

高转速立轴混流水轮发电机组轴线调整与振动控制技术研究

文 / 任 浩 陕西省宝鸡峡引渭灌溉中心

师 丹 陕西省宝鸡峡引渭灌溉中心

摘要：随着水利水电工程的快速发展，高转速立轴混流水轮发电机组在水电站中的应用日益广泛。然而，这类机组在运行过程中常常面临轴线偏移和振动过大的问题，严重影响了机组的稳定性和安全性。本文旨在研究高转速立轴混流水轮发电机组轴线调整工艺的优化与振动控制技术，通过理论分析和实际数据验证，提出有效的解决方案。文章首先分析了轴线偏移和振动产生的原因，然后详细阐述了轴线调整工艺的优化方法和振动控制技术的实施策略，并通过具体案例验证了这些方法的可行性和有效性。

关键词：高转速立轴混流水轮发电机组；轴线调整；振动控制；技术研究

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.087

引言

本研究旨在通过对高转速立轴混流水轮发电机组轴线调整工艺的优化和振动控制技术的深入研究，实现以下目标：通过优化轴线调整工艺，提高机组轴线的调整精度，确保机组运行更加稳定；深入研究振动控制技术，提出有效的振动控制措施，降低机组振动水平，延长设备使用寿命；结合现代传感技术、数据处理技术和智能控制算法，实现轴线调整和振动控制的自动化和智能化，提高工作效率和调整精度。

一、轴线偏移与振动产生的原因分析

（一）轴线偏移的原因

轴线偏移是指机组在运行过程中，由于各种内外因素的综合作用，导致机组实际轴线与理想设计轴线之间产生偏差。高转速立轴混流水轮发电机组轴线偏移的主要原因可以归结为以下几点：首先，机组在安装过程中的质量问题是导致轴线偏移的重要因素。其次，机组在长期运行过程中，各部件会发生不同程度的磨损。特别是推力轴等关键部件，由于承受巨大的轴向力和径向力，磨损后极易导致轴线偏移。这种磨损是不可避免的，但可以通过合理的润滑和保养措施来减缓其进程。此外，机组的基础如果发生沉降或变形，也会对机组轴线产生影响。地基的不均匀沉降或变形会导致机组支撑结构的失稳，进而引发轴线偏移。因此，在机组设计和安装过程中，必须充分考虑地基的稳定性和承载能力。

（二）振动产生的原因

高转速立轴混流水轮发电机组振动产生的原因则更为复杂多样，主要包括以下几个方面：首先，水流在机组内部流动时，由于水流速度、压力分布不均等因素，会产生水力不平衡力。这种不平衡力会作用于机组部件上，引发机组振动。特别是在水流速度较快、压力变化较大的区域，水力不平衡力更为显著。其次，机组各部件的加工精度和装配质量也是影响振动水平的重要因素。

特别是轴承等关键部件，如果间隙过大或过小，都会引发机组振动。此外，轴承磨损后间隙的增大也是导致机组振动加剧的重要原因。轴承作为机组的重要支撑部件，其磨损程度直接影响机组的稳定性和振动水平。当轴承磨损到一定程度时，间隙会增大，导致机组在运行时产生更大的振动。最后，对于发电机部分，电磁不平衡力也是引发振动的重要原因。



二、轴线调整工艺优化

（一）传统轴线调整方法的局限性

传统轴线调整方法主要依赖于人工操作，包括人工测量和调整步骤。这种方法在实践中暴露出若干局限性，严重影响了调整效果和效率。首先，人工测量易受人为因素影响，如操作熟练度、读数误差等，导致测量精度不高。这种不精确性为后续调整工作带来了挑战，难以确保机组轴线的准确对位。其次，传统方法需要反复测量和调整，过程烦琐且耗时费力。这不仅增加了维护成本，还可能因长时间停机而对水电站生产造成不利影响。更为关键的是，由于测量精度和调整方法的限制，传统

方法往往难以达到理想的调整效果。机组在运行过程中，轴线偏移和振动问题时有发生，严重影响了机组的稳定性和可靠性。

(二) 轴线调整工艺优化方法

1. 高精度测量设备的应用

为了克服人工测量的局限性，本文建议引入高精度测量设备，如激光测距仪和三坐标测量机。这些设备以其高精度、高效率的特点，在机组轴线调整过程中发挥着至关重要的作用。激光测距仪利用激光束进行非接触式测量，能够准确测量机组各部件之间的距离和角度。三坐标测量机则通过精密的机械结构和传感器系统，对机组各部件的三维坐标进行精确测量。在轴线调整过程中，可以利用这些设备对机组轴线进行精确测量，为后续调整提供可靠的数据支持。这不仅大大提高了测量精度，还为后续调整工作奠定了坚实的基础。

2. 自动化调整技术的实施

为了提高调整效率，本文提出了自动化调整技术的实施方案。通过编写自动化调整程序，利用机器人或自动化调整装置对机组轴线进行调整。自动化调整技术能够大大减少人工干预，降低人为因素对调整结果的影响。自动化调整装置具有高度的灵活性和精确性，能够根据测量数据自动调整机组轴线，确保调整结果符合设计要求。这种方法不仅提高了调整效率，还保证了调整质量的稳定性和一致性。通过精确计算和调整参数，确保自动化调整装置能够准确、高效地完成任务。

3. 动态监测与反馈调整的实施

为了确保机组轴线的稳定性，建议在机组运行过程中实施动态监测与反馈调整。通过安装传感器等方式，实时监测机组轴线的偏移量、振动幅值等关键参数。动态监测技术能够实时捕捉机组轴线的变化情况，为反馈调整提供及时、准确的信息。当监测到轴线偏移或振动异常时，立即触发反馈调整机制。反馈调整机制可以根据实时监测数据，自动或手动调整机组轴线，以确保机组稳定运行。

在实施动态监测与反馈调整时，需要选择合适的传感器和监测设备，以确保监测数据的准确性和可靠性。还需要建立有效的反馈调整机制，包括调整策略、调整参数等，以便在监测到异常时能够迅速响应并采取措施。此外，为了进一步提高机组轴线的稳定性，还可以考虑采用智能控制算法和预测模型等技术手段。这些技术能够基于历史数据和实时监测数据，对机组轴线的变化趋势进行预测和分析，从而提前采取措施避免潜在问题。

综上所述，通过引入高精度测量设备、实施自动化调整技术和动态监测与反馈调整等优化方法，可以显著提高高转速立轴混流水轮发电机组轴线调整的精度、效率和稳定性。这些优化方法不仅适用于新机组的安装调试过程，也适用于旧机组的升级改造和维护保养工作。

(三) 工程案例分析

以某水电站高转速立轴混流水轮发电机组为例，该机组在运行过程中出现了轴线偏移和振动过大的问题。采用本文提出的优化方法后，机组轴线的偏移量得到了有效控制，振动幅值也显著降低。具体数据如表1所示，从表中数据可以看出，采用优化方法后，机组轴线的偏移量和振动幅值均得到了显著改善。

测量项目	优化前数值	优化后数值
轴线偏移量(mm)	0.5	0.1
振动幅值(μm)	80	30

表1：优化前后数值对比

三、振动控制技术

(一) 振动控制策略

1. 水力设计的优化

水力设计是影响机组振动的重要因素之一。通过改进水力设计，如优化叶片形状、调整流道结构等，可以降低水流在机组内部的不均匀性，减少水力不平衡力的产生。还可以通过增加导流板、调整导叶开度等方式，进一步改善水流流态，降低机组振动。

2. 机械加工精度的提高

机组各部件的加工精度对机组振动水平有着直接影响。在加工过程中应严格控制各部件的尺寸精度、形状精度和位置精度。同时，在装配过程中也应加强质量控制，确保各部件之间的配合间隙在规定范围内，避免因装配质量不佳导致的振动。

3. 轴承检查维护

轴承的维护与更换部件，其状态直接影响到机组的稳定性和振动水平。定期进行轴承的检查与维护，包括润滑状态、温度监控以及磨损情况的评估，是预防振动问题的重要手段。一旦发现轴承磨损严重或出现异常声音、温度升高等情况，应及时进行更换，以避免因轴承故障引发的剧烈振动。

4. 动态平衡调整

高转速机组在运行过程中，由于材料不均匀、制造误差或长期运行磨损等原因，可能导致转子不平衡，进而引发振动。因此，定期对转子进行动平衡测试，并根据测试结果添加或移除平衡块，以校正不平衡状态，是减少振动、提升机组运行稳定性的有效方法。

5. 主动振动控制技术

除了上述被动控制措施外，还可以考虑引入主动振动控制技术。这包括使用传感器实时监测机组振动情况，通过先进的算法分析振动数据，快速识别振动源，并通过作动器等主动装置施加反向作用力，动态调整机组状态，从而有效抑制振动。这种技术尤其适用于处理复杂

多变的振动问题，能够提高振动控制的精确度和响应速度。

6. 监测与诊断系统的建立

建立健全的振动监测与故障诊断系统，是及时发现和处理振动问题、避免故障扩大的关键。该系统应包括高精度传感器网络、数据采集与分析软件以及专业的故障诊断算法，能够实时监测机组振动状况，预警潜在故障，为维修人员提供准确的故障定位和修复建议，确保机组安全高效运行。

四、数据分析与验证

(一) 数据采集与处理

为了验证上述振动控制策略的有效性，笔者在目标机组上安装了高精度的振动传感器，以及温度传感器、压力传感器等相关监测设备。这些传感器以每秒 10 次的频率采集数据，确保能够捕捉到瞬态振动事件以及其他关键参数的变化。数据采集覆盖了机组在不同负荷、不同转速下的运行状态，以确保数据的全面性和代表性。

(二) 数据分析方法

笔者采用了以下先进的数据分析技术对收集到的振动数据进行深入剖析：通过绘制振动幅值随时间变化的曲线，笔者识别出了机组振动的趋势和周期性变化，笔者发现机组在启动和停机过程中振动幅值较大，而在稳定运行阶段振动幅值相对稳定。利用快速傅里叶变换（FFT）技术，笔者将振动信号从时域转换到频域，识别出了振动中的主要频率成分。通过对比不同频率下的振动幅值，笔者判断出了振动类型，如同步振动（与机组转速相关的振动）和异步振动（与机组转速无关的振动）。笔者计算了振动幅值与其他关键参数（如温度、压力、流量等）之间的相关系数，探究了它们之间的关联性，笔者发现振动幅值与轴瓦温度之间存在显著的正相关性，这为笔者定位振动源提供了重要依据。

(三) 策略实施前后的对比分析

在实施振动控制策略前后，笔者分别采集了机组在相同负荷和转速下的振动数据，并进行了对比分析。通过计算振动幅值、频率、相位等特征参数的变化，笔者量化评估了各项措施的效果。实施后，机组在额定负荷下的振动幅值降低了约 20%，特别是在低频段（<10Hz）的振动得到了有效抑制。通过严格控制各部件的加工精度和装配质量，机组在稳定运行阶段的振动幅值波动范围减小了约 15%，定期检查和更换轴承后，机组因轴承故障引发的振动事件减少了约 30%，且振动幅值也降低了约 10%，通过动平衡测试和调整，机组在高速旋转时的振动幅值降低了约 15%，且振动频率更加集中，减少了不必要的能量损耗。应用主动振动控制技术后，机组在遭遇瞬态扰动时的响应速度提高了约 20%，振动抑制效果显著提升，结合机组运行效率、稳定性指标的变化，

笔者综合评价了振动控制策略对机组整体性能的影响。结果显示，实施策略后机组的运行效率提高了约 5%，稳定性指标也显著改善。

(四) 验证结果

经过详细的数据分析和对比验证，笔者发现实施上述振动控制策略后机组振动水平显著降低。特别是在水力优化设计、提高机械加工精度和轴承维护方面取得了明显成效。动态平衡调整和主动振动控制技术的应用也进一步提升了机组的稳定性和抗振能力，监测与诊断系统的建立有效缩短了故障响应时间约 30%，提高了维修效率约 20%。这些成果为机组的安全高效运行提供了有力保障。

结语

(一) 持续优化建议

深化水力设计研究，继续探索更优化的叶片形状和流道结构，利用 CFD（计算流体动力学）模拟技术，进一步减少水力不平衡力，提升机组效率。智能化升级，推动机组向智能化方向发展，利用 AI 算法优化振动预测模型，实现故障预警的精准化和提前量。材料与技术创新，探索新型材料的应用，如高强度、低摩擦系数的轴承材料，以及更高效的冷却技术，以提高机组部件的耐用性和可靠性。

(二) 未来展望

随着物联网技术的发展，未来可实现机组振动数据的远程实时监控和远程故障诊断，提高运维效率，降低运维成本，基于大数据分析，建立更加精准的预防性维护模型，提前规划维修任务，减少非计划停机时间，结合环保要求，优化机组设计，减少能源消耗和排放，推动水轮发电机组向更加绿色、高效的方向发展。加强与其他行业（如航空航天、汽车制造）的技术交流与合作，借鉴其在振动控制、材料科学等领域的先进经验，共同推动水轮发电机组技术的革新与进步。总之，通过持续的技术创新和优化管理，笔者有信心进一步提升高转速立轴混流水轮发电机组的振动控制能力，为水电行业的可持续发展贡献力量。

参考文献

[1] T. Narisimha Murty, Krish Mehta, Rajasekhara Reddy, Mitra, D. Mallikarjuna Reddy. Vibration Mitigation in High-Speed Rotor-Bearing Systems with Various Control Schemes [J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2025, 13(2): 184-184.

[2] Nilarghya Sarkar, Tanmoy Konar, Aparna (Dey) Ghosh. Passive vibration control techniques for offshore structures under different environmental loading: A review [J]. Ocean Engineering, 2025, 320120296-120296.