

道路桥梁工程施工控制中的监测应用分析

陈才

南充职业技术学院土木与建筑工程学院, 四川 南充 637131

DOI:10.61369/ERA.2026090008

摘 要 : 基于传感网和数据通信融合智能分析方法, 形成 “感知 – 传输 – 判定” 的智能化闭环系统, 在道路桥梁工程的质量检测中实现了从事后应对到事前预防的转变; 该文主要介绍了基于智能化监控技术对变形进行实时监控、性能指标实时评价以及安全监控、环境监控、数据分析与报警等功能。体现出其对提高建造精度、预警风险问题以及优化管理流程等方面的显著成效; 同时指出智能监测仍面临着技术整合、数据质量、造价成本及管理协同等方面的问题并提出标准化体系构建、循序渐进实施等解决路径。综上所述, 尽管前期投入成本较高, 但从全寿命周期考虑, 可以有效降低质量事故的概率以及维护成本, 相信未来必将与 5G / AI / 数字克隆等高新技术紧密结合, 引领路桥建管领域质控水平向更高层次发展。

关 键 词 : 智能检测; 道路桥梁建设; 品质管理; 感应器; 数字孪生; 预警系统

Analysis of Monitoring Applications in Construction Quality Control for Road and Bridge Projects

Chen Cai

School of Civil and Architectural Engineering, Nanchong Vocational and Technical College, Nanchong, Sichuan 637131

Abstract : By integrating sensor networks and data communication with intelligent analysis methods, this study establishes a closed-loop intelligent system featuring "perception-transmission-evaluation," enabling a shift from post-event response to proactive prevention in quality inspection of road and bridge projects. The paper details how intelligent monitoring technologies enable real-time deformation tracking, continuous performance evaluation, safety monitoring, environmental surveillance, data analysis, and alarm systems, demonstrating significant benefits in enhancing construction precision, early risk detection, and process optimization. However, challenges remain in technological integration, data quality assurance, cost management, and collaborative governance, prompting recommendations for standardized frameworks and phased implementation strategies. Despite initial high costs, this approach effectively reduces quality risks and maintenance expenses over the entire lifecycle. It is poised to integrate seamlessly with cutting-edge technologies like 5G, AI, and digital cloning, driving quality control standards in road and bridge construction management to new heights.

Keywords : intelligent detection; road and bridge construction; quality management; sensor; digital twin; early warning system

一、智能监测技术概述

(一) 监测模式

基于传感器网络、数据通信和智能算法的智能检测技术构筑了“感知 – 传递 – 决策”循环系统的核心框架, 实现了对项目状况的即时察觉及持续评价。从物理角度来看, 通过分散式的传感器组网 (例如光纤光栅探测器、微机电系统加速计等) 可以获取多维度的物理参数, 如变形、振动速度等信息。

所谓 “三级分析逻辑”, 即按照 “临界点报警 – 发展过程预报 – 根源追溯” 的思路开展技术处理方法。“临界点” 是指达到某个指标阈值后触发第一级报警; 通过时程分析可识别风险的发展进程, 通过贝叶斯网络可识别风险的根源, 通过对高速公路桥

梁监测系统振动频谱变化进行。提前 2 天发现模板支撑架出现松动苗头, 变事后处理为主动预防, 实现质的飞跃。

(二) 在土木工程中的应用进展

在智能化监测方法上也从理论走向了实践应用, 并具有全要素、全过程的特点。以超高层为例, 上海中心大厦采用光纤光栅传感技术测得压力值, 布设了 1200 多处监测点, 对 632m 高程的超高层建筑物竖向沉降以及风振响应进行连续观测, 其精度达到 0.01% FS 的水平, 同时基于 BIM 技术将实时的监测结果进行关联分析实现了首次预纠正。

港珠澳大桥隧道施工中使用分布式声波传感技术 (das) 对管节的错位进行监测, 并辅以流体压力传感器组成的 6 自由度监测体系, 实现了沉管对接精度达到 3mm 及提高 80% 的工作效率。

在边坡稳定监测方面：成昆复线采用北斗高精度定位技术和 InSAR 遥测技术布置了北斗监测站52处、微型气象仪12台并建立边坡位移与降雨量和地下水的关系模型，成功预报了3次滑坡发生，水平位移监测精度为0.5mm/a。

随着桥梁健康监测由单一的桥梁运行状态监测向全寿命健康监测转变，虎门二桥布设了包含索力变化和振动在内的12项指标共198个传感器节点。基于该类信息数据分析的需求可有效缩短边缘计算节点至数据传输的时间为200ms内，同时首次利用机器学习的方法对拉索PE保护层破损进行识别，精度高达92.3%。

二、路桥施工质量控制的关键环节

对于道路和桥梁施工来说，要想保证其施工质量，我们就必须要掌握全方面、全过程以及精确度高的监督和控制技术。

1. 建立动态监测系统，从而及时获取建筑体的压力值、位移值等相关信息，在大跨度桥梁施工中应该监测桥体的挠度，并且检测出临时支座受力情况。而对于智能化检测装置（如 光纤光栅 或 MEMS 传感器）能实现 μm 级精度，远超人工测量范畴。

2. 构建材料性能数据库：采用内置温度、湿度感应器及超声波探伤技术对材料进行全生命周期信息采集；应用内置 RFID 标签技术在滨海大跨度桥梁中完成预制构件混凝土强度发展规律与工期动态关联控制。

3. 构建多元异构的数据融合平台：利用 BIM + GIS 平台保证施工机具数据、环境数据、激光雷达扫描点空间位置及时间节点的一致性；杭州亚运项目采用 5G 边缘计算基站技术可对无人机巡检数据与设计模型进行实时比对分析，这样就将桥墩铅垂度偏差控制在 H/2500 范围内。

4. 智慧预警平台升级：运用图像识别技术监测高处作业工人安全带使用情况，结合北斗卫星进行电子围栏管理，山区梁桥工程可减少高处坠落事故发生率72%；运用深度学习对支架应力变形进行预测性评估，在8小时前发现局部失稳隐患。

三、智能监测在路桥施工中的具体应用

（一）结构变形实时监测

结构健康监测系统的应用目的就是采用高精度传感器以及自动化采集系统对桥梁墩台及桥梁关键部位（包括主梁）的位移、沉降和挠度毫米级速率进行跟踪检测；在斜拉桥主梁施工过程中，采用了分布式光纤传感技术（BOTDR），植入到混凝土箱梁中，并且利用全站仪完成自动化追踪测量，并对灌注过程中的温压及弹跳变化进行了监测，累计误差不超过 $\pm 0.3\text{mm}$ ；该系统每隔 5min 获取的三维定位数据将通过无线传输发送至 BIM 平台以实现可视化分析，超限后报警提示。

针对环境温度对监测结果的影响，跨海大桥采用温度-形变相关性模型结合 Kalman 滤波法消减因昼夜温差产生的 2 ~ 3mm 量级测值漂移，保证了数据的准确性。

（二）材料性能在线检测

采用光纤光栅传感技术、超声波探伤仪等在线监测手段，可对混凝土强度变化情况、钢筋锈蚀状况、沥青混合料温度等信息进行实时采集并处理。如跨海大桥采用分布式光纤传感系统用于大体积混凝土水化热监测控制其内外温差 $\leq 2^\circ\text{C}/\text{m}$ ，进而避免出现由于温度太高或者太低而产生的裂缝。另外，在进行钢构桥梁施工的过程中，还可以借助于电感测量的方式了解到钢筋保护层厚度的变化情况，并且精确程度为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，相对比传统的人工检测方式来说能够提升工作效率80%。

沥青路面施工中应用红外热成像技术和介电率测试设备相结合形成了质量反馈回路，沪陕高速改扩建工程采用热红外影像检测发现摊铺温度为 15°C 的温度梯度变化并据此优化压实工艺，提高压实度 12%。智能型石料技术能够对混凝土受力进行动态检测，并且埋置式压电陶瓷传感器可对养生龄期为28d的压力值的变化情况进行监测，在桥墩柱部位的应用效果显示，早期应力集中区与后期裂缝位置吻合度达到92%。

（三）施工安全与环境监控

关键数据用于辅助做出施工安全决策，这是多种传感器和设备提供的重要信息，是智能监测创新方法的结果。例如，内置 IMU 的安全帽能够识别佩戴者的姿态并报警，当用户跌倒或碰到障碍物时；采用 UWB 的定位技术可记录人员位置。一旦靠近危险区域就会发出声光警报；在部分大跨度桥梁施工中已成功避免多起高处坠落事故发生。

在大型机械设备监测方面，塔机所安装的倾斜仪、力矩限制器可以将现场信息传递回来，当其超过限值时会给出相应的停机信号；高速公路上的一些跨线桥也在使用中发现了塔机基础下沉的风险，避免了塔机倒塌事件的发生。

环境监测包括：粉尘传感器及噪音传感器可以综合监测，如在城市立交桥施工中，粉尘监测设备配合自动喷雾装置，使得 $\text{pm}_{2.5}$ 浓度处于合格范围之内；噪音信息有利于安排作业时段，降低周边群众受影响程度。

对于山区桥梁来说，在进行施工的过程中可以利用微震监测网络以及边坡位移监测系统对地质情况进行提前预警，比如山区工程可以在72h内对边坡滑动情况进行预警，为人员和机械的撤离争取到时间；同时还可以利用水文监测系统对水文情况实现监控量测工作，包括水位以及流速等信息，保证工程施工在汛期期间也能够正常开展。

利用人工智能技术，实现智能视频分析，包括未佩戴安全帽、不规范动作等违规违章事件进行预警，并将报警信息推送给中心控制室屏幕展示。同时红外热成像摄像机可弥补传统视频监控存在的不足之处，在夜间同样发挥着重要的作用。由于 BIM 建筑模型是一个信息综合化的建筑模型，在这个平台上，相关工作人员可以直观地看到所负责工作的整体安全性如何，尤其对于一些大型桥梁建设来说，BIM 技术的应用更是将问题处理率提高至少60%。

（四）数据集成与预警系统构建

智能化监测的开展和落实是进行数据分析以及预警体系构建

的基础,在这一过程中所面临的主要技术难题即为多源异构实时数据的有效处理方法。通过物联传感装置获取建筑结构受力情况、位移情况、温湿度等物理量数据并结合 BIM 模型,能够产生立体可视化的数据映射功能。

本预警模型采用多层级预警机制,并基于较高阶次的智能算法进行建模。第一层预警机制是 3σ 控制图法,即超过其本身波动范围则报出黄色警戒;第二层则是基于 LSTM(Long Short-Term Memory)神经网络方法进行报警。此模型可识别时间序列信息,预测风险并产生黄色预警。城市桥梁工程中,可通过此平台分析混凝土浇筑温度场变化,在 12h 内预测出因温差引起的裂缝风险,给出养护方案改进建议避免质量事故的发生。

采用微服务架构的数据汇聚平台支持异构协议接入以及统一规范转换,在高速公路改扩建工程中接入北斗定位数据、无人机巡检照片、地磅称重等 12 个数据源,并通过 ETL 工具进行转换后存入时序数据库实现质量溯源功能。对预警响应进行分级处理,以手机短信提醒+声光报警+停工指令构成闭环管理流程。试验表明该复合监控体系可将质量缺陷响应效率提升 83%,整改成效提升 67%。

四、智能监测应用面临的挑战与对策

(一) 成本与管理协同难题

应用智能化监控技术的实施难度及运维管理协调困难较大。前期建设投入大,一座跨江大桥分布式光纤监测系统的建设投入超过 80 万元;后期运行维护成本高,我省高速公路桥梁群每年设备标定、软件升级等运行维护费用约占建设成本的 15%~20%。

机构之间的协调问题是体现在机构内部的机制及办事程序方面的问题:传统质量管理手段难以完全适用于智慧监管系统,当桥隧监测数据分析显示的结果与人工巡检不同时,就存在责任推诿;缺乏各机构间的信息共享途径;从业人员素质有待提升,在中部西部抽样调查中,会操作智慧监测设备的监测技术人员仅占 35%。

技术迭代带来隐性成本增长:如毫米波雷达等设备更新周期已降至 3~5 年,中字头单位在 2020 年部署的监控设备将在 2023 年报废;数据存储的成本显著攀升,如跨海通道项目每天产生的监测数据超过 200GB,云平台每年的服务费超 200 万元等。这是规模利用的成本障碍。

行业生态割裂造成管理深层矛盾。如 BIM 设计模型与建筑监控系统不统一标准,铁路桥施工需重新建模,成本占投资的 0.8%,保险公司未建立与智能化检测挂钩的保费调节机制等等,降低企业积极性。此外,地方性监管制度与全国统一的标准不兼容,导致 3 个省在建桥梁需采取不同监测方案,增加合规化成本等问题均须通过全产业链改造才能得到解决。

(二) 推广路径建议

突破成本制约的方式是循序渐进地进行:第一,将特殊桥型及地形条件复杂路段优先列为试点对象,在港珠澳大桥中采用的光纤分布式监测系统经工程验证之后,其仪器失效概率已降至不到 0.5%;第二,构建区域级监测设施共享服务平台,建议以“监测 MaaS(As a Service)”的模式来解决小微项目投入成本的问题,例如广西在 2022 年起推行桥隧监测设备租赁制度,将项目前期投入的成本压缩了近 2/3;最后是监测数据的资产化应用,纳入全生命周期成本中考虑。可参考的是美国 FHWA “Every Day Counts”计划中的监控数据估值方法。

五、结论

综上所述,本文认为在道路与桥梁施工过程中运用智能化检测对于工程质量管控的作用有如下几个方面:一方面,在具体实施的过程中,可以通过分布式光缆传感器来对混凝土灌注的温度场进行有效监测,监测误差为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$;借助 BIM(Building Information Model)(建筑信息化建模)技术及北斗卫星定位系统,将跨海大桥主塔垂直度偏差控制在设计规范 1/10000 的范围内;采用机器视觉作为裂纹识别系统工具后,较传统纯人工方式提高效率约 12 倍,并降低误判率至 3%。

参考文献

- [1] GB 50026-2020, 工程测量规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2020.
- [2] JGJ/T 181-2014, 建筑施工起重机械安全检测规程 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
- [3] 王伟, 李明. 智能传感技术在桥梁健康监测中的应用进展 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-15.
- [4] 刘强, 赵磊. 基于数字孪生的智慧工地质量管控体系构建 [J]. 施工技术, 2023, 52(8): 67-72.
- [5] 港珠澳大桥沉管隧道智能监测系统技术总结 [R]. 广东:港珠澳大桥管理局, 2019.
- [6] 虎门二桥结构健康监测系统设计及实施 [J]. 桥梁建设, 2022, 52(3): 45-52.
- [7] 上海中心大厦光纤光栅监测系统应用研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51(7): 88-94.
- [8] 成昆铁路复线边坡监测系统集成与预警实践 [J]. 铁道工程学报, 2022, 39(4): 102-108.
- [9] 杭绍台高速公路 5G+ 智能监测平台建设与应用 [J]. 公路交通科技, 2023, 40(2): 67-73.