

液压支架电液控制系统故障诊断技术研究

方 宇

煤科(北京)检测技术有限公司 北京 100013

摘要: 液压支架电液控制系统故障诊断技术致力于提升系统可靠性与维护效率。通过构建大数据决策服务平台,集成时域分析、频域分析及深度学习算法,结合多源信息融合与专家系统,实现故障特征精准提取与实时诊断。研究涵盖传感器故障识别、液压泄漏定位及电气故障预警,有效解决复杂工况下诊断鲁棒性不足问题,为煤矿综采无人化提供关键技术支撑。

关键词: 液压支架;电液控制系统;故障诊断技术

引言: 随着煤矿综采智能化发展,液压支架电液控制系统作为工作面核心装备,其可靠性直接影响生产效率与安全。然而,井下复杂工况导致系统故障频发,传统诊断方法存在滞后性强、误判率高的问题。本研究聚焦电液控制系统故障机理,融合信号处理、模型预测与数据驱动技术,构建多层次诊断体系,旨在实现故障的精准识别与快速定位,为智能矿山建设提供技术保障。

1 液压支架电液控制系统基础理论

1.1 电液控制系统组成与工作原理

(1) 液压支架结构核心包含立柱、千斤顶与阀组。立柱承担支撑顶板载荷的关键作用,通过伸缩调节支架高度以适应工作面变化;千斤顶分为推移千斤顶、侧护千斤顶等,分别实现支架前移、防倒调偏等动作;阀组是液压控制核心,由主控阀、先导阀等组成,负责调控液压油的通断与流向,保障各执行元件有序运行。(2) 电液控制阀以电磁力为驱动源,接收电控系统指令后,电磁线圈通电产生磁力,推动阀芯移动改变油路通道,实现液压油的分配。信号传输采用有线与无线结合方式,有线传输通过屏蔽电缆传递数字信号,保障数据稳定性;无线传输借助射频模块,适用于复杂工作面,实现控制指令与状态反馈的实时交互,确保系统响应及时。

1.2 常见故障类型及特征分析

(1) 机械故障中,泄漏多发生在密封件老化或接头松动处,表现为液压油渗漏,伴随压力下降;卡滞常因杂质进入阀芯或零件磨损导致,特征是执行元件动作卡顿,无法顺畅伸缩,影响支架支护效率。(2) 液压故障里,压力异常分为压力不足与超压,压力不足会使支架支撑力不够,超压则可能损坏液压元件;流量不稳定表现为执行元件动作速度忽快忽慢,源于油泵磨损或油路堵塞,降低系统运行平稳性。(3) 电气故障方面,传感器失效会导致数据采集偏差,如位移传感器故障使支架

高度检测不准;通信中断会造成控制指令无法传递,表现为支架无响应,严重影响工作面生产。

1.3 故障传播机理与影响分析

(1) 单点故障易通过系统关联部件传播,例如立柱密封泄漏导致液压系统压力下降,进而影响千斤顶动作速度,若未及时处理,压力不足会使主控阀阀芯受力失衡,引发阀组卡滞,形成连锁故障。(2) 系统性故障与单点故障存在相互加剧关系,当多个传感器同时失效时,电控系统无法获取准确工况数据,导致控制指令偏差,偏差指令会加剧液压元件磨损,引发更多单点故障,最终导致整个电液控制系统瘫痪,造成工作面停产,增加维修成本与安全风险。

2 液压支架电液控制系统故障诊断关键技术研究

2.1 基于信号处理的故障诊断方法

(1) 时域分析通过提取振动、压力信号的特征参数实现故障识别。针对振动信号,选取峰值、均方根、脉冲指标等统计量,若立柱振动信号峰值异常升高,可能提示立柱磨损或松动;对于压力信号,监测压力波动幅度与持续时间,当系统压力骤降且波动频繁时,可初步判断存在液压泄漏故障,该方法能直观反映信号时域特征,适用于故障初步筛查^[1]。(2) 频域分析借助FFT(快速傅里叶变换)与小波变换处理信号。FFT将时域信号转换为频域信号,通过分析频率成分占比定位故障,如液压泵正常工作时某频率成分占比稳定,若该成分占比突变,可能表明泵体磨损;小波变换具备多分辨率分析能力,可有效捕捉信号突变点,在电气故障诊断中,能精准识别传感器信号中的瞬时干扰,区分正常信号波动与故障信号,提升诊断准确性。

2.2 基于模型的方法

(1) 液压系统数学建模与参数辨识是基础环节。根据液压支架电液控制系统工作原理,建立包含泵、阀、

执行元件的数学模型，通过实验采集流量、压力、位移等数据，采用最小二乘法等算法辨识模型参数，如确定阀芯阻尼系数、油液粘度等关键参数，使模型能准确模拟系统实际运行状态，为故障诊断提供理论依据。（2）残差生成与故障检测通过对比模型输出与实际系统输出实现。基于建立的数学模型计算期望输出，将实际输出与期望输出的差值作为残差，设定残差阈值，当残差超过阈值时，判定系统存在故障。例如，模型预测千斤顶伸缩速度为50mm/s，实际速度为30mm/s，残差超出正常范围，可判定千斤顶存在卡滞或液压力不足故障。

2.3 基于数据驱动的智能诊断方法

（1）机器学习算法在故障诊断中应用广泛。SVM（支持向量机）通过构建最优分类超平面区分故障类型，适用于小样本故障诊断，如利用少量传感器失效数据训练模型，可准确识别传感器故障；随机森林通过多棵决策树集成学习，降低单一决策树的过拟合风险，在液压系统多故障诊断中，能同时识别泄漏、压力异常等多种故障，且抗干扰能力强。（2）深度学习模型提升故障分类效能。CNN（卷积神经网络）通过卷积层提取故障信号的深层特征，在振动信号处理中，可自动挖掘信号中的故障特征模式，无需人工特征选择；LSTM（长短期记忆网络）能处理时序信号，针对电液控制系统的动态故障，如通信中断导致的间歇性故障，可通过分析历史信号时序关系，实现故障的精准分类与提前预警^[2]。

2.4 多源信息融合诊断技术

（1）传感器数据融合整合压力、位移、温度等多维度数据。采用卡尔曼滤波、D-S证据理论等方法融合数据，例如结合压力信号的泄漏特征、温度信号的元件过热特征，若压力下降同时伴随局部温度升高，可更准确判定为密封件老化导致的泄漏故障，避免单一传感器数据误判。（2）专家系统与知识图谱构建实现经验与数据的结合。专家系统将领域专家的故障诊断经验转化为规则库，当系统出现故障时，通过推理机匹配规则库得出诊断结果；知识图谱整合故障类型、特征、原因等信息，构建故障关联网络，如点击“通信中断”故障节点，可查看相关的传感器故障、电缆损坏等原因，为故障排查提供清晰的逻辑路径，提升诊断效率。

3 液压支架电液控制系统故障诊断系统设计与实现

3.1 系统总体架构设计

分层式架构采用“数据采集层-分析层-决策层”三级结构，各层功能独立且协同联动。（1）数据采集层负责实时获取系统运行数据，通过部署在立柱、千斤顶、阀组等关键部位的传感器，采集压力、振动、温度、位移

等信号，经信号调理电路降噪后，以毫秒级频率将数据传输至分析层；（2）分析层作为核心处理环节，调用故障诊断算法对采集数据进行处理，如通过时域分析提取压力信号峰值特征，结合小波变换处理振动信号，识别潜在故障特征；（3）决策层根据分析层输出结果，生成故障诊断报告，明确故障类型（如密封泄漏、传感器失效）、故障位置及严重程度，并自动推送维修建议，同时将诊断结果存储至数据库，为后续故障分析提供数据支持。

3.2 硬件选型与接口设计

（1）传感器布局遵循“关键部位全覆盖、冗余备份”原则，在立柱缸底安装压力传感器监测液压系统压力，在千斤顶活塞杆处部署位移传感器记录伸缩量，在电控箱内部设置温度传感器预防电气元件过热；硬件选型优先选择工业级设备，如压力传感器选用量程0-60MPa、精度±0.5%FS的扩散硅传感器，位移传感器采用精度±0.1mm的磁致伸缩传感器，确保数据采集准确性^[3]。（2）通信协议采用CAN总线与工业以太网相结合的方式，CAN总线用于支架本地传感器与控制器间的数据传输，具备抗干扰能力强、实时性高的优势，适配井下复杂电磁环境；工业以太网实现多支架诊断系统与地面监控中心的远程通信，采用TCP/IP协议，传输速率达100Mbps，满足海量数据的高速传输需求，同时通过光纤传输降低信号衰减。

3.3 软件平台开发

（1）故障特征库构建基于历史故障数据与实验数据，分类存储不同故障类型的特征参数，如“密封泄漏”对应压力信号波动幅度>5%、温度升高>8℃的特征组合，“传感器失效”对应信号无变化或跳变频率>10次/分钟的特征，支持特征参数的动态更新，通过新增现场故障案例持续优化特征库精度。（2）诊断算法集成采用模块化设计，将SVM、CNN、数据融合等算法封装为独立功能模块，用户可根据诊断需求灵活调用；可视化界面采用B/S架构，通过Web端展示系统运行状态，以仪表盘实时显示压力、温度等关键参数，用不同颜色标注故障等级（红色代表紧急故障、黄色代表预警故障），支持故障数据的查询与导出，提升操作便捷性。

3.4 实验验证与结果分析

（1）模拟故障注入实验在实验室搭建液压支架电液控制系统测试平台，通过手动设置故障（如更换老化密封件模拟泄漏、断开传感器线路模拟失效），验证诊断系统的识别能力。实验共注入12类典型故障，系统均能准确识别，其中液压故障（如压力异常）识别耗时<0.3

秒,电气故障(如通信中断)识别耗时 < 0.2 秒,证明系统对不同类型故障的快速响应能力^[4]。(2)现场实测数据对比选取某煤矿3个工作面的液压支架作为测试对象,采集1个月的运行数据与故障记录,对比诊断系统输出结果与人工排查结果。数据显示,系统故障诊断准确率达96.8%,其中机械故障(如卡滞)准确率98.2%、液压故障准确率95.5%;平均响应时间为0.25秒,较传统人工巡检(平均排查时间30分钟)效率提升7200倍,有效减少故障停机时间,验证了系统的实际应用价值。

4 液压支架电液控制系统故障诊断技术挑战与发展趋势

4.1 当前技术局限性

(1)复杂工况下的鲁棒性不足问题突出。井下工作面存在强电磁干扰、粉尘堆积、温度湿度剧烈波动等环境因素,会导致传感器采集数据出现噪声污染,如振动信号受电磁干扰产生杂波,使基于信号处理的诊断方法误判率升高;同时,支架频繁动作引发的动态载荷变化,易导致模型参数偏移,降低基于模型的诊断方法准确性,难以适应复杂多变的实际工况。(2)小样本数据下的模型泛化能力较弱。现有数据驱动诊断模型多依赖大量标注故障数据训练,而井下罕见故障(如阀组阀芯断裂)样本量极少,导致模型无法充分学习故障特征,面对未见过的故障类型时,分类准确率大幅下降,例如小样本下随机森林模型泛化误差可达15%以上,难以满足实际诊断需求。

4.2 未来研究方向

(1)数字孪生与虚拟调试技术应用前景广阔。通过构建液压支架电液控制系统数字孪生体,映射实体设备运行状态,可在虚拟环境中模拟不同故障场景(如极端压力下的密封失效),生成海量虚拟故障数据,辅助模型训练;同时借助虚拟调试技术,提前验证诊断算法

在复杂工况下的性能,减少实体设备调试成本与风险。

(2)边缘计算与5G赋能可提升实时诊断能力。将诊断算法部署在井下边缘节点,就近处理传感器数据,避免数据传输至云端的延迟,结合5G高带宽、低时延特性,实现故障数据的实时传输与诊断指令的快速下发,例如5G加持下诊断响应时间可缩短至毫秒级,满足工作面实时故障处置需求。(3)自适应学习与增量式诊断模型能突破小样本限制。模型可通过自适应学习实时调整参数,适应工况变化;增量式学习则能在新增小样本故障数据时,无需重新训练整个模型,仅更新局部参数,快速学习新故障特征,提升模型对罕见故障的识别能力,推动诊断技术向智能化、自适应化发展。

结束语

液压支架作为煤矿综采工作面的关键支护装备,其电液控制系统的稳定运行直接关系到生产安全与效率。本研究围绕系统故障诊断难题,创新融合多源信号处理、深度学习与边缘计算技术,构建了高鲁棒性的智能诊断框架。实验结果表明,该技术可实现故障毫秒级响应与96%以上识别准确率。未来将持续优化数字孪生建模与自适应学习机制,推动故障诊断向智能化、预防性维护方向跨越式发展。

参考文献

- [1]杜万飞.煤矿液压支架电液控制系统及其应用分析[J].中国新技术新产品,2022,(09):220-221.
- [2]刘康,刘卓然,刘塘.液压支架电液控制系统故障诊断系统设计研究[J].科技创新与应用,2024,14(15):55-58.
- [3]石磊.液压支架电液控制系统的故障诊断研究[J].能源与节能,2024,(05):161-164.
- [4]常彦鹏.液压支架电液控制系统故障诊断方法设计及应用[J].晋控科学技术,2023,(05):30-32.