

智能传感技术在公路预防性养护决策中的创新应用

孟建坤 郑红旗 陈润喆

河南交投交通建设集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要：随着我国公路里程持续增长与交通流量日益攀升，传统被动式养护模式已难以满足公路全寿命周期管理需求。本文聚焦智能传感技术在公路预防性养护决策中的应用。先阐述了光纤传感、无线传感器网络、图像传感等智能传感技术的概况。接着详细介绍其在公路病害监测、交通荷载监测、环境因素监测等方面的具体应用。然后深入探讨了智能传感技术的创新方向，包括多源数据融合与智能分析技术创新、传感器技术创新与设备升级、养护决策模式创新与智能化转型等。智能传感技术的应用为公路预防性养护决策提供了新的思路和方法，有助于提升公路养护的科学性和有效性。

关键词：智能传感技术；公路预防性养护；决策创新应用

引言：公路作为重要的交通基础设施，其良好状态对交通运输至关重要。传统公路养护多依赖经验判断，缺乏精准性和及时性。随着科技发展，智能传感技术逐渐兴起，凭借其高精度、实时监测等优势，为公路预防性养护决策带来新契机。通过对公路各项指标的实时感知，智能传感技术能为养护决策提供可靠数据支持。本文将深入探讨智能传感技术的内涵、在公路预防性养护中的具体应用，以及未来创新发展方向，以推动公路养护技术的进步。

1 智能传感技术概述

1.1 光纤传感技术

光纤传感技术基于光在光纤中传输时，外界物理量对光的特性产生调制作用的原理实现传感功能。当公路结构出现裂缝、沉降等病害时，会引起周边环境物理量变化，进而影响光纤中光的强度、波长等参数，通过对这些光信号变化的监测和分析，就能获取公路结构的状态信息。该技术具有抗电磁干扰能力强、灵敏度高、测量距离长、可实现分布式测量等显著特点。在公路预防性养护中，光纤传感技术可埋设在公路路基、路面等部位，对公路内部结构状态进行长期、实时监测，及时发现潜在病害，为养护决策提供精准数据支持。

1.2 无线传感器网络技术

无线传感器网络技术由大量部署在监测区域的无线传感器节点组成，这些节点能够实时采集温度、湿度、应力等数据，并通过无线通信方式将数据传输至汇聚节点和控制中心。其自组织、低成本、易于部署的特性，使其在公路养护监测中具有广泛应用前景。在公路预防性养护场景下，无线传感器网络可灵活布置在公路沿线，对公路的交通荷载、环境参数等进行实时监测。

1.3 图像传感技术

图像传感技术利用图像传感器将光学图像转换为电信号或数字信号，通过对图像的采集、处理和分析，获取目标物体的特征和信息。在公路养护领域，图像传感技术可通过车载摄像头、无人机航拍等方式，对公路路面状况进行快速检测。它能够识别路面裂缝、坑槽、车辙等病害，并通过图像分析算法对病害的类型、尺寸、严重程度进行量化评估。相比传统人工检测方式，图像传感技术具有检测效率高、准确性好、可实现大范围快速检测等优势，能够为公路预防性养护决策提供直观、全面的路面状况信息，帮助养护人员及时制定科学合理的养护方案^[1]。

2 智能传感技术在公路预防性养护决策中的具体应用

2.1 公路病害监测

2.1.1 裂缝监测

在公路病害中，裂缝是常见且危害较大的问题。光纤传感技术可通过将分布式光纤传感器铺设在路面或路基中，实现对裂缝的精准监测。当路面出现裂缝时，裂缝处的应力变化会导致光纤发生微小形变，进而引起光信号的波长、强度等参数改变，通过对这些光信号的分析，能够精确判断裂缝的位置、长度和扩展趋势。无线传感器网络技术则可利用应变传感器节点，实时采集路面应力数据，一旦应力异常，便能及时预警裂缝的产生。图像传感技术凭借高清摄像头采集路面图像，再借助图像识别算法，快速识别出裂缝的形态和分布，还能对裂缝宽度进行精确测量，为公路养护人员制定针对性的修复方案提供关键数据，有效防止裂缝进一步扩大。

2.1.2 坑槽监测

智能传感技术为坑槽监测带来了高效解决方案。图

像传感技术是监测坑槽的重要手段，通过车载摄像头或无人机搭载的高清相机，在公路上进行动态拍摄，采集路面图像信息。利用先进的图像分析算法，可快速识别出坑槽的位置、形状和尺寸，并且能够实现对坑槽发展过程的动态跟踪。无线传感器网络可在路面部署压力传感器节点，当车辆经过坑槽区域时，压力传感器采集到的压力数据会出现异常波动，通过对这些数据的实时分析，可及时发现坑槽的存在。

2.1.3 车辙监测

车辙的出现会严重影响公路的平整度和行车舒适性，智能传感技术能有效监测车辙情况。图像传感技术通过采集公路路面图像，运用三维建模和图像处理技术，可精确测量车辙的深度和长度，直观呈现车辙的分布范围和严重程度。光纤传感技术可以在公路内部铺设光纤光栅传感器，监测路面不同深度的变形情况，当车辙形成时，路面各层的应力分布发生变化，引起光纤光栅传感器的波长漂移，通过分析波长变化数据，可了解车辙形成过程中路面结构的力学响应，为车辙的成因分析提供依据。无线传感器网络则可利用位移传感器节点，实时监测路面的垂直位移，当位移数据超过阈值时，及时发出预警，提醒养护人员对车辙进行处理，延缓路面损坏进程。

2.2.1 车辆轴重监测

车辆轴重是影响公路使用寿命的关键因素之一，智能传感技术为此提供了可靠的监测手段。光纤传感技术可将光纤传感器埋设在公路路面下方，当车辆经过时，路面产生的压力会使光纤发生微小应变，导致光信号的波长改变，通过对波长变化的精确测量和分析，能够计算出车辆的轴重信息。无线传感器网络技术则可部署压电式传感器节点，这些节点能将车辆通过时产生的压力转换为电信号，借助无线通信传输至数据处理中心，经过算法分析得出车辆轴重数据。

2.2.2 交通流量监测

准确掌握交通流量对于公路预防性养护决策至关重要，智能传感技术能实现高效、精准的交通流量监测。无线传感器网络可在公路沿线布置多种传感器节点，如红外传感器、地磁传感器等，红外传感器通过检测车辆经过时的红外信号变化，地磁传感器则利用车辆金属部件对地球磁场的扰动，实时感知车辆的存在和行驶状态，进而统计交通流量数据，并通过无线通信将数据上传至监测中心。图像传感技术借助安装在道路上方的摄像头，利用视频分析技术对过往车辆进行识别、跟踪和计数，不仅能统计交通流量，还可分析车辆类型、行驶

速度等信息，为交通流量的精细化管理提供支持。

2.3.1 温度监测

温度变化会使公路材料产生热胀冷缩，引发路面开裂、变形等病害，智能传感技术为精准监测温度提供了有效途径。光纤传感技术利用光纤材料的温度敏感特性，当温度改变时，光纤的折射率等光学参数发生变化，通过测量光信号的波长漂移量，能够精确计算出环境温度。将光纤传感器铺设在公路路面和路基中，可实时获取不同深度的温度分布数据，分析温度梯度对公路结构的影响。无线传感器网络技术则通过部署数字温度传感器节点，将采集到的温度数据以无线通信方式传输至监测系统。这些节点体积小、功耗低，可灵活布置在公路沿线关键部位，实现对公路环境温度的长期、连续监测。

2.3.2 湿度监测

湿度是影响公路稳定性和耐久性的重要环境因素，智能传感技术能够实时掌握公路湿度状况。无线传感器网络可采用电容式或电阻式湿度传感器节点，这些传感器通过感应环境湿度变化导致的电容值或电阻值改变，将湿度信息转换为电信号，经无线传输至数据处理中心。节点可安装在公路路基、路面基层等位置，持续监测土壤和结构层的湿度。光纤传感技术同样可用于湿度监测，利用涂覆有湿度敏感材料的光纤，当湿度变化时，敏感材料的特性改变会引起光纤光学特性变化，从而实现对湿度的测量。通过对公路湿度的实时监测，可评估水分对路基路面的侵蚀程度，判断是否会因湿度引发路基沉降、路面翻浆等病害，为公路预防性养护决策提供关键数据，保障公路结构的稳定与安全。

3 智能传感技术在公路预防性养护决策中的创新方向

3.1 多源数据融合与智能分析技术创新

3.1.1 多模态数据融合技术的应用与发展

多模态数据融合技术整合光纤传感、无线传感器网络、图像传感等多源异构数据，打破单一数据监测的局限性。例如，将光纤传感获取的公路内部应力应变数据，与图像传感捕捉的路面表观病害图像、无线传感器网络采集的交通荷载和环境数据相结合，通过特征提取、数据配准等处理，构建全面的公路状态信息模型。在实际应用中，多模态数据融合可实现对公路病害的精准定位与成因分析，如结合温度、湿度数据与路面裂缝图像，能更准确判断裂缝产生是由环境因素还是荷载作用主导。随着技术发展，多模态数据融合正朝着实时化、智能化方向迈进，通过深度学习等算法自动挖掘数据间的潜在关联，提升数据处理效率与分析精度，为公

路预防性养护决策提供更可靠的依据。

3.1.2 基于人工智能的数据分析与预测模型优化

基于人工智能的数据分析与预测模型为公路预防性养护注入新动能。利用机器学习算法，对海量历史监测数据进行训练，可建立公路病害发展、交通荷载演变等预测模型。如通过卷积神经网络（CNN）对大量路面图像数据进行学习，能精准识别和预测裂缝、坑槽等病害的发展趋势；采用循环神经网络（RNN）分析时间序列的交通荷载、环境数据，可预测未来公路承载压力与病害发生概率。此外，强化学习算法可根据养护决策实施后的反馈效果，动态优化预测模型，提升预测准确性。

3.2 传感器技术创新与设备升级

3.2.1 新型传感器的研发与应用前景

新型传感器研发不断突破，为公路预防性养护带来新契机。例如，基于纳米材料的传感器凭借独特物理化学特性，对环境变化响应更灵敏，可精准监测公路微小形变与早期病害；生物传感器利用生物分子特异性识别功能，能检测公路材料中有害物质，评估其耐久性。此外，柔性传感器可贴合复杂曲面，适应公路特殊结构监测需求，如桥梁索缆、隧道衬砌的健康检测。这些新型传感器不仅具备更高精度与可靠性，还能拓展监测维度。

3.2.2 传感器设备的小型化、低功耗与集成化发展

传感器设备朝着小型化、低功耗与集成化方向发展，契合公路养护复杂应用场景需求。小型化使传感器更易部署于公路隐蔽部位，如路面结构层内部，不影响公路正常使用；低功耗设计延长设备续航，减少维护频率，降低人力与经济成本，特别适用于偏远公路路段。集成化则将多种功能传感器整合为一体，可同步采集温度、湿度、应力等多参数，避免多设备安装带来的干扰与空间占用问题。通过微机电系统（MEMS）技术与先进封装工艺，传感器设备实现性能提升与体积缩小的双重突破，未来将进一步提升公路监测效率，为预防性养护决策提供更全面、实时的数据支撑。

3.3 养护决策模式创新与智能化转型

3.3.1 从经验决策到数据驱动决策的转变

传统公路养护多依赖养护人员的经验判断，决策的准确性和科学性受人为因素影响较大。随着智能传感技术的发展，海量的公路监测数据得以实时采集，为养护决策提供了坚实的数据基础。通过对公路病害、交通荷载、环境因素等多源数据的分析，能够精准判断公路的健康状况，预测潜在问题。例如，结合长期的路面裂缝监测数据和交通流量数据，可分析出裂缝扩展与车辆荷载的关联，进而制定针对性的养护方案。

3.3.2 智能养护机器人与自动化养护作业的发展

智能养护机器人和自动化养护设备的出现，推动了公路养护作业向智能化、自动化方向迈进。智能养护机器人可搭载多种传感器，具备自主导航、环境感知和作业执行能力，能够完成路面裂缝修复、坑槽填补等养护任务。自动化养护设备则可以实现大规模、标准化的养护作业，如自动化清扫车、智能喷洒设备等，能够根据设定程序自动完成路面清洁、洒布养护材料等工作。这些智能设备和自动化技术的应用，不仅降低了人工劳动强度，还能提高养护作业的安全性和规范性，是未来公路养护发展的重要趋势^[3]。

结束语

智能传感技术在公路预防性养护决策中的创新应用，已深刻改变传统养护模式。从多源数据融合分析，到传感器技术革新，再到养护决策智能化转型，实现了从经验判断到精准数据支撑、从人工养护到智能自动化作业的跨越。不仅提升了公路病害监测的及时性与准确性，优化了养护决策的科学性，还降低了养护成本与人工风险。

参考文献

- [1]安康.高速公路预防性养护技术研究[J].工程建设与设计, 2023 (10) : 204-206.
- [2]黄彦堂.预防性农村公路养护在现代农村公路养护中的应用[J].运输经理世界, 2023 (12) 150-153.
- [3]谢志雄.公路桥梁维修及预防性养护研究[J].运输经理世界, 2023 (9) : 111-113.