

抽水蓄能电站发电电动机常见机械故障的维护与检修

吕 优 康 虎

陕西镇安抽水蓄能有限公司 陕西 西安 710000

摘 要：抽水蓄能电站发电电动机面临多种机械故障，包括转子、定子、轴承及附属设备故障。为确保其稳定运行，需采取日常保养与预防性维护措施，如定期清理、润滑及设置合理检修周期。同时，应用状态检修技术实时观察设备参数，预测潜在故障。故障诊断基于振动、油液分析及先进模型，确保快速定位。故障修复需针对部件特性采用适当方法，以提升电站整体运行效率和安全性。

关键词：抽水蓄能电站；发电电动机；常见机械故障；维护；检修

引言：抽水蓄能电站作为电网调峰填谷的重要设施，其发电电动机的运行状态直接影响电力供应的稳定性。然而，发电电动机在运行过程中常面临多种机械故障，如转子失衡、定子绝缘老化、轴承磨损等，这些故障不仅影响电站效能，还可能对电网安全构成威胁。因此，对发电电动机的常见机械故障进行深入分析与有效维护检修，是保障电站稳定运行的关键所在。

1 抽水蓄能电站发电电动机概述

1.1 发电电动机的基本结构

1.1.1 关键部件介绍

定子是发电电动机的固定部分，由定子铁芯、绕组和机座组成，铁芯叠片设计可减少涡流损耗，绕组通入电流后产生旋转磁场。转子为旋转部件，励磁绕组通直流电形成磁极，与定子磁场相互作用实现能量转换。主轴连接转子与水轮机/水泵，传递扭矩并保证旋转精度。推力轴承承担机组转动部分的轴向载荷，同时减少摩擦，确保运行稳定，其性能直接影响机组的安全与效率。

1.1.2 立式与卧式结构差异

立式发电电动机高度大、占地面积小，主轴垂直布置，推力轴承位于转子下方或上方，适应高水头大容量机组，安装需精准控制垂直度。卧式发电电动机主轴水平布置，结构紧凑，检修方便，推力轴承负荷较小，但占地面积大，多用于中低水头、小容量场景，两者在承重方式和空间适配性上差异显著。

1.2 发电电动机的工作原理

(1) 状态转换机制。发电状态时，水轮机驱动转子旋转，切割定子磁场产生电能；水泵状态时，电网供电使电机运行于电动状态，转子带动水泵抽水蓄能。转换通过换相开关改变电流方向，配合导水机构调整水流，实现从发电到抽水或反之的快速切换，满足电网调峰需求。(2) 双向旋转原理及机械特性要求。双向旋转依赖

可逆设计，正转发电、反转抽水（或反之），要求转子绕组和铁芯能承受双向磁场力。机械特性上，需具备高刚度抵抗双向扭矩冲击，耐磨轴承适应正反转向摩擦，同时转子动平衡精度高，避免双向旋转时产生过大振动，确保两种工况下的稳定运行。

2 抽水蓄能电站发电电动机常见机械故障类型

2.1 转子故障

(1) 磁极引出线故障多表现为接头过热变色、绝缘层老化开裂，频繁启停产生的振动易导致接线端子松动，严重时出现断线，引发励磁电流波动；磁极连接线常因安装时扭矩不均，运行中受电磁力反复作用出现绝缘磨损，形成局部放电通道，甚至发生相间短路。(2) 磁极铁芯故障包括叠片间绝缘损坏形成片间短路，运行时局部过热使铁芯变色，叠片松动则引发异常振动；磁极绕组因双向旋转产生交变应力，导致导线疲劳变形，匝间绝缘在冷热循环中龟裂，进而出现匝间短路，表现为绕组温度异常升高^[1]。(3) 极间支撑件受转子离心力和电磁力联合作用，易出现螺栓松动、结构变形，极端情况下发生断裂，导致磁极偏移；阻尼绕组焊接点在频繁工况转换中脱开，或因涡流效应产生过热烧损，造成机组动态调节能力下降，甩负荷时出现振荡。

2.2 定子故障

(1) 定子铁芯因叠压不实出现松动，运行中产生电磁噪声，片间短路则使铁损增大，铁芯局部温度超过允许值；定子绕组绝缘受机械振动磨损、潮湿环境侵蚀，出现绝缘电阻降低、介损值超标，严重时绝缘击穿形成接地或相间短路。(2) 定子绕组固定结构（如绑扎带、支撑块）因长期振动疲劳失效，导致绕组端部摆动幅度增大，与铁芯碰撞产生磨损；汇流排接头螺栓松动引发接触过热，伸缩节因温度变化产生应力裂纹，造成导电截面减小，出现局部发热现象。

2.3 轴承故障

(1) 推力轴承轴瓦因安装偏差导致受力不均, 出现局部磨损、脱胎, 油膜稳定性被破坏后引发振动; 导轴承间隙因磨损增大, 转子摆度超标, 轴颈与轴瓦摩擦产生异响, 严重时出现划伤、沟槽。(2) 轴承润滑系统油路堵塞导致供油不足, 润滑油因氧化、污染出现黏度异常, 油膜承载能力下降; 密封件老化失效引发漏油, 同时外界杂质侵入油系统, 加剧轴承滚子与滚道的磨粒磨损。

2.4 附属设备故障

(1) 机械制动装置闸瓦磨损量不均, 制动时受力失衡导致机组摆振, 制动间隙过大使制动时间延长; 液压管路泄漏、制动阀卡涩造成压力不足, 出现制动失灵, 紧急停机时无法有效制动。(2) 冷却系统管道结垢、滤网堵塞导致冷却水量不足, 冷却器换热效率下降使出水温度超标; 水泵叶轮磨损、电机故障造成流量衰减, 温控阀失灵则无法根据机组温度自动调节, 影响散热效果。

3 抽水蓄能电站发电电动机机械故障成因分析

3.1 设计制造缺陷

(1) 结构设计不合理表现为关键部件受力匹配失衡, 如极间支撑未考虑双向旋转的交变应力, 导致运行中频繁断裂; 定子绕组固定结构刚性过剩, 无法缓冲振动, 引发绝缘磨损。部分机组通风路径存在盲区, 局部散热不足, 加速部件老化。(2) 制造工艺不良体现在铁芯叠片精度差, 片间间隙超标增加涡流损耗; 绕组绕制时导线排列杂乱, 匝间应力集中导致绝缘开裂。焊接缺陷如磁极连接线虚接, 受振动影响形成接触不良, 加剧局部发热; 轴承座加工平面度偏差, 造成安装后受力不均, 诱发振动故障。

3.2 运行维护不当

(1) 润滑不良因润滑油型号错误或更换延迟, 油质劣化后黏度下降, 油膜稳定性破坏。油道清理不彻底, 杂质与新油混合形成磨粒, 加速轴承磨损。加油量失衡, 过多导致搅拌发热, 过少则油膜残缺, 均引发轴承温度异常。(2) 冷却系统维护不足使滤网堵塞, 冷却水量减少; 散热片积灰降低换热效率, 定子温度偏高。老化管路未及时更换导致渗漏, 温控装置校准滞后, 无法适配工况调节冷却强度, 长期过热加速绝缘与部件疲劳^[2]。

3.3 外部因素影响

(1) 水质不良引发冷却系统腐蚀, 循环水高含氧量造成管道电化学腐蚀; 钙镁离子形成水垢, 0.3mm 厚水垢可使热阻增加 50%。高氯离子破坏不锈钢钝化膜, 导致点蚀穿孔。(2) 异物侵入多源于检修遗落工具或过滤失效, 砂石、金属碎屑进入机组, 造成定转子扫膛、绕

组刮伤; 轴承系统进入颗粒引发磨粒磨损, 形成凹坑, 严重时导致轴承卡死。通风系统吸入的昆虫、灰尘也会堵塞风道, 降低散热效率。

4 抽水蓄能电站发电电动机机械故障的维护与检修措施

4.1 日常保养与预防性维护

(1) 设备清理、润滑等工作的重要性。设备清理是保障机组高效运行的基础环节。发电电动机运行过程中, 定子、转子表面易堆积灰尘、油污及金属碎屑, 这些杂质不仅会降低散热效率, 导致设备局部过热, 还可能因粉尘导电性引发绝缘故障。定期清理可避免杂质侵蚀绝缘材料, 维持铁芯与绕组的绝缘性能。润滑工作对轴承系统至关重要, 推力轴承和导轴承的润滑油脂能形成稳定油膜, 减少金属部件直接摩擦, 降低磨损速率。若润滑不足或油脂劣化, 会导致轴承温度骤升、振动加剧, 甚至引发烧瓦事故, 因此需严格按照规程加注适配型号的润滑剂, 并及时更换变质油脂。(2) 设置合理的检修周期与计划。检修周期需结合机组运行强度、工况转换频率及设备老化趋势综合制定。对于每日启停3次以上的调峰机组, 推力轴承、冷却系统等易损部件的检修周期应缩短至4个月; 定子绕组、转子磁极等结构件可每1.5年进行一次全面检测。检修计划需明确分级检修内容: 日常巡检侧重温度、振动等参数监测; 月度检修包含润滑系统检查与清洁; 年度大修则涉及铁芯紧固、绕组绝缘测试等深度维护。同时, 计划制定需预留20%的应急检修时间, 应对突发故障, 且需与电网调度协调, 避开用电高峰时段, 减少对电力供应的影响^[3]。

4.2 状态检修技术的应用

(1) 实时观察设备参数变化, 预测潜在故障。通过部署在关键部位的传感器, 实时采集振动幅值、轴承温度、定子绝缘电阻等参数。当振动值超过2.8mm/s (国家标准阈值)、轴承温度升至65℃以上, 或绝缘电阻低于100MΩ时, 系统自动触发预警。结合参数变化趋势可预判故障类型: 如振动1倍频分量持续增大, 预示转子不平衡; 温度骤升伴随绝缘下降, 可能为绕组短路。通过建立参数变化速率模型, 当绝缘电阻每周下降超过8%时, 可提前72小时发出停机检修建议。(2) 状态监测系统的构建与运行。系统由三层架构组成: 感知层部署16路振动传感器 (采样率10kHz)、8路红外温度传感器及绝缘监测模块, 数据经屏蔽线缆传输; 传输层采用工业以太网与5G备用链路, 确保数据实时性与可靠性; 应用层搭载故障诊断平台, 具备数据存储、趋势分析及可视化功能。运行中需每月校准传感器精度 (误差 ≤ ±0.5%),

每季度进行抗电磁干扰测试（在1000V/m电磁场下数据偏差 $\leq 1\%$ ）。系统通过边缘计算节点实现本地化分析，重要数据上传云端，支持多终端访问与远程诊断。

4.3 故障诊断与定位方法

（1）基于振动分析、油液分析等方法的故障诊断。振动分析通过频谱分析识别故障特征：转子磁极松动表现为2倍频振动幅值异常；轴承滚道磨损伴随高频冲击脉冲（500-2000Hz）。油液分析采用铁谱仪检测磨粒：当铁元素浓度超过50ppm且出现磨削磨粒，提示轴承严重磨损；铜颗粒占比超30%，可能为定子绕组烧损。两种方法协同应用：若振动高频分量增大且油液中铜粒增多，可定位为定子与转子扫膛故障。此外，红外热成像可快速识别局部过热区域，辅助判断绕组接头松动或铁芯短路位置。（2）利用先进的故障诊断模型（如POA-RVM模型）提高诊断准确性。POA-RVM模型（鸮鹗算法优化相关向量机）通过机器学习提升诊断精度。模型输入振动、温度、油液等12维特征参数，经POA算法优化核函数参数，解决传统模型对微弱故障识别率低的问题。训练数据集包含1000+历史故障案例，模型对转子线圈变形、定子绝缘老化等隐性故障的识别准确率达96.3%，较传统BP神经网络提升18.7%。实际应用中，模型实时接收监测数据，10秒内输出故障类型、位置及置信度（ $\geq 90\%$ 时触发报警），为快速定位提供量化依据^[4]。

4.4 故障修复与处理技术

（1）转子、定子、轴承等部件的修复方法。转子修复：磁极引出线断裂采用银基钎焊修复，焊接后进行1.5倍额定电流耐压测试；线圈移位需拆除松动固定件，重新定位后用环氧玻璃丝带绑扎，固化温度控制在 $80 \pm 5^\circ\text{C}$ 。定子修复：铁芯短路需拆除受损叠片，重新涂刷0.2mm厚绝缘漆，叠压后片间电阻需 $\geq 500\text{M}\Omega$ ；绕组松脱采用无纬带缠绕固定，绑扎张力控制在20-

25N，浸漆后进行24小时固化处理。轴承修复：推力轴瓦磨损采用精密刮研，确保每平方厘米接触点 ≥ 3 个；导轴承间隙超标时，更换巴氏合金轴套，间隙调整至 $0.2 \pm 0.02\text{mm}$ 。（2）冷却系统、机械制动装置的故障处理。冷却系统故障处理：管道堵塞采用3MPa高压水冲洗，顽固水垢用5%柠檬酸溶液循环清洗，处理后需进行0.8MPa水压试验保压30分钟无泄漏；冷却水泵效率下降时，更换陶瓷轴承叶轮，确保流量恢复至设计值的105%以上。机械制动装置处理：闸瓦磨损不均需重新研磨，保证接触面 $\geq 80\%$ ，制动间隙调整至 $1.5 \pm 0.2\text{mm}$ ；液压系统泄漏时，更换氟橡胶密封件并排气，确保制动响应时间 ≤ 0.5 秒。对于反复出现的冷却不足问题，可升级为板式换热器，换热效率提升40%以上。

结束语

综上所述，抽水蓄能电站发电电动机的机械故障维护与检修是确保其高效、安全运行的基石。通过实施日常保养、预防性维护、状态监测及精准故障诊断与修复，能够有效预防并减少故障发生，提升机组可靠性和使用寿命。未来，随着智能监测与诊断技术的不断发展，抽水蓄能电站发电电动机的维护与检修将更加高效、精准，为电网稳定供电提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1]王瑞栋.浅谈抽水蓄能电站状态检修[J].青年时代,2020,(04):57-58.
- [2]伟俭英.浅谈水电站机电设备维护与检修管理措施[J].大科技,2021,(12):126-127.
- [3]黄致尊.水电站机电设备维护检修管理[J].科技创新与应用,2020,(25):240-241.
- [4]陈日光.水电站机电设备维护检修管理探析[J].现代商贸工业,2022,(12):187-188.