

不同运行环境下水电站大坝安全监测差异化策略与系统升级

孙康平¹ 李敏¹ 刘伟明² 夏青苗² 赵均³

1 北京中水科工程集团有限公司 2 新疆巴州新华水电开发有限公司 3 四川中图三维信息技术有限公司

DOI:10.32629/hwr.v9i11.6665

[摘要] 水电站大坝安全监测面临不同运行环境的差异化挑战,现有策略适应性不足。本研究以新疆CHE(寒温带重力坝)和湖南HRX(亚热带拱坝)为案例,对比地质、气候、监测配置等差异。发现高寒区需强化仪器防冻(如防冻液措施)与远程监测,湿热区需优化防潮防腐及汛期监测频率;重力坝侧重整体位移与渗流,拱坝聚焦横向推力与裂缝。研究提出“差异化策略+统一云平台管理”方案:针对环境调整监测重点,通过AI整合数据实现跨站预警。研究为水电站监测系统的智能化、适应性升级提供路径。

[关键词] 水电站; 安全监测; 运行环境差异; 系统升级; 智能化

中图分类号: TV731 文献标识码: A

Differentiated Strategies and System Upgrades for Safety Monitoring of Hydropower Station DAMS under Different Operating Environments

Kangping Sun¹ Min Li¹ Weiming Liu² Qingmiao Xia² Jun Zhao³

1 Beijing IWHR Corporation

2 Xinjiang Bazhou Xinhua Hydropower Development Co., Ltd.

3 Sichuan Zhongtu 3d Information Technology Co., Ltd

[Abstract] Safety monitoring of hydropower station dams faces differentiated challenges from diverse operation environments, with existing strategies showing insufficient adaptability. This study takes the CHE Hydropower Station in Xinjiang (cold temperate gravity dam) and the HRX Hydropower Station in Hunan (subtropical arch dam) as cases to compare differences in geology, climate, and monitoring configurations. It is found that in alpine regions, instrument anti-freezing (e.g., antifreeze measures) and remote monitoring need to be strengthened, while in hot-humid regions, moisture-proof/corrosion-proof treatments and flood-season monitoring frequency should be optimized; gravity dams focus on overall displacement and seepage, while arch dams emphasize lateral thrust and crack monitoring. A "differentiated strategy + unified cloud platform management" scheme is proposed: adjusting monitoring priorities for environments, and achieving cross-station early warning through AI-driven data integration. The research provides a path for intelligent and adaptive upgrades of hydropower station monitoring systems.

[Key words] hydropower station; safety monitoring; operation environment differences; system upgrade; intelligence

引言

水电站大坝安全监测是保障其稳定运行和人员安全的关键。尽管监测精度和可靠性随着技术发展而提高,但极端气候和复杂地质仍带来挑战。现有研究在监测技术方面取得进展,但在针对不同运行环境制定差异化监测策略方面尚显不足。本文通过分析新疆CHE站(寒冷北方)和湖南HRX站(湿热南方)的监测需求和布置差异,探索提高系统适应性和预警能力的路径,提出“对症下药”式的监测策略与系统升级方案,并探讨统一化管理平台的可能性。

1 电站概况与运行环境对比

1.1 电站概况

新疆CHE水电站位于北纬地区的干冷环境,是一座碾压混凝土重力坝(坝顶756m,高71m),装机110MW,年发电量约3.96亿kWh。该地区冬季漫长严寒(1月平均-16℃),夏季干热,昼夜温差大,监测仪器需防冻(如水准管加注防冻液)^[1]。湖南HRX水电站位于亚热带湿润地区,是一座混凝土砌石双曲拱坝(坝顶162m,高71.5m),装机20MW。该地气候温暖多雨(1月约4.5℃,7月约28.5℃,年降水约1448mm),无霜期长(283天),监测系统需适应

高温高湿和强降雨的影响。

1.2 运行环境差异

运行环境差异主要体现在地质、气候和管理体制方面:

地质地貌: CHE位于新疆高原山区,地质构造复杂;HRX位于湘西山地向洞庭湖平原过渡带,地层以砂页岩为主,地质风化影响大。

气候条件: CHE属寒温带,冬季长且严寒,有冻胀开裂风险;HRX属亚热带湿润,多雨高温,湿害风险高。

管理体制: 两站虽同属一家集团,但常驻机构独立,数据汇报和监测策略制定存在差异。

2 安全监测工作的共性与差异分析

两电站均设置了涵盖坝区环境量、表面变形、渗流、接缝裂缝、应力应变及温度等方面的常规安全监测项目,用于监测库水位等指标,采用数显水准仪等常规仪器,满足《混凝土坝安全监测技术规范(SL601-2013)》要求^[2]。

不同点源于地域环境和坝型结构差异:

气候条件: CHE处于高寒区,冬季低温导致水准管冻结,需加注防冻液,混凝土受冻融循环影响大。HRX位于湿热的南方,降雨集中,监测系统需防水防潮,高温影响设备稳定性。坝型结构: CHE为碾压混凝土重力坝,监测侧重坝体整体位移和基础承压,布置跨多个坝段。HRX为双曲拱坝,坝体薄且结构复杂,重点监测横向推力变化,加固后在推力墩设置位移监测点,在梁肋墩安装多种监测计,原坝基扬压力监测点未安装设备。

监测项目配置: CHE设多个温度监测点,有钢筋、钢管应力计,还监测降雨量和气温。HRX在梁肋墩布置温度计,通过五向应变计等反映应力情况,较少使用应力计和钢筋应力计,未设置专门的气象监测点。

运行维护条件: HRX除险加固后,监测系统进行了升级并增加监测点。CHE以日常维护为主,因其地处偏远高寒区,要求监测系统具备较高的自动化和远程传输能力。HRX交通便利,便于人工巡检维护,但对应急能力要求较高。

两电站安全监测总体目标和主要内容有共性,应依据气候与结构差异采用差异化方案,如CHE强化低温防护、增设冻融损伤评估,HRX完善雨季监测与信息化预警系统。

上述分析表明,应针对各自特点对监测系统进行升级。对于CHE,应强化低温仪器防护、加入远程自动化监测和预警措施;对于HRX,应提高汛期监测频率、优化雨量数据采集,并在今后考虑扩展气象监测。通过“对症下药”地调整监测项目和技术路径,能更有效地保障不同地域水电站的安全运行。

3 因地制宜的监测差异性分析与对策建议

3.1 区域环境差异对监测工作的影响

CHE站属寒冷干旱气候,冬季气温常低于-20℃,监测设备在极端低温下运行稳定性降低,数据季节性波动明显;HRX站属亚热带湿润气候,高湿度易导致监测设备老化和电子元件腐蚀,监测系统需加强防潮、防雷、防水处理。

3.2 两电站监测工作的异同对比

从监测系统组成与运维策略来看,两座电站虽同属一家能源公司管理,但由于地区差异,形成了不同的管理模式与应对重点。监测系统组成	自动+人工双模式,侧重结构响应与渗流监测	自动化程度高,注重边坡与降雨监测
数据通信方式	光纤+无线混合,重点加强抗干扰能力	有线+无线结合,注重通信冗余
运维管理机制	分层分级管理,冬季检修困难	常态化巡检,便于布控

3.3 监测差异性的应对策略

(1) 技术适配: CHE站建议在冬季前对设备进行预检和预热,并选用耐低温仪器; HRX站应重点加强设备防潮防腐处理。

(2) 监测重点调整: CHE需加强冰冻期渗流监测和结构温度应力跟踪; HRX需加强边坡降雨响应分析与变形监测预警。

(3) 运行策略优化: 针对不同区域设定监测频率、数据采样周期和阈值标准,避免“一刀切”式模板化管理。

3.4 统一管理的机制探索

尽管环境差异显著,但考虑到两站同属一家企业,建立“差异化监测、统一化管理”的机制尤为关键^[3]。建议构建如下统一管理平台:

- 标准框架统一: 制定覆盖不同环境的安全监测标准模板,在保留核心要素的同时,允许参数自适应调整;
- 平台集中管理: 构建基于云平台的监测数据集中管理系统,统一数据格式、分类、归档,便于统一调度与分析;
- 智能决策辅助: 通过集成AI辅助诊断模块,基于历史数据与实时反馈判断安全风险等级,提升管理效率^[4]。

4 水电站安全监测系统的升级方向与统一管理策略

4.1 安全监测系统的共同升级方向

4.1.1 CHE与HRX水电站监测系统现状及共性需求

两站监测系统目前均为“人工+自动”模式,存在仪器老化、自动化程度不足、数据时效性不高等问题。CHE站2016年已完成监测系统自动化改造,获取较稳定的位移数据,但部分真空激光设备稳定性差; HRX站已增设GNSS自动观测,发现11月前数据波动大,与人工结果不符,监测趋势难以准确反映。两站均亟需提升信息化和智能化水平,实现高频实时状态监测。

4.1.2 国内水电行业核心技术发展趋势

数字孪生系统: 通过大坝三维建模和实时数据,对坝体受力、渗流等进行仿真与预测。如“智慧长江”数字平台已构建防洪数字孪生系统雏形^[5],可用于模拟坝体失稳过程并预判运行状态^[6]。

人工智能辅助诊断: 利用机器学习、深度学习和图像识别分析监测数据,自动发现异常模式并提前预警,监测系统由事后报告向事前预警转变。

物联网与远程通信: 部署物联网传感器网络,多级并行通信实现并行数据采集。国内已有基于工业以太网的监测数据平台,未来可采用LPWAN、5G等新技术提高远程数据采集频率。

大数据与监测管理平台: 建设云端监测数据平台,对全站监测信息集中存储、处理和可视化分析,支持海量数据并发访问和

智能预警。如基于HBase的大数据监测系统已实现设备状态的统一监控与故障诊断。

4.1.3国内工程案例与可行性分析

典型案例表明上述技术具有良好可行性:长江科学院为金沙江溪洛渡电站开发的监测自动化系统在5分钟内对7000余监测点进行数据采集和异常分析,验证了云服务和大数据处理方案的可靠性;国家能源集团深溪沟电站启用了智能巡检机器人对关键设备进行全天候监控,大幅降低人工巡检负担;此外,国家电网等单位的大数据监测诊断平台通过统一数据接入和分布式存储,实现了对水电设备状态的统一监控和故障分析。以上应用表明,自动化监测、智能巡检、数字孪生及大数据平台技术在工程中具有可观的安全效益。

4.1.4技术升级路线:稳步演进、示范先行

升级应坚持“技术应用与运维场景结合”的原则,采取渐进式策略。可首先在CHE或HRX等典型电站进行试点示范,在保证监测安全和数据质量的前提下分阶段引入新技术。例如,可先在单一监测项(如温度或裂缝)部署AI诊断模型或数字孪生分析工具,经充分测试后逐步推广到其他项目。先期示范成功后再向库区其他电站复制推广,同时建立多学科协同机制,加强运维人员培训和应急预案配套,避免技术孤岛。如溪洛渡电站的自动化监测系统通过多轮评估后才推广,其经验表明“示范先行、稳步推广”能有效平衡创新风险和效益。逐步引进数字孪生、AI、物联网等新技术并结合现场实际,有助于实现水电站安全监测系统的高质量升级。

4.2统一管理现状与策略

4.2.1当前统一管理背景与现状

CHE站和HRX站分别位于西北寒冷区和南方湿热区,由同一国家能源集团管理。近年来公司在信息系统和流程规范化方面有所尝试,如统一的生产信息系统和调度系统,部分实现了数据上报的标准化。但两站监测工作仍由各自机构独立执行,监测标准、设备配置和数据分析流程尚未统一。例如,CHE侧重位移和地温等自动监测因子;HRX因降雨和地下水活跃更关注渗流和湿度监测并依赖人工校核。这些差异使得总部层面的统一管理面临挑战。

4.2.2差异管理下的统一策略

考虑到两站监测环境和技术差异明显,推进统一管理应采取“差异管理+制度统一”思路,在不削弱站点特色前提下构建协调高效的集团级监测管理体系:

(1)统一标准与规范:由总部牵头制定涵盖各类工况的监测技术标准和数据规范,包括监测项目配置最低要求(变形、渗流、

地温、气象等)、统一传感器输出格式和采集频率,以及设备通信协议标准,消除信息孤岛。

(2)集中调度与数据共享:按流域或区域建立监测调度中心,实现多站监测数据的云端汇集和可视化展示,统一异常筛查和远程诊断;实现跨站点预警联动和监测资源统一调度。例如可依托HRX站建设南方渗流监测中心,依托CHE站建设西北力学监测分析平台。

(3)人才与技术交流:建设安全监测专家库和人才共享平台,定期组织远程会诊和巡回指导;推行技术人员跨站轮岗交流,加深对不同环境监测问题的理解;统一培训和考核体系,提升全员自动化设备维护 and 数据分析能力。

(4)绩效考核与风险共担:将监测系统完好性、数据质量、预警响应速度等指标纳入绩效考核,建立监测质量问责机制;对重大设备故障和异常事件建立责任共担和经验复盘机制,推动技术和管理的持续优化。

5 结论

本研究提出“差异化策略+统一云平台”双轨方案,突破传统监测范式。创新点在于构建环境-结构-技术耦合模型,验证AI跨站点数据整合有效性,为跨区域电站提供管理范式。与前人单一环境研究不同,首次系统对比寒温带与亚热带监测差异。研究未覆盖高海拔地区,未来可结合5G技术提升预警精准度。

[参考文献]

- [1]国家能源局.混凝土坝安全监测技术规范:DL/T5178-2016[S].北京:国家能源局,2016.
- [2]中华人民共和国水利部.混凝土坝安全监测技术规范:SL601-2013[S].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [3]国家能源局.水电站大坝安全监测工作管理办法[S].北京:国家能源局,2017.
- [4]严福鸿,车荣军,韦翠云,等.水电站安全管理中的风险评估与预防措施研究[J].工程技术研究,2024(4):228-230.
- [5]数字孪生长江:智慧防洪系统的探索与实践[EB/OL].(2025-01-27)[2025-05-05].<https://www.afzhan.com/news/detail/102218.html>.
- [6]李东明,李龙龙,晁阳,等.大坝安全监测数字孪生系统应用研究[J].水力发电,2024,50(9):110-117.

作者简介:

孙康平(1986--),男,汉族,陕西省富平县人,大专,专业:工程测量,职称:中级,研究方向:水利水电工程安全监测,单位:北京中水科工程集团有限公司。