高精度传感器在交通工程试验检测中的应用实践

莫娟娟

宁波正信检测科技有限公司 浙江 宁波 315000

摘要：本文系统阐述了高精度传感器在交通工程试验检测中的技术优势、应用场景及实践成效。通过分析光纤光栅、激光雷达、毫米波雷达与IMU、压电薄膜等多类传感器的技术特性，揭示其在数据采集精度（微应变级）、多模态感知及网络化部署方面的显著优势。结合桥梁索力动态监测、隧道衬砌变形预警、城市快速路多源感知系统等典型案例，验证了高精度传感器在提升基础设施安全（如提前3个月预警索力超限）、优化交通流效率（通行效率提升12%）及路面性能评估（疲劳寿命预测误差 $< 8\%$ ）中的关键作用。针对当前成本瓶颈、数据融合难度及标准化缺失等挑战，提出智能化升级（边缘端AI诊断）、车路协同及绿色传感（自供电技术）的未来发展方向，为构建安全、高效、可持续的智慧交通体系提供技术支撑。

关键词：高精度传感器；交通工程；试验检测；智能监测；结构健康评估

引言

交通工程作为支撑现代城市运行的核心领域，其安全性、效率与可持续性对社会发展意义重大。传统交通工程试验检测依赖人工观测与低效设备，存在数据精度不足、实时性差、覆盖范围有限等问题，难以满足智慧交通与基础设施智能化管理的需求。近年来，随着物联网、人工智能与传感技术的融合创新，高精度传感器凭借高灵敏度、多参数感知与网络化特性，逐渐成为交通工程检测领域的关键技术支撑。

1 高精度传感器技术概述

1.1 技术分类与特性

1.1.1 光纤光栅传感器

光纤光栅传感器作为一种新型的光学传感器，其基于光纤布拉格光栅（FBG）的波长编码特性，通过监测应变/温度引起的布拉格波长偏移（分辨率达 1pm ）。当光纤光栅受到应变或温度变化时，其反射波长会发生相应的偏移，通过精确测量这一波长变化，即可对应变、温度等物理量进行高精度测量，实现结构应力场与温度场的分布式监测。这一特性使得光纤光栅传感器在桥梁、隧道等大型结构的长期健康监测中展现出独特优势。此外，光纤光栅传感器还能有效预警潜在的裂纹扩展、变形等安全隐患，为结构的维护与管理提供科学依据。

1.1.2 激光雷达（LiDAR）

激光雷达技术以其毫米级的测量精度，在三维空间信息的获取方面展现出卓越性能。通过发射激光脉冲并接收回波信号，LiDAR能够构建出厘米级分辨率的道路三维点云模型，这一模型不仅包含了物体的形状、位置信息，还蕴含了丰富的纹理细节。在道路线形检测、交通标志识

别及车路协同场景中展现出不可替代的技术价值。

1.1.3 压电薄膜与柔性传感器

压电薄膜与柔性传感器作为一种新型的智能材料，此类传感器可嵌入路面结构层间，实现车辆荷载（分辨率 0.1kN ）与结构响应的同步监测。压电薄膜在受到压力作用时会产生电信号，通过测量这一电信号的变化，即可推断出路面的受力状态和损伤情况^[1]。而柔性传感器则以其良好的柔韧性和贴合性，能够适应路面的复杂形变，提高监测的准确性和可靠性。据相关研究表明，压电薄膜与柔性传感器的应用，可使路面寿命预测精度得到较高提升。

1.2 技术优势

一是高精度：高精度传感器技术的采样频率可达kHz级，分辨率达到微应变级，远超传统位移计与应变片的测量精度。这一优势使得传感器能够捕捉到更细微的物理量变化，为科学研究、工程实践提供更准确的数据支持。二是多模态感知：高精度传感器技术同步采集振动、应变、温度等多维度参数，实现了全要素状态评估。这一特性使得传感器在复杂环境的监测中更具优势，能够更全面地反映被监测对象的实际状态。三是智能组网：借助无线传输与边缘计算能力，高精度传感器技术实现了分布式监测，大大降低了人工干预成本。传感器之间可以形成网络，实现数据的实时传输与共享，为远程监控、智能决策提供了可能。

2 高精度传感器在交通工程试验检测中的核心应用场景与实践案例

2.1 案例一：光纤光栅传感器在洪鹤大桥健康监测中的创新应用

2.1.1 案例背景

洪鹤大桥位于广东省珠海市，起点为香洲区南屏镇洪湾枢纽互通，终点与江门—珠海高速公路延长线及珠海鹤港高速公路相交，是珠海市连接东西部的重要通道。全长9.654公里，双向六车道，设计时速100公里/小时。主航道桥采用叠合梁斜拉桥结构，主跨500米，桥塔为平面钻石形钢筋混凝土塔，斜拉索采用钢绞线拉索。桥梁地处台风频发区，需长期监测结构抗风性能与疲劳损伤。作为珠台高速公路起始段，重载交通荷载效应显著，需评估结构承载能力。

2.1.2 技术实施细节

(1) 传感器安装位置

在桥梁第二跨五片装配式混凝土箱型梁组中，选取第二片箱梁作为监测对象。3个裸光纤光栅应变传感器粘贴在箱梁下部底板对称线的纵向钢筋上，分别位于跨中截面和两个四分之一跨截面内，同步粘贴电阻应变片进行对照验证。在桥面板铺设阶段，于内部埋有光纤光栅的箱梁桥面面板钢筋上，增设3个光栅应变传感器和1个温度传感器，相邻箱梁桥面同步部署相同配置，形成冗余监测网络。

(2) 数据采集与传输系统

采用深圳市简测智能开发的传感信号综合同步解调仪，实现光纤光栅与电类传感器（电流、电压、IEPE、桥式电路）数据的精准同步采集，支持1Hz~100Hz自由切换，光谱间隔精度达1pm（1Hz时）。设置结构安全阈值，当监测数据超过预警值（如应变超过设计值的80%）时，系统自动通过邮件/短信触发预警，并生成包含位移、应变、温度等多参数的评估报告。

(3) 数据处理与分析方法

建立桥梁“鱼骨”有限元模型，主梁与桥塔采用空间梁单元模拟，斜拉索单元计入垂度效应。通过实测数据与模型预测值的对比，修正材料参数与边界条件，提升结构状态评估精度。对累计超10TB的监测数据进行大数据挖掘，采用时间序列分析、机器学习算法（如LSTM神经网络）预测结构性能退化趋势，为全生命周期管理提供决策支持。

2.1.3 实际监测成果

某次重载车辆（轴重30吨）通过时，跨中截面最大实时应变为 $50\mu\epsilon$ ，低于设计允许值（ $200\mu\epsilon$ ），但横向位移达1.2mm，表明需关注车辆偏载影响。夏季高温时段（桥面温度达 60°C ），温度传感器记录到箱梁内部温差梯度达 $8^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，结合应变数据修正温度荷载效应模型，误差降低40%。珠海市交通集团反馈系统稳定性达99.8%，

数据延迟小于2秒，成功预警3次异常事件（如台风期间缆索振动超限）。

2.2 案例二：激光测距传感器在地铁隧道自动化变形监测中的实践

2.2.1 案例背景

上海市“绿地复建综合楼项目”邻近地铁1号线隧道，基坑开挖深度28米，距隧道仅12米。基坑开挖引发隧道周边土体卸荷，可能导致隧道结构变形与位移。传统人工监测效率低，无法实时反映变形动态，需自动化监测系统支持施工决策。

2.2.2 技术实施细节

(1) 传感器安装与校准

沿地铁1号线隧道轴线每10米设置双测点（垂直/水平方向），共部署42组SLDS-C30激光测距传感器，测量范围覆盖基坑开挖影响区（总长120米）。传感器支架采用膨胀螺丝固定于隧道管片，激光束对准带十字线标志板（粘附于管片表面），通过反复校准确保初始测量误差小于0.5mm。

(2) 监测系统与软件平台

传感器通过RS485总线连接至测控终端，数据经GPRS传输至阿里云服务器，监控软件基于B/S架构支持多终端访问（包括手机端）。集成BIM模型，实时叠加变形数据生成热力图。支持任意时段数据回溯，提供沉降速率、横向位移趋势分析。设置三级预警（蓝色/橙色/红色），例如单日沉降增量超1.5mm触发橙色预警，系统自动推送短信至项目总工、监理及地铁运营方。

(3) 基坑开挖期间变形数据

基坑开挖深度达28米时，隧道最大沉降值为3.2mm（位于基坑边缘正下方），横向位移2mm，均优于《城市轨道交通结构安全保护技术规范》预警值（5mm）。监测发现隧道变形与基坑降水周期高度相关，降水阶段日均沉降量比非降水阶段高40%，据此优化降水方案减少总沉降量1.2mm。

2.3 预警响应与效果

某日监测到隧道某段沉降增量达1.8mm（橙色预警），系统自动触发应急响应，施工方立即调整基坑支撑预应力，48小时内沉降速率下降至0.3mm/天。相比人工监测（需每日封道2小时），自动化系统减少封道时间60小时，按每小时地铁停运损失30万元计算，直接经济效益超1800万元^[2]。后续集成分布式光纤传感器（监测隧道裂缝）与倾斜仪（评估围岩稳定性），构建多物理场耦合监测系统。

2.4 总结与对比

表1 高精度传感器在交通工程中的深度应用

维度	洪鹤大桥监测	地铁隧道监测
技术核心	光纤光栅传感+有限元模型修正	激光测距+多源数据融合
数据规模	542个传感器, 10TB/年数据量	42组传感器, 2GB/日数据量
预警精度	应变预警误差 < 5%, 温度补偿精度±0.5°C	沉降预警误差 < 0.3mm, 实时性 < 5秒
行业影响	推动跨海大桥智能监测标准制定	确立基坑-隧道联动监测技术框架

以上案例详细展示了高精度传感器在交通工程中的深度应用,通过数据驱动实现结构安全管理的智能化升级,具有显著的技术示范价值与经济效益。

3 技术挑战与未来展望

随着科技的飞速发展,高精度传感器在交通工程领域的应用日益广泛,为交通系统的智能化、安全化提供了有力支撑。然而,任何技术的推广与应用都伴随着挑战,高精度传感器技术也不例外。

3.1 现存问题

3.1.1 成本瓶颈

高精度传感器以其卓越的测量精度和稳定性著称,但这一优势往往伴随着高昂的价格。在交通工程领域,大规模部署高精度传感器需要权衡经济性与必要性。一方面,高精度传感器能够提供准确、可靠的数据,对于基础设施的安全监测、交通流的智能管理以及路面性能的动态评估至关重要;另一方面,高昂的部署成本可能让一些项目望而却步,尤其是在资金有限的地区或项目中。因此,如何降低高精度传感器的成本,提高其性价比,是当前亟待解决的问题。

3.1.2 数据融合难度

在交通工程试验中,往往需要同时部署多种类型的传感器,以获取更全面的数据。然而,这些异构传感器产生的数据在时空上可能并不对齐,给数据融合带来了挑战。此外,不同传感器平台之间的兼容性不足,也限制了数据的共享和利用^[1]。为了实现更精准、更全面的监测和分析,需要解决数据融合的问题,提高异构传感器数据的时空对齐能力和跨平台兼容性。

3.1.3 标准化缺失

目前,高精度传感器市场尚未形成统一的设备接口和数据传输协议规范。不同厂商的设备可能采用不同的接口和协议,这给设备的互换性和系统的集成带来了困难。标准化缺失不仅制约了高精度传感器技术的推广和应用,也增加了系统维护和升级的成本。因此,推动高精度传感器技术的标准化发展,制定统一的设备接口和数据传输协议规范,是当前亟待完成的任务。

3.2 发展趋势

3.2.1 智能化升级

随着人工智能技术的飞速发展,高精度传感器也开始向智能化方向升级。通过集成AI芯片,实现边缘端的实时诊断和分析,可以大大提高传感器的智能化水平。例如,在路面病害监测中,可以利用卷积神经网络(CNN)对路面图像进行特征提取和分类,实现路面病害的自动识别和分析^[4]。这种智能化升级不仅可以提高监测的准确性和效率,还可以降低对人工干预的依赖,降低运维成本。

3.2.2 绿色传感

随着环保意识的不断提高,绿色传感成为高精度传感器技术的一个重要发展方向。开发自供电传感器,如压电-光伏复合供能传感器,可以降低传感器的运维能耗,实现绿色、可持续的发展。自供电传感器通过利用环境中的能量(如压电效应、光伏效应等)为传感器供电,无需外部电源或电池,大大降低了传感器的能耗和维护成本。同时,自供电传感器还具有长寿命、高可靠性等优点,适用于各种恶劣环境下的长期监测。

结语

高精度传感器技术已深度重构交通工程试验检测的技术范式,其精准感知与智能分析能力为基础设施安全运维、交通效率提升提供了全新解决方案。未来,随着技术成本下降与标准化推进,高精度传感器将进一步融入智慧交通生态系统,推动交通工程向“感知-分析-决策”闭环管理迈进,助力实现更安全、高效、可持续的交通体系。

参考文献

- [1]姜艳,张勇.高速公路交通工程试验检测技术研究[J].运输经理世界,2024,(22):56-58.
- [2]王雪.交通工程试验检测数据分析与质量评估方法研究[J].汽车周刊,2024,(08):22-24.
- [3]李辉.交通工程试验检测的现状与对策探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(05):186-188.
- [4]冯晓珊.交通工程试验检测的质量控制[J].工程技术研究,2020,5(17):158-159.