

汽轮机润滑油系统优化设计与维护策略

邢利军

国能包头煤化工有限责任公司 内蒙古包头 014030

摘要: 本文聚焦汽轮机润滑油系统,先阐述其组成、工作流程及性能指标要求,分析设计缺陷、运行风险与维护短板等关键问题。进而提出优化设计方案,涵盖系统结构与布局、核心设备选型与匹配、冗余与应急系统优化。同时制定科学维护策略,包括构建预测性维护模式、油液全生命周期管理及日常维护与故障处理规范,旨在提升系统可靠性与运行效率。

关键词: 汽轮机;润滑油系统;优化设计;维护策略

引言

汽轮机作为电力、化工等领域的关键设备,其润滑油系统对设备稳定运行至关重要。然而,当前汽轮机润滑油系统存在设计不合理、运行风险高、维护不规范等问题,导致系统可靠性降低、故障频发,影响汽轮机乃至整个生产流程的稳定。深入研究汽轮机润滑油系统的优化设计与科学维护策略,具有重要的现实意义,能为保障汽轮机高效运行提供有力支持。

一、汽轮机润滑油系统的组成与工作原理

(一) 系统核心组成部分

汽轮机润滑油系统是由多模块精密协同的复杂保障体系,其核心构成包括:以主油箱为储油基体,通过焊接工艺成型并内置两台射油器,油箱回油口配置可拆卸滤网实现杂质截留;供油动力由汽轮机主轴直连的主油泵提供,配合高压启动油泵完成初期建压,交流/直流润滑油泵分别作为常规备用与极端工况应急保障;油质净化通过滤油器完成颗粒过滤,油水分离依赖油箱内置结构实现;冷却系统采用冷油器与冷却水管路组合,通过调节进出口水量或旁路阀开度精准控温,取代传统温控阀设计;控制体系集成油位指示器、压力调节阀及温度传感器,实时监测并联动交直流泵自启动试验装置确保可靠性;辅助模块包含溢油阀、排烟系统、盘车装置及顶轴装置,通过止回阀与管网网络实现流体定向输送与轴承启停保护,各组件经监测仪表闭环调控,共同维持轴系润滑与冷却需求。

(二) 系统工作流程

汽轮机润滑油系统的工作流程围绕“油液储存—加

压输送—处理净化—分配使用—冷却回流”的闭环展开。启动阶段,机组启动前,先启动交流润滑油泵进行油循环,为系统及管路充油,再启动高压启动油泵提供压力油,高压油泵出口无调压阀,压力整定至1.96MPa,启动油泵启动,润滑油从油箱吸出,经粗滤器去除大颗粒杂质后进入油泵加压,加压后的油液一部分经精滤器进一步净化后,通过分配管路输送至汽轮机轴瓦、齿轮等摩擦部位,实现润滑与冷却;另一部分作为控制油,为汽轮机调节系统、保安系统提供液动力。正常运行阶段,主油泵接替工作,供油流程与启动阶段一致。流经摩擦部位的润滑油吸收热量后,进入冷油器与冷却水进行热交换,冷却后的油液回流至油箱;同时,油水分离器与在线滤油器持续对油箱内油液进行脱水、净化处理。控制监测模块实时采集供油压力、油温、油质等参数,当参数偏离设定值时,通过压力调节阀、温控阀等自动调节,确保系统稳定运行。停机阶段,辅助油泵启动,持续供油至汽轮机完全静止,避免停机过程中摩擦部件润滑不足^[1]。

(三) 系统性能指标要求

润滑油系统的性能指标是保障汽轮机安全稳定运行的核心要素,涵盖供油参数、油质标准及响应控制三大维度。供油参数方面,系统采用主油泵与射油器协同供油机制:主油泵提供1.96MPa、3000L/min的高压油至#1、#2射油器入口。射油器内置喷嘴、混合室、喉部及扩散段,高压油经喷嘴加速后形成低压区,吸入油箱内静止油并混合,通过喉部高速流动及扩散管动能转换,形成稳定出口压力。其中,#1射油器出口连接主油泵入口,构成自循环增压回路;#2射油器出口油流经冷油器冷

却、润滑油过滤器净化后，向各轴承提供0.08~0.12MPa的润滑油。为确保压力稳定，系统配置溢油阀及三级低压保护装置：当润滑油压降至0.075MPa时，交流润滑油泵自动启动；降至0.06MPa时，直流润滑油泵启动且机组跳闸；降至0.029MPa时，盘车装置紧急停运。此外，主油箱设有高位事故油箱补油系统，可在突发断油时快速向主油箱注油，保障持续供油能力。油质指标方面，严格遵循《电厂用润滑油质量标准》：油液清洁度需达NAS8级，颗粒度（ $\geq 5\mu\text{m}$ ） ≤ 200 个/mL；水分含量 $\leq 0.1\%$ ，防止金属腐蚀；运动黏度（40℃）偏差 $\leq \pm 10\%$ ，酸值 $\leq 0.2\text{mgKOH/g}$ ，避免氧化劣化；响应控制方面，系统要求辅助油泵启动时间 ≤ 10 秒，冷油器油温调节响应时间 ≤ 30 秒，确保故障工况下快速恢复供油压力与温度，维持轴系润滑稳定性。

二、汽轮机润滑油系统关键问题分析

（一）设计缺陷

设计缺陷是润滑油系统可靠性不足的核心诱因，主要体现在结构、匹配及布局三方面。系统结构上，单管路供油设计存在隐患，管路泄漏或堵塞易导致局部断油；滤油器旁路设计不合理，滤芯堵塞时旁通阀过早开启，未过滤杂质进入润滑部位，加剧磨损。设备匹配方面，油泵选型与负荷不匹配问题突出，部分主油泵额定流量过大，低负荷运行时能耗高且油温异常；冷油器换热面积不足，夏季高负荷工况下冷却能力不足，油温持续超标。空间布局上，部分系统部件安装紧凑，如油箱与冷油器间距小影响散热，检修通道狭窄导致关键部件维护困难，增加操作风险。

（二）运行风险

润滑油系统运行中面临多重风险，以油质劣化、参数波动及系统污染为主。油质劣化风险突出，油液长期运行与空气接触易氧化，生成有机酸、胶质等物质，导致酸值升高、黏度变化；同时，汽轮机轴封泄漏的蒸汽使油液含水量超标，引发乳化，降低润滑性能。例如某电厂300MW机组因轴封泄漏导致油中水分达0.3%，引发2号轴瓦温度异常。参数波动方面，供油压力骤降多由主油泵故障、滤油器堵塞或管路泄漏导致，若备用油泵未及时启动，将造成供油中断；油温失控则因冷油器冷却不足或温控故障，油温过高加速劣化，过低则增大黏度、增加阻力^[2]。系统污染风险源于外部杂质侵入（如检修残留物）与内部磨损颗粒（如轴瓦磨损金属屑），易堵塞滤油器、引发设备卡涩。

（三）维护短板

当前润滑油系统维护存在显著短板，影响运行可靠性。维护模式方面，多数企业沿用“定期检修”方式，按固定周期停机维护，导致过度检修增加成本，且操作不当易引入新故障；同时，缺乏状态监测技术，难以提前识别潜在隐患。油液管理粗放问题突出，部分企业仅凭经验判断油液更换时机，未定期检测油质，导致油液劣化后继续使用；滤油器滤芯未按规定周期更换，过滤效率下降，油质清洁度无法保障。故障处理缺乏标准化流程，供油压力下降、油温升高等问题发生时，运维人员多依赖“试错法”排查，延长停机时间；且故障记录不完整，未建立分析追溯机制，导致同类故障反复出现。上述问题反映出维护体系在科学性、规范性和预防性上的不足，需通过状态监测、油质动态管理、标准化故障处理等措施系统性改进。

三、汽轮机润滑油系统的优化设计方案

（一）系统结构与布局优化设计

系统结构优化的核心是提升流体输送稳定性与检修便利性。在管路设计上，摒弃单管路供油，采用“双管路并联”设计，两条管路独立运行、互为备用，每条管路设置单独的阀门与滤油器，当一条管路故障时，可通过阀门切换至另一条管路，确保供油不中断；优化管路走向，减少弯头、三通等阻力部件，管路直径根据流量需求合理匹配，降低油液流动阻力，避免局部压力损失过大。空间布局优化需兼顾散热与检修需求，将油箱、冷油器等发热部件与电气控制设备保持足够安全距离（不小于1.5米），并设置强制通风装置，提升散热效果；设备安装采用“模块化布局”，将供油模块、冷却模块、处理模块分区布置，各模块间预留宽度不小于1米的检修通道，关键阀门、滤油器的安装高度控制在1.2~1.5米，便于操作与维护。另外，在管路关键节点设置可拆卸的检查口，方便管路内部清洁与故障排查。

（二）核心设备选型与匹配优化

核心设备的合理选型与匹配是系统高效运行的基础，根据汽轮机负荷特性采用“主油泵+变量辅助油泵”组合，主油泵选用螺旋泵，其流量与转速线性匹配，适应汽轮机变负荷运行需求；辅助油泵采用变量柱塞泵，通过压力传感器反馈自动调节排量，避免“大马拉小车”现象，降低能耗；滤油器优化选型需兼顾过滤精度与纳污能力，粗滤器选用金属网式滤油器，过滤精度20~40 μm ，用于去除大颗粒杂质；精滤器采用玻璃纤维滤

芯, 过滤精度 $3\text{--}5\mu\text{m}$, 同时配置压差报警器, 当滤芯压差超过 0.1MPa 时自动报警提醒更换; 在精滤器出口增设磁性过滤器, 吸附油液中的金属磨粒。冷油器选用板式换热器, 其换热效率较传统管式冷油器提升30%以上, 同时配备双温控阀, 实现冷却水量的自动精准调节, 确保油温稳定在设定范围^[3]。

(三) 冗余与应急系统优化

冗余与应急系统优化是提升汽轮机润滑油系统可靠性的关键, 用于应对突发故障和极端工况。油泵冗余采用“三泵联动”机制, 主油泵、交流和直流辅助油泵形成三级备用, 由PLC控制系统实现逻辑联动, 确保供油连续。油箱设高低两个油位传感器, 低油位触发时补油泵自动从备用油箱补油; 供油母管设置按10秒应急供油设计的蓄能器, 避免油泵切换或供油短暂不足时中断供油。应急冷却系统优化为“双冷油器并联”, 一用一备, 换热效率下降时可快速切换, 同时配备应急冷却水箱, 能在外部冷却水中断时提供临时冷却水源。

四、汽轮机润滑油系统的科学维护策略

(一) 基于状态的预测性维护模式构建

基于状态的预测性维护可替代传统定期维护, 实现“按需维护”并降低成本。首先, 构建多参数在线监测系统, 在供油母管、轴瓦进油口、冷油器进出口等关键位置部署压力、温度、流量传感器, 同步配置油质在线监测仪, 实时采集油液清洁度、水分、黏度、酸值等数据, 通过物联网传输至运维平台。其次, 建立故障预警模型, 利用机器学习算法分析监测数据, 预测供油压力下降速率、油温变化趋势及油质劣化速度, 参数接近阈值时自动触发预警; 通过振动频谱分析监测油泵、电机等旋转设备, 提前识别早期磨损故障。最后, 制定差异化维护策略, 根据设备状态划分“正常、预警、故障”三级, 对正常部件延长监测周期, 预警部件实施专项检查, 故障部件立即维修, 实现维护资源精准配置。

(二) 油液全生命周期管理策略

油液全生命周期管理覆盖“采购—储存—使用—报废”全流程, 确保油质稳定达标。采购环节, 制定严格准入标准, 依据设备型号选择润滑油, 要求供应商提供质量检测报告, 到货后抽样复检, 合格方可入库。储存环节, 实施“专罐专存”, 按牌号、类型分类存放, 油箱密封并加装呼吸过滤器, 防止水分与杂质侵入, 定期检

测库存油液质量, 杜绝过期使用。使用环节, 推行“净化优先、按需更换”, 通过在线滤油器与离线设备(如真空滤油机)持续净化, 每周抽检油质, 根据检测结果动态决策更换, 而非固定周期更换; 更换时执行“全系统清洗—干燥—新油加注”, 避免旧油残留。报废环节, 明确报废标准, 当酸值超 0.3mgKOH/g 、黏度偏差超 $\pm 15\%$ 或污染度达NAS12级时强制报废, 交由专业机构回收, 防止环境污染^[4]。

(三) 日常维护与故障处理规范

日常维护需制定标准化清单与周期: 每日巡检油泵运行状态(声音、振动)、供油参数(压力、油温)、油箱油位及油质(无乳化/杂质), 并监测滤油器压差; 每周清洁滤油器, 每月检查冷油器换热效率并清理冷却水管路, 每季度测试阀门密封性。故障处理遵循“分析—处置—修复—预防”四步流程: 以供油压力骤降为例, 首先启动备用油泵保障供油, 随后通过压力测试定位故障点, 滤油器堵塞则更换滤芯, 管路泄漏则停机补焊; 修复后分析根本原因(如滤芯更换周期不合理), 调整维护策略并强化油质监测。同时建立故障台账, 记录故障时间、原因、处理过程及效果, 定期统计分析以优化维护计划, 确保系统可靠性。

结束语

汽轮机润滑油系统的优化设计与科学维护是一项系统而复杂的工作。通过系统结构与布局优化、核心设备合理选型、冗余与应急系统完善等优化设计, 以及构建预测性维护模式、实施油液全生命周期管理和规范日常维护与故障处理, 可有效提升系统的可靠性与运行效率, 降低运维成本, 保障汽轮机长期稳定运行, 为相关产业的高质量发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 孙戈. 汽轮机检修中润滑油性能评估及润滑系统优化的研究[J]. 家电维修, 2025, (01): 125-127.
- [2] 石峰. 轧机稀油润滑系统的技术升级及管理[J]. 今日制造与升级, 2022 (01): 33-35.
- [3] 陈秋红, 黄晓明. 汽轮机稀油润滑系统设计方法研究综述[J]. 机械设计与制造工程, 2023 (02): 45-50.
- [4] 张光华, 王杰. 高温燃气轮机稀油润滑系统优化设计与分析[J]. 燃气轮机技术, 2023 (03): 78-82.