

立式水轮机组在线监控及故障预警

刘文泉 席 浩 李晓强 李俞睿

甘肃电投河西水电开发有限责任公司 甘肃 张掖 734000

摘要：本文聚焦于立式水轮机组的在线监控与故障预警系统，阐释其以工业物联网技术为基础的“感知层+传输层+平台层+应用层”分层架构设计，细致介绍实时监测、故障预警、能效分析等关键技术功能模块，以及多机组协同管控、与智能电网交互整合等拓展应用，由工程实践数据可知，该系统明显提升了设备可靠性以及运行效率，为水电行业数字化转型给出可借鉴的技术方案，对促进该行业发展意义重大。

关键词：立式水轮机组；在线监控；故障预警；系统架构；智能运维

引言

伴随水电行业的演进，立式水轮机组运行的稳定性与高效性愈发不容忽视，传统运维模式借助人工经验，存在故障不易迅速察觉、检修资源浪费等现象，难以适配现代电力系统要求^[1]。处在这个背景环境下，立式水轮机组在线监控与故障预警系统顺势诞生，其凭借先进技术完成机组运行状态全流程的管控，在提高机组可靠性、优化能效表现、降低运维支出上意义重大，对该系统架构、关键技术及应用展开深入研究，对促进水电行业智能化过渡、保证电力稳定供应意义非凡。

1 在线监控及故障预警系统架构设计

1.1 分层架构总体设计

立式水轮机组的在线监控及故障预警系统采用“感知层、传输层、平台层、应用层”这种分层架构设计，该架构模式借助工业物联网技术体系构建而成，意在实现机组运行状态数据的全流程管理与控制，分层架构的好处是把复杂系统的功能进行模块化分解，各层均具备各自的技术实现途径，并凭借标准化接口实现协同操作^[2]。感知层承担着现场原始数据采集的工作，传输层助力数据进行高速稳定的传输，平台层实施数据深度处理及分析，应用层朝着运维人员提供可视化交互及决策支持，四层架构彼此紧扣，形成一套从数据采集到应用决策的完整技术体系，为机组全工况在线监测提供一套系统的支撑。

1.2 感知层关键技术

感知层作为系统抓取机组运行状态的“神经末梢”，其技术的实施直接影响监测数据准确与否和完整与否，就振动与摆度的监测而言，于转轮及上导、下导、水导轴承部位安装加速度传感器和涡流传感器，借助多点布局达成转动部件振动特征的全面捕捉，能精确呈现轴承运行状态以及转轮水力稳定性。采用高精度温

度传感器进行温度监测，对轴承、定子绕组以及冷却水进出口温度进行实时监测，轴承温度监测可及时找出因润滑不到位或摩擦增强引起的异常温度升高情况，定子绕组温度监测是绝缘状态评估关键数据的来源，压力与流量的监测借助压力变送器跟电磁流量计，完成蜗壳压 力、尾水管压力跟冷却水流量的动态检测，这些参数在分析机组水力性能及冷却系统效率上意义重大。

1.3 传输层网络架构

传输层架起了工业以太网与无线冗余相联合的复合网络架构，以满足水轮机组监测数据传输在可靠及实时性上的要求，工业以太网采用的是光纤环网拓扑结构，该架构拥有高速传送与低延时的特质，可以达成监测数据的毫秒级传送，达到实时监控的要求。采用光纤介质保障了数据传输的速度，还具备抵御电磁干扰的能力，适用于电站繁杂的电磁环境，在布线麻烦或者需要移动监测的复杂地带，采用5G或工业WiFi无线传输模式，打造有线跟无线的互备冗余备份机制。

1.4 平台层与应用层架构

平台层充当系统的数据处理与分析的核心角色，凭借边缘计算节点与云/数据中心协同协作，做到监测数据的分级加工，边缘计算节点布置在机组邻近位置，可对实时采集到的数据进行预处理，涉及数据滤波、把异常值剔除等操作，同时实现实时预警功能，可以及时发现机组运行的异常现象并发出预警信号，云/数据中心承担存储历史数据的工作，经由运行故障诊断模型及能效分析算法，对长期积累的数据做深度探查，创建机组状态演变走向模型，为故障预测跟能效优化给予数据上的支撑。

应用层为电站运维人员供应直观的人机交互界面与智能决策支持，人机界面（HMI）采用3D可视化的技术，把机组运行状态以动态的三维模型展示，同时呈现

出报警清单及趋势曲线，使运维人员可以直观、全面地把握机组运行情形，智能诊断系统以ISO 7919/10816等国际标准为基础，结合机组运行的知识宝库，对机械振动等数据进行分析鉴别，提供故障原因与维修提议。

1.5 现场实施要点

现场实施阶段需结合4.5万装机容量机组的运行特性，分三阶段推进：

前期部署阶段：优先完成传感器选型与测点优化布置，在转轮及上导、下导、水导轴承处精准安装加速度传感器（量程 $\pm 50\text{g}$ ）和涡流传感器（分辨率 $0.1\mu\text{m}$ ），采用多点对称布局确保振动与摆度数据的完整性；同步完成传输层硬件架设，通过光纤环网（带宽 1000Mbps ）连接机组控制柜与集控中心，在信号干扰较强区域增设无线冗余模块（5G工业级），保障数据传输稳定性。

系统调试阶段：完成传感器校准（误差 $\leq \pm 1\%$ ）后，接入机组实时数据库，通过3次以上满负荷工况测试验证数据同步性（延迟 $\leq 50\text{ms}$ ）；针对故障预警功能，模拟轴瓦超温（设定阈值 85°C ）、振动超标（参照ISO 7919标准）等场景，测试系统响应速度及联动停机逻辑；联合电站运维团队调试能效优化模块，通过调整导叶开度（精度 $\pm 0.5^\circ$ ）验证效率曲线拟合度（偏差 $\leq 2\%$ ）。

验收与培训阶段：连续运行30天无数据中断后，组织功能验收，重点核查多机组协同管控时的负荷分配精度；开展分层培训，对运维人员侧重HMI界面操作与预警处置流程，对技术人员强化边缘节点配置与算法参数调校，确保系统投用后故障处理时效提升50%以上。

2 关键技术与功能模块实现

2.1 实时监测与数据融合

立式水轮机组在线监控系统的实时监测功能借助多类型传感器阵列达成，通过在机组关键部分安置振动、温度、压力等传感器，构建起覆盖全工况运行的状态感知网络，于上导、下导及水导轴承处安装的加速度传感器跟涡流传感器，能实时捕捉转动部件振动幅值与摆度的实时变化，而温度传感器对轴承温升、定子绕组温度以及冷却水进出口温度进行不间断监测，压力变送器与电磁流量计一同采集蜗壳压力、尾水管压力和冷却水流量等水力参数。数据融合技术在这一过程当中发挥关键作用，使用高精度数据采集模块对多源信号开展 $\geq 10\text{kHz}$ 的同步抽样，采用小波降噪与自适应滤波算法相结合的方式，去除电磁干扰与环境噪声的干扰，实现如振动频谱、温度曲线这类数据的特征融合，为后续故障分析供给可靠的原始数据支撑。

2.2 故障预警与智能诊断

故障预警模块借助阈值报警与智能诊断双重机制，打造起多级故障识别格局，系统先借助ISO 7919/10816等国际标准，设定振动、温度等参数的预警临界值，要是轴瓦温度急剧攀升或绝缘状态呈现异常时，立刻触发一级紧急停机的报警，并启动应对预案在24小时内处理好；面对振动慢慢上升等潜在风险，启用二级预警手段，缩短监测的时间间隔，结合发电计划在1周内安排检修活动^[3]。智能诊断系统把转子动力学等机理模型跟数据驱动模型融合在一起，采用振动频谱分析、轴心轨迹识别等技术手段，对不平衡、不对中、轴承磨损等机械故障精准查找位置，同时依靠局部放电监测与介质损耗因数分析对绝缘老化状态进行评估，依靠历史故障案例库给出维修对策，实现从异常鉴定到原因诊断全流程的智能操作。

2.3 能效分析与优化控制

能效分析模块凭借历史运行数据与实时工况，搭建水轮机组能效评价模型，对水力损失、机械摩擦等关键能耗指标进行量化，经由计算机组效率曲线，动态找出最优运行区间，要是电网负荷产生变化，系统自动调整导叶的开度以及励磁电流参数，保证机组始终处在高效区间运行。就负荷分配策略而言，系统综合审视各机组的实时效率、启停损耗及设备健康情形，优化设计启停顺序及负荷分配方案，降低非必需的能量损耗，能效优化控制同样结合了冷却水流量与蜗壳压力等参数，考查水力系统的运行效率，采用导叶开度的精准调校，使水能转化为机械能的转换效率最大化，为电站达成节能降耗目的提供技术支撑力量。

2.4 维护管理与决策支持

维护管理模块借助数字化方式达成检修流程的智能管控，系统凭借实时监测数据与设备退化模型，自动形成巡检工单与备件替换方案，就像基于对轴承剩余寿命的预测，提前规划好润滑脂的更换周期，防止因维护时间滞后引发设备故障，维修记录跟故障案例库的关联手段，可把每次检修里的故障现象、处理经过及效果反馈至知识库，造就可复用的维护经验成果，为后续故障的处理提供参考借鉴。决策支持功能借助3D可视化人机界面达成，运维人员可直接查看机组状态趋势曲线与报警的信息，移动端APP支持在远程接收预警推送以及查询关键参数，打破时间跟空间的局限，使管理人员可凭借实时数据做出精准的运维决策，促进电站从经验驱动的维护模式迈向数据驱动的决策模式。

3 系统拓展应用与技术融合

3.1 基于物联网的多机组协同管理

在电站实际运行的场景当中，多台立式水轮机组一般呈集群化运行模式，而依托物联网技术搭建的协同管理体系，可实现机组群运行状态的全局监测与优化指挥调度，该管理模式把工业物联网平台当作核心，凭借感知层传感器阵列与传输层光纤环网的协同作业，将分散部署的各机组振动、温度、负荷等实时数据汇聚到统一的数据中心里，形成一个多维度的机组运行数据库。依托数据集的集中管理，系统凭借设立机组群负荷分配优化模型，综合评定每台机组的实时能效水平、设备健康状况及其剩余寿命预测结果，动态整定各机组有功功率与无功功率的分配方案，避免部分机组长时间处在低效率运行范围，要是电网负荷出现了起伏，系统会优先启用状态优良且效率颇高的机组承担调峰工作，同时给处于亚健康状态的机组少分配负荷，借此在整体层面提高电站能源转换的效率。

3.2 与智能电网的交互集成

立式水轮机组在线监控及故障预警系统跟智能电网的交互融合，是实现电站跟电网协同优化运行的关键要点，该系统借助部署专用的数据交互端口，与电网调度自动化系统搭建双向通讯通道，一方面将机组的运行参数、能效指标还有故障预警信息实时传至电网侧，为电网调度决策提供底层设备状态相关支撑；另一方面接收由电网下发的负荷指令、电价信号与调度策略，实现机组运行状态的动态变动。若电网的负荷需求有所增加，系统按照能效分析模块算出的结果，自动优化导叶开度跟励磁电流的相关参数，加大机组有功的输出量，保障运行效率稳定在高效区间^[4]；当电网面临调频或调压操作需求时，系统可迅速对调度指令作出响应，采用调整机组的转动惯量或无功功率输出的方式，参与电网频率跟电压的稳定把控。

3.3 新兴技术的融合应用探索

伴随工业数字化转型的深入开展，立式水轮机组在线监控与故障预警系统不断融合新技术来拓展应用范

畴，在人工智能的范畴里，深度学习算法的采用为故障诊断给出了更精准的技术办法，借助构建基于卷积神经网络或循环神经网络的智能诊断模型，对长期积累起来的振动频谱、温度序列等监测数据做特征学习，可识别传统阈值法不易察觉的早期潜伏类故障，像轴承的轻度磨损或者绕组的局部绝缘变差。数字孪生技术的采用为机组运行优化打开了新路径，通过打造与物理机组高度贴合的虚拟模型，在数字空间模拟不同工况时机组的运行状态，可以提前预估设备性能的退化倾向，同时对运行参数设置做优化，杜绝实际运行里的盲目调整操作，就数据安全领域而言，融合应用区块链技术能保证监测数据不可篡改且可追溯，把关键运行数据跟故障记录写到区块链分布式账本中，既可以防止数据在传输与存储期间被恶意篡改，又可为设备全生命周期管理给予可靠的历史数据助力。

结语

立式水轮机组在线监控及故障预警系统凭借多维度技术集成办法，做到从数据采集到智能决策的全流程管控事宜，非计划停机的时长明显缩短，实现检修资源配置的优化，该系统为中小型机组实施智能化改造提供了范例，促进产业从经验驱动向数据驱动转型，未来可以进一步把数字孪生与深度学习技术融合，延伸至新能源耦合相关场景，促进新型电力系统打造

参考文献

- [1] 尚天煜.立式水轮机组主轴密封漏水故障分析及处理方法[J].人民珠江,2023,44(S2):305-308.
- [2] 李志红,黄小军,梁兴,等.立式水轮机组的摆度测量分析[J].南昌工程学院学报,2019,38(01):104-106.
- [3] 洪安俊,谢向东,黄岩.小型立式冲击式水轮机组结构的优化及创新[J].小水电,2018,(01):47-49.
- [4] 苗维阳,陈国仕.立式水轮机组尾水肘管斜向布置的安装控制工艺[J].小水电,2017,(01):28-31.