

智能检测技术在围堰安全管控中的应用研究

张鑫 张文涛 王春乔 李金洋 胡川平
中建八局西南建设工程有限公司 四川 成都 610000

摘要：围堰作为工程建设关键临时结构，其安全管控至关重要。传统方式存局限，智能检测技术的应用成为突破方向。本文聚焦智能检测技术在围堰安全管控中的应用，阐述了围堰工程类型、结构特性及安全风险，剖析了智能检测系统的感知层适配、数据传输处理等关键技术，探讨了其在结构监测、安全评估、环境监测及平台集成中的具体应用，提出了技术、标准、人才和管理四维度提升策略。研究表明，智能检测技术能有效提升围堰安全管控的精准性与实时性，为围堰工程安全提供有力支撑，具有重要的工程实践意义。

关键词：智能检测技术；围堰安全管控；具体应用

引言：围堰作为水利、桥梁等工程的临时挡水结构，其安全直接影响主体工程进度与安全。传统检测方式在复杂环境下精度与效率不足，难以应对结构失稳、渗漏等风险。随着智能技术发展，将其应用于围堰安全管控成为趋势。本文旨在通过分析围堰安全风险，研究智能检测系统关键技术及具体应用，提出应用提升策略，以推动围堰安全管控技术升级，为工程实践提供科学指导。

1 围堰工程概述及其安全风险分析

围堰作为水利、桥梁、港口等工程建设中不可或缺的临时挡水结构，其核心功能是为主体工程施工创造干燥的作业环境，同时抵御外侧水体、泥沙及杂物的侵袭。按结构形式与材料特性，围堰可分为土石围堰、钢板桩围堰、混凝土围堰、草土围堰等类型：土石围堰凭借取材便捷、成本低廉的优势，广泛应用于中小型水利工程；钢板桩围堰则因强度高、施工快速，多用于深水区或软土地基的桥梁基础施工；混凝土围堰整体性强、抗渗性能优异，适用于大型水利枢纽工程的长期挡水需求。从结构特性来看，围堰的“临时性”特征使其设计往往以“经济适用”为首要原则，结构强度与稳定性储备较永久工程更低，这也埋下了潜在安全隐患。在受力方面，围堰需承受多重复杂荷载：外侧水压随水位涨落呈现动态变化，水流冲刷可能导致基础掏空；内侧基坑开挖引发的应力释放易造成结构变形；若遭遇暴雨、洪水等极端天气，荷载会急剧增大，进一步考验结构的承载极限。

围堰工程的安全风险具有多样性和突发性，主要体现在三个方面：（1）结构失稳风险，因设计参数偏差、施工质量缺陷或荷载超限，可能引发整体滑动、倾覆或坍塌，如软土地基上的土石围堰易因抗滑力不足导致坝

体滑移；（2）渗漏与管涌风险，由于防渗体施工不密实、接头处理不当或地基存在透水层，水体可能穿透围堰形成渗漏，若未及时处理，会逐渐发展为管涌，最终引发结构溃决；（3）冲刷破坏风险，高速水流对围堰迎水面、坡脚及基础的持续冲刷，会导致堤身淘刷、基础裸露，削弱结构稳定性^[1]。

2 围堰安全智能检测系统的关键技术

2.1 感知层适配技术

感知层是围堰安全智能检测系统的“神经末梢”，其核心在于实现对关键参数的精准、稳定采集。针对围堰复杂的水文地质环境，传感器需具备抗干扰、耐侵蚀、低功耗特性。在参数感知方面，位移监测采用微机电系统（MEMS）加速度传感器与北斗定位模块融合技术，通过动态差分算法消除环境噪声，实现亚毫米级位移监测；应力监测则依赖分布式光纤传感技术，利用布里渊散射效应，将应力变化转化为光频偏移量，可覆盖围堰全结构的应力场分布测量。为解决围堰结构复杂带来的传感器布设难题，采用自适应布设算法，结合有限元仿真结果确定监测敏感区域，优先在应力集中部位、防渗薄弱环节加密布设传感器。研发防水、防腐、抗冲击的传感器封装技术，使设备在水下30米深度、-20℃至60℃温度范围内保持稳定工作，平均无故障运行时间超过18个月。

2.2 数据传输与处理技术

数据传输需突破围堰工程中信号遮挡、电磁干扰等瓶颈，构建“边缘节点-中继站-云端”三级传输架构。在短距离传输中，采用LoRa扩频通信技术，通过跳频机制规避工业频段干扰，通信距离可达1-3公里，数据传输速率稳定在0.3-50kbps，满足低功耗、长距离需求；长距离传输则依托4G/5G公网，通过数据压缩算法将原始监测数

据压缩60%以上,降低传输带宽占用。

数据处理环节引入边缘计算技术,在中继节点完成实时滤波、异常值剔除和数据融合,减少云端计算压力。针对多源异构数据(如位移、应力、渗流量),采用时空配准算法实现数据同步,通过卡尔曼滤波模型融合不同传感器数据,提升参数测量精度。此外,建立分布式数据库,采用区块链技术实现数据溯源,确保监测数据的完整性和不可篡改性。

2.3 智能分析与决策技术

智能分析模块以机器学习算法为核心,构建围堰安全状态评估模型。基于历史监测数据与事故案例,采用深度学习中的卷积神经网络(CNN)提取数据特征,通过长短期记忆网络(LSTM)预测参数变化趋势,预测精度可达92%以上。针对结构多风险耦合问题,引入贝叶斯网络模型,量化各风险因素的关联性,实现从单一参数预警到多因素综合评估的升级。

决策系统采用分层响应机制,根据安全指数划分预警等级(蓝、黄、橙、红),对应不同的处置策略。通过知识图谱技术构建围堰安全决策库,整合设计规范、施工标准和应急方案,当监测数据触发预警阈值时,自动匹配最优处置措施。开发自适应阈值调整算法,根据工程阶段(施工期、运行期、拆除期)动态优化预警阈值,避免误报和漏报^[2]。

2.4 系统集成与协同技术

系统集成需实现硬件设备与软件平台的无缝对接,采用模块化设计架构,支持传感器、传输设备、分析模型的即插即用。通过统一的通信协议(如MQTT、OPCUA)解决设备兼容性问题,使不同厂商的传感器数据可直接接入系统。开发三维可视化引擎,将监测数据与BIM模型融合,直观展示围堰结构变形、应力分布等状态,支持多视角动态漫游和参数查询。

协同技术方面,构建“监测-评估-预警-处置”闭环协同机制,通过物联网平台实现监测终端、管理中心、施工团队的实时信息交互。开发移动端应用程序,支持管理人员远程查看监测数据和预警信息,现场人员可通过移动终端反馈处置结果,形成信息闭环。引入数字孪生技术,建立围堰物理实体与虚拟模型的实时映射,通过虚拟仿真模拟不同风险情景下的结构响应,为决策提供预演支持。

3 智能检测技术在围堰安全管控中的具体应用

3.1 结构状态参数的智能感知与监测

在围堰结构状态监测中,智能检测技术通过多维度感知网络实现参数的实时采集与动态追踪,具体应用如

下:(1)针对位移变形监测,采用GNSS(全球导航卫星系统)与北斗定位技术相结合的方式,在围堰顶部及关键节点布设监测终端,通过厘米级实时差分定位,捕捉水平位移与垂直沉降的细微变化,数据采样频率可达1Hz,满足动态监测需求。在围堰迎水面及背水面布设分布式光纤传感器,利用布里渊散射效应,将应力应变数据转化为光信号传输,实现沿程30公里范围内的连续监测,空间分辨率达1米,可精准识别结构内部应力集中区域。(2)对于混凝土围堰的裂缝监测,采用机器视觉与红外热成像技术联合检测。在围堰表面安装高清工业相机,通过图像识别算法自动识别宽度0.2毫米以上的裂缝,并结合红外热像仪捕捉裂缝区域的温度场差异,判断裂缝是否存在渗漏活动。针对土石围堰的渗流监测,在坝体内部嵌入智能渗压计与电导传感器,实时采集渗透压力与水电导率数据,通过多参数耦合分析,定位渗漏通道并计算渗流量,数据传输采用LoRa无线通信技术,确保在复杂电磁环境下的稳定传输。

3.2 安全状态智能评估与预警

基于实时采集的监测数据,智能评估系统通过多算法融合实现围堰安全状态的动态评级,其应用如下:

(1)利用机器学习中的随机森林算法,对历史监测数据与事故案例进行训练,构建包含位移速率、应力峰值、渗流量等12项指标的评估模型,模型通过特征重要性排序筛选关键参数,提升评估效率。对于多源数据的时空匹配问题,采用卡尔曼滤波算法对不同传感器的采集时间与空间位置进行校准,确保数据的一致性。(2)预警机制采用分级响应模式,通过设定三级阈值(正常、关注、危险)实现动态预警。当监测参数超出关注阈值时,系统自动启动边缘计算节点进行数据二次核验,排除传感器误报;若达到危险阈值,立即触发声光报警并推送预警信息至管理终端,同时调用预设的应急处置方案,提示需采取的加固措施或泄洪调度建议。为适应围堰施工阶段的参数变化,系统内置自适应学习模块,通过滑动窗口算法不断更新阈值范围,降低因结构阶段性特性导致的误报率。该系统还引入数字孪生技术,将实时评估结果与三维模型联动,直观呈现风险点分布。同时接入气象数据,耦合分析极端天气影响,进一步提升预警精准度与前瞻性。

3.3 周边环境与荷载的动态监测

围堰周边环境的智能监测聚焦以下水流、冲刷及外部荷载的实时感知。(1)在水流监测方面,采用声学多普勒流速仪(ADCP)与雷达测速技术,在围堰上下游布设监测断面,ADCP通过水下声波反射测量水流剖面流

速,雷达测速仪则安装于堤顶高处,实现非接触式表面流速监测,两者数据交叉验证,确保水流速度测量误差控制在5%以内。(2)针对河床冲刷监测,运用水下机器人(ROV)搭载三维声呐系统,按预设航线对围堰基础进行扫描,生成水下地形三维模型,通过与初始模型的比对,计算冲刷深度与范围,扫描精度可达0.1米。(3)外部荷载监测涵盖施工荷载与自然荷载两类。在施工区域,通过无线传感网络采集起重机作业荷载、材料堆载等动态数据,传感器采用低功耗设计,续航时间达6个月;对于船舶撞击力等偶然荷载,在围堰迎水面安装压电式冲击力传感器,通过电荷信号转换实时记录撞击强度与持续时间。在围堰周边布设气象站,采集风速、降雨量、温度等气象数据,结合水文站的水位、波浪参数,构建环境荷载数据库,为结构安全评估提供边界条件。

3.4 智能化管控平台的集成应用

智能化管控平台通过数据融合与流程整合,实现围堰安全管控的一体化管理,具体如下:(1)平台采用“云-边-端”架构,终端设备负责数据采集,边缘节点处理实时分析与预警,云端平台则承担数据存储、模型训练与全局决策。数据存储采用时序数据库(如InfluxDB),按时间序列高效压缩与索引监测数据,单平台可支持10万级传感器接入,数据读写延迟控制在100毫秒以内。(2)在可视化展示层面,平台将监测数据与BIM(建筑信息模型)模型深度融合,通过三维建模还原围堰结构细节,监测参数以颜色梯度或动态曲线形式叠加于模型相应位置,管理人员可通过触控操作查询任意节点的历史数据与变化趋势。针对多参与方协同需求,平台设置分级权限管理,施工单位可查看实时监测数据,设计单位能调用历史数据进行复核计算,监管部门则拥有全局监控与预警处置权限,通过数据接口标准化实现各系统间的无缝对接,形成从监测到决策的闭环管控^[3]。

4 提升智能检测技术在围堰安全管控中应用的策略

提升智能检测技术在围堰安全管控中的应用,要从以下四方面协同推进。

4.1 在技术层面,强化核心技术攻关

重点研发适应复杂水文环境的低功耗传感器,提升数据传输的抗干扰能力;推动人工智能算法与工程实践的深度融合,优化安全评估模型的动态适应性,实现从单一参数监测到多场耦合分析的升级。加快数字孪生技术的落地,构建围堰全生命周期的虚拟映射,提升风险预判的精准度。

4.2 标准体系建设

制定智能检测设备的技术规范,统一数据采集、传输与分析的接口标准;明确不同类型围堰的监测指标阈值,建立分级预警的行业准则,为技术应用提供刚性依据。

4.3 人才培育应注重复合型能力培养

通过校企合作开设专项课程,强化工程人员对智能技术的操作与应用能力;定期开展行业培训,提升管理人员对监测数据的解读与决策能力,构建“技术研发-工程应用-管理决策”的人才链。

4.4 管理机制上建立跨部门协同平台

整合设计、施工、监测等多方数据资源,实现信息共享与联动处置;引入市场化机制,鼓励第三方机构参与智能检测服务,降低工程主体的技术应用成本^[4]。

结束语:智能检测技术为围堰安全管控提供了全新解决方案,从关键技术到具体应用的研究,展现了其在提升管控水平上的显著作用。四维度策略为技术落地提供了路径。该研究丰富了围堰安全管理理论,对保障工程安全、提高施工效率有实际价值。未来需持续完善技术与标准,促进智能检测技术更广泛应用,助力围堰工程安全管控迈向智能化新阶段。

参考文献

- [1]徐双超.智能化检测技术在水利工程裂缝识别及安全性评估中的应用探索[J].世界家苑,2024(22):159-161.
- [2]胡自勍.水利工程中的水闸智能化监测控制技术研究[J].农业开发与装备,2024(8):153-155.
- [3]陈环,张崇昌.中小型水利工程施工中围堰技术的应用[J].中国新技术新产品,2021(10):103-105.
- [4]许本彪.围堰技术在水利工程施工中的应用研究[J].现代工程科技,2024,3(10):97-100.