

汽轮机油动机、伺服阀故障分析及维护保养

张学涛

汕头华电发电有限公司 广东汕头 515000

摘要: 汽轮机油动机与伺服阀的故障分析及维护保养是保障汽轮机调速系统安全、稳定运行的核心环节。油动机作为执行机构, 伺服阀作为电液转换关键部件, 其可靠性直接影响机组的控制精度与安全性。汽轮机油动机和伺服阀是DEH控制系统中的核心执行部件, 其运行稳定性直接影响汽轮机的安全性与调节精度。常见故障多由油质不良、信号干扰、机械磨损及安装问题引发, 需通过系统化维护与精准排查保障可靠性。

关键词: 汽轮机油动机; 伺服阀故障; 维护保养

油动机和伺服阀是汽轮机DEH系统中的关键执行部件, 其运行稳定性直接影响机组的安全性与调节精度。

一、油动机常见故障分析

1. 调节系统摆动或抖动

油动机是将控制信号转换为机械动作的关键液压装置, 其常见故障主要表现为调节系统摆动或阀门异常动作。调节系统摆动, 调节系统摆动指汽轮机转速或阀门开度出现非受控的周期性波动, 严重影响并网与负荷稳定。信号干扰与接地不良: 位移传感器(LVDT)受到干扰, 或控制柜内屏蔽接地不当、电源地与信号地未分离, 导致控制信号含有交流分量, 引发油动机摆动。伺服阀故障, 伺服阀因油质不良导致内部机械部件卡涩, 无法准确执行电信号指令, 轻则引起摆动, 重则导致停机^[1]。阀门特性问题, 阀门在特定工作点因蒸汽力作用发生“突跳”, 导致流量突变, DEH为维持稳定而反复调节, 形成振荡。机械连接松动, 油动机与阀门间的连接部件磨损, 产生自由行程, 在蒸汽力作用下阀门发生晃动。LVDT故障, 位移传感器插头松动、线圈开路或短路, 导致阀位反馈信号失真, 控制系统无法稳定定位。控制卡件问题, 阀门控制卡(如VCC卡)内部故障、LVDT频率接近产生共振或增益参数设置不合理。其他典型故障, 油动机卡涩, 长期高温运行导致EH油裂解碳化、密封件老化, 或活塞杆与油缸间因杂质堆积产生阻力, 影响动作灵活性。油液泄漏, 密封件失效或连接部位松动导致抗燃油泄漏, 影响系统压力与环保安全。响应迟缓或拒动, 滤网堵塞、油路不畅、伺服阀响应性能下降或弹簧失效, 导致油动机动作速度达不到要求或无法动作。伺服阀作为电液转换的核心元件, 其故障常直接表现为油

动机控制失常。卡涩与堵塞, 这是最常见的故障, 主要根源在于油质不合格。抗燃油中的固体颗粒污染物、水分或高温裂解产生的胶状物会堵塞伺服阀精密的喷嘴、节流孔或使阀芯卡滞, 导致其输出流量不稳定或完全失效。零漂与性能衰减, 伺服阀内部零件磨损、磁性元件性能变化或受外部振动影响, 可能导致其零位(无输入信号时的输出)发生偏移, 或动态响应特性(如频率响应、线性度)下降, 造成阀门控制出现静态误差或动态振荡。线圈与电气故障, 伺服阀驱动线圈短路、开路或接线松动, 会导致其接收不到完整的控制指令。冗余设计的双线圈伺服阀, 若一组线圈故障, 虽仍可工作, 但可能因负载变化而降低抗干扰能力, 在特定工况下引发阀门抖动。

2. 油动机响应迟缓或不动作

油动机响应迟缓或不动作是汽轮机调节系统中常见的关键故障, 直接影响机组的控制精度与运行安全。该问题通常由液压系统、控制信号和机械传动三方面原因引起, 需系统性排查。常见故障原因分析, 液压系统问题, 油压不足或波动, EH油系统压力低于设定值(如低于9.5MPa), 会导致油动机推力不足, 动作迟缓。油液污染, 油中颗粒物($>5\mu\text{m}$)或水分超标, 易造成伺服阀、快速卸荷阀卡涩, 影响油路通畅。油温异常, 油温过高($>60^\circ\text{C}$)会降低油膜强度, 加剧内泄漏; 油温过低($<20^\circ\text{C}$)则粘度增大, 流动性差。内/外泄漏, 活塞密封圈老化、油缸端盖密封失效, 导致高压油泄漏, 降低有效驱动力。控制信号与电气故障, 伺服阀(电液转换器)故障, 力矩马达失磁或线圈损坏, 无法响应电信号, 喷嘴挡板间隙(约0.03mm)被颗粒卡住, 导致滑阀偏移

失灵。位移传感器 (LVDT) 故障, 反馈信号失真或中断, 使 DEH 控制系统误判位置, 造成调节紊乱。电磁阀失效, AST/OPC 电磁阀线圈烧毁或卡涩, 影响危急遮断油压建立。机械结构问题, 传动机构卡阻, 油动机活塞杆弯曲、导向套变形或连接螺母松动, 导致机械阻力增大。弹簧力异常, 关闭弹簧预紧力不足或断裂, 影响阀门复位能力。油动机缸体过热, 长期运行温度过高, 引起部件膨胀卡涩, 可通过加装冷却水套改善。

3. 内漏或外漏

外漏原因及处理, 密封件磨损, 油动机小端盖处的复合密封 (氟橡胶+聚四氟乙烯环) 长期运行后易因活塞杆表面损伤或杂质侵入导致异常磨损, 引发外漏。刮油环失效, 刮油环损坏会使外部污染物进入密封面, 加速密封老化, 同时无法阻止抗燃油外泄。处理措施, 定期巡检活塞杆渗油情况, 发现“滴油”趋势应及时记录并评估; 利用停机机会更换密封件, 优先选用原厂高耐腐蚀材质 (如氟橡胶); 改进结构设计, 如加装冷却水套以降低缸体温度, 改善油质稳定性。内漏原因及风险, 伺服阀控制失灵, 电液伺服阀若因油质污染导致阀芯卡涩, 可能造成油动机内部油路无法正常切断, 形成内漏。快速卸荷阀故障, 该部件失灵会导致油动机在应关闭时仍保持压力, 增加内漏风险。影响, 内漏虽不直观, 但会降低系统油压、影响调节精度, 严重时触发低油压跳机保护。

二、伺服阀常见故障分析与维护

1. 常见故障类型

阀不工作 (无流量或压力输出), 原因分析, 电气连接故障是主要原因, 包括外引线断路、电插头焊点脱焊、线圈霉断或内引线断路/短路。液压回路连接错误, 如进油或回油未接通、油口接反, 也会导致阀无法工作。阀输出流量或压力过大或不可控, 原因分析, 机械安装问题与污染物堵塞是主因。阀安装座表面不平或底面密封圈未装妥会导致阀壳体变形, 阀芯卡死。阀控制级被脏物或锈块堵塞, 也会使阀芯卡住, 输出失控。阀反应迟钝、响应降低、零偏增大, 原因分析, 系统供油压力不足会直接影响阀的动态响应。阀内部油滤太脏或控制级局部堵塞会阻碍油液正常流动。此外, 调零机构或力矩马达 (力马达) 的零组件松动也会导致零位不稳和性能下降。阀输出 (或执行机构速度/力) 不能连续控制, 原因分析, 系统反馈回路断开或出现正反馈会导致控制失准。系统的机械间隙、摩擦等非线性因素也

会影响连续性。阀本身分辨率变差、滞环增大, 以及油液清洁度不佳 (太脏) 是常见的内在原因。系统出现高频抖动或振动, 原因分析, 系统开环增益过高是引发振荡的常见系统参数问题。油液污染 (太脏或混入大量空气) 会直接影响阀的稳定性。电气干扰, 如系统接地不良、伺服放大器电源滤波不良或噪声变大, 以及阀线圈绝缘变差、外引线碰地、电插头绝缘变差等, 均可能引发高频振动。阀控制级时堵时通也会造成此类现象。系统响应变慢 (低频问题), 原因分析, 油液污染是首要因素。系统可能因参数匹配问题产生极限环振荡。执行机构摩擦过大也会拖慢系统。阀零位不稳, 源于阀内部螺钉或机构松动、外调零机构未锁紧, 或控制级中有污物。阀分辨率变差同样会导致响应迟缓。外部漏油, 原因分析, 此故障主要与安装面和密封有关。安装座表面粗糙度过大或有污物会影响密封效果。底面密封圈未装妥、漏装、破裂或老化是直接泄漏原因。弹簧管破裂也会导致漏油。

2. 伺服阀失效模式与维护保养要点

失效模式深度解析, 冲蚀失效, 由高速液流携带的硬颗粒冲击阀芯、阀套节流梭边、反馈杆小球或喷嘴挡板所致, 导致梭边损坏、压力增益降低、零位泄漏增加。淤积失效, 阀静止带压时, 污染物在阀芯与阀套的微小环形间隙中聚积, 导致始动摩擦和静摩擦加大, 响应拖长、滞环变宽, 严重时阀芯卡涩无法操作。部分或严重堵塞的油滤 (LCF) 会直接导致阀响应迟钝或完全卡住^[2]。卡涩失效, 不均匀淤积产生侧向载荷, 可能导致阀芯与阀套金属表面间发生微观粘附 (冷压接), 造成始动力加大、运动不平稳甚至完全卡紧。退化失效, 由磨粒磨损、腐蚀、汽蚀、混气、冲刷磨损或表面疲劳等长期累积效应引起, 表现为内泄漏逐渐增加, 效率或精度缓慢下降, 最终可能导致突发性不可修复失效。污染源控制, 失效多与油液污染直接相关。污染源包括被污染的新油 (典型清洁度 NAS7~8 级)、新系统内的残留污染 (毛刺、灰尘等)、运行中的侵入污染 (油箱通气口、维修开口等) 以及系统内部生成的污染物 (油液降解产物、磨损颗粒等)。关键维护保养措施, 油液质量与清洁度管理, 对于磷酸酯抗燃油等介质, 需严格监测和控制油液的清洁度、酸值、电阻率及氯离子含量等关键指标。水分存在会加速磷酸酯水解产酸, 酸值升高会腐蚀金属元件、影响电阻率并促进进一步水解, 形成的胶质盐可能堵塞滤芯和阀芯阀套。必须使用装配高效高精过滤器的设备

加油, 确保油液清洁度达到伺服阀一般要求的NAS6级以上。定期更换滤芯, 滤芯是去除油液中水分、酸及颗粒污染的关键, 必须定期更换(推荐周期为半年), 以确保其正常工作, 维持系统油质。避免不当维修方法, 应尽可能避免采用大电流冲击方法处理伺服阀卡塞。此方法属应急措施, 可能造成反馈杆球头间隙变大、阀芯阀套磨损加剧, 甚至将污染物嵌入阀套, 更重要的是, 可能使弹簧管(与力矩马达衔铁等一体)产生疲劳或应力损坏, 引发伺服阀自激振荡及管路振动。系统环境检查, 需检查所有液压管路, 确保其与蒸汽管路等热源保持足够距离, 避免因局部过热引起油液或元件性能异常。规范操作与系统冲洗, 在维护、更换部件、取样等操作时, 须严格遵守清洁规程, 防止引入新污染物。对新系统或大修后系统进行彻底冲洗时, 应追求高流速和紊流状态, 以有效清除残留污染物。

三、系统级维护策略

1. 油质监督与净化

在线监测与定期化验: 对汽轮机油(透平油)与EH抗燃油的关键指标(水分、颗粒度、酸值、粘度、电阻率等)进行在线监测与定期实验室分析, 确保指标控制在标准范围内(如润滑油颗粒度NAS 8级以内)。连续净化系统运行, 润滑油系统, 确保真空滤油机、聚结分离式滤油机等在线净化装置连续可靠运行, 有效去除水分、气体及颗粒污染物。重点关注真空滤油机排气口油雾与冷凝水情况, 及时更换滤芯。EH油系统, 充分利用系统中的过滤器、再生装置及磁性过滤器, 定期检查与更换滤芯, 吸附降解酸性物质, 维持油液清洁度与化学稳定性。油箱与管路管理, 定期排放油箱底部积水; 保持油箱微负压(100-200Pa)以防止水汽吸入; 检查轴封泄漏情况, 减少油中进水风险; 大修时清理油泵吸入口及油动机进口的金属滤网。

2. 设备状态监测与诊断

运行参数监控, 密切关注油动机行程反馈、伺服阀指令与反馈差值、EH油压波动、润滑油温与回油温度等参数异常变化。直观检查与趋势分析, 定期观察回油视窗油质透明度与泡沫情况, 记录油箱液位异常变化, 比

对排烟风机压力历史数据, 及时发现系统泄漏或堵塞。故障预警机制, 建立基于油质参数与设备运行参数的预警阈值, 一旦接近限值即触发维护工单, 避免故障发生。

3. 预防性维护计划

定期解体检查与维护, 结合机组检修计划, 对油动机、伺服阀进行定期解体检查, 测量关键部件磨损间隙, 清洗阀芯、活塞及节流孔, 更换老化密封件。备件管理与寿命预测, 对伺服阀等精密部件建立寿命档案, 基于运行小时数与油质状况预测更换周期, 储备关键备件。环境与运行条件优化, 调节润滑油温稳定在40-45℃, 避免长期高温运行加速油品老化。确保EH油系统运行温度在合格范围内, 减少高温氧化风险。规范启停机操作, 避免轴封蒸汽大量漏入轴承座。

4. 维护管理体系建设

标准化作业程序, 编制油动机与伺服阀清洗、校准、更换的详细作业指导书, 确保维护质量一致性。人员培训与资质, 对维护人员进行专项培训, 使其掌握部件工作原理、故障诊断方法与精密维护技能。记录与知识管理, 详细记录每次故障现象、原因分析、处理措施及维护效果, 形成案例库, 用于持续改进维护策略。系统级维护策略强调从油源净化、状态监测到主动预防的全链条管理, 通过制度化、标准化的措施, 最大限度降低油动机与伺服阀故障率, 保障汽轮机调速系统长期稳定可靠运行。

总之, 汽轮机油动机与伺服阀是调速系统的核心执行与控制部件, 其故障直接影响机组调节性能与安全。基于油系统维护经验, 制定涵盖油质管理、设备监测、预防性维护的系统级策略至关重要。

参考文献

- [1] 周永, 牟春雨, 罗勇, 等. 某汽轮机主汽阀振动故障分析[J]. 东方汽轮机, 2023, (4): 72-75. DOI: 10.13808/j.cnki.issn1674-9987.2023.04.016.
- [2] 齐新海, 杨勇, 盛鹏, 等. 燃气轮机润滑油系统故障问题分析及处理[J]. 石油和化工设备, 2023, 26(6): 142-145.