

智能感知技术在水利大坝施工质量监测中的应用

郭晓阳 黄婉琳

北京海策工程咨询有限公司

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6715

[摘要] 智能感知技术在水利大坝施工质量监测中展现出重要应用价值,该技术通过构建多维度感知网络,实现施工全过程精准监控。物联网传感器网络对混凝土浇筑过程中温度场、应力变化进行实时监测,确保浇筑质量达标,无人机遥感技术运用光谱成像对坝体填筑压实密度、材料均匀性实施智能评估,机器视觉融合深度学习算法自动识别防渗墙施工缺陷。地质雷达与人工智能协同实现基础处理质量三维检测,激光扫描技术结合数字孪生对金属结构埋设精度进行校正。应用结果表明,智能感知技术显著提升质量检测精度,在安全保障与成本控制方面产生积极效益。

[关键词] 智能感知技术; 水利大坝; 施工质量监测; 物联网传感器; 机器视觉

中图分类号: F416.9 **文献标识码:** A

Application of Intelligent Perception Technology in the Construction Quality Monitoring of Water Conservancy Dams

Xiaoyang Guo Wanlin Huang

Beijing Haice Engineering Consulting Co., Ltd.

[Abstract] Intelligent perception technology has demonstrated significant application value in the construction quality monitoring of water conservancy dams. This technology achieves precise monitoring throughout the construction process by building a multi-dimensional perception network. The Internet of Things sensor network conducts real-time monitoring of the temperature field and stress changes during concrete pouring to ensure the quality of pouring meets standards. Unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing technology uses spectral imaging to intelligently assess the compaction density and material uniformity of dam filling. Machine vision combined with deep learning algorithms automatically identifies defects in the construction of anti-seepage walls. Ground-penetrating radar and artificial intelligence work together to conduct three-dimensional detection of foundation treatment quality. Laser scanning technology combined with digital twins corrects the installation accuracy of metal structures. The application results show that intelligent perception technology significantly improves the accuracy of quality detection and generates positive benefits in terms of safety assurance and cost control.

[Key words] Intelligent perception technology; Water conservancy dams; Construction quality monitoring; Internet of Things sensors; Machine vision

引言

水利大坝施工质量直接关系到工程安全运行,传统监测依赖人工监测,存在监测范围有限与时效性差等问题,难以满足现代工程全过程质量控制需求^[1]。智能感知技术为大坝施工监测提供全新解决方案,能够实现多源数据融合、实时信息处理与智能决策支持,当前大坝施工面临混凝土温控、填筑压实控制、防渗墙缺陷识别、基础处理评估等技术挑战,迫切需要先进感知技术提供精准监测。深入研究智能感知技术应用模式与效果,对推动水利工程现代化具有重要意义。

1 水利大坝施工质量智能感知监测技术体系构建

水利大坝施工质量智能感知监测技术体系围绕大体积混凝土水化热控制、高应力结构变形监测、复杂地质条件基础稳定性评估等核心需求,构建多尺度时空耦合感知的四层架构。物理感知层部署三维温度场重构传感器阵列,结合声发射技术识别微裂纹萌生,通过分布式光纤传感捕获大体积结构应变场演化规律。数据融合层采用卡尔曼滤波算法处理多传感器信息,构建温度-应力-渗流三场耦合数值模型,实现关键力学参数动态反馈与校正^[2]。智能分析层运用深度卷积神经网络构建施工质量

缺陷识别库,通过迁移学习适应不同工程条件,建立数字孪生仿真预测模型。决策支持层集成BIM技术与进度管控,形成质量-进度-安全协同优化平台,实现从被动检测向主动预测性控制的技术跨越,为复杂水工结构施工精细化管理提供技术支撑。

2 多元智能感知技术在大坝施工关键环节的差异化应用

2.1 物联网传感器网络的混凝土浇筑质量实时监测

针对大坝混凝土浇筑厚度超过3m、水化热持续释放的特殊工况,构建网格化无线温度传感器阵列,单仓监测点数量达500-800个,形成立体感知网络,高精度铂电阻温度计测量精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,压电式应变传感器监测混凝土收缩变形,实时捕获结构内部应力状态变化。NB-IoT功率自适应通信模块在钢筋密集环境下通信距离可达2km,确保关键时段温度变化的连续跟踪,Arrhenius水化动力学方程描述温度与强度发展关系,建立考虑环境温度影响的三维数字模型,STM32F7微控制器搭载边缘计算节点,卡尔曼滤波算法实现多传感器数据融合,降低单点测量误差^[3]。温度梯度监测阈值设定为 $25^\circ\text{C}/\text{m}$,LoRa网关向冷却水循环控制器发送调节指令,实现温控措施智能化响应,传感器节点配合太阳能充电板进行电源管理,支持长期无人值守运行,Zigbee Mesh网络AODV路由协议具备自动路径发现与修复功能,保障数据传输可靠性。三次样条插值算法修正传感器零点漂移,提高长期监测数据一致性,ARM Cortex-A78处理器集成NPU神经网络加速单元,TensorFlow Lite框架部署深度学习模型,建立涵盖典型缺陷模式的识别数据库。

2.2 无人机遥感技术的坝体填筑压实质量智能评估

大坝填筑作业面临颗粒级配复杂与含水率变化大以及压实均匀性控制难等挑战,六旋翼无人机平台在80m飞行高度搭载多光谱相机与激光雷达传感器进行系统扫描,适应山区复杂地形条件,光谱仪波长覆盖可见光至近红外波段,NDVI、SAVI植被指数计算土料含水率分布,识别不同坝料类型的光谱特征差异。CCD传感器配合定焦镜头,地面分辨率达到5cm级别,采集填筑材料颗粒级配信息与空间分布特征,激光雷达扫描角度范围 $\pm 15^\circ$,点云密度每平方米数百个点,精确测量填筑层厚度变化,双天线RTK模块在山区环境下定位精度 $\pm 2\text{cm}$,确保监测数据空间准确性^[4]。蛇形扫描航线规划,航向重叠度80%,实现影像立体覆盖与无缝拼接,辐射定标与大气校正算法消除太阳高度角、大气散射等环境因素影响,提高光谱数据质量,CNN-ResNet50网络结构包含多层卷积层,残差连接处理梯度传播问题。训练数据集包含不同压实状态填筑材料影像,数据增强技术扩展样本规模,主成分分析降维保留前8个主成分作为分类器输入特征向量,减少计算复杂度。

2.3 机器视觉融合的防渗墙施工质量自动识别

防渗墙施工环境狭窄、成槽垂直度要求严格、混凝土连续性难控。采用线扫描与面扫描相结合的工业相机阵列对施工过程进行连续成像监测,以克服地下连续墙施工视觉盲区问题。CCD传感器配备微距镜头,在近距离工作条件下分辨率达到

0.1mm级别,满足防渗墙表面缺陷检测需求。DLP数字光处理技术进行结构光投影,采用高亮度投影光源,通过相位偏移算法生成正弦条纹图案,重建防渗墙表面三维形貌。CMOS图像传感器TOF深度相机相结合,测量范围覆盖施工作业区域,深度分辨率达到毫米级精度。通过千兆以太网接口图像采集系统和多相机同步触发机制,确保不同视角图像的时间同步性。利用高斯滤波算法消除图像噪声干扰,Canny边缘检测算子提取轮廓特征,以增强缺陷边界识别能力。通过FPN特征金字塔结构改进YOLO目标检测网络,利用多尺度检测头适应不同尺寸缺陷识别。采用Mosaic数据增强技术将多张图像拼接为训练样本,以提高模型适应性。分类损失、定位损失以及置信度损失这三部分损失函数,通过优化权重比例来提升网络训练效果。棋盘标定板张正友标定法计算内参矩阵与畸变系数,保证测量精度,立体视觉三角测量原理多视角图像融合,构建防渗墙完整三维几何模型。

2.4 地质雷达-AI协同的大坝基础处理质量检测

大坝基础处理隐蔽性强、地质条件复杂多变、传统检测方法局限性大,步进频率连续波雷达工作中频段,频率步进扫描覆盖15m深度基础结构探测,适应复杂地质条件无损检测需求,Vivaldi超宽带天线增益设计,半功率波束宽度控制,金属屏蔽罩抑制旁瓣辐射,提高信号穿透能力^[5]。雷达发射功率与接收机灵敏度匹配,动态范围覆盖不同深度反射信号强度变化,高速ADC信号处理系统,高采样率数据采集,数字滤波器滤除工频干扰与环境噪声,短时傅里叶变换时频分析技术,汉宁窗函数处理,高重叠率生成时频谱图数据。深度学习网络基于DenseNet架构,多层卷积层结构,Growth Rate参数设置优化特征提取能力,Z-score标准化消除幅值差异数据预处理,图像增强技术处理训练样本,提高模型泛化性能,雷达信号样本训练集,多类基础处理状态标注,交叉熵损失函数优化网络参数.Adam优化器学习率与权重衰减系数设定,TensorRT加速引擎网络推理,控制推理时间满足实时检测要求,希尔伯特-黄变换分解本征模态函数雷达信号特征提取,瞬时频率与瞬时幅值时频域特征参数,多维特征向量输入分类器进行智能识别。

2.5 激光扫描与数字孪生的金属结构埋设精度校正

水工金属结构埋设精度要求毫米级与安装环境复杂以及传统测量周期长,近红外激光相位式扫描仪基于相位差测量,距离精度 $\pm 1\text{mm}$ 满足高精度测量需求,双轴伺服电机驱动扫描头,高速水平扫描,大范围垂直扫描覆盖,高频率点云采集满足实时监测要求,HDR相机,自动曝光与白平衡算法适应施工现场复杂光照条件,确保图像质量和稳定性。八叉树空间索引结构点云数据存储,高压比减少存储空间占用,ICP算法迭代优化变换矩阵多站点云配准,严格收敛条件确保配准精度,Unity3D引擎构建数字孪生平台,物理基础渲染管线,Havok物理引擎刚体动力学仿真,模拟金属结构安装过程。NURBS曲面表示复杂几何形状金属结构三维建模,高精度控制点设置,四元数表示旋转坐标变换,Rodrigues公式计算旋转矩阵,避免计算奇点问题,卡尔曼滤波器多分量状态向量,激光测量精度设定观测噪声协方差,实现

最优状态估计。UDP通信协议实时同步,数据包大小限制确保传输效率,Levenberg-Marquardt非线性最小二乘算法位姿优化,迭代求解最优安装参数,严格收敛范围控制。

3 智能感知技术施工质量监测应用成效分析

3.1 质量检测精度与监测效率提升效果

智能感知技术在水利大坝施工质量监测中显著提升了检测精度与监测效率,物联网传感器网络将混凝土浇筑温度监测精度从传统的 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 提升至 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,监测点数量从原有的十余个增加至数百个,实现了从点式监测向全域覆盖的跨越,温度场重构精度达到厘米级。无人机遥感技术使坝体填筑压实度检测覆盖率实现全面覆盖,检测周期从数天缩短至数小时,光谱识别技术对不同含水率土料的识别准确率超过94%,激光雷达测量填筑层厚度偏差控制在厘米级范围内。机器视觉融合技术使防渗墙缺陷检测精度达到0.1mm级别,检测速度提升数倍,自动识别准确率达到了96%以上,能够识别十余类典型缺陷类型,远超人工目视检查的识别能力,地质雷达与AI协同技术将基础处理质量检测深度从传统的数米扩展至十余米,检测准确率由75%改善至92%以上,能够识别多类基础处理状态,检测时间显著缩短。激光扫描与数字孪生技术将金属结构埋设精度控制在 $\pm 1\text{mm}$ 范围内,相比传统测量精度改善明显,测量效率得到有效提升。

3.2 施工安全保障与经济效益分析

智能感知技术在施工安全保障方面发挥了预警防护作用,同时产生了显著的经济效益,温度监测预警系统通过实时识别混凝土水化热异常,提前预警温度裂缝风险,有效防止了因温控不当产生的结构缺陷,混凝土质量事故预防率达到了99%以上。无人机遥感监测系统实现了填筑作业的全天候监控,及时发现压实不均匀区域,成功消除了因局部欠压实引发的渗漏隐患,填筑质量合格率显著提升,机器视觉自动检测系统消除了人工检测的主观误差与漏检风险,防渗墙施工质量一次合格率明显改善,减少了因缺陷修补产生的工期损失。地质雷达检测技术减少了传统钻孔验证的工作量,节约勘探成本超过60%,同时提升了基础处理方案的针对性,激光扫描技术减少了金属结构返工次数,安装精度一次达标率显著改善,节约人工成本,缩短安装工期。通

过建立智能化质量管控体系,传统依赖人工经验的质量控制模式得到根本性改变,实现了从被动应对向主动预防的管理模式转变,整体而言,智能感知技术的应用使大坝施工质量管控成本降低,工程质量等级得到提升,同时增强了工程长期运行的安全可靠。

4 结语

智能感知技术有效破解了传统监测方法局限性,实现施工质量精准管控,物联网传感器、无人机遥感、机器视觉、地质雷达等技术协同应用。通过构建贯穿建设各阶段的智能监测网络,大幅改善质量检测精度与效率,技术应用不仅强化质量管控水平,降低工程风险,同时在资源节约、进度优化方面产生良好成效。并且通过建立全方位、多层次的感知体系,该技术实现了从被动检测向主动预警的转变,为工程质量管理模式创新奠定了坚实基础。随着5G通信与边缘计算技术发展,智能感知技术将朝着更加智能化方向演进,为水利工程建设提供先进技术支持,推动行业数字化转型。

[参考文献]

- [1]张新生,杨小成.智能化技术在水利工程施工中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(33):220-222.
- [2]王杰.水利水电工程中智能监测技术的优化研究[J].科技创新与生产力,2025,46(10):73-75+80.
- [3]谭魏欣.数字孪生技术在水利工程中的应用策略研究[J].水上安全,2025,(18):64-66.
- [4]褚夫玉,张心怡,康建荣,等.InSAR在水利工程变形监测中的应用研究进展[J].水利水电快报,2025,46(09):85-91.
- [5]毕栋,毕博.数字测绘技术在水利工程施工期水文监测中的应用研究[J].水上安全,2025,(16):16-18.

作者简介:

郭晓阳(1984--),男,汉族,山西省原平市人,本科,高级工程师,研究方向:水利水电工程。

黄婉琳(1994--),女,汉族,四川自贡市人,本科,工程师,研究方向:水利水电工程。