

水力发电机组振动故障诊断与处理方法分析

李承龙

云南华电金沙江中游水电开发有限公司梨园发电分公司 云南 丽江 674100

【摘要】：经济的高速发展让人们水力电气也提高了要求，水力电气的发展与水力发电机组运行的稳定性息息相关，稳定的运行水平可以保障水力发电机组的工作效率，因此在日常的管理监测中，要精准的识别发电机组的振动故障，并运用正确的处理方法，保证水力发电机组稳定运行。基于此，本文主要分析当前水力发电机组振动故障诊断中存在的问题，并分析水力发电机组振动故障的诊断要点，随后提出有效的处理方法，希望有效维护水力发电机组的正常运行，促进水力电气工程的长足发展，为人们带来更多的经济效益和社会效益。

【关键词】：水力发电机组；振动故障；诊断与处理

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.026

引言

水力发电作为一种清洁高效的能源生产方式，既能够提供稳定充足的电力以保障能源供给，又凭借“利用水位落差实现水能到电能的转化”这一核心原理，规避了传统能源消耗模式中的资源浪费问题，高度契合现代社会可持续发展的环保理念，因此在全球能源体系中占据重要地位并获得广泛认可。在实际运行过程中，水力发电机组的稳定性监测仍面临复杂工况下的数据精准采集、多因素干扰下的故障特征识别等难题，各类潜在问题若未能得到妥善处理，不仅会影响发电效率，更可能对设备安全与电网稳定构成威胁，这些现实挑战亟待行业技术突破与系统解决方案。

1 当前水力发电机组振动故障诊断中存在的问题

1.1 检修技术落后

检修技术水平相对滞后。与国外先进国家相比，我国水力发电设备检修工作明显处于落后状态。当前所使用的检测仪器先进性不足，难以满足高精度检测需求；检修技术理念较为保守，在技术创新方面缺乏突破性进展，导致检修效率和质量受到一定限制。在水力发电机组常见的振动故障检修中，滞后性表现得尤为明显。例如，当机组因转轮叶片气蚀或轴系不对中引发异常振动时，国内部分电站仍依赖人工巡检结合传统振动仪监测，不仅数据采集精度低，还难以捕捉瞬时振动峰值。而国外先进电站已普及在线振动监测系统，可通过传感器实时采集三维振动数据，结合 AI 算法自动定位故障源。技术差距导致国内机组振动故障往往需停机数天排查，而国外同类问题借助智能诊断技术几小时即可精准修复，严重影响发电效率。

1.2 工作人员的素质有待提高

对水力发电机组进行检修时，能量、空蚀、稳定性等关键指标是评估机组工作性能的重要依据。而这些指标的测量与评估工作，往往需要借助复杂的数学模型，加之水轮机运行过程本身具有较高的复杂性，极易导致零件出现空化、磨损等问题，这对检修人员的专业能力提出了很高要求。尽管部分检修人员

具备一定的专业知识储备，但由于学校理论教育与实际工作需求之间存在显著差距，当遇到复杂故障时，常常会陷入无从下手的困境。以机组因导叶开度不均引发的振动故障为例，其背后涉及水流动力学、结构力学等多学科交叉的数学模型计算，部分人员因缺乏对 CFD 流场模拟软件的操作能力，无法精准计算导叶间水流压力差，只能凭经验调整开度，不得不二次停机检修，既增加了成本，也暴露出理论与实践脱节带来的检修短板。

2 分析水力发电机组振动故障的诊断要点

2.1 振动信号的精准采集与特征分析

为确保振动故障诊断的准确性，首要任务是精确采集振动信号。必须依据机组的实际结构，在关键部位安装传感器，例如轴承座、定子机座等，确保无遗漏。传感器应能测量径向、轴向及垂直方向的振动，速度传感器或加速度传感器均可使用。在采集过程中，务必完整记录运行参数，包括转速、负荷、水头等数据，因为工况变化会影响信号的准确性。在分析信号时，应综合运用频谱分析、时域波形分析等多种方法。例如，若频谱中出现与转速频率相同的峰值，则很可能是转子不平衡；若倍频能量显著，则需检查轴系是否对中；若振动频率复杂，则可能是存在摩擦或汽蚀现象。应参照国家标准 GB/T11348.1，一旦振动幅度超出规定限值，应立即记录并予以特别关注。

2.2 水力因素引发振动的识别方法

水力因素引起的振动问题具有其特定的特征，需结合设备运行状况进行综合分析。当设备振动与负荷变化呈现显著相关性时，优先考虑水力因素的排查是合理的。例如，在机组运行于 50%至 70%额定负荷区间时，若振动现象尤为突出，且振动频率为转速的 0.2 至 0.4 倍，此现象极有可能是尾水管内涡带效应所致。通过测量压力脉动，可以进一步确认涡带效应的强度。导叶开关的不一致性会导致水流状态不稳定，振动频率与导叶数量及转轮叶片数量相关联，此时应比较导叶实际开度与

设定值之间的差异。汽蚀现象引起的振动通常伴随着高频噪声, 频谱分析中会显示出一片杂乱的高频能量分布。为了判断是否为汽蚀所致, 可以测量转轮区的压力或使用内窥镜检查汽蚀坑的存在, 除此之外, 进水流道的检查也不容忽视, 若存在漩涡或堵塞物, 水流的不均匀性将导致机组产生横向振动。

2.3 诊断结果的综合验证与动态跟踪

在诊断振动故障时, 不可仅依赖单一指标, 而应从多个维度进行综合分析。首先, 需将当前的信号分析结果与机组历史数据进行对比, 若振动特征与历史故障相似, 则可缩小排查范围。可实施现场试验, 例如调整负荷以观察振动变化, 从而判断是否为水力工况问题; 在停机状态下测量转子圆跳动, 以验证是否由不平衡引起。数值仿真技术亦可提供辅助, 通过构建轴系动力学模型或流场模型, 模拟不同故障下的振动情况, 并与实际测量数据进行对比分析。完成诊断后, 应制定跟踪方案, 定期采集振动数据, 以评估处理措施的有效性。对于复杂故障, 需待检修时检查轴承磨损程度及叶片损坏情况, 并将这些实际状况综合考量, 以最终确定故障原因, 确保诊断结果与实际问题相符。

2.4 结构因素导致振动的排查要点

在机械工程领域, 机组结构的异常振动问题往往与多种因素相关, 因此在排查过程中需要系统地进行分析, 应评估转子的平衡状态, 并通过执行动平衡试验来量化剩余的不平衡量。若该量值超出设计规范所允许的阈值(通常不超过 $500\text{g}\cdot\text{mm}$), 则必须通过添加或调整配重来调整平衡。接下来, 对轴系的对中情况进行检查, 利用激光对中仪测量联轴器的同心度, 确保径向偏差不超过 0.05mm/m , 轴向倾斜不超过 0.02mm/m 。若对中不良, 可能会导致出现两倍转速频率的振动现象。轴承的检查也不容忽视, 滑动轴承的顶隙应控制在轴径的 1.5% 到 2% 之间, 若间隙过大, 则可能引起低频振动; 对于滚动轴承, 若滚子出现磨损, 振动信号中将伴随高频冲击声。基础的紧固状态亦需检查, 地脚螺栓的松动可能导致机组共振频率的改变, 通过敲击基础并听取声音, 可以初步判断固有频率是否发生变化。

3 水力发电机组振动故障提出有效的处理方法

3.1 精准分析振动信号的特征

振动信号的精准采集与深度分析是故障处理的前提, 只有建立在可靠数据基础上的处理措施才能直击问题核心。在信号采集环节, 需构建全维度监测网络, 结合机组结构特点优化传感器布置方案。对于立式机组, 应在推力轴承、上导轴承、下导轴承等关键部位分别安装三向传感器, 确保径向水平、径向垂直及轴向振动均能被有效捕捉; 卧式机组则需重点监测轴承座的水平与垂直振动, 同时在联轴器附近增设传感器以捕捉轴系传递的振动能量。传感器选型需匹配机组参数, 转速低于

300r/min 的机组优先选用速度传感器, 高转速机组则应采用加速度传感器, 并配备电荷放大器确保高频信号不失真。数据采集过程中必须严格执行工况记录规范, 每5分钟记录一次转速、负荷、水头、导叶开度等参数, 利用频谱分析识别主导频率, 对转速频率峰值采用影响系数法进行动平衡计算, 对倍频成分则通过轴系对中检测数据验证偏差程度, 建立特征图谱库, 将典型故障(如转子不平衡、轴系不对中)的信号特征存档, 新采集数据自动与图谱库比对, 实现故障类型的快速匹配与初步定位。

3.2 用递进式手段处理水力引发的振动

针对水力因素引发的振动, 需构建递进式处理体系。对于尾水管涡带导致的振动, 首要措施是精准控制运行负荷, 通过试验确定机组的稳定运行区间, 当负荷处于 $50\%-70\%$ 额定值时, 启动补气装置进行干预。补气方式可根据机组型号选择, 混流式机组宜采用尾水管十字架补气, 轴流式机组则适用轮毂补气, 补气量需通过压力脉动监测动态调整, 通常控制在水轮机流量的 $0.5\%-2\%$, 直至振动幅值降低至规范限值的 80% 以下。在控制系统中增加开度一致性校验程序, 运行时实时比对各导叶反馈信号, 当发现偏差持续超过 2% 时, 自动执行微调指令, 还可以在转轮区安装压力传感器, 实时监测压力波动值, 当压力低于水的饱和蒸汽压且伴随高频振动时, 立即降低负荷并记录汽蚀发生工况。停机状态下通过水下机器人检查流道内部, 清除淤泥、石块等堵塞物, 对附着的生物污垢采用高压水冲洗处理。若发现流道存在直角弯头或截面突变, 需进行导流优化, 加装流线型导流板减少漩涡生成, 对于进水口拦污栅, 定期测量其前后压差, 当压差超过 5kPa 时立即清理, 防止因水流受阻产生不均匀冲击。处理完成后需进行流场验证试验, 通过测量流道内不同截面的流速分布, 确保水流不均匀度控制在 10% 以内。

3.3 建立模型全过程跟踪故障记录

振动故障的有效处理依赖于多维度验证体系的建立, 避免单一指标导致的误判。首先构建历史数据对比模型, 将当前振动信号的频谱特征、幅值变化趋势与机组近三年的故障记录进行比对, 若相似度超过 85% , 则调取该历史故障的处理方案作为参考, 并重点核查相同部位的运行状态。现场试验验证需制定针对性方案, 对于疑似水力工况问题, 采用阶梯式负荷调整法, 每调整 10% 额定负荷稳定运行 30 分钟, 同步记录振动数据与压力脉动值, 绘制关系曲线, 若曲线在某区间出现明显峰值, 即可确定该负荷段为不稳定工况, 制定回避运行策略。针对机械故障嫌疑, 停机状态下开展转子圆跳动测量, 使用百分表在转子不同截面进行多点检测, 若圆跳动值超过 0.05mm/m , 则需进行动平衡校正; 测量轴承间隙时, 滑动轴承采用压铅法, 滚动轴承采用塞尺法, 确保间隙符合设计规范。数值仿真技术应深度融入验证流程, 利用 ANSYS 建立轴系动力学模型, 输

入实际测量的不平衡量、对中偏差等参数，模拟不同转速下的振动响应，将仿真结果与现场数据进行误差分析，若误差控制在15%以内，则可确认故障机理模型的准确性。对于水力振动问题，通过CFD软件构建流场仿真模型，模拟尾水管涡带、导叶流场等状态，计算压力脉动频率与幅值，为现场处理提供理论支撑。

3.4 精准修复结构缺陷

发电机平衡状态的精准调整是解决机械振动的核心环节，动平衡处理需执行严格的流程规范，通过动平衡试验确定不平衡量的大小与相位，采用双面平衡法在转子两端对称平面添加配重，初次配重后启动机组至工作转速，测量振动幅值变化。对于运行多年的机组，需定期检查配重块固定状态，防止因松动导致的平衡失效，配重块焊接应采用氩弧焊工艺，确保焊接强度满足长期运行要求。轴系对中偏差的修复需依赖高精度仪器与规范操作，使用激光对中仪时，将发射端与接收端分别固定在联轴器两端，调整测量距离确保激光束精准对准，测量径

向偏差与轴向倾斜值，若超出0.05mm/m和0.02mm/m的限值，采用百分表辅助调整法进行校正。调整过程中遵循“先粗调后精调”原则，通过增减轴承座垫片实现高度调整，垫片厚度误差控制在0.01mm以内，重要部位螺栓采用防松螺母或点焊固定，防止运行中松动，若固有频率与机组运行频率差值小于10%，则需采取增加配重或加装阻尼器的方式调整，避免共振发生。

4 结论

总之，水力发电事业是与人民生活紧密相关的，水利水电事业的良好发展可以改善人民的生活成本，促进能源结构的改善，因此相关的工作人员应该利用状态监测技术，预先分析水力发电机组运行故障。并依据状态检测数据，制定水力发电机组维护方案，保证发电机组稳定运行。想要使得水力发电机组平稳正常运转，就一定要做好前期的预测工作以及定期检修工作，这样才能防患于未然，将水力发电机组最大化利用起来，增加企业经济效益。

参考文献：

- [1] 陈晓明,彭祖贤,张华.立式水轮发电机组垂直振动的分析及处理[J].水电与新能源,2021,35(04):8-11.
- [2] 王鹏飞,张京京,陈帝伊.水力发电机组轴系哈密顿建模与动力学特性分析[J].排灌机械工程学报,2020,38(08):794-800.
- [3] 唐滢琨.水力发电机的检修与维护分析[J].集成电路应用,2020,37(06):60-61.