

面向智慧驾驶的道路基础设施功能设计

文 龙^{1,2}, 刘思铨¹, 芮润华¹, 李晓赫¹

(1. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084; 2. 北京公联洁达公路养护工程有限公司, 北京 100160)

摘要: 随着单车智能成本提高以及道路环境复杂性加大, 智慧驾驶车辆的发展越来越依靠智慧道路基础设施的进步。目前国内外不同的道路工程建设项目对道路基础设施的智慧化均提出了各具特色的设计思路和功能模块, 但是相关研究主要集中在单一的道路功能或特定技术上, 尚未系统性地给出智慧道路基础设施的设计理论和应用体系。同时, 智慧道路基础设施建设要求路旁设备、路面材料和外部感知设备等全方位朝着信息化、数字化和智能化方向发展。本研究在系统综述国内外智慧公路项目典型案例的基础上, 提出了未来智慧道路设施的四大关键技术。

关键词: 智慧驾驶; 道路基础设施; 新型路面材料; 智能交通
中图分类号: U495 **文献标志码:** A

Functional Design of Road Infrastructure for Intelligent Driving

WEN LONG^{1,2}, LIU Siqian¹, GUO Runhua¹, LI Xiaohe¹
(1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Gonglianjieda Highway Maintenance Co., Ltd., Beijing 100160, China)

Abstract: With the increase in the cost of single vehicle intelligence and the increasing complexity of road environments, the development of smart driving vehicles is increasingly relying on the progress of smart road infrastructure. At present, in different road engineering construction projects both domestically and internationally, unique design ideas and functional modules are proposed for the intelligence of road infrastructure. However, relevant research mainly focuses on a single road function or specific technology, and there is no systematic proposal for the design theory and application system of smart road infrastructure. At the same time, the smart road infrastructure construction requires the development of roadside equipment,

pavement materials, and external perception equipment in all directions towards informatization, digitization, and intelligence. Based on a systematic review of typical cases of smart road projects both domestically and internationally, four key technologies for future smart road facilities are proposed in this paper.

Key words: intelligent driving; road infrastructure; new pavement materials; intelligent transportation

智慧驾驶是汽车未来的发展方向, 涵盖了自动驾驶和智能网联驾驶等概念, 与传统人工驾驶相比具有提升通行效率和减少交通事故等优点^[1]。2020 年, 交通运输部印发《交通运输部关于促进道路交通自动驾驶技术发展和应用的指导意见》, 要求加强自动驾驶技术研发, 提升道路基础设施智能化水平。美国智能交通系统联合计划办公室也于 2020 年发布了《智能交通系统战略规划 2020—2025》, 提倡市场自由发展自动驾驶技术。网联化和单车智能化是推进智慧驾驶的两大方向, 本质区别在于技术和成本在车侧和路侧的分配。为辅助智慧驾驶车辆的环境感知和即时通信等功能, 道路基础设施的智能化成为必然趋势^[2]。这一发展趋势符合人类交通发展史呈现的规律, 即交通基础设施需适应新的运载工具的发展要求, 与传统机动车辆相比, 智慧驾驶车辆与道路基础设施的耦合程度进一步增强^[3], 因此在智慧驾驶背景下, 未来道路建设必须充分考虑智慧驾驶车辆对道路基础设施的影响与功能需求。

目前, 国内外对智慧道路基础设施的研究主要集中在单一的道路功能或特定技术上, 未系统地给出关于未来智慧道路基础设施的设计理论与应用体

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 北京市首都公路发展集团有限公司重点科技项目(A2023-002)

第一作者: 文 龙(1984—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为路基路面工程、交通基础设施养护管理等。

E-mail: longwen1102@163.com

通信作者: 刘思铨(1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向为未来智慧道路设施建设。

E-mail: liusq20@mails. tsinghua. edu. cn



论文
拓展
介绍

系。本研究旨在从智慧驾驶汽车的技术特点和性能需求入手,分析目前国内外适应智慧驾驶车辆运行特性的道路基础设施的研究现状,明确智慧驾驶车辆对未来道路设计的需求与影响,为智慧道路基础设施建设、管理和养护提供理论支撑。

1 国内外智慧道路基础设施发展历程

1.1 国外智慧道路基础设施

美国加州大学伯克利分校交通研究所和加州交通部于20世纪90年代开展了PATH(partners for advanced transit and highways)项目(见图1),强调车辆自动控制方面的工作,并尝试通过在路面内部布设含钕磁道钉等诱导车辆自动驾驶。2004年,由美国联邦公路局、美国国家公路与运输协会和各州运输部等组成特殊机构,通过信息与通信技术实现汽车与道路设施的集成,推出车路系统集成研究计划^[4]。2010年,美国在Ⅶ计划的基础上成立了IntelliDrive项目^[5],通过开发和集成各种车载和路侧设备以及通信技术,提高驾驶安全和出行效率。2015年,美国交通运输部在怀俄明州等开展研究项目 Connected Vehicle Pilot Deployment Program^[6],部署网联汽车技术方案,加快智能车路协同发展。2020年3月,美国交通运输部发布《智能交通系统战略规划2020—2025》^[7],通过提升基础设施和研发信息的互通性保障自动驾驶技术的安全性。



图1 美国加利福尼亚州PATH项目^[8]

Fig.1 PATH project in California, USA^[8]

与美国的发展模式类似,欧洲于2004年开展了eSafety计划^[9],充分利用先进的信息与通信技术,实现安全系统的研发与集成,实现道路预防性安全。2007年,欧洲开展了以主动交通管理为特征的Easyway项目^[10],旨在实现欧洲道路信息基础设施

的全覆盖,进而建设欧洲统一标准的车路合作系统。为构建车辆与基础设施和交通参与者完整的通信测试基础,2013年荷兰、德国和奥地利签订共同开发合作智能交通项目^[11](见图2)。

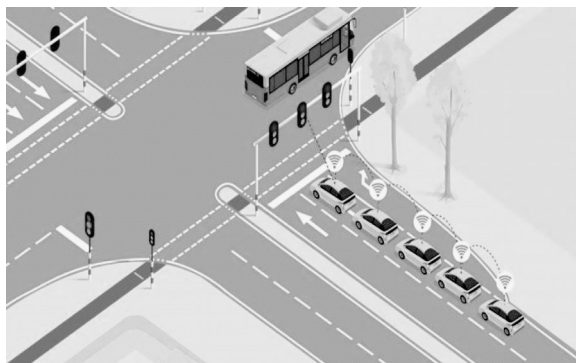


图2 车辆与智能交通系统之间的通信^[12]

Fig.2 Communication between vehicles and intelligent traffic system^[12]

在亚洲发达国家中,日本于2006年第一次展示Smartway计划^[4],在日本智能交通系统已有功能的基础上,通过车路通信减少交通事故。Smartway计划标志着日本的智慧交通系统进入第二个发展阶段,可提高交通安全性。2014年,日本启动ETC2.0战略^[13],旨在通过短程通信手段实现高容量双向通信的车路协同系统。该系统可以实现自动收费,给车辆提供实时交通信息并收集车辆的行驶信息。2008年,韩国实施Smart Highway项目(见图3),综合考虑道路设施智能化,提出驾驶辅助、车路通信等便捷服务。

1.2 国内道路基础设施

2017年—2022年,交通运输部等部委先后发布《加快推进新一代国家交通控制网和智慧公路试点》《智能交通发展近期行动方案》《交通强国建设纲要》《智能汽车创新发展战略》《数字交通“十四五”发展规划》等文件,推进自动驾驶与车路协同技术研发,开展专用测试场地建设,推进智慧公路车路协同试点示范,建设智慧道路。

高速公路对于基础设施智慧化的优势体现在运行环境简单、主体权责明确以及设施齐全等方面,因此在“十三五”期间,智慧化的高速公路成为重点发展方向。现将我国目前已经开展的部分典型智慧高速公路的相关工作整理如表1所示。

2012年,浙江省率先在全国启动智慧高速公路项目,该项目成为浙江省首批智慧城市13个试点示范项目之一;2017年底,浙江省政府计划将杭绍甬高

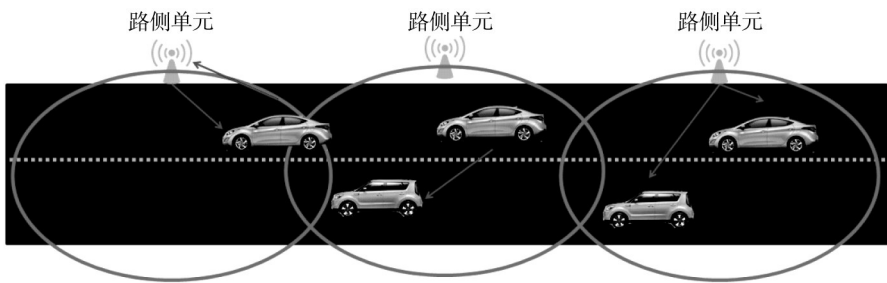


图3 韩国 Smart Highway 模型^[14]

Fig.3 Smart Highway model in South Korea^[14]

表 1 中国已开展的智慧高速公路项目

Tab.1 Smart expressway projects launched in China

序号	项目名称	项目时间	项目来源
1	北京新机场高速公路	2016 年	京投集团
2	延崇智慧高速公路	2016 年	首发集团
3	浙江杭绍甬智慧高速公路	2019 年	浙江省交通运输厅
4	齐鲁滨莱智慧高速公路	2019 年	齐鲁交通发展集团
5	京港澳高速公路驻马店到信阳段智能管控示范工程	2019 年	河南省交通运输厅
6	武汉市四环线智慧高速公路	2019 年	武汉市交通运输局
7	京雄智慧高速公路	2020 年	河北高速集团
8	京台智慧高速公路	2021 年	山东高速集团
9	银川市绕城智慧高速公路	2022 年	宁夏交通投资集团

速公路(见图 4a)建成为一条“智能、快速、绿色、安全”的智慧高速公路^[13],实现安全预警、实时诱导、专用车道、编队行驶、自由流收费、全天候通行和精准管控调度等功能。在国内首次于京雄智慧高速公路(见图 4b)内侧设置一条智慧高速专用车道,构建“11456”智慧交通体系,即一个云计算中心、一个智慧管理服务平台、四方面智能感知、五种网络融合、六项智慧体验。延崇智慧高速公路^[15](见图 4c)是连接北京冬奥会延庆赛区和张家口赛区的公路主通道,综合利用摄像机、雷达、高清卡口、特征识别单元以及气象监测站等手段,实现交通运行状态、车辆状态、环境信息的全面感知,成为国内首条具备车路协同、隧道诱导、北斗卫星和 5G 信号的山区高速公路。山东省将滨莱高速(见图 4d)苗山至博山段 26 km 道路通过智慧化改造和升级后,建成智慧高速示范路段^[7]。该项目计划用 6 年的时间建成全国一流的真实场景智能网联车辆示范区。

1.3 文献统计与分析

除国内外实际工程案例调研之外,还进行了文献分析。数据库为中国知网(CNKI)数据库核心合集数据库和 Web of Science 外文数据库,时间范围为 1960 年—2022 年,主要选取与智慧道路基础设施相关的文献作为数据来源,中文关键词为智慧驾驶和智慧道路基础设施、智慧公路、智能路面,英文检索式为 TS=(“intelligent driving” OR “autonomous

driving” and “intelligent road infrastructure” and “smart highway” and “smart pavement”),最终得到有效中文文献 697 篇,英文文献 1 057 篇。通过 Citespace 软件进行共被引分析,分别从主要文献统计、期刊分布、高频关键词共现、主要研究国家等方面的共引知识图谱进行分析与可视化(见图 5、6)。中英文文献被引频次前 10 位关键词与中心性的结果如表 2 和表 3 所示。由文献分析可知,国内外学者主要关注智慧公路、高速公路、智慧高速和智慧交通系统等,对于智能路面材料和路面性能等的研究不足。

由实际工程调研和文献分析可知,面向智慧驾驶的智慧基础设施的主要特点为:

(1)重视交通信息的获取与发布。主要依靠互联网企业传统高速公路的管理和服务进行重构和再造。

(2)强化通信技术的作用。目前主要有基于蜂窝网络的车用无线通信技术和基于专用短程通信的车用无线通信技术。欧美国家主要重视短程通信技术的研发,日本和中国等亚洲国家实现了对电子不停车收费系统技术的规模化应用。

(3)重视车路交互平台建设。基于高精度定位、三维高精度地图的车路交互平台成为智慧驾驶车辆运行的基础,可实现车端的道路场景还原,路况信息引导、预警、报警等。

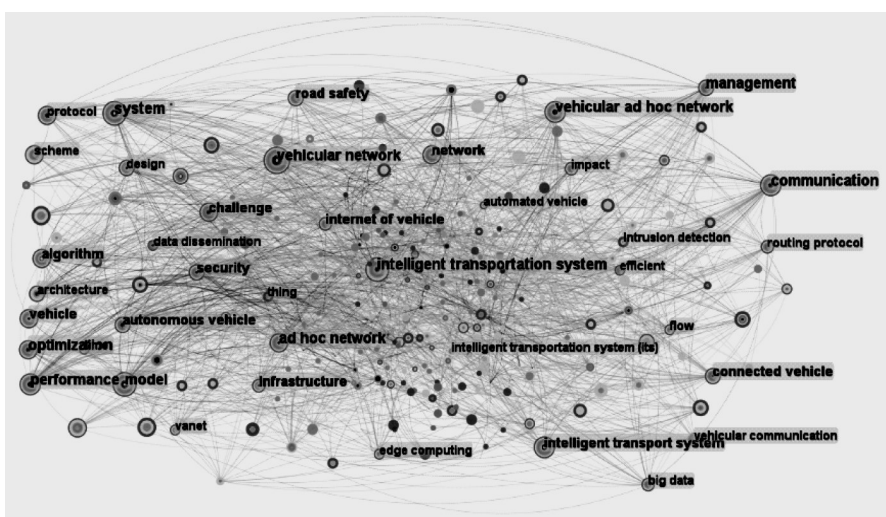


图6 Web of Science关键词共现知识图谱

基础设施需具备智能化、精细化感知等功能以实现车路协同应用,支持智慧驾驶车辆实现位置保持、车道变换、拥堵缓解和流量控制等需求。此外,智慧道路设施还应为智慧驾驶车辆进行能源供给,提供良好的驾驶体验以及实现自身的绿色可持续发展。为适应智慧驾驶车辆的性能,未来道路几何和结构需进行重新设计,并且建造方法需更加智慧化。目前对于智慧道路基础设施尚没有一个统一明确的定义和架构。未来智慧道路基础设施是集功能性路面、感知通信网络、大数据中心和能源系统等高新技术于一体的道路综合体。因此,本研究拟从感知通信技术、综合服务技术、物理设施技术和智慧建造技术4个方面对智慧道路基础设施的关键技术进行整理,提出智慧道路基础设施的架构体系,最终为设计者、建造者和使用者提供必要的指导和支持。

2.1 感知通信技术

感知通信层包括布置于路侧和路面中的感知网络、网络通信模块以及数据处理决策模块等,旨在全方位实现道路运行状态感知、车路动态实时信息交互、主动交通管理和车路协同下的高级别智能交通系统应用。

2.1.1 路侧感知技术

智慧驾驶车辆传感器主要包括视觉传感器和雷达,在光照不足、天气恶劣或道路条件复杂的情况下准确率较低。同时,单车智能的局限性要求智慧驾驶车辆依靠信息交换提高环境感知能力,因此仅当车流中的智慧驾驶车辆渗透率达到一定程度时智慧驾驶的先进性才可得以体现^[16]。为解决上述问题,V2X(vehicle to everything)被提出,可将车辆、路边

基础设施、行人等通过网络连接起来,更好地克服单车智能的局限性。V2X 涉及的通信技术主要包括 2 种无线技术:专用短程通信(DSRC)和蜂窝 V2X。传统的车路协同主要依赖于车载单元(OBUs)和路侧单元(RSUs),因此无法满足未配置 V2X 设备的车辆、行人和自行车的需求。然而,车辆或基础设施中的传感器可以检测未联网的道路用户,构成协同感知系统,因此路侧感知单元系统(RSPUs)的概念被提出^[17],如图 7 所示,主要包括路侧通信、感知和计算设施以及包括用于交通安全、管理和通信定位的设备。

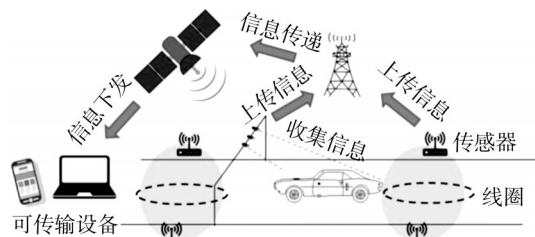


图7 路边单元系统^[18]

Fig.7 Roadside unit system^[18]

2.1.2 路表信息巡检技术

除路侧感知设备,以路面检测车、机器人和无人机为代表的众多自动采集仪器和设备可用于路面数据的获取。

(1)路面检测车

路面检测车主要通过数字图像处理技术、激光位移扫描技术对路面破损、变形病害和平整度进行检测与评价。研究人员采用数码相机检测路面裂缝激光扫描方法检测车辙或裂缝^[19]。基于线激光和多

点激光的传感器在路面轮廓采集时需要等速行驶,车速变化时数据失真,无法在正常交通环境中应用^[20]。在路面纹理分析方面,Chen^[21]与黄晓明等^[22]使用近景摄影技术获取路面纹理信息,计算不同路面状态下的附着系数;针对上述问题,Guo等^[23]开发出车载式高精度三维激光轮廓仪集成调查系统,通过汽车轮迹带位置横向布置与纵向布置架构可以4.5 kHz采样频率连续获取横向270 mm三维数字高程信息与纵向高程信息,采集精度受车速影响小,垂直精度可达0.01 mm,优于微观和宏观纹理分界0.05 mm^[24]。

随着人工智能方法的推广,通过基于深度学习算法的识别检测,有望满足实时处理和快速养护的需求。在平整度和纹理检测方面,如何提升检测速度、降低扫描成本,同时不失纹理精度,是未来需要研究的问题,也是三维扫描检测推广的关键。

(2)道路巡检机器人

与人工检测相比,车载公路病害自动化检测设备虽提高了检测效率,但其自动化程度、数据密度和定位精度有待提高。山东高速工程检测有限公司等开发了一款公路病害检测机器人,该机器人由数据采集作业系统、数据处理与信息管理系统和远程监控与辅助系统组成。侯海涛等^[25]在检测机器人中集成了远程监控系统 and 检测数据分析系统,并可通过无线网络和4G网络进行通信。实际应用中发现,未来道路检测机器人对弯曲道路的适应性不足,对于错台或车辙等位移类病害识别效果较差,未来需优化机器人导航算法,扩展检测模块,提高机器人在公路病害检测中的适应能力。

(3)无人机

无人机与道路检测车和机器人相比,具有能耗低、灵活性强和不影响正常交通等优点。目前,无人机的道路检测技术主要基于数字图像处理技术,路面病害的检测效率主要取决于检测算法的好坏。无人机的倾斜摄影技术为路旁标志、路面标线等的检测提供了多角度和高精度的影像资料,有利于三维模型构建,服务于道路基础设施的数字化,为道路基础设施向智能化、数字信息化发展提供了有效手段^[26]。目前基于无人机的道路病害检测方法在夜间或恶劣天气下效果受到影响,检测数据无法实时传输,依赖后续处理。

2.1.3 路面内部传感器技术

除外部检测技术外,在路面内部嵌入传感器可收集路面气象和交通流信息,通过互联网技术实现

车路数据共享,向智慧驾驶车辆提供推荐速度或危险警示^[27]。路面气象状态传感器可准确测量路面湿滑、积雪和积冰状况,通过车路协同技术或云平台技术等为车辆提供速度推荐。Tabatabai等^[28]使用混凝土材料制备气象状况传感器,该传感器通过由路表面积水积冰导致的电阻变化判断路面湿滑状况,并以无线通信的方式提醒来往车辆。路面交通信息传感器以车辆检测为目的,检测车距、车速后为智慧驾驶车辆提供安全速度和车距建议。未来智慧驾驶车辆将有效利用上述信息,依靠计算机实现更精准的车辆控制和更高效的执行力^[29]。目前常用的路嵌入式交通信息监测传感器包括气动道路管、环形线圈传感器和磁感应传感器等。

2.2 综合服务技术

综合服务层可概括为R2X(road to everything)的概念,“X”包括智慧驾驶车辆、行人、移动终端和道路本身等。综合服务层不仅可通过自监测、自供能和自调节等技术主动适应外界环境变化,还可通过信息感知和传输技术与用户互联,实现车路协同。

2.2.1 能量吸收与利用

道路周边存在大量的环境能量,包括光能、机械能和热能,路域能量的应用不仅可以减弱通信设备和传感器对传统供能的依赖^[30-31],还可以成为智慧驾驶车辆能量来源的重要途径之一。

(1)路面光伏

路面光伏发电是指采用太阳能光伏发电层替代传统的沥青或水泥混凝土面层的新型路面(见图8),最早由美国电气工程师Scott和Julie于2006年提出,目前已相继开发出四代产品^[32]。2016年法国在诺曼底Tourouvre小镇铺设了1 km长共2 800 m²的光伏路面(见图8a),称之为Wattway,太阳能电池板包裹在由树脂和聚合物组成的多层基体中。第一年的发电量为预期的一半,第二年仅第一年的52%。2017年,山东齐鲁交通发展集团等单位在山东济南银丰财富广场和济南绕城高速公路建设了太阳能路面工程(见图8d),但光伏高速公路通车不到8个月便大面积损坏,最后仅剩15 m^[33]。从上述实际工程可知,光伏路面耐久性较差,不适宜大规模推广。

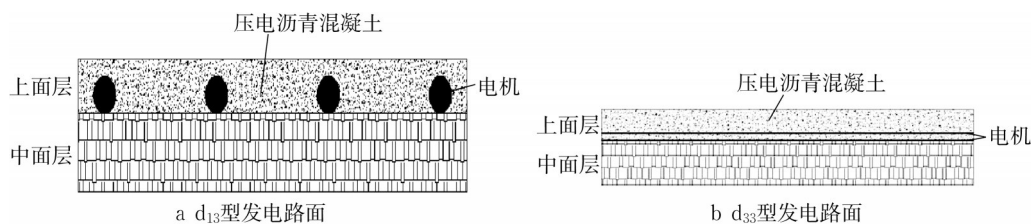
(2)压电路面

传统路面结构中的机械能最终以热能形式耗散在路面内部,而压电路面通过压电效应将机械能转换为电能。压电路面技术包括压电材料与路面材料一体化技术和压电换能元件埋入式路面发电技术。压电材料与路面材料一体化技术是指利用路用压电

图8 世界各国光伏路面^[32]Fig.8 Photovoltaic pavement in various countries around the world^[32]

复合材料直接铺筑而成的压电发电路面形式(见图9)。谭忆秋等^[34]制备了0-3型PZT/沥青压电复合材料,该材料在车辆荷载下可产生7.2 V的电压。将具有发电能力的压电换能元件埋设于路面结构内

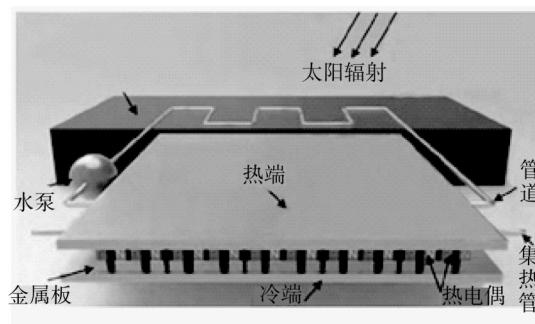
部,在车辆荷载作用下发生应力应变可实现能量转换。目前常用的压电换能器包括堆叠式^[35]、悬臂梁式^[36]和桥式^[37]压电换能器。压电换能元件的防水和耐久性问题是制约该技术发展的难点。

图9 d_{13} 和 d_{33} 型发电路面结构^[38]Fig.9 d_{13} and d_{33} type power generation pavement structure^[38]

(3)路面热能发电

热电材料是利用基于塞贝克效应^[39]的热电转换器将热量差转化为电能的新型材料,具有低碳环保的优点。路面热能发电可分为利用路面下埋设的液体系统传导热量发电(见图10)和固体系统导热发电2种方式。Hasebe等^[40]在2006年首次利用路面埋设管道的方式研究了热电转换。由于管道热发电成本高,冬季管道易破裂,因此目前的路面热能收集发电系统多采用固体系统导热方法。

从实际应用效果来看,光伏路面耐久性较差,板块的结构、材料和电路耐久性存在进一步的研究空间。压电材料的输出功率微弱,未来需从压电新材料、极化方法和元器件耐久性等多方面展开研究。路面热电转换效能与纬度、阳光辐射和温差等因素相关,未来需从交通、能源和计算机等多学科进行

图10 路面热电示意图^[41]Fig.10 Schematic diagram of thermal and electrical road surface^[41]

创新。

2.2.2 超级体验型路面技术

智慧路面除了满足正常的道路行驶条件,还应

具有透水、降噪、自融冰雪、尾气自净化和多色彩等功能,为道路使用者提供良好的驾驶体验。

(1)大孔隙路面材料

采用孔隙率为 18%~23% 的多孔材料铺筑大孔隙路面,可快速排出路表面积水(见图 11),减少积水引起的水雾和水溅现象;该类型路面纹理构造更为粗糙,可提高路面抗滑性;丰富的连通孔隙可有效吸收行车噪音,带来更加舒适的驾驶体验^[42]。

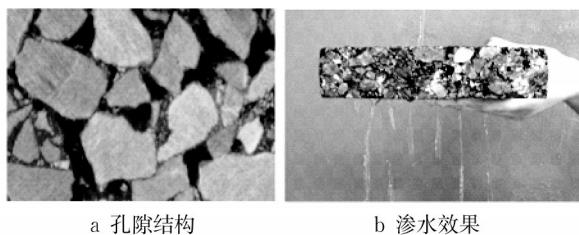


图 11 大孔隙路面功能^[43]

Fig.11 Large pore pavement function^[43]

(2)超级平坦路面

超级平坦路面是指路面平整度指标满足行车安全性和舒适性的路面。施工过程中必须从路床、基层、沥青面层层层控制。对于桥梁伸缩缝等特殊部位,应采取专项措施加以控制^[44]。为保证沥青路面平整度,摊铺前熨平板温度必须加热到 100℃ 以上,还要调整好熨平板的拱度,并保证各熨平板连接平顺,避免摊铺层出现离析现象。

(3)自融冰雪路面

路面的积雪结冰是影响冬季交通安全和运行效率的关键问题。自融雪路面可以减少物理除雪和撒融雪盐对路面和环境的破坏,主要包括自应力弹性铺装路面、低冰点路面、相变材料路面以及能量转化型路面。自应力弹性铺装路面是通过在沥青混合料中添加一定的弹性材料,弹性材料之上的冰层在荷载作用下受力不均而发生破坏^[45-46]。低冰点路面是指预先将低冰点添加剂代替集料或矿粉加入沥青混合料中,使其在毛细作用下析出,进而实现融雪化冰的技术。中国的低冰点填料研究起步较晚,目前以哈工大谭忆秋团队的 ZGHIT 系列、长安大学的 ICB 和 IGD 系列融雪抑冰材料以及中交抗暗冰系列等为主^[46]。能量转化型融雪化冰路面是指在路面结构内部埋设一定数量的传热管线或导热体,通过热力进行路面融雪化冰,根据热力传输方式和能量转化模式的不同,现阶段能量转化型路面主要包括流体加热路面、热管加热路面^[45]及电加热路面^[47]。

(4)自净化路面

自净化路面技术主要通过路面尾气净化技术(见图 12)与路表自清洁技术等提升路面综合环境。路面尾气净化技术是在路面中加入可重复使用的尾气净化材料,利用光照将汽车尾气中的碳氧化物和氮氧化物催化、氧化为无害物质^[48],缓解路面环境污染问题。路表自清洁技术则是通过使用阻燃材料或疏水材料等达到阻燃或防污目的。目前应用较为广泛安全的阻燃材料是氮系、铝镁系和膨胀型阻燃剂等^[49]。疏水材料可降低冰与路面的黏结力,可发挥融雪抑冰的作用。自净化路面发展趋势主要表现在自净化路面材料朝着多元复合化发展,以及有效保证耐久性 2 个方向。

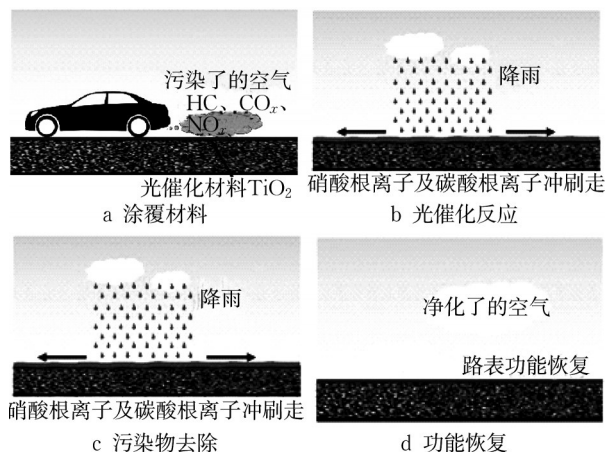


图 12 尾气降解^[43]

Fig.12 Tail gas degradation^[43]

(5)彩色路面

长期以来,路面由黑色的沥青路面和白色的水泥路面组成。为美化环境,彩色路面和自发光路面应运而生。国外学者对彩色沥青路面技术的研究和推广始于 20 世纪 50 年代。我国于 20 世纪 80 年代初开始引入彩色沥青筑路技术,为减少夜间交通事故和照明能耗,在路面中加入自发光材料可实现路面的自发光^[50-51]。目前自发光路面主要是通过向水泥中添加长余辉稀土材料或其他添加剂制备,具有良好的机械强度和耐久性^[52]。一般来说,传统沥青材料颜色的局限性将阻止荧光材料发出的所有光^[50,52]。在世界范围内,水泥混凝土路面的比例低于 10%,远低于沥青路面^[53]。未来沥青路面自发光功能的实现将有助于自发光路面技术的大规模推广,因此对自发光路面的研究具有重要意义。

2.2.3 路面信息化技术

20 世纪 60 年代初,有学者和机构提出在路面内

部嵌入特殊电磁设备,为智慧驾驶车辆提供非前瞻性导航,这些设备不会受天气和地理环境的影响,与近年来的车路通信设备不同,非前瞻性导航方法主要包括电磁导航、永磁体导航、铁磁性路面和射频标签导航等。电磁导航起源于20世纪中叶,路径上埋设的金属线通电之后产生磁场,车辆检测磁场后进行制导。例如,美国内华达州汽车测试中心在1996年使用电缆对无人驾驶卡车进行了自动控制试验^[54]。通电线路一次铺设后难以更改线路,并且维护困难,因此未广泛应用。磁导航是指在路面内部嵌入磁道钉或磁条,车辆获取磁场信号后计算位置偏差进行导航。美国PATH课题组在智能公路系统建设中将磁道钉嵌入路面,并在车辆中安装三维磁通门传感器实现车辆导航^[55-56]。此外,国内部分学者尝试在沥青混合料中加入磁粉末开发数字化沥青路面^[57],可对公里数、车道号和交通标志等信息进行编码,但由于路面材料的不均匀性,存在磁化介质干扰和磁化不均等问题。射频识别(RFID)技术是一种非接触式的识别技术,近年来被应用于智慧驾驶车辆的定位导航,但是在实际应用中存在定位精度低、硬件设备受限等问题。

2.2.4 绿色可持续技术

绿色发展是智慧建设的目标,智慧是绿色发展的保障,绿色可持续路面技术是智慧道路基础设施的重要内容。在公路建设中合理利用工业废弃物可减少固体废弃物对环境的破坏,并节约施工成本。在路面建设中应用较多的固体废弃物包括尾矿、炉渣、粉煤灰、冶炼废渣、废石膏等。

目前旧水泥路面提质升级的重要方式为加铺沥青混合料面层。旧水泥混凝土面板存在接缝,行车荷载、温度应力和复合疲劳应力作用产生的不协调应变导致沥青面层出现反射裂缝,严重降低改造路面的使用寿命^[58-60]。相关研究表明,对水泥混凝土路面进行共振碎石化(见图13)处理是防治反射裂缝最有效的方法^[61]。

2.3 新型道路设计

在道路的物理特性方面,道路的几何线形和路面结构都是基于人类的心理生理特性和驾驶习惯进行设计的,智慧驾驶车辆的传感设备和控制系统与人工驾驶车辆不同,因此对道路基础设施在物理层面的设计提出了新的要求。

2.3.1 道路几何线形与路表特性

道路设计主要包括道路线形、视线距离、限速、路表摩擦、横截面等,目前主要基于驾驶员、车辆物

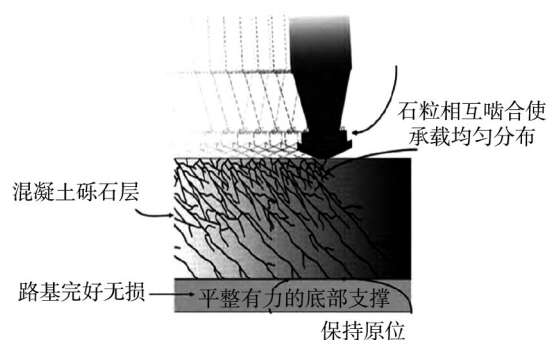


图13 共振碎石化技术

Fig.13 Resonance crushing technology

理性能和舒适性3个因素进行设计。智慧驾驶车辆的出现可能对道路运输的设计、管理与运营产生较大影响^[62],在进行智慧驾驶专用车道设计时,一些基于驾驶员特性的道路设计概念将失去意义而被修改^[63]。

2.3.1.1 基于智慧驾驶车辆的道路水平曲线设计

(1)切线与曲线长度。最小和最大路线长度主要基于驾驶特性进行设计,而在智慧驾驶中,切线和曲线长度不会影响驾驶特性,并且不需要通过限制切线长度来防止疲劳驾驶。

(2)圆曲线半径。最小圆曲线半径是保证汽车在设置超高的曲线部分行驶时产生的离心力不超过轮胎和路面的摩阻力允许的界限并使乘客感觉良好而计算的半径,是基于车辆物理特性进行设计的,因此在智慧驾驶背景下的设计依然有效。由于智慧驾驶车辆可通过V2I或高精度数字地图等技术提前获取道路曲线、超高和路表抗滑信息等,并生成建议驾驶速度,因此圆曲线处的设计速度将失去意义^[64]。

(3)缓和曲线。对于车辆的物理特性,过渡曲线可使道路曲率、超高和加宽连续变化,便于车辆驾驶;对于乘客,缓和曲线有利于横向加速度连续变化,保证乘客舒适度。因此,缓和曲线设计仍会出现在基于智慧驾驶车辆的道路设计中^[63]。

(4)道路一致性设计。道路的几何特征与驾驶速度的一致性设计主要是针对驾驶员特征进行的,智慧驾驶车辆的车路通信技术可取代驾驶员期望,因此基于智慧驾驶车辆的道路一致性设计对道路要素不会有严格要求,但基于舒适性的道路一致性设计仍有必要。

2.3.1.2 基于智慧驾驶车辆的道路竖曲线设计

(1)坡度。坡度设计需一方面考虑路面排水,另一方面考虑车辆驾驶舒适度。智慧驾驶车辆在坡度较大时仍会受到上坡阻力,但智慧驾驶车辆可以预

测斜坡终点,合理设置制动力或牵引力,保证驾驶安全和舒适度。

(2)竖曲线半径。基于乘客舒适性的最小竖曲线半径的设计方法仍适用于智慧驾驶车辆,相较于人工驾驶车辆,智慧驾驶车辆收集环境信息的雷达和传感设备将极大地拓宽视线距离,保证竖曲线半径较小情况下的车辆驾驶安全性^[65-66]。

(3)垂直和水平曲线对齐的一致性。传统的竖曲线和平曲线的一致性主要是为了满足视觉和心理的连续性和舒适性,而智慧驾驶车辆的车道保持、转向和定位系统将取代驾驶员操作,因此平纵曲线设计的一致性原则将不被需要。

2.3.1.3 路表抗滑性

传统车辆难以获得真实的路表抗滑性数据,智慧驾驶车辆通过传感器或加速度测量计等可实现对道路摩擦力的估计。道路检测车或智慧驾驶车辆在行驶过程中获得的道路实际摩擦数据可通过V2I技术传给路侧单元,路侧单元根据路面抗滑性为车辆推荐驾驶速度,保证驾驶安全性。

2.3.1.4 道路宽度

智慧驾驶车辆将具有更加精确的定位能力,一些专家指出,当所有车辆均为自动和联网时,有关道路宽度的标准可以降低。

2.3.2 新型路面结构设计

在未来智慧驾驶车辆大量普及的背景下,道路交通密度、车速和轮迹分布等的变化会对路面结构性能,尤其是车辙病害产生不同的影响^[67]。由于环境感知能力的增加和自动制动技术的应用,智慧驾驶车辆与其他车辆的安全距离大大缩短,导致道路通行能力增加,因此加速道路破坏。智慧驾驶技术的横向控制能力比普通车辆更加精确,横向偏移的减小造成渠化交通,将加速车辙病害的产生。车辆的精确定位在未来有可能减少车道宽度,但是上述因素会加速路面病害的产生^[68],因此车道宽度不可过度缩小^[69]。为避免智慧驾驶车辆普及对路面的不利影响,未来一方面可以使用具有更高刚度和抗变形能力的路面材料^[70],另一方面可以主动控制车辆的轮迹分布,以更均匀的轮迹分布延缓路面损害的产生。

2.4 智慧建造技术

未来智慧道路基础设施内部将埋设大量的通信元件、传感器和网络设备等,以配合智能车辆实现车路协同等功能。目前智慧路面的建造方式主要是在路面中钻孔、开挖后放置元件^[71]或设计新的路面结

构,预留空间放置设备后进行浇筑^[72]。传统的现场拌和使用和摊铺、碾压等施工工艺会对嵌入的元件造成极大威胁。基于上述问题,工厂中的预制式路面技术以及智能压实、建筑信息模型(BIM)和3D打印技术等^[73]可以提高智慧化路面的施工效率。对于道路建设管理部门,智慧建造技术有助于提高施工效率和质量,实现路面的标准化施工和精细化管理。

2.4.1 预制式路面技术

预制式路面技术是研究人员对路面工业化制造的探索,该研究主要集中在地毯式沥青路面技术和预制化拼装水泥路面技术^[46]。荷兰在1996年启动的Roads to the future研究计划^[74]中开发了卷曲路面材料和相应的摊铺设备。Wang等^[75]利用短纤维织物增强水泥材料开发可卷曲路面。Yang等^[76]通过在路面中部加入聚氨酯保证路面材料在卷曲过程中不出现开裂病害,实现路面材料的卷曲性。总体上,可卷曲路面铺装技术目前难以实际应用,仅处于理论研究和室内试验阶段。

2.4.2 BIM技术

BIM近年来在交通基础设施领域得到应用,成为智慧建造的新方向。沈照庆等^[77]分别探讨了BIM技术在公路勘察设计和道路改扩建过程中的具体应用。BIM技术可应用于智慧路面的规划、设计、施工和运营维护阶段,实现全生命周期服务。BIM技术作为项目的信息集成中心,可与无人机信息采集系统、传感监测技术、云计算和激光扫描技术等结合,获取大量的数字化信息,并搭建有效的沟通渠道^[78-79]。

2.4.3 智能压实技术

智能压实技术是指使用具有现场实时测试与反馈系统的振动压路机对路基、基层或沥青层等进行压实^[46]。智能压实技术可对压实道次、轧辊参数(激振力振幅和频率)等压实信息进行动态记录和显示。智能压实质量的评价指标主要有加速度幅值、谐波比、压实测量值(CMV)、压实控制值(CCV)、机械驱动功率(MDP)^[80]。目前的研究多以路基为主,与沥青层相关的压实理论有所欠缺;部分压实状态指标的提出缺乏理论支撑,同时亟需建立基于压实状态指标的压实标准;具有压实参数高精实时调节系统的压路机仍有待进一步开发。

2.4.4 3D打印技术

目前3D打印技术主要应用于路面裂缝修补和粗集料打印等方面。Jackson等^[81]解决了沥青3D打印过程中的挤出问题,用于修复路面裂缝,而且3D

打印沥青的延性优于热浇筑沥青。Yeon等^[82]使用三维摄影和3D打印技术预制混凝土修补块,缩短了路面病害修补时间。此外,3D打印技术可制备智能路面中的功能元件,Safayet^[83]利用3D打印技术制备压电路面中的晶圆盒,且测量精度高,成本较低。

3 结语

智慧道路是结合通信、感知、定位、材料和系统工程的未来高新技术的综合体。系统梳理了国内外在智慧公路和智慧高速项目方面的典型案例和技术手段,并将未来道路基础设施技术分为感知通信、综合服务、物理设施和智慧建造四大关键技术,给出了智慧基础设施建设的完整框架,对未来智慧道路建设具有重要意义。

经历了近半个世纪的探索,智慧道路建设仍处于概念设计阶段,国内外在智慧道路建设方面主要侧重于通信技术或计算技术方面的应用,对道路材料自身的智慧化以及道路性能的数字化研究较少。全面总结智慧路面材料以及路面检测技术,对未来智慧道路建设中的路面材料和检测技术的发展具有指导意义。

本研究仅局限于智慧道路设施建设具体工程技术,未涉及智慧道路设施规划领域。未来智慧道路的建设不仅要突破材料技术和信息技术等的发展瓶颈,还要克服法律、社会和环境等多方面问题。在未来较长的一段时间内,道路上将仍然为“智慧驾驶”和“传统驾驶”的混合交通。因此,不能简单地按照“智慧驾驶”的技术特征改变既有的道路几何和结构设计标准。目前国内外在智慧道路基础设施建设方面的思路 and 标准尚不统一,应加强国际间和行业间的合作,推动智慧道路基础设施的快速发展。

作者贡献声明:

文 龙:原始数据的采集和处理。
刘思铨:撰写论文初稿并修改完善。
芮润华:确定整体的研究思路和方法。
李晓赫:负责原始数据的采集和处理。

参考文献:

- [1] ABU BAKAR A I, ABAS M A, MUHAMAD SAID M F, *et al.* Synthesis of autonomous vehicle guideline for public road-testing sustainability[J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1456.
- [2] 徐志刚,李金龙,赵祥模,等. 智能公路发展现状与关键技术[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(8): 1.
- [3] 杜豫川,刘成龙,吴荻非,等. 新一代智慧高速公路系统架构设计[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(4): 203.
- [4] DU Yuchuan, LIU Chenglong, WU Difei, *et al.* Framework of the new generation of smart highway[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 203.
- [5] 陈超,吕植勇,付姗姗,等. 国内外车路协同系统发展现状综述[J]. *交通信息与安全*, 2011, 29(1): 102.
- [6] CHEN Chao, LÜ Zhiyong, FU Shanshan, *et al.* Overview of the development in cooperative vehicle-infrastructure system home and abroad[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2011, 29(1): 102.
- [7] 王云鹏. 国内外ITS系统发展的历程和现状[J]. *汽车零部件*, 2012(6): 36.
- [8] WANG Yunpeng. The history and current situation of ITS system development at home and abroad[J]. *Automotive Parts*, 2012(6): 36.
- [9] ADOMAH E, KHODA B A, AHMED M M. Safety impact of connected vehicles on driver behavior in rural work zones under foggy weather conditions[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2021, 2676(3): 88.
- [10] 赵祥模,高赢,徐志刚,等. IntelliWay:变耦合模块化智慧高速公路系统一体化架构及测评体系[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(1): 176.
- [11] ZHAO Xiangmo, GAO Ying, XU Zhigang, *et al.* IntelliWay: an integrated architecture and testing methodology for intelligent highway using varied coupling modularization[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(1): 176.
- [12] GORDON T J, LIDBERG M. Automated driving and autonomous functions on road vehicles[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2015, 53(7): 958.
- [13] SAEED K, ADAMSKI M, KLIMOWICZ A, *et al.* A novel extension for e-Safety initiative based on developed fusion of biometric traits[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 149887.
- [14] TOMÁS V R, PLA CASTELLS M, SAMPER J J, *et al.* Intelligent transport systems harmonisation assessment: use case of some Spanish intelligent transport systems services[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2013, 7(3): 361.
- [15] PETIT J, SHLADOVER S E. Potential cyberattacks on automated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(2): 546.
- [16] ALVERT S C, KLUNDER G, STEENDIJK J L L, *et al.* The impact and potential of cooperative and automated driving for intelligent traffic signal corridors: a field-operational-test and simulation experiment[J]. *Case Studies on Transport Policy*, 2020, 8(3): 901.
- [17] 岑晏青,宋向辉,王东柱,等. 智慧高速公路技术体系构建[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(7): 111.
- [18] CEN Yanqing, SONG Xianghui, WANG Dongzhu, *et al.* Establishment of technology system of smart expressway[J].

- Highway Transportation Technology, 2020, 37(7): 111.
- [14] JO M J, KIM Y G, KIM C D, *et al.* Research on secure communication through RSU-based group key [J]. Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, 2017, 41(9): 890.
- [15] 唐小军, 章立辉, 兰凤民. 以京雄、延崇高速公路为例谈智慧高速公路的发展对策[J]. 公路, 2022, 67(4): 250.
TANG Xiaojun, ZHANG Lihui, LAN Fengmin. Discussions on the development strategy of smart expressway based on the Beijing-Xiong'an and Yanqing-Chongli Expressway [J]. Highway, 2022, 67(4): 250.
- [16] TANG Z Y, HE J H, FLANAGAN S K, *et al.* Cooperative connected smart road infrastructure and autonomous vehicles for safe driving[C]//2021 IEEE 29th International Conference on Network Protocols. Dallas: IEEE, 2021: 1-6.
- [17] TSUKADA M, OI T, KITAZAWA M, *et al.* Networked roadside perception units for autonomous driving [J]. Sensors, 2020, 20(18): 5320.
- [18] 何永明, 权聪, 魏堃, 等. 超高速公路车路协同路侧单元感知融合方法研究[J/OL]. 吉林大学学报(工学版). [2023-04-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//22.1341.T.20230117.2004.008.html>.
HE Yongming, QUAN Cong, WEI Kun, *et al.* Research on perceptual fusion method of vehicle road cooperation roadside unit in superhighway [J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition). [2023-04-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//22.1341.T.20230117.2004.008.html>.
- [19] LUO W, LIU L, LI L. Measuring rutting dimension and lateral position using 3D line scanning laser and inertial measuring unit [J]. Automation in Construction, 2020, 111: 103056.
- [20] 吕润华, 徐粒, 彭慧婷, 等. 三维线激光国际平整度指数计算原理及测试评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(11): 1316.
GUO Runhua, XU Li, PENG Huiting, *et al.* Pavement roughness index measurements with a 3D line laser [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(11): 1316.
- [21] CHEN J, HUANG X, ZHENG B, *et al.* Real-time identification system of asphalt pavement texture based on the close-range photogrammetry [J]. Construction & Building Materials, 2019, 226: 910.
- [22] 黄晓明, 蒋永茂, 郑彬双, 等. 基于路表摩擦特性的无人驾驶车辆安全制动原理与方法[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3328.
HUANG Xiaoming, JIANG Yongmao, ZHENG Binshuang, *et al.* Theory and methodology on safety braking of autonomous vehicles based on the friction characteristic of road surface [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30): 3328.
- [23] GUO R, YU Z, ZHOU YJ. Development and preliminary evaluation of a varying-speed road profiler [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2019, 48(5): 3479.
- [24] 徐粒, 吕润华, 彭慧婷, 等. 三维激光断面仪调查系统工作原理及其应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(10): 1202.
XU Li, GUO Runhua, PENG Huiting, *et al.* Three-dimensional laser profilometer survey system of pavement slip characteristics [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(10): 1202.
- [25] 侯海涛, 邱雄, 范洪祥, 等. 基于机器人技术的道路病害自动化检测系统应用研究[J]. 科技创新与应用, 2022(3): 1.
HOU Haitao, QIU Xiong, FAN Hongxiang, *et al.* Research on the application of automated road disease detection system based on robot technology [J]. Technology Innovation and Application, 2022(3): 1.
- [26] 卜天翔. 基于无人机遥感的道路设施检测与三维建模可视化管理[D]. 南京: 东南大学, 2020.
BU Tianxiang. Road facilities detection, modeling and visual management based on UAV remote sensing [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [27] GALANIS I, ANAGNOSTOPOULOS I, GURUNATHAN P, *et al.* Environmental-based speed recommendation for future smart cars [J]. Future Internet, 2019, 11(3): 78.
- [28] TABATABAI H, ALJUBOORI M. A novel concrete-based sensor for detection of ice and water on roads and bridges [J]. Sensors, 2017, 17(12): 2912.
- [29] MA J, LI X, SHLADOVER S, *et al.* Freeway speed harmonization [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(1): 78.
- [30] MENINGER S, MUR-MIRANDA J O, AMIRTHARAJAH R, *et al.* Vibration-to-electric energy conversion [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2001, 9(1): 64.
- [31] MITCHESON P D, GREEN T C, YEATMAN E M, *et al.* Architectures for vibration-driven micropower generators [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2004, 13(3): 429.
- [32] 胡恒武, 查旭东, 岑晏青, 等. 太阳能路面研究现状及展望[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 16.
HU Hengwu, ZHA Xudong, CEN Yanqing, *et al.* Research status and prospect of solar pavement [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(1): 16.
- [33] JIANG H, CEN Y, ZHA X, *et al.* Current situation and development trend of solar pavement technology [C]//Destech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences (EPE). Beijing: Destech Publications, 2018: 10-16.
- [34] 谭忆秋, 钟勇, 吕建福, 等. 路面用PZT/沥青压电复合材料的制备及性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 975.
TAN Yiqiu, ZHONG Yong, LÜ Jianfu, *et al.* Preparation and properties of PZT/asphalt piezoelectric composites used on pavement [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(6): 975.
- [35] WANG C, WANG S, GAO Z, *et al.* Applicability evaluation of embedded piezoelectric energy harvester applied in pavement structures [J]. Applied Energy, 2019, 251: 113383.

- [36] WANG S, WANG C H, YU G X, *et al.* Development and performance of a piezoelectric energy conversion structure applied in pavement[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 207: 112571.
- [37] JASIM A, YESNER G, WANG H, *et al.* Laboratory testing and numerical simulation of piezoelectric energy harvester for roadway applications[J]. *Applied Energy*, 2018, 224: 438.
- [38] 李彦伟,陈森,王朝辉,等. 智能发电路面技术现状及发展[J]. *材料导报*, 2015, 29(7): 100.
LI Yanwei, CHEN Sen, WANG Chaohui, *et al.* Status and development of intelligent power generation pavement technology[J]. *Material Introduction*, 2015, 29(7): 100.
- [39] 赵建云,朱冬生,周泽广,等. 温差发电技术的研究进展及现状[J]. *电源技术*, 2010, 34(3): 310.
ZHAO Jianyun, ZHU Dongsheng, ZHOU Zeguang, *et al.* Research progress and current status of temperature gap power generation technology[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2010, 34(3): 310.
- [40] HASEBE M, KAMIKAWA Y, MEIARASHI S. Thermoelectric generators using solar thermal energy in heated road pavement [C]//2006 25th International Conference on Thermoelectrics. Piscataway: IEEE, 2006: 697-700.
- [41] 金娇,李锐,彭梧桐,等. 热电技术在道路工程中应用现状及展望[J]. *市政技术*, 2022, 40(5): 1.
JIN Jiao, LI Rui, PENG Wutong, *et al.* Application and prospect of thermoelectric technology in road engineering[J]. *Municipal Technology*, 2022, 40(5): 1.
- [42] 高岩,郑丹丹,朱坤佳,等. 透水性沥青路面路用性能研究综述[J]. *公路工程*, 2013, 38(4): 29.
GAO Yan, ZHENG Dandan, ZHU Kunjia, *et al.* Performance review of permeable asphalt pavement [J]. *Highway Engineering*, 2013, 38(4): 29.
- [43] 沙爱民,蒋玮. 环保型多孔路面材料设计理念与架构[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(9): 1.
SHA Aimin, JIANG Wei. Design philosophy and architecture of eco-friendly porous pavement materials[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(9): 1.
- [44] 宋志峰,胡成英,马海卫,等. 基于行车安全与舒适性的路面平整度控制技术[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2013, 9(11): 6.
SONG Zhifeng, HU Chengying, MA Haiwei, *et al.* Road smoothness control technology based on driving safety and comfort [J]. *Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition)*, 2013, 9(11): 6.
- [45] 谭忆秋,张驰,徐慧宁,等. 主动除冰雪路面融雪化冰特性及路用性能研究综述[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(4): 1.
TAN Yiqiu, ZHANG Chi, XU Huining, *et al.* Snow melting and deicing characteristics and pavement performance of active deicing and snow melting pavement [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(4): 1.
- [46] 于华洋,马涛,王大为,等. 中国路面工程学术研究综述(2020)[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(10): 1.
YU Huayang, MA Tao, WANG Dawei, *et al.* Review on China's pavement engineering research (2020) [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(10): 1.
- [47] ZHANG Q, YU Y, CHEN W, *et al.* Outdoor experiment of flexible sandwiched graphite-PET sheets based self-snow-thawing pavement[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 122: 10.
- [48] YU J C, HO W, YU J, *et al.* Efficient visible-light-induced photocatalytic disinfection on sulfur-doped nanocrystalline titania [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(4): 1175.
- [49] XIAO F, GUO R, WANG J. Flame retardant and its influence on the performance of asphalt: a review [J]. *Construction & Building Materials*, 2019, 212: 841.
- [50] VORAVANICHA K, LEELACHAO S, SAHASITHIWAT S, *et al.* Natural rubber filled with phosphorescent materials for pavement [C]//Materials Today, Proceedings 17. New York: Elsevier Ltd., 2019: 1971-1976.
- [51] WYNAND J. Development of autoluminescent surfacings for concrete pavements [J]. *Transportation Research Record*, 2008, 2070(1): 22.
- [52] WANG W, SHA A, LU Z, *et al.* Self-luminescent cement-based composite materials: properties and mechanisms [J]. *Construction & Building Materials*, 2021, 269: 121267.
- [53] QIAN G, YU H, GONG X, *et al.* Impact of nano-TiO₂ on the NO₂ degradation and rheological performance of asphalt pavement [J]. *Construction & Building Materials*, 2019, 218: 53.
- [54] 徐海贵. 基于磁阻传感器阵列的车辆自主导航系统研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
XU Haigui. Research on vehicle autonomous guidance system based on magnetic sensor array [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009.
- [55] TAN H S, GULDNER J, CHEN C, *et al.* Changing lanes on automated highways with look-down reference systems [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 1998, 31(1): 67.
- [56] GULDNER J, PATWARDHAN S, TAN H S, *et al.* Coding of road information for automated highways [J]. *Intelligent Transportation Systems Journal*, 1999, 4(3/4): 187.
- [57] LÜ Z, REN F, ZHANG S, *et al.* Sensing mechanism of magnetic asphalt road materials [C]//2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). Piscataway: IEEE, 2018: 983-986.
- [58] 苏卫国,孙浩. 旧水泥混凝土路面直接加铺薄层沥青罩面方案选择分析[J]. *公路工程*, 2015, 40(2): 169.
SU Weiguo, SUN Hao. Scheme selection and analysis of asphalt ultra-thin overlay laying on the old cement concrete pavement directly [J]. *Highway Engineering*, 2015, 40(2): 169.
- [59] 李超华,钱国平,吴东强. 旧水泥混凝土上沥青罩面层温度应力分析[J]. *公路交通技术*, 2004(5): 41.
LI Chaohua, QIAN Guoping, WU Dongqiang. Thermal stress

- analysis of asphalt screen on old cement concrete [J]. *Technology of Highway and Transport*, 2004(5): 41.
- [60] 黄建国, 严圣友. 基于控制反射裂缝的沥青加铺层荷载应力分析与设计[J]. *公路工程*, 2016, 41(6): 126.
HUANG Jianguo, YAN Shengyou. Load stress analysis and design of asphalt overlay based on control reflection crack[J]. *Highway Engineering*, 2016, 41(6): 126.
- [61] 李豪, 张中云, 周启兆, 等. 旧水泥混凝土路面碎石化技术适应性分析[J]. *中外公路*, 2011, 31(2): 75.
LI Hao, ZHANG Zhongyun, ZHOU Qizhao, *et al.* Adaptability analysis of old cement concrete pavement fragmentation technology [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2011, 31(2): 75.
- [62] SHANNON S, CAROLINE R. Envisioning automated vehicles within the built environment: 2020, 2035, and 2050 [C]//*Road Vehicle Automation 2*. Berlin: Springer, 2015: 225-233.
- [63] INTINI P, COLONNA P, BERLOCO N, *et al.* Rethinking the main road design concepts for future automated vehicles native roads[J]. *European Transport*, 2019, 73: 1.
- [64] GEREON M. Lecture notes in mobility[M]. Berlin: Springer, 2017.
- [65] KHOURY J, AMINE K, ABI SAAD R. An initial investigation of the effects of a fully automated vehicle fleet on geometric design [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 2019: 6126408.
- [66] HAYERI Y, HENDRICKSON C, BIEHLER A. Potential impacts of vehicle automation on design, infrastructure and investment decisions: a state dot perspective [C]//*Transportation Research Board 94th Annual Meeting*. Washington DC: Transportation Research Board, 2015: 1-18.
- [67] FENG C, ROMAIN B, NICOLE K. Potential influences on long-term service performance of road infrastructure by automated vehicles [J]. *Transportation Research Record*, 2016, 2550(1): 72.
- [68] LUTIN J M, KORNHAUSER A L, LERNER-LAM E. The revolutionary development of self-driving vehicles and implications for the transportation engineering profession [J]. *ITE Journal*, 2013, 83(7): 28.
- [69] CARSTEN O, KULMALA R. Road transport automation as a societal change agent [C]//*Transportation Research Board 94th Annual Meeting*. Washington DC: Transportation Research Board, 2015: 65-76.
- [70] LIU Y, TIGHT M, SUN Q, *et al.* A systematic review: road infrastructure requirement for connected and autonomous vehicles (CAVs) [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1187(4): 42073.
- [71] EYAL L. Estimating vehicle speed with embedded inertial sensors [J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2014, 46: 300.
- [72] XUE W J, WANG L B, WANG D. A prototype integrated monitoring system for pavement and traffic based on an embedded sensing network [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(3): 1380.
- [73] WANG Linbing, 王含笑, 赵千, 等. 智能路面发展与展望[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(4): 50.
WANG Linbing, WANG Hanxiao, ZHAO Qian, *et al.* Development and prospect of intelligent pavement [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(4): 50.
- [74] LING S, YU F, SUN D, *et al.* A comprehensive review of tire-pavement noise: generation mechanism, measurement methods, and quiet asphalt pavement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 287: 125056.
- [75] WANG D, SCHACHT A, CHEN X, *et al.* Innovative treatment to winter distresses using a prefabricated rollable pavement based on a textile-reinforced concrete [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(1): C4014008.
- [76] YANG J, ZHU X, LI L, *et al.* Prefabricated flexible conductive composite overlay for active deicing and snow melting [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(11): 04018283.
- [77] 沈照庆, 魏鹏飞, 董朝辉, 等. 基于 BIM 技术的道路改扩建研究与应用[J]. *长安大学学报(社会科学版)*, 2017, 19(6): 43.
SHEN Zhaoqing, WEI Pengfei, DONG Chaohui, *et al.* Research on application of road reconstruction based on BIM technology [J]. *Journal of Chang'an University (Social Science Edition)*, 2017, 19(6): 43.
- [78] COSTIN A, ADIBFAR A, HU H, *et al.* Building information modeling (BIM) for transportation infrastructure: literature review, applications, challenges, and recommendations [J]. *Automation in Construction*, 2018, 94: 257.
- [79] KEVIN K H, MANI G. Potential of big visual data and building information modeling for construction performance analytics: an exploratory study [J]. *Automation in Construction*, 2017, 73: 184.
- [80] MA Y, CHEN F, MA T, *et al.* Intelligent compaction: an improved quality monitoring and control of asphalt pavement construction technology [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(9): 1.
- [81] JACKSON R J, WOJCIK A, MIODOWNIK M. 3D printing of asphalt and its effect on mechanical properties [J]. *Materials & Design*, 2018, 160: 468.
- [82] YEON J, KANG J, YAN W. Spall damage repair using 3D printing technology [J]. *Automation in Construction*, 2018, 89: 266.
- [83] SAFAYET A. Designing and testing 3-D printed wafer-box with embedded PZT sensors to identify the shape effect on energy harvesting [D]. Statesboro: Georgia Southern University, 2018.