

文章编号:1001-7372(2019)08-0001-24

智能公路发展现状与关键技术

徐志刚¹, 李金龙¹, 赵祥模¹, 李立¹, 王忠仁², 童星³,
田彬¹, 侯俊¹, 汪贵平⁴, 张骞⁵

(1. 长安大学 车联网教育部-中国移动联合实验室, 陕西 西安 710064; 2. 加利福尼亚交通厅, 加利福尼亚 萨克拉门托 CA95833; 3. 齐鲁交通信息集团有限公司, 山东 济南 250102; 4. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064; 5. 东软集团软件架构新技术国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110179)

摘要:借鉴美国自动公路系统(Automated Highway Systems, AHS)技术框架,系统回顾了初级应用、通信技术、绿色能源技术、自动驾驶技术等不同因素驱动下智能公路的概念演化、技术发展和未来变革。根据当前信息技术的发展趋势,在 AHS 的研究基础上延伸和扩展了智能公路的概念和技术框架,提出了未来智能公路系统的演化方向以及包含信息管理层、网络通信层和感应控制层的智能公路体系架构。同时,瞄准当前主流技术和未来科技发展方向,总结了泛在无线通信、高精度定位与导航、车辆队列控制、无线充电、道路智能材料、道路主动安全控制、面向出行即服务的车路信息交互、基于基础设施的智能决策规划等驱动智能公路快速发展的新兴技术研究现状,并基于这 8 项关键技术的自身发展特点,提出了未来智能公路技术应用和推广的建议措施;分析了车路协同一体化、智能平行系统、人工智能、交通信息安全、自动驾驶等新兴技术将对未来智能公路发展带来的冲击和影响;系统性地预测了智能公路技术的商业化推广路线以及未来智能公路的应用将进一步降低自动驾驶的技术设备成本,为自动驾驶提供了一个更安全、更稳定和高效的交通环境。研究成果将对当前和未来智能公路的技术研发和工程应用具有一定指导意义。

关键词:交通工程;智能公路;综述;智能交通系统;道路基础设施;平行智能公路;车路协同

中图分类号:U495 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.08.001

A Review on Intelligent Road and Its Related Key Technologies

XU Zhi-gang¹, LI Jin-long¹, ZHAO Xiang-mo¹, LI Li¹, WANG Zhong-ren², TONG Xing³,
TIAN Bin¹, HOU Jun¹, WANG Gui-ping⁴, ZHANG Qian⁵

(1. The Joint Laboratory for Internet of Vehicles, Ministry of Education -China Mobile Communications Corporation, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. California Department of Transportation, Sacramento CA95833, California, USA; 3. Qilu Transportation Information Group Co., Ltd., Jinan 250102, Shandong, China; 4. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 5. State Key Laboratory of Software Architecture State Key New Technology, Neusoft Corporation, Shenyang 110179, Liaoning, China)

Abstract: Based on the technical framework of automated highway systems (AHSs), the influence of different driving factors such as primary application, communications technology, green energy technology, and automated driving technology, the evolution of concepts,

收稿日期:2018-10-04

基金项目:国家重点研发专项(2018YFB0105104);东软集团软件架构国家重点实验室开放课题(211924180084);
国家自然科学基金项目(61973045)

作者简介:徐志刚(1979-),男,湖北鄂州人,教授,工学博士,E-mail:xuzhigang@chd.edu.cn.

通讯作者:赵祥模(1966-),男,重庆市人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:xmzhao@chd.edu.cn.

development of technology, and future changes in intelligent roads (IRs) were reviewed in this paper. According to the current development trend in information technology, the concept and technical framework of IRs have been extended and expanded on the basis of studies on AHSs. The direction of evolution of the IR system in the future, and its system architecture, which consists of a management layer, network layer, and application layer, were presented. Meanwhile, focusing on the current popular technologies and the development direction of science and technology in the future, the status of research on emerging technologies driving the rapid development of IRs were summarized, such as ubiquitous wireless communication, high-precision positioning and navigation, vehicle platoon control, wireless charging, road intelligent materials, road active safety control technology, vehicle-to-road information interaction for Mobility-as-a-Service, intelligent decision planning technology combined with infrastructure, etc. Based on the development characteristics of these eight key technologies, some recommendations on the application and promotion of IR technology in the future are presented. Meanwhile, the influence and impact of emerging technologies such as vehicle-integrated integration, intelligence parallel systems, artificial intelligence, and traffic information security on the future development of IR were analyzed. Finally, this paper systematically predicted the commercialization promotion route of IR technologies, and that the application of IR will further reduce the cost of technologies and equipment in autonomous driving, providing a safer, more stable and efficient traffic environment for autonomous driving in the future. The research results of this paper have significance as reference for current and future technology research and development of IR and engineering applications of IR.

Key words: traffic engineering; intelligent road; review; intelligent transportation system; road infrastructure; parallel intelligent road; vehicle-infrastructure cooperation

0 引言

智能公路(Intelligent Road, IR)是一种多功能集成的道路基础设施系统,可以提供大量全局、实时和先验信息,辅助智能网联汽车(Intelligent and Connected Vehicle, ICV)^[1]环境感知和即时通信,可以消除行车安全和交通拥堵隐患,使得未来道路交通系统能够更加安全、高效、环保和舒适。

智能公路是智能交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)^[2]的重要组成部分,20世纪60年代初,就有学者和机构提出自动化公路的概念^[3-5],直到20世纪80年代,美国联邦公路管理局(Federal Highway Administration, FHWA)开展了有关自动公路系统(Automated Highway Systems, AHS)研究^[6-7]。相关研究指出,AHS是通过安装在道路和车辆上的传感器收集信息,利用该信息在极少或无人干预的情况下自动驾驶车辆的一种系统^[8]。其所研究的技术旨在为车辆提供指导,通过减少事故来改善交通流和公路安全,同时减少燃料消耗和污染^[9]。AHS的重点是为自动驾驶车

辆提供基础设施支持,路侧控制系统和车辆本身可以保障车流运行的安全和高效性^[10]。AHS是一种可以很好地解决道路拥堵、行车安全问题和提高道路利用率的解决思路,可以增加道路通行能力^[11],其路侧控制系统可以优化整个道路容量和交通流量^[12]。Hall等^[13]提出将控制、传感和通信技术应用于公路车辆的公路自动化可以提高道路性能并将道路容量提高3倍左右。AHS通过自动化提升道路交通的安全性和效率^[14]。此外还有智能车辆与公路系统(Intelligent Vehicle and Highway System, IVHS),该系统是美国政府根据1991年多式联运地面运输效率法案启动的一项综合计划,旨在提高安全性,减少拥堵,提高机动性,减少对环境的影响,节约能源,并提高运输中的经济生产力^[15]。

智能公路使智能网联汽车提高行驶环境感知能力和环境适应能力,是帮助其实现安全快速自主导航的可靠保障,有助于智能网联汽车提供更安全便捷的出行方式。研究表明^[16],在完全自动驾驶阶段,自动驾驶车辆可以完全避免交通事故的发生,并且提升交通效率30%以上。但是目前无人驾驶的

环境感知能力和应对各种突发事件的能力还存在许多不足^[17]。通过将感知设备、通信设备、控制设备等^[18]安装到道路基础设施上,让道路“聪明”起来,为通行的车辆提供环境感知和通信支持,可以从时间和空间维度上突破单车智能系统对车辆周边环境感知能力的局限性^[19]。但是目前有关智能公路基础设施的研究并不多,在早期的 AHS 研究中,Carbaugh 等^[20]研究了 4 种不同的自动化公路系统,量化研究了 AHS 车辆间合作对运行速度的影响。Li^[21]为 AHS 提供了一种基于面向服务的体系架构(Service Oriented Architecture, SOA),建立了一个将传感器资源,数据资源和处理资源的注释扩展为服务的公路信息系统。Baskar 等^[22]基于 AHS 的分层交通控制架构提出了综合交通管理和控制方法。在 IVHS 中,AHS 被认为是先进的车辆控制系统。因此可将 AHS 定义为:“AHS 由自动驾驶车辆、车路通信与协同和智能的道路基础设施三部分组成,其目标是通过通信、电子、自动化技术构建车辆-公路一体化系统,实现在车辆之间实时通信的环境下,最大限度地提高道路通行能力^[23]”。

随着科学技术的不断进步,AHS 逐步朝着智能化的方向发展,智能公路将是一种为用户提供泛在移动服务供应的交通环境配备的必要设施^[24]。根据相关文献调研,可以看出智能公路的概念和应用仍处于演化阶段,其内涵和外延仍将不断扩展,但其本质仍然定位在智能化上。与传统道路的区别在于其对道路自身状态信息的获取是实时的,其内部各元素之间的信息是共享的,其管理与决策支持系统一定程度上实现了智能化,其目标是让道路更加安全、高效、节能、环保和可持续发展。

为了厘清国内外智能公路及其关键技术的发展现状,本文以 AHS 为原型,对国内外智能公路的核心概念和技术体系架构进行了系统梳理,分阶段回顾和总结了智能公路的发展进程和最新的发展状况,对智能公路建设和发展的关键性技术进行了解析和重构,并对智能公路未来的发展趋势进行了展望和思考。

1 智能公路的发展历程

1.1 美国 AHS 体系构架及演化

智能公路技术体系中集成应用了计算、传感、通信、网络、自动控制及智能材料等技术,是一个环境感知化、网络互联化和系统集成化的多功能技术发展框架。早先 AHS 的概念依据自动化程度可以分

为部分自动化系统和全自动系统。部分自动化系统包括通知和警告系统,采用临时紧急控制和连续部分控制,在紧急情况下对车辆进行有限控制。美国国家自动化公路系统联盟(National Automated Highway System Consortium, NAHSC)根据车辆和基础设施协同工作的程度,定义了从协作到全自动的几种供选择的 AHS 概念,主要包括自动驾驶、合作协同、基础设施支持和管理控制这 4 个阶段概念,并介绍 AHS 具有的位置保持、车道变换、拥堵缓解和流量控制的功能在不同阶段的演化概念。图 1 显示了这些可供选择的观念和它们的 4 个功能^[25]。随着科学技术的快速发展和交通环境的巨大变化,AHS 的概念变得更加广泛和创新。

本文在 AHS 的基础上,对智能公路的概念内涵增加了新的技术,并对其功能进行了扩展,在 AHS 基础上增加了能源供给和道路养护 2 个功能,不同阶段在功能上的演化内容,构建了满足社会发展和公众更高出行要求的智能公路系统技术框架。预测了未来智能公路系统的演化方向,即在自动驾驶前期可能存在人工驾驶和半自动驾驶共存发展的阶段。随着智能公路信息感知、处理、传输、计算、融合决策系统的不断完善,智能公路最终将达到物理公路与数字化公路并存,二者实现虚实信息交互,共同完成决策-控制-管理的功能,成为具有平行智能特征的高级阶段,如图 1 所示。

以实现智能公路的作用功能为目的,集成现代化的技术条件,图 2 从智能公路系统层级出发,梳理了当前智能公路的结构层次和相关概念,在该框架中智能公路将通过路侧设备实时感知和收集车辆的行驶状态和道路状况,然后通过泛在网络实现智能公路各实体之间的互联互通,接着运用大数据和云平台技术对数据进行动态交互、信息挖掘和智能决策等一系列处理,从而为车辆、驾驶人、管理者等参与者提供全面高效的信息服务。

未来智能公路的体系架构将是一个集环境感知、规划决策、信息交互、自动修复等功能于一体的高新技术道路综合体。对图 2 智能公路系统的结构层次概念进行简化和集成,本文主要将其分为 3 个结构层次:感知和控制层、网络通信层、信息管理层。

(1) 感知和控制层

感知和控制层对应图 2 的感应和收集模块,主要由路侧设备和智能车辆两部分组成,实现道路和车辆信息的有效采集以及执行设备的有效控制,同时还负责底层传感器工作状态的自动监测和动态管

系统概念	位置保持	车道变换	拥堵缓解	流量控制	能源供给	道路养护
人工驾驶 全部是手动车辆在路上运行; 无需基础设施的帮助和通信	驾驶人控制	驾驶人控制	驾驶人控制		传统电力	定期人工巡视维修
半自动驾驶 通过导航等车载设备, 辅助驾驶人控制, 实现监督下的自动驾驶	半自动感知驾驶人监督	车辆自动感知前方车辆和道路状况	车辆自动感知前方车辆和道路状况		传统电力	定期人工巡视维修
自动驾驶 全自动车辆与手动车辆一起运行; 无需基础设施的帮助和通信	车辆自动感知前方车辆和道路状况	自动寻找并进入1个空缺位置	车辆刹车侦测障碍, 如有可能改变车道		传统电力	定期人工巡视维修
合作协同 车辆间共享信息, 协调机动和实现完全自动化的行驶	通过与其他车辆通信实现变道和队列	通过车辆间的通信合作进行决策	车辆感知、传达警告并协调机动		传统电力	基础设施半自动感知, 通知人工维护
基础设施支持 在专用车道上运行, 利用全局信息与智能基础设施的双向通信支持车辆决策	与合作协同相同, 但在基础设施的指导范围内	车辆间通信合作进行决策	车辆感知、传达警告并协调机动	基础设施监控流量, 制定响应, 将参数发送到本地车辆组	风能、太阳能、动能	车辆自动感知前方车辆和道路状况
管理和控制 自动路侧系统在车流进出、合并和紧急情况下, 为车辆间的协调管理, 基础设施和车辆间的协调提供服务	基础设施和车辆通信, 感知车辆位置并发送命令控制车辆状态	前期基础设施响应围绕车辆的命令, 后期控制所有必要的车辆	基础设施感知, 基于基础设施或车辆检测向车辆发送命令	基础设施监控单个车辆, 执行车辆优化策略	新环保能源, 实现无线充电	基础设施管理系统全自动感知半自动维护
平行智能公路 通过虚实结合的交互方式实现真实公路系统与虚拟公路系统之间的信息流传递	仿真和现实系统的交互, 控制车辆状态	仿真和现实系统交互控制车辆群的转变	仿真和现实系统交互控制, 实现最优方案	仿真和现实系统交互控制, 实现最优方案	新型能源系统, 大幅提高利用率	全自动基础设施维护系统

图1 基于AHS概念的智能公路框架^[25]

Fig. 1 Framework of IR Based on AHS Concept^[25]

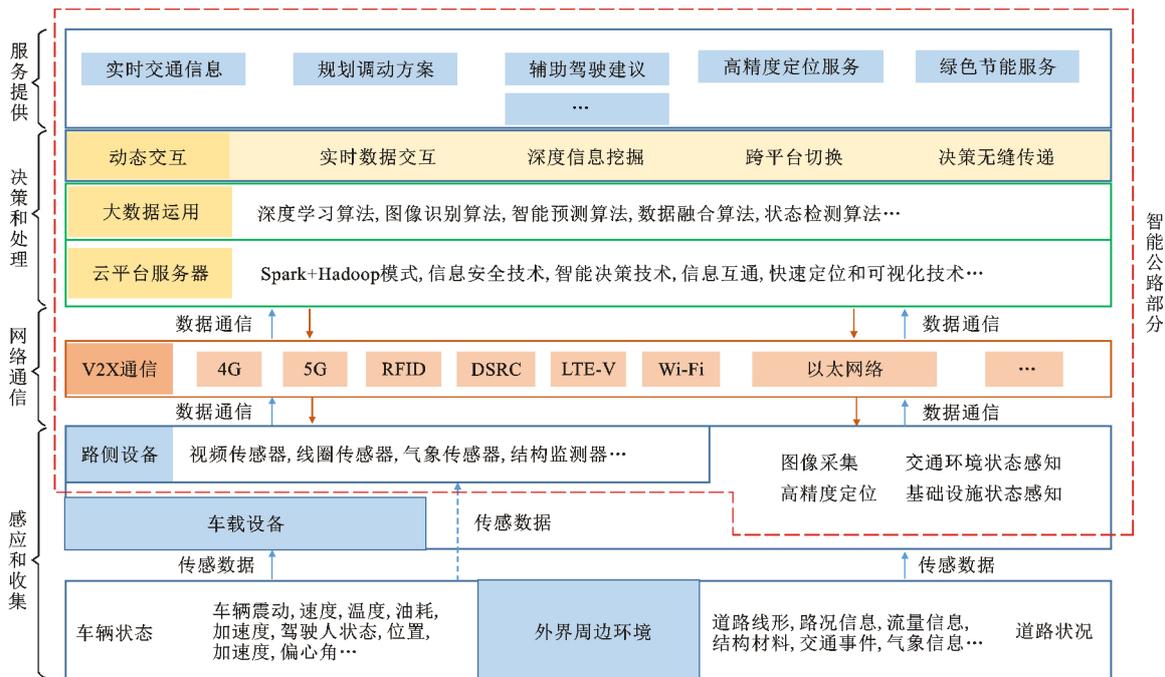


图2 智能公路的结构层次和相关概念

Fig. 2 Concept and Structure of IR

理。由于道路状况和车辆行驶环境的复杂性, 目前仅仅依靠智能汽车的摄像头、激光雷达、毫米波雷达等车载传感器感知周围环境状况, 其检测和识别精度无法满足自动驾驶的发展需求, 智能公路通过结

合路侧设备和车载传感器可以更为全面地获取丰富的周边环境信息, 为自动驾驶提供丰富全面的路况信息和决策依据。同时深度学习也被应用在环境感知方面, 对道路物体和图像的识别分类工作有巨大

优势^[26-28]。

(2)网络通信层

网络通信层对应图 2 中的网络通信模块,主要由各种通信技术如 V2X (Vehicle to Everything)通信技术和网络协议组成,主要是实现传感网、车联网、光纤网络和各种无线网络之间的互联互通,保证各类信息的有效传输,同时满足极端条件下网络的稳定性和信息安全性。网络通信层通过车内通信网、车际通信网和广域通信网的整合互通,可以更有效地获得驾驶人信息、车辆姿态信息和汽车周边环境信息数据,为数据的整合和分析提供了丰富的渠道。在不同等级的智能化载运工具与智能公路连接匹配方面,智能公路为载运工具提供车路通信及感知信息等数据传输的统一标准化接口。

(3)信息管理层

信息管理层对应图 2 中的决策处理和服务提供模块,主要由云平台技术和大数据技术组成,实现人-车-路数据的存储,信息挖掘和决策支持。目前常用的决策方法有状态机、决策树、深度学习、增强学习等^[29];通过对车路数据的实时状态分析实现对车流在时间和空间上的引导、分流,避免交通拥堵。同时提高车道管理,通过可变交通标志或数字交通广播发布交通诱导信息。

1.2 智能公路发展阶段

为了更好地了解智能公路的发展和现状,根据智能公路的技术发展路径,本文将智能公路发展归纳为 4 个阶段:概念初级应用阶段、通信技术驱动发展阶段、绿色能源技术驱动发展阶段和自动驾驶技术驱动发展阶段。每个阶段技术的应用都丰富并扩展了智能公路的概念和内容,使其从最初的概念模型向多功能、多元化的技术集成方向发展。

1.2.1 概念初级应用阶段

20 世纪 70 年代至 90 年代,智能公路的概念开始走进公众的视野,各国开始相关的研究和系统开发,很多智能公路研究合作项目开始起步。1986 年成立的美国加州 PATH 项目是北美首个专注于智能交通系统的研究项目,对 AHS 进行了全面系统研究和长期试验探索。PATH 计划将 AHS 架构分为 5 个层级:网络层(Network Layer)、链路层(Link Layer)、协调层(Coordination Layer)、管理层(Regulation Layer)和物理层(Physical Layer)^[30]。如图 3 所示,其中网络层的功能是基于路侧或车辆的传感器收集的信息来估计高速公路的网络状态。链路层通过广播链路获得车辆的加速度和排队长度目标

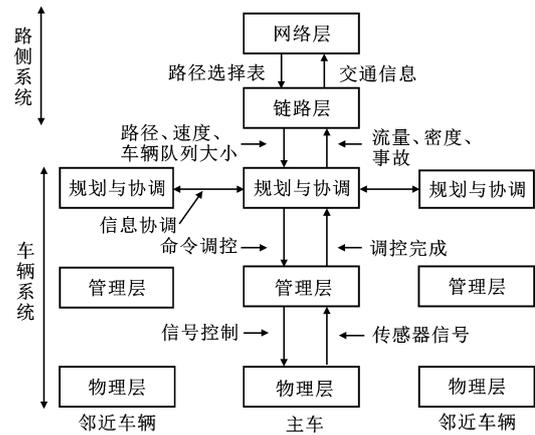


图 3 在 PATH 项目中 AHS 的层次结构^[31]

Fig. 3 Hierarchical Architecture of the AHS in the PATH Program^[31]

值,控制高速公路网络的路段或链路中的交通流量^[31]。协调层主要是协调车辆组之间操纵的执行,同时辅助管理层执行操纵。管理层和物理层构成的闭环控制系统在纵向和横向上控制每辆车。1988 年 9 月第 1 次使用嵌入道路中的永久磁钉进行车辆引导试验,证明了根据磁场测量可精确检测车辆位置^[32]。1991 年 2 月建造了 1 条约 300 m 长的测试跑道,提供了基于磁力引导概念测试自动车辆转向控制的场地,并在丰田 Celica 上实施了第 1 个自动转向控制。另外,始于 20 世纪 80 年代的弗吉尼亚智能道路项目,是一条长约 9.17 km 且限制进入的高速公路,目前已经建成为美国北部唯一能够测试自动驾驶、网联技术与智慧交通系统的一条道路^[33]。

日本于 1973 年开始进行第 1 个智能交通项目汽车综合交通控制系统(Comprehensive Automobile Control System, CACS),该项目研究了世界上最早的道路自动导航系统^[34]。20 世纪 80 年代中期到 90 年代中期,日本成功研制了路车间信息系统(Road Automobile Communication System, RACS)、先进的车辆交通信息与通信系统(Advanced Mobile Traffic Information and Communication System, AMTICS)等项目^[34-35]。欧洲于 1987 年开始进行欧洲高效安全交通系统计划,其主要目的是进行交通运输信息化领域的研究^[36]。美国于 1990 年成立了智能化车路系统组织,开始利用通信和信息技术对道路交通进行研究,从而提高道路交通效率。1994 年 1 月,日本成立路车交通智能协会(VETIS),1995 年 7 月成立道路交通信息通信系统(VICS)中心。1999 年起,中国智能交通系统

工程技术研究中心以车辆磁诱导控制技术为切入点,对智能公路系统进行了深入研发^[37]。

1.2.2 通信技术驱动发展阶段

2003年9月,欧洲ITS组织欧洲智能交通协会(ERTICO)提出了电子化安全(Electronic Safety, ESafety)的概念,开始了欧洲车路协同系统的研究,同时欧盟开始主导欧洲ITS的研究和应用。在2011年1月1日欧盟正式启动车联网项目Drive C2X,并于2014年试验成功。在2010年,美国推出了《智能交通系统战略计划(2010—2014)》,接着在2012年8月发布了《智能交通系统战略计划(2010—2014):2012年进展》,确立Connected Vehicle为车路协同相关研究的总称,而基于安全的专用短程通信(Dedicated Short Range Communications, DSRC)的车车通信(Vehicle to Vehicle, V2V)技术已取得初步成果并完成了典型应用。2006年,日本政府联合23家知名企业开启了SmartWay计划,该计划是日本车路协同系统发展的基础,它设计了系统的体系框架和开放的平台结构。SmartWay系统已经于2010年在全日本普及。中国对车路协同技术的研究起步较晚,2010年10月中国科技部在“八六三”计划中提出2项涉及车联网关键技术的项目,即智能车-路协同关键技术研究以及大城市区域交通协同联动控制关键技术研究,于2014年2月通过了验收,该项目完成了车路协同系统的体系框架,提出了车路协同系统的集成测试与演示方案,突破了多项关键技术,如图4所示^[38]。由图4可以看出:车辆与基础设施(Vehicle to Infrastructure, V2I)通信和车辆间通信以及相应的智能交通应用构建了一个主动式提升交通安全的有效平台。

1.2.3 绿色能源技术驱动发展阶段

在绿色能源技术驱动发展阶段,人们更加关注道路的环保建设和绿色出行方式。在第16届智能交通世界大会上重点关注了未来的交通、气候变化以及智能交通的发展,目的是让智能交通领域的众多技术能够为节能减排做出贡献。在这个阶段,通过在道路上安装光伏发电板等发电设备以及使用绿色清洁能源达到节能减排和保护环境的目。在节能减排方面,出现了以利用太阳能为主的清洁能源的新型智能公路。欧洲公路研究实验室提出了永远开放道路(Forever Open Road)的概念^[39],其中就包括了直接应用到道路本身,而不是在道路的边缘的太阳能发电模块。其理由是,修建沥青路面会产

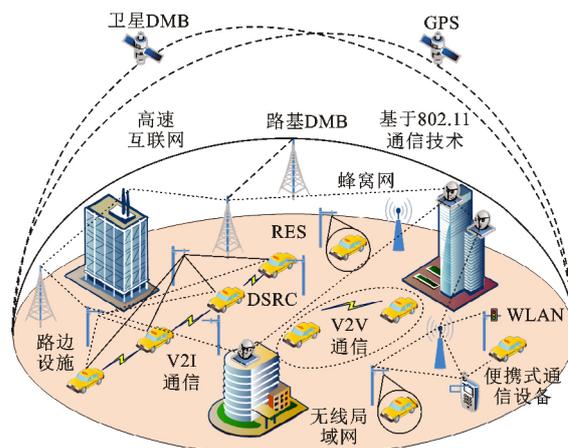


图4 车路协同实现多模式交通的互联^[38]

Fig. 4 Car-road Collaboration to Achieve Multi-modal Traffic Interconnection^[38]

生成成本,这可以从更昂贵的太阳能电池板的成本中扣除。另外太阳能道路还可以提供集成LED的车道标识,以及防止冬季冰雪堆积的加热元件。从理论上讲,道路板的发电量随着时间的推移将覆盖建设成本,而如果广泛部署,将提供分散的电网系统。2010年,获得美国联邦公路管理局10万美元投资的太阳能电池板原型,是一种多层预制面板,其透明的玻璃表面和太阳能电池板构成了表面层,并配备嵌入式LED照明。在它下面是电子层,包含控制照明、加热、通信和监控的微处理器,最后是分配电源和数据信号的基板层。2014年上半年,荷兰在其首都阿姆斯特丹的N329公路上改造了第1条能够发光的智能公路。随后美国、法国、英国等纷纷推出了自己的新型能源道路。2017年12月,全球首条光伏高速公路在中国济南投入运营,这条仅2 km的路面已实现并网发电,未来将实现车辆移动充电。此外美国、法国、英国、韩国等也建设了自己的光伏发电道路,以探索太阳能在道路方面的应用。这种以光伏路面为代表的绿色公路,可以为道路自动除冰、电动汽车无线充电等服务提供有效的清洁能源保障。

1.2.4 自动驾驶技术驱动发展阶段

在自动驾驶技术驱动发展阶段,以自动驾驶为目标的智能网联汽车技术得以不断发展,在近期实现安全、舒适、节能、高效行驶的优化目标,远期实现无人驾驶的目标^[40]。美国、日本和欧洲的发达国家纷纷开始对一些试验道路的通信设备、环境感知设备进行智能化改造和升级,以辅助智能网联汽车完成高度自动化的行驶。弗吉尼亚 Smart Road 试验场进行的关于测试自动驾驶、网联技术与智慧交通

系统的研究项目已经超过 1 800 项,其中最具有特色的是建立了一段具有天气模拟系统的道路系统^[33]。

目前受控封闭的智能网联测试场地承担着智能网联汽车技术研究、模块开发、性能验证等多项功能。测试场模拟多种道路场景并装备相关通信定位设备,也是改造智能公路的必要设施。在智能网联汽车试验场方面,国外建设时间较早,有许多可以为智能道路建设提供参考。位于美国密歇根州安娜堡市的著名的 Mcity 试验场^[41-42],是由密歇根大学和密歇根州交通部共同出资 1 000 万美元为自动驾驶、车联网技术和电动安全系统的研究开发、测试评价而打造的模拟小镇,是全球首个专为智能网联汽车设计的试验场。始建于 2014 年的瑞典 Astazero 安全技术综合试验场是欧洲现有最大的智能汽车试验场,测试包括通信技术、V2V 和 V2I 功能、车辆动力学等内容^[43];英国著名汽车测试服务商 Mira 公司修建的 City Circuit 试验场位于英国米德兰,占地约 304 万 m²,为传统车辆和智能网联汽车提供了一个完全可复制的安全现实环境。韩国、日本等也拥有和建造了自己的智能汽车测试场。

近几年中国的智能汽车测试场的建设和发展迅速。2016 年 6 月 7 日,由工信部批准的中国首个国家智能网联汽车(上海)试点示范区封闭测试区正式开园运营,该试点示范区封闭测试区位于嘉定,是全球范围内功能场景较多、DSRC 和 LTE-V 等 V2X 通讯技术较全面的封闭测试区。目前中国已经获批的示范区还包括北京、吉林、重庆、武汉、浙江的 5 个示范区。除了上述几个示范区以外,湖南的湘江新区智能驾驶测试区和深圳总投资规模 100 亿元的 M-CITY 项目也在重点建设中。在高校试验场方面,长安大学车联网与智能汽车试验场走在了全国前列。试验场占地 28 万 m²,建有 2.4 km 的汽车高速环形跑道,1.1 km 的直线试车道、1.3 万 m² 的操纵稳定性试验广场、F3 车道、汽车驾驶训练场,5 种可靠性强化典型试验道路、3 种低附着系数路面等专用汽车试验道路设施等,集成了 4G-LTE, LTE-V, Wi-Fi, 802.11p, EUHT 五种无线网络,构建了较为完备的车联网通信体系,如图 5 所示。试验场道路系统可以作为智能公路原型系统,2018 年 7 月 10 日,交通运输部依据《自动驾驶封闭测试场地建设技术指南(暂行)》为长安大学、交通运输部公路科学研究院、招商局重庆车辆检测研究院 3 家进行了自动驾驶封闭场地测试基地资质认定,并授牌。随着自动驾驶汽车上路测试和自动驾驶测试场地的开

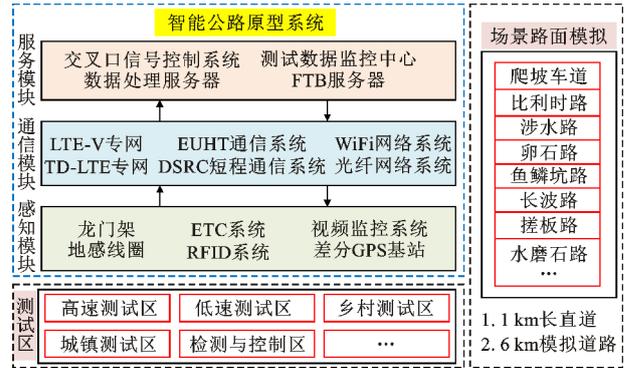


图 5 长安大学车路协同试验场智能道路原型系统

Fig. 5 IR Prototype System in Chang'an University Vehicle Road Collaborative Test Site

启,也将加快道路基础设施的智能化发展和商业化进程。

2 智能公路关键技术

智能公路是集成了多方面专业技术的一个复杂、庞大的系统性工程,涉及信息采集与处理、信息加密与传输、道路材料、智能化管控与检测等多个方面的技术。本文根据目前主流技术和有前景的发展方向,总结了未来应用在智能公路上的八大关键技术,主要包括:泛在无线通信技术、车辆全时空连续高精度定位与导航技术、基于车路协同的车辆队列技术、无线充电技术、道路智能材料技术、面向主动安全的道路控制技术、面向出行即服务(Mobility as a Service, MaaS)的车路信息交互技术和结合基础设施的智能决策与规划技术等。

2.1 泛在无线通信技术

泛在网是在异构网络融合和频谱资源共享基础上实现无所不在的网络覆盖,可以利用现有的和新的网络技术,实现无所不在并且按需进行的信息获取、传递、存储、认知、决策、使用等综合服务的网络体系。在智能公路中,无线通信的各种技术的互补性越趋明显和重要,针对人、车、路不同终端的不同接入技术具有不同的覆盖范围,不同的适用区域,不同的技术特点和不同的接入速率,推进组合网络的一体化进程和多元化融合非常重要,如图 6 所示。泛在无线通信技术是智能公路设施平台正常运行的重要保障,现在的主要工作是无线通信技术如何与公路设施更好地融合和车路通信的网络性能问题的解决。

目前有大量研究将无线通信技术在智能公路上进行测试和应用。其中光纤无线电(Radio-over-Fiber, ROF)技术^[44]是一种可以用于未来建设新型

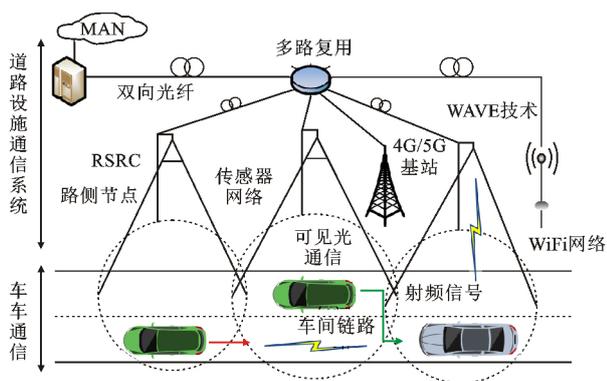


图6 泛在无线技术在智能公路中的应用

Fig. 6 Application of Ubiquitous

Wireless Technology in IR

V2I 信息交互的通信系统,可实现多种信息的高速率可靠传输与交互。基于路侧无线基站的 Carlink 平台^[45]支持汽车之间通信,并可提供基于混合智能交通的无线服务,应用于各种交通和安全服务的真正双向通信实体。可见光通信(Visible Light Communication, VLC)技术^[46]可以应用在自动驾驶车队列上。Noh 等^[47]提出了一种扩展了环境感知的范围,并提高了高度自动化驾驶情境感知性能的 V2I 协作系统。在智能公路上路侧单元(Road Side Unit, RSU)部署条件和通信设置对支持 IEEE 802.11p 协议的 V2I 的通信质量产生影响^[48],主要是影响车辆协同驾驶,特别是车辆在交通干扰情景中。为解决环境干扰的影响,Jia 等^[49]开发了一种考虑 V2X 的增强型合作微观跟车交通模型,同时应用可用于交互式通信的 WAVE 技术^[50],车辆可以通过使用基础设施通信,即使 V2V 通信服务突然中断,基础设施也可以提供可靠的服务。

在车路通信的网络性能服务方面,Dey 等^[51]评估了 Het-Net 的性能,包括 Wi-Fi、DSRC 以及 LTE 技术,用于 V2V 和 V2I 通信。其在此基础上开发了应用层切换方法,以便为 2 个联网车辆技术(Connected Vehicle Technology, CVT)应用启用 Het-Net 通信:流量数据收集和前向冲突警告,还成功使用应用层切换技术维护 CVT 应用的无缝连接,可以在未来支持 Het-Net 的连接车辆中采用。Chennikara-Varghese 等^[52]提出了一个用于将 RSU 与本地对等组(Local Peer Groups, LPG)组织和路由协议集成的概念框架,但在 LPG 中,还需要开发高效可靠的单播和多播协议,以及支持此类 LPG 到 RSU 协议扩展的多通道 MAC 协议。在交互通信中,V2V 和 V2I 通信对连接性能有重要影响。可以

考虑使用车对车的方法协助在车辆和基础设施之间传输安全相关信息^[53]。在双向道路情景中多个 RSU 之间的合作方面,Ko 等^[54]提出最大服务算法,提高了 V2I 与 V2V 通信的信道效率,以最大化系统性能。文献^[55]研究了波束设计,以最大化基于波束切换的毫米波 V2I 系统的数据速率。Ubiergo 等^[56]提出了基于 V2I 通信的咨询速度限制控制策略。文献^[57]为车载自组织网络中的性能分析和聚类设计提出了一种新的分析模型,以实现所需的系统可靠性和网络吞吐量。

泛在无线通信技术是实现高度智能的车-路通信与协作的基础。虽然目前相关行业已经取得了很多重要成果,但是中国在此领域还有很多实际问题急需解决和攻克,例如:信道划分和频率资源分配、自组织网络架构设计、链路复用技术、异构网络垂直切换方法、天线增益及灵敏度和 DSRC 新标准制定等问题。目前比较成熟的商业技术是中国华为、大唐等企业力推的车间通信长期演进技术(Long Term Evolution-Vehicle, LTE-V),该技术相比 DSRC 技术具有兼容蜂窝网、可平稳过渡至 5G 系统等多重优势。

2.2 车辆全时空连续高精度定位与导航技术

高精度定位技术是实现车辆安全应用和个性化交通信息服务的基础。随着北斗系统亚米级精度定位技术的逐渐成熟,同时通过与道路基础设施上安装的 WLAN 信号定位、射频无线标签定位等无线定位技术相结合,有利于将高精度定位技术直接应用于城市交通规划和管理、智能公交、车辆安全和辅助驾驶、智能出行等各个领域,从而推动智能公路的技术升级。但现有的 GPS、惯性导航等设备定位精度不足,且容易受环境影响,无法满足智能公路应用需求。因此探索新的、精度高且经济效益好的定位技术是实现智能公路的关键。

在高精度定位技术研究方面,广域精确定位技术^[58]可以应用于车辆网络系统,可以在城市环境中提供车道级定位服务。O'Keefe 等^[59]提出了一种将载波相位差分 GPS 与超宽带(Ultra-wide Bandwidth, UWB)测距紧密耦合的方法,用于 V2I 的相对导航。Haak 等^[60]提出了一种解决车辆定位精度易受数字地图质量影响的车道级高精度车辆定位方法。文献^[61]中在车道上将具有不同色温和光学聚焦的 LED 路灯安装到车道线上,通过分析色度点的坐标确定自驾车的位置^[61]。Kawamura 等^[62]开发了一种具有超高频射频识别(Radio Frequency

Identification Devices, RF-ID)系统的车辆导航系统,使用埋在路面下的 RF-ID 标签中的信息找到车辆位置,RF-ID 标签具有通过驾驶支持信息使驾车道智能化的能力。Pashaian 等^[63]提出了一种基于模糊逻辑和神经网络的地图匹配法,并开发了融合低成本 GPS 接收器和微控制器芯片的汽车导航系统。Dai 等^[64]开发了一个基于车载自组织网络的基于位置的服务(Location Based Service, LBS),利用 RSU 作为处理K最近邻(K-Nearest Neighbor, KNN)查询的道路基础设施支持。Kim^[65]提出了基于基础设施的路径跟踪控制系统,该控制系统包括基础设施传感器模块、车辆控制器和执行器模块。结合以上高精度定位技术,在智能公路未来的建设上,可以将 LED 灯、射频识别等多种传感器互联融合,实现全面、及时的车辆信息定位。

在提高车辆导航精度方面,Pashaian 等^[66]提出了 2 种基于模糊逻辑和神经网络的方法来解决汽车导航系统中的匹配问题。Zhang 等^[67]提出了一种利用对称测量方程滤波器进行协同定位以解决数据关联问题的解决方案。De Ponte 等^[68]提出利用雷达传感器检测周围道路基础设施,并基于全球导航卫星系统(GNSS)定位相关联错误的解决方案。为解决载波相位整数模糊,Vu 等^[69]提出了使用惯性测量单元、双频 GPS 伪距和载波相位接收器估算传感器平台轨迹的平滑框架,其位置精度为厘米级。Liu 等^[70]提出了一种通过专用短程通信和航位推算集成的低成本协同车辆定位解决方案,促进了基于 DSRC/DR 集成的解决方案以补偿 GNSS 并实现期望的准确性和可用性。

在未来的智能公路上,对道路中的大规模车辆进行实时高精度定位,有助于精细化的交通流特性刻画及精准控制,有利于城市交通的实时监控和车流引导控制,使车辆可以根据当前位置信息和变道、超车、运动方向纠正等微观运动识别,实现异常行为的自动辨识和碰撞预警。图 7 给出了未来智能公路通过融合无线定位技术、惯性导航系统、卫星定位、车辆自主定位、路侧设施辅助定位和高精度地图实现智能公路大规模车辆的实时精准定位的总体解决方案,该方案将充分利用路侧设施提供的定位信息弥补卫星定位的不足,从而保证智能公路上所有车辆高精度位置的实时获取,实现车辆运动轨迹的可视、可存和可控,有助于交通事故的提前预警、应急处理和事后分析。

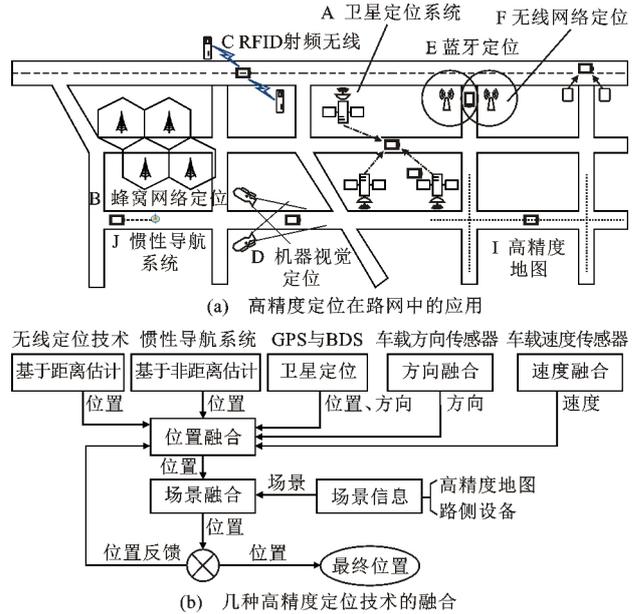


图 7 在高精度定位中使用的几种技术

Fig. 7 Several Techniques Used in High Precision Positioning

2.3 基于车路协同的车辆队列技术

如图 8 所示,车辆队列(Platoon)是利用距离探测传感器、车-车/车-路通信技术使得多辆汽车之间保持一定的安全距离,除头车以外的所有车辆都自动跟随头车行驶,从而使得整个车队形成了一个一致性的整体。由于队列中车辆之间的速度与相对距离的控制同步进行,因此这种车队行驶方式可以大大缩短车间距、降低风阻,从而显著降低车辆队列的整体燃油消耗。车辆队列可以使队列中的车辆以较高的平均车速行驶,从而提高道路的通行效率和行车安全性。在车辆队列中可靠的通信链接是关键,但是公路环境中恶劣天气,隧道、桥梁、山脉、高层建筑、植被等道路沿线遮挡物,电磁波干扰等都会影响车辆间无线通信的质量,从而影响车辆队列的安全和控制性能。目前对于车辆队列的研究主要集中在网络通信和运动控制优化方面。

在车辆队列的网络通信技术方面,Di Bernardo 等^[71]将车辆队列控制和管理过程视为一种时滞系统,采用 Lyapunov-Razumikhin 定理对其时滞性进行分析,探究车辆队列系统能够容忍的最大通信时延。Lei 等^[72]搭建仿真平台,通过仿真方法研究无线通信的丢包率对车辆队列系统性能的影响,得到保证车队稳定性的最低丢包率要求。目前,基于 IEEE 802. 11p 的 DSRC 成为车辆队列研究者首先研究的网络^[73]。IEEE 802. 11p 具有自组织、低时延等特点,能够满足大多数条件下车辆队列中车间通信的需求。但是车辆队列通信技术依旧存在不

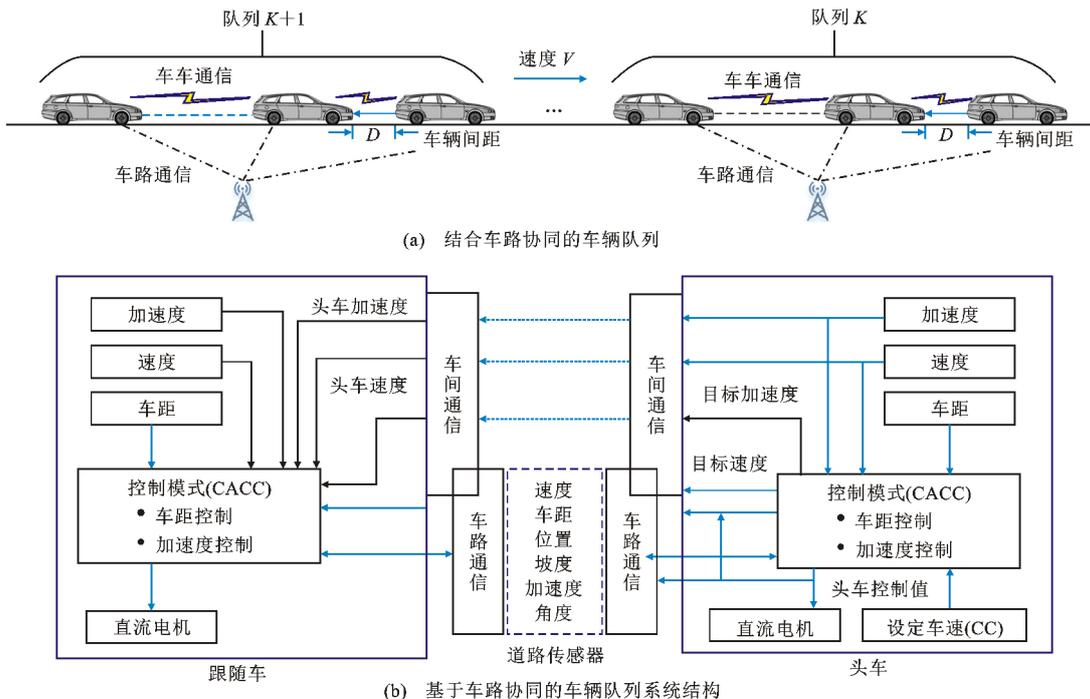


图 8 基于车路协同的车辆队列

Fig. 8 Vehicle Platoon Based on Vehicle-Infrastructure Cooperation

足:在车辆密度较大的环境下,容易丢包^[74],信息传输的距离较短,约为 300 m^[75],并且通信易受到遮挡和屏蔽,这些问题并没有得到很好的解决。智能道路可以通过 V2X 通信和环境感知设备来弥补和优化车辆队列的即时通信和网络稳定问题。

在车辆队列的运动控制和优化方面,Saeednia 等^[76]将货车编组划分为车队形成、车队保持和车队消散 3 个阶段。提出了一种混合超车和减速模式的混合策略,对车辆队列形成过程的期望速度进行了优化。Hall 等^[77]对车队编组形成阶段的一些静态参数如最优队长、排队顺序等进行了优化。Amoozadeh 等^[78]基于车载自组网(Vehicular Ad-hoc Network, VANET)无线通信开发了一套车队编组协议,该协议将所有的车辆编组策略分解为合并、拆分和换道 3 种最基本的动作。Zheng 等^[79]提出了一种用于具有单向拓扑和先前未知期望设定点的异构车辆编组的分布式模型预测控制算法(Distributed Model Predictive Control, DMPC),通过使用局部成本函数的总和作为李亚普诺夫函数候选,证明了 DMPC 的渐近稳定性可以通过明确成本函数权重的充分条件来实现。同时在文献^[80]中研究了信息流拓扑对在刚性结构异构车辆编组移动的内部稳定性和可扩展性的影响。Sabau 等^[81]针对自主车辆的异构编组提出了一种新的分布式控制架构,基于成本规范优化控制器设计,同时还引入了一

种同步机制来精确补偿由无线通信引起的延迟问题。Harfouch 等^[82]设计了一种基于通信延迟的开关控制策略,当车载网络处于良好状态时启动一种扩展协同自适应巡航控制(Coordinated Automatic Cruise Control, CACC)模型,否则启用自适应巡航控制(Automatic Cruise Control, ACC)模型,并对这种开关控制策略的稳定性进行了分析。目前车辆队列研究存在的主要问题是大多数车队都是考虑正常交通流情况下的编组策略和跟车控制模型,很少提及紧急情况下或网络延迟条件下的车队运动控制,而这恰恰是 Platoon 技术能否进入实用化的关键。

未来在智能公路系统中,将充分利用 V2I 的可靠性弥补 V2V 随机性的不足,同时提供实时的高精度地图和高精度无线定位服务,从而保证车辆队列运行的可靠性和安全性。目前在车辆队列商用之前,还有很多问题急需解决,如:在复杂交通环境和恶劣天气条件下,一些技术手段(无线通信、传感器)的可靠性不能完全保证,车辆安全保障策略还未得到系统性的验证和测试等,而且如何防止车辆队列信息系统受到骇客攻击也是亟待解决的课题。

2.4 无线充电技术

无线充电技术(Wireless Charging Technology, WCT)是指在不通过实体电线连接的情况下,通过电磁场或电磁波等方式为用电设备进行充电,

在千瓦级功率水平下,传输距离从几毫米增加到几百毫米,并且电网负载效率高于 90%。这些进步使得 WCT 在静止和动态充电场景中对电动车辆(Electric Vehicle, EV)充电应用非常具有吸引力^[83]。目前主要有电磁感应式、电磁共振式和无线电容式这 3 种无线充电方式。电动汽车无线充电系统是一种复杂的非线性磁电耦合系统,主流的无线充电标准有 3 种:PMA (Power Matters Alliance)、Qi(无线充电联盟推出的无线充电标准)和 A4WP (Alliance for Wireless Power)。目前 Qualcomm Halo 设备的电能转换效率达到 90%以上,可以在更短的时间内充入更多的电能。相对于电动汽车的有线充电而言,无线充电具有使用方便、安全、可靠,没有电火花和触电的危险,无积尘和接触损耗,无机械磨损,没有相应的维护问题,可以适应雨雪等恶劣的天气和环境等。图 9 为车辆进行无线充电的示意图。

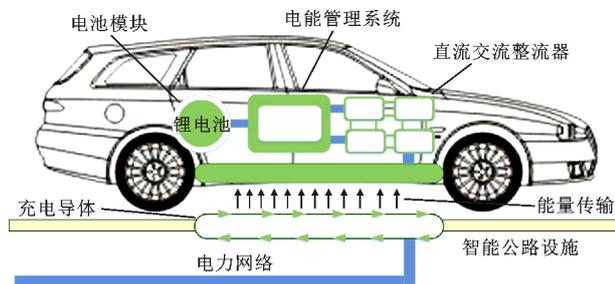


图 9 无线充电技术的应用

Fig. 9 Application of Wireless Charging Technology

在道路无线充电的应用研究方面, Deflorio 等^[84]提出了一种用于评估驾驶时为电动车辆充电的无线感应电力传输性能的方法。Xiao 等^[85]提出了一种由多个螺旋线圈组成的,用于电动汽车的感应式无线充电通道。Chen 等^[86]研究了一种使用一系列分段初级线圈的 WCT 充电系统,初步探讨了初级线圈尺寸与传输效率之间的关系,并提出了为双线道路同时提供电力的初级线圈的推广设计。Wang 等^[87]提出了一种结合无线充电和太阳能技术的混合动力框架,网络中的簇头配备太阳能电池板以清除太阳能,其余节点由无线充电供电。混合动力框架可以将电池消耗的能量减少 20%,并能节省车辆的移动成本 25%。通过允许部分再充电,可以在成本略微增加的情况下进一步减少电池的能量消耗。未来可以通过部署更低成本的太阳能传感器来减少高成本移动充电器的数量。文献^[88]提出了一种跟车模型研究无线充电车道(Wireless Charging Lane, WCL)附近的每个 EV 的运动行为,该文献指

出由于 WCL 成本较高,目前在整个高速公路上应用 WCL 不切实际,但在部分道路上应用部分无线充电车道(Part Wireless Charging Lane, PWCL)或许是一个可行的解决方案。文献^[89]通过仿真模拟评估高速公路上 PWCL 的电动汽车纵向安全性。当使用 PWCL 时, EV 的分布显著影响纵向安全性,较大的车辆制动减速度将导致 EV 产生较高的纵向碰撞风险,而 PWCL 的长度没有明显影响。Jiang 等^[90]提出了一种用于 48V 轻型电动汽车的电感耦合无线充电系统;评估和设计了系统的主要功率级,包括高频逆变器、谐振网络、全桥整流器和负载匹配转换器。

当前无线充电技术仍旧有很多工程问题亟待解决。未来如果实现电动汽车的动态无线充电,将无线充电模块配置在智能道路上,同时利用太阳能等新能源提供电力,则可以大幅减少电动汽车配备的动力电池容量,有利于节能减排,并且降低电动汽车的运行成本,为扩展电动汽车续航里程提供新思路,电动汽车无线充电技术将在未来很长一段时间内处于行业热点位置。

2.5 道路智能材料技术

在智能公路系统中,智能材料技术是道路智能化的基础:一方面道路智能材料能够自主感知环境刺激,对之进行分析、处理、判断,并采取一定的措施进行适度响应;另一方面智能材料的优异特性使路面具备了能量收集、自调节、自诊断、自愈合、信息交互等智能化功能,提升了道路服务能力。

在智能材料应用的研究方面,智能混凝土在原有部件的基础上添加智能部件,使混凝土成为具有自我感知和记忆,自适应和自我修复的多功能材料。根据这些特点,可以有效预测混凝土的内部损伤,满足自身安全检测的需要,防止混凝土结构的脆性破坏,并可根据检测结果自动修复,显著提高混凝土的安全性和耐久性。近年来出现了一系列智能混凝土,如自毁混凝土、温度自调混凝土和仿生自愈混凝土等,为智能混凝土的研究奠定了坚实的基础^[91]。水泥基压电复合材料^[92]可以被用作新型智能交通监控系统的传感元件,其压电性能能够对交通流量引起的压力实现强大而准确的实时检测。嵌入式水泥基压电传感器及相关测量装置具有良好的智能交通监控能力,如交通流量检测、车速检测和动态称重测量等。智能粉尘传感器网络^[93]可以用于监测路面的温度和湿度条件,以及检测结冰路况。新一代沥青黏合剂^[94]是一种在材料使用寿命期间能够使材

料的机械性能适应其实际变化负载条件的智能材料。其基质已经用磁性颗粒改性,当它们被磁场激活时能够改变黏合剂的机械性能,为在智能基础设施中实施该应用提供了广泛的应用可能性(图 10),特别是沥青路面的建设、修复和维护。Jung 等^[95]提出了一种基于聚偏二氟乙烯聚合物的压电能量收集器模块,可用于智能道路应用。Alavi 等^[96]提出了一种基于压电自感知技术的沥青混凝土路面连续健康监测方法,利用压电传感器从交通负载中感知的信号既可用于增强自供电传感器的能力,也可用于损坏诊断。Nasir 等^[97]对路面太阳能集热器系统的研究表明,通过吸收路面的热量并利用热能,可以减少路面的热量。

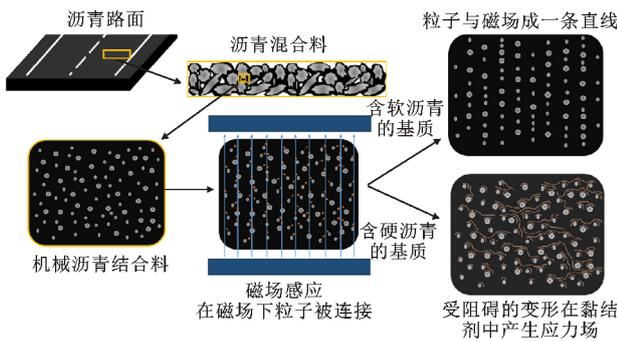


图 10 磁场激活机械黏结剂时的现象示意^[96]
 Fig. 10 Sketch of Phenomena Appearing in the Mechanomutable Binders when Activated by a Magnetic Field^[96]

在未来的智能公路中,在路面材料中加入导电纤维、石墨等导电材料,使路面具备导电性,从而通过电热传递,达到路面融雪化冰的功能。道路微裂缝的探测极其困难,可以使用裂缝自愈合技术,依据仿生学的基本原理,模拟生物体损伤愈合现象及其原理,通过能量补偿或者物质补偿的方式刺激路面损伤的自愈合。在路面材料中添加石墨、导电纤维等可使路面具有导电能力,从而通过电加热的方式实现能量供给。由于目前道路材料各方面的高性能要求、材料本身的投入成本等因素,距离智能材料的大规模商业化应用还有一段时间,但未来智能材料技术的应用将大大提高智能公路的整体性能。

2.6 面向主动安全的道路控制技术

在智能公路系统中,面向主动安全的道路技术是道路交通设计和智能集成化的重要目标,安全作为要素融入到道路交通设计和运营管理的全过程,可对道路车流信息进行提前预知。如图 11 所示,通过 RSU、车载设备(On-Board Unit, OBU)、电子信

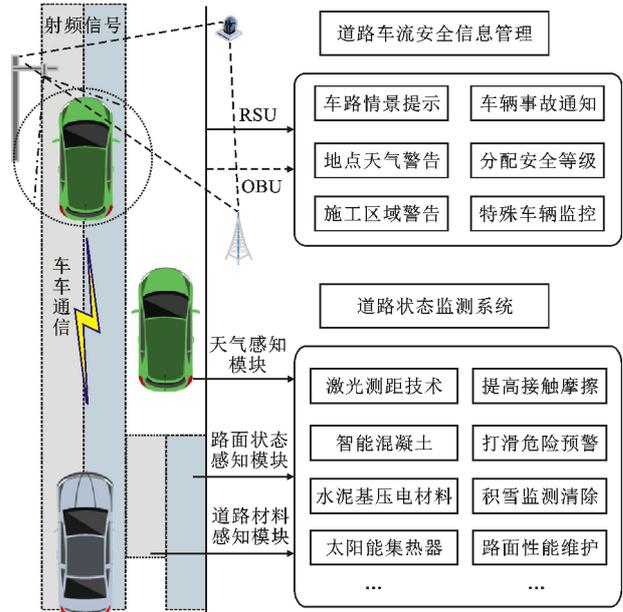


图 11 智能道路安全技术应用

Fig. 11 Application of IR Safety Technology

息牌和智能手机等,可以实现车路情境感知、施工区警告、特定地点天气影响警告、事故通知、路边报警、停车通知、行人碰撞警示等有效预警通知,提前感知、提醒和规划特殊运营车辆的行车路径和路权等级。道路基础设施电子设备可辅助特殊运营车辆进行全程可视化的高效监控和跟踪,实现道路交通安全态势的前期诊断、事故预警和主动干预;同时可在道路路面本身进行主动的安全防护,通过提高道路轮胎的摩擦,雨天雪天防打滑预警系统等功能,提高道路本身的安全通行能力。

在面向主动安全的道路控制技术研究方面,路面状态监测系统^[98]可以利用平板电脑内的低成本 MEMS 加速度传感器和 GPS 接收器检测和定位路面异常点。激光测距技术^[99]可以建立自动监测积雪深度的预警系统,实现了对积雪道路状况的实时、连续、自动监测。基于通用分组无线服务(General Packet Radio Service, GPRS)技术和应用程序(Rich Internet Application, RIA)模型的路面温度监测系统^[100],可以在监测温度数据超过警戒范围时,自动加热融化表面的冰雪,并将警报信息同步发送给监测管理人员。也可以通过智能基础设施设备评估事故风险,将神经网络和模糊逻辑应用于运输控制中以提高安全性^[101]。Zhou 等^[102]建立了道路太阳能系统,根据监测到的太阳辐射热、道路吸收的太阳能和土壤储存的热量,分析系统的传热机理和效果。Ito 等^[103]提出了一种在严峻的通信环境中使用各种传感器数据的路况监测系统。以收集各种传

传感器数据,选择传感器数据作为目的,并使用选定的传感器数据理解路况。在城市交叉路口处,传感器数据可用于不同水平的交通需求和信号间隔的实时交通信号灯控制^[104]和周期长度的预测^[105],有助于减少行车延误,提高交叉口安全系数;同时结合自动化车辆轨迹控制和交叉口优化控制方法^[106],可以实现减轻拥堵,降低碰撞风险,减少燃料消耗和交叉口排放的巨大效益。

目前在车辆本身的主动安全防护以及交通流信息的安全事故预测方面都进行了大量的工作。未来智能公路将从道路基础设施本身着手,通过实时监控、提前预测、自动感知和自动修复等工作模块提高道路的行车安全性和稳定性。

2.7 面向 MaaS 的车路信息交互技术

出行即服务(MaaS)旨在共享交通模式和智能信息技术的基础上建立无缝衔接的网络化交通系统^[107]。MaaS 用户可以使用该服务作为即用即付,或他们可以根据其旅行需求购买移动套餐^[108]。目前德国、法国、荷兰和美国均开始设计并实施 MaaS 方案,通过应用程序和智能卡访问系统即可访问运营商或城市里所有的交通方式,让出行者可以享受出行计划、出行预定、实时信息和个性化出行建议等服务。MaaS 模式是基于消除各种不同交通模式之间的阻碍,实现无缝出行的一体化技术^[109]。如图 12 所示,该技术包括 6 项关键技术^[110],其中由车路信息交互技术为重要支撑的交通出行服务平台是实现 MaaS 无缝出行的关键基础。

在未来城市的乘客移动出行中,按需自动化的移动服务是可以预见的^[111],自动车辆的共享和预约(Autonomous Vehicle Sharing and Reservation, AVSR)可通过构建线性规划模型有效求解自动车辆行程链的最优解和所需的车队规模,可进一步提高共享系统的效率^[112]。MaaS 模型通过多种运输方式支持乘车共享,但目前它非常依赖于汽车这个重要角色^[113],如何结合自动驾驶和智能公路解决基于此的道路拥堵问题,将会成为消费者权衡时间成本的关键因素。Ravindran 等^[114]提出了一种以信息为中心的 5G 的网络架构(5G Information-centric Networking, 5G-ICN),将 MaaS 功能转化为 5G-ICN 切片的问题,并概述了功能配置和功能 5G-ICN 切片之间的相互依赖性和协调,以满足 MaaS 目标。在安全问题上,Thai 等^[115]在拒绝服务(Denial of Service, DoS)对 MaaS 系统攻击的漏洞问题上,提出了一个量化分析框架。目前有关 MaaS 方案和技术的研究还在持续中,未来结合自动驾驶和智能路侧设备的技术方案将成为 MaaS 模式的重点发展方向。

在未来的 MaaS 模式中,车路信息交互技术通过信息交互传输道路和车辆之间的数据信息,建立无缝连接的道路车辆信息化网络系统。道路设施为车辆提供场景自适应的交通信息,车辆为道路提供全息位置和状态信息,使整个道路网和交通网向信息流一体化系统方向发展;为出行者提供灵活、高效、以人为本的出行服务,实现由私人交通向共享交通,由离散交通子系统向一体化综合交通系统的转变。智能公路作为交通出行实时信息的高质量数据平台,可以分担部分数据采集成本,提供统一的数据标准接口;智能公路通过对道路车流感知和实时定位,为出行服务提供商数据优化利用、交通最优出行规划,为提高系统的整体运行效率提供了数据和服务接口。对于交通管理机构,智能公路作为重要的信息平台载体,有利于对交通服务安全行为的实时有效监管,有助于补充完善相关安全保障措施。未来智能公路的建设和发展将是 MaaS 平台共享化、一体化、人本化、低碳化构建的重要基础,是保障交通运输朝着绿色低碳、高效便捷、经济舒适、安全可靠等方向发展的重要支撑。

2.8 结合基础设施的智能决策与规划技术

智能公路可为自动驾驶及多车协同规划提供更高效率稳定的感知和通信途径。自动驾驶的规划决策模块负责生成车辆的行驶行为,是体现自动驾驶车

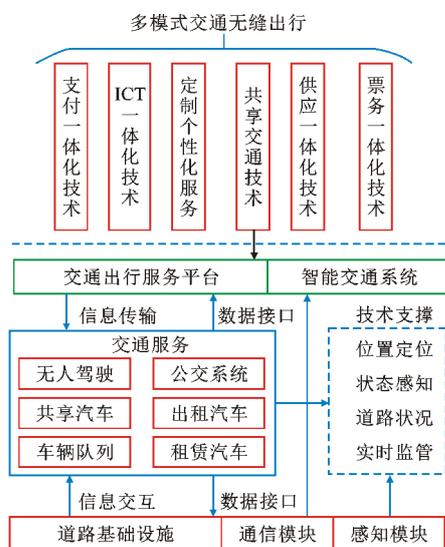


图 12 基于智能公路的多模式交通无缝出行技术

Fig. 12 Multi-mode Traffic Seamless Travel Technology Based on IR

辆智慧水平的关键因素^[116]。但在实际的交通场景中存在的往往是多车协同规划和决策问题,仅仅单车智能决策和规划难以解决实际运行问题,智能公路作为道路基础设施和多车辆的感知通信平台,为实际解决多车协同决策和规划提供了更好的思路。但目前许多研究都仅关注单车智能的决策和规划问题,较少考虑道路基础设施智能化的影响。

单车智能决策行为的性能好坏是衡量智能车辆智能化水平的重要指标,主要包括车辆跟驰、换道、超车、汇入车流等。目前智能车辆驾驶行为的决策方法主要包括基于规则的决策方法、基于马尔可夫理论的决策方法和基于神经网络的决策方法。基于规则的决策方法主要是人工搭建一个由大量规则模块组成的复杂结构,该方法依赖于规则制定者的经验,可解释性较高,但对于复杂多变的交通环境,缺乏适应性。Liu等^[117]提出一种在城市道路情景中整合道路环境和一辆车的运动意图的马尔可夫决策算法,用道路情景来参考车辆的行为变化,然后通过观察与参考行为的偏差推断其他车辆的反应。Naranjo等^[118]基于模糊逻辑建立了换道决策模型,提高了计算效率。Perez等^[119]提出了一种基于模糊逻辑的决策系统,用于两车道上的自主超车。模糊逻辑的局限性在于其设计依赖于相关的经验知识,而这些经验往往很难获得。基于概率的驾驶决策方法考虑了环境的不确定性,能够提高智能车辆驾驶决策的鲁棒性。Ardelt等^[120]提出了一种用于高速公路上车辆换道决策的概率方法,并在高速公路上进行实车试验,验证了方法的有效性。Wolf等^[121]提出了一种学习使用深度Q网络(Deep Q-network)在模拟环境中驾驶车辆的方法,在对车道的中心距离进行基准测试时,可以通过添加其他变量(例如车辆与中心线的角度偏差),改善车辆的学习驾驶行为。Lillicrap等^[122]提出了一种基于确定性策略梯度、依赖深度强化学习的行为判断和无模型算法。Ngai等^[123]提出了一种基于Q-learning算法的多目标增强学习方法,用于智能车辆的超车决策与控制。此外自动驾驶端到端的方案和通过生成对抗网络提取框架直接获取策略,能复现驾驶人面对突发状况时的驾驶行为^[124]。综合考虑宏观和微观层面,需要一个综合模型来捕捉车道的变换决策过程及其对周围交通的影响^[125],尤其在开发新的车道变换模型时,应优先采用多层次评估策略。但是目前的决策方法仍缺乏通用性和灵活性,无法应对新的复杂场景,如何与现代化、数字化的道路中

确定的信息和规则融合也存在挑战。

多车协同运动规划(Multi-vehicle Motion Planning, MVMP)是指在给定多辆汽车的初始位置、行驶目的以及约束条件的基础上,对多辆汽车的路径或轨迹进行求解的过程^[126]。如何有效处理集中式MVMP问题中的大规模复杂约束并保障问题的求解效率,是影响动态优化方法在多车协同运动规划领域发展前景的关键因素^[127]。Desaraju等^[128]提出了分散式多智能体快速探索随机树(Decentralized Multi-agent Rapidly-exploring Random Tree, DMA-RRT)和协同DMA-RRT方法来解决受复杂约束影响的多智能体规划路径问题。在同时考虑了车辆动力学,时间和空间规范以及与能耗相关的要求的基础上,Häusler等^[129]提出了一种解决多车辆运动规划问题的数值算法。目前的分布式MVMP算法按照分布式机理可细分为3类:优先级分配方法、运动协调方法以及任务分解方法^[130]。优先级分配方法是指遵循一定规则向各车辆分配优先级,随后按照优先级从高到低的次序对所有汽车分别进行运动规划,在对低优先级车辆进行轨迹规划时,已求解了高优先级车辆^[131];在车道变更任务中,Plessen等^[132]以通行能力最大化为目标,通过优化计算对优先级进行调整。在路口通行任务中,Dresner等^[133]提出了一种“先到先得”的优先级分配协议。在联网车辆环境下,合作车辆交叉口控制系统^[134]能够实现车辆和基础设施之间的协作,以便在所有车辆完全自动化时进行有效的交叉路口操作和管理。运动协调方法,也称路径-速度分解方法,通过对多车间相互冲突的行驶路径配置速度变量,将空间上冲突的路径转化为时空上无冲突的安全轨迹^[135]。Ahmadzadeh等^[136]提出了一种存在移动障碍物的非完整多车系统的路径规划方法。任务分解方法将完整的多车协同运动过程分解为一系列任务或过程,逐一解决,最终通过合并任务的结果而实现完整的协同运动过程。在求解多车协同变更车道问题时,Desiraju等^[137]将车辆编队划分为若干小组,并按照小组分批进行换道。Atagoziyev等^[138]将协同换道任务彻底分解为各车辆逐一完成的序贯换道过程。Abichandani等^[139]提出了一个基于数学规划的通用框架,可以适应MVMP问题的所有目标和约束,重点关注了各种路径基元的能力,空间和/或时间的离散化,集中/分散决策。

结合基础设施的智能决策和规划技术能提高ICV决策和规划的智能和网联能力,一方面,智能公

路通过多种路侧传感器扩大 ICV 的感知范围,充分感知行车环境,并基于此优化其运动模式,从而在行驶道路场景中实现自主智能运动;另一方面,ICV 借助车-车或车-路通信网络,与其他 ICV 及智能道路路侧设施共享车辆路线规划和行驶决策信息,采用协同决策机制实现多车协同规划运行,如图 13 所示^[140]。

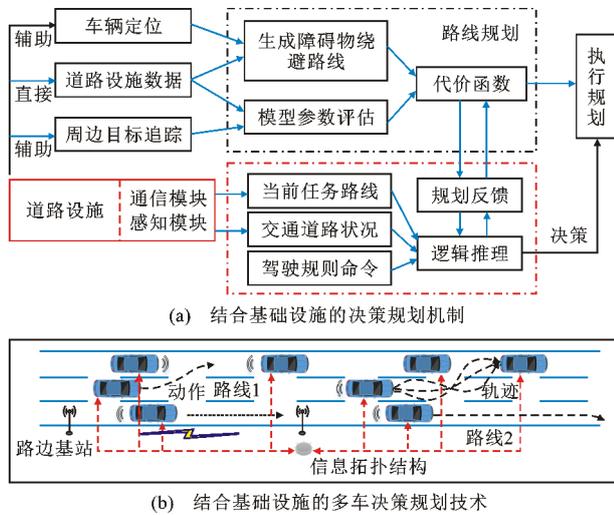


图 13 结合基础设施的智能决策和规划技术^[140]

Fig. 13 Intelligent Decision and Planning Techniques Combined with Infrastructure^[140]

3 智能公路发展展望

3.1 智能公路车路协同一体化技术的发展与应用

在智能公路的建设上,未来将更多地体现在现有道路基础设施上,利用信息技术、传感技术、网络技术等进行系统集成改造。车路协同感知一体化技术是以路侧感知设备为主,车辆感知为辅,实现全路全息以及全维度的车路一体化感知,改善自动驾驶车辆感知能力的局限;智能公路为车路协同一体化技术提供了有效的技术实现载体,是实现车路协同技术规模化、产业化、集成化应用的实现平台;车路协同技术也是智能公路系统的重要技术组成部分,为道路交通系统信息一体化建设提供了重要技术支撑。车路协同决策一体化的 V2X 通信技术借助车与车、车与路侧基础设施、车与行人之间的无线通信,实时感知车辆周边状况并及时预警将成为当前世界各国解决道路安全问题的一个研究热点。未来在无人驾驶研究领域,动态无线充电提供支持的道路智能化升级也将受到越来越多的关注。如图 14 所示,未来智能车辆的驾驶控制将由智能公路的路侧控制系统和车载控制系统共同完成,为自动驾驶提供一个更安全、更稳定和更高效的环境。



图 14 未来的智能公路

Fig. 14 IR in the Future

3.2 虚实结合的平行智能公路发展与应用

平行系统是指由某一个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工仿真系统所组成的共同系统^[141-142]。基于平行系统的平行智能公路是将人工仿真道路系统作为建模工具,以人-车-路的

信息数据为驱动,采用大数据计算试验方法进行分析评估,实现物理公路系统与人工仿真系统之间的交互,对二者之间的行为进行对比和分析,完成对各自未来状况的“借鉴”和“预估”,相应地调节各自的管理与控制方式。平行智能公路体系框架如图 15

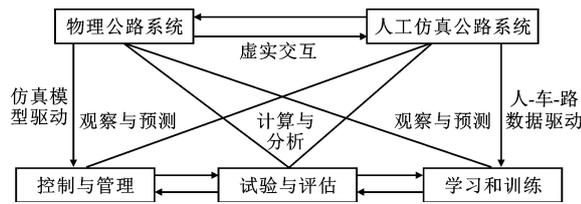


图 15 平行智能公路体系框架

Fig. 15 Framework of Parallel Intelligent Road

所示,平行智能公路通过虚实结合的交互方式实现物理公路系统与虚拟公路系统之间的信息流传递。物理公路系统通过传感器和通信设备实时感知道路上的“人-车-路-环境”运行状态,并将收集的信息进行预处理,传送给虚拟公路系统,虚拟公路系统由数学模型和特定算法组成,将根据物理公路系统输出有效信息进行事件检测、故障诊断、态势预测与评估、系统优化,并执行闭环控制,不断优化物理公路系统的交通流状况和车辆运动状况,从而保证物理道路的安全性、交通运行效率、环保性能、能源利用效率始终处于最优状态。

3.3 智能公路中人工智能技术的快速发展与应用

以深度学习和增强学习为代表的人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术在环境感知和深度数据挖掘领域正在得到快速应用。一方面在智能公路的养护上,利用大数据和人工智能等技术,在全国范围内,将天气状况、车流量、车辆构成信息与道路条件等先验信息相对比,构造基于大数据的道路健康检测和养护管理信息库。另一方面,深度学习与增强学习可以有效应用于车载系统和路侧系统,提供更好的驾驶预测和自适应控制,为道路健康状况自动跟踪和养护决策提供支持,不断提高信息传递和交通决策的准确度。云计算技术方面,一般采用分布式冗余存储方式,具有处理大规模数据和实现数据共享等特点。人-车-路的大量数据存储和计算需求,为云计算技术从概念层走向应用层提供了机遇,未来结合车载和路侧建立的视频监控点,利用无线宽带技术构建智能视觉车联网来实现对车牌、事故现场、事件、交通流等的可视化管理也将成为研究热点。

3.4 信息安全技术在智能公路中的应用与发展

随着信息和网络化在各个领域发挥着越来越关键的作用,信息安全已经成为当前各国行业的一个重点关注领域。智能公路是一个集成感知和控制、人-车-路数据处理的高度信息化综合体,智能公路系统中基础节点数量众多,大量感知设备的信息

交换,还未形成统一的通信协议等诸多环节,一旦被恶意攻击和控制,将会对智能车辆、道路基础设施、驾驶人、乘客甚至行人安全造成毁灭性的打击。所以智能公路信息安全技术研究刻不容缓,一方面应加大人员、资金的投入,确定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、应用安全的数据安全体系,同时建立智能公路的数据安全技术框架,制定中国智能公路数据安全技术标准;另一方面应建立智能公路信息安全应急响应体系和保障智能道路系统健康发展的法律法规和伦理道德框架。

3.5 自动驾驶技术与智能公路设施建设加速融合

自动驾驶的关键系列技术是实现自动驾驶 L4 和 L5 等级的重要决定因素,能够有效提高行车安全性、基础设施利用率和驾乘舒适性等。尽管目前自动驾驶在应用研究方面取得了巨大进步,但是要实现自动驾驶的商业化落地仍然有较大阻碍,存在众多问题待解决,主要包括:①激光雷达等先进传感器体积大、成本高,容易受天气条件等周边环境的影响;②尽管车载传感器设备精度高,但仍旧对环境复杂性和多样性感知存在局限性和盲点;③自主式单车智能应用存在成本高、难以大规模商业化的问题;④自动驾驶的安全性问题仍需要进一步研究;⑤缺少自动驾驶汽车的测试评价方法和相关标准法规。智能公路和自动驾驶技术的交叉融合为解决上述问题提供了新技术和新途径。

智能公路本身具备感知和控制等特点,可以由规模化的智能公路分担智能车辆的部分感知控制成本。通过智能公路的路侧感知设备和仅安装必需感知设备的自动驾驶车辆相结合,在使智能车获得全面感知能力的基础上,进一步促进传感器加速向低成本、小型化发展。通过 V2X 通信实现自动驾驶车辆和智能公路的网联式智能技术,补充自动驾驶智能的不足,不仅可以帮助自动驾驶系统实现全面高效的决策和避障规划能力,还能为车辆群体协同决策规划提供条件;智能公路和自动驾驶技术的融合发展可以大大提高自动驾驶车辆的自主性和智能性,减少单车智能存在的风险和隐患,进一步提高自动驾驶车辆的行车安全性。在未来,智能公路和自动驾驶车辆相结合的试验测试场将成为研究热点。

3.6 智能公路商业化推广的实现路线

回顾美国 AHS 的发展历程并展望未来可以得出,智能公路的最终实现和应用应该需要相当长的一段时间,但终将被社会接受。本文在文献分析的基础上,对其发展路线进行了初步预测,如图 16 所

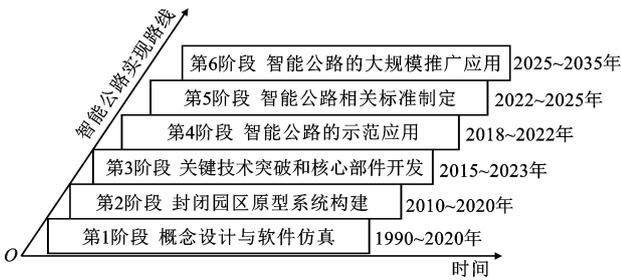


图 16 智能公路未来的发展路线

Fig. 16 Future Development Route of IR

示。该路线图包括以下 6 个阶段：①概念设计与软件仿真；②封闭园区原型系统构建；③关键技术突破和核心部件研发；④智能公路示范应用；⑤标准与规范制定；⑥大规模推广与应用。上述 6 个阶段在时间上将存在重叠部分，不存在明显的分界线，其发展特点是智能公路将处于一种不断演进的螺旋式上升状态，随着驱动技术的不断迭代，智能公路的功能和性能将不断完善，逐步逼近其理想的概念设计原型。如图 17 所示，本文对智能公路的发展进行了梳理整合，未来随着一些新兴技术(5G 通信、车辆高精度定位、人工智能等)的不断突破，将进一步加快智能公路的大规模推广和应用。当前热门的自动驾驶技术路线主要是以车辆为技术主体，搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等设备，将汽车打造成先进的移动智能体，但目前高昂的感知设备也使智能汽车的成本居高不下。因此，可以由规模化的智能公路分担智能车辆的部分感知、控制成本，通过智能公路的路侧感知设备和仅安装必需感知设备的车辆相结合，在使智能车获得全面感知能力的基础上，进一步降低车辆感知设备的成本。未来智能车辆的驾驶控制将由智能公路的路侧控制系统和车载控制系统共同完成，为自动驾驶提供一个更安全、更稳定和更高效的环境。因此未来的技术路线将从“聪明车、普通路”模式，逐步发展到“聪明车、智慧路”的高级发展阶段。

4 结 语

(1)智能公路是结合感知、计算、通信、材料、人工智能以及系统集成技术的高新技术道路综合体。本文在 AHS 系统的基础上，梳理了国内外关于智能公路的核心概念、关键技术和 4 个历史发展阶段，提出了智能公路由信息管理层、网络通信层和感知控制层组成的 3 层体系架构，初步给出了虚实结合的平行智能公路体系框架，并指出未来公路将从“聪明车、普通路”模式，逐步向“聪明车、智慧路”的高级

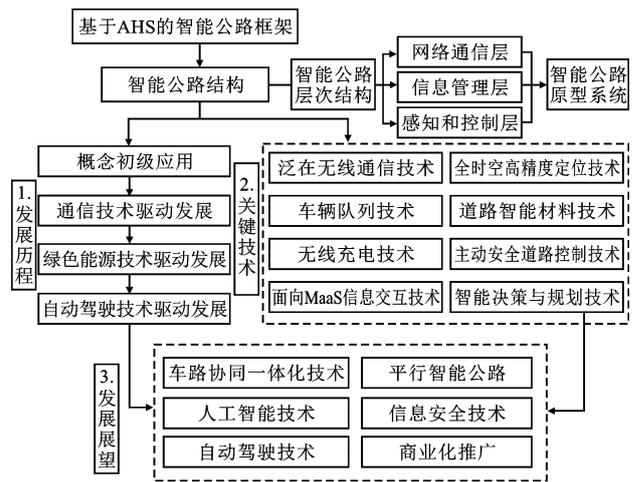


Fig. 17 Context Arrangement of IR

阶段演进的发展趋势。

(2)目前智能公路还处于概念化设计阶段，在国际上尚未有成熟的行业规范和技术标准，本文对智能公路的系统架构和关键技术进行了详细梳理和总结，对智能公路的未来发展和工程应用具有一定的指导意义。随着技术的不断更新与升级，智能公路的概念和内容也将不断丰富并实现多元化发展。

(3)目前关于智能公路的系统研究相对较少，本文对于智能公路的研究和讨论难免有些因素考虑不周全。随着自动驾驶瓶颈的来临和智慧交通的快速发展，将来对于智能公路的关注和研究将越来越多。未来如果成立智能公路相关的国际协会或组织，对智能公路的相关概念和定义进行规范化整理，同时制定智能公路相关的技术标准体系和相关法律法规，将更有利于加速智能公路从理论构想走向现实。

参考文献:

References:

[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 [J]. 汽 车 安 全 与 节 能 学 报 , 2017,8(1):1-14.
LI Ke-qiang, DAI Yi-fan, LI Sheng-bo, et al. State-of-the-art and Technical Trends of Intelligent and Connected Vehicles [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8 (1): 1-14.

[2] 冉 斌 , 谭 华 春 , 张 健 , 等 . 智 能 网 联 交 通 技 术 发 展 现 状 及 趋 势 [J]. 汽 车 安 全 与 节 能 学 报 , 2018,9(2): 119-130.
RAN Bin, TAN Hua-chun, ZHANG Jian, et al. Development Status and Trend of Connected Automated Vehicle Highway System [J]. Journal of Automotive

- Safety and Energy, 2018, 9 (2): 119-130.
- [3] MORRISON H M, WELCH A F, HANYSZ E A. Automatic Highway and Driver Aid Developments [J]. SAE Transactions, 1961, 69: 31-53.
- [4] FENTON R E, COSGRIFF R L, OLSON K W, et al. One Approach to Highway Automation [J]. Proceedings of the IEEE, 1968, 56 (4): 556-566.
- [5] IOANNOU P A. Automated Highway Systems [M]. New York: Springer Science and Business Media, 2013.
- [6] SINHA K C, COHN L F, HENDRICKSON C T, et al. Role of Advanced Technologies in Transportation Engineering [J]. Journal of Transportation Engineering, 1988, 114 (4): 383-392.
- [7] HALL R W, THAKKER V, HORAN T A, et al. Automated Highway System Field Operational Tests for the State of California: Potential Sites, Configurations and Characteristics [R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1997.
- [8] MANIVANNAN P V, RAMAKANTH P. Vision Based Intelligent Vehicle Steering Control Using Single Camera for Automated Highway System [J]. Procedia Computer Science, 2018, 133: 839-846.
- [9] HAMOUDA O, KAÄNICHE M, KANOUN K. Safety Modeling and Evaluation of Automated Highway Systems [C] // IEEE. Proceedings of the 2009 International Conference on Dependable Systems and Networks. New York: IEEE, 2009: 73-82.
- [10] HOROWITZ R, VARAIYA P. Control Design of an Automated Highway System [J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88 (7): 913-925.
- [11] TOMIZUKA M. Automated Highway Systems -An Intelligent Transportation System for the Next Century [C] // IEEE. Proceedings of the 1997 International Symposium on Industrial Electronics. New York: IEEE, 1997: 1-4.
- [12] TSAO H S J. Traffic Control for Automated Highway Systems; A Conceptual Framework [J]. Transportation Research Part C, 1995, 3 (4): 227-246.
- [13] HALL R W, CALISKAN C. Design and Evaluation of an Automated Highway System with Optimized Lane Assignment [J]. Transportation Research Part C, 1999, 7 (1): 1-15.
- [14] TSUGAWA S. An Overview on Control Algorithms for Automated Highway Systems [C] // IEEE. Proceedings of the 1999 International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 1999: 234-239.
- [15] GÖLLÜ A, VARAIYA P. SmartAHS: A Simulation Framework for Automated Vehicles and Highway Systems [J]. Mathematical and Computer Modelling, 1998, 27 (9/10/11): 103-128.
- [16] 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.
- [17] CHEN C, SEFF A, KORNHAUSER A, et al. Deep-driving: Learning Affordance for Direct Perception in Autonomous Driving [C] // IEEE. Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision. New York: IEEE, 2015: 2722-2730.
- [18] VAN NUNEN E, KWAKKERNAAT M R J A E, PLOEG J, et al. Cooperative Competition for Future Mobility [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13 (3): 1018-1025.
- [19] SHLADOVER S E. Automated Vehicles for Highway Operations (Automated Highway Systems) [J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2005, 219 (1): 53-75.
- [20] CARBAUGH J, GODBOLE D N, SENGUPTA R. Safety and Capacity Analysis of Automated and Manual Highway Systems [J]. Transportation Research Part C, 1998, 6 (1/2): 69-99.
- [21] LI H. A Service-oriented Architecture for Networked Highway [J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 2093-2097.
- [22] BASKAR L D, DE SCHUTTER B, HELLENDORRN H. Traffic Management for Automated Highway Systems Using Model-based Predictive Control [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13 (2): 838-847.
- [23] BENDER J G. An Overview of Systems Studies of Automated Highway System [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40 (1): 82-99.
- [24] TERZIYAN V, KAYKOVA O, ZHOVTOBRYUKH D. Ubiroad: Semantic Middleware for Context-aware Smart Road Environments [C] // IEEE. Proceedings of the 2010 5th International Conference on Internet and Web Applications and Services. New York: IEEE, 2010: 295-302.
- [25] CHEON S. An Overview of Automated Highway Systems (AHS) and the Social and Institutional Challenges They Face [R]. Berkeley: University of California Transportation Center, 2003.
- [26] VAN DRIEL C J G, VAN AREM B. The Impact of

- a Congestion Assistant on Traffic Flow Efficiency and Safety in Congested Traffic Caused by a Lane Drop [J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2010, 14 (4): 197-208.
- [27] ERHAN D, SZEGEDY C, TOSHEV A, et al. Scalable Object Detection Using Deep Neural Networks [C] // IEEE. *Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York: IEEE, 2014: 2147-2154.
- [28] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. Imagenet Classification with Deep Convolutional Neural Networks [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2012, 25 (2): 1097-1105.
- [29] ARULKUMARAN K, DEISENROTH M P, BRUNDAGE M, et al. Deep Reinforcement Learning: A Brief Survey [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2017, 34 (6): 26-38.
- [30] HSU A, SACHS S, ESKAFI F, et al. The Design of Platoon Maneuvers for IVHS [C] // IEEE. *Proceedings of the 1991 American Control Conference*. New York: IEEE, 1991: 2545-2550.
- [31] ALVAREZ L, HOROWITZ R, LI P. Traffic Flow Control in Automated Highway Systems [J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7 (9): 1071-1078.
- [32] SHLADOVER S E. PATH at 20—history and Major Milestones [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2007, 8 (4): 584-592.
- [33] GIBSON T. Virginia's Smart Road: Where Researchers Make the Extreme Weather [J]. *Weatherwise*, 2015, 68 (4): 20-27.
- [34] KAWASHIMA H. Japanese Perspective of Driver Information Systems [J]. *Transportation*, 1990, 17 (3): 263-284.
- [35] OKAMOTO H. Advanced Mobile Information and Communication System (AMTICS) [J]. *SAE Paper* 881176.
- [36] FESTAG A. Cooperative Intelligent Transport Systems Standards in Europe [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52 (12): 166-172.
- [37] 李斌,王春燕,吴涛,等.中国智能公路磁诱导技术研究进展[J].*公路交通科技*,2004,21(11):66-69.
LI Bin, WANG Chun-yan, WU Tao, et al. Research Review on Magnetic Guidance Technology of Intelligent Highway System in China [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 21 (11): 66-69.
- [38] 常促宇,向勇,史美林.车载自组网的现状与发展[J].*通信学报*,2007,28(11):116-126.
CHANG Cu-yu, XIANG Yong, SHI Mei-lin. Development and Status of Vehicular Ad Hoc Network [J]. *Journal of Communications*, 2007, 28 (11): 116-126.
- [39] LAMB M J, COLLIS R, DEIX S, et al. The Forever Open Road—Defining the Next Generation Road [C] // AIPCR. *Proceedings of the 2011 AIPCR World Congress*. Mexico City: AIPCR, 2011: 1-16.
- [40] 《中国公路学报》编辑部.中国汽车工程学术研究报告·2017[J].*中国公路学报*,2017,30(6):1-197.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's Automotive Engineering Research Progress: 2017 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30 (6): 1-197.
- [41] BRIEFS U. Mcity Grand Opening [J]. *Research Review*, 2015, 46 (3): 1-2.
- [42] EUSTICE R. University of Michigan's Work Toward Autonomous Cars [R]. Ann Arbor: University of Michigan, 2015.
- [43] SKOGLUND M, PETIG T, VEDDER B, et al. Static and Dynamic Performance Evaluation of Low-cost RTK GPS Receivers [C] // IEEE. *Proceedings of the 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. New York: IEEE, 2016: 16-19.
- [44] NAI W, DONG D, ZHENG W, et al. A Novel Vehicle-to-infrastructure Communication System Providing Triple Play Services Based on Radio-over-fiber Technique [C] // IEEE. *Proceedings of the 2011 IEEE 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*. New York: IEEE, 2011: 1-4.
- [45] SUKUVAARA T, NURMI P. Wireless Traffic Service Platform for Combined Vehicle-to-vehicle and Vehicle-to-infrastructure Communications [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2009, 16 (6): 54-61.
- [46] ABUALHOUL M Y, SHAGDAR O, NASHASHIBI F. Visible Light Inter-vehicle Communication for Platooning of Autonomous Vehicles [C] // IEEE. *Proceedings of the 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. New York: IEEE, 2016: 508-513.
- [47] NOH S, AN K, HAN W. Toward Highly Automated Driving by Vehicle-to-infrastructure Communications [C] // IEEE. *Proceedings of the 2015 IEEE 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. New York: IEEE, 2015: 2016-2021.
- [48] GOZÁLVEZ J, SEPULCRE M, BAUZA R. IEEE 802.11 p Vehicle to Infrastructure Communications in

- Urban Environments [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50 (5): 176-183.
- [49] JIA D, NGODUY D. Enhanced Cooperative Car-following Traffic Model with the Combination of V2V and V2I Communication [J]. Transportation Research Part B, 2016, 90: 172-191.
- [50] BESSLER S, KÜHN E, PAULIN T. Disruption Tolerance in Vehicle to Infrastructure Communication; Making a Case for Intelligent Roadside Infrastructure [C] // ITS. 19th ITS World Congress. Washington DC: ITS, 2012: 1-11.
- [51] DEY K C, RAYAMAJHI A, CHOWDHURY M, et al. Vehicle-to-vehicle (V2V) and Vehicle-to-infrastructure (V2I) Communication in a Heterogeneous Wireless Network-performance Evaluation [J]. Transportation Research Part C, 2016, 68: 168-184.
- [52] CHENNIKARA-VARGHESE J, CHEN W, HIKITA T, et al. Local Peer Groups and Vehicle-to-infrastructure Communications [C] // IEEE. Proceedings of the 2007 IEEE Globecom Workshops. New York: IEEE, 2007: 1-6.
- [53] ZHAO J, CHEN Y, GONG Y. Study of Connectivity Probability of Vehicle-to-vehicle and Vehicle-to-infrastructure Communication Systems [C] // IEEE. Proceedings of the 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). New York: IEEE, 2016: 1-4.
- [54] KO B, LIU K, SON S H. Towards Efficient Data Services in Vehicular Networks Via Cooperative Infrastructure-to-vehicle and Vehicle-to-vehicle Communications [C] // IEEE. Proceedings of the 2016 International IEEE Conferences on Ubiquitous Intelligence and Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People, and Smart World Congress. New York: IEEE, 2016: 82-89.
- [55] VA V, SHIMIZU T, BANSAL G, et al. Beam Design for Beam Switching Based Millimeter Wave Vehicle-to-infrastructure Communications [C] // IEEE. Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). New York: IEEE, 2016: 1-6.
- [56] UBIERGO G A, JIN W L. Mobility and Environment Improvement of Signalized Networks Through Vehicle-to-infrastructure (V2I) Communications [J]. Transportation Research Part C, 2016, 68: 70-82.
- [57] WANG H, LIU R P, NI W, et al. A New Analytical Model for Highway Inter-vehicle Communication Systems [C] // IEEE. Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE, 2014: 2581-2586.
- [58] GUO C, GUO W, CAO G, et al. A Lane-level LBS System for Vehicle Network with High-precision BDS/GPS Positioning [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2015, 2015: 1-13.
- [59] O'KEEFE K, JIANG Y, PETOVELLO M. An Investigation of Tightly-coupled UWB/Low-cost GPS for Vehicle-to-infrastructure Relative Positioning [C] // IEEE. 2014 IEEE Radar Conference. New York: IEEE, 2014: 1295-1300.
- [60] HAAK U, SASSE A, HECKER P. On the Definition of Lane Accuracy for Vehicle Positioning Systems [J]. IFAC Proceedings, 2010, 43 (16): 372-376.
- [61] JAE-HOON J, MIN K, GI-SIG B. Position Recognition for an Autonomous Vehicle Based on Vehicle-to-led Infrastructure [C] // Springer. 2016 International Conference on Advanced Engineering Theory and Applications. Berlin: Springer, 2016: 913-921.
- [62] KAWAMURA T, KASHIWA T, TAGUCHI K, et al. Intelligent Driving Lane with RF-ID for Vehicle Navigation System [C] // IEEE. 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo. New York: IEEE, 2014: 869-870.
- [63] PASHAIAN M, MOSAVI M R, PASHAIAN M. Accurate Intelligent Map Matching Algorithms for Vehicle Positioning System [J]. IJCSI International Journal of Computer Science Issues, 2012, 9 (2): 114-119.
- [64] DAI C, CHOW C Y, ZHANG J. Utilizing Road-side Infrastructure for Location-based Services in Vehicular Ad-hoc Networks [C] // IEEE. Proceedings of the 2013 IEEE 8th International Conference on Communications and Networking in China. New York: IEEE, 2013: 546-551.
- [65] KIM W, KIM D, YI K, et al. Development of a Path-tracking Control System Based on Model Predictive Control Using Infrastructure Sensors [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50 (6): 1001-1023.
- [66] PASHAIAN M, MOSAVI M R, PASHAIAN M. Accurate Intelligent Map Matching Algorithms for Vehicle Positioning System [J]. International Journal of Computer Science Issues, 2012, 9 (2): 114-119.
- [67] ZHANG F, HINZ G, CLARKE D, et al. Vehicle-infrastructure Localization Based on the SME Filter [C]

- // IEEE. Proceedings of the 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2015: 225-230.
- [68] DE PONTE M F, DIAZ E M, RASHDAN I. Cooperative Infrastructure-based Vehicle Positioning [C] // IEEE. Proceedings of the 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference. New York: IEEE, 2016: 1-6.
- [69] VU A, FARRELL J A, BARTH M. Centimeter-accuracy Smoothed Vehicle Trajectory Estimation [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2013, 5 (4): 121-135.
- [70] LIU J, CAI B, WEN Y, et al. Integrating DSRC and Dead-reckoning for Cooperative Vehicle Positioning Under GNSS-challenged Vehicular Environments [J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2015, 19 (1/2): 111-129.
- [71] DI BERNARDO M, SALVI A, SANTINI S. Distributed Consensus Strategy for Platooning of Vehicles in the Presence of Time-varying Heterogeneous Communication Delays [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16 (1): 102-112.
- [72] LEI C, VAN EENENNAAM E M, WOLTERINK W K, et al. Impact of Packet Loss on CACC String Stability Performance [C] // IEEE. Proceedings of the 2011 IEEE 11th International Conference on ITS Telecommunications. New York: IEEE, 2011: 381-386.
- [73] KENNEY J B. Dedicated Short-range Communications (DSRC) Standards in the United States [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99 (7): 1162-1182.
- [74] CAMPOLO C, VINEL A, MOLINARO A, et al. Modeling Broadcasting in IEEE 802.11p/WAVE Vehicular Networks [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15 (2): 199-201.
- [75] EMMELMANN M, BOCHOW B, KELLUM C C. Vehicular Networking: Automotive Applications and Beyond [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.
- [76] SAEEDNIA M, MENENDEZ M. Analysis of Strategies for Truck Platooning: Hybrid Strategy [J]. Transportation Research Record, 2016 (2547): 41-48.
- [77] HALL R, CHIN C. Vehicle Sorting for Platoon Formation: Impacts on Highway Entry and Throughput [J]. Transportation Research Part C, 2005, 13 (5): 405-420.
- [78] AMOOZADEH M, DENG H, CHUAH C N, et al. Platoon Management with Cooperative Adaptive Cruise Control Enabled by VANET [J]. Vehicular Communications, 2015, 2 (2): 110-123.
- [79] ZHENG Y, LI S E, LI K, et al. Distributed Model Predictive Control for Heterogeneous Vehicle Platoons Under Unidirectional Topologies [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25 (3): 899-910.
- [80] ZHENG Y, LI S E, WANG J, et al. Stability and Scalability of Homogeneous Vehicular Platoon: Study on the Influence of Information Flow Topologies [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17 (1): 14-26.
- [81] SABAU Ş, OARA C, WARNICK S, et al. Optimal Distributed Control for Platooning Via Sparse Coprime Factorizations [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62 (1): 305-320.
- [82] HARFOUCH Y A, YUAN S, BALDI S. An Adaptive Switched Control Approach to Heterogeneous Platooning with Intervehicle Communication Losses [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2018, 5 (3): 1434-1444.
- [83] LI S, MI C C. Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3 (1): 4-17.
- [84] DEFLORIO F P, CASTELLO L, PINNA I, et al. "Charge while Driving" for Electric Vehicles: Road Traffic Modeling and Energy Assessment [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3 (2): 277-288.
- [85] XIAO J, CHENG E, CHEUNG N, et al. Study of Wireless Charging Lane for Electric Vehicles [C] // IEEE. Proceedings of the 2016 International Symposium on Electrical Engineering (ISEE). New York: IEEE, 2016: 1-4.
- [86] CHEN Z, JING W, HUANG X, et al. A Promoted Design for Primary Coil in Roadway-powered System [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51 (11): 1-4.
- [87] WANG C, LI J, YANG Y, et al. Combining Solar Energy Harvesting with Wireless Charging for Hybrid Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17 (3): 560-576.
- [88] HE J, HUANG H J, YANG H, et al. An Electric Vehicle Driving Behavior Model in the Traffic System with a Wireless Charging Lane [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 481:

- 119-126.
- [89] LI Y, WANG W, XING L, et al. Longitudinal Safety Evaluation of Electric Vehicles with the Partial Wireless Charging Lane on Freeways [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 111: 133-141.
- [90] JIANG W, XU S, LI N, et al. Wireless Power Charger for Light Electric Vehicles [C] // IEEE. *Proceedings of the 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. New York: IEEE, 2015: 562-566.
- [91] SUN J, DING W X. Research Status and Prospects of the Smart Concrete [C] // *Trans Tech. Advanced Materials Research*. Switzerland: Trans Tech Publications, 2011, 194: 1118-1121.
- [92] ZHANG J, LU Y, LU Z, et al. A New Smart Traffic Monitoring Method Using Embedded Cement-based Piezoelectric Sensors [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24 (2): 1-8.
- [93] FERZLI N A, IVEY R A, KING T, et al. An Application of "Smart Dust" for Pavement Condition Monitoring [C] // *International Society for Optics and Photonics. Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. New York: International Society for Optics and Photonics, 2006, 6174: 1-12.
- [94] MORENO-NAVARRO F, IGLESIAS G R, RUBIO-GÁMEZ M C. Development of Mechanomutable Asphalt Binders for the Construction of Smart Pavements [J]. *Materials and Design*, 2015, 84: 100-109.
- [95] JUNG I, SHIN Y H, KIM S, et al. Flexible Piezoelectric Polymer-based Energy Harvesting System for Roadway Applications [J]. *Applied Energy*, 2017, 197: 222-229.
- [96] ALAVI A H, HASNI H, LAJNEF N, et al. Continuous Health Monitoring of Pavement Systems Using Smart Sensing Technology [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114: 719-736.
- [97] NASIR D S N M, HUGHES B R, CALAUTIT J K. A CFD Analysis of Several Design Parameters of a Road Pavement Solar Collector (RPSC) for Urban Application [J]. *Applied Energy*, 2017, 186: 436-449.
- [98] EL-WAKEEL A S, LI J, RAHMAN M T, et al. Monitoring Road Surface Anomalies Towards Dynamic Road Mapping for Future Smart Cities [C] // IEEE. *Proceedings of the 2017 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing*. New York: IEEE, 2017: 828-832.
- [99] WANG Y D, CHENG Y C, ZHANG P, et al. Research on Exploitation Technology of Snow Disaster Forecast Warning System on Roads [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 533: 350-353.
- [100] TAN B. Road Surface Temperature Monitor System Realization Based on Rich Internet Application Model and GPRS Technology [C] // IEEE. *Proceedings of the 2010 IEEE 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications*. New York: IEEE, 2010: 1-4.
- [101] BEINAROVICA A, GOROBETZ M, LEVCHENKOV A. Innovative Neuro-fuzzy System of Smart Transport Infrastructure for Road Traffic Safety [C] // *Institute of Physics. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. London: IOP Publishing, 2017, 236 (1): 1-8.
- [102] ZHOU Z, HU S, ZHANG X, et al. Characteristics and Application of Road Absorbing Solar Energy [J]. *Frontiers in Energy*, 2013, 7 (4): 525-534.
- [103] ITO K, ARAI Y, HIRAKAWA G, et al. A Road Condition Sharing System Using Vehicle-to-vehicle Communication in Various Communication Environment [C] // IEEE. *Proceedings of the 2015 IEEE 9th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems*. New York: IEEE, 2015: 242-249.
- [104] MOGHIMI B, SAFIKHANI A, KAMGA C, et al. Short-term Prediction of Signal Cycle on an Arterial with Actuated-uncoordinated Control Using Sparse Time Series Models [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20 (8): 2976-2985.
- [105] MOGHIMI B, SAFIKHANI A, KAMGA C, et al. Cycle-length Prediction in Actuated Traffic-signal Control Using Arima Model [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2017, 32 (2): 1-10.
- [106] GUO Y, MA J, XIONG C, et al. Joint Optimization of Vehicle Trajectories and Intersection Controllers with Connected Automated Vehicles: Combined Dynamic Programming and Shooting Heuristic Approach [J]. *Transportation Research Part C*, 2019, 98: 54-72.
- [107] JITTRAPIROM P, CAIATI V, FENERI A M, et al. Mobility as a Service: A Critical Review of Definitions, Assessments of Schemes, and Key Challenges [J]. *Urban Planning*, 2017, 2 (2): 13-25.

- [108] KAMARGIANNI M, MATYAS M, LI W, et al. A Critical Review of New Mobility Services for Urban Transport [J]. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14: 3294-3303.
- [109] KAMARGIANNI M, MATYAS M, LI W, et al. Feasibility Study for “Mobility as a Service” Concept in London [R]. London: UCL Energy Institute, 2015.
- [110] DJAVADIAN S, CHOW J Y J. An Agent-based Day-to-day Adjustment Process for Modeling ‘Mobility as a Service’ with a Two-sided Flexible Transport Market [J]. *Transportation Research Part B*, 2017, 104: 36-57.
- [111] LAMOTTE R, DE PALMA A, GEROLIMINIS N. On the Use of Reservation-based Autonomous Vehicles for Demand Management [J]. *Transportation Research Part B*, 2017, 99: 205-227.
- [112] MA J, LI X, ZHOU F, et al. Designing Optimal Autonomous Vehicle Sharing and Reservation Systems: A Linear Programming Approach [J]. *Transportation Research Part C*, 2017, 84: 124-141.
- [113] HENSHER D A. Future Bus Transport Contracts Under a Mobility as a Service (MaaS) Regime in the Digital Age: Are They Likely to Change [J]. *Transportation Research Part A*, 2017, 98: 86-96.
- [114] RAVINDRAN R, CHAKRABORTI A, AMIN S O, et al. 5G-ICN: Delivering ICN Services over 5G Using Network Slicing [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55 (5): 101-107.
- [115] THAI J, YUAN C, BAYEN A M. Resiliency of Mobility-as-a-Service Systems to Denial-of-service Attacks [J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2018, 5 (1): 370-382.
- [116] OKUMURA B, JAMES M R, KANZAWA Y, et al. Challenges in Perception and Decision Making for Intelligent Automotive Vehicles: A Case Study [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2016, 1 (1): 20-32.
- [117] LIU W, KIM S W, PENDLETON S, et al. Situation-aware Decision Making for Autonomous Driving on Urban Road Using Online POMDP [C] // IEEE. *Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. New York: IEEE, 2015: 1126-1133.
- [118] NARANJO J E, GONZALEZ C, GARCIA R, et al. Lane-change Fuzzy Control in Autonomous Vehicles for the Overtaking Maneuver [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, 9 (3): 438-450.
- [119] PEREZ J, MILANES V, ONIEVA E, et al. Longitudinal Fuzzy Control for Autonomous Overtaking [C] // IEEE. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics*. New York: IEEE, 2011: 188-193.
- [120] ARDELT M, COESTER C, KAEMPCHEN N. Highly Automated Driving on Freeways in Real Traffic Using a Probabilistic Framework [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13 (4): 1576-1585.
- [121] WOLF P, HUBSCHNEIDER C, WEBER M, et al. Learning How to Drive in a Real World Simulation with Deep Q-networks [C] // IEEE. *Proceedings of the 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. New York: IEEE, 2017: 244-250.
- [122] LILICRAP T P, HUNT J J, PRITZEL A, et al. Continuous Control with Deep Reinforcement Learning [EB/OL]. [2015-07-09]. <https://arxiv.org/pdf/1509.02971.pdf>.
- [123] NGAI D C K, YUNG N H C. A Multiple-goal Reinforcement Learning Method for Complex Vehicle Overtaking Maneuvers [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12 (2): 509-522.
- [124] SCHWARTING W, ALONSO-MORA J, RUS D. Planning and Decision-making for Autonomous Vehicles [J]. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2018, 1: 187-210.
- [125] ZHENG Z. Recent Developments and Research Needs in Modeling Lane Changing [J]. *Transportation Research Part B*, 2014, 60: 16-32.
- [126] LI B, SHAO Z, ZHANG Y, et al. Nonlinear Programming for Multi-vehicle Motion Planning with Homotopy Initialization Strategies [C] // IEEE. *Proceedings of the 2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering*. New York: IEEE, 2017: 118-123.
- [127] 李 柏. 复杂约束下自动驾驶车辆运动规划的计算最优控制方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
LI Bai. Research on Computational Optimal Control Methods for Autonomous Vehicle Motion Planning Problems with Complicated Constraints [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [128] DESARAJU V R, HOW J P. Decentralized Path Planning for Multi-agent Teams with Complex Constraints [J]. *Autonomous Robots*, 2012, 32 (4): 385-403.
- [129] HÄUSLER A J, SACCON A, AGUIAR A P, et al.

- Energy-optimal Motion Planning for Multiple Robotic Vehicles with Collision Avoidance [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24 (3): 867-883.
- [130] LI B, ZHANG Y, SHAO Z, et al. Simultaneous Versus Joint Computing: A Case Study of Multi-vehicle Parking Motion Planning [J]. *Journal of Computational Science*, 2017, 20: 30-40.
- [131] INDRANIL S, RATTANACHAI R, VIJAY K, et al. Implan: Scalable Incremental Motion Planning for Multi-robot Systems [C] // IEEE. *Proceedings of the 2016 ACM/IEEE 7th International Conference on Cyber-physical Systems*. New York: IEEE, 2016: 1-10.
- [132] PLESSEN M G, BERNARDINI D, ESEN H, et al. Multi-automated Vehicle Coordination Using Decoupled Prioritized Path Planning for Multi-lane One-and Bi-directional Traffic Flow Control [C] // IEEE. *Proceedings of the 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control*. New York: IEEE, 2016: 1582-1588.
- [133] DRESNER K, STONE P. A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management [J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2008, 31: 591-656.
- [134] LEE J, PARK B. Development and Evaluation of a Cooperative Vehicle Intersection Control Algorithm Under the Connected Vehicles Environment [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13 (1): 81-90.
- [135] LIAN F L, MURRAY R. Real-time Trajectory Generation for the Cooperative Path Planning of Multi-vehicle Systems [C] // IEEE. *Proceedings of the 2002 41st IEEE Conference on Decision and Control*. New York: IEEE, 2002, 4: 3766-3769.
- [136] AHMADZADEH A, MOTEE N, JADBABAIE A, et al. Multi-vehicle Path Planning in Dynamically Changing Environments [C] // IEEE. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2009: 2449-2454.
- [137] DESIRAJU D, CHANTEM T, HEASLIP K. Minimizing the Disruption of Traffic Flow of Automated Vehicles During Lane Changes [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16 (3): 1249-1258.
- [138] ATAGOZIYEV M, SCHMIDT K W, SCHMIDT E G. Lane Change Scheduling for Autonomous Vehicles [J]. *IFAC-Papers on Line*, 2016, 49 (3): 61-66.
- [139] ABICHANDANI P, FORD G, BENSON H Y, et al. Mathematical Programming for Multi-vehicle Motion Planning Problems [C] // IEEE. *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2012: 3315-3322.
- [140] WARD E, EVESTEDT N, AXEHILL D, et al. Probabilistic Model for Interaction Aware Planning in Merge Scenarios [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2017, 2 (2): 133-146.
- [141] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. *控制与决策*, 2004, 19(5): 485-489.
WANG Fei-yue. Parallel System Method for Management and Control of Complex Systems [J]. *Control and Decision*, 2004, 19 (5): 485-489.
- [142] 王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(5): 893-897.
WANG Fei-yue. Computational Experiments for Behavior Analysis and Decision Evaluation of Complex Systems [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16 (5): 893-897.