ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

水电站水轮机导叶漏水监测与处理技术应用研究

张　猛　曹善玉

国能新疆阿克苏水电开发有限公司，新疆 阿克苏 843100

摘　要：水轮机导叶是水轮机调节水流量的重要组件，导叶的密封性能好坏直接关系到机组效率和运行安全。运行时间长的导叶容易发生磨损、腐蚀以及老化等问题，从而导致漏水现象的发生。针对水电站水轮机导叶漏水问题，根据目前应用的监测手段及处理技术的适用边界，提出了以声发射检测和智能密封优化相结合的技术路线，经工程实践证明是切实可行的，能显著提高导叶漏水监测的精度，降低设备的维护成本，保证水电站安全稳定运行。

关键词：导叶漏水；声发射监测；密封优化

0 引言

本文利用当前先进的传感技术和数据分析手段，实现导叶漏水监测智能化、精细化是导叶漏水监测的发展趋势。本文围绕导叶漏水监测及处理技术展开讨论，就其适用性、关键技术及实施方案进行研究，为水电站运维提供借鉴。

1 导叶漏水监测技术适用性分析

1.1 声发射检测在导叶漏水定位中的适用性

声发射检测利用材料内部应力释放产生弹性波来获取导叶密封面微裂纹和漏水通道的位置信息，当导叶密封间隙大于 0.05 mm 时可以被完全识别，适合于混流式、轴流式水轮机导叶的在线监测，由于是非接触式检测方式，不会造成机组停机带来的发电损失，而且在额定转速 75 ~ 150 r/min 之间均可稳定采集到信号；声发射检测对水压变化较为灵敏，导叶前后压差大于 0.3 MPa 时，由于漏水产生的湍流噪声能够得到有效的捕捉，所以在中高水头电站导叶监测方面有较大应用前景。该技术对安装空间要求较小，声发射传感器可以通过磁座或者胶粘的方式固定在导叶外环上，不用对导叶本身进行结构上的改造。检测系统功耗小于 5 W，可连续工作时间长。

1.2 压力脉动监测在漏水程度评估中的适用性

基于以上描述可知：压力脉动监测通过导叶区域压力脉动的波动特性进行分析，可以实现导叶区域漏水严重程度的定量评定。该方法使用高频压力传感器采集导叶室内压力的时域信号并进行频谱分析，得到漏水特征频率。导叶漏水量超过额定流量的 1.5% 时，压力脉动幅值有明显的增大趋势，监测误差在 ±5% 以内。该方法适用于各种水头的导叶状态检测，对轴流转桨式水轮机由于活动导叶和固定导叶之间的间隙变大产生的渐进式漏水具有良好的跟踪效果。压力脉动监测设备安装简单方便，不需要改造导叶本身，可满足已投运电站的技术改造要求。导叶室内进口和出口管段处均适合安装传感器，可用现有测压孔完成压力脉动信号采集，降低现场工作量。

2 水电站水轮机导叶漏水监测及处理关键技术

2.1 声发射信号特征提取及去噪技术

声发射信号在导叶漏水监测过程中容易受到机组振动、水流噪声等干扰，在信号监测中实施特征提取和去噪处理是提高监测精度的关键，先通过小波包分解方法对原始声发射信号实行多尺度分析，分解信号得到 8 个频带，选择中心频率为 150~300kHz 的频带分量作为漏水特征频段，再对选出的频带信号利用经验模态分解方法进行自适应分解，获取本征模态函数的高频分量，去除由于机组机械振动产生的低频干扰。对于信号的去噪，通过自适应阈值法对分解后的信号进行软阈值处理，其阈值根据信号噪声水平确定，通常取噪声标准差的 2.5 倍，经过上述去噪处理后，声发射信号的信噪比可提高到 15dB 以上，漏水点定位误差可控制在 ±10mm 以内。关键技术要点在于小波包基函数的选择上，Db4 小波基对导叶漏水声发射信号具有良好的时频聚集性，可以很好地分离出漏水信号和背景噪声的频谱特性。实际应用时，采样频率要大于 1MHz，确保能够采样到高频漏水信号。

2.2 导叶密封间隙动态测量技术

导叶密封间隙的精确测量是判断漏水原因和确定处理方案的前提。导叶密封间隙电涡流

ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

传感器阵列测量技术，通过电涡流传感器阵列实现导叶密封间隙非接触式动态测量，传感器沿导叶圆周方向均匀布置，其间距为 150mm，能够覆盖导叶密封面大部分区域，测量时将传感器探头与导叶密封面之间保持 1 ~ 2mm 左右的初始间隙，在导叶全关位置时测取各测点处的间隙值，采样频率设置为 1000Hz, 连续采集 10 个周期数据取平均值以滤除随机误差。该技术可测范围 0.02 ~ 5.00mm, 分辨率 0.001mm, 重复测量精度 ±0.005mm。对于导叶体变形引起的不均匀间隙可通过多点测量数据拟合密封面轮廓曲线得到，找出大于 0.30mm 的异常区域。测试时需控制水轮机转轮室水位稳定，避免水流波动造成影响测试结果的情况发生。该技术可以在导叶开闭过程中进行动态测量，得到导叶密封间隙随操作力的变化规律，为分析导叶密封面磨损规律提供数据支撑。传感器输出信号为 4 ~ 20mA 标准电流信号，可以直接接入现有数据采集系统。

2.3 导叶密封面激光熔覆修复技术

当导叶密封面发生严重磨损或腐蚀时，可以通过激光熔覆修复技术来恢复其几何精度和表面性能。采用半导体激光器作为热源，将激光功率设为 2.0 ~ 3.5 kW，光斑直径设为 3 ~ 5 mm，扫描速度设为 5 ~ 15 mm/s；选用镍基合金粉末作为熔覆材料，颗粒度为 45 ~ 150 μm，其中 Ni 含量 ≥ 55%，Cr 含量为 15% ~ 20%，添加适量 Mo、B 元素提高熔覆层的耐蚀性和硬度；预处理时对密封面进行喷砂粗化，Ra=(6.3 ~ 12.5) μm, 改善熔覆层与基体的结合强度；使用氩气作为保护气和送粉载气，气体流量为 15 ~ 20 L/min；单层熔覆层厚度为 0.5 ~ 1.2 mm，对于磨损量大于 1.0 mm 的部位采取多层熔覆的方法，每层之间加工后呈纺锤状，层间温度控制在 80 ~ 120 ℃，以免产生裂纹；最后对密封面进行数控铣削加工，得到 Ra ＜ 1.6 μm 的表面粗糙度和小于 0.05 mm 的平面度误差。检测结果显示：修复后导叶密封面的硬度为 HRC 45 ~ 50，相比原始材料耐磨性提高 30% 以上；通过对熔覆层与基体的结合强度进行拉伸试验，可知断裂均发生在基体材料而不是结合界面处，因此可得到可靠的修复效果。

3 水电站水轮机导叶漏水监测及处理技术实施方案

3.1 监测网络部署方案

该电站导叶漏水监测网络采用分层分布式结构，在每个机组导叶区域安装 8 只声发射传感器、4 只高频压力传感器和 12 只电涡流传感器。声发射传感器安装在导叶外环和内环检测孔处，利用磁座固定，传感器谐振频率为 150kHz，灵敏度不小于 65dB；压力传感器安装在导叶室进出口管段上，量程为 0—2.5MPa，精度等级为 0.2 级；电涡流传感器安装在导叶密封面相邻的固定导叶上，探头对应于活动导叶密封面，测量范围为 0—2mm。所有传感器信号经屏蔽电缆接入机旁边缘计算节点，在水轮机层现地控制柜内。监测网络覆盖 4 台机组全部 96 个导叶，数据采集周期定为每 5min 自动巡检一次，当出现异常时切换为连续采集状态。传感器供电使用 24VDC 集中供电，电源模块具有过压保护和电磁屏蔽功能。监测网络投运后可实现导叶漏水状态的实时在线监测，数据存储期限为 3 年，历史数据可用于趋势分析和寿命预测。现场布线使用屏蔽双绞线，可有效降低电磁干扰，使信号传输距离达到 500m 以上。

3.2 漏水点定位及程度评估方案

对于该电站 2 号机组导叶漏水问题，采用多源数据融合方法进行定位和评估，首先通过声发射信号时延分析确定漏水点的大致区域，3 只声发射传感器接收到异常信号的时间差通过双曲线定位算法计算，将漏水点定位在 3 号导叶密封面下部 120° 扇形区域内；然后利用电涡流传感器对上述区域进行细部测量，测得密封间隙在导叶下缘局部达到 0.45 mm，超出设计值 0.20 mm 的 125%；压力脉动监测数据显示：该导叶在关闭状态下压力波动幅值为 0.18 MPa，相比正常导叶偏大 0.12 MPa。结合以上 3 项监测数据，判断 3 号导叶存在中度漏水，估算漏水量约为额定流量的 2.8%，通过现场排查，可排除由于顶盖排水不畅而造成的影响，同时参照相邻导叶的监测数据可知，该处异常具有局部性质。将该份评估结果以报告的形式呈现出来，内容包括漏水的位置示意图、间隙分布的云图以及风险等级的评定，作为后期处理的依据。另外，实际的漏水点和计算得到的位置偏差控制在 15 mm 以内，满足工程处理要求。

3.3 密封修复及优化处理方案

根据现场调查的结果，对 3 号导叶开展密封修复和优化处理，具体步骤如下：①将机组水位降低到转轮室以下，卸下导叶密封压板，将导叶密封压板上连接螺栓全部松开，并清除导叶密封槽内遗留杂物；②对导叶密封面进行激光熔覆修复，熔覆区域选择下缘局部磨损带，宽度约为 80mm，周向长度约为 200mm, 采用镍基合金粉末进行两层熔覆，总厚度为 1.8mm, 熔覆后进行数控加工恢复密封面平面度；③将原密封件更换为聚四氟乙烯基复合材料密封

ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

条，截面尺寸为 15mm×8mm, 在安装时应保证其压缩率在 15%-20% 之间；④密封压板紧固螺栓按照对角顺序分三次紧固，最后扭矩达到 120N·m; ⑤修复完成后进行密封试验，在导叶前后建立 0.5MPa 压差，保持 30min, 压降不大于 0.02MPa 为合格，试验合格后，逐渐恢复机组运行，工后连续 72h 监测数据显示：3 号导叶声发射信号幅值恢复正常，压力脉动幅值为 0.06MPa, 密封间隙为 0.18~0.22mm, 修复效果良好；⑥同时对相邻的 2 号、4 号导叶开展了预防性检查，检查结果表明两块导叶的密封情况良好。

3.4 运行维护及效果跟踪方案

在维修完全站机组导叶后建立长期跟踪机制，将该电站全部机组导叶按照漏水风险等级划分为 A、B、C 三类，A 类为监测数据正常导叶，巡检周期为每季度 1 次；B 类为有轻微磨损但还未到修理标准的导叶，巡检周期为每月 1 次；C 类为已经修复的导叶，在修复后的前 6 个月每周 1 次密集监测。跟踪过程中重点看导叶的密封间隙变化率，当某导叶间隙月增长率大于 0.02mm 时发出预警，及时缩短监测周期，并且建立导叶密封件更换档案，记录每次维护所更换的密封件型号、安装日期和运行小时数，以便于后续进行备品备件采购。经过 6 个月的统计，该电站 4 台机组导叶漏水问题得到了有效的控制，由于导叶漏水造成的非计划停机由原先每年平均 3.2 次降为 0 次，机组效率平均提高约 0.8%，并且监测系统的持续运作可以让运维人员提前2~3个月发现导叶密封劣化的问题，达到由被动抢修到主动预防的目的。后期计划将监测数据接入电站生产信息系统中，实现导叶状态的全生命周期数据追溯。

4 结语

针对水电站水轮机导叶漏水问题，从适用性分析、关键技术、实施方案 3 个层面开展研究，以声发射检测、压力脉动监测、激光熔覆修复、边缘计算预警等为核心，构建了导叶漏水监测预警及定位修复技术体系；并通过工程实践证明，本技术路线可以实现导叶漏水状态的精准监测和高效处理，提高设备可靠性。随着传感技术以及智能算法的发展，导叶漏水监测将会朝向更高精度、更强实时性的方向发展，未来还可以进一步研究数字孪生技术在导叶状态预测方面的作用，以实现水电站智能化运维。

参考文献：

[1] 赵杨 . 水电站 #2 机组水轮机导叶中轴套密封改造 [J]. 电工技术 ,2021, (21):22-23. DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2021.21.009.

[2] 柳俊 . 水轮机导叶中轴套漏水分析与密封结构改造 [J]. 水电站机电技术 ,2021,44 (4):37-39+60.DOI:10.13599/j.cnki.11-5130.2021.04.012.

[3] 寇林 , 吴易洋 , 马晨原 , 等 . 水轮机导叶漏水率及效率试验研究 [J]. 电站系统工程 ,2021,37 (1):65-68.

[4] 陈前 , 石飞 . 水泵水轮机导叶轴套漏水的分析与改进方法 [J]. 水电站机电技术 ,2019,42 (11):45-46+51.DOI:10.13599/j.cnki.11-5130.2019.11.016.

[5] 杨黎明 , 杜雄春 . 水电站水轮机导叶漏水流量测算与应用 [J]. 水电与新能源 ,2018,32 (10):36-42.DOI:10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2018.10.009.

作者简介：张猛（1999.10—），男，蒙古族，内蒙古，本科，助理工程师，研究方向：水轮机。
曹善玉（1994.11—），男，汉族，新疆，本科，助理工程师，研究方向：水轮机。