水利信息化技术在病险水闸除险加固工程中的应用分析

汤建国[1] 李江[2] 徐智[2] 王绍兵[1]
1. 江苏云诚水利建设工程有限公司 江苏 南通 226000；
2. 南通市新江海河闸管理所 江苏 南通 226000

摘 要 传统病险水闸除险加固技术面临艰巨挑战，依靠人工经验与常规检测手段已经难以满足水利工程高质量发展需求。针对处理水闸隐蔽病害诊断不易、结构安全监测精准度不够、水力破坏风险预测偏差等状况，本文首先系统阐明了水利信息化技术在病险水闸除险加固中的关键作用；其次透彻分析了传统除险加固工程中的四大突出难题，涵盖施工阶段结构变形监测方法欠缺、隐蔽渗漏风险排查能力不足、混凝土内部缺陷检测精准度偏低以及水力冲刷破坏风险预估偏差较大；最后在制定除险加固工程施工策略的同时结合水利信息化技术，实现对病险水闸除险加固整个过程的精准察觉、科学评判与智能决策，切实提升了加固工程的有效性、针对性和经济性。

关键词 水利信息化；病险水闸；除险加固；结构变形

Application Analysis of Water-Resources Informatization Technology in Risk-Removal and Reinforcement of Defective Sluices

Tang Jian-guo[1], Li Jiang[2], Xu Zhi[2], Wang Shao-bing[1]
1. Jiangsu Yuncheng Water-Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Nantong 226000, Jiangsu Province, China;
2. Nantong Xinjianghai River Sluice Management Office, Nantong 226000, Jiangsu Province, China

Abstract Traditional reinforcement techniques for dangerous and diseased sluices face formidable challenges, as reliance on manual experience and conventional detection methods can no longer meet the demands of high-quality development in water conservancy projects. In response to difficulties such as diagnosing concealed diseases in sluices, insufficient accuracy in structural safety monitoring, and deviations in hydraulic damage risk prediction, this paper first systematically elucidates the critical role of water conservancy informatization technology in the reinforcement of dangerous and diseased sluices. Second, it thoroughly analyzes four prominent challenges inherent in traditional reinforcement projects: the lack of structural deformation monitoring methods during construction, inadequate capacity for identifying concealed seepage risks, low accuracy in detecting internal concrete defects, and significant deviations in predicting hydraulic scour damage risks. Finally, while formulating construction strategies for reinforcement projects, the integration of water conservancy informatization technology enables precise detection, scientific evaluation, and intelligent decision-making throughout the entire process of reinforcing dangerous and diseased sluices, thereby effectively enhancing the effectiveness, targeting, and economic efficiency of reinforcement efforts.

Key words Water-Resources Informatization; Defective Sluice; Risk-Removal & Reinforcement; Structural Deformation

当前，水利基础设施迈向高质量发展，病险水闸除险加固已成为保障防洪安全、水资源高效利用及人民生命财产安全的关键环节。水闸作为水利体系的核心控制结构，长期运行后面临结构老化、功能衰退等问题，严重影响其安全性能。随着工程规模不断扩大和环境日益复杂，传统依赖人工经验与常规检测的除险加固方式，已难以适应现代化水利建设的需求。

水利信息化技术是推动工程智能化转型的核心动力。通过融合物联网、大数据、人工智能、云计算等前沿技术，可为病险水闸除险加固提供系统的技术路径与解决方案。此类技术不仅可实现水闸运行状态的实时感知与病害的精准诊断，还能为加固方案的制订、实施与评估提供科学依据，从而提升工程的经济性、有效性和针对性。系统研究水利信息化技术在除险加固中的应用，对推动水利工程数字化转型、提升水闸安全运行水平具有重要意义。

1 病险水闸除险加固工程中水利信息化技术的作用

水利信息化技术作为现代水闸除险加固工程的核心支撑，

汇聚人工智能、大数据、物联网等先进技术，为水闸安全运行与科学加固提供全方位技术保障。

水利信息化技术借助布置高精度传感器网络，可实现水闸结构应力、变形、渗流等关键参数的实时采集与传递，形成覆盖全生命周期的监测体系。在数据处理层面，管理人员利用云计算平台和边缘计算技术，可对海量监控数据开展高效存储、智能分析与快速处理，及时察觉潜藏的安全风险[1]。在决策支持层面，通过构建数字孪生模型及专业分析算法，可呈现不同工况下水闸的响应特性，为加固方案的合理制订提供量化支撑。同时，信息化技术推动了加固进程的精细化管理，管理人员将BIM技术与现场监测数据融合应用，能够实现工艺参数、加固部位与进度控制的精准契合，提升工程推进的针对性和实施有效性。上述技术应用贯穿水闸除险加固的全流程，从病害检测到方案改良，再到施工监控与成效评价，形成了完整的技术闭环，有效推动了传统水利工程向数字化、智能化层面的转型升级。

2 传统病险水闸除险加固工程存在的问题分析

2.1 施工期结构变形监测手段不足

传统病险水闸除险加固施工过程中，结构变形监测多依赖简单测量工具与人工定期观测，监测手段单一、时效性差，难以满足现代工程安全控制要求。由于缺乏系统监测设备与技术支撑，在混凝土浇筑、锚索张拉、基础处理等关键工序期间，闸体变形无法实现连续实时监测。常规监测方法通常仅在施工前后进行有限几何测量，难以掌握施工中结构应力释放、基础沉降、构件位移等动态变化过程[2]。

2.2 隐蔽渗漏风险排查技术滞后

以往加固工程中对地基渗漏及防渗体系缺陷的排查主要依靠压水试验、表面观察和经验判断，难以有效识别隐蔽渗漏风险。常规方法仅可发现表面湿渍、水痕等明显现象，对于防渗墙接缝、地基管涌、混凝土微裂缝等隐蔽问题，缺乏有效探测手段。渗漏通道定位精度较低，难以准确判定渗漏源、渗漏路径及影响范围，导致加固措施针对性不足；排查依赖人工经验，无法定量评估渗漏程度与危害，尤其对深层地基和隐蔽结构渗漏探测能力有限，现有技术难以穿透覆盖层识别深部渗流问题。

2.3 混凝土内部缺陷检测精度有限

传统加固项目中，混凝土内部病害（如空洞、蜂窝、裂缝等）的检测多采用表面敲击、钻孔及有限无损检测方法，精度与可靠性难以满足精准加固需求。回弹法、超声波法等常规手段受检测深度与分辨率限制，难以准确识别内部细微缺陷及其空间分布；检测覆盖范围有限，通常仅能获得局部点位信息，无法全面反映大范围混凝土结构的整体质量。针对闸墩、底板等厚实结构深层缺陷的识别能力不足，常规方法在穿透厚混凝土层获取内部信息方面存在困难。

2.4 水力冲刷破坏风险预测不准

常规加固工程中对水流冲刷破坏风险的预测多依赖经验公式、简化计算与定性判断，难以准确模拟复杂水力条件下闸体结构冲刷机理及破坏过程。传统方法基于标准工况假设，未考虑实际水流动力特性的时空变化及局部涡旋、回流等复杂流态影响。对消力池、闸下出流、弯道等关键部位的水流结构与冲刷机理认识不足，预测结果与实际偏差较大。风险评估多采用静态指标与经验阈值，缺乏对不同工况下冲刷强度的动态模拟与定量分析，难以准确预测冲刷坑的形成过程、发展速率与最终形态[3]。

3 基于水利信息化技术的病险水闸除险加固策略

3.1 多节点传感组网实现施工变形动态追踪

传统施工期变形监测依赖人工定期观测，无法及时捕捉混凝土浇筑、锚索张拉等核心工序中的结构响应，监测时易遗漏瞬间变形异常。利用多节点传感形成组网技术，构建高密度监测网络，在闸墩、底板、工作桥等关键部位布置光纤光栅应变计、倾角传感器、静力水准仪，可实现施工过程变形的动态追踪。

工程施工中，将光纤光栅传感器沿闸墩纵向和环向按5 ~ 10 m间距布置，监测混凝土温度应力及结构应变；在闸墩顶部和底板转角处安装倾角传感器，测量轻微角度变化；在底板和梁系关键节点布置静力水准仪，检测竖向位移。借助分布式光纤和无线传输模块，传感器数据可实时输送到监测平台，采样频率设定为1 ~ 10 Hz，涉及混凝土浇筑、养护、预应力施加等多种施工阶段。

为消除环境干扰，数据处理采用滑动窗口滤波和小波降噪算法，依托有限元模型获取结构整体变形场。该技术可实时探测施工过程中0.1 mm级的微小变形，实时发出结构失稳风险警报，为施工参数调整及时提供依据，保障加固时段结构安全可控[4]。

高频次、多方位的协同检测，不仅可迅速识别局部异常变形，还可利用融合数据的分析识别潜在的结构薄弱环节，为后续加固设计提供精准的变形特征数据支撑，进一步提升除险加固工程的整体质量与安全性。

3.2 地质雷达协同示踪试验定位渗漏点

常规检测方法无法精准定位隐蔽渗漏点，降低了防渗加固的针对性。借助染色剂示踪试验与地质雷达协同开展工作，能

全面识别防渗墙接缝、地基砂层等区域的渗漏通道。

首先，沿防渗墙轴线和闸基周边，以0.5 ~ 1 m的间距用100 ~ 200 MHz高频地质雷达开展网格化扫描，获取地下介质介电常数分布图，识别异常低阻区，并在疑似渗漏区域选定上游注入点位，添加环保类荧光示踪剂，同时在下游观测井设置荧光检测仪和pH传感器，实时跟踪示踪剂浓度变化与出现时间。

其次，开展地质雷达数据处理采用层析成像反演算法，搭建三维渗流场模式，综合示踪试验所得到的流速和路径信息，精准锁定渗漏点空间坐标。如果防渗墙接缝存在渗漏，采用50 MHz低频天线着重探查墙身接缝区域，识别脱空和裂缝；针对地基砂层存在的渗漏，采用高密度电法补充测定电阻率异常区。此技术组合能实现15 ~ 20 m的探测深度，定位精度 ± 0.3 m，为高压旋喷桩、帷幕灌浆等靶向加固提供准确依据，防止盲目处理引发的资源浪费，同时为后续防渗体系优化设计提供翔实的数据支撑，保障水闸长期安全运转。

3.3 探地雷达联合相控阵超声诊断内部缺陷

普通检测方法对混凝土内部缺陷分辨率低，难以精准判断闸体结构完整性，应用探地雷达与相控阵超声联合诊断技术，可精准探明闸墩、底板等结构的内部裂缝、蜂窝和空洞。

探地雷达系统配置高频1.6 GHz天线和中频400 MHz天线组合，以0.2 ~ 0.5 m扫描间距对检测区域开展网格化扫描，得到混凝土内部介电常数的异常分布，发现0 ~ 1.5 m浅层范围内的空洞及分层。采用线阵列换能器进行相控阵超声检测，频率为5 ~ 10 MHz，通过电子扫描手段发射和接收超声信号，借助全矩阵捕获技术采集混凝土内部散射波场，经后续处理，利用成像呈现内部缺陷的位置、大小和形状[5]。

对于深层缺陷，采用低频相控阵探头，其频率为50 ~ 100 kHz，穿透深度为3 ~ 5 m。检测时按闸墩纵向和环向布置测线，距离间隔不超过0.3 m，着重检查预应力锚固区、截面突变部位和施工缝区域。数据处理采用合成孔径聚焦和全波形反演算法，绘制三维缺陷分布图。

该技术组合可检测0.1 mm宽度的裂缝和最小5 mm的空洞，定位精度为 ± 0.1 m，为靶向注浆与局部加固提供精准指导方向，防止加固超出合理范围或处理不到位。

3.4 流体仿真原型观测联动优化防冲设计

防冲消能设计传统上依赖经验公式，无法精准预测复杂水流结构对水闸结构造成的破坏风险。采用计算流体动力学仿真与原型观测数据相结合的办法，可对消力池、护坦等防冲结构设计进行优化。

首先，按照水闸实际几何尺寸和运行工况，搭建精细三维数值模型，选取Realizable k- ε 湍流模型和VOF方法捕捉自由水面，仿真消力池内水流的流动、水跃形成和闸孔泄流过程，并构建高分辨率计算网格，对闸孔出口和消力池底部区域的网格尺寸进行细化，网格尺寸控制在0.1 ~ 0.3 m，时间步长限定为0.001 ~ 0.005 s，精确获取高速射流与漩涡区的流速、压力及涡量分布特征。

其次，一同开展原型观测，将压力传感器和PIV测速系统布置于消力池底部及护坦表面，测定水流实际冲击力、流速矢量分布和冲刷坑形态，把原型观测数据传递给数值模型进行参数校正，调整边界条件与糙率参数，提升模拟精准度。

最后，利用校准后的模型，全面剖析不同流量、闸门开度组合下的水流性状，估算护坦厚度、消力坎坡度与高度等参数对消能效果的作用。经过多方案对比筛选，完善尾坎布置形式、护坦表面防护措施和消力池长度设计，确保水流有序扩散，缓解脉动压力及局部高速水流。

4 结束语

本文提出多节点传感组网实现施工变形动态监控、地质雷达示踪试验配合找出渗漏点、探地雷达与相控阵超声共同诊断病害、流体仿真原型观测联动优化防冲设计等措施，能妥善应对传统除险加固工程中检测精度不足、风险预测不准、监测手段匮乏等突出问题。相关技术人员后续应积极探索水利信息化技术与传统工程技术的深度融合路径，推动病险水闸除险加固工程朝着智能化、高效化、精准化方向发展，全面提升水利基础设施的服务效能和安全韧性。

参考文献

[1]庄馨.复杂环境下病险水闸除险重建方案选择[J].人民黄河,2023,45(S2):108-109,111.

[2]韩飞.液压启闭式水闸病险问题与除险加固措施探讨[J].水电站机电技术,2022,45(6):96-98.

[3]程茜.哈密市病险水闸除险加固探讨[J].农业与技术,2022,42(8):45-47.

[4]宋文燕,范立群.德州市德惠新河大刘节制闸除险加固工程设计[J].人民黄河,2021,43(S2):171-173.

[5]樊静.新疆病险水闸除险加固紧迫性分析及对策建议研究[J].中国水能及电气化,2021(12):46-49.

（本文编辑 曹 阳）