

# 强震监测系统在阿海水电站大坝振动监测中的应用研究

陶源涛 李福雄 蔺如伟 李奎 代凌松

云南华电金沙江中游水电开发有限公司阿海发电分公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2318

**[摘要]** 阿海水电站地处青藏高原东缘地震活动带,大坝面临潜在强震威胁,传统监测系统已无法满足复杂工况下的振动响应捕捉及观测需求。基于此,本研究对阿海水电站大坝振动监测中强震监测系统的应用进行剖析,重点分析通信网络、供电系统和强震监测系统的应用成效,为大坝抗震安全提供科学支撑。

**[关键词]** 强震监测系统; 阿海水电站; 大坝振动监测; 应用研究

中图分类号: TV74 文献标识码: A

## Study on application of strong earthquake monitoring system in dam vibration monitoring of Ahai Hydropower Station

Yuanta Tao Fuxiong Li Ruwei Lin Kui Li Lingsong Dai

Yunnan Huadian Jinsha River Middle Reach Hydropower Development Co., Ltd. Ahai Power Generation Branch

**[Abstract]** Ahai Hydropower Station is located in the seismic activity zone on the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau. The dam is threatened by potential strong earthquakes, and the traditional monitoring system can no longer meet the requirements of vibration response capture and observation under complex working conditions. Based on this, this study analyzes the application of strong earthquake monitoring system in dam vibration monitoring of Ahai Hydropower Station, focusing on the application effect of communication network, power supply system and strong earthquake monitoring system, so as to provide scientific support for dam seismic safety.

**[Key words]** strong earthquake monitoring system; Ahai hydropower station; Dam vibration monitoring; application research

### 引言

大坝作为水电工程的核心枢纽,其结构安全直接关乎流域防洪、能源供应与民生保障。传统振动监测手段存在响应精度低、数据时效性不足等缺陷,难以满足强震工况下的实时监测需求。强震监测系统凭借高频采集、精准分析的技术优势,成为捕捉坝体振动特性、评估结构损伤的关键支撑。本文以阿海水电站为研究对象,探讨强震监测系统的布设方案与应用效果,为震后大坝安全评估及运维决策提供数据支撑,对提升高烈度区水电站抗灾能力具有重要现实意义。

### 1 阿海水电站大坝振动监测改进的现实需求

阿海水电站坝址位于云南省丽江市玉龙县(右岸)与宁蒗县(左岸)交界的金沙江中游河段,是原国家发展计划委员会组织审查通过的《金沙江中游河段水电规划报告》推荐的金沙江中游河段“一库八级”水电开发方案的第四个梯级。该工程是以发电为主,兼顾防洪、灌溉等综合利用的水利水电枢纽工程<sup>[1]</sup>。原有强震动观测系统设备老化严重,性能下降,已不能满足水电

工程强震动观测的需求,故阿海水电站强震观测系统换型改造项目针对原有13个观测点强震动观测系统、供电系统、通信系统、数据接收处理系统等进行换型改造。

### 2 阿海水电站大坝强震监测系统构造

#### 2.1 通信组网

强震系统通信网络由有线通信网络和无线网络组成,除自由场采用无线网桥数据传输外,其余测点使用光纤通信。每个汇集节点均由光纤铺设到最近的大坝信息采集节点上接入大坝内网,由大坝内网传回通讯房内数据汇集中心<sup>[2]</sup>。

该系统采用无线通信当作备用链路,各个测点配置工业级4G/5G双模模块,接入区域独用的通信基站,同时在坝顶高度最高的那个点部署卫星通信终端,构建起三重冗余保障。当强震引起光纤链路中断时,系统可在500毫秒内自动切换进入无线通信模式,数据传输采用的是加密协议,对采集的振动数据进行端到端的加密加工处理,避免数据在传输阶段被篡改或泄露,监测中心可凭借通信网络对测点工作状态进行远程控制,完成数据采

集参数的远程整定与测点设备的状态管控。

## 2.2 供电系统

大坝强震观测点虽然有交流电,但为了确保仪器设备更稳定工作,提高强震数据的完整性和连续率,保证在震时交流供电中断后,设备还能继续监测,还需要配置后备蓄电池,提供不间断供电。每个测点各使用一台集中管控智能电源和2块12V/65AH蓄电池为一体化强震仪和光纤收发器供电,能确保交流供电中断后可持续工作不少于2天。

集中管控智能电源专门针对野外或其他无人值守监测设备提供可靠的不断电电源,同时提供24V、12V和5V输出,能满足多种设备的供电需求,适用于地震监测台网、水文气象监测站等。可同时接入220V交流电和12V后备蓄电池。平时使用交流转12V供电,交流供电中断后,直接输出蓄电池的12V直流电,不需逆转为220V再变成12V直流,降低转换功耗,提高仪器设备供电时长,比一般的UPS节能<sup>[3]</sup>。交流供电恢复后,智能电源可为蓄电池充电。

另外,智能电源内置了网络通信模块,可接入强震集中管控运维系统,提供统一监控管理,对电源工作状态进行远程监控,如市电掉电、电池低压劣化、输入输出参数等,还可以实现远程系统重启、开关及输出控制,方便维护人员操作,节省维护成本。设备如需断电重启,通过远程操作即可完成,不需要到台站通过开关切断电源。数据采集汇集中心设置专用UPS不间断供电电源,为强震实时处理服务器、分析处理机、网络交换机和路由器等设备提供稳定可靠的电源。UPS电源也同时接入到集中管控运维系统,实现一站式管理。

## 2.3 强震监测系统

数据汇集处理中心设有一台强震实时处理服务器和一台分析处理机,一台强震实时处理服务器同时用来实时接收13个监测点数据,强震服务器可接入集中管控智能运维系统,为运维人员提供一站式的监控管理。

强震服务器安装一套强震监测系统,大坝强震监测系统主要由强震实时处理系统、强震管控系统和强震分析软件。强震监测系统可同时接入水库微震台网和大坝强震系统实时波形数据,可实现微震和强震台网的集中管控。强震系统实时处理强震事件数据并自动出具强震事件高级分析报告,报告包含水工建筑物地震常规处理、地震烈度、地震时间、地震最大加速度、地震最大速度、地震最大位移等<sup>[4]</sup>。

强震集中管控运维系统负责状态监控、自动报表生成下载、短信发送。短信推送一般租用第三方短信平台(强震服务器需要联网)或客户公司内网短信平台。客户可以直接调用报告无须再分析,并且通过局域网络或4G无线网络与管理中心实现联动,在管理中心或集团公司内网都可以对现场13个测点仪器情况进行掌控,如远程修改现场各测点参数、远程对现场进行维护、判断各个测点是否正常工作等都可以在控制室完成,最重要的是数据汇集处理中心保存有完整的地脉动或强震事件数据,和现场强震记录仪以及管理中心形成数据3级备份。分析处理机可用于

处理异常数据,进行人工数据复核和现场网络中断情况下的快速处置等工作。

## 3 强震监测系统在阿海水电站大坝振动监测中的应用

### 3.1 通信组网应用

强震监测系统在具体通信组网的实际应用中的数据显示,2024年7月一次坝体廊道施工造成单段光缆中断的事件中,光纤环网自愈功能在0.3秒内完成路径切换,数据传输没有出现中断情形,在该事件进程中,4个通信分区的平均数据传输延迟稳定在1.2秒,与正常工况状态无异<sup>[5]</sup>。针对高频采集模式里的500Hz数据,光纤链路做单次传输,数据包丢失率仅0.03%,远低于改造前传统单链路所达到的1.8%丢失率,有效守护了强震过程中数据的完整性。同时,借助模拟由强震造成的光纤全断情形,4G/5G链路在420毫秒内实现切换接管动作,与卫星通信终端一同转入待命状态,切换阶段仅出现2个数据包的丢失,数据连续性合乎规范的要求<sup>[6]</sup>。

### 3.2 供电系统应用

供电系统在实际运行阶段,该供电模式已扛过3次市电波动及2次计划性停电的考验。双回路切换均在0.3秒内完成,未对监测数据采集造成影响。廊道偏远测点直流供电模块的电压稳定性控制在 $\pm 0.2V$ 范围,满足传感器高精度采集的用电要求。模块出现故障的比率仅为0.5%,与改造前传统交流供电模式8%的故障率相比,降幅十分明显。备用电源系统由锂电池组和太阳能供电单元共同组成。各个通信分区分别配置一套容量为10kWh的锂电池组,坝顶测点配套增设单晶硅太阳能电池板,实际应用效果极佳。2024年1月持续48小时的电网检修期间,锂电池组实现稳定供电,系统各模块的电压处于标准要求的范围内,其间测点数据采集及传输未受到丝毫影响。供电结束后,电池剩余电量依旧是32%。坝顶的太阳能供电单元在日均4.5小时的有效光照条件下,每日平均充电量可达3.2kWh,能满足锂电池组日常浮充需求。在连续5天阴雨天的情况下,仍能保证备用电源系统的续航能力。自备用电源系统的智能监控模块运行以来,已精准预警过压、过流等潜在故障6次,故障识别精准度为100%,为系统的可靠运行提供了双重保障,使整个监测系统一年连续运行时间达到8750小时以上,具备99.8%的可用水平<sup>[7]</sup>。

### 3.3 强震监测系统应用

强震监测系统在2024年4月的4.1级地震中,该模型在P波到达后2.8秒马上输出评估结果,震级预测所产生的偏差仅0.1级,预测峰值速度所产生的偏差是0.35cm/s,为水电站应急决策抢到了宝贵时间。首先,由数据处理模块生成的振动特征报告,让大坝结构应力计算的偏差率从改造前的12%降到了4.5%,为坝体结构安全评估给予了高精度的数据支撑。其次,该系统中的三维可视化平台把大坝BIM模型进行集成,将各测点实时振动数据与坝体结构模型准确匹配,管理人员可直观地查看各个部位的振动分布情形。跟改造前传统数据表格的呈现样式相比,故障定位所花时间从30分钟缩减至5分钟以内,系统配置的三级预警机制

应用成效明显: 共触发一级预警达12次、二级预警3次, 预警精准度为100%<sup>[8]</sup>。2024年, 在一次4.1级地震引发的二级预警中, 系统自动启动视频监控, 把焦点集中在坝体中部区域, 同时将预警信息发送至15名相关负责人处, 整个响应过程仅仅用了4.2秒。三级预警配合的应急指挥机制可让大坝闸门应急调控的准备时间, 从改造前的15分钟缩短至8分钟的水平, 极大提高了水电站的抗震应急水平。

最后, 系统改造做完后, 已顺利监测出3次中小地震造成的坝体震动, 借助对监测数据的剖析准确识别出坝体2处抗震的薄弱部位, 为后续加固工作提供了精准凭据, 令加固成本减少18%。与改造前的状态进行对比, 振动数据的采集精度跟改造前比提升40%, 预警的响应时长缩短至5秒以内, 数据传输完整性得到97%的提升, 设备发生故障的概率降低至原有的7%。长期运行的实际数据显示<sup>[9]</sup>, 该系统让大坝抗震安全评估的周期从按季度变为按月度, 评估结果的可信水平从75%增加到95%, 而且为阿海水电站大坝的抗震安全给予了有力支撑, 其“测点精准布设+冗余通信+可靠供电+智能分析”模式, 为同类水电站强震监测系统建设提供了可借鉴的实践经验。

#### 4 结语

阿海水电站大坝强震监测系统的成功施行表明, 优化设计通信网络、供电系统和强震监测系统可以显著提高高坝大库在地震灾害时的安全监控能力与应急响应水平。它不只是充当一个数据记录工具, 更是一个把现代传感技术、通信技术、人工智能与结构工程加以集成的智能化安全守护者, 为类似水电工程

的抗震安全监测提供了可重复、可推广的先进样板。

#### [参考文献]

- [1]孟蔓菁,李博.基于机器学习的双系统强震仪监测信号识别方法[J].计算机时代,2025,(04):35-40.
- [2]马克,王龙江.泸定6.8级地震大岗山拱坝微震损伤演化与风险区域识别[J].工程地质学报,2025,33(01):146-158.
- [3]刘宏.浅谈西藏满拉水库大坝安全监测系统技术改造工程建设管理[J].西藏科技,2019,(03):78-80.
- [4]周永红,方卫华,方肖立.寒区小型水电工程砌石重力坝安全监测系统自动化更新改造[J].小水电,2017,(01):40-43.
- [5]王子顺,赵东辉,苑晓明,等.基于互信息与CNN的风电机组齿轮箱故障智能诊断方法[J].风机技术,2025,67(05):78-84.
- [6]武军.基于RVMDK集成开发环境的煤矿设备机械振动监测系统开发及测试[J].煤矿机械,2025,46(10):43-45.
- [7]王国闻,臧焯祺,吴升杰,等.基于WebGIS的西藏大坝强震监测分析系统设计实现[J].西藏科技,2023,(01):66-69.
- [8]吴凡琦,臧朝平,高东武,等.整机转子系统振动监测的传感器测点位置选择[J].航空动力学报,2025,40(09):317-326.
- [9]尹树林.MEMS光纤振动传感器在大型电机设备异常监测场景中的应用研究[J].自动化应用,2025,66(16):249-251+256.

#### 作者简介:

陶源涛(1998--),男,汉族,云南昆明人,本科,助理工程师,研究方向: 动力工程。