

汽轮机润滑油系统故障模式与可靠性提升措施

康永财

山西昱光发电有限责任公司 山西 朔州 036900

摘要: 汽轮机润滑油系统是保障机组安全稳定运行的关键辅助系统,其可靠性直接关系到轴承寿命、转子稳定性及整机运行安全。本文从系统组成与功能出发,系统梳理了润滑油系统的主要故障模式,包括轴承磨损与烧瓦、润滑油压力异常、油温超标、油质劣化、油系统泄漏及调节部件卡涩等典型类型,深入分析了各故障模式的物理成因与演化规律。在此基础上,从故障的渐进性与突发性特征入手,探讨了系统薄弱环节的识别方法。进而从设备选型与设计优化、油品全生命周期管理、在线状态监测与智能预警、冗余配置与备用自投策略、以及检修维护制度优化等维度,提出了系统性的可靠性提升措施,旨在为汽轮机润滑油系统的安全可靠运行提供技术管理参考。

关键词: 汽轮机;润滑油系统;故障模式;可靠性;状态监测;油质管理

引言

汽轮机是将热能转化为机械能的核心动力设备,广泛应用于火力发电、核电及工业驱动领域。润滑油系统作为汽轮机最重要的辅助系统之一,承担着轴承润滑、轴瓦冷却、转子支承油膜形成以及调节保安系统供油等多重功能。润滑油系统的运行状态直接影响汽轮机的振动水平、轴承温度、调速系统响应特性乃至整机的运行寿命。历史上多起汽轮机严重事故(如烧瓦、断轴、超速等)的根源均可追溯到润滑油系统的功能性失效或性能劣化。随着机组向大容量、高参数方向发展,汽轮机轴承负荷和线速度显著增加,对润滑系统的供油可靠性、油质洁净度和油温稳定性提出了更为严格的要求。与此同时,长期运行中因磨损、污染、老化和疲劳等因素导致的润滑油系统性能退化不可避免,故障风险客观存在。因此,系统认识润滑油系统的故障模式及其成因,并采取针对性的可靠性提升措施,对于防范重大设备事故、延长维修周期、降低全生命周期成本具有重要意义。

1 汽轮机润滑油系统的功能架构与故障模式分类

1.1 系统的功能构成与关键环节

汽轮机润滑油系统通常由主油泵、交流辅助油泵、直流事故油泵、冷油器、滤油器、油箱、排烟风机、压力调节阀、温度调节阀、管路及阀门等设备组成,与轴承箱、调节保安系统紧密连接。系统运行的基本逻辑是:主油泵从油箱吸入润滑油并加压,经冷油器冷却和滤油器过滤后,分配至各轴承、盘车装置和调节系统,完成润滑和冷却后回油至油箱,形成闭式循环。在这一循环中,供油压力的稳定性、油温的可控性、油质的洁净度及系统的密封完整性是保证其功能实现的四个关键

维度^[1]。任何一个维度的偏差都可能触发系统性能下降乃至功能失效。

1.2 故障模式的多维度分类

汽轮机润滑油系统的故障模式可从不同视角进行分类。按功能后果可分为功能性故障(供油压力或流量不足)和质量性故障(油质不达标、油温过高);按发生速率可分为突发性故障(如油管破裂、主油泵断轴)和渐发性故障(如轴瓦磨损、油品老化、滤芯堵塞);按故障部位可分为油源故障(油泵及驱动部分)、油质故障(污染、乳化、酸化)、油路故障(堵塞、泄漏、阀门卡涩)及负载端故障(轴承、调节装置异常引起的系统响应变化)。这种多维分类有助于后续原因分析和措施制定时准确定位。

1.3 故障模式的统计规律与关联性

现场运行经验表明,润滑油系统故障并非均匀分布,而是呈现“两端集中”的统计规律——即系统投运初期(磨合阶段)和运行后期(老化阶段)故障率明显偏高。初期故障主要为安装遗留问题(如管路清洁度不足、轴承间隙不当)及调试不当引发;后期故障则以材料疲劳、密封老化、油泵磨损和调节元件卡涩为主。更为值得关注的是各故障模式之间的关联传导关系:油质劣化加速轴承磨损,轴承磨损产生的金属碎屑又进一步污染油质并损伤油泵;油温调节失灵可能导致油粘度下降,进而引起油压波动和轴承承载能力降低。这种链式传导特征要求可靠性提升措施必须关注系统整体而非孤立环节。

2 典型故障模式的物理成因与演化机理

2.1 轴承磨损与烧瓦故障的成因而分析

轴承(特别是径向轴承和推力轴承)是润滑油系统

的终端负载,也是最敏感的功能执行元件。轴承磨损和烧瓦故障的成因可归结为三类情形:供油中断或不足,包括主油泵故障、油管破裂、滤网堵塞引起的前端供油缺失;油膜破坏,由油温过高致粘度下降、转速过低致油膜动压不足或轴承过载导致;异物损伤,硬质颗粒进入轴承间隙造成刮磨和疲劳点蚀。在演化过程上,轻微磨损首先表现为轴承温度缓慢升高和振动小幅增加,若未被及时识别,磨损加速并产生大量摩擦热,最终轴瓦合金层熔融粘着于转子轴颈,形成“烧瓦”事故。从微量磨损到灾难性烧瓦,时间窗口因负荷条件而异,可短至数十分钟,这要求监测系统具备足够的灵敏度和响应速度。

2.2 润滑油压力异常的类型与诱因

供油压力异常包括压力降低、压力波动和压力过高三类情形。压力降低的主要诱因有:主油泵输出下降(叶轮磨损或驱动故障)、油位过低导致吸空、滤油器严重堵塞、管路破裂泄漏以及调压阀误动或卡涩。压力波动多与系统中有气体析出(回油管布置不当吸入空气)或调节阀振荡有关^[2]。压力过高则主要由调压阀设定不当或堵塞引起,可能造成油管路法兰泄漏和冷油器管束超压损坏。压力异常的危害不仅在于轴承供油量的变化,还在于压力的不稳定会传导至调节保安系统,可能引发调速器误动作或危急遮断装置异常动作,直接影响机组安全。

2.3 油温异常的机理与系统响应

润滑油温度是影响油膜特性和氧化寿命的核心参数。油温过高的原因包括冷油器冷却效率下降(管束结垢、循环水量不足或水温偏高)、系统内摩擦发热过大(轴承间隙偏小或轴瓦接触不良)以及油品老化导致的粘度异常升高。油温过低的诱因则主要是冷油器调节失灵、冬季启动时加热不足等。油温偏离最佳工作范围(通常为38~45℃)的直接后果是油粘度的变化:粘度过低,油膜厚度减薄,轴承处于边界润滑甚至干摩擦状态;粘度过高,油膜内摩擦阻力增大,轴承发热加剧,形成“温升-粘度下降-油膜变薄-摩擦增大-温升加剧”的正反馈循环,加速故障进程。

2.4 油质劣化的物理化学过程

油质劣化包括物理污染和化学老化两个方面。物理污染主要为固体颗粒(外界侵入的粉尘、内部磨损碎屑)和水分(轴封漏汽凝结、油箱呼吸吸入)。固体颗粒通过磨粒磨损加速轴承和油泵的损耗,水分则促进油品乳化、降低油膜强度并诱发锈蚀。化学老化表现为基础油氧化、添加剂消耗和酸值升高,其速率与油温正相

关——运行温度每升高10℃,氧化速率约增加一倍。老化产物(油泥和漆膜)沉积于管路和阀芯表面,可能造成调节元件卡涩和冷油器传热恶化。油质劣化通常是一个渐进过程,其危险性在于早期难以通过肉眼判断,而一旦劣化达到临界点,系统性能会迅速衰退。

2.5 泄漏故障与调节部件卡涩

油系统泄漏分为外漏和内漏。外漏(法兰、阀门密封、管接头处)直接造成油量损失和环境火险隐患;内漏(如冷油器管束破裂导致油水互窜、调压阀内漏导致系统压力失衡)则隐蔽性更强,后果更为复杂。调节保安系统中的错油门、滑阀、伺服阀等精密部件对油质洁净度和油压稳定性极为敏感,油中微小颗粒或胶质物沉积于阀芯与阀套间隙(通常为微米级)即可引发卡涩或动作迟缓,严重时导致调节汽门拒动或保护装置误动,后果极为严重。

3 润滑油系统可靠性提升的技术与管理措施

3.1 系统设计与设备选型的可靠性源头控制

提升可靠性应从设计源头入手。在主油泵选型上,应优先采用可靠性高的螺杆泵或离心泵,其工作转速应避免转子的临界转速区,泵的流量和扬程裕量应不低于设计值的10%~15%,以应对油滤器压差增大和轴承间隙变化等长期运行后的工况偏移。冷油器换热面积的设计应考虑夏季冷却水温度和管束结垢的综合裕量,确保极限工况下油温仍可控。管路系统的设计应避免急弯和袋形段,减小流动阻力并防止空气积聚;回油管应有足够的坡度以利回油通畅^[3]。此外,油箱容积应满足全系统油量循环的停留时间要求,以利于气泡析出和污染物沉降。关键阀门和执行元件应选择经过长期工业验证的成熟型号,并对其动作寿命和抗污染能力提出明确技术要求。

3.2 润滑油全生命周期质量管理的实施路径

油品质量是系统可靠性的“血液”基础。全生命周期质量管理覆盖新油验收、运行维护和废油处理三个阶段。在新油进厂阶段,应按标准进行理化性能全项检验,尤其关注抗乳化性、防锈性和氧化安定性等关键指标。运行维护阶段的核心是定期取样检测,检测周期根据机组运行状态动态调整——正常运行可每季度一次,启停频繁或出现过温等异常工况后应追加检测。检测项目应包括运动粘度、水分、酸值、机械杂质、破乳化度和旋转氧弹等。当指标接近警示值时,应启动在线净油装置或离线滤油处理;当多项指标达到换油标准时,应果断更换而非“补充新油延长寿命”,避免添加剂体系失衡。应建立单机润滑油质量档案,跟踪每次检测数据的变化趋势,而非孤立地判定单次结果。

3.3 在线状态监测与智能预警技术的集成应用

在线监测是实现从“事后维修”向“预知维修”转变的关键技术手段。汽轮机润滑油系统的在线监测参数应包括：主油泵出口压力、润滑油母管压力、各轴承供油压力、冷油器进出口油温、各轴承回油温度、油箱油位、滤油器前后压差以及油中水分和颗粒度（可通过在线传感器实现）。这些参数应与集散控制系统(DCS)或机组状态监测系统(TDM)集成，设置合理的报警阈值——阈值应区分为预警值和跳闸值两级，预警值留有足够的时间裕度以便运行人员采取干预措施。在此基础上，可利用多参数融合算法（如主成分分析或贝叶斯网络）识别故障早期特征，实现智能预警^[4]。例如，轴承回油温度的缓慢上升与滤油器压差的同步增大可能提示油质劣化导致的轴承磨损加速，这种关联特征比单参数阈值报警更具诊断价值。

3.4 冗余配置与备用自投策略的优化

提高系统容错能力是提升可靠性的重要路径。在关键设备配置上，交流辅助油泵和直流事故油泵是主油泵的冗余备份，其自启动逻辑和可靠性至关重要。建议将辅助油泵的自启动定值设定为略高于跳闸值但留有足够安全裕度的水平，避免主油泵跳闸后轴承断油时间超过安全限值。直流油泵应由独立蓄电池组供电，并定期进行启动试验和蓄电池容量核对。冷油器和滤油器应采用双路并联布置，任一路故障时可在线切换至备用路而不中断供油。切换阀门的选型和安装位置应确保操作便捷、密封可靠。对于调节保安系统的油源供给，应考虑独立供油管线设计，避免调节系统用油与轴承润滑用油因同一管路故障而同时丧失。

3.5 检修维护制度的优化与人员能力建设

技术措施的最终效果依赖于维护制度的有效执行。检修维护优化包括三个层面：第一，基于状态的检修决策——根据在线监测数据和离线检测结果，动态调整维修计划，避免“无论状态如何、到期必修”的机械式检修策略。对于振动、温度、油质等指标长期稳定的机组，可适当延长检修间隔；对于存在劣化趋势的机组，

则提前安排检修。第二，检修工艺标准化——制定汽轮机润滑油系统检修作业指导书，明确油管路清洗、油箱清理、滤芯更换、油泵对中、轴承间隙测量和调节阀行程校验等关键工序的技术要求和验收标准，减少人为操作差异。第三，人员能力持续提升——运行人员应接受润滑油系统故障诊断与应急处置的专项培训，能够根据参数异常快速判断故障类型并执行标准处置流程；检修人员应掌握油系统污染控制和精密检修技能，避免因检修作业引入二次污染。

4 结语

汽轮机润滑油系统的可靠性关乎整机安全与运行经济性。本文从系统功能架构出发，系统识别了轴承磨损、压力异常、油温超标、油质劣化、泄漏及调节部件卡涩等典型故障模式，深入分析了各模式的物理成因、演化机理及相互关联性。在此基础上，提出了覆盖设计选型、油品质量管理、在线监测预警、冗余配置优化和检修维护制度等全链条的可靠性提升措施体系。核心认识在于：润滑油系统的可靠性不是单一措施的产物，而是设备质量、运行管理、检测技术和人员素质协同作用的结果；故障防范的重心应从“发生后的快速处理”前移至“发生前的早期识别和趋势管理”。随着状态监测技术和数据分析方法的持续进步，汽轮机润滑油系统有望实现从定期维护向基于状态的精准维护转型，为机组更加安全、高效、长周期运行提供坚实支撑。

参考文献

- [1]杨建刚,曹浩,刘金福.汽轮发电机组振动故障诊断技术研究进展[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2819-2833.
- [2]傅忠广,杨昆,何青.旋转机械状态监测与故障诊断技术[M].动力工程学报(参考文献格式示例),2021,41(5):353-360.
- [3]顾煜炯,陈村,张磊.基于油液分析的设备磨损状态识别方法[J].润滑与密封,2020,45(9):1-8.
- [4]王伟,刘占辉,李永红.汽轮机润滑油系统典型故障分析及对策[J].电力安全技术,2022,24(3):44-49.