

# 水电站机组轴瓦故障诊断与处理方法研究

解志强

河北省水利工程局集团有限公司建筑安装分公司 河北 石家庄 050000

**摘要：**水电站机组轴瓦作为关键部件，其故障直接影响机组安全与效率。本文聚焦轴瓦故障诊断与处理，分析磨损、烧瓦、裂纹等典型故障成因及影响，提出振动分析、油液检测、温度监测等传统与智能诊断方法，如机器学习、多源数据融合等，以提升诊断精准度。处理方面，涵盖紧急停机、轴瓦修复更换及润滑系统优化等措施，同时强调预防性维护，包括工况监测、定期检修，通过科学处理与预防策略降低故障率，保障水电站稳定高效运行。

**关键词：**水电站机组；轴瓦故障诊断；处理方法

引言：水电站是能源体系的重要构成，机组稳定运行关乎电力供应的可靠性。轴瓦作为机组旋转部件的关键支撑与减摩元件，其运行状况直接影响机组性能与寿命。在长期运行中，轴瓦会因复杂工况、润滑问题、制造安装缺陷等，出现磨损、烧瓦、裂纹等故障，导致机组振动异常、效率降低，甚至引发重大事故。因此，深入研究水电站机组轴瓦故障诊断与处理方法，实现故障的早发现、早处理，对保障水电站安全经济运行意义重大。

## 1 水电站机组轴瓦工作原理与故障机理

### 1.1 轴瓦结构与润滑机制

(1) 滑动轴承与推力轴承的构造。滑动轴承由轴瓦、轴承座、润滑装置组成，轴瓦多采用巴氏合金、青铜等减摩材料，内表面设油槽以导油；推力轴承含推力头、镜板、推力瓦，推力瓦呈扇形分布，通过支撑结构贴合镜板，承担机组轴向荷载，二者共同保障轴系平稳转动。(2) 油膜形成与承载原理。开机时，轴颈与轴瓦间润滑油因剪切作用产生油膜。随转速提升，油膜厚度增加，形成流体动压润滑。油膜借助粘性力将轴颈浮起，使固体摩擦转为液体摩擦，利用油膜压力平衡机组径向与轴向荷载，避免金属直接接触，降低磨损。

### 1.2 常见故障类型及成因

(1) 磨损。均匀磨损多因润滑油长期使用后杂质含量超标，或油膜厚度不足导致轴瓦与轴颈轻微摩擦；偏磨则源于机组安装时轴系对中偏差，使轴瓦局部受力集中，或轴承间隙不均匀，造成特定区域持续承压磨损，两类磨损均会破坏轴瓦表面平整度，影响润滑效果。(2) 烧瓦。润滑油量不足、油质劣化（如氧化变质、进水乳化）会直接破坏油膜，引发润滑失效；机组过载运行、冷却系统堵塞或散热不良，会使轴瓦温度骤升（超过材料耐受极限80℃），导致轴瓦金属熔化粘连，形成烧瓦故障，严重时会造成轴颈损伤。(3) 裂纹与变形。

长期交变荷载作用下，轴瓦材料内部产生疲劳应力，逐渐形成微小裂纹并扩展；机组启动骤停时的冲击荷载，或轴承座基础沉降引发的附加应力，会使轴瓦发生塑性变形，破坏其与轴颈的配合精度，影响机组运行稳定性。(4) 油膜振荡与失稳。当机组转速达到2倍临界转速以上时，油膜刚度下降，油膜力与轴颈惯性力形成共振，引发油膜振荡；润滑油粘度异常（过高或过低）、轴承间隙过大，会进一步加剧油膜失稳，导致轴颈剧烈振动，威胁机组安全运行<sup>[1]</sup>。

### 1.3 故障对机组运行的影响

(1) 振动加剧、效率下降。轴瓦故障使轴系同心度偏差增大，运行中产生周期性振动，振幅超过0.08mm时，会导致机组部件松动、连接螺栓断裂；同时，摩擦阻力增加、油膜承载效率降低，使机组能量损耗上升，发电效率较正常状态下降5%-15%，影响电站经济效益。(2) 引发连锁故障的风险。轻微磨损若未及时处理，会发展为烧瓦、裂纹等严重故障，迫使机组停机检修；轴瓦变形可能导致轴颈磨损，进而破坏密封装置，引发润滑油泄漏、水轮机进水等问题；油膜振荡还可能传导至发电机，造成定子、转子碰撞，引发更严重的设备损坏，甚至危及电站安全生产。

## 2 水电站机组轴瓦故障诊断方法研究

### 2.1 传统诊断技术

(1) 振动信号分析。振动信号是轴瓦故障的重要“晴雨表”。频谱分析通过傅里叶变换将振动信号分解为不同频率成分，若出现特定频率峰值，可精准定位故障类型——如轴瓦磨损常伴随2倍转频谐波，油膜振荡则表现为低频段共振峰值；时域波形分析通过观察信号幅值波动，判断故障严重程度，例如烧瓦故障发生前，时域波形会出现明显的幅值突变与不规则波动，为故障预警提供直接依据。该技术操作简便、响应迅速，广泛应

用于机组日常巡检。（2）油液分析。油液分析通过检测润滑油中磨损颗粒的特性判断轴瓦状态。铁谱分析利用磁场分离油中金属颗粒，观察颗粒形态与数量：均匀磨损产生细小、规则的磨粒，偏磨或裂纹则出现片状、块状大颗粒；光谱分析借助原子发射光谱，定量检测油中金属元素含量，当巴氏合金中的锡、铅元素浓度骤升时，可判定轴瓦存在严重磨损。该技术能早期发现隐性故障，但分析周期较长，需结合其他技术综合判断<sup>[2]</sup>。

（3）温度监测与热成像技术。温度是轴瓦故障的直观指标。通过在轴瓦关键部位安装热电偶传感器，实时监测温度变化，当温度超过预设阈值（通常为60-70℃），可初步判断润滑失效或过载；热成像技术则通过红外相机捕捉轴瓦表面温度场分布，直观显示局部高温区域，精准定位偏磨、冷却系统故障等问题。该技术具有非接触、可视化的优势，适用于高风险工况下的诊断。

## 2.2 现代智能诊断技术

（1）基于机器学习的故障分类。支持向量机（SVM）通过构建最优分类超平面，对振动、油液等特征数据进行故障分类，尤其在小样本数据下，仍能保持较高的诊断精度，可有效区分磨损、烧瓦等相似故障；神经网络（如BP神经网络）模拟人类大脑神经元结构，通过大量故障样本训练，自主学习故障特征规律，实现故障类型的自动识别与概率判断，解决了传统技术依赖人工经验的局限性，提升了诊断效率与准确性。（2）深度学习在振动信号解析中的应用。深度学习（如卷积神经网络CNN、循环神经网络RNN）可深度挖掘振动信号中的隐藏特征。CNN通过卷积层、池化层提取信号的局部特征，精准识别频谱图中的细微故障信息，如早期裂纹对应的微弱频率成分；RNN则擅长处理时序振动数据，捕捉故障发展的动态规律，预测故障演变趋势。该技术无需人工提取特征，实现了从“数据输入”到“故障输出”的端到端诊断，大幅提升了复杂工况下的诊断能力。（3）多源数据融合诊断模型。多源数据融合模型整合振动、油液、温度等多维度监测数据，通过数据级、特征级、决策级三层融合，消除单一数据的局限性。例如，将振动信号的频率特征与油液分析的金属颗粒浓度数据融合，可交叉验证故障类型；结合温度监测的实时数据，修正诊断结果，避免误判。该模型通过加权融合不同数据源的诊断结果，显著提升了故障诊断的可靠性与全面性，适用于大型水电站机组的复杂诊断场景<sup>[3]</sup>。

## 2.3 综合诊断策略

（1）分层次诊断流程设计。分层次诊断流程分为“初步诊断-精准定位-深度分析”三层：第一层通过温度监测、时域波形分析等快速筛查异常机组，缩小诊断范

围；第二层利用频谱分析、铁谱分析等传统技术，初步判断故障类型与大致位置；第三层调用深度学习模型、多源数据融合模型，对疑似故障机组进行深度分析，确定故障原因、严重程度及发展趋势。该流程兼顾效率与精度，实现了故障诊断的有序化、系统化。（2）阈值设定与预警机制。基于历史故障数据与设备运行标准，设定多维度预警阈值：温度阈值根据轴瓦材料特性设定（如巴氏合金轴瓦预警温度65℃，停机温度75℃）；振动幅值阈值结合机组额定转速设定（如转速3000r/min时，振动幅值预警值0.05mm）；油液金属元素浓度阈值参考设备手册与行业标准（如锡元素浓度预警值10mg/L）。当监测数据超过预警阈值时，系统自动触发多级预警：一级预警通过声光提示通知巡检人员；二级预警启动多源数据融合诊断，生成初步诊断报告；三级预警触发停机流程，并推送详细故障分析与维修建议，实现故障的早发现、早处理，降低停机风险。

## 3 水电站机组轴瓦故障处理与预防方法

### 3.1 紧急处理措施

（1）停机检修流程。当监测系统触发轴瓦故障预警（如温度超阈值、振动异常），需立即启动停机流程：首先切断机组动力电源，关闭进水阀门，按照“减速-怠速-停机”的顺序平稳降低转速，避免突然停机引发轴系冲击；停机后，锁定机组转动部件，悬挂安全警示标识，防止误操作；随后开展初步检查，记录轴瓦温度、振动数据及外观状态，为后续检修提供基础信息。整个流程需严格遵循设备操作规程，确保人员与设备安全。

（2）临时支撑与降温方案。若轴瓦出现局部过热或轻微损伤，暂无法立即拆机检修时，需采取临时支撑与降温措施：通过液压千斤顶或专用支撑装置，在轴颈非受力区域建立临时支撑，减轻轴瓦承载压力；同时，开启强制冷却系统，加大润滑油循环流量，或向轴承座外部喷洒工业冷却液（需避免冷却液渗入油腔），快速降低轴瓦温度；若温度持续升高，可拆除轴承端盖，采用压缩空气直吹降温，待温度稳定后，安排停机检修，防止故障进一步恶化。

### 3.2 修复与更换技术

（1）轴瓦表面修复工艺。针对轴瓦表面轻微磨损、划痕等缺陷，可采用喷涂或电镀工艺修复：喷涂修复选用镍基合金、巴氏合金等耐磨材料，通过等离子喷涂技术将材料均匀覆盖于轴瓦磨损表面，再经磨削加工至标准尺寸，恢复表面平整度与配合精度，适用于磨损深度小于0.5mm的情况；电镀修复则利用电解原理，在轴瓦表面沉积铜、锡等金属镀层，镀层厚度可控（通常为0.05-

0.2mm），具有良好的附着性与减摩性，适合修复精密配合面的微小损伤。修复后需进行硬度检测与密封性试验，确保满足运行要求。（2）材质优化与配对选择。轴瓦更换时需注重材质优化与配对适配：对于高负荷机组，优先选用新型铜合金（如锡青铜-石墨复合材料）或陶瓷基复合材料，这类材料具有更高的抗压强度与耐磨性，可提升轴瓦使用寿命；对于低速重载机组，仍以巴氏合金为主，但需提高合金纯度，减少杂质含量；同时，轴瓦与轴颈的材质配对需满足“软-硬配合”原则，例如巴氏合金轴瓦搭配45号钢轴颈，铜合金轴瓦搭配不锈钢轴颈，避免金属粘连，降低磨损风险。更换后需进行轴系对中调整，确保轴承间隙符合设计标准（通常为0.1-0.3mm）<sup>[4]</sup>。

### 3.3 预防性维护策略

（1）润滑系统优化。润滑系统优化是预防轴瓦故障的核心：建立油质管理体系，定期（每3个月）检测润滑油粘度、水分、杂质含量，当粘度变化率超过15%、水分含量大于0.1%或杂质颗粒度超过NAS8级时，及时更换润滑油；安装高精度油滤装置（过滤精度 $\geq 10\mu\text{m}$ ），减少油中杂质；同时，根据机组负荷变化动态调整润滑油流量，如满负荷运行时流量提高20%，确保油膜厚度稳定；冬季低温环境下，启动润滑油加热装置，将油温预热至30-40℃后再开机，避免低温导致油膜破裂。（2）运行工况监测与调整。实时监测机组运行工况，避免不利工况引发轴瓦故障：通过在线监测系统跟踪轴瓦温度、振动、荷载等参数，当发现参数异常波动时，及时调整运行状态，如降低机组负荷、调整导叶开度，平衡轴系受力；避免机组长期在临界转速（或2倍临界转速）附近运行，防止油膜振荡；定期检查冷却系统，确保冷却水

温控制在20-30℃，冷却水管无堵塞，避免因冷却失效导致轴瓦过热。（3）定期检修计划制定。制定科学的定期检修计划，实现故障提前预防：按照“日常巡检-月度检查-年度大修”的周期开展检修工作，日常巡检重点检查轴瓦温度、润滑油泄漏情况；月度检查拆解轴承端盖，观察轴瓦表面状态，测量轴承间隙；年度大修时，全面拆解轴瓦，进行无损检测（如超声波探伤），排查内部裂纹、疲劳损伤，同时清洁润滑系统、校准监测仪表；根据机组运行年限与故障历史，对老旧轴瓦（使用超过8年）提前制定更换计划，避免突发故障停机。

### 结束语

本文聚焦水电站机组轴瓦故障诊断与处理方法，深入剖析了轴瓦常见故障类型、成因及影响。通过整合振动分析、油液检测等多技术手段，结合智能算法，有效提升了故障诊断的精准度与及时性。针对不同故障，提出的针对性处理措施经实践验证切实可行。未来，随着新技术不断发展，可进一步融合大数据、物联网等技术，实现轴瓦状态的实时智能监测与预测性维护，降低故障发生率，为水电站机组稳定运行提供更坚实保障，推动水电行业迈向更高水平。

### 参考文献

- [1]王玉林,张民威,张祥飞,等.基于多数据融合的水电机组全息监测系统[J].云南水力发电,2024,40(08):149-150.
- [2]惠宝军.水电机组状态监测与故障诊断技术应用探讨[J].企业科技与发展,2020,(07):81-82.
- [3]曾令森.大型水电站运行安全管理模式研究[J].水利科学与寒区工程,2021,4(03):104-105.
- [4]刘雁飞.水轮发电机组智能故障诊断与处理分析[J].水电站机电技术,2024,47(10):139-140.