

# 火电厂汽轮机润滑油系统故障模式与可靠性提升措施

周 峰

黄陵矿业煤矸石发电有限公司 陕西 延安 727306

**摘 要:** 汽轮机润滑油系统是火电厂安全稳定运行的关键辅机,其可靠性关乎主机及全厂生产安全。本文针对该系统开展故障模式分析与可靠性提升研究。先介绍系统组成、原理与关键指标,收集现场故障数据分类常见故障模式,用故障树分析法剖析成因与逻辑关系,构建可靠性模型,计算关键指标并做敏感度分析,找出薄弱环节。从设备、维护、油质、监控、人员培训等方面提出综合性可靠性提升措施,为火电厂预防故障、优化运维、提升可靠性提供参考。

**关键词:** 火电厂;汽轮机;润滑油系统;故障模式;可靠性提升

引言:汽轮机是火电厂核心动力设备,其安全运行依赖润滑油系统正常工作。该系统为汽轮机关键摩擦副提供润滑、冷却与净化功能。若系统故障,轻则轴承温度升高、振动增大,重则引发烧瓦、大轴磨损甚至机组飞车等灾难事故,带来巨大损失与安全风险。随着机组参数提升和设备老化,故障风险愈发凸显。深入分析故障机理、评估可靠性、制定预防提升策略,对保障火电厂长期安全经济运行意义重大。本文将梳理故障,量化评估,形成综合解决方案。

## 1 火电厂汽轮机润滑油系统概述

### 1.1 系统组成与工作原理

火电厂汽轮机润滑油系统是一个闭环的供油与回油系统,其主要由储油、供油、净化、冷却和控制保护等子系统构成。核心设备包括主油泵(常由主轴驱动或采用交流润滑油泵)、辅助润滑油泵(直流事故油泵)、顶轴油泵、冷油器、油箱、滤油器、以及一系列阀门、管道和监测仪表。其工作原理为:主油泵从油箱中吸取润滑油,经滤油器过滤杂质后,通过冷油器将油温降至允许范围,随后将具有一定压力和流量的洁净润滑油输送至汽轮机各轴承。润滑油在轴承中形成油膜,起到润滑与冷却作用后,依靠重力或回油泵返回油箱,完成循环。系统中设置有溢流阀以稳定油压,低油压联锁保护装置则确保在油压异常时能自动启动备用泵或紧急停机,保障设备安全。

### 1.2 系统主要性能参数

评价汽轮机润滑油系统性能的关键参数主要包括:润滑油压、润滑油温、油流量与清洁度。润滑油压是确保形成足够厚度油膜、克服轴承阻力将油送达各润滑点的直接动力,其值需严格维持在设计范围内,过高易导致漏油,过低则可能造成供油不足。润滑油温直接影响油的粘度和润滑效果,温度过高会加速油品氧化、降低粘

度、破坏油膜;温度过低则粘度过大,增加启动阻力与摩擦。油流量需满足所有润滑点的冷却与润滑需求<sup>[1]</sup>。油清洁度通常以颗粒度等级(如NAS标准)和水分含量衡量,不洁的润滑油会导致滤网堵塞、部件磨损加剧。这些参数相互关联,共同决定了系统的运行状态与可靠性。

### 1.3 系统在火电厂中的重要性

汽轮机润滑油系统被誉为汽轮发电机组的“血液循环系统”,其重要性不言而喻。它不仅直接关系到汽轮机转子-轴承这一核心旋转部件的安全,防止因润滑失效导致的金属直接接触和磨损,还承担着带走轴承摩擦热和部分转子传导热的关键冷却功能。一旦系统故障,如供油中断或油质恶化,将在极短时间内引发轴承巴氏合金熔化(烧瓦),造成大轴颈磨损、转子下沉、动静部分摩擦等恶性事故,迫使机组非计划停运,修复周期长、经济损失巨大。此外,油系统泄漏还存在火灾安全隐患。因此,该系统的可靠性是火电厂实现安全、稳定、长周期运行的基础前提之一。

## 2 火电厂汽轮机润滑油系统故障模式分析

### 2.1 故障数据收集与整理

开展有效的故障模式分析,必须建立在全面、真实的故障数据基础之上。数据收集渠道主要包括:电厂设备管理信息系统中的维修工单与历史记录、运行日志中的异常报警与参数记录、定期油液分析报告、设备解体检查报告以及行业同类型机组的故障案例汇编。收集的数据需进行系统化整理,内容应涵盖故障发生时间、设备部位、故障现象(如油压下降、油温升高、异响等)、直接原因(如泵损坏、滤网堵、管道漏)、根本原因(如磨损老化、维护不当、设计缺陷)、处理措施及停机时间等。通过对这些历史数据进行统计、归类与趋势分析,可以识别出高频故障部件和共性失效模式,为后续的深入分析提供数据支撑。

## 2.2 常见故障模式分类

根据故障发生的部件与性质,可将汽轮机润滑油系统常见故障模式归纳为以下几类:(1)油泵故障,包括主油泵驱动端故障(如主轴带动的小齿轮断齿)、电动辅助油泵电机烧损、泵体内部磨损导致出力不足等;(2)油压异常,表现为系统油压过低或波动大,原因可能涉及油泵故障、溢流阀设定不准或卡涩、系统存在泄漏、滤网堵塞导致阻力增大等;(3)油温异常,油温过高通常由冷油器换热效率下降(结垢、堵塞)、冷却水量不足或冷却水温高引起;油温过低则可能发生于机组启动阶段或环境温度极低时<sup>[2]</sup>;(4)油质劣化,包括水分超标(轴封漏汽、冷油器泄漏)、颗粒污染(磨损产物、外部侵入)、油品氧化酸值升高,导致润滑性能下降和部件腐蚀磨损;(5)部件机械故障,如管道振动开裂导致漏油、阀门卡涩或内漏、轴承箱油档磨损间隙过大等。

## 2.3 基于故障树的故障模式分析

故障树分析是一种自上而下的演绎分析方法,适用于复杂系统的故障逻辑关系研究。以“汽轮机轴承供油中断”这一项上事件作为顶事件进行构建。一级中间事件可包括“主油泵供油失败”、“备用泵未能自启”、“系统严重泄漏”和“滤网完全堵塞导致油路阻断”等。进而逐级向下分解,例如“主油泵供油失败”可分解为“驱动故障”、“泵本体故障”和“入口油源中断”;“驱动故障”又可细分为“小齿轮断齿”、“联轴器损坏”等底事件。通过构建这样的逻辑树,可以清晰地展示导致顶事件发生的所有可能路径及其逻辑关系(与门、或门)。分析故障树有助于识别系统的薄弱环节(最小割集),量化各底事件对顶事件发生的贡献度(重要度分析),从而为制定针对性的预防措施和优化保护逻辑提供理论依据。

## 3 火电厂汽轮机润滑油系统可靠性评估

### 3.1 可靠性基本概念与指标

可靠性是指产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。针对汽轮机润滑油系统,常用的可靠性量化指标包括:(1)可靠度 $R(t)$ ,系统在时间 $t$ 内无故障工作的概率;(2)平均无故障工作时间(MTBF),对可修系统,指相邻两次故障之间的平均工作时间,是衡量其运行稳定性的关键指标;(3)平均修复时间(MTTR),发生故障后恢复至可用状态所需的平均时间,反映维护效率;(4)可用度 $A$ ,系统在长期运行中处于可用状态的时间比例, $A = MTBF / (MTBF + MTTR)$ ;(5)故障率 $\lambda(t)$ ,工作到某时刻尚未故障的产品,在该时刻后单位时间内发生故障的概率。对于润滑油系统这样的可修复复杂系统,通常关注其稳态可用度和MTBF。

### 3.2 可靠性建模方法

对润滑油系统进行可靠性建模,旨在用数学模型描述其各部件之间的功能关系及对系统整体可靠性的影响。常用的方法有可靠性框图法和马尔可夫状态转移法。可靠性框图法根据系统的功能逻辑(串联、并联、混联等)将各部件连接起来。对于润滑油系统,通常将主油泵、辅助油泵(交流、直流)、冷油器、滤网等关键部件,按其在实际供油流程中的功能关系构建RBD模型。例如,主油泵与辅助油泵在供油功能上通常构成热备用并联关系;而油泵、冷油器、滤网等在油路中多为串联关系。马尔可夫法则更适用于描述带有冗余、切换和修复过程的动态系统,通过定义系统各种状态(如正常运行、主泵故障辅泵运行、全部泵故障等)及状态间的转移率(故障率、修复率),求解稳态概率以获得系统可用度等指标<sup>[3]</sup>。

### 3.3 系统可靠性计算与分析

基于构建的可靠性模型(如RBD)和收集到的各部件的可靠性数据(故障率 $\lambda$ 、修复率 $\mu$ ),可以进行系统级的可靠性定量计算。对于串联部分,系统可靠度为各部分可靠度之积;对于并联冗余部分,系统不可靠度为各部分不可靠度之积。通过计算,可以得到整个润滑油系统的可靠度函数、MTBF、稳态可用度等关键指标。将计算结果与行业标准或设计期望值进行对比分析,可以客观评价当前系统的可靠性水平。例如,计算可能揭示虽然单台泵的MTBF较长,但由于冗余配置或切换装置存在单点故障,导致系统整体可用度并未达到预期。这种量化分析为识别系统可靠性瓶颈提供了科学依据。

### 3.4 可靠性敏感度分析

可靠性敏感度分析用于研究系统可靠性指标对各部件可靠性参数变化的敏感程度。通过计算可靠性指标(如系统可用度)关于某个部件故障率或修复率的偏导数,可以得到该部件的敏感度系数。敏感度系数高的部件,其可靠性的微小改善会对系统整体可靠性产生显著的提升效果;反之,则影响较小。例如,分析可能表明,系统可用度对直流事故油泵的故障率最为敏感,因为它是最后的备用屏障;或者对冷油器的修复时间非常敏感,因为其故障可能导致系统被迫降负荷运行。敏感度分析指导维修资源和管理重点的优化配置,应将更多精力投入到对系统可靠性影响最大的“关键少数”部件上,从而实现资源约束下系统可靠性的最大化提升。

## 4 火电厂汽轮机润滑油系统可靠性提升措施

### 4.1 设备选型与优化

从源头上提升可靠性,需重视设备的选型与系统优化设计。在新建或改造项目中,应优先选择技术成熟、

业绩优良、故障率低的设备，如采用高效耐磨的螺杆泵或离心泵作为油泵，选用高效板式或管壳式冷油器。在系统设计上，考虑更高的冗余配置，例如交流辅助润滑油泵和直流事故油泵应采用独立电源，且容量均能满足机组安全停机需求；重要油压监测点应设置双重或三重变送器；供油母管可考虑环形布置，提高供油可靠性。对现有系统，可针对故障高发部件进行优化改造，如将老式的针形调节阀更换为更可靠的调节型阀门，对振动大的管道进行加固或更换。

#### 4.2 设备维护与保养策略

实施以可靠性为中心的维护策略是提升运行可靠性的核心。根据设备重要性和故障模式，制定差异化的维护计划。对于主油泵、直流油泵等关键设备，应严格执行定期解体检修，检查齿轮、轴承、密封的磨损情况。对冷油器，定期进行反冲洗或化学清洗，保证换热效率<sup>[4]</sup>。推行状态检修，利用振动监测技术监测油泵轴承状态，利用红外热成像检查管道与阀门泄漏、轴承温度分布。建立完善的预防性维护数据库，记录每次维护内容、发现的问题及更换的部件，通过数据分析优化维护周期和内容，变定期检修为预知检修。

#### 4.3 油质管理与控制

保持润滑油优良的物理化学性能是保障系统可靠运行的基础。必须严格执行油质监督规程，定期（如每月）取样化验，监测粘度、水分、酸值、颗粒度等关键指标。在线油质监测装置（如水分、颗粒传感器）可提供实时数据。强化油系统的密封，防止汽水渗入。保证滤油设备（如精密滤油机、离心式净油机）连续或定期投运，及时清除油中杂质和水分。补充新油时必须进行过滤和化验，确保与在用油品兼容。根据油质化验结果，严格执行油品报废和更换标准，杜绝润滑油超期服役。

#### 4.4 系统监控与故障诊断技术

提升智能化监控与诊断水平是实现早期预警和精准干预的重要手段。在传统DCS监控基础上，部署专门的润滑油系统状态监测与故障诊断平台。该平台整合油压、油温、油位、油泵电流、轴承温度等多源实时数据，利用大数据分析和机器学习算法，建立设备正常运行的状态

基线。通过实时数据与基线的对比，以及趋势分析，实现异常状态的早期预警（如油压缓慢下降趋势）。进一步发展智能诊断功能，当发生异常时，系统能根据故障树和专家知识库，自动推理并提示最可能的故障原因及处理建议，极大缩短故障判断和处理时间。

#### 4.5 人员培训与管理

人员的技能和责任心是所有技术措施能否落地的最终保障。应定期对运行和维护人员进行系统的培训，内容涵盖润滑油系统原理、设备结构、操作规程、常见故障处理、应急预案演练以及新技术应用等。特别要强化“小缺陷不过班”的责任意识，加强对巡检质量的要求，确保能及时发现跑冒滴漏、声音异常、参数漂移等初期问题。建立完善的考核与激励机制，将设备可靠性指标与相关人员绩效挂钩。同时，规范技术档案管理，确保图纸、规程、检修记录完整准确，为系统的长期可靠运行提供持续的知识支持和管理支撑。

#### 结束语

汽轮机润滑油系统可靠性是火电厂安全的重要保障。本文系统分析常见故障模式，用可靠性工程方法定量评估与敏感度分析，找出影响稳定运行的关键因素。研究发现，提升其可靠性需从设计选型、维护、油质管控、智能监控、人员素质等多维度协同推进，所提措施涵盖技术与管理层面，构建全方位保障体系。未来，随着状态监测、大数据、人工智能技术深入应用，润滑油系统运维模式将更智能、精准、高效，为火电厂安全经济灵活运行提供坚实支撑。

#### 参考文献

- [1]蔡德军.火电厂汽机润滑油系统故障诊断及处理技术研究[J].模型世界,2025(3):162-164.
- [2]陈智,马春,王海飞,彭登明,沈国栋,杨圣超,叶明君,夏琦.汽轮机润滑油在线监测系统的设计与应用[J].内燃机与配件,2023,(22):60-63.
- [3]王妍飞.某电厂汽轮机润滑油压低缺陷分析与处理[J].电站系统工程,2023,39(06):37-38+42.
- [4]滕鲁.火电厂汽轮机润滑油系统常见故障及油质提升改造[J].设备管理与维修,2024(18):115-117.