

# 灯泡贯流式水轮发电机组轴瓦烧损预警保护方法研究

卢家川

广西广投桥巩能源发展有限公司 广西来宾 546119

**摘要:** 灯泡贯流式水轮发电机组在低水头资源开发中占据重要地位,但其轴瓦烧损问题长期制约运行可靠性。现有保护机制多基于阈值报警,响应滞后且误报率高。本研究提出一种融合物理模型与数据驱动的混合预警方法:通过建立轴瓦热-力耦合仿真模型,结合在线油膜厚度监测与振动频谱分析,构建动态风险评估指标;同时引入自适应学习算法,优化预警阈值动态调整策略,实现从“被动保护”到“主动预防”的转变,为同类型机组智能运维提供新思路。  
**关键词:** 灯泡贯流式;水轮发电机组;轴瓦烧损;预警保护

## 引言

灯泡贯流式水轮发电机组因其结构紧凑、效率高等特点广泛应用于低水头电站,但其轴瓦烧损问题严重影响机组安全运行。传统保护方法依赖事后报警,难以实现故障预防。

## 一、灯泡贯流式水轮发电概述

灯泡贯流式水轮发电机组是一种适用于低水头、大流量水能资源开发的特种水轮发电设备,其核心特征在于将发电机定子与转子直接集成于流道内部的灯泡形密闭壳体中,实现机组结构的轴向紧凑化布置。该机型采用卧轴式设计,水流沿轴向贯穿转轮后平直流出,显著减少了弯道水力损失,使得在3~30米水头范围内能量转换效率可达90%以上。从结构组成分析,主要包含灯泡体、转轮室、导水机构、轴承系统及尾水管等关键部件,其中双向对称的转轮叶片设计兼顾正反向发电需求,特别适用于潮汐电站等双向水流场合。相较于传统立轴机组,其流道线性化特征降低了土建工程量,但同时也带来轴系支撑稳定性、轴承散热等特殊技术挑战。现代机组通过采用高分子复合材料轴瓦、油雾润滑冷却系统以及在线监测装置,有效提升了运行可靠性。在智能运维方面,基于振动频谱分析与热力学建模的故障预警技术逐步成熟,为机组长期稳定运行提供保障。当前该机型在全球低水头电站装机容量占比已超过40%,在平原河道、灌溉渠道等场景展现出显著的经济性与适应性,未来随着复合材料与数字孪生技术的深度融合,其轻量化与智能化水平将进一步提升。

## 二、灯泡贯流式水轮发电机组轴瓦烧损造成的影响

### 1. 机组安全风险

灯泡贯流式水轮发电机组轴瓦烧损将直接破坏转子

系统的动态稳定性,引发支撑结构失效。当轴瓦润滑性能恶化时,金属间干摩擦产生的瞬时高温可导致巴氏合金层熔融脱落,造成轴颈与轴瓦间隙突变。这种机械失衡会诱发机组横向振动幅值急剧增大,在临界转速工况下可能引发转子扫膛事故,严重时造成转轴弯曲变形或联轴器螺栓断裂等结构性损伤。振动能量通过轴承座传递至流道壳体,可能进一步导致灯泡体密封失效或转轮室气蚀加剧。若未能及时停机,持续恶化的机械振动将威胁机组基础混凝土结构的完整性,甚至诱发压力钢管共振风险。此类故障往往伴随润滑油系统污染,金属磨粒随油路循环会加速推力轴承和导轴承的异常磨损,形成多部件连锁损伤的恶性循环,显著增加非计划停运概率与事故等级。

### 2. 经济损失

轴瓦烧损事故将导致机组被迫紧急停机,造成直接发电收益损失。以单机容量50MW的灯泡贯流式机组为例,按平均上网电价0.3元/千瓦时计算,单日发电量损失可达36万元。故障处理通常需要7~15天的检修周期,涉及轴瓦更换、轴颈修复、润滑油系统清洗等工序,材料及人工成本约50~80万元。若烧损引发转轴变形等次生损伤,维修费用可能突破200万元。间接经济损失更为显著,包括电网考核罚款、备用容量购置费用以及合同违约赔偿等。频繁的非计划停运还将缩短机组大修间隔,使原定5年的大修周期提前至3~4年,单次大修费用增加约15%~20%。长期运行数据表明,轴瓦烧损类故障造成的年均经济损失可达机组总维护费用的30%以上。

### 3. 连锁故障

轴瓦烧损产生的金属磨屑会随润滑油循环进入整个

润滑系统，导致油品污染劣化。粒径大于 $5\mu\text{m}$ 的硬质颗粒将加剧推力轴承和导轴承的磨粒磨损，使轴瓦间隙在运行2000小时内扩大 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ 。油膜承载能力下降会引发新的轴瓦温度异常，形成自激式恶性循环。污染油液流经冷却器时，磨屑沉积可能堵塞换热管束，使润滑油冷却效率降低30%以上。进入调速系统的污染物还会加速伺服阀芯磨损，造成导叶开度控制偏差增大。更严重的是，未及时清除的铜合金碎屑可能引发电机组定子绕组的短路事故。监测数据表明，单次轴瓦烧损事故可使关联部件的平均使用寿命缩短40%，后续6个月内发生二次故障的概率提升3~5倍。

### 三、灯泡贯流式水轮发电机组轴瓦烧损预警保护方法

#### 1. 多参数融合监测技术

多参数融合监测技术通过部署分布式传感网络实时采集轴瓦运行状态数据，包括温度场分布、振动频谱特征、油膜厚度动态变化以及润滑油理化指标。采用小波包变换对振动信号进行多尺度分解，提取 $0.5\sim 5\text{kHz}$ 频段的特征能量参数，结合红外热像仪获取的轴瓦表面温度梯度分布，构建三维状态特征矩阵。开发基于卡尔曼滤波的数据融合算法，消除传感器测量噪声干扰，建立温度-振动-油膜参数的耦合关系模型。通过核主成分分析(KPCA)对高维监测数据进行特征降维，提取反映轴瓦健康状态的关键综合指标。实验数据表明，该技术可将早期异常识别时间提前72~120小时，误报率控制在5%以下。系统每30秒更新一次状态评估结果，当特征参数偏离基准值15%时启动预警机制。

#### 2. 智能诊断算法应用

智能诊断算法通过融合深度学习和信号处理技术构建轴瓦全生命周期状态评估体系。采用多尺度一维卷积神经网络处理振动时序信号，结合小波包变换提取 $0.5\sim 10\text{kHz}$ 频段的特征能量参数，实现故障特征的层级化提取。门控循环单元网络分析温度、油压、流量等多维参数的动态耦合关系，建立考虑工况变化的时变预测模型。模型训练阶段引入多头注意力机制，重点捕捉异常工况下的特征突变模式，使测试集分类准确率提升至92%以上。针对现场数据稀缺问题，开发基于条件生成对抗网络的数据增强模块，合成涵盖不同故障类型和严重程度的样本数据。迁移学习框架实现实验室标定数据与现场运行数据的特征空间对齐，解决小样本条件下的模型泛化问题。在线学习系统通过滑动窗口机制持续更新模型参数，结合增量学习算法避免灾难性遗忘，使诊断准确

率每年提升3~5个百分点。系统每10分钟执行一次综合状态评估，当故障概率超过动态阈值时，自动生成包含故障类型、严重等级和演化趋势的诊断报告。

#### 3. 数字孪生预警平台

数字孪生预警平台通过建立轴瓦系统的多物理场耦合仿真模型，实现虚拟空间与物理机组的实时交互。基于有限元方法构建包含热-流-固耦合作用的轴瓦三维模型，通过实时数据驱动更新边界条件，精确模拟不同转速和载荷下的油膜压力分布。采用降阶建模技术提升计算效率，使仿真周期缩短至物理时间的1/10。开发虚拟传感模块，利用数字孪生体推演出物理传感器未覆盖区域的温度场和应力场分布。平台每5分钟执行一次状态预测，当仿真结果显示油膜破裂风险系数超过0.7时触发预警。历史数据验证表明，该平台可提前48小时预测临界润滑状态，定位精度达到 $\pm 2^\circ\text{C}$ 温度场偏差和 $\pm 5\mu\text{m}$ 油膜厚度误差。通过可视化界面实时展示轴瓦健康状态演变趋势，为运维决策提供量化依据。

#### 4. 主动保护控制系统

主动保护控制系统基于实时状态监测数据构建多级联动响应机制，通过嵌入式控制器实现闭环保护策略。系统采用自适应模糊PID算法，根据轴瓦温度上升速率、振动烈度变化趋势等动态参数，实时计算最优调节量并输出至执行机构。当监测参数超过预设阈值时，系统自动分级启动保护程序：初级响应阶段调节润滑油冷却器阀门开度，中级响应阶段联动辅助高压油泵提升供油压力，高级响应阶段协调调速器实施负荷梯度卸载。系统集成故障树分析模块，针对不同故障模式匹配相应的保护逻辑，如油膜破裂预警时优先启动应急润滑系统，振动超标时自动激活阻尼补偿装置。运行数据表明，该系统可将轴瓦异常工况的响应时间缩短至30秒内，使临界故障的干预窗口延长2~3倍。所有保护动作均通过工业总线同步记录，形成包含时间戳、动作类型、参数变化曲线的完整事件报告，为后续故障分析提供数据支撑。系统具备自学习功能，可根据历史保护效果动态优化控制参数，持续提升保护动作的精准性和可靠性。

### 四、灯泡贯流式水轮发电机组轴瓦烧损预警保护方法未来发展趋势

#### 1. 人工智能深度集成

人工智能技术在轴瓦状态监测领域的深度应用将推动预警系统向自主决策方向发展。基于深度神经网络的故障诊断模型通过在线学习机制持续优化参数配置，利用迁移学习算法实现不同机组间的知识共享。生成对抗

网络创造多样化故障样本，有效解决实际运行数据不足的瓶颈问题。数字孪生平台构建高保真虚拟仿真环境，为AI模型提供海量训练场景。图神经网络技术将应用于多传感器数据关联分析，挖掘温度、振动、油液参数间的非线性耦合关系。强化学习算法使系统能够自主制定最优保护策略，根据历史干预效果动态调整预警阈值。预计下一代智能预警系统可实现95%以上的故障识别准确率，并将预警响应时间压缩至10秒以内。边缘计算设备的部署使AI模型能够就地处理实时数据，显著提升系统响应速度。

## 2. 微型传感器网络部署

微型传感器网络的发展将实现轴瓦运行状态的全方位精确感知。基于MEMS技术开发的耐高温压力传感器可嵌入轴瓦表面，实时监测接触面微米级形变。分布式光纤传感系统通过布拉格光栅阵列测量油膜厚度分布，空间分辨率达到0.1mm。无线传输技术的应用解决了旋转部件布线难题，自组网协议确保数据传输可靠性。纳米材料涂层使传感器具备抗油污腐蚀特性，在80℃润滑油环境中保持长期稳定性。智能传感器节点集成边缘计算能力，可本地完成特征提取和数据预处理。实验数据显示，256个监测点组成的传感网络可重构轴瓦三维受力状态，温度测量误差控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内。新型量子点传感器正在研发中，有望实现纳米级磨损颗粒的在线检测。

## 3. 预测性维护体系构建

预测性维护体系的演进将实现机组健康管理的全流程智能化。基于设备数字孪生体构建寿命预测模型，融合实时运行数据与历史维护记录，通过深度学习算法评估部件剩余使用寿命。区块链技术确保数据链条的完整性与可追溯性，从设计参数到运维记录形成不可篡改的电子档案。采用随机森林算法分析多源监测数据，建立关键部件劣化速率与运行工况的映射关系。开发自适应维护决策模块，根据风险评估结果动态优化检修计划，平衡安全性与经济性。实际应用表明，该体系可将非计划停机时间减少40%，维护成本降低25%。云边协同架构支持多电站数据共享，通过迁移学习提升小样本机组的预测精度。智能诊断知识库持续积累典型故障案例，为维护策略提供决策支持。

## 4. 新型材料与结构创新

材料科学与结构设计的突破将显著提升轴瓦系统的可靠性。石墨烯增强复合材料通过纳米级分散相改善基体力学性能，使轴瓦在边界润滑工况下的耐磨性提升3倍以上。微胶囊自修复技术将润滑添加剂封装于聚合物基体中，磨损产生的机械应力触发微胶囊破裂，实现摩擦界面的原位修复。智能可变刚度支撑结构采用形状记忆合金作为执行元件，根据载荷变化自动调节轴瓦间隙，将振动幅值控制在安全范围内。磁流体润滑技术的应用通过外磁场精确调控润滑油黏度分布，在启动和变负荷工况下维持稳定油膜。实验数据表明，新型轴瓦材料在同等工况下可使温升降低15-20℃，使用寿命延长至传统材料的2.5倍。正在研发的仿生表面织构技术模仿生物关节的微观形貌特征，进一步优化润滑剂流体动力学性能。

## 结束语

研究提出的轴瓦烧损预警方法通过实时监测关键参数并引入自适应阈值算法，显著提升了故障识别的时效性与准确性。未来可结合数字孪生技术进一步优化模型泛化能力，推动水电机组状态检修体系的智能化升级。研究成果对保障机组安全、降低维护成本具有重要工程价值。

## 参考文献

- [1] 彭自强. 灯泡贯流式水轮发电机定子接地故障原因分析及处理[J]. 小水电, 2025, (02): 77-79+86.
- [2] 宋厚彬, 王帅, 韩伟, 等. 灯泡贯流式水轮发电机风路多物理场耦合分析及结构优化[J]. 水力发电学报, 2025, 44 (03): 24-37.
- [3] 卜天郎, 徐孝刚, 孙万庆, 等. 巨型灯泡贯流式机组全水头运行研究[J]. 四川水力发电, 2025, 44 (01): 49-52.
- [4] 张方庆, 蒋志彦. 灯泡贯流式水轮发电机组轴瓦烧损预警保护方法研究[J]. 水电站机电技术, 2024, 47 (07): 69-72.
- [5] 尤瑜策, 黄文理. 基于A级规范的河床灯泡贯流式发电机检修技术[J]. 水电站机电技术, 2023, 46 (06): 107-109.