

水电站全站仪远程集中控制系统设计与运行优化研究

张 凯 刘洪具

宝信软件(云南)有限公司 云南昆明 650000

摘 要: 水电站工程在运行过程中对结构变形、安全监测、库岸稳定性等方面提出了高频次、精度高的测量需求。在高海拔、偏远及多点分布的水电站环境中,传统依赖人工巡检与本地控制的全站仪管理模式,不仅响应滞后、效率低下,更面临恶劣环境对人员安全与数据连贯性的挑战。本文围绕水电站现场监测中全站仪的远程集中控制需求,系统性地设计了一种基于物联网与智能边缘计算技术的全站仪远程集中控制系统。在明确系统架构、通信协议的基础上,构建了具备设备统一调度、远程参数配置、自动化任务执行与运行数据回传等功能的一体化平台。针对多点布设、复杂地形及多工况切换等运行场景,进一步提出了优化调度算法与数据同步机制。

关键词: 水电站; 全站仪; 远程集中控制; 系统设计; 运行优化

引言

我国水电站朝着山区、边远地区以及高海拔区域布局的速度不断加快,在此过程中,工程结构变得日益复杂,运行环境也变得日益恶劣,这就对关键部位的位移监测、边坡稳定评估以及坝体变形预警提出了更高精度和更高频率的测控需求,全站仪作为可实现三维空间点位精密测量的关键仪器,在水电工程形变监测中长久以来都起着核心作用。当下物联网、边缘计算、5G 通信以及大数据等技术在工业测控领域融合发展,为构建水电站智能测控系统奠定了技术基础。借助远程集中控制系统对多点全站仪进行统一调度、实时数据采集、远程运维以及智能分析,可达成全天候、无人值守的自动监测,又可以与预警系统联动响应,极大提升测量系统的稳定性以及预警能力。在面对高陡边坡、施工变形、高地震烈度区等特殊工况时,远程集中控制系统可突破传统运维的瓶颈,切实保障电站运行安全。

1 水电站全站仪远程集中控制系统总体架构设计

1.1 构建基于“边—云协同”的多层级控制架构

在水电站全站仪远程集中控制系统里,首先要搭建起“边缘控制—通信中继—云端指挥”这样的三层协同架构,以此达成数据的实时采集、快速响应以及统一管理。其中边缘控制层设置在测量现场,其作用是接入全站仪、转台系统、环境监测模块等感知设备,像温湿度、风速、降雨量这些设备,采用国产嵌入式工业控制主板,例如基于 ARM Cortex - A72 架构的主板,搭载轻量级 Linux 操作系统,运行本地测

控调度程序和设备驱动。通信中继层运用多通道冗余机制,包含主干 5G 通信模块与备用 LoRa 或有线光纤连接模块,在弱信号环境下会自动切换,以此保障数据传输的连续性。云端控制层依靠阿里云 IoT 或私有云服务器进行部署,集成测量任务调度模块、实时数据处理模块、异常报警模块以及权限管理模块,依靠 HTTPS 和 MQTT 双协议通道接入各个边缘设备,达成对全站仪运行状态的集中调度与监控。另外系统配备 Web 可视化管理界面与移动端 APP,支持远程访问、数据查看以及异常操作提醒,形成完整的信息闭环。

1.2 统一全站仪控制指令集与调度协议体系

要达成多品牌以及异型号全站仪的远程集中控制目的,就得设计出一套统一的控制指令集合与调度协议体系。此体系是依据标准 OPC UA 协议框架构建的,向下借助中间件来解析不同厂商像徕卡、拓普康、索佳等仪器的私有通信协议,向上则封装成统一的 RESTful API 接口集合,以供平台调用使用。每一台全站仪都被映射成一个“虚拟设备节点”,其设备状态、任务队列、日志记录以及历史数据借助 JSON 格式对象进行统一管理。调度逻辑运用多线程非阻塞任务分发机制,达成并发控制以及状态回收^[1]。系统会把每日测量任务依照时间片段和优先级来分级,借助“时间窗口—空间点位”二维调度矩阵给予分发,以此保证各测站能在最优时间窗口内完成测量作业。控制指令集囊括初始化自检、目标定位、测角、测距、数据上传、异常复位、姿态调整、断点续传等操作命令。系统支持批量下发、自动重试以及差错校

验机制,提升操作的可靠性与灵活性,整体协议体系可凭借配置文件灵活扩展,兼容未来新型号全站仪接入。

2 水电站全站仪远程集中控制系统功能模块设计

2.1 自动测量计划调度模块

系统预先设定测量区域的站点频率,借助引入的支持时间序列回归的预测模型比如 LSTM 神经网络来预测不同区域的变形趋势,同时结合实时水位数据、雨情雷达回波图、滑坡预警信息等外部触发因子,以此达成测量周期的动态调整。像在预测到未来 48 小时内库区水位涨幅超过 2 米或者降雨量超过 50mm 的时候,系统会自动提升边坡敏感点的测量频率,并且重新排列测量优先级。任务调度由平台后端控制器进行管理,运用“任务池—站点队列—时间窗口”三层任务模型,协同边缘网关把任务分发给各个测站,实现高效排程以及资源的最优利用。

2.2 故障自诊断与远程维护模块

在全站仪设备上部署状态感知模型,可实时收集电压、电流、伺服电机负载、指向时间延迟、测角反馈误差以及通信信号强度等一系列运行参数。接着运用阈值与趋势算法,像是移动平均偏离法,来识别异常运行状态,像光路遮挡、云台卡滞或者数据回传失败等情况。检测得出的结果会经由 MQTT 协议上传至主控平台,该系统可自动识别故障类型,触发预设的维护脚本,其中囊括远程软件重启、测头归位、初始化标定指令下发以及系统日志抓取等操作。还集成了远程固件升级功能,以此保证设备软件维护过程中无需人工进行干预。

2.3 智能姿态校正模块

山区基座位移致使测站姿态出现漂移情况,于是在全站仪控制基座上集成了三轴倾角传感器以及高精度 RTK 模块。每次测量任务结束后会进行初始标靶回测,之后与内置基准点数据库开展误差拟合分析。系统借助自适应视觉标定算法并结合设备云台旋转角度,能自动识别偏差源生成校正量。要是姿态偏差超过 $\pm 0.2^\circ$,系统就会触发自动调整流程,驱动微型电动支脚或者反馈警报提示人工干预,以此保证测量坐标系统稳定且一致。

2.4 多点数据融合模块

为了提高边界测量的精准程度以及冗余特性,系统专门设计了数据融合模块,以此来支持多个全站仪针对同一目标点展开交叉测量以及拟合工作。运用改进型卡尔曼滤波以

及最小二乘法来进行空间坐标数据的重新构建,并且引入基于观测角、距离以及历史稳定性的测量权重分配机制,对各个设备的数据进行动态加权平均。在平台端搭建三维坐标融合库,把测量数据按照“时间戳—坐标对—设备源—置信度”的形式存入库中,自动去除偏差值并生成最优结果集,为边坡或者坝体轮廓建模提供高精度的基础数据。

2.5 预警联动模块

此模块借助 API 接口与大坝在线监测平台、气象预警系统以及工程调度指挥中心相连接,实现数据的实时共享,系统之中设有多级预警规则库,像位移速率超过 5mm/d、测点出现异常连续达两次、连续信号发生中断等情况,一旦全站仪返回的数据触发规则阈值,系统便会自动把告警事件推送至值班人员平台。此平台包含短信、APP 推送以及语音通报等方式,同时还会联动其他设备,比如摄像头、加速度计,自动针对异常区域展开记录。在必要之时,会经由指挥系统发送调度命令,以此调整测量计划或者启用应急监测流程,保证在灾变发生之前可做到可视且可控。

2.6 历史数据分析与模型预测模块

此模块借助时间序列数据库来存储全站仪多点历时坐标数据,构建数据湖模型,并且凭借 Python 平台把回归分析以及机器学习预测模型进行集成,以此对坝体或者边坡的变形趋势展开建模与拟合工作。该平台可生成点位预测曲线、形变热图以此来以及趋势拐点预测,还支持用户自行定义预测周期与模型参数^[2]。预测结果作为输入会反向影响测量调度逻辑,达成真正的“预测驱动测量”以及“异常驱动预警”,提升系统整体的智能水平。

3 水电站全站仪远程集中控制系统运行优化案例分析

3.1 案例背景

在我国西南山区的一处典型梯级水电站,其坐落于 V 型峡谷地形当中,该电站的总装机容量为 42 万千瓦,每年所发电量超过 16 亿千瓦时。大坝采用的是混凝土双曲拱坝结构,最大坝高达 192 米,库岸两侧的边坡十分陡峭,地质构造较为复杂,地震烈度也比较高。这座电站运行多年之后,发现左岸坝肩以及上游库岸有多处出现了变形征兆,需要增加全站仪测点的密度,并且要实现全天候的监测。但是测点分布范围广泛,交通条件不便,天气变化多端,而且部分测点处于高空吊装平台区域,传统的人工巡检以及本地控制模式已经没办法保障测控的效率与安全。为了提升监测的

自动化水平，同时实现异地集中管理，项目组在 2024 年启动行优化项目，该项目覆盖测量、通信、计算、预警等关键环节。动了“基于边云协同的全站仪远程集中控制系统”建设与运

表 1 自动测量计划调度标准

测站编号	所在区域	正常测量频率（次/天）	预测水位涨幅（m）	48h 预报降雨量（mm）	是否触发预警机制	调整后测量频率（次/天）	优先级调整情况
A01	左岸边坡 I 区	2	2.3	61	是	6	提升至优先队列
B07	右岸坝肩 II 区	3	1.1	45	否	3	保持不变
C12	上游库岸 III 区	1	2.8	78	是	5	提升至优先队列
D09	消能池边墙	2	0.6	25	否	2	保持不变
E03	通航边坡	1	2	52	是	4	提升至次优队列

3.2 部署方案

依据该电站独特的地理环境以及测控需求，系统部署运用分区分层策略：总共设置 13 套全自动徕卡 TS16 型全站仪，分布在坝肩、库岸以及边坡监测的重点区域，每一台仪器都配备了三轴高精度倾角传感器、UWB 防干扰通信模块以及 RTK 接收单元，边缘计算终端选用基于 ARM 架构的嵌入式工控主板，预先安装了 Ubuntu 系统与 Python 监控脚本，承担着任务调度以及数据初处理的功能。每一台终端借助 5G 公网 SIM 卡与电站光纤专网进行双链冗余传输到主站服务器，主控平台部署在中心控制室，采用国产信创架构服务器，运行集中监测平台软件，集成数据库、调度算法模块以及三维 GIS 可视化模块，支持远程操作以及异常报警，系统接入电站现有的坝体变形预警系统，形成联动响应机制，达成全天候无盲区自动监测运行。

具体方案中所构建的自动测量计划调度标准如表 1 所示。

3.3 优化效果

具体实施后的优化效果如表 2 所示。

部署后的结果显示，该系统让测量的实时性以及覆盖率得到了提升，在复杂气象状况以及夜间作业条件下，全站仪自动执行任务的成功率提升到了 98% 以上，边云协同这种部署模式有效地降低了通信中断的概率，还缩短了设备故障响应的时间，很大程度上缓解了人工压力以及安全风险，达成了水电站关键区域的智能化监测以及集中管控，为类似高风险山区的水电站提供了可复制的技术范式。

表 2 优化效果

指标项目	部署前	部署后
平均测量响应时间（秒）	180	28
测量点位日均覆盖率	62%	98%
预警触发识别时效（分钟）	90	12
人工巡检频次（次/周）	14	2
异常数据丢失率	3.20%	0.30%
系统稳定运行时间（月均）	470 小时	714 小时（满载）

4 结语

本文围绕水电站全站仪远程集中控制系统的设计与运行优化展开系统研究，构建了边云协同、多模块协作的控制体系，并细化设计了六大功能模块，包括自动测量调度、故障诊断、姿态校正、数据融合、预警联动及历史预测等核心环节，具备高度可实施性与工程适应性。结合典型山区梯级水电站的部署案例，验证了系统在多测点管理、通信可靠性、数据实时性与预警响应等方面的显著优化效果，全面提升了测量系统的自动化水平与安全管控能力。本研究不仅为水电站复杂环境下的全站仪测控提供了一套高效、智能的技术路径，也为推动水电工程智慧运维和数字化升级提供了理论支撑与实践范式，具有广泛的推广应用价值。

参考文献：

[1] 刘勇. 抽水蓄能电站施工测量平面控制网的建立方法研究[J]. 水电站设计 2024,40(4):13-16.

[2] 孔令利, 郭际明, 宋胜登, 等. 白鹤滩水电站地下厂房新型精密控制网研究及应用[J]. 人民黄河, 2022(01):044.

作者简介：张凯（1992-），男，汉族，黑龙江省杜尔伯特县人，本科，研究方向为自动化自动控制工作。