

水电站水轮发电机组轴线调整工艺优化与现场实践

邵允谨

江西省港航建设投资集团有限公司 江西 南昌 330006

摘要：水电站水轮发电机组轴线调整是保障机组安全稳定运行的关键环节。本文基于盘车摆度测量技术，通过分阶段调整工艺（主轴单独调整与整机联合调整），结合刚性支撑、弹性油箱等结构特性优化受力分配，采用刨铣法兰面、法兰面加垫等精准措施，有效控制短轴轴线相对摆度在0.02mm/m以内，显著降低机组振动与摆度，提升运行效率。实践验证了该工艺在中小型及大型机组中的普适性与经济性。

关键词：水电站；灯泡贯流式机组轴线；调整工艺优化；现场实践

引言：水轮发电机组轴线精度直接影响水电站运行稳定性与效率。传统调整工艺依赖经验性盘车测量与反复修刮，存在调整周期长、摆度超标等问题，难以满足高参数机组运行需求。本文以降低机组振动、提升轴系对中精度为目标，通过引入三维激光对中仪、优化调整顺序及受力分配模型等创新手段，结合现场实践数据，系统阐述轴线调整工艺的优化路径与实施要点，为同类工程提供技术参考。

1 水电站灯泡贯流式机组轴线结构与调整原理

1.1 灯泡贯流式机组轴系结构特点

(1) 水轮机与发电机同轴布置、水平延伸为核心特征，机组仅一根主轴，转轮与发电机转子分装两端，水平贯穿管型座。该设计适配低水头、大流量工况，缩短轴向长度且提升能效，但因转轮与转子重量差异大，主轴易挠曲，需针对性调整。(2) 组合轴承与水导轴承协同支撑：组合轴承集成轴向载荷承载与径向定位，自润滑合金瓦结构，设于发电机端；水导轴承为分块式滑动轴承，靠近转轮端，限制转轮径向位移，二者需匹配平衡径向力不均及主轴挠度偏移。

1.2 轴线调整的核心参数

(1) 轴线垂直度、摆度、管型座同心度为关键几何参数：垂直度反映与水平基准偏差，摆度是主轴旋转径向跳动，管型座同心度决定灯泡体、主轴与转轮室中心重合度，均需控制在毫米级误差内。(2) 主轴挠度为特有参数：因转轮与转子重量差异（转子通常重1.2-1.5倍），主轴易向下挠曲，需调整至0.03-0.05mm/m，避免转子与定子空气间隙不均匀，引起磁拉力不平衡造成机组振动大。(3) 轴承间隙与受力分布影响寿命：水导轴承径向间隙过大会导致转轮摆度过大，过小引发油膜失效容易导致合金瓦烧毁；组合轴承受力不均加剧磨损，需垫片调整实现载荷均匀^[1]。

1.3 传统调整工艺的痛点

(1) 依赖经验缺乏精准数据，主轴挠度调整易因简易测量出现偏差，单台机组调整周期7-10天，多次调整结果差异大，重复性差。(2) 灯泡体内部空间狭小，部件密集，主轴挠度测量、管型座同心度校准及垫片更换操作不便，水导轴承近转轮端，传统工具难深入，易数据误读，影响调整精度。

2 水电站灯泡贯流式机组水轮发电机组轴线调整工艺优化方法

2.1 预调整阶段优化

(1) 基于三维建模的轴系受力与挠度仿真分析为轴线调整提供精准预判。通过SolidWorks、ANSYS等专业软件构建包含主轴、转轮、转子、水导轴承及组合轴承的全尺寸三维模型，导入机组运行时的水力载荷、电磁载荷及部件重量参数，重点模拟主轴挠度分布规律、管型座同心度偏差趋势及轴承受力状态。例如，可提前识别因转子重量过大导致的主轴中部挠度过大问题，或因管型座加工偏差引发的同心度偏移，输出可视化仿真报告，明确主轴挠度调整目标值与管型座校准基准，减少盲目试调次数，从源头降低调整风险。(2) 关键部件加工精度控制是保障轴线质量的基础。针对管型座、轴承座、主轴等核心部件，采用高精度数控机床加工，将加工误差控制在微米级。其中，管型座内孔同心度误差需 $\leq 0.02\text{mm}$ ，轴承座安装平面平行度误差需 $\leq 0.01\text{mm/m}$ ，主轴径向圆跳动误差需 $\leq 0.03\text{mm}$ 。加工过程中引入在线检测技术，通过激光干涉仪、三坐标测量机实时监测部件尺寸，避免因加工偏差导致轴线装配基准偏移，尤其确保主轴材质均匀性，减少后期运行中因材质不均加剧的挠度变形，为现场调整奠定良好硬件基础。

2.2 现场调整工艺改进

(1) 激光对中技术替代传统百分表法，精准实现

管型座同心度与主轴挠度测量。选用高精度激光对中仪（测量精度 $\pm 0.001\text{mm}$ ），在管型座两端及主轴关键截面（如转轮端、水导轴承处、转子端）布设测量点，通过激光束捕捉管型座同心度偏差与主轴挠度值，5-10分钟内即可完成一次全轴系测量，生成数据报表直观显示垂直度、摆度、同心度及挠度偏差。相较于传统百分表（精度 0.01mm ），不仅测量精度提升10倍，还能避免人工读数误差，为调整提供量化依据。（2）分步调整策略实现轴线调整的精细化与有序化，重点强化主轴挠度与水导轴承调整：①管型座同心度校准优先进行，通过调整管型座与基础台板间的定位螺栓及垫片，将同心度偏差控制在 0.05mm 以内，为主轴安装提供基准；②水导轴承间隙预调，拆下水导轴承上瓦后，用塞尺测量下瓦原始间隙，通过增减轴承座扇形板底部调整垫片，将径向间隙精准控制在 $0.15\text{--}0.25\text{mm}$ ，确保转轮径向定位稳定，同时为后续主轴挠度调整提供约束；③主轴挠度调整，采用“多点支撑法”，在主轴中部及靠近转子端增设临时支撑，通过调整支撑高度逐步修正挠度值，每调整一次后用激光对中仪复测，直至将挠度控制在 $0.03\text{--}0.05\text{mm/m}$ 范围内，避免因挠度超标导致的轴系振动；④组合轴承负荷分配优化，在组合轴承正推8块轴瓦接触面粘贴压力传感器，通过调整轴承座支撑螺栓预紧力与垫片厚度，使各轴瓦受力偏差控制在5%以内，避免局部过载磨损；⑤动态摆度监测与迭代修正，结合机组旋转状态下的摆度测量数据，每轮调整后重新监测，逐步将摆度值控制在 0.05mm 以内，保障运行平稳性^[2]。（3）专用工装设计解决灯泡体内空间狭窄难题。针对水导轴承与转轮端操作空间不足的问题，设计可伸缩式测量支架，支架伸长后可固定激光对中仪探头，缩短后体积缩小60%，便于深入转轮端测量；开发磁吸式水导轴承垫片安装工具，通过强磁吸附垫片精准定位，避免传统手工安装时的偏移或掉落，同时设计主轴挠度调整专用支撑工装，可实现 0.001mm 级微调，大幅提升操作便利性与精度。

2.3 数字化辅助手段

（1）多参数传感器实时监测构建动态调整体系。在水导轴承座、组合轴承座、主轴中部及转轮端安装振动传感器（采样频率 1000Hz ）、温度传感器与挠度传感器，实时采集振动加速度、轴承温度、主轴挠度数据，通过无线传输模块上传至监控平台。当数据超预设阈值（如径向振动 $> 0.1\text{mm}$ 、水导轴承温度 $> 60^\circ\text{C}$ 、挠度 $> 0.05\text{mm/m}$ ）时，平台自动报警，技术人员可及时停机调整，避免设备故障。（2）基于机器学习的调整参数预测模型实现智能化调整。收集历史调整数据（如管型座同

心度偏差、主轴挠度值、水导轴承间隙、调整垫片厚度等），构建神经网络模型并优化。新机组调整时，输入当前测量数据，模型10秒内可输出最优方案（含管型座校准量、主轴支撑高度、水导轴承垫片厚度等），预测准确率达90%以上，减少经验依赖，提升调整效率与一致性^[3]。

3 水电站灯泡贯流式机组水轮发电机组轴线调整工艺优化现场实践案例分析

3.1 工程概况

本次实践对象为某低水头径流式水电站3号灯泡贯流式机组，2018年投运，承担区域电网基荷供电任务。机组核心参数：额定功率 12MW ，设计水头 8.5m ，额定转速 150r/min ，转轮直径 5.2m ，主轴总长 12.8m （材质为 20CrNiMo ），采用“转轮+主轴+发电机转子”一体化水平布置，配套组合轴承（正推、反推各8块巴氏合金瓦）与分块式水导轴承（上下各1块）。2023年检修时，机组运行稳定性下降，采用优化工艺开展维修作业。

3.2 调整前问题诊断

通过专业设备全面检测，确认三大核心问题：一是主轴摆度与挠度超标，停机状态下转子端径向摆度 0.28mm 、转轮端 0.31mm （远超 GB/T8564-2003 《水轮发电机组安装技术规范》 $\leq 0.1\text{mm}$ 要求），主轴最大挠度 0.08mm/m （超标60%）；二是轴承温度异常，水导轴承最高温度 62°C 、组合轴承最高温度 68°C （设计限值均为 60°C ），长期超温易导致轴瓦合金层磨损；三是振动噪声大，水导轴承座处振动加速度级 85dB(A) （“优良级”标准 $\leq 75\text{dB(A)}$ ），伴随低频噪声，影响设备寿命与厂区环境。

3.3 优化工艺实施步骤

（1）激光对中系统布置与校准：选用某品牌激光对中仪，在管型座两端（距水导轴承 0.5m 处）、主轴中部、转轮端及转子端布设5个测量点，调整设备水平度 $\leq 0.01\text{mm/m}$ ，3次重复校准消除误差，测得管型座同心度偏差 0.18mm ，主轴最大挠度 0.08mm/m ，生成偏差报表作为调整依据。（2）管型座同心度校准：通过调整管型座周向6组定位螺栓与 0.02mm 规格垫片，分4次逐步修正，每次调整后复测，最终将同心度偏差降至 0.04mm ，满足设计要求。（3）水导轴承间隙调整：拆下水导轴承上瓦，测得下瓦左侧间隙 0.32mm 、右侧 0.28mm ；通过增减 0.02mm/片 的调整垫片，分3次调整，首次调整后间隙 0.22mm （左）、 0.21mm （右），二次调整后 0.18mm （左）、 0.17mm （右），最终双侧间隙稳定在 $0.15\text{--}0.16\text{mm}$ ，确保转轮径向定位。（4）主轴挠度调整：在

主轴中部（距转轮端6m处）与靠近转子端（距转子0.8m处）架设专用支撑工装，初始支撑高度按仿真计算值设定，每调整0.005mm支撑高度后用激光对中仪复测挠度，经8轮调整，将主轴最大挠度降至0.04mm/m，符合标准。

（5）组合轴承负荷均衡化操作：在8块组合轴承轴瓦接触面粘贴压力传感器，测得原始负荷分布偏差18%（3号瓦最高、7号瓦最低）；通过研磨轴瓦接触面、调整支撑螺栓预紧力，4轮迭代优化后，各轴瓦受力偏差控制在4%以内，实现负荷均衡^[4]。

3.4 调整后效果验证

（1）轴系关键参数达标：停机状态下转子端摆度0.08mm、转轮端0.09mm，主轴挠度0.04mm/m，管型座同心度0.04mm，均满足国家标准；（2）轴承温度显著下降：机组满负荷运行72h后，水导轴承最高温度52℃，组合轴承最高温度54℃，较调整前分别下降16.1%、14.7%，低于设计限值；（3）振动噪声达标：水导轴承座处振动加速度级降至70dB（A），达到“优良级”标准，厂区低频噪声减弱，符合《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2022），同时机组运行能耗降低2.3%，实现安全与节能双重效益。

4 水电站灯泡贯流式机组水轮发电机组轴线调整优化工艺的效益分析

4.1 技术效益

（1）调整效率大幅提升，工期缩短30%以上。传统工艺依赖经验试调，单台机组调整周期7-10天，优化工艺通过激光测量、分步调整与数字化辅助，将12MW机组调整工期缩短至4天，减少43%，且无需二次返工。多机组检修时可压缩整体停机时间，保障枯水期集中检修的电力供应。（2）轴系运行稳定性增强，故障风险降低。优化工艺使轴系关键参数达标率从传统工艺的75%提升至98%以上，某水电站应用后，机组摆度、主轴挠度、同心度长期稳定，水导轴承与组合轴承瓦温度控制在48-54℃，因轴线问题引发的故障停机从每年2-3次降至每3年1次，运行可靠性显著提高。

4.2 经济效益

（1）减少停机检修成本。传统工艺下，12MW机组每次停机日均发电损失约10.08万元（28.8万kWh×0.35元/kWh），检修费用8万元；优化工艺使检修间隔从1年延长至3年，单台机组每年减少停机损失与检修费用合计约25万元。（2）延长机组使用寿命。轴线偏差与挠度超标会使机组设计寿命从30年缩短至22-25年，优化工艺通过控制挠度、均衡轴承负荷，可延长机组寿命至28-30年，减少1次中期大修（核心部件更换费用约800万元），降低长期投入成本。

4.3 社会效益

为同类低水头灯泡贯流式机组提供可复制方案。国内60%低水头水电站采用该类型机组，且普遍面临轴线调整难题。优化工艺经8-15MW、6-10m水头机组验证，技术路径与参数标准可直接参考，相关经验已通过行业交流会、专业期刊分享，助力提升国内低水头水电设备运维水平，推动水电行业绿色高效发展。

结束语

水电站水轮发电机组轴线调整工艺优化通过融合先进技术手段与创新策略，显著提升了调整的精准度与效率，有效解决了传统工艺的诸多弊端。现场实践表明，优化后的工艺切实增强了机组的运行稳定性，降低了故障发生率，带来了可观的技术、经济与社会效益。未来，我们将持续探索，进一步完善工艺，推动水电设备运维向智能化、精细化迈进，为水电行业的可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]李红义.水轮发电机组轴线调整工艺研究[J].水电站机电技术,2020,44(09):102-104.
- [2]王永潭.丰满水电站水轮发电机组轴线调整[J].水利水电技术,2020,52(S1):91-92.
- [3]熊佳进,官瑶,王一方.水轮发电机组轴线调整新工艺的研究与应用[J].水电与新能源,2024,38(08):86-89.
- [4]李红义.水轮发电机组轴线调整工艺研究[J].水电站机电技术,2021,44(09):123-124.