

智能化监测技术在公路桥梁施工安全管控中的应用探讨

文 / 刘庆 云南交投公建隧道工程有限公司

摘要：智能化监测技术在公路桥梁施工安全管控中通过集成物联网传感器、无人机巡检、人工智能分析及数字孪生平台，构建了覆盖结构应力、位移、环境因素等多维参数的实时感知体系。该技术能够动态捕捉施工过程中的潜在风险，同时，无人机与智能传感技术协同作业，显著提升了对高边坡、深基坑等危险区域的监测精度与效率，推动安全管理从被动响应向主动预警转型，为工程质量与施工人员安全提供核心保障。基于此，本篇文章对智能化监测技术在公路桥梁施工安全管控中的应用进行研究，以供参考。

关键词：智能化监测技术；公路桥梁；施工安全；应用要点

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.045

引言

随着公路桥梁工程向大跨度、高墩柱及复杂地质条件方向发展，传统依赖人工巡检和经验判断的安全管理方式难以应对隐蔽工程多、动态变化快的施工风险。智能化监测技术通过布设光纤光栅传感器、北斗定位系统等设备，实现对桥梁应力、变形及机械运行状态的毫米级实时监控。该技术体系将施工安全管控从碎片化、滞后性的管理模式升级为全流程、数据驱动的精准确控模式，成为现代交通基础设施建设的重要支撑。

一、智能化监测的背景

智能化监测兴起的时代背景源于传统监测手段在应对日益复杂的环境问题、基础设施安全管理以及工业生产效率提升时显现的局限性，这些传统方法往往存在数据更新滞后、覆盖范围有限及分析深度不足等问题。随着物联网、大数据、人工智能等前沿技术的迅猛发展，监测技术自身经历了从单纯的数据采集工具到具备智能分析与决策支持能力的“智能体”的深刻变革。同时，全球对环境保护、公共安全与资源高效利用的重视程度不断提升，各国政府也通过政策规划积极推动数字化治理体系建设，共同驱动了监测模式向实时化、精准化、智能化方向演进，以满足现代社会治理与产业升级的迫切需求^[1]。

二、公路桥梁施工安全管理的重要性

公路桥梁施工安全管理是保障工程建设顺利推进的基石，其核心重要性体现在三个方面。它通过规范流程和预控风险，直接保障施工人员的生命安全，避免伤亡事故的发生；它有助于优化资源配置，减少因安全事故导致的工期延误与成本超支，从而确保项目按计划高质量完成；最终，它维护了公共基础设施的长期安全与稳定，对社会经济的和谐发展具有深远意义。

三、智能化监测的技术体系

智能化监测技术体系（图1）的四个层级构成了一个紧密协作的闭环系统。感知层作为起点，负责采集物理世界的原始数据；传输层随即构建起可靠的数据通道，确保信息高效、安全地流动至平台层；平台层作为核心，对汇聚的海量数据进行深度处理与智能分析，将其转化

为有价值的洞察；最终，应用层将这些洞察转化为具体的业务指令与交互服务，直接支撑用户的决策与行动。这个链条并非单向，应用层产生的反馈可指导感知层优化数据采集策略，形成“感知-传输-处理-应用-优化”的智能闭环，从而协同实现监测目标。

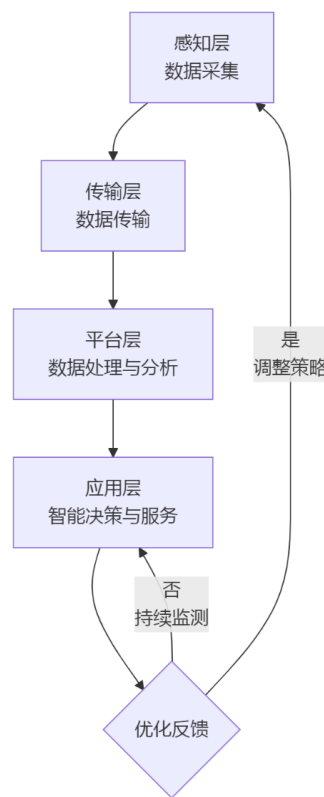


图1 智能化监测技术体系的流程图

（一）感知层

感知层是智能化监测技术体系的神经末梢与数据源头，其核心功能在于通过部署各类传感器、射频识别标签与智能终端，实现对物理世界物理量、标识及状态信息的精准采集与初步转换。该层级关键技术涉及高精度传感器技术，例如监测结构应变的光纤光栅传感器精度可达 $\pm 1 \mu \epsilon$ ，探测环境参数的温湿度传感器采用 MEMS 工艺将体积缩小至 1 立方毫米；同时融合 RFID 与二维码用于目标识别定位，并借助边缘计算网关对多源异构

数据进行本地融合与冗余消除，从而为上层分析决策提供高可靠性、低延迟的原始数据支撑^[2]。

（二）传输层

传输层是智能化监测技术体系中承上启下的数据流通枢纽，其核心职能是依托有线与无线通信网络，将感知层采集的各类监测数据安全、可靠、低延迟地传输至平台层。该层级采用异构混合组网策略，针对不同场景需求选用 5G 如端到端延迟可低于 200 毫秒、NB-IoT、LoRa 如开阔地带传输半径达 15 公里等高带宽或低功耗广域网技术，并遵循 MQTT 等轻量级物联网协议以优化传输效率，同时集成数据加密与链路冗余机制，确保海量监测信息在复杂环境下的高效、稳定流转。

（三）平台层

平台层是智能化监测技术体系的数据中枢与智能核心，承担着对感知层采集并经传输层送达的海量多源异构数据进行汇聚、存储、处理分析与智能决策的关键任务。该层级基于云计算架构和分布式存储技术如 Hadoop、Spark 构建高性能数据处理引擎，集成数据清洗、特征提取、模式识别以及机器学习与深度学习算法如 CNN、LSTM，实现对监测目标的异常检测、趋势预测与根因分析，并通过可视化系统及 API 接口向上层应用提供实时分析结果与决策支持，最终形成“数据-信息-知识-决策”的闭环智能支撑能力。

（四）应用层

应用层是智能化监测技术体系的顶层交互界面，负责将下层处理后的数据转化为面向特定场景的可操作指令与直观服务。该层级通过部署基于机器学习与深度学习的分析模型如卷积神经网络 CNN、长短期记忆网络 LSTM，实现对设备故障或环境异常的预测性维护，其预警响应时间可控制在毫秒级。同时，应用层借助 RESTful API 接口与微服务架构，向用户提供可视化监控大屏、多终端 APP 及决策支持系统等交互服务，最终完成从数据到智能决策的价值转化^[3]。

四、智能化监测技术在公路桥梁施工安全管控中的应用分析

（一）结构安全与施工质量监控

1. 应力应变监测

应力应变监测是评估工程结构受力状态与安全性能的关键技术，其通过布设电阻应变片、光纤光栅传感器或振弦式应变计等传感设备，直接测量结构在荷载、温度等因素作用下产生的微应变如单位通常为微应变 $\mu\epsilon$ ，并依据胡克定律等物理原理将应变值转换为应力值。例如，振弦式应变计的测量范围可达 $\pm 1500 \mu\epsilon$ ，测量精度不低于满量程的 0.1%...，频率测量范围覆盖 400 赫兹至 3800 赫兹。该技术能实时捕捉结构关键部位如节点、焊缝、高应力区的应力变化，为判断结构是否处于弹性工作状态、识别应力集中及预警潜在损伤提供定量依据，广泛应用于桥梁、大坝、钢结构等工程的安全监控。

2. 线形与位移监控

线形与位移监控是确保桥梁施工精度与安全的关键技术，其核心在于对桥梁结构在施工过程中产生的高程变化与轴线偏位进行毫米级实时测量。该技术通常采用高精度全站仪与电子水准仪构成测量控制网，并辅以 GPS 全球定位系统进行大型桥梁的宏观位移追踪，例如对主梁挠度与桥墩沉降的监控精度需控制在允许偏差范围内。近年来，三维激光扫描技术能快速获取海量点云数据，其与全站仪测量结果的平均差值可控制在规范允许的相邻点间相对点位测量误差内，有效支撑了线形控制的精细化决策^[4]。

3. 智能压实与温控

智能压实与温控是保障大坝及道路工程质量的闭环控制系统，其核心在于通过传感器网络与智能算法实现施工过程的精准调控。智能压实系统通过安装在压路机上的加速度传感器连续监测振动轮响应，结合卫星定位技术，以振动压实值等指标实时反馈碾压面的压实程度、均匀性与稳定性，并将压实度均匀性提升至 98%。智能温控系统则依托埋设于混凝土内部的温度传感器，采用 PID 算法对通水冷却的流量与温度进行自动控制，使温度控制精度达到 0.1°C ，并结合云仿真平台计算最优通水策略，有效抑制大体积混凝土内部最高温度，实现“无裂缝”浇筑。两者共同构成“感知-分析-决策-执行”的智能闭环，显著提升工程质量的均质性与可控性。

（二）人员与机械设备安全管控

1. 人员不安全行为识别

人员不安全行为识别是智能安全监控系统的核心技术，其通过部署于作业场景的摄像头实时采集视频流，并基于改进的 YOLOv5 等深度学习目标检测模型进行行为分析，该模型通过引入注意力机制与图像几何变换，能够在对不安全行为测试集中实现超过 98% 的精确率与 99% 的召回率。系统可精准识别未规范佩戴安全帽、反光衣等防护装备，以及在岗睡觉、违规吸烟、攀爬倒地等典型异常行为，并立即触发分级预警，从而实现从被动监管到主动预警的转变，显著提升现场安全管理效能^[5]。

2. 机械设备安全监控

机械设备安全监控系统是基于传感器网络、信息处理单元与控制输出单元的集成化解决方案，其通过对起重机械等设备的起重量、起重力矩、幅度、风速等关键参数进行实时采集与逻辑分析，并依据预设阈值如系统综合误差不大于 5% 实现超限预警与自动控制，同时集成视频监控与数据存储功能，形成对设备运行状态的全方位智能防护体系。

3. 智能安全帽与巡检车

智能安全帽与智能巡检车共同构成了现代工程现场智能化安全管控的核心装备。智能安全帽（图 2）作为前端感知节点，集成了生命体征监测、近电感应、有毒气体检测等多种传感器，并借助北斗与 UWB 技术实现厘米级人员

定位，其内置的 AI 图像识别算法可实时分析作业场景，准确率超过 95%。智能巡检车则作为移动监测平台，搭载高清摄像机与 AI 边缘计算终端，能够在 60 公里时速下精准识别路面裂缝、坑槽等病害，对 2 毫米裂缝的识别准确

率高达 98%，并通过 5G 网络将数据实时回传至云端管理平台。二者通过物联网与云边协同技术联动，实现了对人员状态、作业环境与设施运行情况的全面感知、智能预警与闭环管理，显著提升了安全管理效率。

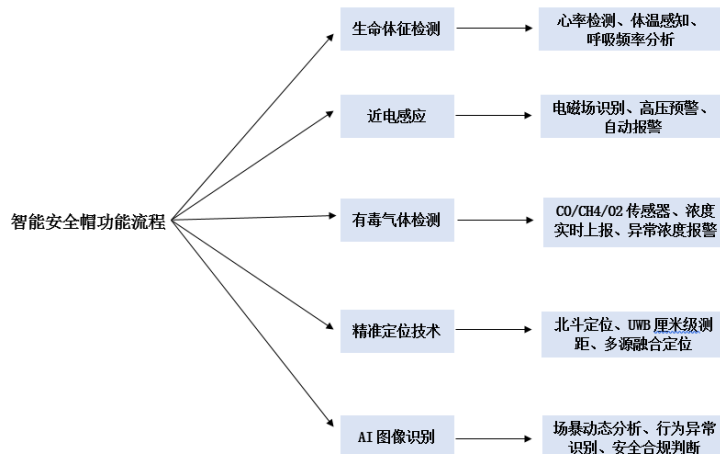


图 2 智能安全帽功能流程图

（三）施工环境与重大风险源监控

1. 无人机智能巡检

无人机智能巡检系统通过集成无人机本体、多类型传感器、自动机场、飞行控制算法与 AI 图像分析平台，构建了集数据采集、传输、分析与决策于一体的闭环作业体系。该系统依托 RTK 定位与三维点云建模技术实现厘米级精度的自主飞行，可搭载红外热像仪、激光雷达等载荷，以每秒数米的巡航速度对目标进行多角度探测，其内嵌的深度学习算法能自动识别设备缺陷与环境异常，检测准确率可达 98% 以上，同时通过 5G 网络实现巡检数据的毫秒级回传与云端处理，显著提升巡检作业的精度与效率。

2. 深基坑、高支模监测

深基坑与高支模监测是针对危险性较大的分部分项工程的核心安全管控手段，其通过布设高精度传感器网络对关键参数进行实时采集与智能预警。深基坑监测主要关注支护结构顶部水平与竖向位移采用 GNSS 与静力水准仪，精度达毫米级、深层土体位移如使用固定式测斜仪、支护结构内力如振弦式钢筋应力计及周边环境沉降，并依据变形速率与累计值进行蓝黄红分级预警。高支模监测则重点监控架体整体水平位移如激光位移传感器、立杆轴力如环形轴力传感器，量程 0-500kN 及杆件倾角，在混凝土浇筑期间监测频率需加密至每 5 分钟一次甚至每秒一次，确保架体稳定性始终受控^[6]。

3. 桥墩防撞与水文监测

桥墩防撞与水文监测是保障跨航道桥梁安全运营的关键技术体系，其核心在于通过集成雷达水位计、流速仪、AIS 如船舶自动识别系统及高清视频监控等传感器，实时采集桥区水域的水位、流速、降雨量等水文参数以及船舶的航向、航速、身份信息。该系统能够基于多源数据融合与数字孪生技术，对船舶的偏航、超高、超速

等风险行为进行智能识别与轨迹预测，并通过 VHF 如甚高频语音播报、LED 显示屏发布、声光报警等多重方式，对距离桥墩 500 至 1000 米范围内的风险船舶进行主动预警，从而有效规避碰撞事故。与此同时，智能防撞装备内部的传感器可持续监测其姿态与受力状态，数据通过云平台进行分析，为桥梁的长期安全评估与维护决策提供支持^[7]。

结语

总而言之，智能化监测技术的深入应用已显著提升公路桥梁施工安全的可控性与可预测性，其价值体现在隐患早期预警、资源优化配置及全生命周期数据积累等方面。未来，需进一步突破传感器耐久性、数据协议标准化等瓶颈，深化数字孪生模型与人工智能算法的融合，推动安全管控向自主决策、自适应优化的高阶阶段演进。

参考文献

[1] 陈俊峰. 公路桥梁隧道工程智能化建设管理要点研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (31): 85-87.
 [2] 高畅. 公路桥梁施工质量控制与新技术的作用分析 [J]. 运输经理世界, 2024, (30): 102-104.
 [3] 黄义龙. 公路桥梁机械设备的智能化发展趋势研究 [J]. 现代工程科技, 2024, 3(18): 13-16.
 [4] 蔡平. 公路桥梁施工中机械设备的智能化升级路径研究 [J]. 现代工程科技, 2024, 3(17): 37-40.
 [5] 唐浩凌. 公路桥梁施工技术与流程优化研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (12): 100-102.
 [6] 任壬, 王健. 公路桥梁隧道工程项目智能化建设管理措施探究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (04): 170-172.
 [7] 陈维华, 刘雁飞. 公路桥梁施工质量控制与技术应用分析 [J]. 运输经理世界, 2023, (34): 82-84.