

钢铁机械液压装置中常见故障的诊断和监测

史超

安阳钢铁股份有限公司 河南 安阳 455004

摘要: 工业生产对液压装置精度与可靠性要求持续提升, 本文系统研究钢铁机械液压装置常见故障类型及成因, 包括泄漏、动态性能异常、热态失效及振动噪声等。通过参数化监测、信号分析、模型驱动诊断及智能系统集成技术, 构建覆盖传感器选型布点、数据传输保障、预测模型更新的全链条监测体系, 实现故障精准定位与健康管理的, 推动工业设备向智能化运维方向演进。

关键词: 液压装置; 故障诊断; 监测系统; 健康管理

引言

钢铁机械液压装置作为工业领域核心动力传输与控制组件, 其稳定运行直接影响生产效率与安全。随着设备向高精度、智能化方向发展, 故障诊断与健康需求日益迫切。本文聚焦液压装置常见故障类型及成因, 结合参数化监测、信号分析、模型驱动诊断等核心技术, 构建智能监测系统与持续改进机制, 为工业设备全生命周期健康管理提供理论支撑与核心技术路径。

1 钢铁机械液压装置的重要性

钢铁机械液压装置作为工业领域核心动力传输与控制组件, 其重要性体现在多维度技术赋能层面。该装置通过液体介质实现能量高效转换与精准调控, 在重型机械、矿山设备、建筑机械等场景中, 可承受高强度压力与大流量冲击, 保障设备稳定运行; 其密封性能与抗污染能力显著提升设备可靠性, 减少因泄漏或杂质导致的故障风险。在复杂工况下, 液压装置能实现微米级精度控制, 满足高精度加工与装配需求, 其模块化设计支持快速维护与升级, 降低全生命周期成本。通过优化流体动力学特性, 该装置在节能降耗方面表现突出, 助力工业生产向绿色低碳转型, 其技术迭代持续推动制造业向智能化、精密化方向发展, 成为现代工业体系中不可或缺的关键技术支撑^[1]。

2 液压装置常见故障类型及成因分析

2.1 泄漏类故障的物理机制与影响因素

液压装置泄漏类故障的物理机制源于密封界面失效与介质渗透特性。密封件在长期高压工况下易发生塑性变形, 导致接触压力降低, 形成微小间隙通道; 温度波动引发密封材料热胀冷缩, 加剧界面磨损, 同时液压油黏度变化影响润滑膜形成, 增加摩擦磨损风险。压力冲击导致密封元件疲劳裂纹扩展, 尤其在管路接头、阀体结合面等应力集中区域, 裂纹扩展速率随循环次数增加

而加快。介质中的杂质颗粒在高压驱动下嵌入密封面, 形成磨粒磨损, 进一步破坏密封性能; 装配精度不足导致密封面贴合度偏差, 局部区域压力集中, 加速密封失效进程。此外, 不同材质密封件的相容性差异可能引发电化学腐蚀, 在潮湿环境中形成腐蚀性产物, 削弱密封界面承载能力, 这些物理机制与材料特性、工况参数、装配工艺等影响因素相互耦合, 共同决定泄漏故障的发生概率与发展速率。

2.2 动态性能异常故障的动力学特性

液压装置动态性能异常故障的动力学特性主要表现为系统振动、噪声及响应失真等现象。振动产生源于流体脉动与机械结构共振的耦合效应, 当激励频率接近系统固有频率时, 振幅显著放大, 引发结构疲劳裂纹; 噪声则与流体湍流、气穴现象及机械碰撞相关, 高压油液通过狭窄通道时产生射流冲击, 形成高频噪声源, 而气穴崩溃瞬间释放的冲击波进一步加剧噪声强度, 响应失真表现为执行元件运动滞后或超调, 源于系统阻尼不足与控制参数失配, 如比例阀死区、液压缸摩擦力非线性等导致指令信号与实际输出存在相位偏差。此外, 温度变化引发油液粘度波动, 改变系统阻尼特性, 加剧动态响应不稳定, 这些动力学特性相互关联, 形成复杂故障链, 需通过模态分析、频谱检测等手段识别关键影响因素, 为故障诊断与性能优化提供理论依据, 最终实现系统动态性能的精准调控与长效稳定^[2]。

2.3 热态失效故障的热力学传递路径

液压装置热态失效故障的热力学传递路径始于系统内部热源生成与外部热环境耦合作用; 摩擦副间高频摩擦生成热能, 通过金属基体传导至液压油, 引发油液温度梯度分布; 温度升高导致油液粘度降低, 润滑膜厚度减薄, 加剧边界摩擦与局部过热风险。热应力在阀体、缸筒等结构件中形成梯度分布, 引发热变形不匹配, 造成密封界面

预紧力下降或局部应力集中；高温加速密封材料老化速率，橡胶类密封件出现硬化脆裂，聚四氟乙烯类材料发生蠕变松弛，降低密封可靠性的同时，热循环引发液压油氧化分解，生成胶质与酸性物质，加剧元件腐蚀与沉积堵塞风险。热传递路径中，热对流通过油液流动将热量向系统远端扩散，热辐射则通过元件表面向环境散逸，形成多维度热交换网络，各热力学参数相互作用，最终导致密封失效、材料性能退化及系统稳定性下降，需通过热管理设计与材料优化实现热态失效防控。

2.4 振动噪声故障的信号特征解析

液压装置振动噪声故障的信号特征解析聚焦于时域、频域及模态参数的关联特性。时域信号呈现周期性冲击与随机波动叠加特征，冲击幅值与故障严重程度呈正相关，而随机波动反映系统非线性扰动。频域分析揭示特征频率分布规律，基频与谐频成分反映旋转部件失衡或周期性激励，宽频噪声则源于流体湍流与机械碰撞；模态参数通过传递函数识别，固有频率偏移指示结构刚度变化，阻尼比降低预示系统稳定性下降；信号相位关系反映能量传递路径，同相振动指示刚性连接故障，反相振动揭示柔性连接失效。此外，信号包络谱分析可提取调制边带，定位故障元件如轴承滚道损伤或齿轮齿面剥落，这些信号特征相互印证，形成多维诊断依据，需结合多维度信号处理技术实现故障精准定位与健康状态评估，为液压系统动态性能优化提供科学支撑^[3]。

3 故障诊断核心技术与实施路径

3.1 参数化监测技术的精准定位方法

参数化监测技术通过多维度参数采集实现故障精准定位，其核心在于传感器网络布局与信号特征提取的协同优化。压力、温度、流量传感器分布于液压系统关键节点，实时捕获工况参数动态变化；信号预处理采用滤波算法抑制噪声干扰，提取时域峰值、频域谱峰等特征指标。特征融合技术结合多参数关联分析，识别异常参数组合模式，如压力突降伴随温度异常升高可定位泵体磨损故障；自适应阈值设定根据工况动态调整报警阈值，避免误报漏报。数据驱动模型通过历史数据训练建立参数—故障映射关系，实现故障模式智能识别；参数化监测需考虑传感器精度、安装位置及环境适应性，确保数据可靠性；通过参数敏感性分析确定关键监测点，优化传感器配置方案。最终形成参数—故障诊断知识库，为液压系统健康状态评估与预测性维护提供量化依据，实现故障早发现、精定位、快处理。

3.2 信号分析技术的频谱特征提取策略

在信号分析技术的频谱特征提取策略中，引入PRC

（过程控制）协同电脑监控类数据分析可显著提升故障诊断效能。PRC通过实时采集液压系统压力、流量、温度等多维参数，结合计算机监控系统（如SCADA或工业物联网平台）进行数据融合处理，实现动态特征提取与故障模式识别。采用流行诊断技术如机器学习算法（如随机森林、深度学习）对频谱数据进行模式分类，可精准定位轴承磨损、阀体卡滞等典型故障。例如，基于PRC的频谱熵分析能量化频率分布紊乱程度，自适应滤波技术动态抑制背景噪声，提升特征信号信噪比；包络谱分析结合高速数据采集卡可捕获齿轮啮合高频共振信号，实现局部损伤早期预警。此外，集成智能诊断系统（如数字孪生平台）可实时模拟液压装置运行状态，通过虚拟—现实双向映射实现故障趋势预测与健康管理的闭环。这些技术的融合应用，不仅强化了频谱特征提取的精准度，还构建了从数据采集到智能决策的全链路诊断体系，为液压系统全生命周期智能运维提供了坚实技术支撑，显著提升了工业设备运行的可靠性与安全性。

3.3 模型驱动诊断的机理建模与验证

模型驱动诊断的机理建模需要基于液压系统物理特性构建数学模型，反映压力、流量、温度等参数间的动态关系。通过质量守恒、能量守恒及动量方程建立基础模型，结合元件特性曲线修正非线性环节，形成高精度仿真模型；模型验证采用实验数据与仿真结果对比，通过均方根误差、相关系数等指标量化模型精度；交叉验证法利用不同工况数据验证模型泛化能力，避免过拟合问题。参数敏感性分析识别关键影响参数，优化模型结构；模型验证需考虑边界条件设定合理性，如入口压力波动范围、环境温度变化区间等，确保模型覆盖实际工况；通过模型修正机制动态更新参数，适应系统老化与工况变化。最终形成机理清晰、验证完备的诊断模型，为故障模式识别与健康预测提供理论支撑，实现从数据到知识的转化，提升诊断结果的可解释性与可靠性^[4]。

3.4 智能诊断系统的集成架构设计

智能诊断系统集成架构设计以模块化分层为核心，实现数据采集、处理、分析及决策的全流程协同。数据采集层通过多源传感器融合，同步获取压力、温度、振动等实时信号，确保数据完整性与时序一致性；数据处理层采用边缘计算与云端协同架构，边缘节点完成信号预处理与特征提取，在云端进行大数据分析模型训练，降低传输延迟与带宽压力；分析层集成参数化监测、频谱分析、机器学习算法等模块，通过多技术融合实现故障模式的交叉验证与精准识别。决策层基于诊断结果生成维护建议，通过可视化界面与交互接口实现人

机协同；系统架构需考虑可扩展性与容错性，支持模块热插拔与故障隔离，确保系统长效稳定运行；通过标准化接口与协议统一数据格式，促进跨平台兼容与信息共享，最终形成高效、可靠、智能的液压系统诊断解决方案，支撑工业设备向智能化、自主化运维方向发展。

4 监测系统构建与持续改进机制

4.1 传感器选型与布点优化原则

传感器选型需综合考虑测量范围、精度等级、响应速度及环境适应性。压力传感器应匹配系统最大工作压力，避免量程过载导致测量失真；温度传感器须具备抗振动与耐油蚀特性，确保长期稳定工作；振动传感器应选用高灵敏度加速计，捕捉微幅振动信号。布点优化遵循“关键节点覆盖、冗余互补”原则，泵出口、阀组连接处等高压区域优先布设压力传感器，缸体表面、轴承座等振动源位置密集布设振动传感器。布点间距需平衡监测密度与成本，避免过度密集导致信号干扰，同时确保盲区最小化，传感器安装需考虑机械固定方式与电气连接可靠性，采用防松垫片与屏蔽线缆降低环境干扰。通过布点仿真与工况验证，动态调整传感器位置，形成覆盖全面、信号清晰的监测网络，为故障诊断提供高保真数据源，支撑系统状态精准感知与健康趋势预测。

4.2 数据采集与传输的可靠性保障

数据采集与传输可靠性保障需通过硬件抗干扰、冗余设计及协议优化协同实现。传感器采用差分信号传输与屏蔽线缆抑制电磁干扰，配合低通滤波电路消除高频噪声，保障原始信号保真度。采集模块集成双通道冗余架构，主备通道实时比对数据一致性，异常时自动切换并记录故障日志，确保数据采集连续性；传输链路采用有线光纤与工业以太网混合组网，辅以无线LoRa双模备份，避免单一路径失效导致数据丢失；数据包嵌入循环冗余校验码，接收端验证完整性后丢弃错误包并触发重传，实现传输零错误。协议层面应用时间敏感网络技术划分数据优先级，关键故障信号优先传输，延迟控制在毫秒级；链路状态实时监控模块动态调整频段选择与编码速率，适应不同工况传输需求。

4.3 故障预测模型的动态更新策略

故障预测模型动态更新需适配工况演变与故障模式迁移，通过数据驱动与机理融合实现持续优化。在线学习机制实时采集工况数据，动态调整权重系数、偏置项等参数，确保模型紧跟系统状态变化；增量学习算法分批处理新数据，避免全量重训计算负担，保留历史知识提升效率。迁移学习技术将相似工况故障特征迁移至当前模型，扩展适用范围并增强泛化能力；更新触发条件基于预测效果评估，如准确率下降、误报率上升或工况突变时自动启动更新。模型验证采用交叉验证与留出法，确保测试集表现稳定，避免过拟合；动态权重分配与特征重要性重评估优化特征子集，提升关键故障模式敏感度。最终形成自适应、可扩展预测模型，支撑液压系统故障趋势精准预测与健康状态动态管理，推动运维模式从被动维修向主动预测转变，实现全生命周期智能运维目标^[5]。

结束语：系统阐述钢铁机械液压装置的重要性、故障类型及成因，提出故障诊断核心技术与监测系统构建策略。通过传感器优化布点、数据可靠传输、状态评估量化标准及预测模型动态更新，形成闭环反馈的智能运维体系。未来，随着人工智能与物联网技术的发展，液压装置健康管理将向更精准、自适应方向演进，推动工业设备智能化升级，助力工业生产向绿色低碳转型，实现可持续发展目标。

参考文献

- [1]李润邦.钢铁制造中的液压设备维护与故障诊断策略研究[J].中国金属通报,2024(14):125-127.
- [2]钱学成,赵志祥,闫凡熙,等.连铸结晶器振动液压系统故障诊断研究[J].特钢技术,2025,31(1):59-63.
- [3]栗琦,徐海龙,张丽丽.工程机械液压系统故障诊断与智能监测研究[J].机械管理开发,2025,40(4):92-94.
- [4]李景辉,李新德.浅谈基于智能诊断技术在液压柱塞泵故障诊断中的应用[J].工程机械与维修,2025(10):16-18.
- [5]杜超,李聪,谭勇.闸阀门启闭机液压系统多通道运行状态检测装置研发应用[J].中国水运,2025(19):105-108.