

# 液压系统故障诊断与维护技术的应用研究

梁 潇

(中铁十一局集团第五工程有限公司, 重庆 409804)

**摘要** 液压系统广泛应用于工业生产、工程机械等领域, 其运行可靠性直接影响设备效能与生产安全。本文以液压系统故障诊断与维护技术为研究对象, 分析泄漏、压力异常等五类常见故障的表现与成因, 探讨传统诊断技术与现代智能诊断技术的原理及应用, 研究预防性、预测性及事后维护策略, 结合挖掘机液压系统故障案例开展实证分析。研究结果表明, 融合两类诊断技术可缩短故障定位时间, 规范实施维护技术能使液压系统故障率降低30%以上、维护成本减少33%左右, 为系统全生命周期安全稳定运行提供技术支持。

**关键词** 液压系统; 故障诊断; 维护技术; 状态监测; 智能诊断

中图分类号: TH137

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.038

## 0 引言

液压系统凭借功率密度大、响应速度快、控制精度高、传动平稳且能实现大范围无级调速等核心优势, 已成为机床制造、航空航天、船舶工程等领域机械装备的核心动力传递与控制单元, 其运行状态直接决定整机生产效率、作业精度与运行安全<sup>[1]</sup>。然而, 液压系统由泵、阀、缸、管路、密封件等数十类元件组成, 结构复杂且关联性强, 工作环境常涉及高温、高压、粉尘、振动等苛刻条件, 易出现泄漏、压力波动等故障<sup>[2]</sup>。行业调研数据表明, 液压系统故障导致的停机时间占总停机时间的32%, 年均直接与间接经济损失超百亿元。

故障诊断与维护是保障液压系统可靠运行的关键环节, 早期精准诊断可避免故障扩大化, 减少次生损坏, 提升运行经济性。维护技术已从事后维护向预防性、预测性维护转型, 但部分企业存在流程不规范、技术应用不充分、维护周期不合理等问题, 导致维护成本偏高、故障复发率较高<sup>[3]</sup>。基于此, 本文结合液压系统工作原理与工程实践, 系统分析故障类型与成因, 研究各类诊断技术适用范围与应用方法, 优化维护技术实施策略, 通过工程实例验证有效性, 为相关实践提供理论与实践参考。

## 1 液压系统常见故障类型及成因分析

液压系统故障多由元件磨损、油液污染、参数失调、安装不当、维护不及时等多因素共同引发, 按表现形式可划分为五大类。

### 1.1 泄漏故障

泄漏是液压系统最频发故障, 发生率占总故障的40%以上, 分内外泄漏。内泄漏表现为系统效率下降、执行元件动作迟缓、能耗增加, 无明显外部油迹, 成因包括液压泵柱塞与缸体配合间隙超设计阈值、液压阀阀芯磨损密封不严。外泄漏表现为管路接头、元件结合面等部位油液渗漏, 源于接头螺栓松动、密封件装配受力不均、密封件材质与介质不匹配<sup>[4]</sup>。

### 1.2 压力异常故障

压力异常表现为压力不足、过高或波动过大。压力不足表现为执行元件动作无力、工作压力低于设计值, 成因包括溢流阀堵塞或弹簧疲劳、液压泵容积效率下降、油路堵塞; 压力过高表现为系统超额定压力、电机负载增大, 由溢流阀失效、负载异常、回油不畅引起; 压力波动表现为压力表指针频繁摆动, 与液压泵吸油不足、阀芯卡滞、泵轴与电机同轴度偏差超0.2 mm等相关。

### 1.3 流量不足故障

流量不足造成执行元件动作缓慢、行程不足、速度不均, 成因包括液压泵磨损排量下降、吸油滤网堵塞或吸油管漏气、节流阀调节失效、管路变形通流面积减小<sup>[5]</sup>。此外, 电机转速低于额定90%、液压泵转向错误等也会导致流量不足, 影响系统正常工作。

### 1.4 振动与噪声故障

振动与噪声恶化工作环境, 加剧元件疲劳损坏, 分机械与流体振动。机械振动源于泵与电机安装不同心、轴承磨损间隙增大、联轴器橡胶垫老化、执行元

作者简介: 梁潇(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械工程。

件不平衡、固定螺栓松动；流体振动由油液混气形成气穴、换向阀快速切换产生液压冲击、节流口流速超 10 m/s、管路共振引起。

### 1.5 动作失灵故障

动作失灵表现为执行元件无法按指令启动、停止或换向，响应延迟或无响应，成因包括电磁换向阀线圈烧毁、阀芯卡滞、控制信号异常、液压锁失效、单向阀泄漏、活塞杆弯曲、密封过紧卡滞、电气与液压系统协同故障。

## 2 液压系统故障诊断技术研究

液压系统故障诊断技术核心是采集运行参数与状态信息，识别故障位置、类型与成因，分为传统诊断技术与现代智能诊断技术两大类。

### 2.1 传统故障诊断技术

1. 感官诊断法：依赖视觉、听觉、触觉、嗅觉判断，观察油液颜色、泄漏部位，识别异常噪声，感知管路温度与振动，发现油液燃烧味或密封件异味。无需专业设备，响应快速，但受经验影响大，准确性有限，适用于初步排查。

2. 仪器测量法：通过压力表、流量计、温度计、振动检测仪、万用表等采集参数定量分析。压力表判断压力异常，流量计定位流量不足，温度计识别过载与泄漏，振动检测仪辅助判断机械磨损，万用表排查电气故障。

3. 故障树分析法（FTA）：以特定故障为顶事件，通过逻辑推理构建故障树，分解为中间事件与底事件，利用逻辑门梳理因果关系。逻辑清晰、系统性强，适用于结构明确、故障模式单一的系统，但构建耗时久，对分析人员要求高。

4. 鱼刺图法：从人、机、料、法、环五个维度分析故障成因，直观呈现关联关系。例如“外泄漏”故障，人员因素包括密封件装配方向错误、螺栓紧固力矩不均；设备因素包括密封件老化、管路腐蚀；材料因素包括油液粘度不符、密封件材质不合格；方法因素包括维护不规范；环境因素包括高温、粉尘。直观易懂，适用于多因素故障分析，但复杂系统深层因素梳理不足。

### 2.2 现代智能诊断技术

1. 振动诊断技术：在关键元件安装压电式振动传感器，采集信号经滤波、傅里叶变换等预处理与特征提取，对比正常阈值识别故障。泵柱塞磨损时出现 2 倍泵轴转速频率谐波，轴承磨损出现特定冲击脉冲信号。非接触式实时监测，诊断准确率达 85% 以上，适用于旋转与往复运动元件，广泛应用于工业液压设备在线监测。

2. 油液分析技术：检测油液物理化学性质与污染物含量，含光谱分析、铁谱分析、颗粒计数法。光谱分析检测金属元素含量，铁谱分析判断磨损类型，颗粒计数法评估油液清洁度（NAS5-9 级）。诊断准确率达 90% 以上，提前 30 ~ 90 天预警潜在故障，是预防性维护核心技术。

3. 红外测温诊断技术：利用红外测温仪或热像仪检测元件表面温度分布，识别异常发热部位。溢流阀卡滞时温度升高 15 ~ 30 °C，管路堵塞时升高 10 ~ 20 °C，密封泄漏时局部温度降低。远距离非接触式快速检测，直观呈现温度场，适用于高温高压环境下故障定位。

4. 神经网络诊断技术：构建 BP、RBF 等神经网络模型，采集多维度故障信号预处理后提取特征参数作为输入，设定故障类型为输出，通过反向传播算法调整权重与阈值，训练后输出故障类型与概率。自学习、自适应能力强，处理非线性、多因素耦合故障，诊断准确率达 92% 以上，适用于复杂液压系统故障诊断。

5. 模糊逻辑诊断技术：基于模糊数学理论，通过隶属度函数量化模糊语言变量，建立规则库，经模糊推理与去模糊化输出结果。适用于故障特征不明确、边界模糊的场景，与神经网络结合可提升诊断精度。

## 3 液压系统维护技术应用策略

液压系统维护技术基于故障诊断结果与运行状态，采取针对性措施预防故障、修复元件、优化参数，延长系统寿命与无故障运行时间，分为预防性、预测性、事后维护三类，形成科学维护体系。

### 3.1 预防性维护技术

预防性维护是故障发生前按固定周期或运行时间的计划性维护，消除潜在隐患，适用于易磨损、关键元件。

1. 定期油液维护：按设备运行时间或油液状态更换液压油；每 500 ~ 1 000 小时清洗滤网，每 2 000 小时更换滤芯；补充油液确保型号一致，检查油箱密封与液位。规范维护可降低 35% 以上磨损故障，延长关键元件寿命 20% ~ 30%。

2. 定期元件检查与更换：密封件需每 1 000 ~ 2 000 小时检查更换，滤芯每 500 ~ 1 000 小时更换，轴承每 3 000 ~ 5 000 小时检查润滑与间隙，及时更换磨损件；每 1 000 小时紧固管路接头，检查管路腐蚀与变形，及时修复或更换。

### 3.2 预测性维护技术

预测性维护基于状态监测与故障诊断，实时采集数据评估元件剩余寿命，精准安排维护，避免过度维护与维护不足。

1. 基于状态监测的动态维护: 在关键元件安装传感器, 构建监测平台采集压力、流量、振动、温度、油液污染度等数据。铁元素含量月增长率超 50%、振动幅值超正常阈值 1.5 倍、局部温度异常时发出预警, 安排针对性维修。例如: 机床液压系统油液铁元素从 30 ppm 升至 80 ppm 且持续升高, 提前更换泵柱塞与缸体, 避免泵体爆裂。

2. 基于智能诊断模型的预警维护: 利用神经网络、模糊逻辑构建预警模型, 输入多维度数据输出故障概率、类型与维护建议。工程机械液压系统采用 BP 神经网络模型, 轻微泄漏时提前 3~5 天预警, 指导更换密封件, 避免作业中断。

3. 维护数据管理与优化: 建立全生命周期维护档案, 记录故障、诊断、维护等数据, 通过大数据分析统计元件故障频率与寿命, 调整维护周期与重点; 分析故障成因与运行环境、操作方式关联, 优化使用条件。某汽车制造厂据此将液压阀维护周期从 6 个月调整为 8 个月, 维护成本降低 18%。

### 3.3 事后维护技术

事后维护是故障发生后的修复性维护, 适用于低故障发生率、低成本元件。

1. 故障修复技术: 泄漏故障更换密封件、紧固接头; 压力异常清洗或更换阀组、修复液压泵; 流量不足清洗滤网、调整节流阀; 振动噪声校正同轴度、更换轴承; 动作失灵修复换向阀、排查电气系统, 修复后进行参数测试。

2. 故障溯源与改进: 追溯故障根源, 避免同类故障重复。某系统频繁密封件损坏, 溯源为油液污染, 优化过滤精度与油箱密封后, 故障发生率下降 60%。

## 4 工程实例分析

以矿山作业挖掘机变量柱塞泵液压系统(额定压力 31.5 MPa, 额定流量 280 L/min)为例, 验证技术应用效果。

### 4.1 故障现象

动臂举升缓慢、挖掘无力, 系统压力 25 MPa (低于额定值), 液压泵部位有异常噪声。

### 4.2 故障诊断过程

1. 初步诊断: 感官诊断发现泵体有空化声、温度偏高, 压力计测量压力为 25 MPa, 流量计显示流量为 220 L/min, 初步判断液压泵故障或油路堵塞。

2. 深入诊断: 油液铁谱分析发现大量 5~20  $\mu\text{m}$  不规则铁颗粒, 光谱分析铁元素含量 120 ppm (标准 $\leq$  50 ppm); 振动信号小波分析显示 120 Hz 频率处振动幅值显著升高, 确认液压泵柱塞磨损故障。

### 4.3 维护措施

1. 事后维护: 拆卸液压泵, 更换磨损柱塞与缸体(配合间隙 0.05 mm, 标准 $\leq$  0.02 mm), 清洗杂质后装配, 测试压力与流量恢复至额定值。

2. 预防性维护: 更换液压油, 将 10  $\mu\text{m}$  滤芯升级为 5  $\mu\text{m}$ , 加强油箱密封, 建立每 500 小时油液检测制度。

3. 预测性维护: 安装振动与温度传感器, 接入数字化平台, 设定预警阈值(振动 $\geq$  0.5 mm/s, 温度 $\geq$  80  $^{\circ}\text{C}$ )。

### 4.4 应用效果

维护后跟踪运行 6 个月 (3 000 小时), 经统计故障率降低 30% 以上; 油液污染度 NAS7 级以下, 金属颗粒·含量 $\leq$  30 ppm; 故障停机时间从 8 小时/月降至 1 小时/月, 生产效率提升了 15%; 维护成本从 1.2 万元/月降至 0.8 万元/月, 累计节约 2.4 万元, 验证了技术有效性。

## 5 结论

本文通过对液压系统故障诊断与维护技术的深入研究, 得出以下结论:

1. 液压系统故障主要为泄漏、压力异常等五类, 成因与元件磨损、油液污染等相关, 需结合特征精准识别。

2. 传统诊断技术操作简便、成本低, 适用于简单故障; 现代智能诊断技术准确性高、适应性强, 是复杂故障诊断核心, 二者融合可提升诊断效果。

3. 预防性、预测性、事后维护各具优势, 构建“预防为主、预测为辅、事后补充”的维护体系, 结合数字化工具, 可降低故障率、缩短停机时间、减少成本。

4. 工程实例表明, 科学运用诊断与维护技术, 可快速定位故障, 使故障率降低 30% 以上, 维护成本减少 33% 左右。

## 参考文献:

- [1] 王点, 高辛. 锅炉系统故障诊断与自动化维护技术应用研究 [J]. 中国机械, 2025(17):129-132.
- [2] 张国诚. 冶炼机械液压系统的维护与故障诊断技术研究 [J]. 中国金属通报, 2024(12):116-118.
- [3] 白立刚, 王连玉, 王魁. 煤矿机电设备中液压系统的故障诊断与维护技术 [J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(01):148-150.
- [4] 师新华. 机械设备液压系统故障特性和故障诊断应用技术研究 [J]. 工程机械与维修, 2023(01):33-35.
- [5] 刘水明, 陈晨, 周方云, 等. 辅助液压系统失效的高效故障诊断技术的应用研究 [J]. 新技术新工艺, 2022(10):102-108.