

智能网联汽车体系结构与关键技术

王建强,王昕

(兰州交通大学 交通运输学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:智能网联汽车(Intelligent connected vehicles,ICV)是无人驾驶技术的核心载体,产业链长,市场巨大,吸引了国内外众多汽车厂商和信息企业都纷纷投向ICV的研发与测试,部分ICV车型已进入量产阶段,新的概念车型也陆续提出。针对新型ICV的发展现状与关键技术,从ICV智能化和网联化两个维度对ICV中涉及到的相关技术进行分析,进一步从信息处理的感知层、决策层、控制层3个层次构建了ICV发展过程中的关键技术体系结构。研究表明,车辆环境感知和通信技术技术涵盖自车状态和外部环境,短程通信技术(DSRC)、机器视觉和激光雷达技术是实现车辆环境信息采集功能完善的关键;车路协同系统涉及车—车通信、车—路通信、车—云通信,协同智能交通系统、云平台 and 大数据技术是车路协同技术的关键;驾驶辅助技术包括自适应巡航控制系统、车道偏离/避免系统、碰撞预警/避免系统等8个构成,这是辅助驾驶、部分自动驾驶和有条件的自动驾驶3个智能化阶段中的关键;具有自主学习、自我决策的人工智能技术和信息安全技术也是智能网联汽车的关键技术,在此基础上,还应该实现多种技术间的相互支撑与融合,克服关键技术协同障碍,才能实现ICV的市场推广与普及应用。

关键词:智能网联汽车;无人驾驶;自动驾驶;人工智能;云平台;大数据;车路协同系统

中图分类号:U495

文献标志码:A

文章编号:1671-6248(2017)06-0018-08

Study on the system framework and key technology of Intelligent connected vehicles

WANG Jian-qiang, WANG Xin

(School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Intelligent connected vehicles are the core carrier of driverless technology, which has attracted many domestic and foreign automobile manufacturers and information enterprises to invest in

收稿日期:2017-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(71761025);国家社会科学基金项目(14XGL011)

作者简介:王建强(1980-),男,山东临沂人,副教授。

R&D and test of ICV for their long industry chain and huge market. Some ICVs have been into mass production stage, the new concept models were also put forward one after another. With probing into the development status and key technologies of new ICV, the related technologies in ICV were analyzed from the two dimensions of ICV intelligence and networking, and the key technology and system framework in the development of ICV were constructed from three layers of information processing: perception layer, decision-making layer and control layer. The results show that the environment perception of vehicles and communication technologies covers vehicle state and external environment, Dedicated short Range communication (DSRC), machine vision and laser radar technology are the keys to improve the function on environmental information collection of vehicle; cooperative vehicle-infrastructure system involves vehicle-vehicle communication, vehicle-road communication and vehicle-cloud communication, collaborative intelligent transportation system, cloud platform and big data technology are the key of the cooperative vehicle-infrastructure technology; driving assistance technology includes adaptive cruise control system, lane departure / avoidance system, collision warning / avoidance system and other 8 components, which is the key in the three smart intelligent phases of assist driving, partially automatic driving and conditional automatic driving; the artificial intelligence technology and information security technology with independent learning and self-decision-making are also the key technology of ICV. On this basis, the mutual support and integration of various technologies should be realized, and the key technical coordination obstacles should be overcome so as to achieve the marketing and popularization of ICV.

Key words: Intelligent connected vehicles (ICV); driverless; automatic driving; artificial intelligence; cloud platform; big data; cooperative vehicle-infrastructure system

无人驾驶 (Driverless) 为我们勾画了一幅未来出行的美好蓝图, 将出行者从传统机械专注的自驾模式带入充满时尚和乐趣的无人驾驶模式。无人驾驶汽车也称为轮式移动机器人, 主要依靠车内以计算机系统为控制器的智能驾驶仪来实现无人驾驶, 其实质是一台受软件体操控的可以自由移动的载人计算机。无人驾驶的概念一经提出, 便得到学术界和工业界的普遍关注和支持, 而无人驾驶技术的核心承载主体是智能网联汽车 (Intelligent connected vehicles, ICV)^[14]。ICV 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 (人、车、路、后台等) 智能信息交换共享, 具备复杂的环境感知、智能决策、协同控制和执行等功能, 可以满足出行者多方面的出行需求, 并同时提升行车安全, 实现节能减

排, 优化交通资源配置, 在一定程度上缓解交通拥堵^[5-8]。

智能网联汽车可以从 3 个维度进行剖析, 即“智能”“网联”“汽车”。“智能”即搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置和车载系统模块, 具备复杂环境感知、智能化决策与控制等功能; “网联”主要指信息互联共享能力, 即通过通信与网络技术, 实现车内、车与环境间的信息交互; 而“汽车”是智能终端载体的外观形态^[9-10]。从更为广义的角度来看, ICV 并不是特指某类或单个车辆, 而是以车辆为主体和主要节点, 由车辆、道路设施、通信设备及交通控制系统以及数据存储与处理系统等共同构成的综合协调系统, 是未来智能交通系统下车联网环境中发挥着重要作用的智能终端^[11]。

虽然前景美好,但是智能网联汽车距离批量生产和实际投入使用尚存在较大距离。本文旨在探讨 ICV 发展现状的基础上,分析 ICV 的关键技术构成,并探讨 ICV 未来发展趋势。

一、智能网联汽车现状

智能网联汽车具有较长的产业链,有望成为未来汽车销售市场中的主力车型。ICV 可以提供的主要服务类型如表 1 所示^[12]。因此,国内外的多数汽车厂商和信息技术企业都纷纷投入到 ICV 的研究与试产当中。总体来看,目前的 ICV 车型可以分为已量产、测试和概念车型 3 种,如表 2 ~ 表 4 所示。

表 1 智能网联汽车服务类型

| 服务类型 | 说明 |
|-------|------------------------------|
| 驾驶辅助类 | 自动制动,速度控制,视觉增强,自动驾驶 |
| 网联类 | 导航,路径规划,停车推荐,天气预报,路况播报,车辆共享 |
| 安全类 | 疲劳驾驶检测,事故预警,事发协助,故障远程维护,车辆防盗 |
| 娱乐类 | 在线音乐、视频推荐,游戏,网页浏览,社交网络 |

表 2 主流量产车型

| 厂商 | 代表车型 | 特点 |
|------|----------|--|
| 特斯拉 | Model X | 具备自动变道、巡航和泊车等驾驶辅助功能 |
| 奔驰 | 新 E 级 | 长轴版配备遥控泊车功能,可借助智能手机专用 APP 来对车辆进行操控 |
| 雷克萨斯 | GS450h | 有多传感器,预测行车路线,生成的预测驾驶信息反馈给驾驶者,协助完成驾驶 |
| 沃尔沃 | S90 | 搭载了 Sensus 智能车载交互系统和 Pilot Assist 高度自动驾驶技术,能够平顺地自动干预转向系统,实现时速 130km/h 内在高速公路上沿清晰可辨的车道标识行驶及转向 |
| 比亚迪 | G5 | 配备蓝牙 APP 进行 30 m 内安全驾驶,同时装有 8 英寸多点触摸屏 |
| 众泰 | T600 改装版 | 采用两个摄像头、毫米波雷达传感器及激光雷达分工实现红绿灯、车辆、行人与车道线的监测工作并且能够与导航路径相结合,根据规划路径实现自主掉头、拐弯等驾驶行为 |

表 3 主要测试车型

| 厂商 | 车型 | 特点 |
|--------|------------------|---|
| 丰田 | Highway Teammate | 在 Lexus GS 的基础上改造而成,可以在机动车专用道路实现从入口到出口的自动行驶,并根据实际交通状况做出合理的认知、判断和操作 |
| 福特 | Fusion Hybrid | 分别在雨雪天气及黑暗环境中对车辆进行了测试 |
| 谷歌 | 谷歌自动驾驶汽车 | 2009 年启动无人驾驶汽车项目,2011 年开始测试试验车,2014 年推出首款无人驾驶原型车,2016 年完成行程 200 万英里,实现从辅助驾驶到高度自动驾驶的升级过渡 |
| Uber | Uber 自动驾驶汽车 | 2016 年 5 月份开始无人车的道路测试 |
| 微软 | CHAD | 有微软的 Azure 云服务及 Win10,能够实现自动驾驶、检测行人、汽车实况集成处理、收集路况并规划下一步路线等功能 |
| Conti | Conti 自动驾驶测试车 | 主要用于在高速公路场景下的自主巡航,车上安装有 MK 100 ESC 电子稳定系统,未来将增加 MK C1 电子制动系统作为补充 |
| DELPHI | DELPHI 无人驾驶出租车 | 使用 6 辆具有高度自动驾驶功能的 AudiSQ5s, 3 条既定路线开展了测试,行进过程中完全不需要驾驶员干预。 |
| 一汽 | 一汽互联智能汽车 | 可手机叫车、自动泊车(包括垂直和平行车位)、自动驾驶和编队跟车等 |
| 长安 | 睿骋改装版 | 2016 年 4 月完成了全程 2 000 km 的长途无人驾驶道路测试 |
| 长城 | 哈弗 H8 | 可以实现高速公路和城市快速路的自动驾驶,在没有人工干预的情况下实现自动变道功能 |
| 比亚迪 | 比亚迪自动驾驶 | 在速锐车型的基础上进行开发,实现了车辆底盘部分的外部 CAN 总线控制 |
| 百度 | 百度 & 宝马 3 系改装版 | 2015 年 12 月 10 日完成在北京途径 G7 高速路、北五环至奥林匹克公园的道路测试,实现全程有司机值守,但不进行任何人为干预跑完全程 |

二、智能网联汽车体系结构

智能化与网联化在智能网联汽车发展的过程中充当了必不可少的组成部分,图 1 说明了不同阶段智能化和网联化走向融合的过程中,有关智能网联汽车的综合应用情况^[13-15]。

其中,智能化主要指车辆行驶过程中 ICV 自主的程度高低,其分级情况如表 5 所示;而网联化是指

表 4 主要概念车型

| 厂商 | 代表车型 | 特点 |
|------|-----------------|---|
| 奔驰 | F105 | 利用摄像头、传感器和 LED 灯的组合来进行导航,对行人及其他车辆的存在作出回应 |
| 宝马 | iVision Future | 采用宝马互联驾驶技术,使车辆具备人性化的运作模式 |
| 劳斯莱斯 | VISION NEXT 100 | 未装配方向盘,驾驶员通过对 Eleanor 下达指令来实现对车辆的一系列操作 |
| 丰田 | NS4 | 混合动力车型,兼顾了智能化的自动驾驶和环保化特征 |
| 奥迪 | Prologue、RS7 | 基于 Prologue 概念车打造的可实现自动驾驶的概念车车型,通过在众多隐形位置安装激光扫描仪、多个视频监控器、雷达探测器以及超声波探测器等,对路况进行采集 |
| 大众 | I. D. | 在全自动驾驶模式下 I. D. 的多功能方向盘可收入仪表盘下方 |
| 日产 | IDS | 取消了传统的方向盘,可模拟驾驶员驾驶风格,进行人车互动 |
| 上汽 | iGS | 基于名爵锐腾改造的智能驾驶汽车 iGS |
| 法雷奥 | Cruise 自动驾驶汽车 | 利用法雷奥 SCALA 激光扫描仪与前置摄像头共同扫描车辆前端路况,精准检测所有障碍物 |
| 乐视 | LeSEE 超级汽车 | 将乐视最新的自动驾驶技术、智能互联网技术、汽车分享技术和乐视生态内容集合在一起 |
| 博泰 | Project N | 集成了自然人机交互界面、智慧科技、自动驾驶、云端大数据及新能源等高新前沿科技,使车辆可以根据行为习惯、用户情感和大数据分析思考,为车主提供个性化服务 |
| 小鹏汽车 | beta 版 | 从城市拥堵入手,开发低速自动跟随的功能,之后逐步往更高智能性方面靠拢 |
| 游侠 | 游侠 X | 具备自主学习、语音交互以及与智能设备互联的优点 |

在车联网环境下,通过车与车、车与路、车与移动互联网之间的数据传递进行信息处理、决策和反馈过程,其分级情况如表 6 所示。

从数据获取、融合、存储与处理的数据流角度分析,智能网联汽车与外界信息交互过程可以分为感知层、决策层、控制层 3 层,如图 2 所示。

(一)感知层

借助车载传感器、GPS、雷达等,结合近距离通信技术,实时准确地探测车辆自身状态和周围环境的信息,通过数据融合技术,将各种类型数据依据通信标准进行交互,实现数据共享。

(二)决策层

依据感知层以及云平台获取的信息来进行决策,进而向驾驶员发出辅助决策信息。目前,ICV 技术发展还处于借助先进驾驶辅助技术的智能驾驶阶段,所以决策信息主要起到预测、警告、推荐作用,驾驶员掌握车辆行驶的主动权。当 ICV 发展到较为完备的阶段时,决策层除了车载决策系统之外,还包括智能交通系统后台服务中心的协同决策机制,将车辆可控权限进行了扩展,是真正的智能网联汽车自动驾驶技术的核心部件。

(三)控制层

车辆在驾驶辅助阶段主要进行一些基本的速度和方向控制。融合完备的网联技术后,车辆自主控制将逐步替代驾驶员的人工控制,实现真正意义上的无人驾驶。

三、关键技术

智能网联汽车的运行涉及到环境感知、智能决策以及协同控制这 3 个层次中的核心处理及操作,包括车辆环境感知技术、通信技术、云平台与大数据技术、多级驾驶辅助技术以及信息安全技术等。

(一)车辆环境感知与通信技术

车辆整体环境信息的及时性、准确性和可靠性需要依赖于车辆环境感知技术。在复杂、动态和多样化的交通环境下,提高环境感知精确程度、对动态目标进行识别与估计以完成交通环境信息的多视图数据融合,是现阶段车辆环境感知面临的三大任务^[16]。

车辆所处的环境由自车状态和外部环境所决定。通过环境感知,智能网联汽车获取包括车辆位置、行车速度、移动方向以及各类车内设备参数等自车状态信息,并且借助视频摄像头、雷达传感器、激光测距器等收集车辆外部的交通信号、路面状态、交通状况、行人移动等数据信息,再结合 LTE-V2X(Long term evolution-Vehicle to X,LTE-V)或者专用短程通信技术(Dedicated short range

表 5 智能化等级

| 智能化等级 | 等级名称 | 等级定义 | 控制 | 监视 | 失效应对 | 行驶环境 |
|----------------------------|---------|---------------------------------------|------|----|------|-------------------------|
| Driver Assistance, DA | 驾驶辅助 | 通过环境信息辅助方向和加减速控制中的一项,其他驾驶操作都由人操作 | 人与系统 | 人 | 人 | 车道内正常行驶,高速公路无车道干涉路段,泊车 |
| Partially Autonomous, PA | 部分自动驾驶 | 通过环境信息对方向和加减速中的多项操作提供辅助,其他驾驶操作都由人操作 | 人与系统 | 人 | 人 | 高速公路及市区无车道干涉路段,换道、环岛绕行等 |
| Conditional Autonomous, CA | 有条件自动驾驶 | 无人驾驶系统完成所有驾驶操作,根据系统请求,驾驶员提供必要干预 | 系统 | 系统 | 人 | 高速公路、市区无车道干涉路段 |
| Highly Autonomous, HA | 高度自动驾驶 | 无人驾驶系统完成所有驾驶操作,特定环境下系统会向驾驶员提出相应请求 | 系统 | 系统 | 系统 | 高速公路、市区有车道干涉路段 |
| Fully Autonomous, FA | 完全自动驾驶 | 无人驾驶系统可以完成驾驶员能够完成的所有道路环境下的操作,不需要驾驶员介入 | 系统 | 系统 | 系统 | 所有路况 |

表 6 网联化等级

| 网联化等级 | 等级名称 | 等级定义 | 控制 | 典型信息 | 传输需求 |
|-------|-----------|---|-------------|----------------------------|---------------|
| 1 | 网联辅助信息交互 | 基于车一路、车一后台通信,实现导航等辅助信息的获取以及车辆行驶数据与驾驶员操作等数据的收集与上传 | 人 | 地图、交通流量、交通标志、油耗等 | 传输实时性、可靠性要求较低 |
| 2 | 网联协同感知 | 基于车一车、车一路、车一后台设备,实时获取车辆周边交通环境信息,与车载传感器的感知信息融合,作为自车决策与控制系统的输入 | 人与系统 | 周边车辆/行人/非机动车位置、信号灯相位、道路预警等 | 传输实时性、可靠性要求较高 |
| 3 | 网联协同决策与控制 | 基于车一车、车一路、车一人、车一后台设备的通信,实时并可可靠获取车辆周边交通环境信息及车辆决策信息,车一车、车一路等各交通参与成员之间信息进行交互融合,形成车一车、车一路等各交通参与成员之间的协同决策与控制 | 人/自车系统/外部系统 | 车一车、车一路间的通信控制信息 | 传输实时性、可靠性要求最高 |

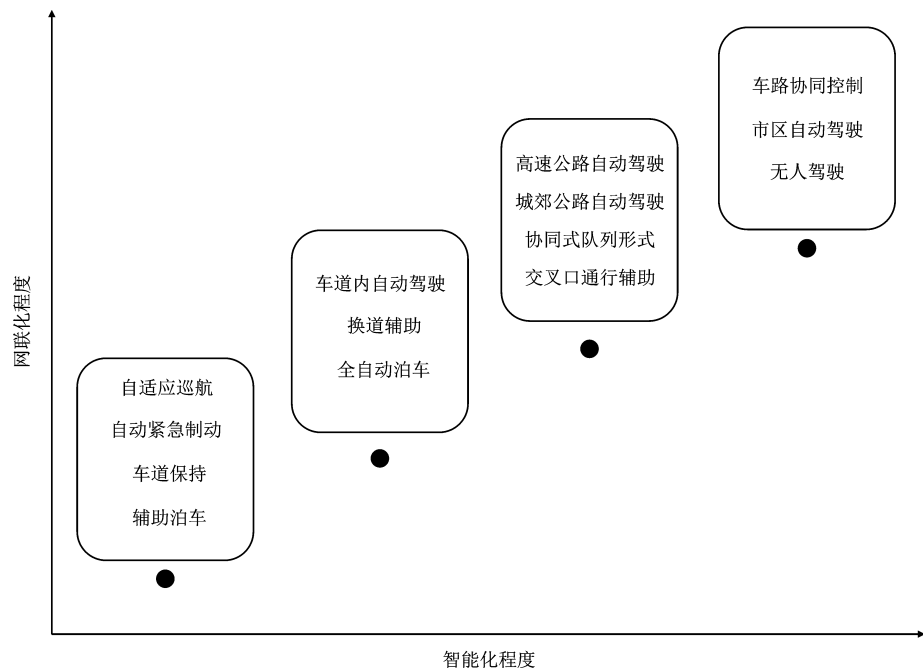


图 1 智能网联汽车的发展路径

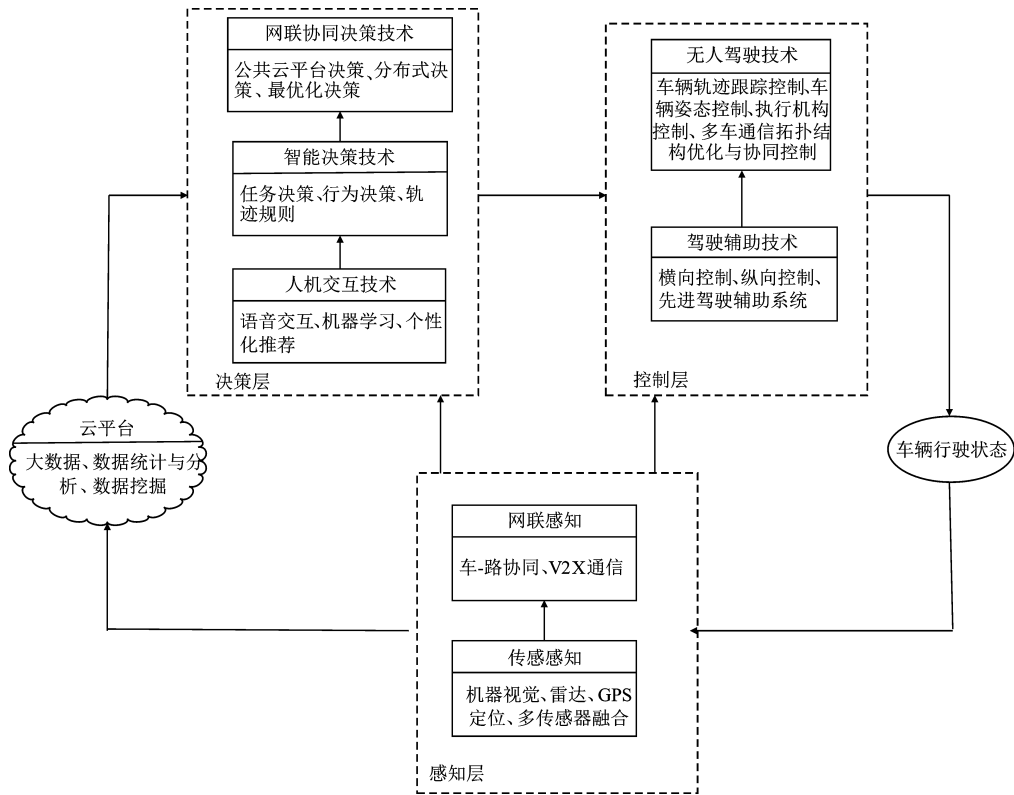


图 2 智能网联车体系结构

communication, DSRC) 等近距离通信技术传输数据, 采用信息融合技术进行分层存储^[17-19]。LTE-V2X 技术是一项能够满足复杂的车联网通信需求、支持可扩展的系统架构, 并且较为灵活地提供可靠、实时、安全的信息传输技术; DSRC 是一种高效的无线通信技术, 它可以实现在特定区域内(通常为数十米)对高速运动下移动目标的识别和双向通信, 车联网中的车—车通信和车—路通信是 DSRC 的两种表现形式。

机器视觉与激光雷达技术是实现车辆环境信息采集功能的关键技术, 是智能网联汽车感知层在运作过程中不可或缺的重要组成部分。机器视觉与激光雷达通过组合装配, 二者互为补充, 各有所长, 共同组成车辆的视觉传感系统。

机器视觉视场宽, 侧向精度高, 成本低, 不受其他传感器影响, 可以提供亮度和深度等更加丰富的平面信息, 用于估算如果不躲避检测到的对象会出现危险的可能程度, 但机器视觉容易受到环境中的光照等气候因素影响^[16]。此技术一般包括多功能

摄像、立体摄像以及红外摄像等技术: 多功能摄像机用来检测驾驶员面部或者交通道路标记, 立体摄像机能够发现危险路况, 红外摄像技术可以提供夜间视觉辅助的功能^[14]。

激光雷达方向性好, 测量角度和距离精度高, 不受地面杂波干扰, 能在低仰角下工作; 不足之处是此技术受恶劣天气、扫描角及分辨率影响较大, 对于很细小的柱状障碍物难以识别^[16]。激光雷达能够快速地获取扫描平面中的距离信息, 并获得障碍物在扫描平面中的外轮廓, 对于路面场景中其他车辆、行人或障碍物, 道路边界等信息具有不错的识别检测效果。

(二) 车路协同技术

车路协同系统(Cooperative vehicle infrastructure system, CVIS) 解决车辆与人、车辆与环境等之间的协同交互问题。智能网联汽车发展到成熟阶段, 将会运用协同智能交通系统(Cooperative intelligent transportation system, C-ITS), 对于车—车通信, 车—路通信以及车—云通信 3 个环节进行更有效的交通

表 7 车路协同系统构成说明

| 名称 | 功能 | 应用 |
|-------------|--|--------------------------------------|
| 车—车通信(V2V) | 为驾驶辅助系统扩展和车辆主动安全系统开发提供数据交换平台,进行车辆间信息共享和危险警告 | 车道保持、转向控制、泊车辅助、障碍物检测、车距控制、车辆间基本信息共享等 |
| 车—路通信(V2I) | 将通过感知技术获取的路况以及天气状况等信息及时准确的通知驾驶员,能够自动通知驾驶员道路危险情况 | 路面检测、车辆防碰撞、基于自适应巡航的障碍物间距控制等 |
| 车—云端通信(V2B) | 车辆信息(速度、位置、路况、设备性能等)、驾驶员行为信息(瞌睡程度、连续驾驶时长等)等有选择的上传到云端;接收由云端发出的驾驶员以及车辆之间的交互信息;与云端互联的车辆之间可以通过某些无线宽带机制进行通信 | 主动安全驾驶辅助、车辆的网络监控跟踪管理 |

状态估计和控制^[20-22],如表 7 所示。

云平台与大数据技术是实现车—云通信的关键技术。据估计,每辆车每小时的数据上传量就超过 20 GB^[12],如此之大的数据量只能上传到云平台进行相关的大数据处理和分析。云平台不仅是一个存储数据中心,还是一个信息收发枢纽,进行所有信息的接收、处理和传送。

(三) 驾驶辅助技术

驾驶辅助技术是指借助各类车载传感器和通信技术,对车辆、驾驶员以及环境信息及时、准确甚至动态的收集,同时进行辨识、侦测、追踪和处理,进而发出警示,使驾驶员察觉可能发生的危险,或在必要时进行汽车控制的一系列主动安全技术。驾驶辅助技术作为智能网联车发展必经阶段中的关键技术,在辅助驾驶、部分自动驾驶以及有条件的自动驾驶这 3 个智能化阶段中占主导地位,而高度自动驾驶以及自动驾驶阶段中,网联协同控制执行技术的作用增大。当前,驾驶辅助技术的构成如表 8 所示。

(四) 人工智能技术

从广义上来说,人工智能技术是指运用深度学习、模糊逻辑等方法,在大数据背景下,使机器通过自主学习的方式具备一定程度上的智能,从而可以理解外界事物并做出预判和决策,以提高工作效率和个性化服务水平^[23]。面对极其复杂多变的不确定道路行驶环境,具备无人驾驶功能的 ICV 需要及时准确应对各种情况、具有自主学习和自我决策的能力。而当前的人工智能技术无疑是最佳的选择。在海量行驶数据的基础上,人工智能技术可以通过智能计算和分析,对外界事物进行认知、自主学习

以及做出判断及决策,进而决定 ICV 的行驶轨迹和行驶路径^[24-25]。

此外,信息安全技术作为智能网联汽车的关键技术,涉及到了智能网联汽车的每一层。信息安全技术包括终端 APP 的加密防护技术、权限验证技术、防火墙技术、身份鉴别技术、电子身份标识技术、数字签名技术等,对于实现保障传输安全、非法入侵检测以及用户隐私数据保密十分关键。实现大量信息安全、准确、及时交互,是智能网联汽车关键技术发展的重大突破,也关系到智能网联汽车的推广和普及。

表 8 驾驶辅助技术构成

| 系统名称 | 应用 |
|--|---|
| 自适应巡航控制系统(Adaptive cruise control,ACC) | 降低驾驶员劳动强度,减小碰撞几率 |
| 车道偏离预警/避免系统(Lane departure warning system,LDWS) | 通过传感器检测车辆在车道中的位置和前方道路情况,在预测到可能发生车道偏离的时候,向驾驶员发出警告或者自动控制车辆以保障安全 |
| 碰撞预警/避免系统(Collision warning/avoidance,CW/CA) | 实时检测主车辆和其他车辆的状态,当有碰撞危险时,向驾驶员发出警告或者自动控制车辆来避免碰撞发生 |
| 驾驶员状态监控系统(Driver condition warning,DCW) | 通过感知设备监控驾驶员的眼部或者头部的运动情况来判断驾驶员的状态 |
| 导航系统(Route guidance and navigation systems,RGNS) | 使乘客方便快捷地到达目的地,可以优化整个路网的使用,从而提高交通容量 |
| 视觉增强系统(Vision enhancement,VE) | 通过红外成像和图像处理等手段使驾驶员能更好地感知车辆周围的环境 |
| 交叉路口碰撞避免系统(Intersection collision avoidance,ICA) | 通过车间通讯以及车辆与信号灯状态检测,在危险情况下发出警告 |

四、结语

技术的进步和市场需求共同促进了智能网联汽车的快速发展,以无人驾驶为目标的智能网联汽车受到了学术界和工业界的广泛关注。各种新型的智能网联汽车陆续问世,新颖且充满人性化设计的概念车型让人们充满期待。然而,面临复杂多变的交通路况和难以琢磨的个性化需求,智能网联汽车的发展绝非一日之功。本文仅从智能网联汽车的体系结构与关键技术入手进行初步探析,指出智能网联汽车发展过程中存在的关键技术难题和突破方向,为智能网联汽车的健康快速发展提供参考。

参考文献:

- [1] Harper C D, Hendrickson C T, Mangones S, et al. Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions[J]. Transportation Research: Part C, 2016, 72: 1-9.
- [2] 陶永,闫学东,王田苗,等. 面向未来智能社会的智能交通系统发展策略[J]. 科技导报, 2016, 34(7): 48-53.
- [3] 康俊民,赵祥模,徐志刚. 无人车行驶环境特征分类方法[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(6): 140-148.
- [4] 潘福全,亓荣杰,张璇,等. 无人驾驶汽车研究综述与发展展望[J]. 科技创新与应用, 2017(2): 27-28.
- [5] 赵福全,匡旭,刘宗巍. 面向智能网联汽车的汽车产业升级研究——基于价值链视角[J]. 科技进步与对策, 2016, 33(17): 56-61.
- [6] Hu J, Park B B, Lee Y J. Transit signal priority accommodating conflicting requests under connected vehicles technology[J]. Transportation Research Part C, 2016, 69: 173-192.
- [7] Wang J, Li S. The impact of travelers' rationality degree heterogeneity in the advanced traveler information system on the network traffic flow evolution [J]. Simulation Transactions of the Society for Modeling & Simulation International, 2017, 93(6): 447-457.
- [8] 马书红,孙朝旭. 基于系统动力学的城市交通系统供需分析模型[J]. 长安大学学报: 社会科学版, 2017, 19(3): 31-37.
- [9] Agrawal S, Zheng H, Peeta S, et al. Routing aspects of electric vehicle drivers and their effects on network performance [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, 46: 246-266.
- [10] 黎宇科,刘宇. 国外智能网联汽车发展现状及启示[J]. 汽车工业研究, 2016(10): 30-36.
- [11] 张懿,刘焰. 大数据时代下的智能网联汽车发展研究[J]. 江苏科技信息, 2016(24): 7-9.
- [12] Coppola R, Morisio M. Connected car: technologies, issues, future trends [J]. Acm Computing Surveys, 2016, 49(3): 1-36.
- [13] 王兆,邓湘鸿,刘地. 中国智能网联汽车标准体系研究[J]. 汽车电器, 2016, 338(10): 15-18.
- [14] Faezipour M, Nourani M, Saeed A, et al. Progress and challenges in intelligent vehicle area networks [J]. Communications of the Acm, 2012, 55(2): 90-100.
- [15] 欧阳明高. 从智能化电动汽车发展的角度谈“互联网+汽车+交通”[J]. 汽车纵横, 2015(9): 20-22.
- [16] 黄武陵. 智能车辆环境感知技术与平台构建[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2016(8): 9-13.
- [17] Guériau M, Billot R, Faouzi N E, et al. How to assess the benefits of connected vehicles? a simulation framework for the design of cooperative traffic management strategies [J]. Transportation Research: Part C, 2016, 67: 266-279.
- [18] 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[J]. 汽车安全与节能学报, 2013(4): 348-355.
- [19] 马飞跃,王晓年. 无人驾驶汽车环境感知与导航定位技术应用综述[J]. 汽车电器, 2015, 318(2): 15-19.
- [20] 蔡伯根,王丛丛,上官伟,等. 车路协同系统信息交互仿真方法[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(3): 111-119.
- [21] 谢伯元,王建强,秦晓辉,等. 基于车路协同的车辆状态估计方法[J]. 汽车工程, 2014(8): 968-973.
- [22] Wang J, Niu H. Graded information feedback strategy in two-route systems under ATIS[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition. 2014, 1(2), 138-145.
- [23] 贺倩. 人工智能技术发展研究[J]. 现代电信科技, 2016(2): 18-21.
- [24] Lipson H, Kurman M. 无人驾驶[M]. 林露茵,金阳,译. 上海:文汇出版社, 2017.
- [25] 赵新勇,李珊珊,夏晓敬. 大数据时代新技术在智能交通中的应用[J]. 2017, 3(5): 1-7.