

基于云平台的水电站大坝施工物联网数据采集与分析系统

范玉磊

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]针对西南高海拔地区水电站大坝建设现场环境艰苦、检测站点分布广、数据分析难等问题,设计了一种基于云计算的大坝工程施工物联网数据采集及处理分析系统,在系统前端搭建多种智能传感网,运用边缘计算和多链路通讯方式保障对各类信息的有效收集汇总,在云端则利用时序型数据库和对象存储相结合的方式搭建起变形监测统计模型以及温度场仿真实验模型,并建立起三级智能预报预警系统以及风险辨识系统。以西南某巨型水电站大坝工程作为实例来对该系统的应用情况进行试验,证明了此系统对于高海拔环境下水电站大坝建设施工过程的安全监控有着良好的适应性和实用价值。

[关键词]云平台;物联网;水电站大坝;施工监测;数据采集;智能分析

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19412

中图分类号: TV5

文献标识码: A

Internet of Things Data Collection and Analysis System for Hydroelectric Dam Construction Based on Cloud Platform

FAN Yulei

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: In view of the difficult environment of the dam construction site of hydropower stations in the southwest high-altitude area, the wide distribution of detection stations, and the difficulty of data analysis, a data acquisition, processing and analysis system of the Internet of Things for dam construction based on cloud computing is designed. A variety of intelligent sensor networks are built at the front end of the system, and edge computing and multi link communication are used to ensure the effective collection and summary of all kinds of information. In the cloud, a deformation monitoring statistical model and a temperature field simulation experimental model are built by using a combination of time series database and object storage, and a three-level intelligent prediction and early warning system and a risk identification system are established. Taking a giant hydropower dam project in Southwest China as an example, the application of this system was tested, which proved that it has good adaptability and practical value for the safety monitoring of hydropower dam construction process in high-altitude environment.

Keywords: cloud platform; Internet of Things; hydroelectric dam; construction monitoring; data collection; intelligent analysis

引言

伴随着中国水电开发逐步深入到西部高原地区的高海拔地带,水电站大坝建设面临着严酷的极端低温及低氧环境、地形地质条件恶劣以及实际可利用的有效工期较短等诸多问题,在施工旺季人工巡查与单独开展离线监控的方式无法及时准确采集并分析大量数据信息需求,迫切需要借助物联网技术、云平台技术等相关前沿科技手段建立一个从采集到上传,再到保存,然后处理最后报警闭环式的自动化的全过程监控管理系统结构框架。长江科学院借助物联网、云计算以及大数据技术,运用 B/S 开发方式和微服务框架技术自研 CK-DSM 大坝安全监测数据管理系统平台,具有数据采集、信息服务、整理统计、监测告警等子系统功能,具有了大坝安全监测主动感知,云端管理和智能化应用的效果。同时国家能源集团自主开发建设和工业互联网平台“云上水电”,已经汇集了全国 17 个省、41 个流域、123 个水电站的数据,接入实时测点超过了 24.6 万多个,原始数据日增量超过三百 GB,由此可见水

电行业数据上云已经开始规模化使用。本文以西南地区某大型水电站大坝工程项目为依托,详细介绍了建立在云计算平台上的水电站大坝建设物联网监测系统的相关技术和应用实例。

1 西南高海拔地区水电站大坝施工特点

西部高原高山峡谷型水电站水库大坝建设难度非常之大,以西南某巨型水电站大坝为例,这座坝体的最大坝高达到 295m,成为目前全世界第二高、中国最高的堆石坝体,把我国的中心墙式堆石坝的筑坝水平提高到了 300m 级别。该工程项目所在的区域地质情况特别复杂,有强烈的边界断裂带活动以及大规模高坝抗震的问题、巨型水库库区岸坡变形失稳的问题、枢纽区的特大型边坡群稳定性及治理的问题、多源式的防渗土料的选择及其合理应用的问题等几大重点工程地质难题。在环境因素上,主要施工作业区域平均海拔 3000m,冬季漫长,常年六级以上的狂风肆虐,高寒缺氧等,施工困难重重,冬季有效施工时间不足 4h/d,夏季汛期达 40d 以上,大坝填筑总量

为 4300 万 m³，大坝基础渗流仅为 0.18L/s 左右，基本上可以做到“滴水不漏”。防渗性能达到了世界级大型水电工程的标准。因此，需要建设一个密集型、高频次、高可靠性的安全监控网络，在此条件下传统离线检测方式已经无法达到时空上的要求以及分析深度^[1]。

2 物联网数据采集与传输系统设计

2.1 传感器选型与布设方案（变形、温度、应力等）

针对水电站大坝工程施工阶段安全保障的需求，系统在大坝主体结构以及基础、边坡重要位置安装多种类、多指标的智能化监测传感器。对位移进行监测，在坝体内垂直不同标高处安装测缝计、沉降仪，在大坝顶部和两侧边坡处安装 GNSS 监测基站，持续获取大坝的位移及沉降情况；对温度进行检测，在建筑物内分别沿着混凝土心墙、反滤料等各类材料区段设置大量数字式测温元件，构建起三维热环境监测体系；应力监控，则是在地基以及建筑物重要的承重地方安置钢筋计、土压表等装置，监测施工加载时的大厦应力变化特点。CK 类安全智能采集器能够同时接入多种类型的被测传感器，包括振弦式、电阻式、电压、电流、数显等，可以采取手机 APP、WEB 网页等多种方式进行设置，应用于水库大坝、调水工程以及水闸等各种工程建设项目的各个阶段和使用过程中对安全状况进行检测。各类型传感器安装数量、参数要求以及监测周期见下表 1。

2.2 数据采集终端与边缘计算

数据采集终端属于物联网感知层的重要环节，在各个监测断面上分布有全自动化的数据采集模块（MCU），可以定期巡查以及即刻获取区域里边各种类型的探测器的数据信息。CK-MCU 全自动化的数据采集模块是整个系统的主采集装置，可以采集振弦式、差电阻式以及电流电压等多种形式的传感器，能够完成对工程检测设备的自动测试并保存下来，配置了比对应用程序，可以随时了解测量结果以及对比结果，利用以太网络进行组网使巡测的速度大幅提升，在边缘计算端口方面，采集装置内置数据分析程序，会对最初的数据做筛选、清洗、筛选出有用部分再传送到云端，减小了传输量以及存储量。此外，边缘节点还提供阈值触发式的加密采集的方式，在检测的数据接

近或者超过了设定的阈值的时候，便会实时地提高对数据采集的时间间隔，从小时级变为分钟级，给应急处理提供大量的实时监测数据。

2.3 通信网络与数据汇聚（含断点续传机制）

对于水电站施工现场远离市区，环境复杂的特性，建立了一套多元化的冗余通讯网络体系，主干层使用光缆以太网，沿着施工现场的道路以及走廊铺设保证大流量的数据快速稳定传递，在无法到达的斜坡以及临时施工作业区内使用 4G 无线通信及 LoRa 低功耗广域网作为补充形成了有线和无线相结合的混合组网模式。CK-LAT 低功耗数据采集仪运用低功耗技术以及锂电池供电，使用寿命长达两年以上，在现场架设布设方便不用铺设供电，通讯电缆，可以根据实际需要选用 LoRa、NB-IoT、4G 无线传输方式，便捷地接入物联网设备联网平台，尤其对一些无电源供应，开放式户外场所如边坡、土石坝等适用性较强^[2]。断点继续上传的功能为维持数据完整性的重要功能：当采集端监测到网络断开状况，会自行把所收集的数据存储到本地环流缓冲区内，一旦重新恢复了网络，系统就会按先后顺序进行继续上传。针对施工高峰期大量数据传输问题，传输层也制定了优先权排程机制，变位、渗流等重要监测数据具有最高的传输优先级别，在保障主要信息及时性的基础上完成全部数据汇总工作。

3 云平台数据处理与智能分析系统

3.1 云平台总体架构与部署模式

云平台采取分层结构设计，由下至上分别为感知层-传输层-数据处理层-应用服务层，层层之间相互连接环环相扣组成闭环控制体系，支持公共云、私有云以及混合云等多种部署方式以适应单坝建设期间监测与大坝群体式管理的不同需求场景；其建立在微服务的基础之上，各个子项可以单独部署也可以根据需要进行弹性伸缩从而极大地增强系统的维护性和扩展能力。云服务平台包括数据收集，资讯管理，整理统计，监督管理，巡查检查，报表汇报，图表展示等板块，可以用于一个水电站的大坝的安全监测管理工作，也可以解决多个水电站的大坝安全监测的工作汇总问题，便于对整个流域公司的所有水电站大坝安全进行统一监控与管理。

表 1 传感器选型与布设参数表

监测类型	传感器类型	量程	精度	采样频率	布设区域	布设数量	防护等级
变形监测	测缝计	0~50mm	±0.1%FS	1次/h	坝体横缝、周边缝、坝肩接触面	180支	IP68
变形监测	GNSS 监测终端	水平/垂直位移	±2.5mm+1ppm	1次/h	坝顶、下游坝坡、两岸边坡	36台	IP67
温度监测	数字温度计	-30~85℃	±0.2℃	1次/10min	心墙、反滤层、坝基、上下游坝面	450支	IP67
应力监测	钢筋计	0~400MPa	±1%FS	1次/h	坝基廊道、心墙底部、锚固区	120支	IP68
渗流监测	渗压计	0~1MPa	±0.5%FS	1次/h	坝基防渗墙、心墙底部、坝肩	85支	IP68

3.2 数据存储与管理技术(时序数据库+对象存储)

基于水电站大坝施工现场监测数据体量大、记录频次高、主要为时间段查询的特点,系统使用了时序数据库加对象存储相结合的混合式存储方案。频繁监测的数据(如温度、应变、渗压等传感器时序数据)存储在时序数据库中,通过先进的数据压缩技术和以时间为窗口的查询加速机制大大节省了存储开销并且提高了查询效率。Influxdb是一个专门用来存储和处理时序型数据的开源数据库,具有极快的写入速度、最高效的压缩率、原生的支持基于时间的时段查询功能、内置的持续查询机制等优势,在重新定义工业领域数据架构方面有着卓越的表现。

3.3 数据预处理与质量控制方法

初始采集的数据都不可避免地存在一定的噪声及离群点以及空缺值,在研究之前都需要经过相应处理。系统先从传感器物理量程和统计数据分布特性上对其有效性进行了检查并剔除了那些远远大于正常的极大值。同时针对连续监测过程中出现的空缺值,运用了线性内插法与序列预测相结合的方式对其进行填充处理,对于短时间内断开的空缺值使用线性内插法进行插补,而对于长时间中断的情况,则通过建立ARIMA模型利用其趋势来推断进行填补^[3]。数据质量管理上,系统借助多方信息校验的方法来提高数据可信度:比较温湿度传感器检测值同施工现场实际天气情况,比较变形观测数据与有限元计算数值之间的差距,当出现较大差异时启动核查程序。

3.4 大坝施工数据分析模型(变形监测、温控分析等)

平台融合了针对水电站大坝建设时期的多种专项分析模型。对于变形检测模型而言,在传统的静水-季节-时间(HST)模型之上增加实时温度滞后因子以建立优化的水-温-时统计型监测模型,准确描述高寒地带昼夜温差变化对大坝变形的曲线作用关系;HST模型为一种经验统计模型,采用水压力部分与温度部分及时间部分之和去近似地表示大坝变形观测值。温控计算模型,根据坝体内三维温度场观测以及施工工期情况来建立混凝土水化热发展过程以及散热边界条件相联系的热力学模拟计算模型。及时对大坝不同部位的温度应力情况进行监测,并给出温控防裂判断的数据参考。同时对于高心墙堆石坝浇筑施工特点,在此基础上也建立了以观测到的实际沉降量为基础进行压缩模量反推分析的方法。从而实现后续填筑施工参数的合理调整。

3.5 智能预警与风险识别机制

智能告警体系以多层次阈值判断加趋势分析双重手段的形式进行工作,系统针对各种监控指标设定了一种蓝色、黄色、橙色、红色四个级别的告警阈值,对应着常规波动、警示提示、加强观察以及紧急处置四种级别,如果监控数据显示达到了一定的数值则会启动警告并以手机短信、网页推送等形式告知负责人员;更重要的是

采用机器学习模型来对监控量的时间序列做趋势分析,在监测量还未达到警戒值但是有急速上升趋势的时候提前做出预警。以变压器结构为基础的多模态预训练模型可以很好地将大坝运行状况实时监测信息以及历史隐患信息、工程资料、BIM、空间信息等多种类型异质信息进行有效融合,在线开展水库大坝潜在危险的实时监测与智能化警示,该模型不仅可以准确地分析出隐患发生的可能性大小而且能够实时更新风险指数、警戒等级以及防范措施建议。

3.6 数据可视化与决策支持系统

数据可视化成为关联监测信息与管理措施的重要纽带。平台开发了GIS地图为底的施工安全生产形势“一张图”,将坝体三维模型及各个监测站点监测数值同步映射到一起,在平台上就可以清晰明了地看到各个区域的安全状况,一个监测点的数据平台会自动生成时程曲线图、相关性图表以及频谱图等多种图表类型,便于观察多点同时期不同指标间的相互比较;决策辅助层面则拥有报表自动生成功能,可以按日、周、月、季等方式自动化生成施工安全生产监测日报表、月报表、季度报表等,包含数据齐全度统计、突发情况汇总、走势判断结果以及警示响应对策等内容。借助手机APP,一线工程人员随时可以访问重要监测指标,获得报警提醒以及上传巡视过程中遇到的问题等,做到工地端和后台指挥室高效联动。

4 系统实现与工程应用分析

系统在西南某大型水电站大坝建设过程中进行了全方位的设计并得到了工程建设的应用检验。系统涵盖了坝体、坝基、边坡以及施工附属设施所有重要部位,总共安装各种传感器1000多个,建立了密织的三维监测体系,在信息传输上光纤骨干网达到25公里之长,无线网路遍布所有的边坡地带,系统的综合信息采集率高达98%以上^[4]。两河口水电站的大坝经过67个月的不间断建设,在提前一年的情况下填筑到位,累计填筑量达到了4310多万m³,实现了300m级高超心墙堆石坝由数字建造向智能建造转型。云平台每日处理监控数据达到百万以上级别,最高写入速率达到5000条每秒,符合施工高峰时期高频次数据采集的需求,在模型检验上,变形监测试验模型对于大坝沉降趋势预报相对误差小于5%,温控分析试验模型及时预估出三处可能发生的气温裂缝隐患区段,总共进行过28次有效报警其中前兆报警次数占到整体的60%以上,提供了重要的技术支持作用,证明了基于云平台的物联网大数据收集处理系统适用于高海拔复杂施工现场环境。

5 结语

本文针对西南高海拔地区水电站大坝建设安全管理的实际需要,设计并开发了一个基于云计算平台的物联网数据采集及处理信息系统,对传感器数据进行采集、汇总

到云端存储、处理以及智能化预报等各个环节构成一个完整的监测网络系统。工程实践证明,本系统很好地解决了在高海拔地区建设管理过程中存在监测数据难获取、分析延迟、报警滞后等问题,大大提高了施工现场的安全管理水平。未来,在数字孪生、大模型等新技术的发展趋势下,本系统可以向着覆盖施工全要素的数字化映射以及智能化决策的方向发展,为高海拔地区水利水电工程建设及安全管理带来更多的技术支持。

[参考文献]

- [1]刘辉军.水电站大坝在线监测管理平台的应用研究[J].中国信息界,2025(12):18-20.
- [2]甘孝清,毛索颖,张锋,等.面向智能大坝的安全监测自动化技术升级路径与实践[J].中国水利,2025(23):36-43.
- [3]杨海云,唐贤琪,陈泽钦,等.面向电网运行的大坝安全群控云平台关键技术[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(8):674-678.
- [4]解旭柯,刘志军,邓维强,等.水电站自动发电控制测试平台的设计与实现[J].自动化应用,2025,66(7):28-30.

作者简介:范玉磊(1990.4—),男,毕业院校:四川理工学院,所学专业:工程管理,当前就职单位:中国水利水电第十二工程局有限公司,职务:项目经理,职称级别:高级工程师。