



情况均无法为轴承提供充足的润滑冷却，导致轴承与轴颈之间的摩擦加剧，造成磨损。磨损增加，轴承间隙也会扩大，将进一步恶化滑油的润滑效果，形成恶性循环。如在某一燃气轮机的实际运行案例中，由于滑油污染引起轴承磨损，在800小时的运行后，轴承内径从初始的50mm扩展至50.15mm，严重影响了机组的稳定性<sup>[3]</sup>。表1呈现了轴承磨损量与运行时长的关系。

表1 轴承磨损量与运行时长的关系

运行时长 (小时)	轴承内径 (mm)	磨损量 (mm)
0	50.00	0
200	50.03	0.03
400	50.07	0.07
600	50.12	0.12
800	50.15	0.15

#### (四) 管路故障

滑油系统管路长期运行中，会出现腐蚀、破裂和接头松动。管道腐蚀会削弱管壁厚度并降低其强度，导致滑油泄漏；管道破裂直接引发大量滑油外泄，对系统压力造成负面影响；接头松动会在连接部位引起滑油渗漏，影响系统的整体效率。

### 三、燃气轮机滑油系统故障解决措施

#### (一) 滑油泵故障解决措施

##### (1) 基于状态监测的精准维修策略

利用振动分析和油液磨粒监测等方法，构建了一套滑油泵运行状态监测体系。采用在泵体内的重要位置加装了一个加速度传感器，对其进行了频率分析，可以有效地识别出齿轮磨损和轴承故障等不正常现象。在此基础上，采用铁谱分析技术，对滑油中的磨料颗粒进行定量分析，如发现有不正常的上升，则可以判定泵体内发生了磨损。以某型滑油泵为例，经频谱检测，其100Hz频谱成分有明显增大，并与其频谱特征相联系，诊断为齿面剥离。维护人员利用监控信息，对损坏的部件进行及时地替换，防止事故进一步扩大。在此基础上，构建基于工况时间、温度和压力等参数的滑油泵运行状态衰减数学模型，对其进行损伤预报，从而达到预防维护的目的，使滑油泵的故障率下降30%以上<sup>[4]</sup>。

##### (2) 密封系统优化与材料升级

针对滑油泵密封故障，可以从密封结构设计和材料选择进行优化。结构设计采用双端面机械密封替代传统的单端面密封，引入独立的冲洗液循环系统，有效地移除密封面因摩擦产生的热量，阻止杂质进入，显著提高密封的可靠性。材料选择使用聚四氟乙烯 (PTFE) 与碳纤维复合材料制造密封环，具备出色的耐磨性和耐腐蚀

性，摩擦系数相较于传统橡胶材料降低了40%。如在某燃气轮机的滑油泵中应用升级后的密封材料后，经过1万小时运行未出现任何泄漏现象。制定严格的密封安装工艺标准，规定密封面的平行度误差不得超过0.01毫米，在安装过程中必须使用专用工具确保密封件不受损害。

#### (二) 油滤堵塞解决措施

##### (1) 智能过滤系统动态管理

采用压差-流量复合监测，建立了一套智能过滤系统。在油滤前、后分别加装高精度的差压传感器及电磁流量计，实现了对油滤前后的压差及通过流量的实时测量。在压差大于80%时，通过调整滑油泵的转速，使整个系统的流速保持在一个较高的水平，从而为更换油滤赢得了一定的时间。在此基础上，引入人工智能算法对历史监测数据进行分析，建立油滤堵塞预测模型。比如，通过对滑油清洁度、运行负荷和环境温度等多个因素与滤油机发生阻塞的关系进行研究，实现对油滤堵塞风险的72h内预报。在一台燃气轮机上安装了此系统，使因油滤阻塞而造成的非正常停炉时间降低了70%，使过滤效果提高了25%。

##### (2) 多级过滤与旁路保护优化

运用三级过滤结构，提高了滑油的洁净程度。初滤使用大流量的粗滤器，高精密度40 $\mu\text{m}$ ，对大粒径的杂质进行截留；二次过滤采用10 $\mu\text{m}$ 高精密度过滤器，可有效清除中粒度杂质；三级过滤采用3 $\mu\text{m}$ 的超精细滤芯，确保润滑点处的滑油洁净。同时，对旁路阀进行了工艺改进，将传统弹簧式旁路阀替换为电磁比例控制旁路阀，并依据滤油器压力差及时调整旁路阀的开启程度，以防止未经滤过的滑油大量流入。在过滤前后压差大于0.1MPa时，旁路阀按10%逐级打开，并与警报装置联系，提醒维修人员注意。经此改进，滑油中5 $\mu\text{m}$ 以上粒子含量可减少85%以上，而由异物引起的轴承故障率则减少60%。

#### (三) 轴承磨损解决措施

##### (1) 润滑参数智能调控与油膜优化

构建集成压力、温度、黏度等多参数传感器的轴承润滑参数实时调控系统，利用PID算法对其进行动态优化。在提高轴承温升的同时，可使滑油的流动速度提高，从而减小滑油的黏性，提高了制冷效率；在负载变动引起的轴承内压波动情况下，对滑油进行及时调节，以保持油膜厚度的稳定性。某燃气轮机轴承在高负荷运行时，采用此方案可使滑油的工作压力由0.25MPa升高到0.32MPa，而油膜的厚度由30 $\mu\text{m}$ 保持在45 $\mu\text{m}$ 以下，从而达到减少摩擦的目的。在此基础上，引入油膜在线监

测技术, 利用电容式传感器实时测量油膜厚度与分布状态, 检测到油膜厚度低于临界值时, 触发应急润滑程序, 通过喷射高压滑油快速恢复油膜, 避免轴承干摩擦。

#### (2) 轴承结构强化与涂层防护

为增强轴承结构的性能, 可以从材料选择和几何形状优化着手。选用高刚性材料, 优化滚道的几何形状, 提高轴承的承载能力。如将普通合金钢制成的轴承外圈升级为高碳铬轴承钢 (GCr15), 使屈服强度从800MPa提升到1100MPa, 有效减少疲劳磨损的风险。在轴承表面涂覆类金刚石碳 (DLC) 涂层, 硬度范围在2000至3000HV之间, 摩擦系数介于0.05至0.1, 提升了轴承的耐磨性与抗腐蚀性。某燃气轮机轴承在应用DLC涂层后, 运行寿命延长了至少两倍。通过优化轴承的安装工艺, 采用热装法替代传统的冷压装配方法, 严格控制安装过盈量在0.02至0.03毫米范围内, 确保轴承的装配精度, 减少因安装不当造成的磨损。

#### (四) 管路故障解决措施

##### (1) 管路应力消除与振动抑制

利用有限元分析 (FEA) 技术对管路系统进行动力学分析, 识别应力集中部位以及振动模态。通过对管道布置及支撑布局进行了优化, 减小了管道的弯曲角度, 将应力集中区域的应力值降低40%以上。管道支承结构以柔性支承代替传统的刚性支承, 选择减振式减振装置, 将管道的振动加速度由 $5\text{m/s}^2$ 降到 $1.5\text{m/s}^2$ 。燃气轮机滑油管路经优化后, 使其在高频振荡条件下的疲劳寿命提高了3倍。对管道接头采用超声检查, 保证接头的质量, 焊缝缺陷率控制在0.5%以内, 避免了由于接头出现裂纹而引起的管线断裂。

##### (2) 腐蚀防护与快速修复技术

为了提高管道的耐蚀性, 使用了复合防腐技术。在内部层涂覆环氧抗蚀涂料0.3–0.5mm, 使滑油不与管道发生直接接触; 外面包有聚乙烯抗腐蚀带, 具有良好的力学及耐水性能。对管道进行周期性的涡流检测, 发现壁厚降低率在20%以上时, 采取快速修复技术。比如, 采用冷喷工艺对管道进行表面处理, 使其与基材的黏结强度大于30MPa, 并使管道的耐压性能恢复到原来的水平。在管路系统中安装牺牲阳极保护装置, 选用镁合金阳极块, 通过电化学反应保护管路免受腐蚀, 使管路平均腐蚀速率从0.15mm/年降低至0.03mm/年。

#### 四、燃气轮机滑油系统故障预防策略

##### (一) 加强设备维护管理

对燃气轮机滑油系统进行了全面的维修保养, 并制定了具体的保养方案及作业流程。对滑油系统部件进行

日常检查, 清洗, 润滑, 维护, 消除可能出现的问题。并做好维修日志, 将维修的时间, 内容, 发现的问题和解决方法等都做详尽的记载, 这样才能对装置的工作状态及故障的规律进行分析。

##### (二) 提高滑油质量管控

必须严格执行采购标准, 选择符合燃气轮机性能要求的高品质滑油, 建立全面的滑油质量检测系统, 定期检查滑油的关键理化性能指标与清洁度, 确保始终符合既定规范。在滑油的储存与使用过程中, 特别注意防止污染, 保持滑油储罐的清洁, 避免水分、灰尘及其他杂质混入滑油系统中, 维护滑油的纯净度。

##### (三) 完善监测与预警系统

为提升滑油系统的监控精度, 建议安装一系列高精度传感器, 包括但不限于压力传感器、温度传感器、流量传感器以及颗粒度传感器, 实时监测滑油系统的关键运行参数。采用先进的监控技术和数据分析手段, 对收集的数据进行即时分析, 快速识别异常情况, 发出预警信号。建立一个故障诊断模型, 利用监测数据与已知的故障特征, 精确判断故障的类型及位置, 为后续的故障处理提供可靠依据。

#### 结论

燃气轮机滑油系统的机械故障对安全稳定运行具有显著影响, 本文深入探讨了滑油系统中常见的机械故障类型及成因, 提出了具体的故障解决方案。实际操作中, 建议强化设备维护管理、提升滑油质量控制、优化监测与预警机制以及加强人员培训, 以此有效减少滑油系统故障的发生, 确保燃气轮机的可靠运行。未来, 随着技术的持续进步, 需要进一步研究与开发更加先进的故障诊断技术以及维护方法, 增强燃气轮机滑油系统的性能。

#### 参考文献

- [1] 于鑫玮. 基于动态特征融合的燃气轮机涡轮故障检测研究[J]. 机械管理开发, 2025, 40(03): 77–78+81.
- [2] 韩道豫, 曹云鹏, 屈东生, 等. 基于相似度的燃气轮机故障可诊断性分析方法[J/OL]. 控制与决策, 1–9[2025–04–23].
- [3] 朱瑞, 王心柔, 韩清鹏, 等. 燃气轮机转子系统气隙偏心–碰摩耦合故障的振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2025, 44(06): 38–46.
- [4] 肖袁, 冯坤, 张鹏. 燃气轮机叶片状态与机匣振动的特征分析及故障预警[J/OL]. 机械工程学报, 1–11[2025–04–23].