尚缺乏全面系统的基础理论支撑。

3.5 通信与平台技术

车载通信的模式, 依据通信的覆盖范围可分为车内通信、车际通信和广域通信。车内通信, 从蓝牙技术发展至 Wi-Fi 技术和以太网通信技术; 车际通信, 包括专用的短程通信 (DSRC) 技术和正在建立标准的车际通信长期演进技术 (long term evolution-vehicle, LTE-V), LTE-V 也是 4G 通信技术在汽车通信领域的一个演化版本。广域通信, 指目前广泛应用在移动互联网领域的 3G、4G 等通信方式。通过网联无线通信技术, 车载通信系统将更有效地获得的驾驶员信息、自车的姿态信息和汽车周边的环境数据, 进行整合与分析。

国外在车联网平台的技术标准化方面比较完善, 典型的平台架构是由宝马公司牵头联合 Connexis、WirelessCar 共同开发而成的车联网平台体系框架及开放的技术标准协议 (NGTP), 即“下一代车联网架构”, 为车联网平台的发展应用提供了更大的灵活性及可扩展性。我国企业基本都是自建服务平台, 各平台间数据之间无法互联互通, 信息安全管理模式也存在问题。交通部针对营运车辆推出的网联联控平台已经实现了全国性重点营运车辆的大规模接入, 但没有涉及规模最大的乘用车领域。

通信与平台技术的应用, 极大提高了车辆对于交通与环境的感知范围, 也为基于云控平台的汽车节能技术的研发提供了支撑条件。基于云控平台的汽车节能驾驶框架如图 9 所示。车辆通过车与云平台的通信将

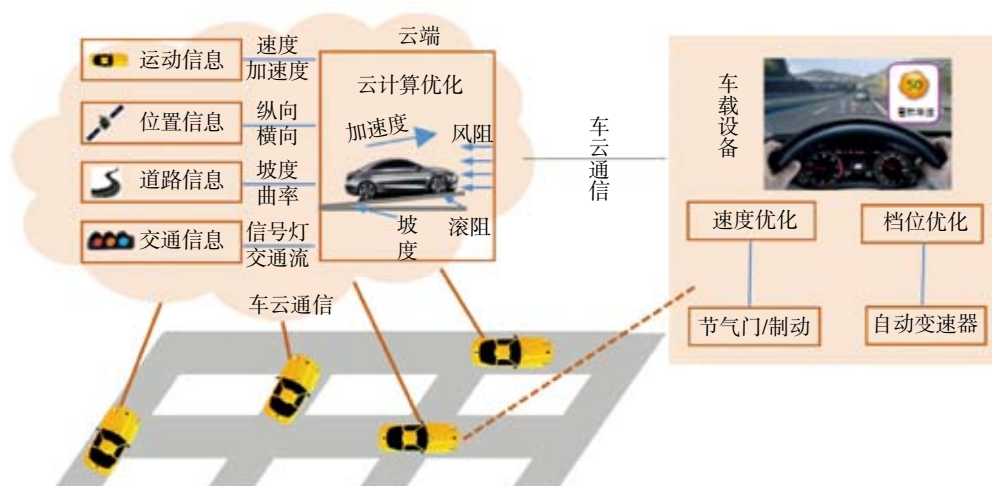


图9 基于云控平台的汽车节能驾驶系统框架

其位置信息及运动信息发送至云端, 云端控制器结合道路信息 (如坡道、曲率等) 以及交通信息 (如交通流、交通信号灯等) 对车辆速度和挡位等进行优化, 以提高车辆燃油经济性并提高交通效率。

在云端控制器中, 以车辆行驶路段的油耗为优化目标, 在车辆动力学约束、交通流速约束和交通信号约束下, 对车辆挡位和速度轨迹进行优化。利用实车试验测试基于云控平台的汽车节能驾驶系统性能。实车试验中包含 3 个信号交叉路口以及 1 台车辆, 车辆运动信息、油耗信息可通过全球定位系统 (global position system, GPS) 及控制器局域网 (controller area network, CAN) 总线获取, 交通信号信息可从交通信号机中进行采集, 利用以上信息对车辆速度进行优化。3 个路口的实车试验结果表明: 此系统对不同驾驶员均有提高燃油经济性的效果, 通过 3 个交叉路口平均可节约油约 15%^[48]。

3.6 信息安全技术

汽车信息系统已安全成为汽车行业的一个重要发展领域。目前, 国际上已经有 ISO26262 等汽车安全相关标准, 美国也已形成 SAE J3061/IEEE1609.2 等系列标准, 欧洲 EVITA 研究项目也提供了相关汽车信息安全指南, 而中国政府在 2014 年“国民经济和社会发展第十二个五年规划”(“十二五”规划) 中才首次将汽车信息安全作为关键基础问题进行研究, 和国际发展存在较大差距。急需结合中国智能网联汽车实际, 确定网联数据管理对象并实行分级管理, 建立数据存储安全、传输安全、应用安全三维度的数据安全体系。建立包括云安全 (实现数据加密、数据混淆、数据脱

敏、数据审计等技术的应用)、管安全 (基于 802.11p/IEEE1609.2, 实现通讯加密体系、身份认证体系、证书体系、防重放、防篡改、防伪造等技术应用)、端安全 (实现车载安全网关、安全监测监控系统、车载防火墙、车载入侵检测技术的应用) 在内的“云—管—端”数据安全技术框架, 制定中国智能网联数据安全技术标准。

围绕信息安全技术领域的周边行业, 也成就了很多创新研究方向。尤其在信息安全测试评估方面, 众多科研机构 and 创业公司通过干扰车辆的通信设备以及毫米波雷达、激光雷达和摄像头等车载传感设备, 进行智能车的信息安全的攻防研究。

3.7 智能环境友好型车辆

为实现汽车电动化与智能化 2 个发展趋势的有机融合, 文献 [49] 曾提出具有清洁能源动力、电控化底盘与智能信息交互 3 个系统, 集成结构共用、信息融合与控制协同 3 项技术, 综合实现安全、舒适、节能与环保 4 个功能, 代表着下一代汽车技术发展方向的环境友好型车辆 (intelligent environment-friendly vehicle, i-EFV) 概念。

在 i-EFV 的概念中, 通过将智能交通系统 (intelligent transportation systems, ITS) 中的环境识别、驾驶辅助和驾驶员识别技术等先进技术, 与搭载电驱动系统的混合动力车辆、纯电动车辆等新能源车辆有机结合, 既可获取多源信息以实现新能源车辆的安全行驶并进一步降低能耗, 还可实现车辆与交通系统 (车辆、行人)、电力系统 (充电站) 进行协同优化, 实现交通系统和电网系统的高效安全运行。

利用 V2X 通信技术使车辆预知前方行驶环境中的

交通信息,有利于使车辆适应多变的交通环境,以实现在保证车辆安全行驶的前提下,降低纯电动汽车 i_EFV 行驶能量消耗。 i_EFV 的智能节能控制的应用场景如图 10 所示。

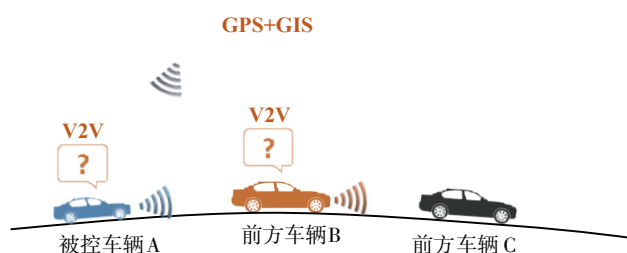


图 10 电动车辆智能节能控制示意图

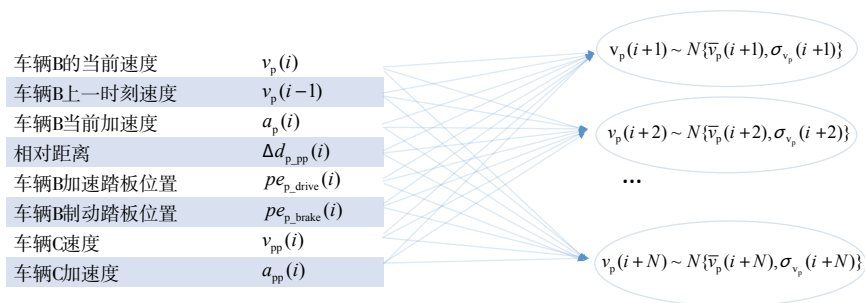


图 11 Bayes 网络结构简图

基于前车运动预测信息,利用非线性模型预测控制方法对电动车辆 A 进行智能节能控制。在传统的研究中,并未对方车辆 B 的运动进行预测,一般假设在车辆 A 的控制周期内,车辆 B 进行匀速或匀加速运动。

图 12 为基于不同的信息输入,自车 A 的速度控制结果曲线。

由图 12 可知,对前车 B 运动进行预测后,能够使自车提早对车辆 B 的运动进行反应,降低了行驶过程中的不必要的加速与减速过程。与不对前车运动进行预测相比,电动车辆的智能节能控制方法的节能效果可以达到 10% 左右^[11]。

4 汽车智能化与网联化技术发展趋势分析

4.1 以深度学习为代表的 AI 技术快速发展和应用

以“深度学习”方法为代表的人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术在智能网联汽车上正在得到快速应用。尤其在环境感知领域,深度学习方法已凸显出

车辆 B 的运动受到车辆 C 的运动的影响,两者间存在因果关系,为预测车辆 B 的未来运动行为,需要基于 B 和 C 两辆车的运行信息。利用 Bayes 网络方法对车辆 B 的运动进行建模,结构简图如图 11 所示。图 11 中, $v_p(i)$ 为前方车辆 B 在时刻 i 的速度值, $v_p(i-1)$ 为前方车辆 B 在时刻 $i-1$ 的速度值, $a_p(i)$ 是前方车辆 B 在时刻 i 的加速度, $\Delta d_{p-pp}(i)$ 是前方车辆 B 和 C 在时刻 i 的相对距离, $pe_{p-drive}(i)$ 是前方车辆 B 在时刻 i 的加速踏板位置, $pe_{p-brake}(i)$ 是前方车辆 B 在时刻 i 的制动踏板位置, $v_{pp}(i)$ 是前方车辆 C 在时刻 i 的速度值, $a_{pp}(i)$ 是前方车辆 C 在时刻 i 的加速度。 $v_p(i+1)$ 是前方车辆 B 在时刻 $i+1$ 的速度预测值, $\bar{v}_p(i+1)$ 是前方车辆 B 在时刻 $i+1$ 的速度预测均值, $\sigma_{v_p}(i+1)$ 是前方车辆 B 在时刻 $i+1$ 的速度预测均方差。

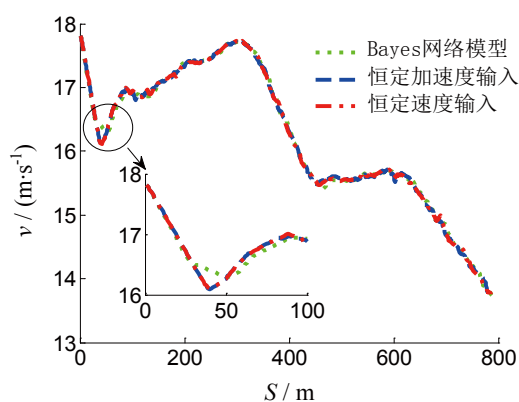


图 12 基于不同前车信息输入的自车速度控制结果

巨大的优势,正在以惊人的速度替代传统机器学习方法。深度学习方法需要大量的数据作为学习的样本库,对数据采集和存储提出了较高需求;同时,深度学习方法还存在内在机理不清晰、边界条件不确定等缺点,

需要与其他传统方法融合使用以确保可靠性, 且目前也受限于车载芯片处理能力的限制。

4.2 激光雷达等先进传感器加速向低成本、小型化发展

激光雷达相对于毫米波雷达等其他传感器具有分辨率高、识别效果好等优点, 已越来越成为主流的自动驾驶汽车用传感器; 但其体积大、成本高, 同时也更易受雨雪等天气条件影响, 这导致它现阶段难以大规模商业化应用。目前激光雷达正在向着低成本、小型化的固态扫描或机械固态混合扫描形式发展, 但仍需要克服光学相控阵易产生旁瓣影响探测距离和分辨率、繁复的精密光学调装影响量产规模和成本等问题。

4.3 自主式智能与网联式智能技术加速融合

网联式系统能从时间和空间维度突破自主式系统对于车辆周边环境的感知能力。在时间维度, 通过 V2X 通信, 系统能够提前获知周边车辆的操作信息、红绿灯等交通控制系统信息以及气象条件、拥堵预测等更长期的未来状态信息。在空间维度, 通过 V2X 通信, 系统能够感知交叉路口盲区、弯道盲区、车辆遮挡盲区等位置的环境信息, 从而帮助自动驾驶系统更全面的掌握周边交通态势。网联式智能技术与自主式智能技术相辅相成, 互为补充, 正在加速融合发展。

4.4 高速公路自动驾驶与低速区域自动驾驶系统将率先应用

高速公路与城市低速区域将是自动驾驶系统率先应用的 2 个场景。高速公路的车道线、标示牌等结构化特征清晰, 交通环境相对简单, 适合车道偏离报警 (LDW)、车道保持系统 (LKS)、自动紧急制动 (AEB)、自适应巡航控制 (ACC) 等驾驶辅助系统的应用。目前市场上常见的特斯拉等自动驾驶汽车就是 L1—L2 级自动驾驶技术的典型应用。而在特定的城市低速区域内, 可提前设置好高精度定位、V2X 等支撑系统, 采集好高精度地图, 利于实现在特定区域内的自动驾驶, 如自动物流运输车、景区自动摆渡车、园区自动通勤车等。

4.5 自动驾驶汽车测试评价方法研究与测试场建设成为热点

自从特斯拉汽车被曝光几起重大安全事故后, 自动驾驶汽车的安全性越来越多的受到关注, 关于自动驾驶汽车测试评价方法的研究以及测试场、示范区的建设成为全球热点。如何测试自动驾驶汽车? 一种潜在的解决方案是引入“普通人类驾驶员”的抽象概念并建

立安全基线——一系列定性、定量的关键功能、性能指标, 表征自动驾驶系统驾驶汽车的安全程度。如果把自动驾驶系统看作一个驾驶员, 对其的考核也可以类比驾驶员的考核过程。首先需要“体检”, 检查自动驾驶系统对环境感知、车辆控制等的基本能力; 其次理论测试, 测试自动驾驶汽车对交通法规的遵守能力; 再次是场地考, 既在特定场景下的自动驾驶测试; 最后是实路考核, 将自动驾驶汽车放置于特定开放测试道路内进行实际测试^[50]。

在测试场建设方面, 美国密歇根大学率先建成了面积约 13 hm² 的智能网联汽车专用测试场 M-city, 如图 13 所示。日本、欧洲等多地也建成或在积极建设各类智能网联汽车专用测试场。上海嘉定于 2016 年率先建成中国第一个专业的智能网联汽车测试场, 如图 14 所示。重庆、北京等多地在正在积极建设。



图 13 美国密歇根大学建设的智能网联汽车 (ICV) 专用测试场 (M-city)

5 中国智能网联汽车 (ICV) 发展的思考与建议

5.1 建设国家智能网联汽车 (ICV) 联合创新中心

整合政产学研多方资源, 建设国家智能网联汽车联合创新中心, 面向智能网联汽车创新发展的重大需



图 14 上海嘉定智能网联汽车 (ICV) 测试场

求, 充分利用现有创新资源和载体, 推动重点领域前沿技术和共性关键技术从开发到转移扩散及首次商业化应用创新链条各环节的活动, 打造跨界协同的创新生态系统。

5.2 建设国家级智能网联汽车 (ICV) 基础数据平台

目前网联汽车并为实现真正“互联”, 各类企业级平台以及政府监管平台数据互不联通。应从国家层面推动建设智能网联汽车的三级式平台, 包括全国性基础数据平台、公共服务平台与应用开发平台。由国家主导建设和运营智能网联汽车基础数据平台, 通过标准的数据交互方式, 与各企业级平台以及行业管理平台实现互联互通, 实现大数据共享, 提供基础数据服务, 提高行业监管效率。

5.3 加快出台智能网联汽车 (ICV) 相关标准与测试规范

网联化技术的发展要求车车、车路、车与平台之间交互时必须要有标准的数据格式与协议, 应加快研究确定具有我国特色的智能网联汽车通信系统与通信协议标准, 研究制定车辆信息安全相关标准。同时应加

快出台智能网联汽车在开放道路进行测试的相关规范, 对智能网联汽车的示范运行与测试进行有效管理。

6 结 语

智能网联汽车 (ICV), 可以提供更安全、更节能、更环保、更舒适的出行方式和综合解决方案, 是城市智能交通系统的重要环节, 是构建绿色汽车社会的核心要素, 其意义不仅在于汽车产品与技术的升级, 而且有可能带来汽车及相关产业全业态和价值链体系的重塑。与发达国家相关项目对比, 中国 ICV 发展整体上还存在差距;但在车联网通信技术、高精度定位与地图、车联网应用等方面发展出了自己的特点和优势。若能充分结合中国体制优势, 依托顶层设计, 中国 ICV 技术与产业发展势必将作为汽车工业转型升级、形成国际竞争力的重要机遇。

参考文献 (References)

- [1] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
China-SAE. Technology roadmap for energy saving and new energy vehicles [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [2] Gay K. Connected and automated vehicle research in the United States [R/OL]. US Department of Transportation, (2014-11-16). http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/events/2014/Joint_BELGIUM-UNECE_ITS/02_ITS_Nov2014_Kevin_Gay_US_DOT.pdf
- [3] LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang, et al. Modeling and verification of heavy-duty truck drivers' car-following characteristics [J]. *Int'l J Automotive Tech*, 2010, 11(1): 81-87.
- [4] WANG Jianqiang, LI Shengbo, HUANG Xiaoyu, et al. Driving simulation platform applied to develop driving assistance systems [J]. *IET Intell Transp Syst*, 2010, 4(2): 121-127.
- [5] DANG Ruina, WANG Jianqiang, LI Shengbo, et al. Coordinated adaptive cruise control system with lane-change assistance [J]. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2015, 16(5): 2373-2383.
- [6] Zanten A, Erhardt R, Pfaff G, et al. Control aspects of the Bosch-VDC [C] // *Int Sympo on Adva Vehi Control*, Aachen, Germany, 1996.
- [7] LI Daoferi, DU Shangqian, YU Fan. Integrated vehicle chassis control based on direct yaw moment, active steering and active stabilizer [J]. *Vehi Syst Dyna*, 2008, 46(1): 341-351.
- [8] Lee C, Lee . Object recognition algorithm for adaptive cruise control of vehicle using laser scanning sensor [C] // *2000 IEEE Intell Trans Syst Conf*, Dearborn, USA, Oct.1-3, 2000.
- [9] 张德兆, 王建强, 刘佳熙等. 加速度连续型自适应巡航控制模式切换策略 [J]. 清华大学学报 (自然科学版) [J],

- 2010, **50**(8): 1277-1281.
- ZHANG Dezhaoh, WANG Jianqiang, LIU Jiaxi et al. Switching strategy for adaptive cruise control modes for continuous acceleration [J]. *J Tsinghua Univ Sci and Tech*, 2010, **50**(8): 1277-1281. (in Chinese)
- [10] ZHANG Dezhaoh, XIAO Qing, LU Meng, et al. Driver specific ACC speed profile for curved roads [C] // *FISITA2010*, Budapest, Hungary, May 30-June 4, 2010.
- [11] ZHANG Shuwei, ZHANG Donghao, LUO Yugong, et al. Predictive Energy Management Strategy for Electric Vehicles based on Estimation of Preceding Vehicle Future Movements [C] // *IEEE Int'l Conf on Adv Intell Mech*, September 26, 2016.
- [12] LI Keqiang, CHEN Tao, LUO Yugong, et al. Intelligent environment-friendly vehicles: concept and case studies [J]. *IEEE Trans on Intell Transp Syst*, 2012, **13**(1): 318-328.
- [13] U.S. Department of Transportation. Status of the dedicated short-range communications technology and applications-report to congress [M]. 2015.
- [14] LI Shengbo, HU Xiaosong, LI Keqiang, et al. Mechanism of vehicular periodic operation for optimal fuel economy in free-driving scenario [J]. *IET Intell Transp Syst*, 2015, **9**(3): 306-313.
- [15] LI Shengbo, JIA Zhenzhong, LI Keqiang, et al. Fast online computation of a model predictive controller and its application to fuel economy-oriented adaptive cruise control [J]. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2015, **16**(3): 1199-1209.
- [16] LI Guofa, LI Shengbo, CHENG Bo. Field operational tests of advanced driver assistance systems in chinese typical road conditions: the influence of driver gender, age and aggression [J]. *Int'l J' Automotive Tech*, 2015, **16**(5): 739-750.
- [17] Mulder M, Van M, et al. Haptic gas pedal feedback [J]. *Ergonomics*, 2008, **51**(11): 1710-1720.
- [18] Abbink A, Mulder M. Measuring neuromuscular control dynamics during car following with continuous haptic feedback [J]. *IEEE Trans Syst, Man, and Cybernetics*, 2011, **41**(5): 1239-1249.
- [19] Hayashi R., Yin F. Study on acceleration and deceleration maneuver guidance for driver by gas pedal reaction force control [C] // *Int'l IEEE Conf Intell Transp Syst*, 2010: 1428-1434.
- [20] Hautiere N, Aubert D. Driving assistance: automatic fog detection and measure of the visibility distance [C]. *ITS World Congress*, 2003: 234-241.
- [21] Morri B, Doshi A. Lane change intent prediction for driver assistance: on-road design and evaluation [C]. *IEEE Intell Vehi Sympo*, 2011: 895-901.
- [22] Weiskircher T, Ayalew B. Frameworks for interfacing trajectory tracking with predictive trajectory guidance for autonomous road vehicles [C] // *Amer Contr Conf (ACC)*, 2015. *IEEE*, 2015: 477-482.
- [23] Geronimo D, Lopez A M, Sappa A D, et al. Survey of pedestrian detection for advanced driver assistance systems [J]. *IEEE Trans Pattern Anal and Mach Intell*, 2010, **32**(7): 1239-1258.
- [24] Gavrilu D M, Munder S. Multi-cue pedestrian detection and tracking from a moving vehicle [J]. *Int'l J Compu Vision*, 2007, **73**(1): 41-59.
- [25] Erhan D, Szegedy C, Toshev A, et al. Scalable object detection using deep neural networks [C] // *IEEE Conf Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2014: 2147-2154.
- [26] Vincent P, Larochelle H, Lajoie I, et al. Stacked denoising autoencoders: learning useful representations in a deep network with a local denoising criterion [J]. *J Mach Learning Res*, 2010, **11**(12): 3371-3408.
- [27] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks [C] // *Adva Neural Info Proc Syst*, 2012: 1097-1105.
- [28] 李晓飞. 基于深度学习的行人及骑车人车载图像识别方法 [D]. 北京: 清华大学, 2016.
- LI Xiaofei. On-board pedestrian and cyclist recognition using deep learning methods [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)
- [29] Enzweiler M, Eigenstetter A, Schiele B, et al. Multi-cue pedestrian classification with partial occlusion handling [C] // *IEEE Conf Compu Vision and Pattern Recog (CVPR)*, 2010: 990-997.
- [30] Dollar P, Wojek C, Schiele B, et al. Pedestrian detection: an evaluation of the state of the art [J]. *IEEE Trans Pattern Anal and Mach Intell*, 2012, **34**(4): 743-761.
- [31] Mogelmose A, Prioletti A, Trivedi M M, et al. Two-stage part-based pedestrian detection [C] // *IEEE Conf Intell Transp Syst (ITSC)*, 2012: 73-77.
- [32] Liu W, Yu B, Duan C, et al. A pedestrian-detection method based on heterogeneous features and ensemble of multi-view-pose parts [J]. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2015, **16**(2): 813-824.
- [33] Zhang S, Bauckhage C, Cremers A B. Efficient pedestrian detection via rectangular features based on a statistical shape model [J]. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2015, **16**(2): 763-775.
- [34] LI S, PENG H. Strategies to minimize the fuel consumption of passenger cars during car-following scenarios [J]. *Proc Instit Mech Eng, Part D: J Automobile Eng*, 2012, **226**: 419-429.
- [35] Barkenbus, J. Eco-driving: an overlooked climate change initiative [J]. *Energy Policy*, 2010, **38**: 762-769.
- [36] Zhou J, Peng H. Range policy of adaptive cruise control vehicles for improved flow stability and string stability [J]. *IEEE Trans. Intell. Transp Syst*, 2005, **6**(2): 229-237.
- [37] 李升波, 李国强, 王建强等. 非奇异快速的终端滑模控制方法 [J]. 信息与控制, 2009, **38**(1): 1-8.
- LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang, et al. Nonsingular and fast terminal sliding mode control method [J]. *Info & Contr*, 2009, **38**(1): 1-8. (in Chinese)
- [38] Wang Y, Bin Y, Li K. Longitudinal acceleration tracking control of low speed heavy-duty vehicles [J]. *Tsinghua Sci & Tech*, 2008, **13**(5): 636-643.
- [39] Hellstrom E, Ivarsson M. Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption [J].

- Contr Eng Practice*, 2008, 17(2): 245-254.
- [40] Ferrara A, Pisu P. Minimum sensor second-order sliding mode longitudinal control of passenger vehicles [J]. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2004, 5(1): 20-32.
- [41] LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang. Economy oriented vehicle adaptive cruise control with coordinating multiple objectives function. *Vehi Syst Dyna*, 2013, 51(1): 1-17.
- [42] LI Shengbo, LI Keqiang, Rajamani R, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control [J]. *IEEE Trans Contr Syst Tech*, 2011, 19(3): 556-566.
- [43] Zheng Y, Li S, Wang J, et al. Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: study on the influence of information flow topologies [J]. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2016, 17(1): 14-26.
- [44] LI Shengbo, LI Renjie, WANG Jianqiang, et al. Stabilizing period control of automated vehicle platoon with minimized fuel consumption. *IEEE Trans Transp Electrification*, 2017, 99:1-13.
- [45] Flemisch O, Bengler K. Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles: H-mode and conduct-by-wire [J]. *Ergonomics*, 2014, 57(3): 343-360.
- [46] Erlien M, Funke J. Incorporating nonlinear tire dynamics into a convex approach to shared steering control[C] // *Ameri Contr Conf, IEEE*, 2014: 3468-3473.
- [47] Cheng B, Zhang W. Driver drowsiness detection based on multisource information [J]. *Human Factors and Ergonomics in Manu and Service Indu*, 2012, 22(5): 450-467.
- [48] Xu B, Zhang F, Wang J, et al. B&B algorithm-based green light optimal speed advisory applied to contiguous intersections [C] // *Conf Int'l Conf Transp Professionals (CICTP)* 2015: 363-375.
- [49] 李克强, 张书玮, 罗禹贡, 等. 智能环境友好型车辆 (i-EFV) 的概念及其最新进展, 汽车安全与节能学报 [J]. 2013, 4(2): 109-120.
LI Keqiang, ZHANG Shuwei, LUO Yugong, et al. Concept of intelligent environment-friendly vehicle and its recent development [J]. *J Automotive Safety and Energy*, 2013, 4(2): 109-120. (in Chinese)
- [50] 戴一凡, 何承坤. 如何让自动驾驶汽车安心上路 [N]. 中国汽车报, 2016-08-15, 6.
DAI Yifan, HE Chengkun. How to make the Automated Vehicle drive safely [N]. *China Automotive News*, 2016-08-15, 6. (in Chinese)

李克强 教授

清华大学汽车工程系教授, 教育部“长江学者”特聘教授, 国家智能网联汽车产业技术创新战略联盟专家委员会主任, 兼任先进车辆控制国际科学委员会委员, 《国际车辆自主操作系统》和《国际智能交通系统研究学报》编委, 《国际汽车设计学报》、《国际汽车系统动力学学报》审稿人等。主要从事智能网联汽车、车辆动力学与控制等方向的研究。

Prof. LI Keqiang

He is a professor of the *Department of Automotive Engineering of Tsinghua University* and a professor of “*Changjiang Scholars Program*”; one of the expert committee directors of the *China Industry Technology Innovation Strategic Alliance for the Intelligent and Connected Vehicles (CAICV)*; a member of *Advanced Vehicle Control (AVEC) international scientific committee*, an editorial board member of the “*International Journal of Vehicle Autonomous Systems*” and the “*International Journal of ITS Research*”, and a reviewer of the “*International Journal of Vehicle Design*” and the “*International Journal of Vehicle System Dynamics*”, etc. His research field covers intelligent and connected vehicles, vehicle dynamics and control.