

# 面向智能大坝的安全监测自动化技术升级路径与实践

甘孝清<sup>1,2</sup>, 毛索颖<sup>1,2</sup>, 张 锋<sup>3</sup>, 黄跃文<sup>1,2</sup>

(1. 长江水利委员会长江科学院, 430010, 武汉; 2. 国家大坝安全工程技术研究中心, 430010, 武汉;

3. 中国三峡建工(集团)有限公司, 610040, 成都)

**摘要:** 大坝安全监测是保障水利工程安全运行的核心技术支撑, 自动化系统是实现监测高效化、精准化的核心载体。随着新一代信息技术快速发展, 大坝安全监测自动化技术正朝着“智能大坝”建设目标加速演进。通过梳理安全监测自动化技术发展历程, 结合6座典型工程调研结果, 剖析当前自动化系统核心性能指标与智能大坝建设需求差距; 从技术体系框架出发系统阐述智能感知采集技术、高效安全数据传输技术、高质量监测数据保障技术、智能预警模型构建及云服务平台技术五大关键技术的创新内涵与升级路径。白鹤滩水电站作为实践案例, 利用安全监测自动化系统实现了巨型大坝5分钟快速“全身体检”、运维效率大幅度提升及数字孪生赋能决策等成效, 验证了技术体系可行性与先进性。研究成果实现了监测装备自主化、组网模式高效化、平台服务集约化、数据分析智能化技术跨越, 为大坝安全监测从自动化、数字化向智能化转型提供了技术支撑。

**关键词:** 大坝安全监测; 自动化系统; 智能大坝; 智能感知; 云平台; 白鹤滩水电站; 数字孪生水利体系

**Upgrade paths and practices of automated safety monitoring technologies for smart dams//GAN Xiaqing, MAO Suoying, ZHANG Feng, HUANG Yuewen**

**Abstract:** Dam safety monitoring serves as a core technological pillar ensuring the secure operation of water conservancy projects, with automation systems acting as the essential vehicle for achieving efficient and precise surveillance. As next-generation information technologies advance rapidly, automated dam safety monitoring technologies are accelerating their evolution toward the “smart dam” development objective. By reviewing the historical progression of automated safety monitoring technologies and integrating findings from six representative project investigations, this study examined the current gap between the core performance indicators of the automation system and the requirements for the construction of smart dams. Through a systematic technical framework analysis, it elaborated on the innovative connotations and upgrade paths of the five key technologies: intelligent perception collection, high-efficiency secure data transmission, premium-quality monitoring data assurance, intelligent early-warning model construction, and cloud service platform. The Baihetan Hydropower Station was taken as a case study, demonstrating practical achievements including rapid 5-minute comprehensive structural assessment of the mega dam, significantly enhanced maintenance efficiency, and digital twin-enabled decision-making support and validating both the feasibility and advancement of this technical architecture. These research outcomes have facilitated significant technological leaps in indigenous monitoring equipment development, optimized network configuration, integrated platform

收稿日期: 2025-12-06

作者简介: 甘孝清, 工程安全与灾害防治所所长, 正高级工程师, 主要从事水利水电工程安全监测、评价及监控预警技术研究工作。

通信作者: 毛索颖, 高级工程师, 主要从事大坝安全监测智能感知技术研究与开发工作。E-mail: maosuoying@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3210704); 中国三峡建设管理有限公司科研项目(JG/20016B)。

services, and intelligent data analytics, thereby providing robust technical foundations for transitioning dam safety monitoring from automated and digitalized operations to intelligent systems.

**Keywords:** dam safety monitoring; automation system; smart dam; intelligent perception; cloud platform; Baihetan Hydropower Station; digital twin water conservancy system

中图分类号: TV6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2025)23-0036-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.23.006

## 一、引言

大坝是国家水安全体系的重要基础设施,承担着防洪、供水、发电、灌溉、航运及生态调控等多重任务,其全生命周期安全稳定运行直接关系到流域民生保障与区域经济发展全局。大坝安全监测作为保障工程安全运行重要技术措施,通过现场巡查以及在坝体、坝基及近坝区部署变形、渗流、应力应变、环境因素(如水位、气温、降雨量)等监测感知设备,实现对工程结构性态的感知与诊断,为坝体隐患早期识别、风险预警、科学运维提供决策依据。

大坝安全监测自动化系统是信息技术与大坝安全监测融合形成的技术体系。传统层面,其主要以用自动化手段替代人工观测为目的,依托程序化运行的机械/电子设备和标准化数据传输链路,实现远程感知控制、数据整编和基础分析功能。在云计算、物联网、大数据及人工智能等新一代信息技术的驱动下,大坝安全监测技术正以智能大坝建设为战略导向,加速向“透彻监测感知、智能分析预测、前瞻决策支持”方向发展。新时期自动化系统已突破传统自动化范畴,构建“感知—传输—存储—分析—预警—决策”的全链路架构,深度融合多领域先进技术,形成兼具自动化执行与智能化决策特征的融合系统,成为支撑大坝安全监测从自动化、数字化向智能化跃迁的核心载体。

当前水利行业数智化转型进程持续加快,智能大坝建设目标对大坝安全监测自动化系统的精准性、实时性、智能化水平提出全新要求。传统监测系统存在自主感知能力不足、数据传输效率低、数据质量难以保障、预警模型协同性弱、管理平台兼容性差等问题,已难以满足大型水利水电工程复杂监测需求。为精准把握技术升级路径,本文通过梳理国内外安全监测自动化技术发展脉络,以及调研典型工程现状,系统剖析其在感知采集、数据传输、数据质量、分析预警、平台软件等核心环节的问题,结合五大技术层面的创新研究与工程案例,系统解析面向智能大坝的大坝安全监测

自动化系统的技术升级路径与实践经验,为同类工程建设提供参考。

## 二、系统发展历程与调研分析

国外大坝安全监测自动化技术研究起步于20世纪70年代末期,美国Geokon公司、美国Campbell公司、加拿大Roctest公司、澳大利亚DataTaker公司等国际知名设备制造商研制的高性能监测传感器及采集装置,被广泛应用于世界各国的工程监测领域,但因引入成本高、后期维护不便、适配能力欠缺、存在数据安全风险、应用支撑不足等问题,在国内规模化应用受限。

国内大坝安全监测自动化技术的整体性应用始于20世纪80年代中后期,从与国外技术发展关联来看,经历技术引进、“消化吸收”到自主创新的发展历程。在此过程中,各型式国产化监测仪器、采集终端设备逐步涌现,自动化技术随之快速发展,实现了从半自动化到全自动化,从仅支持单一类型采集到混合复用采集,从集中式架构到分布式架构,从单一采集软件到综合管理软件,从内观自动化到内外观一体自动化的技术跨越。历经近40年的技术迭代与实践积淀,国内监测自动化领域已逐渐形成自主可控的完整技术体系。近年来,在国家大力推进大中型和小型水库大坝安全监测设施建设的举措下,大坝安全监测自动化系统已在国内水利水电工程中全面部署与应用。

本文调研了国内6座不同规模、不同建成年代典型工程监测自动化系统,通过分析其核心性能指标,为国内大坝安全监测自动化技术升级提供支撑(见表1)。

由表1可知,多数大坝安全监测自动化系统仍停留在“设备自动化采集”的基础层面,未形成全链路智能化闭环。面向智能大坝建设需求时,显现出几个显著短板:一是感知实时性不足,系统巡测时长普遍为15 min以上,难以满足突发工况下的快速响应需求;二是数据质量控制薄弱,系统均普遍存在粗差问题,依赖人工剔除粗差,缺乏有效的质量控制机制,影响安全研判的准确性;三是软件架构兼容性差,从感知层到分析

表1 典型工程大坝安全监测自动化系统情况

工程名称	工程规模	系统建成年代	接入系统测点数	采集终端设备数量	巡测时长	采集/分析管理软件是否独立	系统粗差情况	是否具有协同预警能力
小浪底水利枢纽	大(1)型	2022年	2943	158台/套	12 min	多款采集软件,且与管理软件独立	存在粗差,具备自动识别处理能力	基本具备
乌东德水电站	大(1)型	2023年	5955	495台/套	15 min	多款采集软件,且与管理软件独立	存在粗差且依赖人工剔除	基本具备
猴子岩水电站	大(1)型	2021年	3992	109台/套	32 min	各为独立软件	存在粗差,具备自动识别处理能力	不具备
大岗山水电站	大(1)型	2019年	2861	130台/套	15 min	各为独立软件	存在粗差,具备自动识别处理能力	不具备
瀑布沟水电站	大(1)型	2013年	1641	265台/套	15 min	多款采集软件,且与管理软件独立	存在粗差,具备自动识别处理能力	不具备
小漩水电站	中型	2021年	86	4台/套	20 min	各为独立软件	存在粗差且依赖人工剔除	不具备

注：“系统建成年代”指最近一次整体或局部升级改造年代；“协同预警能力”是指基于数据-机理-知识的多元协同的监控预警能力。

层、决策层的传输链路割裂,无法实现“数据—分析—应用”的无缝衔接,制约了系统整体运行效率;四是协同预警能力不足,多数依赖单一阈值指标预警,未构建基于数据—机理—知识协同的监控模型,预警的科学性和前瞻性不足。

因此,现有监测系统在技术架构、功能性能与应用效能等方面与智能大坝建设要求存在明显差距,已无法适应新时期工程安全监测的需求,亟须通过系统性技术创新实现升级突破。

### 三、关键技术研究与创新

大坝安全监测自动化技术智能化升级,依托于感知层、网络层、数据层、分析层与应用层五大核心层面技术协同升级。从技术体系框架出发,逐层解析技术创新内涵与升级路径。

#### 1. 智能感知采集技术

感知设备是大坝安全监测系统的基础与核心,根据技术演进阶段和功能集成度可分为三类:第一类为无源传感部件构成的模拟传感器,第二类为集成了模数转换、存储单元、通信接口模块的数字传感器,第三类为内置处理器与智能算法的智能传感器。其中,模拟与数字传感器搭配外置智能采集终端设备可实现智能感知功能;智能传感器本身已集成拥有感知—分析—决策能力,构成了完整的智能感知单元。

##### (1) 智能传感器

在智能传感方面,依托微机电系统(MEMS)研制的无线倾斜仪、固定式测斜仪、阵列式位移计,具有体积小、功耗低、延迟低、精度高等性能优势,正逐渐替代传统的电解液式、伺服加速度式测斜仪,在行业内实现广泛应用;基于电荷耦合器件(CCD)和控制局域

网(CAN)总线技术的垂线坐标仪、引张线仪,集成光源自适应调节、正交误差实时修正和边缘侧分析处理算法,突破了正、倒垂和引张线装置在节点组网数量、通信距离、测量精度上的技术瓶颈;利用磁场强度与位移量的线性关系研制的磁感应式传感器,其测量不受水气、粉尘及光照波动等非铁磁性介质影响,可实现大坝廊道高湿多尘等复杂场景下的监测,拓宽了监测应用范围。

这些新一代智能传感器(见图1)不仅具有高精度、响应速度快、高稳定性的特点,还集成了智能计算、测值补偿、故障自诊断、异常自决策等功能,显著提升了传感器智能程度边界,此外智能传感器通过采集、处理、存储和通信交互的一体化设计,为自动化系统的快速部署与集成提供了便利条件。

##### (2) 智能采集终端设备

在智能采集终端设备方面,针对大坝施工期与运行期监测的差异化需求,融合物联网、嵌入式及移动互联网技术研制了自动化数据采集单元、无线低功耗数据采集仪和手持式振弦差阻读数仪(见图2)。自动化数据采集单元支持振弦、差阻、电流、电压、数字式等多原理及变形、渗流、应力应变、温度等多要素传感器

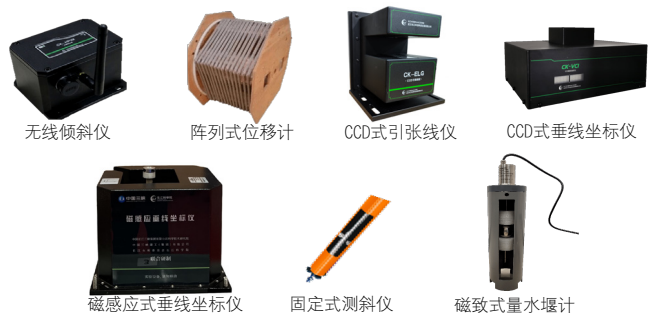


图1 智能传感器示例

复用测量,配置串口、以太网和蓝牙等多种通信接口,可实现监测数据实时召测、定时巡测与智能触发测量,满足大型工程多参量同步采集时效性需求;无线低功耗数据采集仪采用LoRa扩频通信与双核协处理器架构,通过算力动态分配技术平衡高性能与低功耗矛盾,适用于偏远测点及无供电场景,有效解决大坝施工期或工程边坡等野外环境下无人或少人值守运维难题;手持式振弦差阻读数仪采用高度集成化设计,尺寸小、重量轻、轻便易携,支持人工观测无纸化操作,可提升施工期临时监测与运行期巡检效率。

智能采集终端设备基于移动互联网、物联网交互理念,构建多终端协同智能交互模式。现场运维可通过手机蓝牙直连配置参数,远程调试依托内置Web服务器实现网页端操作,集中管控通过云平台API接口完成批量设备管理,解决传统采集设备交互单一、运维烦琐的瓶颈。

## 2. 高效安全数据传输技术

数据传输是大坝安全监测自动化系统实现远程控制与数据闭环的核心保障,其网络架构设计直接决定数据传输效率与稳定性。传统大坝安全监测系统监测站内的采集设备以环形网络组网形式,通过RS485串行总线方式开展轮询通信。在此机制下,超千测点的大坝安全监测自动化系统单次巡测耗时冗长(通常超过15 min),难以满足实时监测需求。

采用“单终端轮巡通道测量、多终端并行同步采

集”的创新模式,依托工业以太网与“监测站—采集单元—传感器”三级星型网络架构,构建实时高效的安全监测物联网平台。通过广播式指令分发与数据并行传输入库机制,实现超大规模采集网络的高速并行通信,其传输效率较传统串行轮询总线提升数十倍,彻底解决了传统系统传输滞后问题。传统轮询通信与以太网并行通信网络结构对比如图3所示。

数据采集汇聚到现场监测站后,若处于有线网络覆盖区域,通过光纤高速信息网络进一步传输至云端数据库;若为野外偏远测点等场景,则依托4G移动通信、LoRa低功耗广域网、NB-IoT窄带物联网、VPDN虚拟专用拨号网等构建无线传输通道,形成“核心网+接入网”的全链路保障体系。



图2 智能采集终端设备示例

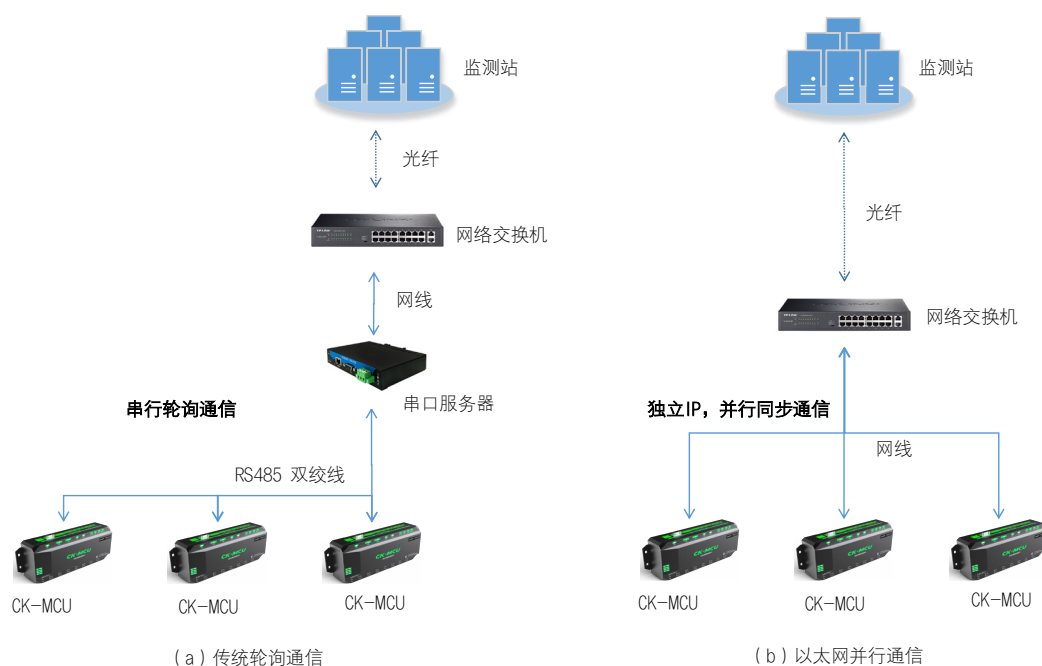


图3 传统轮询通信与以太网并行通信网络结构对比

为全面满足安全传输要求,建立“链路—数据—终端”三级加密体系,确保各类场景下数据传输的高效与安全。链路层采用IPSec协议加密无线传输通道,结合密钥交换与身份认证防止窃听篡改;数据层采用AES-256算法加密监测数据,核心密钥经独立通道定期更新以保障内容安全;终端层为设备配置唯一标识,通过集成国密SM2椭圆曲线公钥密码算法,实现终端的高可信度双向身份认证与数字签名,确保只有经过严格鉴别的合法设备才能接入网络,从根本上杜绝非法接入的风险。

### 3. 高质量监测数据保障技术

高质量监测数据是大坝安全监测系统实现精准分析与科学预警的前提。安全监测自动化系统是由采集单元、供电单元、网络单元等构成的复杂集成系统,其运行过程易受供电稳定性、网络传输质量、通道接口状况、绝缘性能及接地状态等多类因素的综合影响,进而导致测量数据质量不稳定,成为制约系统可靠性的瓶颈之一。高质量数据保障技术从技术层级划分,可分为感知层质量提升技术与数据层数据清洗技术两大模块。

#### (1) 感知层质量提升技术

振弦式监测仪器因精度高、寿命长、适合长线缆传输等优点,是当前各类工程部署规模最大的埋入式仪器类型。但该类仪器不同于常规类型仪器,它以交流信号为测量载体,易受工频、电磁辐射、结构振动等噪声干扰,且随服役时长累积会出现信号幅值衰减现象,这导致监测数据易混杂伪异常信息,成为自动化系统数据可靠性的关键制约因素之一。

振弦传感器普遍采用的时域测量法,在噪声干扰显著或信号幅值衰减明显的工况下,测量可靠性大幅度下降。谱分析式测量技术以谱馈式激励策略、谱减式滤噪及谱插值频率估计等算法为支撑,在完成测量同时,同步提取幅值、信噪比、衰减率等多维度时频特征,在边缘侧构建信号质量评价体系与测值置信评价闭环反馈的智测系统,实时甄别异常数据并实施补测,为已测数据标注置信权重,实现复杂工况下埋入式振弦传感器的高可靠测量,在感知源头保障了监测数据质量。

#### (2) 数据层数据清洗技术

监测数据清洗技术是以提升大规模监测数据处理分析效率为目标,基于极值理论建立阈值自适应更新算法,并利用无监督学习算法优势,通过时间序列分析、序列残差计算、集合式异常检测等多步骤处理流程,实现大数据场景下监测数据中异常值的精准识别与去除(见图4)。该技术无需人为设计标签和设置粗差阈值,且阈值自适应更新算法不需假设数据分布,显著提升了粗差识别效率和适用性。

### 4. 智能预警模型构建

智能预警模型是实现大坝安全风险前瞻预判的核心技术,其核心目标是基于监测数据精准识别工程结构性态异常,提前预警潜在安全风险。大坝运行过程中积累了大量的自动化监测信息、人工巡检记录、仿真分析成果,形成了多个信息孤岛,数据分析、结构监控指标定性化程度高,大坝多源信息与性态监控之间的解译路径不清晰,难以形成平台化、可复制能力强的监控模式。

#### (1) 单测点监控预警

构建结构性态分区、风险要素识别与多物理量协同监测的监控方案,实现监控测点从经验选取向风险驱动、精准布置的转变;以分析诊断为目标,基于大坝局部异常特征和整体失效模式,构建集成静态阈值、动态置信区间、演化趋势及有限元仿真的多级监控指标与测点异常预警体系,有效提升大坝关键风险的前置识别能力与监控精度。

#### (2) 多测点多维度监控预警

提出基于监测—仿真—检查的多源信息大坝结构安全状况评分机制,利用监测信息、仿真信息、现场检

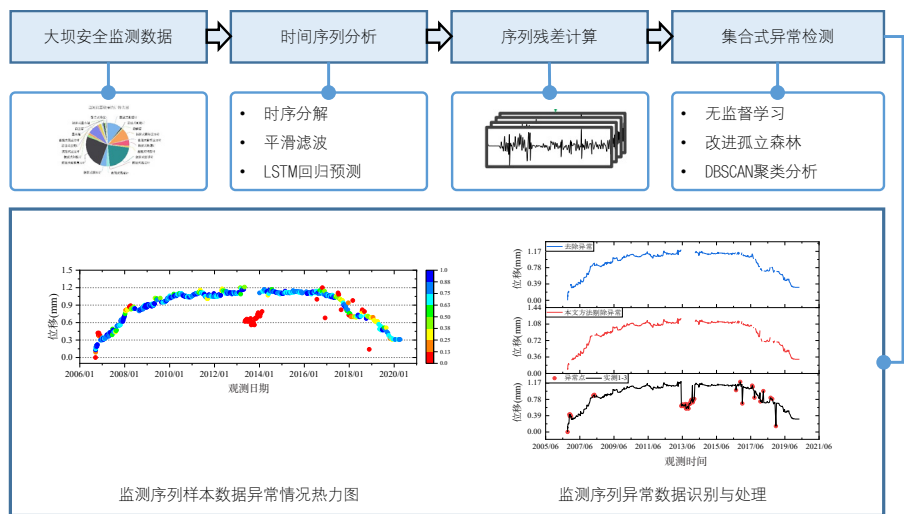


图4 大数据场景下监测数据中异常值的精准识别与去除

查信息3个信息源,分别从实测运行性态、结构安全复核、专家经验3个维度对大坝结构安全状况进行综合评判。实测运行性态维度,提出兼顾单测点异常程度和多测点空间关联关系的监测指标等级设置方法以及非线性评分标准,更客观评估大坝某方面的安全状态,避免因分散异常而低估潜在问题。结构安全复核维度和专家经验维度,以坝体应力和抗滑稳定安全系数为指标,等级划分与评分标准以设计思想为依据,正常状态对应规范最低要求,在此基础上通过参数和标准调整实现优选机制,并利用专家经验现场检查裂缝辅助进行区间插值。大坝安全多维监控模式见图5。

### 5. 云服务平台技术

安全监测采集与管理软件是大坝安全监测自动化系统的信息载体,是实现监测数据集中管理、分析研判与决策支持的交互平台。传统的软件系统多采用“采集与管理软件分立”和“一坝一软件”定制化开发模式,存在系统耦合程度低、开发成本高、复用性差、维护难度大等缺点,也制约了流域管理机构、集团化运营企业对下辖多座工程的在线预警监控和集中管控研判。

依托SaaS云服务模式与微服务架构为核心支撑,构建高效、灵活的大坝安全智能监控预警系统。SaaS

模式遵循云计算按需服务理念,用户无需购买软硬件资源,通过互联网浏览器即可随时随地使用数据采集、管理、分析、预警等全功能,以低成本、低门槛实现项目自助管理。微服务架构将系统按业务解耦为离散服务,采用Spring Cloud框架实现高内聚、低耦合,通过服务中心协调各模块协作。核心微服务包括数据管理、数据分析、报表报告生成、巡视检查、综合展示、监控报警等(见表2),可为不同用户角色提供独立功能,提升系统鲁棒性。

平台支持公有云、私有云或混合云部署,适配不同用户的安全与成本需求。结合Hadoop大数据集群实现海量数据分布式存储与计算,通过Nginx负载均衡分发访问请求,保障系统高效稳定运行。同时采用HTTPS协议加密数据传输,依托标准化接口支持多操作系统、多平台、多终端接入,形成安全、可扩展的技术体系。

## 四、系统建设实践——以白鹤滩水电站为例

### 1. 系统概况

白鹤滩水电站安全监测自动化系统于2023年12月建成投入运行、2025年8月完成实用化验收,覆盖混凝土双曲拱坝、水垫塘与二道坝、引水发电系统、边坡

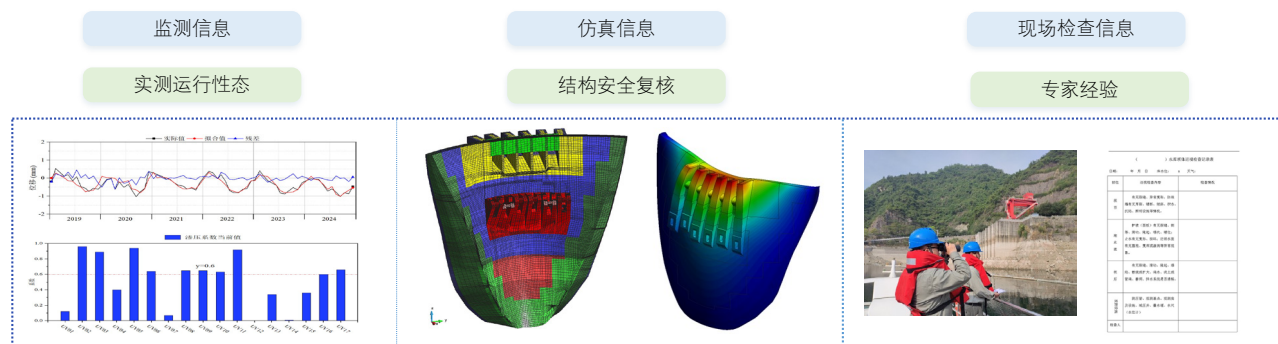


图5 大坝安全多维监控模式

表2 微服务系统列表

微服务系统	服务内容
数据管理服务	提供基础的数据管理功能,可对工程信息、仪器信息和仪器数据进行管理操作
数据分析服务	提供多种数据分析方法,支持对数据的整编和资料分析
报表报告生成服务	提供报表/报告的自动生成功能,用户可以根据自身需求自定义报表/报告模板
巡视检查服务	提供对巡检项目、内容及路线的管理功能,支持对巡视检查流程的管理
综合展示服务	提供对测点数据、报警信息、环境因素信息等的综合展示功能,便于用户对安全监测状态进行整体把控
监控预警服务	提供安全监控指标的拟定方法,支持自定义分级监控指标,提供实时监控预警服务
其他服务	其他各类微服务

及滑坡体等关键部位,建成了世界目前规模最大的水电站安全监测自动化系统,实现内外观监测数据的统一采集、分析和监控预警,有效提高了白鹤滩水电站大坝在线监控能力和风险防范水平。

系统由自动化采集系统与智能管理系统构成。自动化采集系统设置现场监测站—监测管理站—监测管理中心站三个层级,层级间主要采用基于TCP/IP协议的光纤局域网通信,部分距离较远的监测站采用4G无线通信(VPDN加密网络);部署CK-MCU自动化采集单元860套,共接入安全监测传感器13 000余支,应用了51台CK-VCI型CCD式垂线坐标仪、47台CK-FWM型磁致式量水堰计等新型智能传感器。现场监测站均实施标准化部署与建设(见图6),兼顾维护、防护与美观需求。

基于通用化设计和微服务架构,深度融合安全监测理论与方法,在无缝集成自动化采集系统基础上,开发并部署了白鹤滩水电站安全监测智能管理系统(见图7)。系统涵盖数据采集、数据管理、整编计算、资料分析、报表报告、监控报警、智能管理、巡视检查、工程管理、系统管理、综合展示等功能模块,实现了监测业务的全流程数字化、智能化管理。

## 2. 建设成效与亮点

白鹤滩水电站整体应用了本文所述智能感知采集、超大规模并行通信、数据质量控制、微服务架构融合等关键技术,其建设成效与技术亮点具体体现在以下方面:

①五分钟高效、可靠的“全身体检”。系统实现了超大规模自动化采集网络高速并行通信,在3 min内可完成13 000余支安全监测传感器的巡回测量,并在后续2 min内实现工程结构性态的初步分析与安全评价,支撑巨型大坝的5 min快速“全身体检”。

②智能交互模式提升现场运维效率。依托自主开发的智能终端互联应用程序,系统实现了人工仪表与自动化设备的在线智能比测、仪器运行性态的辅助诊断、“透明化+数字化”的人工巡检等实用功能,大幅度提升运维效率。

③专业化监测分析管理平台。实现了数据快速整编、成果批量计算和报告一键生成,大幅度提高了安全监测工作效率与成果质量;构建了“安全监测—分析预



图6 现场监测站

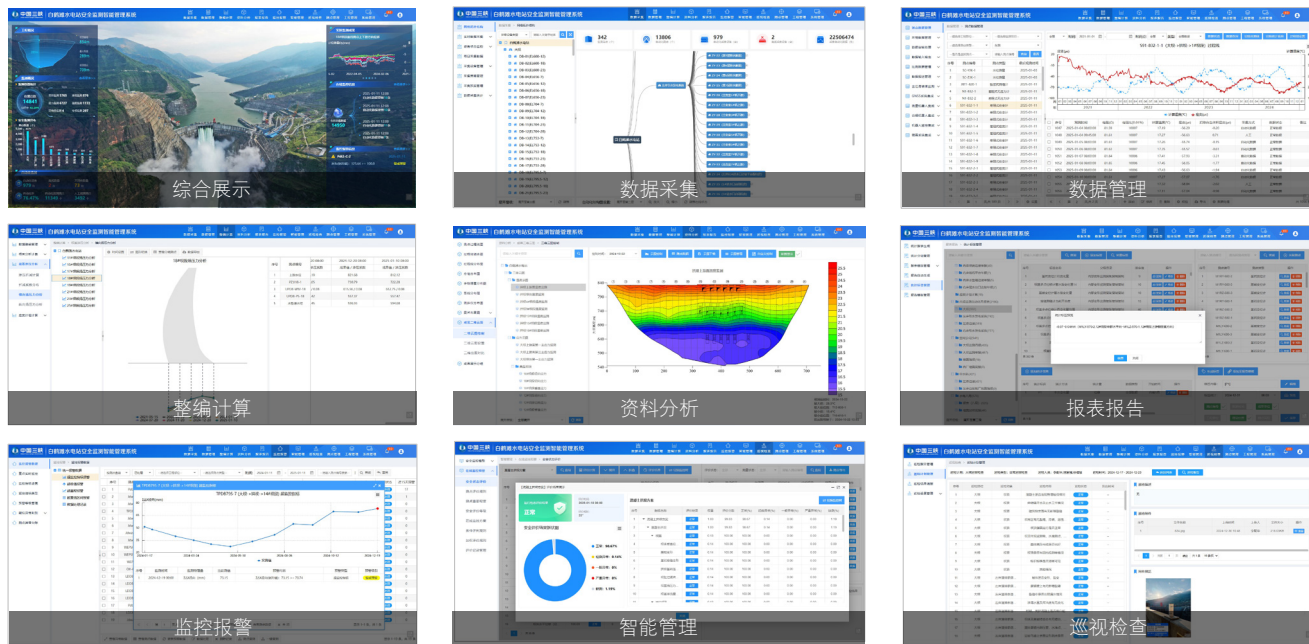


图7 白鹤滩水电站安全监测智能管理系统

测—监控预警—综合评估”全链条专业模型,有效支撑了高拱坝安全监测数据智能分析挖掘及在线监控预警业务。

④数字孪生工程赋能决策支持。挖掘监测数据价值,利用多类图表从时空维度分析大坝安全性态演变规律,结合倾斜摄影与BIM建模构建白鹤滩大坝数字孪生场景,融合实时数据、分析成果与预警信息,实现监测体系精细化三维表达,提升可视化水平,立体呈现大坝运行性态,为调度决策提供支持(见图8)。

## 五、总结与展望

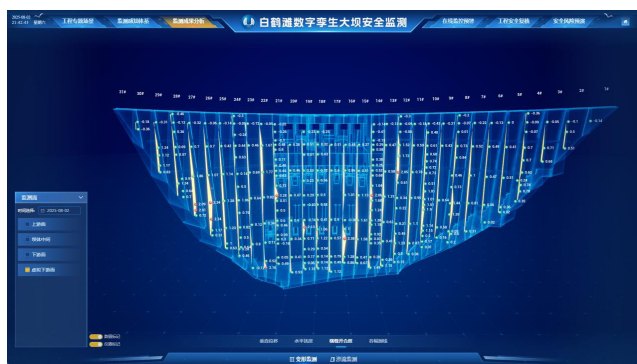
本文针对传统大坝安全监测自动化系统在实时性、智能化等方面存在的不足,明确感知采集、数据传输、数据保障、预警模型及云平台构建为核心升级要点,构建全链路技术架构与协同机制,在智能感知、高效数据传输、高质量数据保障、智能预警和云平台等层面实现技术升级,研发智能感知采集设备与系统并形成配套应用体系,经白鹤滩水电站等重大工程验证了技术体系的先进性及可行性。

当前大坝安全监测自动化技术仍面临核心器件自

主化不足、技术融合深度不够、跨专业协同欠缺等问题。未来需聚焦国产核心器件研发,深化人工智能与数字孪生技术融合,拓展与流域综合管理系统的协同应用,推动监测向数智化转型,提升大坝安全管控效能,助力智能大坝与智慧水利建设。

### 参考文献:

- [1] 刘毅,周秋景,赵运天.以智能大坝理念引领坝工技术发展[J].中国水利,2025(20):29-36.
- [2] 李国英.推进安全大坝、生态大坝、智能大坝建设[J].中国水利,2025(16):1-3.
- [3] 戴济群.已建大坝智能化改造实践探索与思考[J].中国水利,2025(16):39-45.
- [4] 高长胜,刘成栋,李登华,等.库坝安全智能监测感知体系构建与实践[J].中国水利,2025(16):72-80+90.
- [5] 周秋景,赵运天,聂鼎,等.智能大坝本质特征及功能目标研究[J].中国水利,2025(16):53-57.
- [6] 齐智勇,孙辅庭,毛延翩,等.基于全卷积神经网络的大坝变形监测数据粗差识别方法研究[J].水电能源科学,2023,41(3):87-90.
- [7] 盛金保,李宏恩,王芳.智能大坝建设与韧性提升发展路径研究[J].中国水利,2024(24):68-77.
- [8] 张斌,史波,陈浩园,等.大坝安全监测自动化系统应用现状及发展趋势[J].水利水电快报,2022,43(2):68-73.
- [9] 张锋,彭思唯,杜泽东.基于CAN总线的双轴测斜系统设计[J].长江科学院院报,2023,40(5):183-190.
- [10] 周芳芳,毛索颖,黄跃文,等.基于线阵CCD和CAN总线通信的引张线仪的设计与实现[J].长江科学院院报,2021,38(4):150-154.
- [11] 房宽达,张继楷,姚孟迪,等.基于磁通测量的大坝水平位移监测方法研究[J].人民长江,2024,55(7):247-253.
- [12] 黄跃文,牛广利,李端有,等.大坝安全监测智能感知与智慧管理技术研究及应用[J].长江科学院院报,2021,38(10):180-185+198.
- [13] 毛索颖,黄跃文,李云友.基于频谱反馈的振弦传感器自适应激励策略研究[J].传感技术学报,2023,36(4):522-528.
- [14] 牛广利,李端有,李天暘,等.基于云平台的大坝安全监测数据管理及分析系统研发与应用[J].长江科学院院报,2019,36(6):161-165.



(a) 安全监测成果立体展示



(b) 运行性态综合评价

图8 白鹤滩数字孪生大坝安全监测成果立体展示与运行性态综合评价界面

责任编辑 李卢祎