

灯泡贯流式水轮发电机组灯泡头异常振动原因分析及处理

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因其结构紧凑、效率高等优点在低水头电站中得到广泛应用。机组运行过程中灯泡头部位出现的异常振动问题严重影响设备安全稳定运行。本文针对某电站灯泡贯流式机组运行中出现的灯泡头异常振动现象,通过现场测试、数据采集和频谱分析,系统研究了振动特征及其产生机理。研究表明,灯泡头异常振动主要源于水力不平衡、机械不对中、电磁力不对称等多因素耦合作用。基于分析结果,提出了包括优化导叶开度、调整轴承间隙、改善流道设计等综合治理措施,实施后振动幅值显著降低,为同类机组振动故障诊断与处理提供了重要参考。

关键词: 灯泡贯流式; 水轮发电机组; 灯泡头异常振动; 原因分析及处理

引言

灯泡贯流式水轮发电机组因其结构紧凑、效率高而广泛应用于低水头电站,但灯泡头异常振动问题可能威胁机组安全运行。振动成因复杂,涉及水力、机械、电气等多因素耦合,如水流不对称、转子不平衡或电磁力异常等。

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水力发电设备,其结构特点在于将发电机置于流道内的灯泡形壳体中,与转轮直接同轴连接,形成高度紧凑的一体化设计。该机组采用卧式布置,水流沿轴向贯穿流道推动转轮旋转,能量转换效率较高,适用于水头范围3~30米的电站。相较于传统轴流转桨式机组,贯流式机组流道平直,水力损失小,单位流量出力更大,且厂房土建工程量显著减少。其核心部件包括转轮、导水机构、发电机定转子、灯泡体支撑结构及轴承系统,其中转轮通常采用3~6片固定或可调叶片以适应变工况运行。发电机因布置在流道内,需特殊考虑密封、散热与防腐蚀问题,通常采用密闭循环通风冷却系统。灯泡体的结构强度与动态稳定性直接影响机组振动特性,需通过水力优化设计避免尾水管涡带诱发压力脉动。现代灯泡贯流机组普遍配备状态监测系统,实时采集振动、摆度、温度等参数,为故障预警提供数据支撑。该机型在潮汐电站、平原河段径流式电站中具有显著优势,其设计制造水平体现了一个国家在低水头水能利用

领域的技术能力。

二、灯泡贯流式水轮发电机组灯泡头异常振动原因

1. 水力不平衡引起的振动

水力不平衡是导致灯泡贯流式水轮发电机组灯泡头异常振动的主要诱因之一。导叶开度不对称或局部磨损破坏水流周向均匀性,在转轮进口形成非对称压力分布,产生周期性水力激振力作用于转轮叶片。转轮叶片背面低压区空化现象引发空泡溃灭,产生高频压力脉动并通过水体传递至灯泡头结构,其频率特征表现为叶片通过频率及其整数倍谐波。部分负荷工况下尾水管内形成的螺旋状涡带诱发低频压力脉动,典型频率范围为0.2~0.4倍转频,该脉动压力与结构固有频率耦合时易引发共振。流道内局部脱流与再附着现象造成压力场动态变化,进一步加剧水力激振力幅值波动。水力不平衡激振力通过轴系传递至灯泡头支撑结构,在特定工况下与机械系统形成复杂耦合振动,振动信号通常呈现宽频带特征且与机组转速具有明显相关性。

2. 机械因素导致的振动

机械因素引发的振动在灯泡贯流式机组运行中具有显著影响。轴承间隙异常导致转子系统支承刚度下降,使得转频振动分量显著增大,当导轴承径向间隙超过设计值0.15mm时,轴心轨迹呈现明显椭圆特征。轴线对中不良产生周期性交变应力,轴线偏差每增加0.02mm/m将导致二倍转频振动幅值上升30%。连接结构松动改变系统动力特性,法兰连接螺栓预紧力不足时,结构固有频率下降15%~20%,在50~100Hz频段易激发局部共振。

转轮室密封间隙不均匀造成水力径向力波动,当单侧间隙偏差超过平均间隙20%时,将诱发与转速同步的强迫振动。转动部件质量不平衡每增加 $5\text{g}\cdot\text{m}$,转频振动速度有效值相应升高 0.5mm/s 。机械缺陷引起的振动通常具有稳定频率特征,其相位变化与故障位置存在确定对应关系,可通过轴心轨迹分析和相位诊断技术准确定位故障源。

3. 电磁力不对称振动

电磁力不对称是引发灯泡贯流式机组振动的重要诱因。定转子间气隙不均匀导致磁场分布失衡,当气隙偏差超过设计值 $\pm 5\%$ 时,产生的单边磁拉力使振动频率稳定呈现二倍工频特征。转子动态偏心造成电磁激振力周期性变化,磁极匝间短路或配重块脱落使转子质量分布改变,振动频谱中出现转频与极通过频率的调制分量。三相电流不平衡超过10%时,负序电流分量产生的反向旋转磁场与正序磁场相互作用,在转子上形成100Hz脉振电磁力。铁芯叠压不紧或定子绕组松动导致局部磁阻变化,引发分数次谐波电磁振动。电磁振动具有与电气参数强相关性,其幅值随励磁电流增大而显著提升,通过空载升压试验可有效区分电磁振动与机械振动。采用频响函数分析可识别电磁力与结构模态的耦合状态,为振动控制提供依据。

4. 结构共振问题

结构共振是灯泡贯流式机组异常振动的重要表现形式。灯泡头支撑结构的固有频率通常在80–120Hz范围内,当与转频谐波或电磁力频率重合时,振动响应被显著放大。焊接缺陷导致局部刚度削弱,支撑环焊缝裂纹使结构模态频率偏移10%–15%,在特定工况下激发高阶共振。水体–结构耦合效应改变系统动力学特性,流道内水体的附加质量使结构固有频率降低20%–30%,形成特有的流体弹性振动模态。法兰连接面接触不良引发局部非线性振动,接触刚度变化产生次谐波共振现象。结构共振具有窄带频谱特征,振动响应在临界转速附近呈现急剧放大,相位差出现180度突变。通过模态试验获取结构实际动力参数,采用有限元分析优化结构刚度分布,可有效避免共振风险。运行中实施振动模态监测,为结构动态特性评估提供数据支持。

三、灯泡贯流式水轮发电机组灯泡头异常振动处理策略

1. 水力优化措施

水力优化措施着重改善流道内部流动状态以降低振动源强度。通过激光测量技术确保导叶开度同步性,将

各导叶角度偏差控制在 $\pm 1^\circ$ 范围内,有效消除周向水流不均匀性。采用计算流体力学方法优化转轮室型线设计,在转轮进口段设置特殊导流曲面,使水流进入转轮前获得充分发展。针对尾水管涡带问题,在锥管段加装十字型稳流隔板,将涡带振动区负荷范围压缩至45–55%额定负荷。实施空化监测系统,实时跟踪转轮叶片背面压力分布,通过调整安装高程使临界空化系数降低15%。优化机组协联关系曲线,在80–100%负荷区间采用等开度线控制策略,避免部分负荷工况下的不稳定流动。定期进行流道表面抛光处理,保持过流部件表面粗糙度 $R_a \leq 3.2\mu\text{m}$,减少局部流动分离现象。运行参数显示,实施后转轮区域压力脉动幅值下降40%,有效抑制了水力激振力向灯泡头结构的传递。

2. 机械系统整治

机械系统整治重点在于提升转子系统运行稳定性。采用高精度激光对中仪实施轴线校正,确保发电机与水轮机轴线偏差不得超过 0.02mm/m ,径向跳动量控制在 0.05mm 以内。轴承间隙调整遵循动态刚度匹配原则,导轴承径向间隙严格限定在 $0.08\text{--}0.12\text{mm}$ 范围,组合轴承轴向间隙不大于 0.05mm 。连接结构紧固采用扭矩–转角法控制预紧力,关键法兰面接触斑点需达到80%以上接触率。转轮室密封间隙通过三维坐标测量仪进行圆周均布调整,单侧间隙偏差控制在平均值的 $\pm 10\%$ 以内。实施高速动平衡校正,在95%额定转速下将转子剩余不平衡量降至 $0.8\text{g}\cdot\text{m}$ 以下。振动监测数据显示,经系统整治后转频振动速度有效值下降60%,二倍频分量幅值降低45%,轴系运行稳定性显著提升。

3. 电磁系统改进

电磁系统改进旨在消除磁场不对称引发的振动问题。定子铁芯圆度通过激光跟踪仪检测修正,确保各向气隙偏差控制在 $\pm 2\%$ 设计值范围内,有效降低单边磁拉力影响。转子动态平衡在额定转速下实施多平面配重调整,将剩余不平衡量降至 $0.5\text{g}\cdot\text{m}$ 以下,消除电磁激振力的周期性波动。三相电流不平衡度采用负序电流补偿技术控制在3%阈值内,电压谐波畸变率通过滤波器装置限制在2.5%以下。定子绕组端部采用新型绑扎工艺,径向位移量控制在 0.3mm 以内,避免电磁振动引发绝缘磨损。铁芯叠压工艺优化使叠压系数提升至0.98,磁路均匀性显著改善。空载升压试验表明,改进后100Hz电磁振动分量降低55%,转子偏心引起的调制振动幅值下降40%,电磁力分布趋于均衡。

4. 结构动态特性强化

结构动态特性强化通过系统优化提升机组整体抗振能力。基于实验模态分析获取结构实际振动特性，采用拓扑优化方法重新设计加强肋布置方案，使结构一阶固有频率提升至125Hz以上，有效避开主要激振频率带。支撑环关键焊缝实施全熔透焊接工艺，配合超声波相控阵检测技术确保焊接质量，焊缝区域刚度系数提高30%。法兰连接面采用精密研磨工艺处理，平面度控制在0.02mm/m以内，接触压力分布均匀度达90%以上。流道内壁加装导流肋结构，改变水体-结构耦合振动特性，使流体附加质量效应降低25%。实施激光动态位移监测系统，实时捕捉结构振动模态变化，为动态特性评估提供数据支持。改进后结构阻尼比提升至0.08以上，共振峰值降低60%，在40-100Hz频段振动响应显著减弱。

四、灯泡贯流式水轮发电机组灯泡头异常振动处理注意事项

1. 综合治理原则

综合治理需建立多参数协同优化机制，将水力特性、机械状态、电磁参数与结构动态特性纳入统一分析框架。实施过程中采用分阶段验证方法，先通过空载试验确认机械系统状态，再结合负荷试验评估水力电磁耦合影响。数据采集系统需同步记录振动、压力脉动、电气参数等16项关键指标，建立多维故障特征数据库。调整策略遵循“先易后难”原则，优先处理可逆性调整项目，如导叶同步性校正和气隙均匀化处理，再开展结构性改造。每次调整后需进行不少于8小时的稳定运行观测，对比振动频谱特征变化趋势。建立处理效果评价矩阵，从振动幅度下降率、运行稳定性、经济性三个维度量化评估改进成效，确保各项措施形成正向叠加效应而非相互制约。

2. 安全控制要求

安全控制需严格执行振动限值管理标准，处理过程中实时监测振动速度有效值，确保水平方向不超过4.5mm/s、垂直方向不超过3.5mm/s的警戒阈值。采用多通道数据采集系统同步跟踪振动相位角变化，相位差突变超过30°时立即暂停作业并分析原因。轴承温度监控设置双重预警机制，滚动轴承温升速率超过3℃/h或绝对温度达到75℃时触发保护动作。关键调整阶段实施振动位移峰值限制，径向振动位移控制在150μm以内，

轴向振动不超过100μm。绝缘电阻测试贯穿处理全过程，定子绕组对地绝缘电阻值保持500MΩ以上。建立振动-温度-电气参数三维安全边界，任一参数超限立即启动保护程序，确保设备调整过程处于受控状态。

3. 参数匹配准则

参数匹配准则着重于系统各部件特性的协调优化。结构固有频率调整需避开主要激振频率的±15%范围，确保频率分离度大于20%以避免共振风险。轴承支承刚度与轴系临界转速匹配设计，使工作转速位于0.7-1.3倍一阶临界转速的安全区间之外。转轮密封间隙均匀度控制在±8%以内，与轴承间隙形成合理的刚度梯度分布。电磁气隙均匀度保持±2%设计值，与机械偏心量形成制约关系，确保单边磁拉力不超过转子重量的5%。流道水体固有频率通过导流板结构调整，使其与结构模态频率保持30%以上的间隔。转动部件残余不平衡量与轴承间隙的乘积需小于0.05g·mm，实现质量分布与支承特性的动态平衡。

结束语

灯泡头异常振动的治理需综合水力设计优化、机械调校与电气参数匹配，通过在线监测与定期维护可显著降低风险。未来，随着智能诊断技术的发展，实时振动分析与自适应控制将进一步提升机组稳定性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 汪如哲. 灯泡贯流式机组受油器烧瓦故障分析处理[J]. 电力安全技术, 2025, 27(01): 60-62.
- [3] 赵昕. 水电站水轮发电机组常见故障及处理措施探讨[J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(12): 43-45.
- [4] 黄水亮. 灯泡贯流式水轮发电机组灯泡头异常振动原因分析及处理[J]. 电力设备管理, 2024, (16): 166-168.
- [5] 孙涛. 灯泡贯流式水轮发电机组多物理场耦合特性分析[D]. 太原理工大学, 2023.
- [6] 冯国柱. 灯泡贯流式水轮发电机组的振动与振动区的界定[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(02): 5-8.