

Design and Application of Infrared Early Warning and Wireless Broadcast Linkage System for Small and Medium-sized Hydropower Station

Yu Liu

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 662400, China

Abstract

In the context of the increasingly intelligent operation and management of small and medium-sized hydropower stations, this paper designs and implements an infrared early warning and wireless broadcasting linkage system to meet the safety operation requirements of small and medium-sized hydropower stations. The system features efficient identification, rapid linkage, and intelligent response, which is of practical significance for enhancing the safety automation level of hydropower stations.

Keywords

small and medium-sized hydropower station; infrared early warning; wireless broadcast; linkage system

中小水电站红外预警与无线广播联动系统设计及应用

刘渝

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南红河州 662400

摘要

在中小水电站运行管理日益智能化的发展背景下, 本文围绕中小水电站安全运行需求, 设计并实现了一套红外预警与无线广播联动系统, 具备高效识别、快速联动、智能响应的功能, 对提升水电站安全自动化水平具有实际意义。

关键词

中小水电站; 红外预警; 无线广播; 联动系统

1 引言

中小水电站在我国能源结构中占据重要地位, 其运行安全直接关系到区域电力稳定与人民生命财产安全。受限于地理位置分散、运维力量薄弱等因素, 现有监测与预警手段难以及时发现设备异常与突发状况, 存在信息传递延迟、应急响应效率低等问题, 因此构建集成化、自动化的预警与信息发布系统成为提升水电站安全管理水平的重要方向。

2 系统总体架构

中小水电站红外预警与无线广播联动系统在结构上由感知层、通信层、控制层、执行层与管理层构成, 各层在系统内部承担不同的结构性职责并保持清晰的上下关联, 使系统能够在监测、传输、判断与广播之间建立稳定的数据链路结构与逻辑。在此系统内, 感知层提供监测基础, 通信层维持链路结构, 控制层承担逻辑核心, 执行层完成信息发布, 管理层构建系统监管。

3 系统设计与实现

3.1 硬件设计

中小水电站红外预警与无线广播联动系统需在硬件上围绕感知、传输、控制与执行四个功能层展开配置, 进而结合水电站运行场景对环境适应性、数据时效性与响应可靠性的要求, 完成了具体硬件集成与模块部署。在感知层, 采用热释电红外传感器作为主要监测单元, 用于检测区域内人体移动、设备异常发热和明火信号等热辐射特征, 该传感器选型为双元热电堆型探测器, 具备高灵敏、低噪声及广视角特性, 其中外壳部分采用 IP65 等级的防护设计, 适用于高温、强尘的水电站内部环境; 前端配套电路需包括低通滤波器、可调增益放大器与电压转换模块, 将模拟输出信号转换为微控制器可读电平, 同时配置热稳定电阻网络以确保测量准确性, 同时前端处理模块采用 STM32F103 单片机负责对原始信号进行实时采样、中值滤波与温升速率分析。

传输层核心为 LoRa 无线通信模块与 NB-IoT 数据终端设备两类无线通信单元, 根据站区布控距离及传输稳定性要求进行组合部署, 其中 LoRa 模块选用 SX1278 芯片方

【作者简介】刘渝 (1986-), 男, 中国云南建水人, 本科, 工程师, 从事电气工程及其水电站技术研究。

案,通信距离可达5公里以上,适用于同站点内不同监测节点间的组网传输;NB-IoT模块选用Quectel BC26型号,通过移动公网传输数据至远程平台;通信天线选用433MHz高增益螺旋天线与全向玻璃钢天线两种规格,底部配备磁吸安装组件,具备防水护套与浪涌抑制器以保障雷雨天气下的运行安全。整套通信系统配置RS485与TTL电平接口,支持Modbus与自定义帧结构协议。控制层基于嵌入式运控主板进行部署,其中主控核心采用Cortex-M4架构的STM32F407处理器,主频168MHz,内部集成12位ADC、多个UART接口与DMA控制器,用于并行采集多路传感器数据并完成联动判别逻辑运行,并配置外部FLASH用于记录近期状态数据;控制主板配套扩展模块包括W5500以太网芯片用于现场调试通信、蜂鸣器报警模块用于状态提示、LED组用于系统运行指示,并预留CAN总线与GPIO扩展接口用于后期传感器或控制输出模块的接入。

执行层广播部分采用一体化无线广播终端,包括信号接收模块、音频解码模块、功放电路与高音号角扬声器,其中音频解码部分基于VS1053芯片实现MP3与WAV格式双模解码;放大模块采用TDA7492数字功放,最大输出功率50W;扬声器采用ABS防水材质、内置磁钢高频振膜,覆盖半径不低于150米,可安装于变电室门口、坝顶通道、调度中心外部等区域,使得广播终端接收联动指令后可自动播放预设警示内容,支持区域分组广播与循环播报功能,必要时也可外接手动播控按钮实现本地手动触发。此外,系统供电采用市电+太阳能双源配置,其中太阳能供电部分包括18V/50W单晶硅太阳能板、12V/24Ah胶体蓄电池与智能充电控制器,配置DC-DC降压模块输出稳定5V和12V电源供给前端模块,并在系统电源线路中增加TVS二极管、保险丝与过压保护模块用于应对雷击、短路等突发情况。各核心模块通过双层PCB板进行集成布线,使用工业级连接器与防水线缆进行模块互联,整体结构支持模块化拆装与维护。布设时,所有硬件设备在结构设计中遵循统一壳体规范、统一接线端口与统一标签编号,具备远程故障监测与本地故障指示功能,可实现对设备状态的实时监管与后期可扩展维护。

3.2 软件设计

中小水电站红外预警与无线广播联动系统的软件设计由感知驱动处理模块、通信协议调度模块、联动控制逻辑模块与广播执行接口模块构成,分别部署在系统的感知层、通信层、控制层与执行层,其运行依托多处理器架构,采用任务分离、事件驱动与主从通信机制构建完整的联动逻辑链路。具体而言,感知驱动处理模块嵌入于红外前端采集设备的MCU内部,基于STM32F103单片机运行,在初始化阶段加载传感器型号D203B的驱动库,配置ADC通道采样周期为1ms,并启动DMA连续采样机制以实现高频数据缓存,其中设定动态背景补偿算法,根据每10秒温度基线变化自

动修正参考零点,通过差分计算捕捉异常温升特征,在分析逻辑中设置 $\Delta T \geq 2.5^\circ\text{C}$ 且持续3秒作为低级预警阈值,同时判断时间窗内多次重复触发则升级为中级预警,处理结果封装为8字节数据帧,结构为“SensorID+Status+TimeStamp+Checksum”,并写入通信缓冲区^[1]。

通信协议调度模块位于LoRa节点通信主控中,采用SX1278通信芯片,驱动层加载Semtech官方库,采用FSK调制方式配置中心频率433MHz,传输速率为2.4kbps,软件设计中定义三类命令帧结构:0xA1(数据上报)、0xA2(心跳包)、0xB1(应答包),每帧最长32字节,包含源地址、目标地址、有效载荷、CRC校验段,帧组装过程基于RTOS定时任务调度,每500ms轮询感知缓冲区是否存在新数据上传请求,若存在,进入发送队列,主控端每30秒广播一次网络状态查询命令并监听在线节点响应,节点缺失两轮响应则自动列入掉线列表并发出异常提示。

联动控制逻辑模块作为系统决策中心,运行于主控制平台(STM32F407芯片)中,基于FreeRTOS系统配置三大任务:数据接收任务、状态解析任务与联动决策任务,接收任务持续监听通信总线,将LoRa接收缓冲区数据上传至环形缓存区。此外在状态解析中,任务解析每条数据帧中传感器编号与预警等级,调用事件融合算法,若同一逻辑区域3分钟内出现两个不同节点同时预警,或同一节点连续两次报告相同等级异常,则触发联动事件标志;联动决策任务根据策略表查找对应广播模式、音频内容编号与广播区域分组,将广播命令构造成广播控制帧“TerminalID+VoiceID+GroupID+Cycle+ExecuteTime”,发送至广播模块命令接口。广播执行接口模块部署于ESP32控制器中,运行基于Arduino平台构建的软件框架,核心程序中设有命令接收中断函数、播放控制函数与状态反馈函数,命令接收函数解析控制层下发的控制帧,提取播放序号与循环次数,调用I2S接口驱动PCM5102 DAC芯片,播放SD卡中指定编号语音文件,播放控制函数设有超时检测与功率监控机制,每次播放完成后向上位机返回“0xC1”状态确认帧,若播放中检测到电压低于10.5V或功放模块异常则中止播放并返回异常帧^[2]。整个软件系统构建在统一的数据帧结构、任务调度模型与错误响应机制下,各模块通过缓冲区、消息队列或总线中断方式实现异步通信,保证预警数据从前端采集、后端决策到广播执行全过程不丢包、不延迟、可溯源,全面支撑系统在水电站复杂运行环境下的自动识别、分级响应与分区联动能力。

4 系统验证与应用分析

4.1 模拟测试场景搭建

为验证中小水电站红外预警与无线广播联动系统在复杂工况下的运行稳定性与联动准确性,构建了一套完整的功能性模拟测试平台,并基于实际水电站典型工作场景进行了

分区化布控。测试环境选取一处具备多区域、分层结构与真实设备布置条件的仿真水电站模型,包含主控室、机组厂房、泄洪闸区与职工通道四个典型空间,在各区域内部署红外传感器节点10个、LoRa通信节点8个、控制中心1套与广播终端6个,并分别设置模拟入侵、异常发热、烟雾释放等典型干扰源作为测试事件触发条件,系统架构完全依据设计逻辑进行布置,确保感知、传输、控制与响应四层结构完整呈现^[9]。

测试过程中采用人工触发与环境模拟两种方式进行信号干扰生成,红外节点持续采集前方区域热辐射强度变化,通信模块以设定间隔向主控中心上传异常状态数据,控制模块完成异常等级判别并生成指令帧,广播终端根据接收命令完成区域语音播报,全流程数据采集频率控制在1秒内完成一次闭环响应。为提高测试结果的可量化性与分析维度,设计三类事件等级与五种测试场景,并建立如下测试条件控制:

表 1: 测试条件控制

场景编号	模拟事件类型	异常等级	红外触发节点	广播响应区域
S1	人员非法闯入	低级	001、002	A1
S2	设备异常发热	中级	004、005	A2
S3	烟雾遮挡感应	高级	006、008	A1、A2
S4	多节点联动异常	中级	003、007	A3
S5	突发照明故障	低级	9	A1

4.2 系统响应效果评估

在模拟测试环境基础上开展了系统响应效果的综合评估,评估目标聚焦于系统在多场景、多等级、多节点条件下的响应速度、判断准确率与联动完成率,分别设置5轮重复测试以控制偶然性干扰影响,并以平台记录日志与外部计时设备进行时间对比较验。结果如表1:

4.3 实际应用

系统在完成实验室仿真与功能测试验证之后,选取某山区实际运行中的中小水电站作为实地部署场景,该水电站

位于地形起伏明显、水工构筑物分布复杂的河谷区域,具备典型的小型分布式电站特征,包括主厂房、引水隧洞、职工宿舍与调度平台等多个独立区域。系统在该场站内部署传感节点共计14组、通信模块12组、广播终端8个,并结合区域划分设定三个广播分区用于多级响应。系统运行前期完成网络搭建、参数校准与策略设定,运行阶段持续通过红外监测设备温度状态、厂房出入情况及边界热源侵入,实际运行中触发3次有效预警事件,含1次人员误闯主控区及2次夜间异常温升告警,同时广播终端均于3秒内完成播报响应以及控制平台完成异常定位及图示标绘。在此基础上,值班人员依广播指令完成现场排查与响应,系统日志完整记录各时间节点及状态码反馈,未出现漏报、误报与中断情况。

表 1: 系统效果

指标名称	平均值	最大值	最小值
响应延迟时间(s)	2.94	4.51	2.65
状态识别准确率	96.30%	100%	91.70%
播报完整性	99.60%	100%	98.90%

5 结语

本文围绕中小水电站运行安全需求,构建了具备红外智能感知、无线通信传输、控制联动判别与分区广播响应能力的多层次系统架构,完成了从硬件部署到软件逻辑的全链路集成与功能实现,经测试验证系统具备响应及时、识别准确、运行稳定等特性,具备良好的工程应用。

参考文献

- [1] 贾斌. 火灾预警与疏散广播系统的协同优化设计[J].电子技术,2025,54(08):262-263.
- [2] 王祥,张长娟,牟亚南. 地震预警信息应急广播发布机制的应用分析——以四川省地震预警试验为例[J].广播电视网络,2022,29(03):16-18.
- [3] 庄严,张伟杰. 监控与应急广播系统联动的实现[J].煤矿安全,2018,49(01):126-128.