

液压系统典型故障模式识别与预测性维修策略优化

陈 俊

东方电气集团东方汽轮机有限公司 四川 德阳 618000

摘 要：本文聚焦于液压系统典型故障模式识别与预测性维修策略优化。先阐述液压系统在现代工业的重要地位及故障的严重影响，强调研究的必要性。接着详细分析常见典型故障模式，如泄漏、压力异常等，深入探讨其成因。然后介绍多种故障模式识别方法，包括信号处理、模型和人工智能方法，并丰富技术细节与数据支撑。在预测性维修策略方面，分析传统策略不足，提出基于故障模式识别的优化策略，通过具体案例验证其有效性。最后总结研究成果，展望未来研究方向，旨在提高液压系统可靠性和维修效率，降低维修成本。

关键词：液压系统；故障模式识别；预测性维修；策略优化

1 引言

液压系统在长期运行过程中，由于受到工作环境、负载变化、液压油污染、零部件磨损等多种因素的影响，不可避免地会出现各种故障。这些故障不仅会影响设备的正常运行，导致生产效率下降，还可能引发安全事故，造成人员伤亡和财产损失。例如，在航空航天领域，液压系统故障可能导致飞行器失控，危及飞行安全；在工程机械领域，液压系统故障会使设备无法正常工作，延误工程进度。因此，对液压系统典型故障模式进行准确识别，并制定科学合理的预测性维修策略，具有重要的现实意义。

2 液压系统典型故障模式概述

液压系统常见故障模式多样。泄漏故障有外、内泄漏两种，成因包括密封件老化、加工精度不足等，外泄漏浪费液压油、污染环境，内泄漏降低系统效率、影响性能。压力异常故障表现为压力过高或过低，成因有液压泵、阀故障及液压油粘度变化等，压力异常会损坏元件或影响设备运行。振动与噪声故障成因包括液压泵、管路、阀故障及液压油污染、空气混入等，过度振动和噪声影响设备运行及人员健康。执行元件动作失灵故障表现为动作缓慢、不到位等，成因有液压油污染、液压

阀故障、执行元件内部泄漏等，液压油杂质卡滞阀芯、执行元件内泄漏会使输出力减小，导致动作异常。

3 液压系统故障模式识别方法

3.1 基于信号处理的故障模式识别方法

基于信号处理的故障模式识别方法主要是通过对液压系统运行过程中产生的各种信号，如振动信号、压力信号、流量信号等进行采集、分析和处理，提取故障特征信息，从而实现故障诊断。常用的信号处理方法包括时域分析、频域分析和时频分析等。

时域分析是通过通过对信号的时间历程进行分析，提取信号的统计特征参数，如均值、方差、峰值等，来判断系统的运行状态。例如，通过分析液压泵出口压力信号的均值和方差，可以判断液压泵的工作是否正常。当液压泵出现故障时，其出口压力信号的均值和方差会发生明显变化。实验表明，当液压泵磨损严重时，其出口压力信号的方差会增大2-3倍。

频域分析是将时域信号通过傅里叶变换转换为频域信号，分析信号的频率成分和能量分布，从而识别故障特征。例如，液压泵出现故障时，其振动信号的频率成分会发生变化，通过频域分析可以检测到这些变化，实现故障诊断^[1]。



图1 基于信号处理的故障模式识别方法框架图

时频分析是一种同时分析信号的时域和频域特征的方法,常用的时频分析方法有短时傅里叶变换、小波变换等。时频分析能够更好地处理非平稳信号,对于液压系统这种复杂的动态系统,具有更好的故障诊断效果。例如,采用小波变换对液压系统的振动信号进行分析,可以准确地提取故障特征信息,识别故障类型和故障位置。

3.2 基于模型的故障模式识别方法

基于模型的故障模式识别方法是建立液压系统的数学模型,通过比较系统的实际输出与模型预测输出之间的差异,来判断系统是否存在故障。常用的建模方法有机理建模和系统辨识建模。

机理建模是根据液压系统的工作原理和物理定律,建立系统的数学方程。例如,对于液压泵,可以根据其流量、压力和转速之间的关系建立数学模型。设液压泵的流量为 Q ,压力为 P ,转速为 n ,则其流量方程可以表示为:

$$Q = V \cdot n - C_s \cdot P$$

其中 V 为液压泵的排量, C_s 为液压泵的泄漏系数。通过建立这样的数学模型,可以预测液压泵在不同工况下的输出参数,从而判断其是否存在故障。

系统辨识建模则是通过采集系统的输入输出数据,利用参数估计方法确定系统的模型参数。建立好数学模型后,采用状态估计、参数估计等方法对系统进行故障诊断。状态估计方法是通过估计系统的状态变量,并与实际测量值进行比较,判断系统是否存在故障。例如,采用卡尔曼滤波器对液压系统的状态进行估计,当估计值与实际测量值之间的误差超过一定阈值时,判断系统出现故障。参数估计方法是通过估计系统的模型参数,当参数发生显著变化时,判断系统出现故障。

3.3 基于人工智能的故障模式识别方法

随着人工智能技术的不断发展,基于人工智能的故障模式识别方法在液压系统故障诊断中得到了广泛应用。常用的人工智能方法包括人工神经网络、专家系统、模糊逻辑等。

人工神经网络具有自学习、自适应和非线性映射等能力,能够处理复杂的非线性问题。在液压系统故障诊断中,可以将液压系统的故障特征参数作为神经网络的输入,将故障类型作为输出,通过训练神经网络,使其能够根据输入的故障特征参数准确识别故障类型^[2]。例如,采用三层前馈神经网络对液压泵的故障进行诊断,输入层节点数为6,分别对应液压泵的振动、压力、流量等6个特征参数;隐藏层节点数为10;输出层节点数为3,分别对应液压泵的正常、磨损、气蚀3种故障类型。经过大量样本的训练后,该神经网络对液压泵故障的诊

断准确率可有效提升。

专家系统是一种基于知识的系统,它将专家的知识 and 经验以规则的形式存储在知识库中,通过推理机对输入的信息进行推理和判断,实现故障诊断。例如,某液压系统故障诊断专家系统,知识库中存储了数百条故障诊断规则,如“如果液压泵振动信号的峰值超过正常值的2倍,且压力信号的方差增大1.5倍,则判断液压泵出现磨损故障”。当输入液压系统的故障特征信息时,推理机根据知识库中的规则进行推理,得出故障诊断结果。

模糊逻辑是一种处理不确定性和模糊性的方法,在液压系统故障诊断中,可以利用模糊逻辑对故障特征参数进行模糊化处理,通过模糊推理判断系统是否存在故障以及故障的类型。例如,将液压泵的振动强度分为“弱”、“中”、“强”三个模糊等级,将压力波动范围分为“小”、“中”、“大”三个模糊等级,然后根据模糊规则进行推理,判断液压泵的工作状态。

4 液压系统预测性维修策略优化

4.1 传统预测性维修策略分析

传统的预测性维修策略主要包括定期维修和基于状态的维修。定期维修是按照预定的时间间隔对设备进行维修,不考虑设备的实际运行状态。这种维修策略的优点是计划性强,便于组织和管理,但存在维修不足或维修过度的问题。维修不足可能导致设备故障扩大,影响生产安全;维修过度则会增加维修成本,降低设备的可用性。例如,某企业的一台液压设备采用定期维修策略,每1000小时进行一次维修,但由于设备实际运行状态良好,在维修时很多零部件并未达到维修或更换的标准,造成了不必要的维修成本浪费,同时频繁的维修还导致设备停机时间增加,影响了生产效率。基于状态的维修是通过对设备的运行状态进行实时监测,根据监测数据判断设备的健康状况,当设备出现故障征兆时进行维修。这种维修策略能够根据设备的实际情况合理安排维修时间和维修内容,避免了定期维修的盲目性,但需要配备先进的监测设备和专业的技术人员,成本较高^[3]。

4.2 基于故障模式识别的预测性维修策略优化思路

基于故障模式识别的预测性维修策略优化是在传统预测性维修策略的基础上,结合故障模式识别技术,对设备的故障模式进行准确识别和分类,根据不同故障模式的特点和发展规律,制定个性化的维修策略。具体思路如下:首先,通过故障模式识别方法对液压系统的故障模式进行准确识别和分类,建立故障模式库。故障模式库应包含各种故障模式的特征参数、成因、发展规律等信息。例如,对于液压泵磨损故障,故障模式库中应

记录其振动信号的频率特征、压力信号的变化规律、磨损程度与运行时间的关系等信息。其次,根据故障模式库中的信息,对不同故障模式进行风险评估,确定故障的严重程度和发生概率。风险评估可以采用定性评估和定量评估相结合的方法,综合考虑故障对设备性能、生产安全、环境等方面的影响。例如,采用风险矩阵法对故障进行风险评估,将故障的严重程度分为“低”、“中”、“高”三个等级,将发生概率分为“罕见”、“可能”、“经常”三个等级,然后根据故障的严重程度和发生概率确定其风险等级。最后,根据风险评估结果,制定个性化的维修策略。对于严重程度高、发生概率大的故障模式,应采取预防性维修措施,提前更换易损件或进行维修保养;对于严重程度低、发生概率小的故障模式,可以采用事后维修或状态监测维修的方式。例如,对于液压泵磨损故障,如果风险评估结果显示其严重程度高、发生概率大,则在液压泵运行一定时间后,提前更换其关键零部件,以防止故障的发生。

4.3 优化后的预测性维修策略实施步骤

优化后的预测性维修策略实施步骤主要包括以下几个方面:

4.3.1 数据采集与监测

安装合适的传感器,对液压系统的关键参数,如压力、流量、温度、振动等进行实时监测,并将监测数据传输到数据采集系统。数据采集系统应具备数据存储、处理和分析功能,能够对采集到的数据进行初步处理和分析。例如,采用高精度的压力传感器和振动传感器,采样频率设置为1000Hz,能够准确采集液压系统的压力和振动信号。

4.3.2 故障模式识别

利用故障模式识别方法对采集到的数据进行分析处理,提取故障特征信息,与故障模式库中的信息进行比较,识别设备的故障模式^[4]。例如,采用基于小波变换和人工神经网络的故障模式识别方法,先利用小波变换对采集到的信号进行去噪和特征提取,然后将提取的特征参数输入到人工神经网络中进行故障模式识别。

4.3.3 风险评估

根据识别出的故障模式,结合故障模式库中的信息,对故障进行风险评估,确定故障的严重程度和发生

概率。例如,采用层次分析法对故障的风险进行评估,将故障的严重程度和发生概率作为评估指标,通过建立层次结构模型和判断矩阵,计算出故障的风险等级。

4.3.4 维修决策

根据风险评估结果,制定维修决策。维修决策应包括维修时间、维修内容、维修方式等信息。对于需要立即维修的故障,应及时安排维修人员进行维修;对于可以暂缓维修的故障,应制定监测计划,定期对故障进行监测,观察其发展情况。例如,如果故障风险等级为“高”,则立即安排维修人员进行维修;如果故障风险等级为“中”,则在设备停机时进行维修;如果故障风险等级为“低”,则继续进行状态监测。

4.3.5 维修实施与反馈

按照维修决策进行维修实施,维修完成后对维修效果进行评估和反馈。将维修过程中的经验教训反馈到故障模式库和维修策略中,不断完善预测性维修策略。例如,维修完成后对设备进行试运行,检测设备的性能指标是否恢复正常,如果存在问题,及时调整维修策略。

结语

本文围绕液压系统典型故障模式识别与预测性维修策略优化展开研究,先分析液压系统泄漏、压力异常等常见故障模式及其成因影响,介绍基于信号处理、模型和人工智能等多种故障模式识别方法并分析优缺点,接着指出传统预测性维修策略不足,提出基于故障模式识别的优化思路并阐述实施步骤。未来研究将进一步深入故障模式识别方法,加强故障预测技术研究,探索降低预测性维修策略实施成本的方法,开展远程监测和诊断技术研究,以提高故障诊断、维修决策及维修服务水平。

参考文献

- [1]孙万峰,肖杰,丁佩军,等.液压系统常见故障及解决方案[J].工程机械文摘,2025,(02):58-60.
- [2]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(04):92-94.
- [3]程二九,王建军,郝素兰.液压系统故障智能诊断技术研究[J].中国设备工程,2025,(10):191-193.
- [4]杨成刚,赵红美,张春辉,等.液压系统数据采集与故障预测研究[J].工业技术与职业教育,2022,20(03):19-24.