

采油设备故障诊断技术现状与改进分析

李超

长庆油田分公司第五采油厂冯地坑采油作业区 陕西 榆林 718615

【摘要】：针对采油机械设备在高温高压工况下故障风险突出、现有监测技术覆盖不足及诊断响应滞后等问题，系统梳理了声发射、振动、温度等状态监测技术的适用边界与性能短板。从传感器部署优化、自适应降噪算法应用、无线测温改造等维度提出技术改进路径，重点探讨油液分析智能化集成、无损探伤精准应用及超声-射线协同诊断等关键措施。结合人工智能神经网络辅助诊断机制，构建覆盖数据采集、特征提取、故障定位与运行保障的综合技术体系，为提升复杂工况下采油设备故障识别的准确性与实时性提供技术支撑。

【关键词】：采油机械设备；状态监测；故障诊断；无损探伤；智能诊断

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.079

引言

油田开采工况复杂恶劣，采油机械设备长期处于高温、高压及易燃易爆环境，运行可靠性直接决定油田生产安全与整体效益。目前，声发射、振动监测、油液分析等故障诊断技术虽已在采油现场初步应用，但设备故障隐患仍较为突出。传统监测手段对复杂现场环境适配性不足，诊断反馈滞后，易造成维修成本增加。本文结合工程实际，梳理各类采油设备故障诊断技术的原理特征与应用短板，从硬件改造、算法优化、多技术融合协同层面制定优化策略，以此强化故障诊断的全面性与精准性，为油田设备稳定高效开采提供技术支撑。

1 采油机械设备故障诊断技术现状与应用问题

1.1 高温高压环境下设备故障风险突出

油田采油作业开展阶段，各类机械装置长期置身高温高压叠加易燃易爆介质的复杂工况，恶劣外界条件持续催化构件材质老化衰变，金属基体力学性能逐步衰减，密封结构极易产生形变及功能损耗^[1]。各类承压容器、输送管路与钻采装置常态承载高压负荷，环境温升会改变润滑介质粘稠度与化学属性，运动构件摩擦损耗持续加剧。运行参数脱离标准区间后，局部热量堆积与压力集聚易诱发构件破损、介质泄漏，还会衍生恶性安全事故。高温高压带来的损耗具备缓慢累积特质，常规现场巡查难以捕捉初期隐患。工况异常引发的振动异响、温度波动得不到及时把控，装置整体结构会产生永久性损伤，复杂工况催生监测诊断技术朝着高精度、实时化方向升级，也为油田现场安全生产筑牢基础。

1.2 现有监测手段难以全面覆盖复杂工况

在采油机械设备实际运行中，高温、高压、易燃易爆等极端工况普遍存在，设备结构复杂、运行环境多变，现有监测手段在覆盖广度与适应能力方面存在明显不足。噪声监测技术受现场环境干扰较大，不稳定的声场条件会导致信号采集失真，影响运行状态的准确判断。振动监测技术虽然能够反映设备频率与幅值变化，但在低转速或非稳态工况下，特征提取能力有

限，难以识别早期微弱故障。温度监测技术依赖于接触式传感器，信号在长距离传输过程中易衰减，且在封闭或高危部位难以布置测点，造成监测盲区。声发射技术对压力容器和管道的检测效果较好，但设备成本较高，现场部署灵活性不足，难以实现对多类型、分散布置的采油设备进行全覆盖、连续性的状态监测。

1.3 故障诊断响应滞后导致维修成本上升

当前采油机械故障诊断实操环节里，诊断响应迟缓，持续推高现场运维投入成本。采油装置长期适配高温高压连续作业模式，早期隐患仅体现为振动、异响、温变等微弱参数波动。传统诊断模式依托人工定时巡查与离线取样检测，采集信号还要经过多层处理流程，才可完成设备状态研判与故障点位锁定。整套流程消耗大量时间，异常现象出现至检修落实存在明显间隔。持续荷载作用会放大初期磨损、构件裂隙、润滑不足等轻微问题，逐步演化成构件损毁乃至全线停工。隐患持续恶化增加人工耗材与停产损耗，应急检修额外消耗检测物资及运输开支。滞后处置还会放大故障影响范围，简单维保即可修复的设备问题，最终转为大范围拆解更换作业，运维开支随之失去合理调控空间。

2 采油机械设备状态监测技术的主要改进方向

2.1 声发射与噪声监测技术的适应性提升

声发射监测手段应用于压力容器及管道缺陷检测具备良好的感知性能，复杂油田作业场景会限制该类技术实际适配水平。行业现有实践多围绕大型装置周期性检测开展，连续运行状态下的动态监测环节存在明显覆盖缺口^[2]。野外采油场地布局零散，线路布设存在现实阻碍，轻量化便携采集设备研发可贴合现场特殊作业条件。油田现场各类机械运转及气候变化会催生复杂背景干扰，固定参数分析模型很难维持稳定判别效果，自适应降噪算法搭配多通道信号捕捉及环境智能划分模式，可剥离混杂干扰信号，依托标准化噪声特征数据储备完成动态阈值调控，强化监测体系环境耐受能力，传感器排布方案

与信号分析模式的完善，能够强化设备早期隐患识别效能，契合油田设施长效监测的实际发展诉求。

2.2 振动监测参数分级与频率分段优化

振动监测体系内振幅层级划分与频段划分，直接左右机械故障诊断精准程度。位移指标适配低频运行工况，机械转速处于 600r/min 及以下区间，结构刚性损伤逐步凸显，位移波动变化可直观体现设备本体形变状态。速度指标适配中频运行区间，转速维持大于 600 r/min 且小于 120000 r/min 范围，构件疲劳损耗成为核心失效形式，速度波动状态可精准反映部件长期损耗积累情况。加速度指标适配高频运转环境，超高转速工况下惯性力损伤持续加剧，对应波动变化可敏锐捕捉高频冲击带来的振动信号。机械故障类型存在差异化特征，振动监测可依托频段差异设置分级预警标准，低频关注位移累积变化，中频把控速度指标波动，高频紧盯加速度峰值波动，各类监测参数与运行频段形成适配搭配，帮助精准判定设备损伤诱因与受力特点，强化油田机械运行状态研判的实际价值。

2.3 温度监测无线化与封闭环境适用性改造

传统温度监测依托有线传输模式开展大型采油机械检测，远距离信号传输易出现持续衰减，最终造成测温数据出现偏差。石油钻采类大型设备作业范围广，现场施工条件复杂，有线布设模式暴露诸多应用短板，密闭腔体结构内部的温度捕捉同样存在技术阻碍，密闭空间散热条件受限，监测点位布设空间不足，关键构件温度动态变化难以完整捕捉。无线测温设备可突破有线传输距离限制，借助射频、蓝牙等通信模式完成数据实时输送，小巧的硬件结构支持复杂密闭区域灵活布设，深入轴承座、变速箱壳体等隐蔽位置完成数据采集。无线监测硬件测量精度存在固有短板，多次采样均值处理搭配节点滤波算法优化，可剔除异常数据波动，弱化随机误差带来的干扰，让现场温度监测数据保持稳定输出质量。

3 采油机械设备故障诊断技术的关键改进措施

3.1 油液分析技术智能化与在线诊断集成

油液分析技术核心改进方向为打造智能化在线诊断集成系统。传统模式依靠离线采样与实验室检测，存在时效滞后、无法实时反映设备运行状态的短板。在采油设备润滑系统加装在线油液传感器，可对油液粘度、水分、酸值、磨粒浓度等关键指标开展不间断监测^[3]。监测数据实时上传智能诊断平台，依托优化铁谱分析算法、磨粒识别与智能监控技术完成数据分析，自动记录磨粒形态、尺寸及分布特征，并联动历史数据横向比对。一旦油液参数超标或检测到异常磨粒，系统即刻发出预警，精准判别故障类型与发生位置。该模式将周期性抽检升级为全天候连续监测，弥补传统技术难以预判突发故障的不足。同时简化数据处理流程，提升监测效率与诊断精度，全面实现采油机械润滑系统全生命周期运维管控（见图 1）。

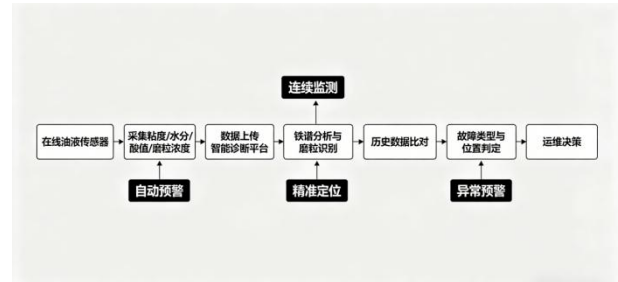


图 1 油液智能化在线诊断集成系统工作流程图

3.2 无损探伤技术在金属与非金属部件中的精准应用

针对采油机械设备中金属与非金属部件的不同特性，无损探伤技术需实现精准化应用。对于金属部件，磁粉检测技术利用铁磁效应原理，通过识别磁场畸变形成的漏磁场分布，能够准确发现表面及近表面的裂纹、气孔等微小缺陷，尤其适用于高压容器和管道的检测。涡流检测技术则基于电磁感应原理，分析导电部件内涡电流的变化规律，可快速定位金属结构内部的材质不均匀或疲劳损伤。对于非金属部件或复合材料，渗透检测技术采用高渗透性液体浸润被检测表面，依据毛细管原理使液体渗入细微缝隙，再通过显像剂吸出并分析缺陷形态。超声检测技术利用超声波在被检测材料中的反射与散射特性，能够穿透非金属部件内部，精准评估其结构完整性和力学性能变化。射线检测技术通过超强穿透力识别部件内部的密度差异，适用于金属与非金属部件的深层缺陷诊断，确保检测结果全面可靠。

3.3 超声与射线诊断技术对内部结构检测能力的强化

超声诊断技术通过向采油机械设备内部发射高频超声波，利用其不同介质界面发生的反射与散射特性，能够精准识别金属及非金属部件内部的裂纹、气孔及不均匀组织结构。该技术针对复杂力学结构部件，如高压容器壁、焊接接头及转轴等，实现了非侵入式的深层检测，避免了传统外力检测造成的二次损伤。射线诊断技术则凭借其强穿透能力，可清晰呈现设备内部如锻造不均匀或表面微小气泡等隐蔽缺陷，尤其适用于金属部件内部质量评估。两者结合应用时，超声技术擅长检测面状缺陷和壁厚变化，射线技术则对体积型缺陷和内部结构完整性具有可视化优势。在实际操作中，可根据检测对象选择互补方案：对于往复机械的曲轴、轴承等疲劳敏感部位，优先采用超声检测裂纹深度与走向；对于压力容器焊缝及铸件内部气孔、夹渣等问题，则利用射线成像记录缺陷形态与分布，从而全面强化对采油机械设备内部结构异常状态的诊断能力。

4 采油机械设备故障诊断技术运行保障与能力提升

4.1 智能系统与人工智能神经网络辅助诊断机制构建

智能系统整合多元传感元件，持续收集处理采油机械振动、温度、声发射及油液等多项运行参数，依托内置算法完成数据特征挖掘与态势研判，搭建设备运行状态动态基准。运行

参数偏离基准范围,设备运行异常状态便可快速识别并触发预警机制。神经网络搭建非线性映射模型,复刻复杂故障模式的辨识逻辑,三层网络架构分工完成多维信号接收、特征深度挖掘及诊断结果输出。海量历史故障样本持续训练模型体系,强化故障类型与特征参数的内在关联,陌生故障形态可依托特征匹配完成概率化判定^[4]。智能体系承担现场数据收集及前期规整工作,神经网络完成深层特征解析与类别判定,两类技术相互配合,搭建完整闭环辅助诊断体系,切实强化油田机械故障研判的综合效能。

4.2 不同诊断技术的协同应用与现场适配

现场作业环境复杂多变,单一诊断手段难以全面覆盖各类故障。振动监测可敏锐捕捉旋转构件异常,油液分析能精准判定摩擦副早期磨损,两者形成良好互补。高压容器与管道运维中,声发射技术快速筛查压力波动,超声检测完成厚度核验与内部缺陷排查。往复机械的轴承及齿轮箱可同步布置温度与振动传感器,以温度数据辅助验证负荷变化^[5]。停机检修窗口内,磁粉检测与渗透检测分别适用于铁磁性部件表层裂纹和非金属材料开口缺陷筛查,涡流检测则用于非铁磁性材料表层评估。各类检测手段需明确适用对象与优先级,避免重复或漏检,结合设备结构与故障历史制定标准化组合方案,降低误判与漏检带来的生产风险。

4.3 全员技术培训与岗位诊断能力强化

结合采油设备故障诊断技术实际应用需求,搭建分层级、

分岗位的全员专项培训体系。面向管理层,聚焦故障诊断系统数据解读与决策应用,强化依托监测报告研判设备风险等级的综合能力。针对一线运维人员,重点开展振动监测、油液分析、超声波检测等常规技术实操培训,设置模拟故障排查场景,规范信号采集、特征识别与故障定位全流程操作。动态更新培训内容,融入声发射、涡流、渗透检测等新型诊断技术。配套建立岗位能力考核机制,将故障诊断准确率、问题响应速度等纳入绩效考评,倒逼人员转变工作思维,实现主动分析研判。依托故障案例复盘与经验交流共享,持续完善典型故障特征资源库,推动个人实操经验转化为集体技术储备,全面提升全员设备状态识别与故障初步判定的专业水平。

5 结语

采油机械设备故障诊断技术正从单一参数监测向多技术协同、智能化分析方向持续发展。当前,声发射、振动、温度及油液分析等状态监测手段已在现场应用中展现出各自优势,但高温高压环境下的故障风险仍然突出,监测覆盖不足与诊断响应滞后的问题尚未完全解决。通过优化传感器部署方式、推动无线与自适应技术应用、引入智能系统与神经网络辅助决策,能够显著提升特征提取精度与故障定位效率。同时,加强不同诊断技术的协同配合,并围绕岗位需求开展全员技术培训,有助于将先进的诊断手段真正转化为现场可操作、可推广的能力体系,为采油设备的安全高效运行提供可靠保障。

参考文献:

- [1] 张军峰,张跃文,曹永.油田采油机械设备状态监测及故障诊断技术分析[J].中国设备工程,2022,(11):167-169.
- [2] 王若晗.采油机械设备状态监测与故障诊断技术[J].设备管理与维修,2021,(18):178-179.
- [3] 杨国庆.海上采油平台空压机高温故障诊断及排除方法[J].设备管理与维修,2024,(01):86-88.
- [4] 翟磊.人工智能在油田采油设备故障预测中的应用研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(09):117-119.
- [5] 郝宇飞.海上稠油热采设备常见故障分析及措施[J].石化技术,2024,31(11):291-293.