

机务设备润滑系统优化与磨损控制技术研究

胡玉明

中电建湖北电力建设有限公司，湖北武汉，430060；

摘要：机务设备稳定运行依赖润滑系统与磨损控制技术的协同作用，其核心目标是降低设备故障概率、延长使用寿命。本文先分析机务设备润滑系统现存的共性问题与磨损产生的核心诱因，明确优化与控制的核心方向；再从润滑系统的介质选择、结构设计、运行监测等三方面阐述优化路径，同时对应提出磨损控制的预防性、运行中、修复性技术手段；最后总结两类技术的协同逻辑与应用价值，为机务设备运维效率提升提供技术参考。

关键词：机务设备；润滑系统优化；磨损控制；润滑介质；设备运维

DOI: 10.64216/3080-1508.26.01.075

引言

机务设备是工业生产和交通保障的核心支撑。它的运行状态，直接影响整体作业效率和安全。在影响设备运行稳定性的因素内，润滑系统的效果和设备磨损是关键的问题。现在，润滑系统常出问题，导致润滑效果不佳。一是润滑介质选型不恰当，二是系统结构和设备工作情况不匹配，三是运行时没法实时监测。这些问题加在一起，让润滑系统效率降低。同时，设备运动部件之间总会摩擦。如果摩擦因素未控制好，导致磨损严重甚至损坏。磨损会缩短部件使用寿命，增加更换次数和成本，还会发生骤然故障，导致设备运行骤停，造成更大损失。所以，要找润滑系统的优化方法，结合实际工作情况，做好磨损控制。

1 机务设备润滑系统现存问题与磨损诱因分析

1.1 润滑系统现存共性问题

润滑系统的状态，受介质、结构、监测三个方面影响。现在的问题，也主要在这三点，而且很多设备都有类似情况。第一，选润滑介质时，没针对性。设备运动部件的材质不同，承受的负荷不一样，工作温度也有差别。选介质时，未考虑这些情况，导致介质性能不足。比如，介质粘度太高或过低，抗氧化、抗磨能力不够。最后要么油量过多，增加运行成本；要么油量不足，摩擦损伤设备。第二，润滑系统的结构设计有缺点。油路布局不合理，油质流动时阻力大，油量分布不合理。特别是多个设备联合运行的时候，关键部件的油量难得做到恰到好处。第三，润滑系统运行时，没法实时看。要知道油质是否洁净、粘度是否乳化、供油压力波动变化，只能通过定期停机检查。这样一来，系统出现问题

未能及时发现，错过了最佳维护时期，最后导致设备故障。

1.2 设备磨损核心诱因

设备部件磨损，根本原因是运动部件之间的摩擦。磨损的原因主要有三类，而且都与润滑系统的运行情况有关。第一类，润滑防护未做好，导致其接触面直接磨损，这也是最主要的原因。润滑系统的作用，是给部件摩擦面注入油量，形成油膜。如果系统供油量不足，或者油质选型不恰当，就无法形成稳定的油膜。若未形成油膜，金属部件就会干磨或半干磨，进而造成部件损坏。第二类，工作环境让磨损加剧。许多机务设备在超负荷、高温、满目尘灰的环境下工作，这些都会加重磨损。超负荷，部件间油压增大，油膜容易破，润滑效果逐减；温度高，油质粘度会下降，油膜不稳定，部件本身性能降低；在灰尘飞扬的环境下，杂质将会进入摩擦面，将会导致设备运行的接触面磨损严重甚至损坏。第三类，部件材质不合格或装配不适，都会引发磨损加剧。一方面，部件材质硬度及耐磨系数不达标，，正常运行时也会缩短使用寿命。另一方面，组装部件时，间隙过大或安装时偏斜，都会造成运行时受力不均，从而造成局部磨损严重。若未及时处理这种情况，长时间运行后将会造成整个部件无法使用，严重时将会造成其设备报废。

2 机务设备润滑系统优化路径

2.1 基于工况的润滑介质优化选择

润滑介质作为润滑系统的核心功能载体，其选型科学性直接决定润滑效能发挥，需以设备实际工况为核心依据，实现介质性能与摩擦副需求的精准匹配，最大化提升润滑保护效果。依据摩擦副材质优化选型：针对钢

制摩擦副，因其运行中摩擦载荷大、易出现金属直接接触，优先选用抗磨性能优异（抗磨指数达标）的润滑介质，依托介质中抗磨添加剂的作用，增强油膜承载能力，即便在冲击载荷下，仍可避免油膜破裂，防止摩擦副发生黏着磨损。针对铜及铝合金材质摩擦副，需严格规避含硫、磷元素的润滑介质，此类元素易与铜、铝合金发生化学腐蚀反应，导致摩擦副表面损伤、使用寿命衰减，保障材质稳定性与润滑有效性。结合设备工况参数优化选型：设备处于重负荷工况时，选用高黏度润滑介质，可形成厚度充足的油膜，满足重载下的承载需求，避免摩擦副失效；处于高温工况时，选用具备优异抗氧化性与热稳定性的润滑介质，防止介质高温变质、黏度衰减，确保润滑性能稳定；处于低速工况时，选用低黏度润滑介质，降低流动阻力，提升介质到达摩擦面的速率，保障润滑及时性与有效性。

2.2 润滑系统结构的适应性优化

优化润滑系统结构，要围绕三个目标：精准润滑、污染控制、减少浪费。还要结合设备部件的位置，调整结构，让结构符合设备需求。优化油路设计，关键实现定时、定量的精准供给。可以用多路供油的方式，给轴承、齿轮这些关键部件，改装一路单独油管。每条油路上装流量阀，通过每路油管需安装伺服阀或流量控制阀、调节阀等控制油量。这样就不会有的部件供油不足或过量。另外，管道口径适中及布局走向，减少管道折弯，增加介质流速，减少管阻，更换管材。优化过滤装置，关键是拦住杂质。选用多级高精度过滤器。滤芯要选耐油、耐磨的材料，能用得久一些，不用经常换。还要增加设置过滤器前后压差装置，定期更换滤芯，防止油质杂物过多影响设备部件运行效果。

2.3 润滑系统运行监测机制优化

润滑系统运行监测机制的优化，核心在于构建“实时感知-精准预警-数据驱动”的管控体系，实现系统运行状态的动态监测与异常工况的及时识别，避免故障扩大化，保障润滑效能持续稳定。一方面，构建多参数实时传感监测网络，实现关键指标的精准采集。在润滑系统油路中布设黏度传感器与污染度传感器，实时采集润滑介质黏度变化值及介质中固体颗粒污染物含量，预设各参数的阈值范围，当监测值超出阈值时，系统自动触发声光预警，提示介质性能衰减或污染超标。同时，在供油管路及摩擦副润滑点布设压力传感器，实时监测供

油压力参数，精准识别超压（易引发管路泄漏、油膜破裂）与欠压（易导致润滑不足、摩擦副润滑失效）工况，确保供油压力处于设计合规区间，及时捕捉压力异常并预警。另一方面，搭建数据传输与分析体系，实现监测数据的高效利用。通过工业总线或无线传输技术，将各传感器采集的实时数据无延迟、无丢失传输至中央控制终端，避免数据传输断层。控制终端搭载数据处理与分析模块，不仅可实时显示各监测参数的当前数值，还能通过趋势分析算法，对参数变化规律进行研判，评估润滑系统运行稳定性，预判潜在故障风险，实现“不停机在线监测”，既避免监测对设备作业的干扰，又可提前识别故障、制定维修方案，提升故障处置时效性。

3 机务设备磨损控制关键技术

3.1 预防性磨损控制技术

预防性磨损控制以“事前防控”为核心，聚焦设备装配环节与摩擦副前期防护，从源头降低磨损发生概率，实现磨损的前置管控。在设备装配环节，需落实两项关键管控措施：一是严格控制摩擦副装配间隙，根据摩擦副运动形式（旋转、往复）及设备运行参数，通过计算与试装确定合规的装配间隙范围，避免间隙超差引发磨损——间隙过大易导致摩擦副运行时产生径向跳动，造成局部载荷集中、磨损加剧；间隙过小则会增大运动阻力，引发摩擦副干摩擦倾向，加速表面磨损。二是保障装配环境与过程的洁净度，装配前对作业环境、工装工具进行彻底清洁，去除粉尘、金属碎屑等杂质；装配过程中采取防护措施，避免杂质附着于摩擦副表面或进入摩擦间隙，从装配源头杜绝杂质诱发的磨粒磨损。在摩擦副表面防护环节，通过表面改性与涂层技术提升耐磨损性：其一，采用化学表面处理技术，对金属摩擦副实施渗碳或氮化处理——渗碳处理可提升摩擦副表面碳含量，增强表面硬度与抗咬合能力；氮化处理能在摩擦副表面形成致密的氮化层，兼具高耐磨性与耐腐蚀性，有效提升摩擦副表面抗磨性能。其二，采用表面喷涂技术，将耐磨材料（如陶瓷、金属基复合材料）通过热喷涂或冷喷涂工艺涂覆于摩擦副表面，形成耐磨防护涂层，实现摩擦副本体与杂质、摩擦载荷的隔离，减少本体磨损，延缓摩擦副早期失效。

3.2 运行中的磨损控制技术

运行阶段的磨损控制需与润滑系统协同联动，构建

“润滑适配调控+摩擦状态实时监测”的双重管控模式，抑制磨损加剧，保障设备运行可靠性。一方面，基于润滑系统监测数据，动态调控设备运行参数与润滑补给策略，实现润滑效能与磨损防控的适配。通过润滑系统监测数据（介质污染度、供油压力、介质黏度），判断润滑状态优劣——若监测到介质污染度超标，需立即执行换油作业，排空废油并加注合规新介质，避免磨粒随介质循环加剧摩擦副磨损；若监测到供油压力异常（超压/欠压），需优先排查管路堵塞、流量阀故障、管路泄漏等问题，修复后恢复供油压力至合规区间，确保摩擦副获得充足、稳定的润滑，杜绝润滑不足诱发的磨损恶化。另一方面，采用摩擦状态实时监测技术，及时捕捉磨损加剧信号并处置。在设备关键摩擦副上布设振动传感器与温度传感器：振动传感器实时采集摩擦副振动频率，正常磨损阶段振动频率处于稳定区间，若振动频率骤升，多为摩擦副表面磨损加剧或间隙超标所致；温度传感器实时监测摩擦副表面温度，正常运行时温度维持在合理范围，若温度骤升，多因油膜破裂引发干摩擦或磨损加剧导致热量积聚。当传感器监测到参数异常时，立即触发停机预警，通过拆解检查或无损检测技术，确定磨损部位与磨损程度，及时开展维修更换，避免磨损扩散引发摩擦副失效，降低故障损失。

3.3 修复性磨损控制技术

修复性磨损控制具有明确的应用边界，主要针对“局部轻度磨损、未发生结构性失效”的摩擦副，核心是通过专业修复技术实现磨损部位的性能与尺寸恢复，而非直接更换摩擦副，在保障设备运行可靠性的同时，降低运维成本与备件消耗。依据磨损形态及部位差异，可分为两类针对性修复技术，实现磨损问题的精准处置。其一，针对摩擦副表面微划痕、局部浅磨损，采用激光熔覆技术开展修复。该技术以高能量密度激光为热源，将预设的耐磨合金粉末精准输送至磨损区域，激光作用下，耐磨合金粉末快速熔化，同时摩擦副磨损表面表层金属发生微熔，二者形成冶金结合，冷却后凝固形成致密耐磨涂层。该涂层与基体结合强度高、无明显界面缺陷，不仅可填补表面划痕与凹陷，恢复摩擦副表面平整度，且因涂层采用耐磨合金材质，其表面硬度与抗磨性能相较于基体更优，可实现摩擦副耐磨性的提升与寿命延长。其二，针对运动副（如轴颈-轴承、齿轮-齿轮轴）

磨损导致的配合间隙超差，采用电刷镀技术开展修复。运动副配合间隙需严格符合设计要求，间隙超差易引发运行时载荷分布不均、径向跳动增大，进而导致油膜破裂、磨损加剧。电刷镀技术修复时，以待修复磨损件为阴极，含特定金属离子的镀液为电解质，裹有镀棉的镀笔为阳极，蘸取镀液后在磨损表面按预设轨迹移动；通电后，镀液中金属离子在电场作用下沉积于磨损表面，逐步形成均匀金属镀层。通过精准控制通电参数（电流密度、通电时间）与镀笔运动参数（移动速度、轨迹），可实现镀层厚度的精准调控，将磨损后尺寸衰减的部件恢复至设计尺寸，使运动副配合间隙回归合规区间，保障运动副配合精度与润滑稳定性，抑制磨损进一步发展。

4 结语

机务设备润滑系统优化与磨损控制，是保障设备长期稳定运行的核心技术体系，二者存在协同互补关系：润滑系统优化为磨损控制提供基础支撑，通过润滑介质工况适配、系统结构优化及运行监测完善，实现摩擦副的精准润滑，从源头减少磨损诱因；磨损控制技术则构建全周期防护体系，弥补润滑系统的效能局限，通过预防性、运行中、修复性技术的联动应用，全阶段抑制磨损发展。通过基于设备工况优化润滑介质选型与润滑系统结构、构建多参数实时监测机制，可显著提升润滑系统的运行稳定性与润滑效能；结合摩擦副装配管控、表面改性技术形成预防性磨损控制，依托润滑协同调控与摩擦状态监测实现运行中磨损抑制，通过激光熔覆、电刷镀技术开展修复性处置，可构建完整的磨损控制体系，有效降低磨损程度、延长摩擦副使用寿命。两类技术的融合应用，不仅能大幅降低机务设备故障发生率、减少运维成本与备件消耗，更能提升设备整体运行效率与作业可靠性，为交通运输、工业制造等领域机务设备的稳定作业提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 钟婷. 黏着-变形-流体动压摩擦磨损理论及实践 [R]. 2024世界润滑技术大会, 2024.
- [2] 张封廷. 超低温摩擦界面演变与分子滚动润滑机理研究获进展 [R]. 微信公众平台(腾讯网), 2024-07-17.
- [3] 吴江河. 超快激光微纳制造材料微观结构演变规律研究取得进展 [R]. 清华摩擦学国家重点实验室 2022-04-20.