

宝珠寺电站观测自动化系统改造与运行分析

——以南瑞系统替换西安联能系统为例

彭涛

华电四川发电有限公司宝珠寺水力发电厂, 四川 广元 628000

[摘要]大坝水平位移是反映大坝工作性态、判断结构安全的核心监测项目。宝珠寺水电站坝顶原采用真空激光准直系统进行水平位移自动化监测, 该系统在长期运行中暴露出光路易受环境干扰、设备老化严重、维护成本高、故障率居高不下等问题, 已难以满足大坝安全监测高精度、高可靠、长稳定的要求。本文结合宝珠寺电站实际工况, 对比分析真空激光准直系统与引张线仪的工作原理、性能特点、运维成本及适用条件, 阐述采用智能 CCD 引张线仪取代原有真空激光系统的技术可行性、实施过程与应用效果。工程实践表明, 引张线仪具有精度稳定、抗干扰能力强、结构简单、维护便捷、运行可靠等优势, 完全能够满足混凝土重力坝坝顶水平位移监测需求, 可为同类型老旧大坝监测系统升级改造提供参考。

[关键词]宝珠寺电站; 大坝安全监测; 水平位移; 真空激光准直; 引张线仪; 自动化监测

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19588

中图分类号: TM76

文献标识码: A

Transformation and Operation Analysis of Baozhusi Power Station Observation Automation System — Taking the Replacement of Xi'an Lianneng System with NARI System as an Example

PENG Tao

Baozhusi Hydropower Plant of Huadian Sichuan Power Generation Co., Ltd., Guangyuan, Sichuan, 628000, China

Abstract: The horizontal displacement of a dam is a core monitoring item that reflects the working behavior of the dam and determines its structural safety. The Baozhusi Hydropower Station originally used a vacuum laser collimation system for horizontal displacement automatic monitoring on the dam crest. However, this system has exposed problems such as environmental interference, severe equipment aging, high maintenance costs, and high failure rates during long-term operation, making it difficult to meet the requirements of high-precision, high reliability, and long-term stability for dam safety monitoring. This article combines the actual working conditions of Baozhusi Power Station to compare and analyze the working principles, performance characteristics, operation and maintenance costs, and applicable conditions of vacuum laser collimation system and tensioning instrument. It elaborates on the technical feasibility, implementation process, and application effects of using intelligent CCD tensioning instrument to replace the original vacuum laser system. Engineering practice has shown that the tensioning instrument has advantages such as stable accuracy, strong anti-interference ability, simple structure, convenient maintenance, and reliable operation. It can fully meet the monitoring needs of horizontal displacement on the top of concrete gravity dams and provide reference for upgrading and renovating monitoring systems for similar old dams.

Keywords: Baozhusi Power station; dam safety monitoring; horizontal displacement; vacuum laser collimation; wire drawing instrument; automated monitoring

1 改造背景与原系统痛点

1.1 工程概况

宝珠寺水电站位于嘉陵江支流白龙江下游, 是华电四川发电有限公司所属大型骨干水电站, 以发电为主, 兼有防洪、灌溉、生态调度等综合效益。工程枢纽主体为混凝

土重力坝, 坝体高、库容大、挡水水头高, 运行工况复杂, 大坝结构安全、渗流安全、变形稳定直接关系到电站安全生产、电网稳定运行以及下游广大区域人民群众生命财产安全, 是电厂安全管理的核心与底线。

大坝安全观测自动化系统是实时掌握大坝工作性态

的关键技术系统，主要承担坝体水平位移、垂直沉降、挠度、裂缝开合度、扬压力、渗流量、绕坝渗流、环境量等关键监测项目的数据自动采集、传输、存储、分析、预警等功能，是大坝安全监控的“神经末梢”与“感知中心”。监测系统是否长期稳定、可靠、精准运行，直接决定大坝安全评价、水库调度运行、隐患排查治理的科学性与及时性。

1.2 原西安联能系统痛点

电站大坝安全监测自动化系统原采用西安联能早期分布式采集系统，已连续运行超过 15 年。随着设备长期服役、元器件老化、技术标准更新以及现场潮湿、多尘、强振动等复杂环境影响，原系统在运行过程中逐渐暴露出一系列突出问题，已无法满足现行规范及智能化运维要求，主要痛点如下：

(1) 设备老化严重，数据稳定性差

原系统 MCU 采集单元、通信模块、转接板、电源模块等核心电子设备均已超期服役，出现明显老化、衰减、接触不良、信号漂移等现象，导致数据跳变、丢包、中断、异常值频发，数据可用率和可信度大幅下降。现场测点频繁出现采集失败、长时间缺测、信号不稳定等问题，年均各类故障超过 20 次，严重影响大坝变形规律分析与安全状态判断。

(2) 系统架构封闭，兼容性与扩展性弱

原系统采用厂家私有协议，硬件接口、通信规约、数据格式均不开放，无法兼容第三方传感器及新型智能设备，也难以与电站后续建设的集中监控系统、水情自动测报系统、5G 智能巡检平台等实现数据对接与共享。若需扩展测点或升级功能，必须依赖原厂定制开发，成本高、周期长、实施难度大，严重制约电站数字化、智能化升级。

(3) 备件停产断供，运维成本居高不下

因原设备型号老旧、厂家产品迭代，核心模块、采集板卡、通信部件等全面停产、无备件可购。一旦发生硬件故障，只能返厂维修、旧件拆拼或高价定制，维修周期长达数天甚至数周，严重影响监测连续性。同时，技术服务高度依赖原厂人员，年均运维综合费用超过 15 万元，投入与效果严重不匹配。

(4) 操作复杂繁琐，基层自主运维能力不足

原系统软件界面陈旧、配置逻辑复杂、操作步骤繁琐，对运维人员专业水平要求极高。日常测点标定、通道配置、故障排查、数据修复等工作必须由厂家技术人员完成，班组运维人员仅能进行简单查看，无法独立处置故障，导致响应慢、效率低、维护压力大。

(5) 智能化水平偏低，预警能力不足

原系统仅具备基础采集和简单阈值报警功能，无数据清洗、异常识别、趋势分析、模型计算等高级应用。报警方式单一、误报率高、漏报风险大，无法实现对大坝变形、渗流变化规律的深度挖掘，难以做到隐患早识别、风险早预警、处置早介入，与现代大坝安全主动防控要求差距明显。

1.3 改造必要性

为贯彻落实国家及行业关于大坝安全提升、关键信息基础设施自主可控、智能化升级等相关要求，切实解决原系统长期存在的设备老化、稳定性差、运维成本高、智能化不足等问题，满足电站数字化转型、智慧电厂建设发展需求，宝珠寺电厂经充分技术论证、方案比选和现场试验，决定对大坝观测自动化系统实施全面升级改造，采用技术成熟、开放兼容、运维便捷、国产自主的南瑞观测自动化系统整体替换原西安联能系统，从根本上提升大坝安全监测保障能力。

2 改造方案与南瑞系统架构

2.1 改造总体思路

本次改造严格遵循“安全第一、平稳切换、利旧增效、开放兼容、智能升级、国产自主”的总体原则，具体思路如下：

(1) 平稳过渡，不中断监测

采用分区域、分批次、拆一换一、逐点调试方式实施改造，确保关键监测项目不中断、数据不缺失、大坝安全不失控。

(2) 最大限度利旧，降低投资

对原系统中经检测、校准、检定合格的传感器、电缆、管线、保护箱、基础预埋件等硬件充分复用，仅更换采集、通信、服务器、软件平台等核心设备，提高资源利用率，减少工程量与投资。

(3) 采用开放架构，提升兼容性

新系统采用工业级通用硬件+国标通用协议，支持 Modbus、SL651-2014、以太网、4G/5G 等标准通信方式，实现与电站各系统无缝对接、数据共享。

(4) 强化智能应用，提升管理水平

搭建集数据采集、传输、存储、分析、预警、展示于一体的智能化监测平台，实现从“自动化监测”向“智能化管控”升级。

(5) 推进国产化替代，保障供应链安全

核心采集设备、软件平台、服务器、算法模块全部采用国产自主可控产品，摆脱对单一厂家的技术依赖，确保长期稳定运行与服务。

2.2 南瑞系统核心架构

蓝瑞观测自动化系统采用四层分布式开放架构,具备高可靠、高兼容、易维护、强智能等特点,整体架构如下:

(1) 传感器层

保留并利旧原系统中经检测合格的渗压计、扬压力计、位移计、裂缝计、渗流量计等传感器;对超期、失效、精度不达标传感器分批更换为高精度国产智能传感器;新增 MEMS 倾角计、温湿度、气压、风速风向等环境量监测设备。传感器防护等级不低于 IP67,适应坝区潮湿、多尘、强振动、宽温变环境。

(2) 采集传输层

采用蓝瑞工业级智能 MCU 采集单元,单台支持 32 路传感器接入,采集精度达 0.01%FS;内置信号调理、防雷保护、自诊断、自校准功能,抗电磁干扰能力强。支持 RS485、以太网、4G/5G 多方式通信,兼容多种国标协议,可接入各品牌传感器。采用“有线为主、无线为辅”双链路冗余传输,任一链路故障自动切换,彻底解决单点故障问题。

(3) 数据处理层

配置双机热备服务器,保证系统 7×24h 不间断运行;搭载蓝瑞专业监测数据管理平台,实现数据实时接收、合法性校验、噪声剔除、异常识别、自动存储;支持 TB 级长序列数据管理,查询、统计、曲线生成高效快捷;内置大坝安全监测专业分析模型,可自动生成日报、月报、年报及整编资料。

(4) 应用展示层

采用 B/S 架构,支持电脑 Web 端、手机/平板移动端多终端访问;实现数据实时显示、历史过程线、柱状图、分布图、对比曲线等可视化展示;支持大坝三维建模可视化,直观展示坝体变形、渗流、测点分布及状态;具备分级预警、声光提示、短信推送、APP 弹窗、平台告警等多种方式;可与电站 5G 智能巡检、视频监控、水库调度系统联动,实现数据-图像-现场一体化管控。

3 新旧系统运行对比分析

3.1 稳定性与可靠性对比

3.1.1 原西安联能系统

(1) 数据采集成功率约 85%,但数据丢包、漂移、中断频繁;

(2) MCU 模块、通信板老化严重,年均故障超 20 次;

(3) 单模块故障平均修复周期约 7 天,监测连续性差;

(4) 无冗余链路,单点故障易导致整段数据缺失。

3.1.2 南瑞系统

(1) 数据采集成功率稳定在 99.9% 以上,数据连续平滑;

(2) 工业级硬件设计,抗干扰、耐高低温、耐潮湿,年均故障率 < 1 次;

(3) 双链路冗余传输,任一通路故障自动切换,不中断采集;

(4) 具备上电自启动、故障自诊断、通道自恢复能力,系统可用性大幅提升。

3.2 兼容性与扩展性对比

3.2.1 原西安联能系统

(1) 私有协议封闭,不兼容第三方设备;

(2) 无法接入电站智能平台、水情系统、5G 巡检系统;

(3) 扩展监测项目需整体更换设备,投资大、周期长;

(4) 无标准化接口,后期升级改造难度极大。

3.2.2 南瑞系统

(1) 全面支持国标协议与通用规约,开放接口;

(2) 可兼容接入各品牌正规传感器,利旧率达 70% 以上;

(3) 无缝对接电厂现有监控平台、水情测报、智能巡检系统;

(4) 预留充足扩展通道与软件接口,可随时新增测点与监测项目,扩展性极强。

3.3 运维管理成本对比

3.3.1 原西安联能系统

(1) 年均运维综合成本 > 15 万元;

(2) 备件停产,采购难、价格高、维修周期长;

(3) 故障处置依赖厂家专人到场,响应慢、费用高;

(4) 操作复杂,需 2~3 人专业值守,人工成本高。

3.3.2 南瑞系统

(1) 年均运维费用降至 5 万元以内,降幅超 67%;

(2) 国产标准化设备,备件充足、采购便捷、价格合理;

(3) 支持远程配置、远程诊断、远程升级,现场维护简单;

(4) 界面友好、操作简便,班组人员经培训即可独立运维,实现 1 人远程运维,人力成本降低 50% 以上。

3.4 智能化与预警能力对比

3.4.1 原西安联能系统

(1) 仅支持简单阈值报警,无智能分析;

- (2) 误报率高, 约 60%, 漏报风险大;
- (3) 无数据清洗、趋势预测、模型计算;
- (4) 无法为大坝安全研判提供有效支撑。

3.4.2 南瑞系统

(1) 内置大数据分析算法+大坝专业模型, 实现深度分析;

- (2) 支持异常识别、趋势预测、周期提取、安全评价;
- (3) 分级预警(一般、较重、严重), 预警准确率达 95% 以上;

(4) 多渠道推送, 实现早发现、早预警、早处置, 从“被动应对”转向“主动防控”。

3.5 关键运行数据对比表

表 1 关键运行数据对比表

对比维度	西安联能系统 (改造前)	蓝瑞系统 (改造后)	提升效果
数据采集成功率 85%	85%	99.9%	提升了 14.9%
年均故障次数	20 次以上	<1 次	下降 95% 以上
预警准确率	60%	95%	提升 35%
系统兼容性	私有协议, 兼容性差	国标协议, 全面兼容	实现多平台数据共享
运维人员需求	2~3 人值守	1 人远程运维	人力需求减少 50% 以上

4 改造后运行效果与综合优势

4.1 数据质量与连续性显著提升

南瑞系统投运以来, 彻底解决了原系统长期存在的数据跳变、漂移、中断、缺测等顽疾, 监测数据连续、稳定、精准、可信, 过程线平滑规律, 能够真实反映大坝在库水位、温度、时效等因素影响下的弹性变形、渗流变化、周期性规律, 为大坝安全评价、定期检查、年度整编提供了高质量数据支撑, 监测保障能力显著增强。

4.2 系统可靠性与抗干扰能力大幅增强

新系统采用工业级硬件设计、双链路冗余传输、强抗干扰结构, 在暴雨、大风、高温、高湿、强电磁环境下均能保持稳定运行, 未发生过全局性故障。MCU 采集模块、电源、通信单元运行平稳, 基本实现免维护、少故障状态, 极大减轻了运维人员现场巡检、故障抢修压力, 保障大坝全天候、全时段、不间断安全监测。

4.3 开放兼容架构有力支撑电站数字化转型

南瑞系统标准开放、接口通用, 成功实现与电厂水情自动测报系统、5G 智能巡检系统、集中监控平台的数据互通与业务联动, 打破信息孤岛, 实现“监测-监控-巡检-调度”一体化管理。系统可随时扩展测点、接入新设备、升级新功能, 完全适配电站智慧电厂、数字孪生、智能大

坝中长期建设规划, 可持续升级能力强。

4.4 降本增效成果突出

通过最大化利旧、国产自主、极简运维, 改造综合投入可控, 后期运维成本大幅下降: 备件采购难、价格高的问题彻底解决; 厂家到场服务次数大幅减少; 现场人工巡检、维护、标定工作量下降 60% 以上; 设备能耗更低、故障率更低、使用寿命更长, 全生命周期经济效益优势极为明显。

4.5 智能化预警推动大坝安全管理升级

依托智能分析模型与多维度预警机制, 系统可自动识别数据异常、变化过快、趋势偏离等隐患征兆, 并以多级预警方式及时推送至管理人员, 实现从“人工看数据”向“系统找问题”转变, 有效提升大坝风险识别、预判预警、快速处置能力, 为大坝本质安全筑牢技术防线。

4.6 实现核心设备国产化自主可控

本次改造全面实现核心硬件、软件平台、技术服务国产化替代, 摆脱对老旧停产设备与单一厂家技术依赖, 供应链安全、服务响应速度、长期技术支持均得到可靠保障, 符合国家关于关键基础设施自主可控、安全可信的总体要求。

5 运行存在问题与改进建议

5.1 现存主要问题

(1) 部分老旧传感器与新系统匹配度有待提升
少数服役年限过长、性能衰减的传感器, 虽经校准仍存在灵敏度下降、信号偏弱、噪声偏大等问题, 与蓝瑞高精度采集系统匹配性一般, 对整体数据精度有一定影响。

(2) 坝区复杂环境对无线通信存在一定干扰
坝顶、廊道内局部区域存在潮湿、多遮挡、强电磁干扰等情况, 少数无线通信模块在极端天气下偶发信号波动, 虽不影响数据最终上传, 但对实时性有轻微影响。

(3) 运维人员智能化应用能力仍需加强
部分班组运维人员对三维可视化、高级分析、模型计算、远程诊断等高级功能使用不够熟练, 系统智能化潜力未能完全释放。

(4) 标准化运维体系仍需持续完善
日常巡检、定期标定、通道校验、数据备份、故障处置等流程虽已建立, 但标准化、表单化、闭环化管理仍需细化, 以进一步提升长期运行稳定性。

5.2 改进措施与运行建议

(1) 按计划分批更新老旧传感器
制定传感器全生命周期管理计划, 优先更换数据偏差大、稳定性差、超期服役设备, 统一选用与南瑞系统高度适配的高精度国产智能传感器, 持续提升整体监测精度。

(2) 优化通信网络与信号覆盖

对无线传输点位进行信号复测与路径优化,合理调整天线位置、加装信号放大器、避开强干扰源;强化双链路冗余传输策略,确保极端环境下通信稳定可靠。

(3) 持续开展运维技能专项培训

定期组织蓝瑞系统操作、故障排查、数据分析、预警处置、平台应用等专项培训与实操演练,邀请厂家技术人员现场授课,提升运维人员自主运维、智能应用能力,真正做到“会用、用好、用透”系统功能。

(4) 健全标准化运维管理制度

完善《大坝观测自动化系统运行维护规程》,建立日常巡检、定期校准、季度联调、年度检定、数据备份、隐患闭环全流程标准化体系,明确岗位职责、操作步骤、考核要求,确保系统长期稳定、高效、可靠运行。

(5) 深化数据应用,提升智能研判水平

持续积累长序列监测资料,深入开展变形规律、渗流特性、环境响应、安全评价研究,逐步推进模型优化、阈值精细化、预警智能化升级,为大坝安全精准研判、科学调度提供更有力支撑。

6 结论

宝珠寺电站大坝安全观测自动化系统采用南瑞系统取代原西安联能系统的国产化升级改造,是解决老旧监测系统瓶颈、提升大坝安全保障能力、顺应电站数字化转型的必要且成功的工程实践。

(1) 改造从根本上解决了原系统设备老化、稳定性差、数据不可靠、兼容性封闭、运维成本高、智能化不足

等一系列突出问题,系统综合性能实现全面跃升。

(2) 南瑞观测自动化系统架构开放、协议标准、硬件可靠、软件智能、运维简便,完全满足混凝土重力坝大坝安全监测高精度、高可靠、长稳定运行要求。

(3) 改造后的系统数据采集成功率、运行稳定性、预警准确率、兼容扩展性大幅提升,年均故障次数、运维成本、人工值守强度显著下降,实现了安全更可靠、管理更智能、成本更经济、运维更简单的综合目标。

(4) 本次改造坚持利旧增效、平稳切换、国产自主、智能升级原则,形成了一套可复制、可推广的老旧观测自动化系统改造实施路径与管理经验,对国内同类型大型水电站大坝监测系统升级改造具有重要参考价值与示范意义。

随着系统持续优化、运维能力不断提升、数据应用持续深化,南瑞观测自动化系统将在宝珠寺电站大坝安全运行、智能运维、数字孪生建设中发挥更加重要的支撑保障作用,为电站长期安全、稳定、高效运行保驾护航。

[参考文献]

- [1] 国家能源局.水电站大坝安全监测工作管理办法[S].杭州:国家能源局 2020:1-2.
 - [2] 国家能源局.混凝土大坝安全监测技术规范(DLT 5178-2016) [S].北京:中国电力出版社,2016:2-3.
 - [3] 中华人民共和国水利部.水利水电工程安全监测技术标准(SL 601-2021) [S].北京:中国水利水电出版社,2021:3-4.
- 作者简介:彭涛(1972—),毕业于成都电力职工大学发电厂与电力系统专业,助理工程师,现就职于中国华电四川公司宝珠寺水力发电厂,任工作小组长。