

智能传感技术在公路工程实时监测中的应用前景

贺利兵

华设检测科技有限公司 江苏 南京 211135

摘要：智能传感技术为公路工程实时监测带来广阔前景。其技术体系丰富，涵盖结构健康、环境感知、动态监测等多类，具备实时、精准、经济、智能等优势。在路基路面、桥梁隧道、交通环境及养护决策等方面应用成效显著。虽面临技术、经济、管理、人才等挑战，但通过技术创新、产业生态构建、政策标准支持等对策，未来有望在车路协同、数字孪生公路、碳排放监测等场景拓展应用，推动公路工程高质量发展。

关键词：智能传感技术；公路工程；实时监测；应用前景

引言：公路工程作为国家基础设施的关键构成，其安全与稳定运行关乎经济与社会发展。传统监测方式存在时效性差、精度有限等诸多弊端，难以满足当下复杂多变的公路状况监测需求。智能传感技术凭借实时数据采集、高精度检测、智能化分析等突出优势，为公路工程实时监测开辟了新路径。深入探究其在公路工程中的应用前景，对提升公路质量、保障交通安全、推动行业智能化发展具有重要的现实意义。

1 智能传感技术体系与核心特点

1.1 技术分类与原理

(1) 结构健康监测类：光纤光栅传感器（FBG）依托光的干涉效应，通过光栅反射波长变化感知结构应变与温度；压电传感器（PZT）利用压电效应，将机械振动转化为电信号，适用于裂缝与振动监测；应变片基于金属电阻应变效应，粘贴于结构表面，精准捕捉微小形变。(2) 环境感知类：温湿度传感器通过热敏电阻、湿敏电容等元件，将温湿度变化转化为电信号；雨量传感器利用光学原理，通过雨滴对光线的折射/反射差异检测降雨量；气体传感器（如CO/NO₂监测）借助气体与敏感材料的化学反应，改变元件电学特性实现气体浓度监测。(3) 动态监测类：加速度传感器基于惯性原理，通过检测质量块受力后的位移/加速度输出电信号；位移传感器利用激光、超声等技术，测量物体线性或角位移；激光雷达（LiDAR）发射激光束，通过回波时间差与相位差计算目标距离与三维坐标。(4) 新兴技术：无线传感网络（WSN）由多个传感节点组成，通过无线通信实现数据分布式采集与传输；MEMS传感器基于微机电系统技术，体积小、功耗低，集成度高；自供电传感器结合太阳能、振动能等能量收集技术，摆脱电池依赖^[1]。

1.2 技术优势对比传统方法

(1) 实时性：传统人工检测需定期现场采集数据，

存在时间滞后；智能传感技术实现毫秒级数据采集与无线传输，可实时捕捉结构状态与环境变化，及时预警风险。(2) 精准性：传统检测受人工操作、环境干扰影响较大，误差较高；智能传感器具备高分辨率，搭配抗干扰设计与数据校准算法，检测精度显著提升，可捕捉微小异常信号。(3) 经济性：传统人工检测需长期投入人力、设备运输等成本，且难以覆盖复杂区域；智能传感系统一次部署可长期运行，减少人工成本，同时降低因滞后检测导致的故障维修成本。(4) 智能化：传统方法需人工整理分析数据，效率低；智能传感技术融合边缘计算与AI算法，可在本地实时处理数据、识别异常模式，无需依赖远程服务器，提升数据处理效率与决策智能化水平。

2 智能传感技术在公路工程实时监测中的应用

2.1 路基与路面监测

(1) 沉降与变形监测：在路基关键区域布设防腐蚀的光纤光栅（FBG）传感器，其能精准捕捉路基土压力变化与竖向位移，实时传输数据至监控平台。相较于传统人工沉降观测，可实现24小时连续监测，及时发现路基不均匀沉降隐患，避免路面出现塌陷、开裂等问题，保障路基长期稳定性。(2) 裂缝扩展实时追踪：融合高清图像识别技术与分布式光纤传感系统，将分布式光纤沿路面裂缝易发生区域布设。图像识别可快速定位初始裂缝，分布式光纤则能实时感知裂缝扩展过程中的应变变化，精确记录裂缝宽度与延伸速度，为路面裂缝修复提供精准数据支撑，防止裂缝进一步扩大影响路面结构。(3) 路面温度与冻融循环监测：在路面结构层内置温湿度传感器，实时采集不同深度路面温度及湿度数据。通过分析温度变化规律，预判高温天气下路面车辙形成风险；同时监测冬季冻融循环次数，评估路面材料因冻融产生的剥落损伤，提前制定养护措施，延长路面

使用寿命^[2]。

2.2 桥梁与隧道结构安全

(1) 桥梁振动与应力监测：在桥梁主梁、支座等关键部位安装压电传感器（PZT）与加速度传感器，实时采集桥梁在车辆荷载、风力作用下的振动频率与应力变化数据。通过分析数据判断桥梁结构是否存在疲劳损伤，当振动或应力超出安全阈值时，及时发出预警，避免桥梁因长期疲劳受损引发安全事故。(2) 隧道围岩收敛与支护结构状态评估：在隧道开挖后，于围岩表面布设位移传感器，监测围岩收敛变形情况；同时在支护钢拱架上安装应变片，实时掌握支护结构受力状态。结合监测数据评估隧道围岩稳定性与支护结构安全性，及时调整施工方案，预防隧道坍塌。(3) 索力监测：针对斜拉桥、悬索桥的拉索，采用磁通量传感器或光纤光栅传感器进行索力监测。传感器直接安装于拉索表面，实时采集索力变化数据，通过数据分析判断拉索是否存在松弛、锈蚀等问题，为桥梁拉索维护提供依据，保障桥梁整体结构安全。

2.3 交通环境与灾害预警

(1) 暴雨积水深度监测：在公路低洼路段安装超声波传感器，传感器与物联网平台实时连接。暴雨天气时，超声波传感器精准测量路面积水深度，数据实时传输至平台，当积水深度超出安全标准时，平台自动向过往车辆及交通管理部门发送预警信息，引导车辆绕行，避免积水引发交通事故。(2) 边坡滑坡预警：在公路边坡区域布设土壤湿度传感器与位移传感器，联合监测边坡土壤含水量与边坡位移变化。当土壤湿度达到临界值或边坡出现微小位移时，系统立即发出预警，提醒交通管理部门采取加固措施，防止边坡滑坡阻断交通^[3]。

(3) 交通事故快速定位：整合GPS定位传感器、视频监控传感器及车联网数据，利用多传感器融合定位技术。当发生交通事故时，系统可快速精准定位事故位置，自动将事故信息发送至交警、急救等部门，缩短救援响应时间，减少事故造成的交通拥堵与人员伤亡。

2.4 智能养护决策支持

(1) 基于大数据的病害预测模型：收集公路工程各监测环节的传感器数据，包括路基路面变形、桥梁结构应力、交通荷载等信息，构建大数据分析平台。通过平台建立病害预测模型，结合历史数据与实时监测数据，精准预测公路可能出现的病害类型、位置及时间，为养护工作提供前瞻性指导。(2) 养护优先级排序与资源动态调配：依据病害预测模型结果，结合公路交通流量、路段重要性等因素，对养护任务进行优先级排序。

同时，利用智能传感技术实时掌握养护资源（如养护设备、人员）的分布与使用状态，通过系统实现养护资源动态调配，确保高优先级养护任务高效完成，提升公路养护效率与资源利用率。

3 智能传感技术在公路工程实时监测应用中的关键挑战与瓶颈

3.1 技术层面

(1) 传感器耐久性不足：公路工程监测中，传感器长期暴露于高温、雨雪、盐碱等恶劣环境，易出现外壳腐蚀、元件老化问题，导致测量精度下降甚至失效，缩短设备使用寿命，增加更换频率与维护成本。(2) 多源数据融合与标准化缺失：不同类型传感器（如FBG、PZT、图像传感器）数据格式、传输协议差异大，缺乏统一数据标准，导致多源数据难以有效融合，无法充分挖掘数据价值，影响监测系统整体效能。(3) 能源供应问题：公路沿线部分偏远区域无稳定供电设施，传感器依赖电池供电时需频繁更换，自供电传感器（如光能、振动能收集）受环境限制，在光照不足、振动微弱区域供电不稳定，影响监测连续性。

3.2 经济与成本层面

(1) 初期设备投入高与性价比平衡：智能传感设备（如激光雷达、分布式光纤）单价高，加之安装调试费用，初期投入显著高于传统监测手段，部分项目方对长期收益认知不足，难以平衡投入与性价比。(2) 小规模项目的推广难度：小规模公路养护、乡村公路监测项目预算有限，智能传感系统的成套成本难以分摊，且项目规模小导致数据价值挖掘空间有限，制约技术在小规模项目中的推广应用^[4]。

3.3 管理与政策层面

(1) 数据安全与隐私保护机制不完善：监测数据包含公路地理位置、交通流量等敏感信息，目前缺乏针对性的数据加密、存储、共享安全规范，存在数据泄露风险，影响项目方数据应用积极性。(2) 跨部门协同与标准统一滞后：公路监测涉及交通、气象、应急等多部门，各部门数据管理体系独立，协同机制不健全；同时行业内缺乏统一的技术应用标准，导致不同项目监测系统兼容性差，难以形成全域监测网络。

3.4 人才与认知层面

(1) 复合型技术人才短缺：公路工程实时监测需兼具公路工程专业知识、IT技术（如物联网、边缘计算）与数据分析能力的复合型人才，目前行业内此类人才储备不足，导致系统运维、数据解读效率低。(2) 行业对新技术接受度参差不齐：部分传统公路养护单位习惯于

人工监测模式，对智能传感技术的可靠性、操作复杂性存在顾虑，接受度较低，阻碍技术在行业内的快速普及。

4 智能传感技术在公路工程实时监测中的发展对策与未来展望

4.1 技术创新方向

(1) 开发低成本、高可靠的国产传感器：针对当前进口传感器成本高、依赖度强的问题，加大国产传感器研发投入，优化核心元件设计与生产工艺，在降低制造成本的同时，提升传感器在恶劣环境下的抗腐蚀、抗老化性能，增强设备长期运行可靠性，减少对外部技术的依赖。(2) 探索自修复材料与柔性传感器应用：结合材料科学与传感技术，研发具备自修复功能的传感材料，当传感器出现微小损伤时可自主修复，延长使用寿命；同时推进柔性传感器技术落地，使其更贴合公路复杂结构表面，提升监测数据的准确性与覆盖范围。(3) 融合5G/6G与北斗高精度定位技术：借助5G/6G的高速率、低时延特性，优化传感器数据传输效率，实现大规模监测数据的实时交互；融合北斗高精度定位技术，提升公路工程监测点的定位精度，为位移监测、事故定位等场景提供更精准的空间坐标支持。

4.2 产业生态构建

(1) 推动“产学研用”协同创新平台建设：整合高校科研资源、企业技术研发能力、公路工程应用需求，搭建跨领域协同创新平台，促进技术研发与实际应用的深度对接，加速实验室技术向工程化、产业化转化，解决技术落地过程中的适配性问题。(2) 建立智能传感设备认证与质量追溯体系：制定统一的智能传感设备认证标准，对设备性能、精度、可靠性等指标进行规范认证；构建全生命周期质量追溯体系，记录设备生产、安装、运维等环节信息，保障设备质量可控，提升行业对智能传感设备的信任度^[5]。

4.3 政策与标准支持

(1) 将智能监测纳入公路设计规范与验收标准：修订现行公路工程设计与验收相关规范，明确智能传感监测系统的设计要求、安装标准与验收指标，强制或引导新建、改扩建公路项目配套智能监测设施，推动技术在行业内的普及应用。(2) 出台数据共享与开放激励政策：针对数据孤岛问题，制定公路监测数据共享管理办法，明确数据共享范围、权限与安全责任；推出数据开放激励措施，鼓励交通、气象、应急等部门及企业参与数据共享，充分释放数据价值，支撑跨领域协同决策。

4.4 未来应用场景拓展

(1) 车路协同（V2X）中的路侧单元（RSU）集成：将智能传感技术与路侧单元深度融合，通过路侧传感器实时采集交通流量、路面状态、周边环境等信息，与车辆进行动态数据交互，为自动驾驶提供全方位环境感知支持，提升行车安全与交通效率。(2) 数字孪生公路的实时映射与仿真：依托智能传感设备采集的公路全要素数据，构建数字孪生模型，实现物理公路与数字模型的实时映射；利用仿真技术模拟公路病害发展、交通流变化等场景，为公路规划、养护决策提供可视化、可预测的技术支撑。(3) 碳中和目标下的碳排放动态监测：在公路工程中集成碳排放监测传感器，实时采集公路建设、运营过程中的能耗数据与碳排放数据，构建碳排放动态监测体系，为公路工程低碳设计、绿色养护提供数据依据，助力实现碳中和目标。

结语

智能传感技术为公路工程实时监测注入全新活力，从路基路面到桥梁隧道，从交通环境到养护决策，全方位提升了监测的效能与精准度。尽管当下在技术、成本、管理等方面存在挑战，但随着创新突破、生态完善、政策扶持，其发展前景光明。未来，智能传感技术将深度融入公路工程各环节，在车路协同、数字孪生等领域持续拓展，助力公路工程向智能化、绿色化大步迈进。

参考文献

- [1] 朱伟.智能化施工技术在高速公路工程中的应用分析[J].工程与建设,2024,38(01):170-171.
- [2] 王维杰.试析公路工程监理存在问题及对策[J].全面腐蚀控制,2025,39(05):90-92.
- [3] 王尉,羊云.公路工程监理在施工阶段的质量控制对策分析[J].运输经理世界,2025,(09):37-39.
- [4] 张龙,白旭光,田腾飞,等.基于物联网的公路工程边坡智能动态监测系统研究[J].公路,2022,67(09):122-123.
- [5] 闫利平.智能化技术在公路工程机械化施工中的应用[J].集成电路应用,2023,40(11):190-191.