

自动驾驶背景下智能路面研发进展

吕润华, 刘思铨, 周晶

清华大学土木工程系, 北京 100084

摘要 综述了自动驾驶背景下智能路面的研究进展和发展趋势。介绍了智能路面为实现与AVs协同交互所需具备的3项关键技术: 自导航技术通过在路面中嵌入车辆导航标志为AVs提供位置信息; 自感知技术通过对道路气象信息和交通流信息的感知和分析, 为AVs推荐安全车速, 减少交通事故; 自充电技术在解决充电系统可行性的基础上, 需研究高透波率和导热路面材料以及新型复合路面结构。总结了智能路面为保证精细化施工和嵌入式元件的使用寿命而采用的预制式路面技术、BIM和3D打印3项先进建造技术。并指出除关键技术问题, 智能路面的推广还面临社会、经济、法律和环境等非技术问题。

关键词 自动驾驶; 智能路面; 自导航; 自感知; 车辆自充电

随着定位导航技术、传感器、通信和雷达等技术的发展^[1], 具备智能化、网联化、共享化和电动化特征的自动驾驶车辆(autonomous vehicles, AVs)成为汽车行业发展的主要目标, 为支持AVs的发展, 国内外存在车路协同和单车智能两条路线, 由于单车自动驾驶技术提升难度大、成本高^[2]以及交通环境复杂性增加, 自动驾驶越来越依靠智能交通基础设施的进步^[3], 只有AVs的部分功能让“聪明的路”代替, 才可以降低单车成本, 从空间维度上突破单车智能对周边环境信息获取和应对突发事件能力的局限性, 实现AVs的大规模推广^[4]。这也符合人类交通发展史的规律, 即新的运载工具的发明会带动与之相适应的交通基础设施的发展, 道路是车辆的载体, 道路与车辆的发展呈现出明显的耦合趋

势^[5], 畜力车辆的普及带动了土夯石筑道路的出现, 蒸汽和燃油汽车的诞生推动了现代公路的发展^[6]。AVs与道路基础设施的互动方式将不同于传统机动车辆, AVs的“新四化”特征增强了车路之间的耦合关系, 对道路基础设施体系提出了新要求^[7], 因此在自动驾驶背景下, 未来路面的建设必须充分考虑AVs的发展趋势与功能需求。

Leiva-Padilla等^[7]提出, 为使自动驾驶技术从第3级最终达到第4级, 需要依靠道路基础设施感知交通和路面状况, 辅助车辆定位和导航, 实现车路协同, 包括车路间信息或能量交互, 及其所支撑的信息服务、交通管理以及车辆调度与控制等功能^[8]。Meng等^[9]指出在城市地区, AVs的发展依赖于智能化的道路运输网络和协同互联的基础设施。

收稿日期: 2021-08-02; 修回日期: 2021-09-14

基金项目: 清华大学-丰田联合研究院跨学科专项项目(20203910013)

作者简介: 吕润华, 副教授, 研究方向为路基路面工程、交通基础设施养护管理等, 电子信箱: guorh@tsinghua.edu.cn

引用格式: 吕润华, 刘思铨, 周晶. 自动驾驶背景下智能路面研发进展[J]. 科技导报, 2022, 40(12): 73-89; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.12.007

Pompigna 等^[10]指出未来的智能公路将支持网联车辆实现自动驾驶, AVs 与交通基础设施的互联将提高交通效率和交通安全, 并提出智能道路将具备自监控、自感知、自适应和自供能等功能。Shi^[11]提出为充分利用 AVs 的优势, 实体和数字基础设施应该升级, 促进 AVs 与道路基础设施的合作, 即车辆—基础设施集成(VII), 最终实现减少交通拥堵、减少能源消耗和改善交通安全的目标。为提高道路基础设施的自动化, 增强自动驾驶辅助功能, 国内外对“智慧公路^[12-13]、智能车路协同^[14-15]”或“智慧高速公路”^[5, 16]等智能交通基础设施进行了大量探索, 而路面的智能化是智能交通基础设施的关键技术, 路面作为创新和应用平台, 将通信、传感和供能等技术集成在现有路面中。自动驾驶背景下的智能路面(以下简称智能路面)协同建设旨在通过采用新材料或新型路面结构、功能设计方法, 使路面在承担载荷的基础上, 具备为 AVs 提供车辆导航、信息交换甚至能源供应的功能, 提高 AVs 的环境感知和环境适应能力, 全方位促进 AVs 的普及。

但目前国内外对于智能路面没有统一的定义和架构, 研究主要集中在单一的路面功能或某些特定的技术上, 智能路面不能被认为是单一、独立的服务项目、功能或技术的集合, 就其本质而言, 智能路面是一个将各个项目、功能、技术或设计解决方案整合在一起的系统。许多智能材料和路面功能技术与 AVs 的出行需求并不直接相关, 研究成果和应用现状尚不明确, 缺少对自动驾驶背景下的智能路面系统集成和推广所面临障碍的分析总结。

1 自导航路面技术

AVs 主要依靠前瞻参考系统(look-ahead reference)和非前瞻参考系统(look-down reference)^[17]实现横向控制和自动导航。前瞻参考系统主要指使用全球定位系统(GPS)、雷达、摄像机等进行导航^[18]。基于视觉的车辆导航是利用摄像机检测车道标记进行车道跟踪^[19], 该方法在恶劣天气^[20]或者车道线十分复杂^[21]的情况下会出现偏差。为解决这一问题, AVs 使用 GPS 和三维(3D)路线图^[22]以提

高导航精度, 但 GPS 在隧道、城市建筑物较为密集等区域效果较差, 底层推理算法带来的不确定性导致 3D 路线图导航的安全性较差^[23]。雷达和激光雷达可与上述技术配合^[24], 但只能对道路边界进行分解, 在多车道下效率较低^[25]。基于上述缺陷, 通过在路面中嵌入特殊标记, 为 AVs 提供非前瞻性的路面参考与导航, 不会受天气和地理环境的影响^[26], 主要的方法有电磁导航、永磁体导航、铁磁性路面和射频标签导航等。

1.1 电磁导航

电磁导航技术是通过在路面内部埋置通有交变电流的电缆, 产生磁场(图 1), AVs 通过检测通电导线的磁场, 实现位置和方向定位^[27]。20 世纪 60 年代, 日本机械工程实验室开展自动化公路项目, 在路面下嵌入感应电缆, 车辆前保险杠上安装横向控制线圈传感器, AVs 在测试中车速达 100 km/h^[28]。1996 年, 美国内华达州汽车测试中心 WesTrach 试验场在跑道两边埋设电缆并对电缆通 100 mA 的电流产生磁场, 无人驾驶卡车在实验跑道上以 65 km/h 的速度进行了自动控制实验^[29]。但通电导线交变电流产生的磁场导航存在电流中断的风险, 维护较为困难, 未广泛应用。

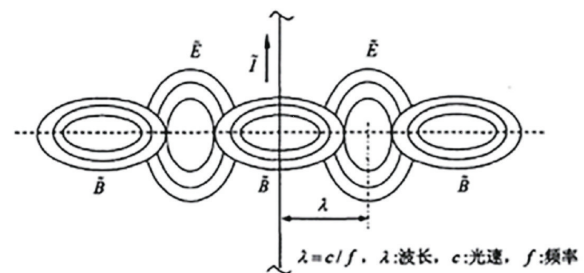


图1 通电长直导线产生磁场

1.2 永磁体导航

磁道钉导航是在路面上纵向按照一定距离铺设磁道钉(图 2), 车辆上安装的磁传感器通过获知车辆与磁道钉的相对位置进行车辆的车道级定位, 车载设备可对车辆偏离状态预警。磁道钉的南北极类似于计算机的 0 和 1, 研究人员将不同极性的磁道钉按照一定规律布设在路面中, 可将道路前方信息, 包括道路曲率、里程标志和出入口等进行二

进制编码。

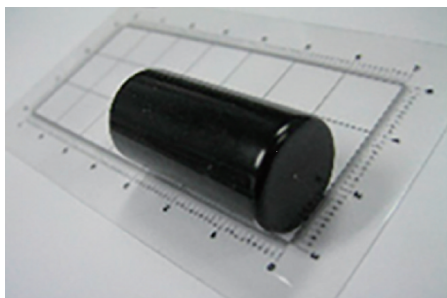


图2 磁道钉示意

日本首先在自动高速公路系统中埋置磁道钉,车辆保险杠上安装磁传感器,测量精度达1 cm^[30]。美国加州大学 PATH 课题组在智能公路系统中埋设陶瓷磁钉和钕制磁钉,使用三维磁通门传感器测量磁钉信号^[31],并详细阐述了磁道钉编码信息的类型和结构,编码和解码方案以及可能的扩展^[32]。葡萄牙英布拉大学在路面中埋设硼铁材料磁钉,车辆前保险杠安装霍尔传感器检测磁钉信号进行导航^[33]。2000年,交通运输部公路科学研究院与武汉理工大学利用磁道钉进行路面编码^[34-35],车辆前保险杠安装5个传感器检测磁场信号,但实际应用时发现,磁导航系统中传感器灵敏度和精度不高、可靠性较差、易受外界干扰^[29]。为解决风雪天气、低能见度条件下的车辆导航,交通运输部公路科学研究院与新疆交通厅公路管理局开发了智能公路磁诱导装置,路面以磁道钉为参照物,引导车辆沿磁道钉布设线行驶^[36]。

磁道钉成本较高,需对路面打孔破坏,而磁带(图3)安装速度快且成本较低,磁带中的磁性粒子含量与磁场强度密切相关^[26],可在路面内部嵌入基础设施信息。美国3M公司于20世纪90年代在自



图3 磁带示意

动扫雪车系统中应用了磁带导航^[37],磁带由50%的硼铁矿材料混合丁腈橡胶复合而成,三维磁传感器测量磁带3个方向的磁场大小,实现车辆的自动导航。

为提高导航的可靠性,日本AHS项目还尝试使用磁钉和磁带混合导航的方式^[29]。在跑道中央埋设磁道钉,车辆前保险杠上安装磁传感器来接收信号;跑道两旁埋设磁带,在车辆两侧安装相应的磁传感器接收信号,车载计算机根据3个传感器信息进行转向控制。

当车辆速度超过20 m/s后,磁导航会失去准确性和可靠性,磁传感器无法感知两车道之间的区域,无法实现车辆变道。为解决上述问题,研究人员在后保险杠上也安装磁传感器,横向控制器可以提供“虚拟前瞻”,提前估算路线变化,保证车辆可以高速行驶^[38],在路面上设置额外标志线,实现基础设施引导下的车辆变道^[39]。由于磁场强度随磁体和传感器之间的距离增大衰减较快,路面中需嵌入密集的磁体,而且铺设后不易更改,导致系统安装成本较高。磁带的磁场强度随距离衰减较快,无法在车道的侧面设置磁带,车道中间设置的磁带在夜间对驾驶员产生视觉干扰^[40],因此磁导航技术尚未大规模实施。

1.3 铁磁性路面

磁道钉等的安装和更换需对已有路面进行钻孔切割,严重破坏路面结构。磁性标记物以钕铁硼为主,属于稀缺资源,成本较高。基于上述问题,吕植勇等^[41]在沥青中加入1%~20%的磁化粉末构成一层1~3 cm可磁化沥青表面层,开发出数字化磁记录沥青路面。将公里数、车道号和交通标志等信息通过磁头按三轴异轨同构的编码方式写入和读取路面的磁信号,然后通过车载磁传感器采集写入路面的数据,获得诱导信息。数字磁化路面具有多种磁化方式,信息量丰富,数字化效率高,磁化材料较为廉价,由于路面不是纯的磁化记录材料,存在磁化介质干扰和磁化不均等问题。Moreno-Navarro等^[42]在沥青混合料中加入不同剂量的铁或钢颗粒研发编码沥青材料。不同含量和类型的金属颗粒形成不同的代码,与路面限速、左右车道等信息

相关联,车载金属探测传感器读取代码,软件解读信号实现车辆导航。该方法不需要对现有路面进行重大改造,只需要将编码的沥青材料铺在旧路表面,而且掺入的金属材料成本较低。铁磁材料存在生锈问题,对路面使用寿命的影响有待进一步研究。研究人员未评价铁磁材料的掺入对路用性能的影响,因此应同时考虑路用性能和编码效果进行材料配合比设计。

1.4 射频识别导航

近年来,利用射频识别(RFID)技术进行AVs定位导航(图4、图5)的新方法被开发^[24]。RFID技术是非接触式的自动识别技术,通过射频信号自动识别目标对象并获取相关数据^[43],RFID标签嵌入路面,车载RFID读取器读取标签存储的精确位置信息^[44]。Baum等^[45]开发出用于车辆导航的路嵌式无源13.56 MHz RFID应答器,使用聚甲基丙烯酸甲酯外壳避免其在气候或车轮荷载作用下破坏。Wang等^[14]提出一种基于RFID的车辆定位方法,当车辆经过RFID标签时,车辆位置由存储在标签中的准确位置给出。在没有RFID覆盖的位置,使用

运动学集成算法从最近的标签位置估计车辆位置,直到从下一个标签更新为止。Mohsen等^[25]在车道标志中嵌入无源平板电磁应答器,在车辆侧面嵌入超频收发器,车辆的横向位置定位精度为3 cm。Walvekar等^[46]在电磁学软件FEKOTM中模拟道路结构,仿真的电子标签嵌入路表3 cm以下,结果表明在沥青或混凝土路面中嵌入的电子标签通信范围为1 m,允许最高车速为200 km/h。Song等^[47]针对隧道中GPS信号弱,无法准确定位等问题引入射频识别技术实现隧道中的初步定位,有源RFID阅读器安装在车辆的顶部,有源RFID标签以固定的位置间隔放置在隧道两侧,可将阅读器的位置视为车辆所在位置,实现车辆定位(图5)。Pochettino等^[48]针对嵌入式无线RFID传感系统寿命短的问题,开发出一种使用电池供电和能量收集的混合动力传感器,并集成可选择性触发的射频触发元件,40 km/h的车速下,触发距离达1 m,标签的使用寿命预计超过20年。

射频标签与永磁体相比,其成本较低,但RFID技术只能显示车辆在采集点的位置信息,不能实时显示车辆的位置,不适合在开阔区域大范围使用,非常适合在GPS定位的盲区等小范围使用^[49]。目前射频技术由于缺乏正确的校准和聚类集成,收集的数据信息较不稳定^[50]。射频标签嵌入路面之后会受到车辆荷载以及路面变形的影响,耐久性有待研究。车辆高速行驶时与射频标签的通信会产生多普勒效应^[26],影响响应时间和通信精度。积水、冰雪覆盖等会影响射频标签的通信范围与响应速率,需要提升特殊条件下的通信能力^[46]。

各类非前瞻导航系统优缺点汇总如表1所示。交通环境复杂和成本问题导致自动驾驶定位与导航路面目前尚未在公路和城市道路中大规模应用。但该系统已被应用于厂房、物流公司、港口和园区等封闭区域^[51-52]中的自动驾驶车辆的引导。相对封闭、高度结构化的环境,极端事件可以预测并被排除,且上述场景规模较小、建设成本较低、适合精细化铺设和管理。目前,非前瞻式参考系统与前瞻式参考系统配合形成的智能组合导航技术越来越受到研究人员的关注。

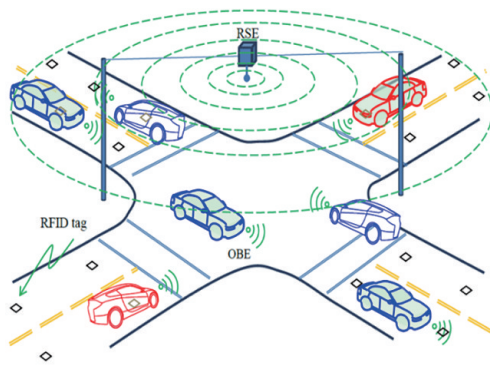


图4 RFID导航示意

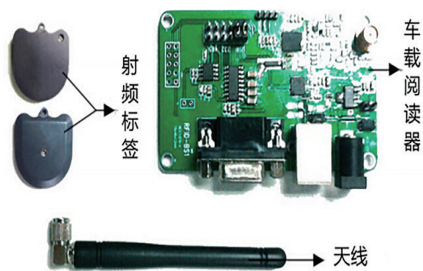


图5 射频标签、车载阅读器和天线实例

表1 非前瞻导航系统优缺点对比

车辆定位与导航方式	优点	缺点	
电磁导航	原理简单,易于操作	电流中断失去导航效果且维护困难;铺设电缆的费用较高	
永 磁 体 导 航	磁道钉	可实现对道路信息的二进制编码;可靠性和鲁棒性强	需要安装密集的磁体,系统成本高;车载磁传感器昂贵,安装高度低,不利于车辆室外运行
	磁带	安装速度快,成本低;磁带可嵌入道路信息	磁场强度较低,使用寿命较短,维护困难;磁带在夜间产生视觉干扰
	磁道钉与磁带混合	导航可靠性强	系统安装成本较高
	铁磁性路面	成本低,避免路面破坏	导航精度较低
射频标签导航	成本较磁导航系统低	标签无法实时显示车辆位置;车辆高速行驶影响通信效果;积水和冰雪覆盖影响通信能力	

2 自动感知路面技术

AVs纵向速度控制的目标是在确保安全的前提下,以最短的时间到达目的地^[53]。随着车辆基础设施互联系统(V2I)技术的发展,基础设施可以在对路况和交通信息进行收集与分析后,将推荐车速反馈给车辆^[54]。速度协调策略、车路协同和自动驾驶技术的配合可显著提高交通流量性能,减少AVs低普及率(10%左右)下的交通拥堵和事故率^[55]。路嵌式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^[56],为AVs创造更准确的道路交通环境感知,结合多个异构来源的信息,向AVs提供推荐速度或危险警示^[57],保证交通流协调运行。

2.1 道路气象自感知

作为道路气象^[11]的一部分,路面积水、积雪和结冰等会降低胎路摩擦系数,引起交通事故。路嵌式道路气象状态传感器可实现对路面湿滑状况的自感知,并通过V2I技术将限速警告发送给车辆,

AVs通过车载计算机控制系统自动减至安全速度通过湿滑路面^[58],Tabatabai等^[59]提出一种圆柱形混凝土路面气象状况自感知传感器,水分和冰层厚度的不同引起电阻变化,进而判断路面干湿与冰冻情况,传感器可通过无线方式将危险区域的位置信息传达给AVs,警告路面结冰和雨雪情况。陆凯旋等^[60]通过在路面内部布设智能道钉,当检测到路面积水积雪、黑冰等状态时,内置的LED灯会闪烁红灯对车辆进行警示。目前路嵌式道路气象状态传感器主要有多频电容测量传感器、盐度测量传感器、光反射式传感器、电导传感器、回波测量传感器、谐振测量传感器等^[61]。

2.2 交通信息自感知

由于安全^[62]和技术等因素,AVs的全面普及需要50年甚至更长时间^[63],这意味着AVs将长期与传统车辆共享道路,不同级别AVs的混合场景下的协调运行将成为未来交通的重要挑战。交通信息自感知路面通过嵌入式传感器(图6)检测交通流信息,为AVs推荐行驶速度和安全的车辆跟随距离,

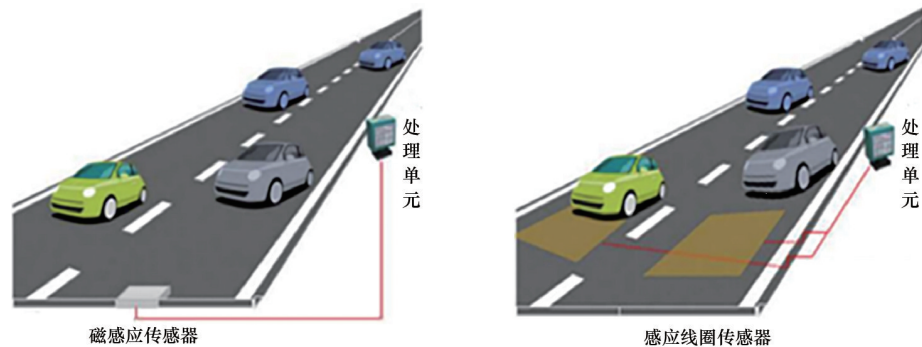


图6 路面嵌入式传感器示意

当系统检测到 AVs 行驶速度和与前车距离超过计算的安全范围时发出警告信号,保证车辆协调运行以及驾驶安全,且与人工驾驶相比,AVs 由更精准、快速反应的计算机控制,可根据实时信息直接控制车辆,对推荐速度的执行力更强^[64]。目前常用的路嵌式交通信息监测传感器包括气动道路管、环形线圈传感器、磁感应传感器、地磁传感器、光纤传感器、振动加速度传感器、压电式传感器等。

为解决路嵌式交通信息传感器布设复杂、维护费用高、与路面不相容和使用寿命短等缺陷,国内外研究人员提出自感知混凝土路面材料。Shi 等^[65]在水泥混凝土中加入碳纤维,利用碳纤维复合水泥混凝土在不同荷载作用下的电阻率变化实现交通监测和对车辆进行称重。韦文兵等^[66]研究了碳纤维掺量、加载方向对碳纤维混凝土机敏性的影响,提出了交通测速、交通称重的工作原理与方案。韩宝国等^[67-68]使用碳纳米管、镍粉等制备水泥基自感知路面用于车辆检测、称重和车速测量等,发现镍粉水泥基自感知路面具有较高的灵敏度。龚学进等^[69]分别制备碳纤维、炭黑、石墨复合导电相水泥基复合材料本征传感器件和长连续碳纤维树脂基复合材料本征传感器件,发现后者在道路交通中的越线违规监测实验可以准确的测试动载响应。Monteiro 等^[70]开发出一种负载炭黑水泥基复合自感知路面,平均压敏系数在 48~52,具有良好的、可逆的压敏性能,且材料成本较低。

2.3 传感器路域自供电

为解决电池寿命与长期监控之间的矛盾^[71],路面嵌入式传感器朝着无线、自供电和多功能的方向发展^[56]。目前微机电系统(MEMS)器件的功耗仅为微安至毫安级,使采集环境能量为其供能成为可能^[72]。传感器埋置在道路内部,无法使用太阳能供电^[73]。Rhim 等^[74]提出使用无线传感技术和射频(RF)能量为埋入沥青路面的传感器供电,以传输路面结构数据来诊断道路健康状况。Guo 等^[75]将无线信息和功率传输技术应用于路面协作式集群无线传感器网络,能量受限的中继节点收集环境 RF 信号,将数据包从源转发到目的地。然而,RF 能量的使用需要车载 RF 读取器来为电源模块提供能

量,且 RF 能量接收天线尺寸较大并且不便于掩埋^[71]。翟英博等^[73]选用热电优值系数(ZT)较高的 Bi_2Te_3 作为热发电材料,采用 DC-DC 转换器将温差发电片产生的尖峰直流电转换为满足传感器节点供电需求的平稳直流电。使用温差发电可减缓高温天气下沥青路面塑性变形,减轻城市热岛效应^[76],可实现全天候发电,为无线传感节点提供稳定的能量^[77],但路基温差的需要、设计安装的困难以及道路行为的影响,使得热电技术极为困难^[78],甚至影响道路铺设和道路寿命^[79]。

沥青路面压电能量采集技术虽然收集的能量有限,但适用于为功率较小的路嵌式传感器供电^[80],是路面传感器自供能技术是较为理想的方案^[79-81]。Xiao 等^[71]集成了一种基于压电技术的路面自供电无线传感系统,可为微处理器提供稳定的 3.3 V 工作电压。Moure 等^[82]用压电传感器在沥青路面上进行了压电测试,在 100 m 的道路可获得 40~50 MWh/m² 的能量密度。Cho 等^[78]使用铝板、钢板和聚丙烯棒开发了一种新型的道路兼容压电能量采集器,在韩国安东某道路进行试点安装,发电模块在车速为 50 km/h 时输出电压为 272 V,输出功率为 23.81 W/m²。在高速公路休息区可为 LED 指示灯供电,并将泄漏、温度和应变传感器的测量数据实时传输到云存储中,具有较高的实用价值。Hasni 等^[77]基于压电换能器与超低功耗浮动栅阵列计算电路的集成,开发出一种新型的基于压电的自供电无线传感系统。使用聚偏二氟乙烯压电薄膜从路面结构中获取应变能,记录在传感器上的信息可以使用 RF 技术读取。Hou 等^[83]采用压电能量采集技术为加速度传感器和射频通信提供电能。压电悬臂振动能量采集系统的功率可达 1.68 mW。Manosalvas-Paredes 等^[84]使用环氧树脂对聚偏氟乙烯薄膜压电传感器进行封装,在法国运输发展和网络科学技术研究所进行 3 个月的加速路面实验(APT),该传感器表现出良好的工作性能。Ji 等^[85]选择锆钛酸铅压电陶瓷(PZT)和聚偏氟乙烯制备 PZT/PVDF 复合圆柱形压电振子,并使用环氧树脂封装,制备自供电损伤检测骨料(SPA),一次性负载下 SPA 获得的电压为 75.0 V,压电能量为 4.31

μJ 。Homami^[86]开发出具有传感、处理、无线通信和微型发电能力智能路面材料(SPM)。SPM支持应用程序的功能取决于电源或其微型电源模块。可用于路面管理和交通监控系统,微型发电机的最大功率为 $345\ \mu\text{W}$,所需的最小发电量为 $50\ \mu\text{W}$ 。

压电传感器具有系统简单、埋置方便、对路面结构破坏和影响较小等优点,既可作为传感器,又可作为供电手段^[74],但目前使用的压电陶瓷材质较脆,埋置在路面中容易损坏,并且道路上的车辆负载具有随机不确定因素,车辆的大小和数量决定产生能量的多少,导致控制采集能量比较困难^[73]。上述技术虽未大规模应用,但在没有电力供应的实际道路上,传感器监测和自供能系统被认为是自动驾驶技术的一个方面,是必要的的数据收集技术^[71],可很好地融入V2I应用框架,有利于下一代自动驾驶汽车的发展。

3 自充电路面技术

自动驾驶技术与电动汽车技术可以产生天然的协同效应^[87],可减少能源消耗和温室气体排放^[88],改善城市环境,提高交通效率以及乘客舒适度,因此电动汽车(EVs)是AVs普及的先决条件^[89],AVs途中加油和充电均可实现自动化操作,但EVs可实现无线充电,因此AVs的驱动平台最有可能是EVs,因此目前AVs多以EVs的形式制造^[90]。但EVs推广的障碍之一是“里程焦虑”问题,即用户担心在EVs直接行驶里程内无法找到充电设施^[91]。EVs动态无线充电是指通过埋设在路面下方的无线电能传输设备为行进中的车辆实时连续供电(图7),实现“边行驶,边充电”功能,可减少车载电池体积和质量^[13],解决导线充电和静态充电方式充电时间长等问题^[92],提高EVs续航能力^[93]。新西兰奥克兰大学、日本东京大学、美国橡树岭国家实验室^[94]、欧盟FABRIC项目^[95]、韩国高等科学技术学院以及国内重庆大学和东南大学^[94]等研究团队已经对电动汽车动态充电的相关技术难点以及关键问题展开了一系列研究,但主要关注充电系统的可行性评估,对路面材料和结构要求方面的研究较少。

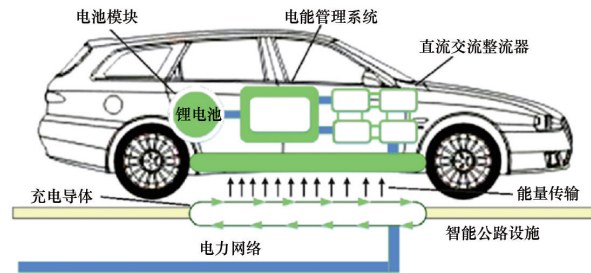


图7 车辆动态自充电路面示意

3.1 动态自充电路面材料要求

沥青和水泥路面材料在磁场中被磁化后产生的感应磁场会影响无线充电的原有磁场,造成电能传输的损失^[96]。为避免传统路面对无线充电的干扰,韩国OLEV系统建议使用大型塑料外壳将线圈与周围的地面材料隔离后,将充电单元嵌入路面^[97]。西班牙的CIRCE研究所建议将线圈结构安装在远离任何周围材料的专用检修孔中^[98]。美国SELECT研究中心选用不具任何电磁效应的非金属板对线圈进行覆盖^[99]。上述方案有助于原型设计和无线充电测试,但不满足路面机械响应和结构、安全要求,且成本较高。

李峰等^[96]使用振动样品磁强计对AC-13沥青混凝土和C30普通硅酸盐水泥混凝土进行定量分析,采用LCR测试仪测量感应耦合系数,搭建了87 kHz的无线电能传输系统研究能量损失效应。Chen等^[100]提出沥青路面材料的功率损耗低于水泥混凝土,无线充电能量传输功率损耗很大程度上取决于系统的工作频率和磁通密度的幅度。路面材料的介电性能还会受到材料老化、开裂以及积雪积水、冰冻的影响。结果表明:两种路面材料均造成较大的能量损失,而且沥青混凝土的不连续性所导致的原边功率下降更大。综上可知,降低路面材料的介电损耗、提高透波率是提升无线充电路面电能传输效率的关键技术,由于 SiO_2 具有良好的介电性能,可选择 SiO_2 含量较高的石英类和陶瓷类材料^[101]替代部分集料制备路面材料,提高无线充电效率。

充电元件与周围路面材料热传导系数不连续性导致的温度应力有导致混凝土开裂的风险^[102]以及导热率低出现局部发热导致充电元件老化等问

题。Amirpour 等^[103]指出动态自充电路面在运行过程中的功率损耗会引起温度局部升高,导致材料退化,产生设备组件故障。Barnes 等^[104]制作了添加相变材料(PCM)和未添加 PCM 的动态自充电路面,埋设温度传感器监测线圈模块在工作中的热行为,试验发现:温度集中于充电元件顶部,使用相变材料可以有效降低路面的温度,增加系统的热响应时间。Varghese 等^[105]指出线圈在高频磁场下,由于涡流和铁芯损耗会局部放热,引起温度梯度,降低导热效率,导致混凝土开裂和结构破坏。建议一方面使用非金属玻璃纤维代替钢筋以减少损失,另一方面使用 PCM 进行被动热管理。Chen 等^[106]提出气候温度变化会引起充电设备的收缩和内部膨胀,需加强对路面的温度监测,以便采取预防性措施。综上,为解决自充电路面的热传导问题,可改变路面材料配比,使路面材料与充电设备的热学性能尽量接近,使用相变材料调整路面温度,开发导热型路面使热量迅速传导散失,减少热应力和温度积聚对充电设备和路面造成的破坏。在易发生温度集中的部位埋设温度传感器,实时监测并及时采取措施。

3.2 动态自充电路面结构要求

由于路面内部嵌入充电元件,动态自充电路面是一种复合多功能路面结构^[106],不能用简单的多层弹性理论进行建模分析^[107],其荷载响应不仅与传统路面不同,而且会受到充电元件不利影响^[107],充电元件附近的路面材料应力集中会加速车辙病害^[107]。为保证无线电能传输效率,充电元件之上路面材料的最佳厚度为 4 cm^[108],车辆重载或制动力会在路面薄面层中产生较大的应力,导致路面损坏。

基于上述问题,德国 Bombardier 公司^[109]使用特殊混凝土开发一种预制式水泥混凝土充电路面并在 Nantes 的 IFSTTAR 进行了加速路面测试。发现充电模块与路面材料可保持良好的变形连续性,路面边缘挠度较大。由于混凝土覆盖层厚度只有 4 cm 左右,充电模块上部和板端混凝土出现少数裂缝,但未出现疲劳破坏。Chen 等^[106]提出,一方面可借鉴半刚性路面中防止反射裂缝以及桥梁沥青塞等方法,在充电模块和路面材料之间使用具备应力

释放能力的材料防止接缝处的开裂和脱胶损坏,另一方面需要建立结构监测系统,在路面结构出现问题之前采取措施。Ceravolo 等^[107]对动态自充电沥青路面进行建模仿真后发现,在车辆荷载反复作用下,沥青路面材料与充电元件出现间隙,但由于充电元件的约束作用,无线充电路面的抗疲劳开裂性能优于传统路面。Flander'DRIVE 项目中^[110]使用落锤式挠度计(FWD)对无线充电路面进行了无损挠度测试,结果表明路面材料与充电模块之间的荷载传递效率为 91%,由于未使用金属销钉,接缝处的荷载传递效率较低,充电模块与顶部路面材料黏结问题导致上部挠度较大。Ceravolo 等^[111]研究了无线充电路面不同填充方案及其疲劳寿命,发现水泥沥青混凝土和沥青混凝土填充方案之间几乎没有差异,且在充电元件外部的填充材料对路面整体疲劳寿命没有影响。Chabot 等^[112]采用数值模拟方法研究了沥青层中嵌入预制水泥充电元件的力学响应。材料模量差造成路面的不连续性以及材料之间的黏结问题导致动态自充电路面在车辆制动、转向等行为下以及环境条件作用下易出现路面结构破坏。并提出减少预制充电元件与顶层路面材料的模量差可以避免破坏,并建议使用水泥混凝土替代原沥青路面的上面层,形成水泥-沥青反向复合路面结构。综上可知,应缩小充电元件与路面材料的模量差或使用土工织物等应力释放材料,减少应力集中。应注意充电元件与路面材料的黏结问题和填充密实问题,可开发高性能的界面黏结材料,采用预制式路面技术或研发新型路面回填材料,提高充电元件周围混凝土的填充密实度。

4 智能路面建造技术

智能路面内部将埋设大量的通信、传感和电气化设备,目前的建造方式为在现有路面上钻孔、开槽等放置元件后密封^[113]或在新建路面中设计新的路面结构,预留孔道安装元件^[114]。传统的路面施工工艺会对嵌入元件造成很大威胁,采用预制式路面技术同时结合 BIM 和 3D 打印技术等^[56]可以保障智能路面的施工质量。

4.1 预制式路面技术

国内外对于预制式路面的研究主要集中在以沥青基等柔性材料为主的地毯式铺装技术和以水泥基材料为主的预制化拼装技术^[115]。针对可卷曲路面铺装技术,荷兰最早于1996年启动Roads to the future 研究计划^[116],并进行了室外路铺试验,但荷兰对可卷曲路面的研究仍停留在研发阶段,并未大规模应用。Strache等^[117]提出可卷曲路面有利于保证路面生产质量、提高道路性能,通过在可卷曲路面上集成传感器节点网络可实现“智能道路”(图8),是未来道路建设的发展趋势。Wang等^[118]针对德国冬季路面病害问题开发出一种基于短纤维织物增强水泥混凝土的1 cm厚可卷曲路面。董元帅等^[119-120]采用专用粒子改性剂和SBS颗粒对沥青进行改性,开发出可卷曲路面专用改性沥青,对其自愈性能进行评价,同时开发了专用卷曲设备进行路面试铺。Zhou等^[120]通过在路面材料中嵌入柔性聚氨酯板材保证路面材料的可卷曲性,开发出可卷曲融冰除雪路面。代书凝等^[122-123]采用岩沥青、SBS改性沥青、橡胶粉和玄武岩纤维制备可卷曲降噪沥青路面,并使用自制乳化沥青毛毡作为基底增强其可卷曲性能。综上可知,可卷曲路面铺装技术尚属于理论研究和试验阶段,除少数研究人员概念性地提出可卷曲沥青路面的智能化趋势之外,可卷曲铺面材料的研究目前主要停留在力学性能方面。

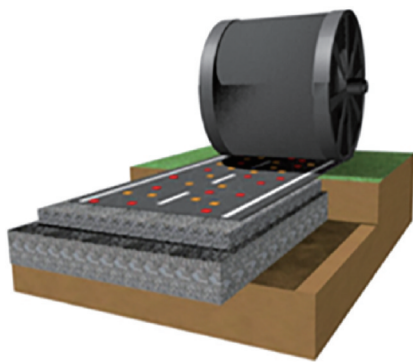


图8 智能可卷曲路面

与地毯式柔性铺面相比,以装配式水泥混凝土路面(PCP)为主的装配式刚性路面无论在本身的结构材料设计还是智能化方面均更为成熟。Vait-

kus等^[124]提出增强型预制混凝土板的先进理念,即混凝土板中内置传感器,具有用于公用设施的内部空间,并可快速与其他设备建立、连接、替换等。科罗拉多州交通运输部^[125]将传感技术与一个模块化的预制铺装系统结合起来,使道路系统变为交通信息触摸板,可跟踪在其上方移动的车辆和交通,并向AVs提供信息。荷兰北部克罗梅尼省^[126]的太阳能自行车道由27个预制混凝土构件组成。Dinh^[127]提出预制式水泥路面(图9)系统是车辆自充电路面的最佳选择,可最大程度地减少对交通干扰,对混凝土进行最佳的质量控制,还可保证充电元件安装位置的精准性以及对电气元件提供良好的保护,并开发了一种用于EVs自充电道路的预制超薄白面层(prest Ultra-Thin whitetop, PUTW)。德国Bombardier公司^[128]采用玻璃纤维增强聚合物(GFRP)进行加筋的预制混凝土板,内含电力供应电缆板,形成电磁感应场,开发出一种新型电动公共交通工具的感应供电系统。比利时Bruges公司的电动汽车感应充电路面项目中使用了预制混凝土板技术^[110],现场施工迅速,混凝土板是在受控环境中预制,系统不同构件的定位偏差得到了更大的控制。

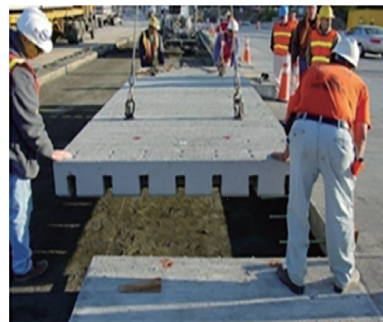


图9 预制式水泥路面

4.2 BIM技术与3D打印技术

BIM在交通基础设施中的应用虽较为缓慢^[129],但在道路设计规划、养护管理以及作为道路智能交通系统设计平台^[130]等的应用已受到研究人员的关注。Tang等^[131]创建了一个基于BIM的道路设计和路面结构分析的集成平台,允许建立三维模型和有限元方法软件ABAQUS之间的转换,提供高质量的

数据和强大的技术支持,最大限度地减少道路设计和养护过程中的不确定性因素。Smarsly等^[132]将工业基础类(IFC)目前的标准拓展到道路智能交通系统(ITS),进而实现了使用BIM对智能道路基础设施进行建模和描述。智能路面属于ITS的一部分,智能路面设备提供的实时交通数据可用于详细分析模型数据,并且可以对基础设施模型进行更多的分析,而可靠的数据是BIM的主要组成部分^[133],预计未来BIM与智能路面数据的融合将成为更具实际意义的课题。BIM技术与预制式路面技术的结合可实现预制构件的标准化设计,减少施工中的人为失误^[134]。BIM技术能够在构件生产制作和预入场、构件的存储管理中发挥较大作用。将BIM技术与RFID结合可实现对构件生产施工全过程的跟踪,提高生产效率,对质量问题及时采取措施^[135]。3D打印技术在路面工程方面多用于路面裂缝和坑槽修补^[136]。Jackson等^[137-138]通过对3D打印挤出机的改进,解决了沥青3D打印过程中挤出困难的问题,并提出该沥青3D打印机可安装在自动驾驶汽车或无人机上,用于修复路面裂缝(图10),且3D打印沥青的力学性能与浇铸沥青不同,在断裂强度相近的情况下,其延性可达浇铸试样的9倍。Yeon等^[139]针对路面裂缝,使用三维摄影和3D打印技术预制混凝土修补块,在可承受较高的剪切强度的同时,路面破损的修补养护时间可从7 d缩短至2 h。3D打印技术可与预制式路面技术结合,提高预制式路面板的生产质量,张守祺等^[140]将活性粉末混凝土与3D打印成型相结合,有限元计算表明该方法可减少路面板自重,提高路面板疲劳寿命与循环利用次数。Wang等^[156]提出在工厂可使用3D打印机精确预制出结构经过拓扑优化的路面板,用于智能路面的现场铺设,但是传统的道路工程材料无法满足3D打印技术的快速成型、单一均匀、细度和强度等要求,需要将3D打印技术与新型路面材料及先进施工工艺相结合,作为路面工程设计、施工的新型技术手段^[141]。3D打印技术不仅可用于路面材料的打印,还可制备智能路面中的功能元件,Safayet^[142]利用3D打印技术打印出不同形状的晶圆盒,通过沥青路面分析仪的车轮载荷测试研究压电路

面中PZT传感器耦合时产生能量的晶圆盒的形状效应,结果表明3D打印机可在短时间内打印晶圆盒,且测量精度高,成本较低。

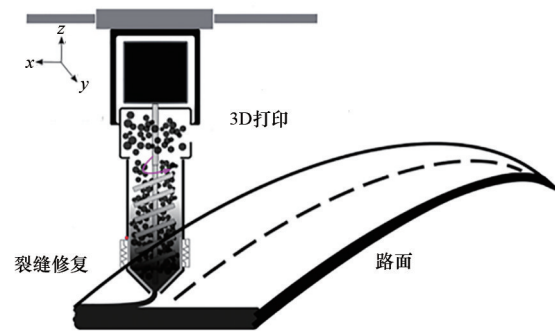


图10 3D打印路面示意

5 智能路面建设非技术性问题

目前没有任何国家或城市建设AVs的专用车道和出台相关规定,除了极少数的应用外,AVs专用车道可行性较低,车路通信设施不仅成本高昂,而且会引起国际互操作性的问题^[143]。Alawadhi等^[144]提出基础设施的更新是一个既耗时又昂贵的过程,而且比车载自动化的发展速度要慢。智能路面是智能公路等基础设施的组成部分,其推广不仅面临技术难点,还面临社会、经济、法律和等非技术问题^[145]。

1) 国家政策。国家政策将决定道路基础设施如何适应和支持AVs。各国政府所制定的引入AVs的计划大部分与AVs系统的测试相关。目前对AVs基础设施需求的研究尚处于起步阶段,针对AVs对道路基础设施的状况及其维护、更新和配置的影响,尤其是基础设施的关键特征需要达到的标准研究较少^[143]。

2) 高昂的成本和市场的确定性。美国AHS项目由于研究资金短缺和美国交通部将重点转移到促进采用短期的、以安全为导向的技术^[146]。智能车辆公路系统的部署需要政府部门、私营企业和消费者的大量投资,后期的操作和维护成本限制了消费者的使用^[147]。由于时间和经济成本过高,独立支持AVs的基础设施是不太可能的。Muller等^[148]指

出V2X只能在车辆全自动化以及所有的道路全部安装V2X设施的前提下才可实现。由于硬件技术很快要面临时代淘汰的命运,智能基础设施的投资风险日趋增大。

3) 潜在的交通和环境问题。美国AHS项目提出道路基础设施自动化可能会对交通和环境产生不利影响^[147],越来越多的车辆可能会重新进入非自动化公路,造成交通拥堵。自动公路系统对公路安全的总体影响尚不确定,在技术水平、成本和安全水平之间尚未权衡。道路基础设施自动化将提高交通运行速度,通勤者可能会居住在离工作地点更远的地方,进而刺激城市扩张和增加对汽车的依赖性,导致高峰时段车辆里程数增加,空气污染和噪音问题更加严重。

4) 社会公平问题。支持自动驾驶的道路基础设施成本高昂,在一定时期内只能被高消费者使用,公共资金不应该只服务于少数高消费者的出行^[149]。如果低收入者无法购买自动驾驶汽车,那么为自动驾驶汽车进行道路设施改造升级启用公共资金便存在不公平问题^[145]。

5) 隐私和事故责任。车辆和道路基础设施的通信产生的大数据涉及用户隐私问题^[10]。道路基础设施自动化智能化程度的提高可能会把交通事故责任转移给自动化系统的开发人员和操作人员,司机在交通事故中所承担责任的份额会下降,而制造商和公路代理机构会承担更多的责任。

6) 车辆和道路基础设施自动化实现顺序。杜豫川等^[9]指出,对于L0等级的传统车辆而言,即便最高等级R5的智慧高速也无法使车辆实现具备自动驾驶功能;而对于R0的无智慧设施公路,L5等级单车智能的车辆也无法实现车路通信。因此基于AVs的道路基础设施改造升级要求车辆和道路基础设施同时高度自动化。无论是车辆开发商还是基础设施开发商,如果不保证另一方会进行相应的投资,都无法证明进行本项投资是合理的^[149]。如果没有智能道路,消费者会缺乏购买自动驾驶车辆的动机。如果没有一定比例的AVs,政府便缺少道路基础设施改造升级的动力。

6 结论

1) 智能路面是具备车辆导航、信息自感知和车辆无线充电功能的新型路面综合体,其本身将具备自供电功能和使用智能路面建造技术。本文梳理了国内外关于智能路面的相关研究成果、关键技术、设计和建造方法,并明确了面临的非技术问题,旨在为广大研究人员提供参考。

2) 国内外研究人员在自动驾驶背景下的路面智能化、自动化和电气化研究中多注重路面特殊功能的实现,而对新型路面材料和路面结构问题研究较少。在路面材料方面,智能路面涉及磁性路面材料、自感知路面材料、高磁阻率和电阻率路面材料、导热路面材料和相变材料等,需在重视材料特殊功能与传统路用性能平衡的基础上进行配合比设计。在路面结构方面,智能路面是一种复合式多功能路面结构,目前自充电路面技术对新的路面结构问题研究较多,而自导航和自感知路面技术对其关注相对较少。“自动驾驶化”的道路基础设施改造需较长的时间成本和经济成本,以及安全和法律风险,既需要满足AVs需求,又应支持城市发展的目标,因此智能路面的规划更需考虑长期发展动态。

3) 目前智能路面还处于概念设计和室内研发阶段,国际上尚未有成熟的规范和技术标准,对智能路面的系统性研究相对较少,本文对智能路面的理解、阐述和总结难免有考虑不全之处。智能路面的大规模推广不仅要克服自动驾驶和道路交通工程本身发展的技术瓶颈,还要克服社会、经济、环境和法律等非技术问题。总体而言,智能路面是一个多学科交叉的领域,应充分加强国际和行业的合作,加快技术标准和法律法规的制定落实,促进智能路面和AVs从概念示范走向大规模实际应用。

参考文献(References)

- [1] Yadav A, Gaur A, Jain S M, et al. Development navigation, guidance & control program for GPS based autonomous ground vehicle(AGV) using soft computing tech-

- niques[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 29: 530–535.
- [2] 王云鹏, 鲁光泉, 于海洋. 车路协同环境下的交通工程[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(2): 106–110.
- [3] 罗燊, 张永伟. “新基建”背景下城市智能基础设施的建设思路[J]. *城市发展研究*, 2020, 27(11): 51–56.
- [4] 张颖. 从单车智能到车路协同 未来交通的智能之路还有多远? [J]. *汽车与配件*, 2020, (24): 50–52.
- [5] 杜豫川, 刘成龙, 吴获菲, 等. 新一代智慧高速公路系统架构设计[EB/OL]. [2021–07–10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20210316.1415.004.html>.
- [6] 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): 111–121.
- [7] Leiva-Padilla P, Moreno-Navarro F, Iglesias G, et al. Interpretation of the magnetic field signals emitted by encoded asphalt pavement materials[J]. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7300.
- [8] 李斌, 侯德藻, 张纪升, 等. 论智能车路协同的概念与机理[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(10): 134–141.
- [9] Meng L, Blokpoel R. A sophisticated intelligent urban road-transport network and cooperative systems infrastructure for highly automated vehicles[C]//*Proceedings of World Congress on Intelligent Transport Systems*. Montreal: TRB, 2016.
- [10] Pompigna A, Mauro R. Smart roads: A state of the art of highways innovations in the Smart Age[J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2022, 25: 100986.
- [11] Shi X. More than smart pavements: Connected infrastructure paves the way for enhanced winter safety and mobility on highways[J]. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2020, 1(1): 1–12.
- [12] 吴建清, 宋修广. 智慧公路关键技术发展综述[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2020, 50(4): 52–69.
- [13] 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): 1–24.
- [14] Wang J, Niu H. A distributed dynamic route guidance approach based on short-term forecasts in cooperative infrastructure-vehicle systems[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 66: 23–34.
- [15] 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): 102–105, 9.
- [16] Baskar L D, de Schutter B, Hellendoorn H. Optimal routing for intelligent vehicle highway systems using mixed integer linear programming[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2009, 42(15): 569–575.
- [17] Khodayari A, Ghaffari A, Ameli S, et al. A historical review on lateral and longitudinal control of autonomous vehicle motions[C]//*IEEE. Proceedings of 2010 International Conference on Mechanical and Electrical Technology*. Singapore: IEEE, 2010: 421–429.
- [18] Bar Hillel A, Lerner R, Levi D, et al. Recent progress in road and lane detection: A survey[J]. *Machine Vision and Applications*, 2014, 25(3): 727–745.
- [19] Wang Y, Teoh E K, Shen D. Lane detection and tracking using B-snake[J]. *Image and Vision Computing*, 2004, 22(4): 269–280.
- [20] Clanton J M, Bevlly D M, Hodel A S. A low-cost solution for an integrated multisensor lane departure warning system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(1): 47–59.
- [21] Labayrade R. How autonomous mapping can help a road lane detection system [C]//*2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. Singapore: IEEE, 2006: 1–6.
- [22] Belaroussi R, Tarel Jean-Philippe, Hautiere N. Vehicle attitude estimation in adverse weather conditions using a camera, a GPS and a 3D road map[C]//*2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Baden: IEEE, 2011: 782–787.
- [23] Wang J, Ni D, Li K. RFID-based vehicle positioning and its applications in connected vehicles[J]. *Sensors*, 2014, 14(3): 4225–4238.
- [24] Wang X, Xu L, Sun H, et al. On-road vehicle detection and tracking using MMW radar and monovision fusion [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(7): 2075–2084.
- [25] Mohsen I, Houdali N, Ditchi T, et al. V2I electromagnetic system for lateral position estimation of a vehicle[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 274: 141–147.
- [26] Santos P, Holé S, Filloy C, et al. Magnetic vehicle guidance[J]. *Sensor Review*, 2008, 28(2): 132–135.
- [27] 吴祥. 基于电磁导航智能车的控制研究及实现[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2016.
- [28] Sadayuki T. A history of automated highway systems in Japan and future issues[C]//*2008 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*. Columbus: IEEE, 2008: 2–3.
- [29] 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.

- [30] Tsugawa S, Aoki M, Hosaka A, et al. A survey of present IVHS activities in Japan[J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(11): 1591–1597.
- [31] Tan H-S, Guldner J, Chen C, et al. Changing lanes on automated highways with look-down reference systems I [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 1998, 31(1): 67–72.
- [32] Guldner J, Patwardhan S, Tan H-S, et al. Coding of Road Information for Automated Highways[J]. *ITS Journal-Intelligent Transportation Systems Journal*, 1999, 4(3/4): 187–207.
- [33] Shladover S E, Desoer C A, Hedrick J K, et al. Automated vehicle control developments in the PATH program [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1991, 40(1): 114–130.
- [34] 吴超仲. 基于磁道钉导航的车道保持系统信息融合与控制技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.
- [35] 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(11): 66–69.
- [36] 唐磊. 磁诱导辅助驾驶系统在冬季除雪中的应用[J]. *公路*, 2013, 58(11): 221–224.
- [37] Hopstock D M, Wald L D. Verification of field model for magnetic pavement marking tape[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, 32(5): 5088–5090.
- [38] Guldner J, Tan H-S, Patwardhan S. Analysis of automatic steering control for highway vehicles with look-down lateral reference systems[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1996, 26(4): 243–269.
- [39] Tan H-S, Guldner J, Chen C, et al. Lane changing with look-down reference systems on automated highways[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(9): 1033–1043.
- [40] Houdal N, Ditchi T, Géron E, et al. RF infrastructure cooperative system for in lane vehicle localization[J]. *Electronics*, 2014, 3(4): 598–608.
- [41] Lv Z Y, Ren F Y, Zhang S S, et al. Sensing mechanism of magnetic asphalt road materials[C]//IEEE. Proceedings of 2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). Zhengzhou: IEEE, 2018: 983–986.
- [42] Moreno-Navarro F, Iglesias G R, Rubio-Gómez M C. Encoded asphalt materials for the guidance of autonomous vehicles[J]. *Automation in Construction*, 2019, 99: 109–113.
- [43] 孙瑜, 范平志. 射频识别技术及其在室内定位中的应用[J]. *计算机应用*, 2005(5): 1205–1208.
- [44] 郑坤. 基于RFID的车辆定位系统设计及定位方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [45] Baum M, Overmeyer L. Passive 13.56 MHz RFID transponders for vehicle navigation and lane guidance[C]//Proceedings of the 1st International EURASIP Workshop on RFID Technology. Piscataway: NJ IEEE, 2007: 83–86.
- [46] Walvekar S R, Burkholder R J. FEKO™ modeling study of passive UHF RFID tags embedded in pavement[C]//2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). Denver: IEEE, 2018: 1–2.
- [47] Song X, Li X, Tang W, et al. A hybrid positioning strategy for vehicles in a tunnel based on RFID and in-vehicle sensors[J]. *Sensors*, 2014, 14(12): 23095–23118.
- [48] Pochettino O, Kondapalli S H, Aono K, et al. Real-time infrastructure-to-vehicle communication using RF-triggered wireless sensors[C]//IEEE. Proceedings of 2019 IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). Dallas, TX: IEEE, 2019: 556–559.
- [49] Malekian R, Kavishe A F, Maharaj B T, et al. Smart vehicle navigation system using hidden markov model and RFID technology[J]. *Wireless Personal Communications*, 2016, 90(4): 1717–1742.
- [50] Guerrero-Ibáñez J, Zeadally S, Contreras-Castillo J. Sensor technologies for intelligent transportation systems[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1–24.
- [51] Oyekanlu E A, Smith A C, Thomas W P, et al. A review of recent advances in automated guided vehicle technologies: Integration challenges and research areas for 5G-based smart manufacturing applications[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 202312–202353.
- [52] Lu S, Xu C, Zhong R Y, et al. A RFID-enabled positioning system in automated guided vehicle for smart factories[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, 44: 179–190.
- [53] 刘林. 微缩自主车横向控制及纵向速度自适应控制[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [54] Liang X, Guler S I, Gayah V V. Joint optimization of signal phasing and timing and vehicle speed guidance in a connected and autonomous vehicle environment[J]. *Transportation Research Record*, 2019, 2673(4): 70–83.
- [55] Talebpour A, Mahmassani H S, Hamdar S H. Speed harmonization: Evaluation of effectiveness under congested conditions[J]. *Transportation Research Record*, 2013, 2391(1): 69–79.
- [56] 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): 50-72.
- [57] Galanis I, Anagnostopoulos I, Gurunathan P, et al. Environmental-based speed recommendation for future smart cars[J]. *Future Internet*, 2019, 11(3): 78-95.
- [58] 向新胜. 车路协同在智慧交通中的应用分析[J]. *道路交通管理*, 2017(8): 39.
- [59] 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.
- [60] 陆凯旋. 基于智能道钉的路面冰雪及水体检测技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [61] 桂康. 路面气象状态识别关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [62] Kyriakidis M, Happee R, de Winter J C F. Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2015, 32: 127-140.
- [63] Fagnant D J, Kockelman K. Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 77: 167-181.
- [64] Ma J, Li X, Shladover S, et al. Freeway speed harmonization[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2016, 1(1): 78-89.
- [65] Shi Z-Q, Chung D D L. Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(3): 435-439.
- [66] 韦文兵. 基于碳纤维混凝土(粗骨料)压敏性的交通测速系统研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2003.
- [67] Han B, Zhang K, Yu X, et al. Nickel particle-based self-sensing pavement for vehicle detection[J]. *Measurement*, 2011, 44(9): 1645-1650.
- [68] Han B, Zhang K, Burnham T, et al. Integration and road tests of a self-sensing CNT concrete pavement system for traffic detection[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 22(1): 15020.
- [69] 龚学进. 碳纤维复合材料在交通越线违规检测中的实验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [70] Monteiro A O, Loreda A, Costa P M F J, et al. A pressure-sensitive carbon black cement composite for traffic monitoring[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 1079-1086.
- [71] Xiao J, Zou X, Xu W. EPave: A self-powered wireless sensor for smart and autonomous pavement[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2207.
- [72] 邹祥. 基于压电效应的沥青路面自供电无线传感系统设计与研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [73] 翟英博. 基于温差发电的道路监测传感器节点研究与设计[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [74] Rhimi M, Lajnef N, Chatti K. A self-powered sensing system for continuous fatigue monitoring of in-service pavements[J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2012(5): 303-310.
- [75] Guo S, Wang F, Yang Y, et al. Energy-efficient cooperative for simultaneous wireless information and power transfer in clustered wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(11): 4405-4417.
- [76] Mallick R B, Chen B-L, Bhowmick S. Harvesting energy from asphalt pavements and reducing the heat island effect[J]. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2009, 2(3): 214-228.
- [77] Hasni H, Alavi A H, Chatti K, et al. A Self-powered surface sensing approach for detection of bottom-up cracking in asphalt concrete pavements: Theoretical/numerical modeling[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 144: 728-746.
- [78] Cho J Y, Kim K-B, Hwang W S, et al. A multifunctional road-compatible piezoelectric energy harvester for autonomous driver-assist LED indicators with a self-monitoring system[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 294-301.
- [79] 耿洪杨. 应用于自供电路面监测的集成温度传感器研究与设计[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [80] Cook-Chennault K A, Thambi N, Bitetto M A, et al. Piezoelectric energy harvesting: A green and clean alternative for sustained power production[J]. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 2008(6): 496-509.
- [81] Abbasi A. Application of piezoelectric materials and piezoelectric network for smart roads[J]. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2013 (6): 857-862.
- [82] Moure A, Izquierdo Rodríguez M A, Rueda S H, et al. Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 112: 246-253.
- [83] Hou Y, Wang L, Wang D, et al. A preliminary study on the IoT-based pavement monitoring platform based on the piezoelectric-cantilever-beam powered sensor[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 2017: 1-6.
- [84] Manosalvas-Paredes M, Lajnef N, Chatti K, et al. Data compression approach for long-term monitoring of pavement structures[J]. *Infrastructures*, 2020, 5(1): 1-12.

- [85] Ji X, Hou Y, Chen Y, et al. Fabrication and performance of a self-powered damage-detection aggregate for asphalt pavement[J]. *Materials & Design*, 2019, 179: 107890.
- [86] Homami H R. On chip micro power self generator for smart pavement material application[D]. State of New York: City University of New York, 2013.
- [87] Chen T D, Kockelman K M, Hanna J P. Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2016, 94: 243-254.
- [88] Mohamed A A S, Meintz A, Zhu L. System design and optimization of in-route wireless charging infrastructure for shared automated electric vehicles[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 79968-79979.
- [89] Nguyen T, Xie M, Liu X, et al. Platooning of autonomous public transport vehicles: The influence of ride comfort on travel delay[J]. *Sustainability*, 2019, 11(19): 5237.
- [90] Yu J J Q, Lam A Y S. Autonomous vehicle logistic system: Joint routing and charging strategy[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(7): 2175-2187.
- [91] Ahmad A, Alam M S, Chabaan R. A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2018, 4(1): 38-63.
- [92] 吴璩. 电动汽车动态充电模式相邻导轨激磁电流同步策略[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [93] Li S, Liu Z, Zhao H, et al. Wireless power transfer by electric field resonance and its application in dynamic charging[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10): 6602-6612.
- [94] 李锐杰. 磁耦合谐振式无线电能传输特性研究及优化[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [95] Amditis A, Karaseitanidis G, Damousis I, et al. Dynamic wireless charging for more efficient FEVs: The fabric project concept[C]//IET. *Proceedings of MedPower 2014*. Athens: IET, 2014: 1-6.
- [96] 李峰, 孙轩, 朱兴一, 等. 路面材料磁化对无线电能传输的能量损失效应研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(3): 71-79.
- [97] Villa J, Sanz J, Peri J, et al. Victoria project: Static and dynamic wireless charging for electric buses[C]//IDTechEx. *Proceedings of the Business Intelligence on Emerging Technologies IDTechEx Conference*. Berlin: IDTechEx, 2016: 27-28.
- [98] Azad A N, Echols A, Kulyukin V A, et al. Analysis, optimization, and demonstration of a vehicular detection system intended for dynamic wireless charging applications[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5(1): 147-161.
- [99] Chen F, Kringo, Nicoken. Towards new infrastructure materials for on-the-road charging[C]//2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC). Florence: IEEE, 2014: 1-5.
- [100] Chen F, Taylor N, Balieu R, et al. Dynamic application of the Inductive Power Transfer (IPT) systems in an electrified road: Dielectric power loss due to pavement materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 147: 9-16.
- [101] 胡峥峥, 刘国权, 杨大峰, 等. 树脂基透波混凝土材料的研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2012, 35(3): 42-45.
- [102] Choi S Y, Jeong S Y, Gu B W, et al. Ultrathin S-type power supply rails for roadway-powered electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(11): 6456-6468.
- [103] Amirpour M, Kim S, Battley M P, et al. Coupled electromagnetic-thermal analysis of roadway inductive power transfer pads within a model pavement[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 189: 116710.
- [104] Barnes A N. Thermal modeling and analysis of roadway embedded wireless power transfer modules[D]. State of Utah: Utah State University, 2020.
- [105] Varghese B J, Kamineni A, Roberts N, et al. Design considerations for 50 kW dynamic wireless charging with concrete-embedded Coils[C]//Proceedings of 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). Seoul: IEEE, 2020: 40-44.
- [106] Chen F, Taylor N, Kringos N. Electrification of roads: Opportunities and challenges[J]. *Applied Energy*, 2015, 150: 109-119.
- [107] Ceravolo R, Miraglia G, Surace C, et al. A computational methodology for assessing the time-dependent structural performance of electric road infrastructures[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2016, 31(9): 701-716.
- [108] Marmiroli B, Dotelli G, Spessa E. Life cycle assessment of an on-road dynamic charging infrastructure[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(15): 3117.
- [109] Nguyen M L, Horny P, Perez S, et al. Development of inductive charging pavement for electric buses in ur-

- ban areas[C]//ITS. Proceedings of 22nd ITS World Congress. Bordeaux: ITS, 2015: 1-12.
- [110] Beeldens A, Hauspie P, Perik H. Inductive charging through concrete roads: A belgian case study and application[C]//ERF. Proceedings of 1st European Road Infrastructure Congress. Leeds: ERF, 2016: 1-10.
- [111] Ceravolo R, Miraglia G, Surace C. Fatigue damage assessment of electric roads based on probabilistic load models[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 842: 12037.
- [112] Chabot A, Deep P. 2D multilayer solution for an electrified road with a built-in charging box[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(Suppl2): S590-S603.
- [113] Levenberg E. Estimating vehicle speed with embedded inertial sensors[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 46: 300-308.
- [114] Xue W, Wang L, 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): 1380-1390.
- [115] 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): 1-66.
- [116] Voskuilen J, Montfort J V, Naus R, et al. Rollpave, a prefabricated asphalt wearing course[EB/OL]. [2021-07-10]. http://data.abacus.hr/h-a-d/radovi_s_kongresa_nagoya_japan_2010/90193.pdf.
- [117] Strache S, Wunderlich R, Heinen S. Self-powered intelligent sensor node concept for monitoring of road and traffic conditions[J]. Sensors & Transducers, 2012, 14(2): 93-110.
- [118] 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.
- [119] Dong Y S, Hou Y, Cao D W, et al. Study on road performance of prefabricated rollable asphalt mixture[J]. Road materials and Pavement Design, 2017, 18(Suppl 3): 65-75.
- [120] Dong Y S, Hou Y, Wang Z F, et al. Self-healing performance of rollable asphalt mixture[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(7): 4019117.
- [121] 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): 4018283.
- [122] 代书凝. 可卷曲式预制降噪路面的性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- [123] 代书凝, 芮润华, 高晓通, 等. 玄武岩纤维掺量对可卷曲沥青路面路用性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(4): 137-139.
- [124] Vaitkus A, Andriejauskas T, Šernas O, et al. Definition of concrete and composite precast concrete pavements texture[J]. Transport (Vilnius, Lithuania), 2019, 34(3): 404-414.
- [125] Cardno C A. "Touch Screens" for roadways: Colorado tests smart pavement[J]. Civil Engineering Magazine, 2019, 89(1): 36-37.
- [126] Shekhar A, Kumaravel V K, Klerks S, et al. Harvesting roadway solar energy-performance of the installed infrastructure integrated PV bike path[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2018, 8(4): 1066-1073.
- [127] Dinh N. Precast ultra-thin whitetopping (PUTW) in Singapore and its application for electrified roadways[D]. Free State of Bavaria: Technische Universitaet Muenchen, 2016.
- [128] Hornych P, Nguyen M L, Kerzreho J P, et al. Full scale test on prefabricated slabs for electrical supply by induction of urban transport systems[C]//Proceedings of Transport Research Arena. Paris: TRA, 2014: 1-10.
- [129] Chong H Y, Lopez R, Wang J, et al. Comparative analysis on the adoption and use of BIM in road infrastructure projects[J]. Journal of Management in Engineering, 2016, 32(6): 5016021.
- [130] Mirboland M, Smarsly K. BIM-based description of intelligent transportation systems for roads[J]. Infrastructures (Basel), 2021, 6(4): 51.
- [131] Tang F, Ma T, Guan Y, et al. Parametric modeling and structure verification of asphalt pavement based on BIM-ABAQUS[J]. Automation in Construction, 2020, 111: 103066.
- [132] Smarsly K, Mirboland M. BIM-based simulation of intelligent transportation systems[C]//Proceedings of the 2020 European Navigation Conference (ENC). Dresden: IEEE, 2020: 1-10.
- [133] 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: 257-281.
- [134] Ma C, Wang Y, Xu H. Research on prefabricated structure design method based on BIM technology[J]. IOP

- Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 750: 012195.
- [135] 王建伟, 高超, 董是, 等. 道路基础设施数字化研究进展与展望[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 101-124.
- [136] Tang F, Ma T, Zhang J, et al. Integrating three-dimensional road design and pavement structure analysis based on BIM[J]. Automation in Construction, 2020, 113: 103152.
- [137] Jackson R J, Wojcik A, Miodownik M. 3D Printing of asphalt and its effect on mechanical properties[J]. Materials & Design, 2018, 160: 468-474.
- [138] Jackson R J, Patrick P S, Miodownik M. Functionally graded 3D printed asphalt composites[J]. Materials Letters: X, 2020, 7: 100047.
- [139] Yeon J, Kang J, Yan W. Spall damage repair using 3D printing technology[J]. Automation in Construction, 2018, 89: 266-274.
- [140] 张守祺, 昂源, 李苗, 等. 3D打印对装配式混凝土路面可循环性的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2433-2440.
- [141] 李结义, 何凡, 石红磊, 等. 3D打印技术在路面修复工程的应用探讨[J]. 公路, 2019, 64(4): 51-55.
- [142] Safayet A J. Designing and testing 3-D printed Wafer-box with embedded PZT sensors to identify the shape effect on energy harvesting[D]. Georgia: Georgia Southern University, 2018.
- [143] Johnson C. Readiness of the road network for connected and autonomous vehicles[R]. London: RAC Foundation, 2017.
- [144] Alawadhi M, Almazrouie J, Kamil M, et al. A systematic literature review of the factors influencing the adoption of autonomous driving[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2020, 11(6): 1065-1082.
- [145] Rillings J H. Automated highways[J]. Scientific American, 1997, 277(4): 80-85.
- [146] Cheon. An overview of automated highway systems (AHS) and the social and institutional challenges they face[EB/OL]. [2021-07-10]. <http://scholarship.org/uc/item/8j86h0c>.
- [147] Hill B T. Smart Highways: Challenges facing dot's intelligent vehicle highway systems program. Testimony [R]. Washington: U. S. General Accounting Office, 1994.
- [148] Muller S. Driverless: Intelligent cars and the road ahead [Z]. Berghahn Books, Inc. 2017: 136
- [149] Shladover S E. Why we should develop a truly automated highway system[J]. Transportation Research Record, 1998, 1651(1): 66-73.

Development on smart pavement under the background of autonomous driving

GUO Runhua, LIU Siqian, ZHOU Jing

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract This paper reviews the research progress and the development trend of the smart pavement in the context of the autonomous driving. Three key technologies of the smart pavement are identified to realize the cooperative interaction with the AVs, the self-navigation technology provides the location information for the AVs by embedding the vehicle navigation signs in the pavement; the self-sensing technology can recommend the safe speed for the AVs and reduce the traffic accidents through the perception and the analysis of the road weather information and the traffic flow information; and the self-charging technology involves problems of the high electromagnetic resistance and the thermal conductivity pavement materials and the new composite pavement structures, related with the feasibility of the charging system. Three advanced construction technologies of prefabricated pavement technology are discussed, the BIM and the 3D printing are used by the smart pavement to ensure the service life of the refined construction and the embedded components. Finally, it is pointed out that in addition to the key technical problems, the promotion of the intelligent pavement also faces social, economic, legal and environmental non-technical problems.

Keywords autonomous driving; smart pavement; self-navigation; self-perception; vehicle self-charging ●



(责任编辑 傅雪)