

态，再实行联轴器拆卸和磁极连接件分区分解。吊装时使用额定起重量 300t 以上的桥机，吊点受力偏差控制在 5% 以内，防止局部应力集中。拆解顺序由外向内逐级实行，防止结构失稳。现场布置红外测温、位移监测设备，对结构微动实行实时监测，保证拆解过程中振动值不大于 1.0mm/s。所有的拆卸部件按照编号分区存放，防止二次装配误差的累积^[3]。

5.2 轴系校正与动平衡修复技术措施

轴系校正以激光对中仪为主，对主轴同轴度实行多点测量，允许偏差控制在 0.02mm 以内。偏心量大于 0.08mm 的轴系，用轴承垫片厚度 0.05mm ~ 0.30mm 逐级修正。动平衡修复使用现场试重法和影响系数法相融合的方式，在转子半径方向上分布试重块，单点试重质量一般为 2kg ~ 10kg，借助振动响应的变化来计算不平衡量。校正后的残余不平衡量控制在 20g·cm 以内，振动幅值减少到 0.05mm 以下。整个修复过程要实行多轮迭代验证，每轮调整后运行 30min ~ 60min 实行数据采集，保证稳定性逐步恢复。

5.3 磨损部件修复与更换工艺控制要点

磨损部件修复主要是对轴颈、磁极键槽、轴承瓦面等受力、配合的部位实行修复。轴颈轻微磨损时，一般使用金属喷涂修复工艺实行表面恢复，喷涂层厚度控制在 0.2mm ~ 0.8mm 之间，然后精密磨削加工，使表面粗糙度到了 Ra0.8 以下，保证配合精度以及油膜稳定性。磁极连接部位有裂纹且深度大于 3mm 时，应实行局部更换，防止裂纹扩大造成结构失效。轴承瓦面修复主要靠着刮研调整，借助多次配研使接触斑点均匀分布，接触面积到了 75% 以上，然后增加承载均匀性^[4]。部件更换及装配时预紧力误差控制在 ±5% 以内，配合热装配工艺，装配温差控制在 80℃ ~ 120℃ 之间，保证装配紧固可靠。所有修复及更换完成后必须实行二次无损检测复核，保证缺陷全部消除，保证整体结构恢复到设计性能要求。图 1 为水轮发电机转子故障机械检修流程图。

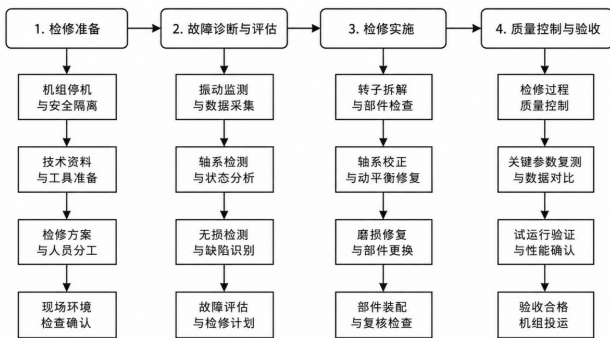


图 1 水轮发电机转子故障机械检修流程图

6 检修质量控制与运行可靠性保障措施

6.1 检修过程标准化与作业规范控制

检修过程建立分级作业标准体系，把拆检、修复、装配环节纳入统一控制流程。各工序设置质量控制点 12 ~ 18

个，核心节点实行双人复核制度。作业误差控制尺寸类偏差不超过 0.02mm，紧固力矩误差控制在 ±5% 以内。现场作业环境温度控制在 15℃ ~ 30℃ 之间，湿度控制在 40% ~ 70% 之间，以减小热变形的影响。所有的检修记录及时录入到管理系统中，形成可追溯的数据链。凭借标准化作业流程控制，使人为误差发生率减少约 30% ~ 45%，增加检修一致性。

6.2 关键参数复测与试运行验证机制

检修完毕后要对转子核心参数实行多方面复测，包含振动值，轴位移，温升以及电气参数等。振动速度控制在 4.5mm/s 以下，轴向位移不超过 0.15mm，轴承温度在 65℃ ~ 75℃ 之间。试运行分阶段实行，低负荷运行 30% 额定功率持续 2 小时，中负荷运行 60% 持续 4 小时，高负荷运行至额定工况持续 6 小时以上。在各个阶段采集不少于 500 组数据实行对比分析，保证参数波动范围在 ±10% 以内。借助试运行来检验轴系稳定性以及动平衡恢复情况，看是否到了长期运行的要求。

6.3 设备长期运行状态跟踪与维护策略

设备投运后建立长期状态跟踪体系，用在线监测系统持续采集振动、温度、位移数据，采样周期为 1s ~ 5s。对核心参数设置三级预警，振动值到了 5.5mm/s 时为关注状态，到了 7.1mm/s 时为停机保护。每运行 5000 小时做一次融合状态评定，对轴系磨损趋势做预测分析。维护方针采取状态检修以及定期检修相结合的方式，根据运行数据动态调节检修周期。建立寿命预测模型可以将突发故障率减少 20% ~ 35%，大大提高机组长期运行可靠性^[5]。

7 结语

总的来说，15W 水轮发电机组转子机械故障有着类型繁多、耦合性强、隐蔽性高等特点，运行状态受结构完整性、受力均衡程度影响。凭借对典型故障机理的分析，可以清楚地知道不平衡振动、轴系偏心、连接松动等问题的发展过程。在检测手段及检修技术的共同作用下，可以对故障实行准确的识别并实行有效的修复。按照标准化检修流程以及运行状态跟踪机制，可以大大提高机组的稳定性、抗风险能力，给水电设备长期安全运行给予可靠的保障。

参考文献

- [1] 杨晓玲.基于振动模态分析的水轮发电机转子绕组松动故障识别方法[J].国外电子测量技术,2025,44(12):336-342.
- [2] 徐博为,任雪峰.水轮发电机转子绝缘能力降低原因与处理研究[J].中国科技纵横,2025,(20):100-102.
- [3] 赵维健.水轮发电机转子匝间短路故障检测及处理技术研究[J].电工技术,2025,(19):120-121+126.
- [4] 覃广.水轮发电机励磁系统转子接地故障的诊断与保护优化[J].家电维修,2025,(10):104-106.
- [5] 朱石炼.一起水轮发电机转子动态一点接地故障原因分析与处理[J].水电站机电技术,2025,48(08):131-133.

Maintenance and Optimization of Wear Issues in Hydrogen Generator Bearing Systems

Haifeng Tang

Hydropower Plant of the Yiluan Project Administration Bureau, Haihe River Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Tangshan, Hebei, 064310, China

Abstract

Aiming at the HL220-L3-560(SF150-6012800)hydrogenerator unit,which is prone to aggravated bearing wear,reduced oil film stability,and abnormal vibration and temperature rise during long-term operation,this paper systematically analyzes its operating mechanism,condition monitoring and fault diagnosis,maintenance processes,and optimization control strategies.Considering the characteristics of high rotational speed and complex hydraulic excitation coupling under rated operating conditions,the formation mechanism of bearing wear and its impact path on unit stability are emphasized.On this basis,vibration monitoring,online temperature and oil quality monitoring,and non-destructive testing technologies are integrated to improve fault identification accuracy.Meanwhile,bearing wear mitigation strategies are proposed from the perspectives of operational load control and lubrication system optimization,providing technical support for improving unit reliability and extending equipment service life.

Keywords

hydrogenerator unit; bearing wear; fault diagnosis; maintenance optimization

水轮发电机轴承系统磨损问题检修与优化

唐海峰

水利部海河水利委员会引滦工程管理局水力发电厂, 中国·河北 唐山 064310

摘要

针对HL220-L3-560(SF150-6012800)水轮发电机组轴承系统在长时间运行过程中易出现磨损激化、油膜稳定性下降、振动温升异常等问题,从运行机理、检测诊断、检修工艺、改良控制四个方面实行详细剖析。根据机组额定工况下高转速和繁复水力激振耦合作用的特点,主要研究轴承磨损形成机理以及它对机组稳定性的影响途径。在此基础上,使用振动监测、温度、油质在线检测、无损检测技术来增加故障识别的准确性。从运行负荷控制、润滑系统优化等角度提出轴承磨损控制措施,为增加机组运行可靠性、延长设备寿命给予技术支持。

关键词

水轮发电机组; 轴承磨损; 故障诊断; 检修优化

1 引言

水轮发电机组是水电系统的主要设备,它的运行稳定状况直接影响到电力系统的安全和能力。轴承系统是支撑转子、传递载荷的重要部件,在长期高负荷运行条件下,轴承系统常处在繁复的受力、水力扰动耦合作用的环境中,很容易出现不同程度的磨损问题。HL220-L3-560(SF150-6012800)型号机组在额定转速及大流量工况下运行时,轴承油膜状态对稳定性影响很大,润滑条件一有波动或者装配精度下降,就会引起振动异常以及温升问题。目前工程实践中,轴承故障有着隐蔽性强、发展速度快、诱因多样的特点,

传统的靠着停机检修的方式不能及时发现早期的异常,造成检修成本及停机损失的增加。所以有必要融合典型机组运行特点,对轴承磨损机理及检修改良途径实行整合和分析,然后增加设备运行安全水平。

2 HL220-L3-560(SF150-6012800)水轮发电机组轴承系统磨损机理以及运行特性分析

2.1 机组结构组成与轴承系统受力传递路径

HL220-L3-560(SF150-6012800)水轮发电机组由水轮机转轮、主轴、发电机转子、定子、推力轴承和导轴承系统组成,轴承系统在整体结构中起到转子支撑以及稳定定位的作用。机组在运行时,水轮机端借助水力作用带动主轴转动,机械能逐级传递到发电机转子上,形成连续的能量转换链条。推力轴承主要承受轴向水推力和转子自重叠加的荷载,导轴承用来约束径向位移,保持轴系同心度。额定

【作者简介】唐海峰(1978-),男,中国河北唐山人,技师,从事水轮发电机机械检修研究。

150000kW 工况下,转速为对应同步运行状态,轴系受力表现周期性波动特征,水轮机水头 33.5m、流量 277m³/s 条件下产生的水力脉动叠加在机械载荷上,使轴承接触面产生冗杂的应力分布,长期运行容易引起局部疲劳磨损及边界润滑状态。

2.2 额定工况下转速、负荷与水力激振耦合作用分析

机组在额定工况下运行时,转速和电磁负荷处于稳定匹配状态,但是水力系统依然存在不可避免的压力脉动以及尾水涡带现象。HL220-L3-560 机组在 223 转/分时,水流经过导叶及转轮区域产生周期性压力波动,频率成分一般在 0.5 倍到 3 倍转频之间,同机械转动频率叠加形成耦合振源。负荷变化引起电磁力矩波动,使轴系扭振以及弯振相互耦合,振动幅值在负荷突变时可增加 20% 到 35%。水力激振在低负荷区更加明显,局部压力脉动幅值可达额定工况的 1.2 倍以上,对轴承油膜稳定性造成扰动,使接触面间隙发生周期性变化,然后加速磨损进程并诱发运行稳定性下降。

2.3 轴承润滑条件与油膜稳定性影响机制

轴承润滑系统依靠压力供油形成连续油膜,减小金属直接接触,分散载荷。HL220-L3-560 机组轴承润滑油一般保持在 0.2MPa 到 0.5MPa 供油压力,油温控制在 35℃ 到 45℃ 之间,保证黏度稳定。当润滑油清洁度下降到 NAS 8 级以上时,固体颗粒会破坏油膜的连续性,造成局部出现边界润滑甚至干摩擦。油膜厚度一般在 20 μm 到 60 μm 之间,转速波动或者载荷突然变化时,油膜厚度会下降 30%,造成承载能力不足。润滑油氧化、含水量大于 0.1% 或者黏度指数下降都会使油膜承载能力下降,造成轴承温升加快、磨损加重,长期作用下形成擦伤、点蚀等典型失效形态^[1]。

3 HL220-L3-560 水轮发电机组轴承系统磨损检测以及诊断技术应用

3.1 振动监测在轴承状态评估中的应用

振动监测用多通道加速度和速度传感器布置在推力轴承座和导轴承壳体上,采集 0Hz 到 10kHz 频率范围内的信号来评定轴承状态。现场系统一般使用采样频率 25.6kHz 以上的在线监测装置,对转频 223rpm 对应 3.72Hz 基频及其倍频成分实行频谱分析。当轴承正常运转时,振动速度有效值一般不大于 2.8mm/s,大于 4.5mm/s 就进入预警区间。利用快速傅里叶变换可以识别出 1×、2× 以及高频冲击成分,轴承磨损的典型特征就是 8kHz 附近宽频带能量增强。某运行数据中导轴承径向振动由 2.1mm/s 上升到 5.6mm/s,3 倍频幅值增大 40%,判定存在油膜不稳及局部磨损。融合包络解调技术可以得到冲击间隔频率,进而识别出滚动体或者滑动面的缺陷。振动烈度变化率大于 15%/周时一般为磨损加速期,用趋势分析模型可以实现早期故障识别和减少停机风险。

3.2 温度与油质在线监测技术分析

温度监测系统在轴瓦进口口、回油口以及轴承金属层上布置 PT100 铂电阻传感器,实现多点温度采集。正

常运行时推力轴承瓦温一般保持在 45℃ 到 60℃ 之间,超过 65℃ 就进入异常区间,超过 70℃ 就有强制停机的风险。HL220-L3-560 机组运行数据中,润滑油流量下降 10% 时,瓦温平均上升约 6℃ 到 8℃,有明显的线性相关性。油质监测使用在线颗粒计数器和介电常数分析仪,NAS 等级由 6 级恶化到 9 级时,磨损速率增加约 1.8 倍,水分含量超过 0.08% 会大大降低油膜稳定性。铁谱分析结果表明,当铁磁颗粒浓度大于 120ppm 时,轴承就进入了中度磨损阶段。融合红外测温与油液光谱分析,可以建立温度—污染度耦合模型,对轴承健康状态实行融合评分。当温升速率大于 1.5℃/h 并且颗粒数异常增多的时候,就可以判断润滑系统有失效的偏好,继而实现提前预警^[2]。

3.3 停机检修与无损检测手段协同诊断方法

停机检修阶段对分解后的轴承结构实行直接检测,用超声波探伤、渗透检测、磁粉检测等方法实行多维度评定。超声波检测频率一般选用 2MHz 到 5MHz 探头,对轴瓦内部裂纹和剥落缺陷实行定位,缺陷深度识别精度可以到了 ±0.5mm。磁粉检测可以发现表面及近表面的裂纹,当裂纹长度大于 1mm 时就需要实行修复处理。在某次检修中发现推力轴承局部点蚀面积占接触面的 12%,磨损深度最大为 0.18mm。配合三坐标测量仪对轴系同轴度实行检测,同轴偏差控制在 0.05mm 以内为合格范围,超过 0.08mm 则需要重新调整。油路系统用压力衰减测试来判断堵塞情况,压降超过额定值 15% 就存在油路异常。协同诊断时把振动历史数据、温度趋势同无损检测结果融合起来,创建故障一致性判定模型,使得检修决策的准确率增加到 90% 以上,继而削减误判以及漏检的危险。

4 HL220-L3-560 水轮发电机组轴承系统磨损检修工艺以及现场处理方法

4.1 轴承拆检流程与磨损面修复技术

轴承拆检应在机组完全停机并做好锁定措施之后实行,依次拆除上机架、轴瓦压盖、油封组件,对推力轴承和导轴承实行分体吊装。拆检时重点记录轴瓦接触斑点分布、磨损深度、表面划痕形态,常用塞尺、千分表测量间隙变化情况。在 HL220-L3-560 机组中,轴瓦磨损超过 0.15mm 时需实行修复处理。磨损面修复主要使用合金刮研及巴氏合金补焊工艺,控制接触角在 60% ~ 80% 之间来增加承载均匀性。对局部点蚀区域用微量补焊后精密刮研,使表面粗糙度恢复到 Ra0.8 以下。修复完成后用着色检测验证接触均匀性,实行模拟负荷试验确认承载稳定性,保证重新装配后的运行可靠性。

4.2 润滑油系统清洁与油路优化处理

润滑油系统清洁时要对油箱、过滤器、油管路实行整体循环冲洗,用高压过滤装置把油液清洁度增加到 NAS 6 级以内。HL220-L3-560 机组油系统容积大,冲洗时间一般要 24 小时以上,分段取样检测颗粒含量变化。当油液中粒径大于 10 μm 的颗粒数量少于每毫升 1000 个时认为到了标

准。油路改良主要是针对局部压降过大、流量分配不均等问题,凭借改变节流阀开度、管径布局来改良供油均匀性。过滤系统使用双联切换结构,过滤精度增加到 $10\mu\text{m}$ 以下可以大大降低磨损风险。油冷却器清洗后热交换能力增加约15%,油温波动范围控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内,然后增加油膜稳定性,延长轴承使用寿命^[3]。

4.3 轴系对中调整与装配精度控制措施

轴系对中调整用激光对中仪以及百分表联合测量,分段校正发电机和水轮机轴线偏差。HL220-L3-560 机组要求径向偏差控制在 0.03mm 以内,思路偏差不超过 $0.02\text{mm}/\text{m}$ 。在调整过程中凭借调整垫片厚度以及基础螺栓预紧力来实现轴系位置的调整。装配精度控制重点在轴瓦间隙和接触角控制,推力轴承间隙一般控制在 0.25mm 到 0.35mm 之间。装配完成后做盘车试验,测量阻力矩波动情况,若波动幅度超过10%则重新调整。借助控制轴系同轴度及轴承间隙的一致性,可以减少运行过程中附加载荷,减小磨损速率,增加整体运行平稳性,图1为HL220-L3-560水轮发电机组轴承系统检修工艺及处理方法解析。



图1 HL220-L3-560水轮发电机组轴承系统检修工艺及处理方法解析

5 HL220-L3-560水轮发电机组轴承系统磨损控制与运行优化策略

5.1 运行负荷调节与工况稳定性控制方法

运行负荷调节借助协调水轮机导叶开度及发电机励磁系统来实现功率的平稳输出,在HL220-L3-560机组中负荷变化速率控制在额定功率的 $3\%/ \text{min}$ 以内,以减小轴系冲击载荷。负荷突变会引起水力扭矩波动幅度增大25%左右,造成轴承受力不均。凭借改良调速器PID参数,可以将转速波动控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,增加工况稳定性。在低负荷运行阶段,保持最低水头能力区间运行,可以减小尾水涡带强度。负荷稳定性增加之后,轴承振动幅值可以下降15%到20%,温升速率明显减缓,磨损累积速度变慢,运行周期变长^[4]。

5.2 润滑系统参数优化与油膜稳定保障措施

润滑系统优化主要是油压、油温、流量三者共同控制。

HL220-L3-560机组运行时油压应保持在 0.3MPa 左右,油温控制在 40°C 左右,波动范围不超过 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。使用变频油泵可以实现流量的自适应调节,使供油量伴随负荷的变化而变化。油液黏度指数保持在90以上可以增加油膜的承载能力。当油膜厚度小于 $25\mu\text{m}$ 时进入风险区间,增加供油压力可以恢复到稳定状态。改良冷却系统换热效率后油温下降约 5°C ,油膜剪切稳定性增加约12%。在线脱水、脱气装置的加入,可使水分含量控制在0.05%以下,大大降低油膜破裂的概率。

5.3 轴承结构材料与间隙参数优化方向

轴承结构改良主要是从材料耐磨性、热稳定性两方面入手,HL220-L3-560机组可以使用巴氏合金改良材料或者复合涂层结构,增加抗疲劳性能约20%。在材料表面增加微沟槽结构可以改良润滑油的分布均匀性,减少局部干摩擦的风险。间隙参数改良时,推力轴承和导轴承的间隙要按照运行工况动态调节,适当增大 0.02mm 至 0.05mm 的补偿间隙可以增加抗冲击能力。借助有限元分析可知,合理间隙调整可以将接触应力峰值减少约18%。改良后的结构设计使轴承温升更加均匀,磨损分布趋于平缓,然后增加整体运行寿命和稳定性^[5]。

6 结语

根据上述内容,HL220-L3-560水轮发电机组轴承系统磨损问题有着多因素耦合、渐进发展的典型特征,形成与水力激振、负荷波动、润滑条件变化有关。建立振动、温度、油质三类监测系统,可以对轴承运行状态实行动态识别、趋势判断,给早期故障预警提供数据支持。检修方面轴承拆检修、油路清洁、轴系对中调整等工艺措施可以恢复设备性能。运行改良上,靠着负荷控制同润滑参数的协同调节,可以明显减小磨损速率,改良机组整体稳定性以及运行可靠性,对保证水电机组长久安全运行有着十分重要的工程意义。

参考文献

- [1] 张黎,刘焯,张芯其,贺德荣,曹泽昊.某大型水电站发电机下导轴承瓦温异常分析与处理[J].云南水力发电,2026,42(05):106-108+165.
- [2] 贺世杰,蒋琳,陈朋.无人值守水轮发电机组轴承温度异常在线监测[J].电器工业,2026,(05):82-86.
- [3] 郭文峰,寸文全,陈才龙,罗远旺,陈楠,杨昌健,卢盈宇,安学利.巨型水轮发电机组暂态过程的稳定性试验与分析[J].水电站机电技术,2026,49(01):10-14.
- [4] 孟阳君,李毅,周定方.某大型水电站水轮发电机组轴承油混水处理及过程思考[N].重庆科技报,2026-01-06(006).
- [5] 支聪,崔岱恒.高转速水轮发电机组轴承油雾治理关键技术与配套装备[J].人民黄河,2025,47(S2):156-157.