

炼焦机械液压系统故障诊断与智能维护策略

张 平

山西焦化股份有限公司 山西 临汾 041600

摘 要：炼焦机械在焦化生产中长期处于高温、高粉尘、高负荷的恶劣工况环境，其液压系统故障频发，严重影响设备作业率和安全生产。本文针对炼焦机械液压系统典型故障模式进行分析，系统阐述了基于状态监测的故障诊断方法，包括油液分析、振动检测、温度监控及压力波动分析等技术手段。在此基础上，提出了融合物联网感知、大数据分析与人智能算法的智能维护策略，构建了从数据采集、特征提取、故障识别到维护决策的完整技术框架。研究表明，采用智能维护策略可显著提升炼焦机械液压系统的可靠性，降低非计划停机损失，为焦化企业设备管理转型升级提供理论依据。

关键词：炼焦机械；液压系统；故障诊断；智能维护；状态监测

引言

炼焦机械是焦化生产线的核心装备，涵盖推焦机、拦焦机、熄焦车、装煤车等关键设备，其液压系统承担着执行机构驱动、位置控制、过载保护等重要功能。由于炼焦作业环境具有高温辐射、粉尘浓度高、振动冲击大、连续作业时间长等显著特点，液压系统面临着油液污染加速、密封老化加剧、元件磨损加快等严峻挑战。据统计，液压系统故障占炼焦机械总故障数的 40% 以上，由此引发的非计划停机不仅造成产量损失，还可能带来安全隐患。传统的液压系统维护主要采用事后维修和定期检修两种模式。事后维修虽然减少了不必要的维护操作，但突发故障导致的停机损失巨大；定期检修则存在“过修”与“失修”并存的弊端，难以实现维护经济性与设备可靠性的最优平衡。随着传感技术、工业物联网和人工智能的快速发展，状态监测与预测性维护成为液压系统故障管理的重要发展方向。

1 炼焦机械液压系统故障模式与机理

1.1 系统构成与工况特性

系统由动力（液压泵）、控制（阀组）、执行（缸/马达）、辅助（油箱、管路、过滤器、冷却器、密封件）元件及液压油组成，工作压力 16~31.5MPa，部分执行件需快速响应与精确定位。炼焦间歇作业导致频繁压力冲击与卸荷循环，叠加高温多尘环境，运行工况复杂。

1.2 典型故障模式分类与界定

运维中，据频次与后果将其分为两类：高频常规故障（概率高、危害可控，如过滤器堵塞、密封磨损）与高危突发故障（概率低、后果严重，如主换向阀卡滞、泵轴断裂），此为制定差异化监测策略的前提。按部位

分四类故障。（1）液压泵：常见输出不足、压力波动、噪声及内漏。高温促油液氧化，胶质物易拉伤柱塞泵滑靴/斜盘。配流盘磨损、容积效率下降属高频故障，可油液检测发现；轴承断裂、柱塞卡死属高危，需振动监测防护。（2）液压阀：推焦机主换向阀卡滞属典型高危故障（粉尘/严重污染致机械卡死，处置窗口极短）；溢流阀压力漂移、节流阀调节偏差属高频故障，可校准清洗恢复。（3）液压缸：活塞杆划伤致外漏属高频易查故障；密封/支撑环磨损致内漏属中等频次隐蔽故障；缓冲失效致末端冲击加剧，超限可致缸筒炸裂，属高危故障，需限制终端速度预防。（4）液压油与辅助元件：油液污染是“头号杀手”。过滤器堵塞频率最高，需每日/每周维护。冷却器效率下降致油温超 65℃属高频问题，长期未处将加速劣化，演变为高危隐患诱因。

1.3 故障演化规律与差异化监测特征

故障遵循“性能退化—异常征兆—功能失效”规律，但高频与高危故障演化时间尺度不同。高频故障（如压差上升、容积效率衰减）退化曲线平缓，连续监测油液颗粒计数、黏度、酸值及过滤器压差即可早期识别趋势，预留计划维护窗口。高危故障（如主阀卡滞、冲击超载）呈“潜伏期长、爆发期短”特征，纯趋势预警不足，须辅以冗余控制逻辑（如主阀芯位置反馈）、冲击振动峰值监测及定期性能测试（响应时间、缓冲行程测定），构建“趋势预警+安全阈值硬保护”双层架构，在失控前执行紧急泄压或急停，将高危风险隔离于安全边界内。

2 基于多源信息融合的故障诊断方法

2.1 振动与噪声检测

液压泵壳体振动信号包含丰富故障特征。轴向柱塞

泵可通过包络解调提取配流盘磨损的特征频率谐波；齿轮泵关注齿根裂纹引起的边频调制。测点布置于泵壳轴承位及阀块安装面，采样频率取特征频率的 5~10 倍^[1]。时域采用峰值、均方根、峭度判断冲击故障；频域结合小波包分解去除热噪声。

2.2 温度场监测

采用差动策略：在油箱、泵出口、冷却器进出口及阀组表面布置热电偶或红外传感器，通过相邻测点温差及变化率识别异常。泵出口温升异常预示内泄漏过大；冷却器进出口温差缩小表明散热衰减。

2.3 压力与流量特征分析

主油路压力波动反映调节环节动态特性。正常时溢流阀调压波动 ≤ 设定值 ±2%；阀芯卡滞或阻尼孔堵塞时压力呈高频尖峰或低频漂移。流量监测用涡轮或超声波流量计，通过理论流量与实际流量计算容积效率，该指标直接表征泵健康状态。

2.4 液压油与辅助元件

构建“在线监测 + 离线分析”两级油液检测体系。在线监测采用电感/电容式颗粒传感器获取颗粒浓度与粒径，配合水分传感器；离线定期进行光谱（Fe、Cu、Si 等）、铁谱（颗粒形态）及理化（黏度、酸值、闪点）测试。污染度依 NAS1638 或 ISO4406 判定，超标或关键元素增速异常时预警。同时监测滤油器压差（判断滤芯堵塞）、油箱油位（发现外漏）、冷却器效率（进出口温差）。

2.5 多源信息融合诊断策略

单一参数信息不完备且误报率高。采用数据级、特征级、决策级三层融合。特征级用主成分分析降维，结合支持向量机或随机森林分类；决策级用 D-S 证据理论合成各子诊断模块的置信度^[2]。如泵磨损故障综合油液铁含量升高、振动滑靴特征频率及壳体温度异常三个证据，有效区分磨损与油液黏度不当导致的压力波动。

2.6 典型故障梳理（分级）

表 1 典型故障梳理

故障部位	现象	诱因	现场风险	易发设备	等级
液压泵	压力不足、噪声大、温升	内部磨损、油污、吸油堵塞	执行元件推力不足，动作失效	推焦车、拦焦车	一般 → 重大（恶化）
液压缸	爬行、推力下降、外漏	密封磨损、活塞杆弯曲、油温过高	取门/提门失效	拦焦车、推焦车	一般
阀类	压力异常、卡滞	油污堵塞、阀芯磨损、电磁铁烧坏	系统失压停机	各系统	一般 → 重大（突然失压）
管路	外漏、破裂	高温老化、振动疲劳	喷油火灾风险	各系统管路	重大
冷却器	油温高、进出口温差小	结垢、水流量不足、风扇故障	加速元件磨损	液压站	一般
液压油	乳化、污染超标、酸值高	水分侵入、颗粒积累、氧化	全系统加速磨损	全部设备	一般 → 重大（严重污染）

分级说明：一般性故障可调整维修恢复，不直接威胁人身安全；重大安全类故障可能导致停机、失控、火灾或人员伤亡，需设联锁保护。

2.7 典型故障案例：推焦车取门液压系统压力异常

某焦化厂 6 号推焦车取门液压系统出现压力异常波动，经排查发现液压油严重乳化、污染度超标，导致换向阀阀芯卡滞、系统无法建立正常工作压力。通过更换液压油、清洗阀组并加强油液水分监测，故障得以排除。该案例凸显了油液品质管理在炼焦机械液压系统维护中的基础性地位。

3 智能维护策略框架

3.1 预测性维护技术架构

面向炼焦机械液压系统的预测性维护架构采用感知、传输、数据、分析、应用五层结构，并针对焦化车

间高温、多尘及钢结构密集的环境特点进行专项适配。感知层传感器均采用隔爆型与本安型设计，配以耐高温护套及辅助散热措施，确保高温区域安全运行；传输层以工业以太环网为主干，无线部分选用穿透力强的 Sub-1GHz 频段并合理增设中继节点，有效应对钢结构导致的信号衰减；数据层在边缘端完成预处理与特征提取，减少无效传输；分析层嵌入环境参数补偿模块，消除温度波动对故障特征的干扰；应用层采用分级报警策略，一般故障推送维修终端，重大安全类故障同时触发调度室声光报警，确保应急响应及时。整体架构在保障防爆与高温可靠性的同时，提升了复杂工况下数据采集、传输与诊断的稳定性。

3.2 基于数据驱动的剩余寿命预测

剩余寿命预测是智能维护的核心环节。对于炼焦机

械液压系统,可采用基于退化轨迹相似性的预测方法。首先,从历史全寿命数据中提取反映系统退化的健康指标(HI)。选取依据为:HI需同时具备物理可解释性(直接关联核心部件劣化机理)与监测可持续性(可在线获取),因此选用泵容积效率归一化值(反映摩擦副间隙增大导致的内泄漏加剧)和油液污染度对数变化率(反映磨损颗粒累积速率),二者在炼焦工况下单调性和趋势一致性较好。其次,运用指数平滑或高斯过程回归拟合HI随时间的演化曲线;最后,将当前退化轨迹与历史样本库进行相似度匹配,根据加权投票确定失效阈值对应的剩余寿命区间。算法对比方面,针对炼焦数据小样本(设备全寿命周期数据获取困难)、强噪声(高温振动及电磁干扰)的特点:高斯过程回归在样本量<100时泛化能力优于深度网络,且能输出预测置信区间,但对复杂非线性退化模式的拟合能力有限;LSTM网络擅长捕捉长时序依赖,适用于退化模式复杂的场景,但在炼焦小样本下易过拟合,且训练需大量调参,工程部署成本较高;隐马尔可夫模型对状态转移概率具有明确物理含义(正常→轻微磨损→严重磨损→失效),在强噪声下鲁棒性较好,但状态数划分依赖先验经验,对多因素耦合退化描述不足。综合考虑,建议以高斯过程回归或隐马尔可夫模型作为主要工具应对小样本噪声数据,当积累足够高质量全寿命样本后,再引入LSTM提升预测精度。对于具有多个退化模式的系统,还可采用隐马尔可夫模型捕捉状态转移规律,实现更精准的寿命预测^[3]。

3.3 维护决策优化模型

在获得故障预测信息后,需建立维护决策模型以平衡停机损失与维护成本。本文建议采用动态规划的维修机会窗口优化方法。定义系统健康状态等级(优良、注意、警告、危险),根据预测的剩余寿命确定柔性维修窗口[TL,TU](TL为最早可行维修时刻,TU为最晚安全维修时刻)。在此基础上,结合备件库存状态、维修人员排班和炼焦生产计划,构建以期望总成本最小为目标的风险决策模型。该模型可输出最优维护时机及备件调度方案,避免“可用但即将失效”的元件被过早更换,也防止侥幸拖延导致突发失效。

3.4 数字孪生驱动的运维新模式

数字孪生技术为炼焦机械液压系统提供了更高层级的智能维护解决方案。通过构建与物理系统等尺寸、等约束的虚拟模型,实时映射液压系统的运行状态,并利用仿真推演预测未来工况下的故障演化趋势。数字孪生平台可集成液压系统流体动力学模型与数据驱动模型,当传感器数据出现异常时,通过虚拟模型反向溯源故障源,辅助维修人员快速定位问题。同时,孪生模型可用

于测试不同的维修策略效果,实现“事前验证”的智能决策。

3.5 实施路径与关键挑战

炼焦机械液压系统故障遵循“性能退化→异常征兆→功能失效”三阶段演化规律,各阶段均有明确的监测指标映射:退化期油液理化指标(黏度、酸值)缓慢变化、振动有效值小幅上升;异常期压力脉动加剧、局部温度异常、执行机构动作滞后;失效期压力/流量骤降、异响剧烈、执行机构卡死。据此,“故障演化→参数变化→监测预警”的逻辑闭环可指导分阶段实施路径:第一阶段完成推焦机、拦焦机等关键设备的状态监测改造,覆盖退化期与异常期核心参数(振动、油液、温度、压力);第二阶段部署诊断算法,基于异常期数据积累实现报警阈值自适应优化;第三阶段引入预测模型,结合全阶段历史数据进行剩余寿命预测,形成闭环维护管理^[4]。实施中须应对高温传感器可靠性、多源数据时间同步、小样本模型泛化及人员接受度等挑战,宜采取“边运行、边积累、边优化”策略,优先保障退化期与异常期的数据质量,逐步提升预测精度与系统成熟度。

5 结语

炼焦机械液压系统的可靠性直接关系到焦化生产的连续性与安全性。本文系统分析了炼焦特殊工况下液压系统的故障模式与演化机理,建立了涵盖油液分析、振动检测、温度监控及压力特征提取的多源信息融合诊断方法,进而提出了基于预测性维护的智能维护策略框架。研究表明,通过构建“感知—传输—分析—决策”一体化的智能维护体系,结合数据驱动的剩余寿命预测与优化决策模型,能够有效实现液压系统故障的早期预警与精准干预,显著提升设备可用率并降低全生命周期维护成本。未来研究可从以下方向深入:一是开发适应炼焦高温高粉尘环境的专用抗干扰传感器;二是探索小样本条件下的深度迁移学习故障诊断方法;三是构建炼焦车间多设备协同的集群智能维护系统,实现维修资源的全局优化调度。

参考文献

- [1] 王建平,李国栋,张明辉.基于油液分析的液压系统故障预测技术研究进展[J].液压与气动,2022,46(5):112-119.
- [2] 刘振宇,陈晓峰,吴志强.炼焦机械液压系统污染控制与状态监测技术[J].煤炭技术,2023,42(3):201-205.
- [3] 孙丽华,郑文彬.多源信息融合在液压泵故障诊断中的应用[J].机械设计与制造,2024(2):78-83.
- [4] 杨建国,刘晓婷,王海波.基于数字孪生的液压系统预测性维护方法研究[J].计算机集成制造系统,2023,29(8):2596-2608.