

边缘计算与人工智能结合在中小水电智能化升级中的应用研究

黄开泰 雷潇霄

丹江口水利枢纽小水电有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i8.6529

[摘要] 针对中小水电设备老化与数据孤岛问题,本文提出以边缘计算为底座、大语言模型驱动故障树为核心的升级路径,构建“边缘感知—智能中枢—业务应用”闭环。边缘侧预处理数据,中枢侧借DS融合生成诊断结论,系统用国产化硬件与YOLOv5保障安全与精度,工程验证显示其能够缩短时延、提升预警能力,可安全合规实现低侵入升级复制。

[关键词] 中小水电智能化; 边缘计算; LLM驱动故障树; 多源数据融合

中图分类号: G623.58 文献标识码: A

Research on the Application of the Integration of Edge Computing and Artificial Intelligence in the Intelligent Upgrade of Small and Medium Hydropower

Kaitai Huang Xiaoxiao Lei

Danjiangkou Hydropower Station Co., Ltd.

[Abstract] Addressing the issues of equipment aging and data silos in small and medium-sized hydropower stations, this paper proposes an upgrading path with edge computing as the foundation and a large language model–driven fault tree as the core, while constructing a closed-loop of "Edge Perception – Intelligent Hub – Business Application". The edge side preprocesses data; the hub side generates diagnostic conclusions through DS evidence fusion. The system uses domestic hardware and YOLOv5 to ensure security and accuracy. Engineering verification shows it shortens latency and improves early warning capability, enabling low-intrusion upgrading and replication under safety and compliance requirements.

[Key words] small and medium-sized hydropower intelligence; edge computing; LLM drives fault trees; Multi-source evidence fusion

中小水电在清洁能源供给与电网调峰中地位重要,但长期运行导致的设备老化与运维流程割裂使传统诊断方法难以适配动态工况,误诊率与停机损失居高不下。为兼顾实时性与安全性,必须以边缘计算承载高频多源数据的在地化处理,并以知识与数据双轮驱动的智能中枢完成可解释推理与闭环处置。

1 边缘计算设备与中小水电智能化升级需求

1.1 功能需求

中小水电智能化升级需实现“感知–决策–执行”闭环,构建机组与辅机全生命周期标准化数据通道及可追溯运维链。边缘侧高频采集振动、温度等关键量并就地预处理,异常结构化写入时序库;中枢侧依托领域知识与历史案例完成检索增强、动态故障树生成,形成可解释诊断结论与处置建议,自动生成规范报告支撑班组与调度协同^[1]。业务层提供值班、巡检、防汛等多场景应用,支持告警订阅、工单联动以保障多岗位协同;兼顾私有化部署与模型在地化适配,确保封闭网络内数据融合与即时预警稳定,以最小改造满足老旧与增容机组差异需求。

1.2 性能需求

以稳定性、实时性为核心,兼顾可扩展与可维护。边缘节点需在受限算力/波动网络下持续采集、稳健推理,具备数据缓存与断点续传能力,借轻量化模型与事件流计算实现毫秒级入库、秒级检测响应。系统经冗余部署、热备切换实现高可用,单点故障时自动降级且告警可信、记录完整;模型与规则引擎支持在线更新、灰度回滚,避免影响生产。横向扩展以容器化与工作流调度为支撑,新增机组参数化接入即可获得同等服务质量;前端交互在边端资源受限下保持流畅,支撑高并发告警与低延迟人机闭环。

1.3 安全需求

遵循“数据不出厂、模型不离坝”的原则,通过国产化硬件本地部署、工业环网物理隔离构建可信环境。访问控制采用最小权限与多因素认证,记录全链路审计日志;敏感信息(含坐标、机组编码等)外发时自动脱敏。核心服务与模型仓库划分安全域、白名单通信,重要操作需双人复核、变更留痕,确保决策可

追踪、可撤回^[2]。建立备份与应急恢复体系,保障极端工况下业务连续性;对照等保与能源行业指南完成分级测评、渗透验证,实现隐私保护、供应链安全与运维流程一体化,不牺牲实时诊断与联动处置能力。

2 边缘计算与AI结合的中小水电智能系统架构

2.1 总体架构

总体架构遵循“边缘感知—智能中枢—业务应用”的闭环范式,核心在于以边缘侧高频采集与就地预处理承接一线工况,再由中枢完成语义推理、时序分析与处置生成,最终经业务层工单联动与可视化交互落地到岗位与班组^[3]。本文建议在总线层预留异构算力与模型的更新能力,以支撑后续多智能体协同与联邦学习。见图1系统总览。

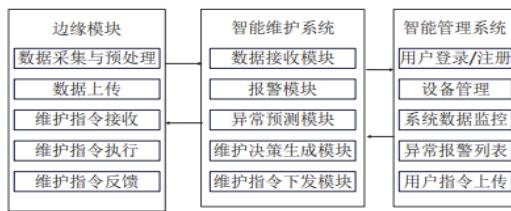


图1 总体架构图

2.2 硬件结构

硬件采用边缘计算设备与本地服务器分层形态:边缘端负责多源采集与事件检测,本地服务器承担批量推理与复杂决策,二者经工业环网互联且与外网物理隔离。中小水电可在关键机组/阀门区配置带GPU或专用加速的边缘节点,实现毫秒级入库与秒级异常识别,仅上传高价值片段与特征至服务器用于模型融合及报表生成。丹江口实践中,以申威服务器双机冗余为安全底座,结合边缘节点现场计算能力,可在断网、汛期高负载场景下维持稳定诊断与记录完整;采用Jetson AGX Xavier等嵌入式平台,还能在高传感密度区域实现就地推理与本地缓存,支撑细粒度时序预测与边端闭环^[4]。

2.3 软件结构

2.3.1 边缘模块

边缘模块集成SCADA采集、协议转换、数据清洗及压缩编码能力,可将振动、温度、电流等时序数据在源端结构化入库,并依据网络状况动态调整上传策略;具备断点续传与本地缓冲功能,能避免光纤环网波动或检修切换时关键样本丢失,且可在边缘完成阈值判别与异常候选生成(按优先级推至中枢),同时联合标注视频快照与日志以提升异常复核效率。工程实现可选哈夫曼等轻量压缩方式及事件流处理框架,结合API网关完成与上层的可靠对接;该设计在多站并发场景下稳定性与可维护性良好,还能为后续模型在地化微调提供洁净数据底座。

2.3.2 智能模块

智能模块承担数据接收、复杂事件处理与预测模型推理,是实现从信号到结论的关键中枢。推荐以FlinkCEP等流式引擎识别模式事件,再调用LSTM或GRU对SCADA序列进行短期预测,结

合知识检索与规则库生成可解释的告警与处置建议。为适配中小水电的差异化负荷与季节性波动,模型需支持在线更新与灰度回滚,并提供参数化输入输出映射以减少接入成本。测试结果显示,LSTM在多工况数据集上的误差与拟合度优于同类模型,可作为主干预测器,同时保留规则与案例检索以增强稳健性。智能模块将结论回写至知识库与工作流引擎,使业务层形成标准化报表与工单闭环。见图2的智能工作流程。

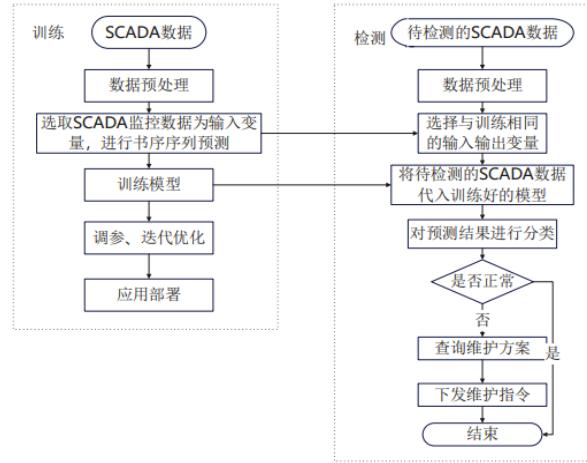


图2 工作流程示意图

2.3.3 智能管理

智能管理聚焦系统治理与运维协同,含设备台账、用户角色管理等功能;采用前后端分层与数据库抽象架构,以MySQL+持久化框架存储。应引入最小权限与多因素认证等保调整可追踪,还负责任务编排分发,将信息路由至团队,兼顾标准化编码与脱敏,保障外发合规。

3 边缘计算与人工智能结合在中小水电智能化升级中的应用

3.1 流媒体技术

面向多源异构的巡检与安防场景,流媒体链路需在边缘侧完成高效编解码与带宽自适应,并与时序数据实现时域对齐,以保障事件级取证与诊断溯源。实践表明,采用面向会话控制的RTSP可稳定承载视频与音频的实时传输,同时支持起停与定位控制,便于在告警触发时快速回溯关键片段。针对嵌入式推理节点,可依托NVIDIA Jetson平台提供的L4T MultiMedia API调用底层编解码与GPU管线,在不牺牲帧率的前提下完成目标检测与异常截图标注,再以结构化索引写入工作流系统。

3.2 通信技术

针对中小水电站点分散、网络条件波动的特点,通信体系以平衡可靠性与可维护性为核心:工程上通过组件化接口定义解耦子系统,边缘设备以自定义接口承载采集与告警上报,中心以统一API编排任务、回传指令,确保局部故障时整体业务连续;边缘模块依链路质量动态分级上传,优先传输关键设备与异常片段,弱网中断时自动切换本地缓存与断点续传,网络恢复后补齐数据;该框架结合私有化智能体工作流,可对齐视频快照与传感

序列并推送至“报告智能体”“预警智能体”，降低人工整合成本、提升协同效率；丹江口实践中，系统通过工业环网与权限分级构建安全闭环，同时保持接口层可扩展，便于后续多站点复制与策略下发。

3.3 算法处理技术

算法栈以流式模式识别与时序预测为主，结合复杂度与并行加速指标指导部署。模型侧选用LSTM作为主力预测器，其在实际数据集上MAE、RMSE更低且R²更高，适用于冷却水压、振动等短期趋势预判，同时保留GRU、TCN适配不同负载；工程侧以T(n)=0(f(n))评估单算子复杂度，以S=Ts/Tp衡量并行加速收益，结合边缘算力与带宽预算确定算子下沉及推理批次。系统级采用FlinkCEP进行模式事件检测，将规则、案例检索结果与神经网络输出在证据层融合，结论回写知识库与工单引擎；为便于复现与互操作，报文中可附带模型版本与阈值元数据，且按图2流程完成训练-部署闭环管理。

3.4 YOLOv5目标检测算法

YOLOv5是中小水电智能化系统中提升现场监测与故障诊断精度的关键技术，基于多次序检测策略与Mosaic数据增强提升复杂工况泛化能力，结合CSPNet架构与自适应训练策略兼顾检测速度与准确性。实现层面，输入端通过自适应锚框计算与图像缩放，提升对不同尺度目标的适配性；主干网络采用Focus结构与CSP网络，轻量化同时保障特征提取深度与鲁棒性；颈部网络整合SPP模块与FPN+PANet结构实现多尺度信息融合；检测层引入CIOU_Loss，将回归问题转化为目标检测任务以提精度。

边缘计算平台推理测试显示，YOLOv5跨平台兼容性与实时性优异，响应速度满足水电现场秒级诊断需求，检测准确率96%、误检率低，但召回率87%，复杂背景下存在漏检，需结合多源融合与时序预测补强。整体而言，其解决了传统算法复杂场景易受干扰的问题，为智能体工作流提供高质量视觉证据流，支撑运维报告生成与预警触发。

4 系统测试

系统测试从功能、性能双维度开展，采用现场等效负载与回

放数据结合的方法，验证链路可靠性与实时性。流媒体模块在RTSP会话下稳定完成音视频实时传输与起停控制，借助Jetson平台L4TMultiMediaAPI实现底层编解码与GPU管线加速，前后编码逻辑一致，满足长时运行需求。

YOLOv5推理部署实现边缘与本地服务器跨平台一致编译，秒级响应符合水电现场实时要求；测得目标检测准确率96%、召回率87%、误检率低，提示复杂背景下仍有漏检风险，需与时序预测、多源证据融合协同优化。总体上，系统在功能正确性、端到端时延及稳定性上达预期，形成可追溯测试基线，为后续跨站点复制与规模化运维提供工程化依据。

5 结语

本文提出并验证了面向中小水电的边缘智能化总体方案，证明以边缘计算承载多源感知与本地化推理，以LLM驱动的动态故障树与DS证据融合提升诊断准确率与前瞻性，以私有化部署与权限审计保障合规可信的技术路线是可行的。实验与场景回放显示，系统在秒级告警与分钟级闭环方面达到工程要求，目标检测准确率与时序预测稳定性满足运维决策需要，形成从证据获取到处置建议的端到端链路。

参考文献

- [1]高聰,陈煜喆,張擎,等.边缘计算:发展与挑战[J].西安邮电大学学报,2021,26(4):7-19.
- [2]周密,陈烨,焦良葆,等.基于人工智能的边缘计算设备智能监控和维护系统[J].信息化研究,2024,50(4):66-72.
- [3]李雅洁,陈长震,胡晓丽.基于5G技术的机床电气柜远程智能监控系统设计[J].电子元器件与信息技术,2024,8(5):110-112.
- [4]袁烨,张永,丁汉.工业人工智能的关键技术及其在预测性维护中的应用现状[J].自动化学报,2020,46(10):2013-2030.

作者简介:

黄开泰(1980--),男,汉族,湖北丹江口人,本科,丹江口水利枢纽小水电有限公司,网络安全与信息化、水利水电。

雷潇霄(2000--),男,汉族,湖北丹江口人,本科,丹江口水利枢纽小水电有限公司,网络安全与信息化、水利水电。