

水轮发电机组振动异常的成因分析及控制技术探析

李育波

四川华电西溪河水电开发有限公司 四川成都 610000

摘要: 水轮发电机组是水力发电系统的核心组成部分,其运行稳定性直接影响电力供应的安全与经济效益。振动异常是机组运行中的常见故障表现,易造成设备部件磨损、性能下降,甚至引发停机事故,制约发电系统高效运维。本文以水轮发电机组振动异常为研究对象,梳理其基本特征与危害,系统剖析多方面成因,探究针对性控制技术路径,总结研究成果与应用价值,为提升机组运行稳定性、降低故障发生率提供理论参考与技术支持。

关键词: 水轮发电机组; 振动异常; 成因分析; 控制技术; 运行稳定性

引言

水力发电是清洁可再生能源发电的重要方式,在能源结构转型中发挥关键作用。水轮发电机组作为水力发电的核心动力设备,长期处于复杂工况环境,受水流冲击、机械传动、电磁作用等多因素影响,易出现振动异常现象。振动异常不仅降低机组发电效率,还可能引发轴承磨损、转子偏心等衍生故障,威胁电网稳定运行。随着机组向大型化、智能化发展,结构复杂度与运行负荷提升,振动异常成因更趋多元,控制难度增加。因此,深入剖析成因并研发应用控制技术,对保障机组安全运行、提升发电效益具有重要现实意义。本文围绕振动异常的成因与控制技术展开系统探析。

一、振动异常的特征与危害

(一) 振动异常特征

水轮发电机组振动异常的特征主要体现在振动频率、振幅及相位的异常变化上。正常运行状态下,机组振动频率与振幅处于稳定范围,相位分布规律。当出现异常时,可能表现为特定频率下振幅骤增,超出标准允许值。不同成因引发的振动异常具有差异化特征,水力因素导致的振动多与水流脉动频率相关,机械因素引发的振动常伴随转速倍数频率成分,电磁因素导致的振动则与电网频率、极对数存在关联。这些特征为后续振动异常的诊断提供了重要依据,通过对振动信号的特征提取与分析,可初步判断异常的大致类型与影响范围。

(二) 对机组部件的直接危害

振动异常对水轮发电机组部件的直接危害体现在多个方面。首先,持续的异常振动会加剧轴承的磨损,破坏轴承的润滑状态,导致轴承温度升高,缩短轴承使用

寿命,严重时可能造成轴承抱死,引发转子卡涩故障。其次,振动异常会影响转子与定子的配合间隙,导致气隙不均匀,进而增加部件之间的摩擦损耗。同时,振动还会对机组的连接件产生影响,导致螺栓松动、焊缝开裂等问题,破坏部件的结构完整性。此外,密封部件在异常振动作用下易出现密封失效,引发漏水、漏油等现象,影响机组的正常运行环境。

(三) 对发电系统的间接影响

振动异常不仅对机组本身造成危害,还会对整个发电系统产生间接影响。一方面,异常振动会导致机组发电效率下降,增加能耗,影响发电企业的经济效益。另一方面,振动异常可能引发机组保护装置动作,导致机组非计划停机,影响电力供应的连续性。对于并入电网的机组,停机事件会造成电网负荷波动,影响电网电压与频率的稳定,增加电网调度难度。此外,振动异常引发的故障维修需要投入大量的人力、物力与时间成本,同时可能导致电力供应短缺,影响工业生产与居民生活用电,进一步扩大经济损失与社会影响。

二、振动异常的成因剖析

(一) 水力因素

水力因素是引发水轮发电机组振动异常的重要原因之一。首先,水流脉动是常见的诱因,当水流在转轮、导叶等过流部件处产生不均匀流动时,会形成周期性的压力脉动,进而引发机组振动。这种脉动可能源于转轮叶片与导叶的相互干扰,即叶道涡的产生与发展。其次,空化现象也会导致振动异常,当水流压力降低至饱和蒸气压时,会产生气泡,气泡破裂时释放的能量会对部件产生冲击,同时引发振动。此外,机组运行工况偏离最优工况,如低负荷或超负荷运行时,水流在过流通道内

的流动状态恶化，形成涡流、回流等不稳定流动，增加水力激振力，导致振动异常加剧。

（二）机械因素

机械结构因素引发的振动异常主要与机组部件的加工精度、安装质量及运行磨损相关。首先，转子不平衡是常见的机械诱因，转子材料不均匀、加工误差或运行过程中部件磨损、脱落等，都会导致转子质心偏移，旋转时产生离心力，引发周期性振动。其次，轴线不对中也会导致振动异常，机组安装或检修时，若转子与发电机轴线未精准对中，运行时会产生附加力矩，导致轴承振动加剧。此外，轴承磨损、间隙过大或过小，以及导轴承、推力轴承的润滑不良，都会增加部件之间的摩擦与冲击，引发振动。同时，机组基础刚度不足或基础沉降不均匀，也会放大振动响应，导致振动异常。

（三）电磁因素

电磁因素引发的振动异常与机组的电磁耦合特性密切相关。首先，定子与转子气隙不均匀是主要诱因之一，气隙不均匀会导致电磁力分布不均，产生周期性的电磁脉动force，引发机组振动。这种不均匀可能源于转子偏心、定子铁芯变形等因素。其次，电网电压不平衡或谐波含量超标，会影响发电机的电磁转矩，导致电磁转矩脉动，进而引发振动。此外，转子绕组故障，如匝间短路、断路等，会破坏电磁磁场的对称性，产生附加电磁力，导致振动异常。同时，发电机的励磁系统故障，如励磁电流波动、励磁绕组过热等，也会影响电磁环境的稳定性，诱发振动。

三、振动异常的检测与诊断技术

（一）信号采集与预处理

振动信号的采集与预处理是振动异常检测与诊断的基础环节。信号采集需根据机组的结构特点与运行工况，合理布置传感器。常用的传感器包括加速度传感器、速度传感器与位移传感器，分别用于采集不同频段的振动信号。传感器通常布置在轴承座、定子机座、转子等关键部位，以全面捕捉振动信息。预处理环节主要包括信号滤波、去趋势、消噪等操作。滤波用于去除外界干扰信号，保留与故障相关的有效信号；去趋势用于消除信号中的线性或非线性趋势成分；消噪则通过小波分析、傅里叶变换等方法，降低噪声对信号的影响，为后续的特征提取与诊断提供高质量的信号数据。

（二）智能诊断方法

随着智能化技术的发展，多种智能诊断方法已应用于水轮发电机组振动异常诊断中。首先，基于机器学习

的诊断方法得到广泛应用，通过构建神经网络、支持向量机等模型，对预处理后的振动信号特征进行学习与分类，实现对振动异常成因的识别。其次，模糊诊断方法适用于处理诊断过程中的模糊信息，通过建立模糊规则库，对振动特征与故障类型之间的模糊关系进行推理，得出诊断结果。此外，专家系统诊断方法整合了领域内专家的经验与知识，通过知识库与推理机的协同工作，对振动异常进行分析与判断。这些智能诊断方法提升了诊断的准确性与效率，实现了振动异常的早期预警与精准诊断。

（三）诊断结果校验

诊断结果的精准校验是保障诊断可靠性的关键步骤。常用的校验方法包括多源信号融合校验，通过整合振动信号与温度、压力、电流等其他监测信号，对诊断结果进行交叉验证，降低单一信号诊断的误判率。其次，现场试验校验是重要的验证手段，通过调整机组运行工况，如改变负荷、转速等，观察振动异常的变化趋势，判断诊断结果是否符合实际情况。此外，历史故障数据对比校验通过将当前诊断结果与机组历史故障数据进行对比，分析故障特征的一致性，进一步确认诊断结论的准确性。通过多维度的校验手段，可有效提升诊断结果的可靠性，为后续的振动控制提供科学依据。

四、振动异常的控制技术路径

（一）水力优化控制

基于水力优化的振动控制技术主要通过改善水流流动状态，降低水力激振力来实现。首先，优化过流部件结构，通过改进转轮叶片形状、导叶型线等，减少水流在过流通道内的涡流与脉动，提升水流流动的均匀性。例如，采用数值模拟方法对过流部件进行优化设计，降低叶道涡的产生概率。其次，合理调控运行工况，通过自动控制系统实时调整导叶开度、转轮转速等参数，使机组保持在最优工况附近运行，避免低负荷或超负荷导致的流动不稳定。此外，增设消涡装置、抗脉动装置等辅助设备，也可有效抑制水流脉动，降低水力引发的振动异常。

（二）机械结构改进

基于机械结构改进的振动控制技术主要针对机械因素引发的振动异常。首先，对转子进行动平衡校正，通过检测转子的不平衡量，采用加重或去重的方法调整转子质心，降低旋转时产生的离心力，减少振动。其次，优化机组安装精度，严格控制轴线对中偏差，确保转子与发电机轴线精准对齐，降低附加力矩引发的振动。同时，改进轴承结构，选用高性能的轴承材料，优化轴承

间隙，提升润滑效果，减少轴承磨损与摩擦引发的振动。此外，增强机组基础刚度，通过加固基础结构、采用隔振材料等方式，降低振动的传递与放大，提升机组的抗振能力。

（三）电磁参数调节

基于电磁参数调节的振动控制技术主要通过优化电磁环境，降低电磁激振力。首先，调整定子与转子气隙，通过检修校正转子偏心、修复定子铁芯变形等方式，保证气隙均匀性，减少电磁力分布不均引发的振动。其次，优化励磁系统参数，通过调节励磁电流、改进励磁调节策略等，稳定电磁转矩，降低电磁转矩脉动。同时，加强电网质量管控，减少电网电压不平衡与谐波含量，避免电网因素对发电机电磁环境的干扰。此外，对转子绕组、定子绕组等电磁部件进行定期检修，及时发现并处理绕组故障，保障电磁磁场的对称性与稳定性，抑制电磁引发的振动异常。

五、控制技术的应用优化

（一）控制技术选型

不同工况下振动异常的成因与特征存在差异，因此控制技术的选型需遵循针对性与适配性原则。在高负荷工况下，水力因素引发的振动异常较为突出，应优先选用水力优化控制技术，如优化过流部件结构、调控运行参数等；在机组启动或停机阶段，机械因素引发的振动更为明显，应重点采用机械结构改进技术，如转子动平衡校正、轴线对中调整等；当电网波动较大时，电磁因素引发的振动风险增加，需优先采用电磁参数调节技术。同时，选型还需考虑机组的型号、运行年限、结构特点等因素，结合现场实际条件，选择技术可行、经济合理的控制方案。

（二）控制技术协同应用

水轮发电机组振动异常的成因往往较为复杂，单一控制技术难以达到理想的控制效果，因此需要实现多种控制技术的协同应用。例如，针对水力与机械因素共同引发的振动异常，可将水力优化控制技术与机械结构改进技术相结合，通过优化过流部件结构、调控运行工况，同时进行转子动平衡校正、轴承结构改进，实现多维度的振动抑制。此外，将控制技术与监测诊断技术相结合，通过实时监测振动信号，动态调整控制参数，提升控制的及时性与精准性。协同应用方案需充分考虑各技术之间的互补性，避免技术冲突，最大化提升振动控制效果。

（三）智能化融合优化

智能化技术在振动控制优化中的融合应用，可显著提升控制的智能化水平与效果。首先，利用大数据分析技术对机组运行数据与振动监测数据进行深度挖掘，识别振动异常的演化规律与影响因素，为控制技术的优化提供数据支撑。其次，结合物联网技术实现对机组运行状态的实时监测与远程控制，及时发现振动异常并启动控制策略。此外，引入人工智能算法，构建自适应控制模型，根据振动信号的实时变化自动调整控制参数，实现振动的自适应抑制。智能化技术的融合应用，推动振动控制从被动应对向主动预警、智能调控转变，提升机组运行的稳定性与可靠性。

结论

水轮发电机组振动异常是多因素共同作用的结果，水力、机械、电磁因素均可能引发振动异常，且不同成因导致的振动特征存在显著差异。振动异常不仅会对机组部件造成直接损害，还会影响整个发电系统的稳定运行，因此对其成因进行系统剖析并采取有效的控制技术具有重要意义。本文梳理的振动异常检测与诊断技术，可实现对振动异常的早期预警与精准诊断，为控制技术的应用提供科学依据。基于水力优化、机械结构改进、电磁参数调节的控制技术路径，以及技术选型、协同应用与智能化融合的优化策略，能够有效抑制振动异常，提升机组运行稳定性。

参考文献

- [1] 郭旭有, 何继全, 冀锐龙, 等. 某抽蓄电站水轮发电机组抽水工况上架架振动偏大原因分析与处理[J]. 水电站机电技术, 2025, 48(10): 140-144.
- [2] 王洪祥, 杨刚, 何继全, 等. 某水轮发电机组振动异常原因分析及处理[J]. 水电站机电技术, 2025, 48(08): 20-24.
- [3] 陈治州. 水轮发电机不平衡磁拉力与振动特性分析[J]. 电力设备管理, 2025, (14): 297-299.
- [4] 赵雨梦, 牟金祥, 刘一瑾. 水轮发电机组振动区域影响因素分析及对策研究[J]. 中国水运, 2025, (02): 45-47.
- [5] 张新. 水轮发电机组顶盖振动及运行稳定范围探究[J]. 石化技术, 2024, 31(07): 210-212.