

矿用卡车液压系统泄漏故障诊断方法研究

叶秀清

铜陵铜冠装备制造科技有限公司 安徽 铜陵 244000

摘要: 矿用卡车液压系统泄漏故障严重影响设备运行效率与安全性。本文围绕泄漏故障分类特征展开研究,梳理静态密封、动态密封及内部元件泄漏的表现差异,构建涵盖感官经验判断、仪器精密检测与逻辑推理分析的多维诊断方法体系,设计初步排查、精准定位与原因分析三阶段诊断流程,并从多传感器信息融合、智能诊断算法应用及便携式设备开发方面提出优化方向,为矿用设备液压系统维护提供理论支撑与实践指导。

关键词: 矿用卡车; 液压系统; 泄漏故障; 诊断方法

引言: 矿用卡车承担矿山开采核心运输任务,液压系统泄漏故障直接导致油液浪费、环境污染及系统压力不足等问题,严重威胁设备安全与生产效率。当前泄漏诊断多依赖人工经验与单一参数检测,存在故障定位模糊、早期预警能力不足等缺陷,难以适应复杂矿山工况下的维护需求。系统研究泄漏故障分类特征,构建多维诊断方法体系并优化诊断流程,对提升矿用设备可靠性、降低维护成本具有重要的实践价值。

1 矿用卡车液压系统泄漏故障类型与特征

1.1 泄漏故障分类

矿用卡车液压系统泄漏故障可根据密封形式与泄漏路径划分为三类。静态密封泄漏主要发生于液压系统相对静止的连接部位,例如管路接头、法兰盘对接面等位置^[1]。此类部位因长期承受液压油压力作用,若密封件选型不当、安装工艺存在缺陷或密封表面加工精度不足,均会导致密封失效,引发液压油外渗。动态密封泄漏则涉及液压系统中存在相对运动的组件,如液压缸活塞杆与缸筒间的密封、液压泵转轴与端盖间的密封等。动态密封需在运动过程中维持密封性能,对密封材料耐磨性、弹性恢复能力及润滑条件要求较高,一旦材料老化或润滑不足,极易出现泄漏问题。内部元件泄漏指液压系统内部组件因磨损、腐蚀或制造缺陷导致的内泄漏现象,典型表现为液压阀阀芯与阀体配合间隙超标、液压泵容积效率下降等,此类泄漏虽不直接导致液压油外泄,但会严重影响系统工作效率。

1.2 泄漏故障特征分析

静态密封泄漏的特征表现为持续性的微量液压油渗出。由于泄漏点固定且压力作用方向稳定,液压油会沿固定路径扩散,在设备表面形成明显的油迹分布区域。随着泄漏时间延长,油迹扩散范围逐步扩大,且因液压油黏附性,油迹边缘呈现不规则形态。动态密封泄漏的

特征与系统工作压力波动及执行机构运动状态密切相关。当密封失效时,高压油液通过密封间隙泄漏至低压腔,导致系统压力瞬时下降,引发压力表指针频繁摆动。同时,执行机构如液压缸因有效工作压力降低,会出现动作迟缓、运动不平稳等现象,严重时甚至无法完成预定动作循环。内部元件泄漏的特征集中体现在系统热平衡状态改变与能量转化效率降低。内泄漏导致液压能转化为热能的比例异常增加,系统整体温升显著高于正常工况,尤其液压泵、液压阀等核心元件表面温度升高更为明显。此外,因内泄漏造成液压油频繁循环流动,系统需额外消耗能量维持工作压力,导致发动机负荷增大、燃油消耗率上升,整体能量损失呈现加剧趋势。

2 泄漏故障诊断方法体系构建

2.1 基于感官经验的诊断方法

视觉诊断聚焦于液压系统外观特征的直接观察。液压油颜色变化是重要的诊断依据,正常油液应呈现透明淡黄色,若出现发黑、乳化或浑浊现象,则表明油液已发生氧化变质或受到水分污染^[2]。泄漏痕迹形态分析可辅助判断泄漏类型,静态密封泄漏通常呈现规则的油滴下落轨迹,而动态密封泄漏因运动部件影响,油迹分布往往呈现扩散状或喷射状。听觉诊断通过捕捉系统运行中的异常声响实现故障定位,液压泵内部啸叫可能源于吸空现象或轴承磨损,阀体冲击声则多与阀芯卡滞或弹簧失效相关,不同声源特征对应特定故障模式。触觉诊断依赖维修人员对系统物理状态的感知能力,液压泵壳体温度异常升高可能预示内部泄漏加剧,管路振动频率改变往往与压力波动或元件松动存在关联,通过触摸元件表面可初步评估其工作状态。嗅觉诊断通过辨别油液气味变化推断故障性质,刺鼻的焦糊味通常与橡胶密封件老化相关,酸臭味则表明油液已发生严重氧化,不同气味特征为故障溯源提供线索。

2.2 基于仪器检测的诊断方法

压力检测通过压力传感器网络实现系统压力场的实时监测,重点分析主泵出口压力、执行机构工作压力及回油背压等关键参数。压力波动幅度超过设定阈值时,可判定存在密封失效或元件内泄漏问题。流量检测利用涡轮流量计或电磁流量计监测回路流量,当实测流量低于额定值时,表明系统存在外泄漏或内部元件磨损导致的内泄漏。温度检测采用红外热成像仪对液压系统进行非接触式测温,局部过热区域往往对应密封失效点或元件故障点,如液压缸活塞密封失效会导致缸筒表面温度异常升高。油液分析包含污染度检测与成分分析两个维度,颗粒计数器可量化油液中固体颗粒含量,超标值直接反映密封磨损程度;光谱分析通过检测油液中金属元素含量,可定位液压泵、液压阀等元件的磨损部位,为故障维修提供精确指导。

2.3 基于逻辑推理的诊断方法

故障树分析法通过构建泄漏故障的逻辑演绎模型实现系统化排查。以“液压缸泄漏”为顶事件,逐层分解至密封件失效、安装误差、油液污染等底事件,通过布尔代数运算确定各底事件对顶事件的贡献度,从而锁定关键故障源。信号流分析法基于液压系统信号传递路径建立故障传播模型,通过分析压力、流量等信号在系统中的传递特性,可快速定位信号中断或异常变动的节点,适用于复杂液压回路的故障诊断。参数对比法通过建立正常工况下的参数基准库,将故障状态下的实测参数与基准值进行比对分析,压力下降、流量衰减或温度升高等参数偏离均指向特定故障类型,该方法尤其适用于早期故障的隐性特征识别。逻辑推理方法可实现故障原因的系统化追溯,避免单一诊断方法的片面性,能够整合多维度诊断信息,形成完整的故障诊断逻辑链,提升故障定位的准确性与全面性。

3 泄漏故障诊断流程设计

3.1 初步排查阶段

故障现象的精准识别是诊断流程的起点,需通过系统运行状态监测捕捉异常特征。执行机构动作迟缓或输出力不足往往与液压动力传递效率下降相关,系统压力持续低于额定值可能由泄漏引发的能量损失导致,而异常噪声或振动则可能暗示密封失效或元件磨损。油液状态检查需同步开展液位高度测量与污染度评估,液位异常下降直接指向外泄漏存在,油液浑浊度增加或金属颗粒悬浮物增多则表明内部污染已影响系统正常运行^[3]。外部泄漏痕迹观察需覆盖液压管路所有连接部位、密封组件及元件表面,重点关注油迹分布形态与扩散方向,持

续滴漏或油渍扩散范围扩大均属典型泄漏特征,油液在设备表面形成的渗透路径可为后续定位提供方向指引。初步排查需在设备停机或低负荷运行状态下开展,重点排查易泄漏部位,快速区分外泄漏与内泄漏,为后续精准定位环节节省时间,提升诊断效率。

3.2 精准定位阶段

静态密封泄漏定位需结合压力测试与渗透检测技术。通过分段加压方式监测压力衰减速率,压力骤降区域即为泄漏疑似点,该方法对管路连接处密封失效定位效果显著;染色法通过向系统注入可辨识荧光剂,利用紫外线灯观察外部渗出液颜色变化,可精准锁定微小泄漏点,尤其适用于复杂结构密封件检测。动态密封泄漏诊断需关联执行机构动作特性与压力波动规律,液压缸动作卡滞或速度不均可能伴随压力表指针频繁摆动,通过同步监测动作周期与压力曲线,可区分密封失效与负载异常导致的压力异常;流量计实时监测回路流量变化,流量持续低于额定值表明存在动态密封泄漏通道。内部元件泄漏程度判断依赖流量检测与油液分析双重验证,超声波流量计可非接触式测量回路流量,结合油液中金属颗粒含量检测结果,可定量评估液压泵或液压阀等核心元件的磨损程度,两项数据交叉分析可提高诊断准确性。

3.3 原因分析阶段

机械因素排查需聚焦密封件物理状态与安装工艺,机械因素是导致泄漏的常见原因。密封件表面裂纹或硬化会直接导致密封性能下降,安装过程中密封件扭曲或预紧力不足会引发早期泄漏,零件变形或配合间隙超标则可能造成动态密封失效,需通过显微镜观察密封件表面形貌,利用三坐标测量仪检测零件尺寸精度。液压因素分析需评估油液性能与系统参数匹配性,油液粘度异常升高会加剧密封件磨损,污染度超标导致阀芯卡滞或泵内摩擦增大,系统压力长期超过额定值会加速密封件老化进程,需通过粘度计、颗粒计数器等设备定量分析油液性能参数。液压因素对泄漏的影响不容忽视^[4]。环境因素影响需考虑设备运行工况的极端性,高温环境会降低油液润滑性能并加速密封材料老化,强振动或冲击载荷可能导致管路连接松动或元件结构损伤,腐蚀性介质接触会破坏密封件化学稳定性,需结合设备运行记录与环境监测数据综合研判各项环境要素的作用程度。

4 泄漏故障诊断技术优化方向

4.1 多传感器信息融合技术

传统液压系统故障诊断依赖单一传感器数据,易受环境干扰或设备老化影响导致误判。集成压力、流量、温度、振动等多类型传感器,可构建覆盖液压系统全要

素的监测网络，如图1所示。压力传感器实时捕捉系统压力动态变化，流量传感器监测回路中油液流动状态，温度传感器追踪元件热损耗特征，振动传感器分析机械结构运行平稳性，多维度数据相互补充可形成更完整的系统运行画像。通过数据融合算法对异构信息进行协同处理，采用加权平均法平衡不同传感器精度差异，利用卡尔曼滤波抑制随机噪声干扰，或构建神经网络模型挖掘数据间非线性关联，能够从复杂信号中提取更具代表性的故障特征。

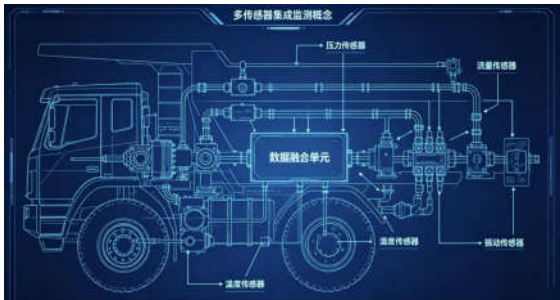


图1

4.2 智能诊断算法应用

传统诊断方法依赖人工经验与固定阈值，对早期微小泄漏或复合故障的识别能力有限。基于机器学习的泄漏模式识别技术通过构建历史故障数据库，提取压力波动频率、流量衰减速率、温度梯度等关键特征参数，训练支持向量机或随机森林等分类模型，可实现对泄漏类型的自动判别与分级预警。深度学习技术进一步突破特征工程限制，利用卷积神经网络直接处理原始传感器信号，自动学习压力-流量-温度的时空耦合特征，通过长短期记忆网络分析故障演化趋势，构建高精度故障预测模型^[5]。结合迁移学习技术将通用模型适配至特定矿用设备液压系统，利用在线学习机制持续更新模型参数，可实现泄漏故障的早期预警与剩余寿命预测，为预防性维护提供量化决策依据。智能算法还可通过生成对抗网络模拟

罕见故障场景，扩充训练数据集，提升模型对极端工况的适应能力，具体流程如图2所示。

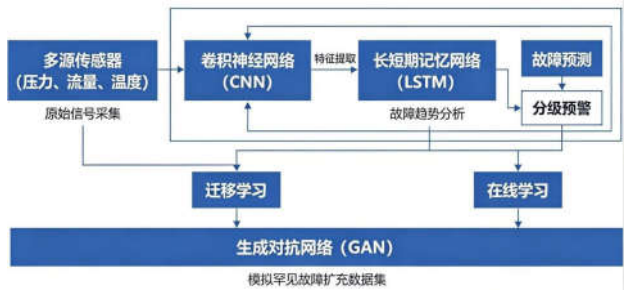


图2

结束语

矿用卡车液压系统泄漏故障诊断需要兼顾理论完备性与现场可操作性。整合感官经验、仪器检测与逻辑推理方法，可构建覆盖故障全生命周期的诊断体系；多传感器信息融合与智能算法应用能够突破传统诊断的精度与效率瓶颈；便携式诊断设备的开发进一步强化了现场快速响应能力。诊断技术的持续优化应以实际工况需求为导向，通过技术迭代与工具创新，推动液压系统维护向智能化、精准化方向演进，为矿山安全生产提供坚实保障。

参考文献

[1]陈莹.高速列车液压制动系统故障诊断技术[J].中国新技术新产品,2026(6):140-142.

[2]芦强.数控车床液压系统故障智能诊断与结构优化[J].铸造设备与工艺,2025(2):27-31,37.

[3]和红波.液压系统泄漏故障诊断及预防措施研究[J].模具制造,2026,26(3):258-260.

[4]于琪.露天矿山机械设备液压系统泄漏故障识别研究[J].工程机械与维修,2024(8):32-34.

[5]王乃利.海上平台吊机液压系统泄漏故障诊断技术[J].建筑与施工,2025,4(20):22-23.