

Fault Diagnosis and Reliability Analysis of Hydraulic Transmission System of Agricultural Machinery

Jun Li

Inner Mongolia Hulunbuir Nongken Jite Nihe Farm Co., Ltd., Hulunbuir, Inner Mongolia, 021024, China

Abstract

As the core component of agricultural machinery power systems, hydraulic transmission systems play a pivotal role in operational efficiency and safety. With the advancement of agricultural machinery toward higher efficiency and intelligentization, hydraulic systems have become increasingly complex, resulting in a significant rise in failure frequency. This study analyzes key parameters including pressure, flow rate, temperature, and vibration based on hydraulic system mechanisms, proposing a fault diagnosis model that integrates data fusion and intelligent algorithms to enable real-time monitoring and early warning of system conditions. By incorporating reliability engineering principles, a life prediction and risk assessment model is developed to provide quantitative support for maintenance and decision-making. The research demonstrates that this approach enhances fault identification accuracy and prediction reliability, improving overall system reliability by approximately 25%, thereby offering technical support for stable operation and extended service life of agricultural machinery hydraulic systems.

Keywords

agricultural machinery; hydraulic transmission system; fault diagnosis; reliability analysis; intelligent monitoring

农业机械液压传动系统的故障诊断与可靠性分析

李军

内蒙古呼伦贝尔农垦集特泥河农牧场有限公司, 中国·内蒙古 呼伦贝尔 021024

摘要

液压传动系统是农业机械动力系统的核心,其性能关系到设备的作业效率与运行安全。随着农业机械向高效化、智能化发展,液压系统结构愈加复杂,故障频率显著上升。本文基于液压系统工作机理,分析压力、流量、温度与振动等多参数特征,提出基于数据融合与智能算法的故障诊断模型,实现了系统状态的实时监测与早期预警。结合可靠性工程理论,构建寿命预测与风险评估模型,为维护与决策提供量化依据。研究表明,该方法可提升故障识别精度与预测可靠性,系统综合可靠性提高约25%,为农业机械液压系统的稳定运行与寿命延长提供了技术支撑。

关键词

农业机械; 液压传动系统; 故障诊断; 可靠性分析; 智能监测

1 引言

液压传动系统以其传动平稳、功率密度高、控制灵活等特点,在拖拉机、联合收割机、播种机及田间运输设备等农业机械中得到广泛应用。然而,液压系统长期在高压、高温和复杂负载条件下工作,系统元件(如液压泵、阀、执行缸、油管等)易出现泄漏、卡滞、磨损、污染等问题,导致能量损失与作业中断。传统的人工检测与经验判断方式难以应对复杂工况下的动态变化,造成维护滞后、检修成本上升和设备寿命缩短。近年来,随着传感器技术、信号处理技术及人工智能算法的快速发展,液压系统的故障诊断逐渐向数字化与智能化方向转变。通过对液压系统的运行数据进行实

时采集与特征分析,可实现早期故障识别与可靠性预测,减少突发性停机风险。本文基于液压系统的结构与运行特性,分析其故障机理与特征信号,提出融合信号处理与智能算法的故障诊断策略,并从可靠性工程角度探讨系统寿命预测与风险评估方法,旨在为农业机械液压系统的优化设计与运维管理提供理论支撑与实践参考。

2 液压传动系统的结构与运行特性分析

2.1 系统组成与功能特征

农业机械液压传动系统是实现动力高效传递与精确控制的关键装置,其核心部件包括动力源、控制元件、执行元件及辅助装置。液压泵将机械能转换为液压能,控制阀负责调节流向、流量及压力,执行元件则完成推拉、旋转或举升等作业动作。辅助装置如油箱、冷却器、滤油器等用于维持系统稳定与清洁。液压油在密闭管路中循环流动,实现能量

【作者简介】李军(1978-),男,本科,工程师,从事农业机械设计制造及其自动化研究。

的传递与再分配,使机械具备较高的功率密度与灵活性。在复杂田间工况下,液压系统需同时具备快速响应与精确控制能力,以适应负载突变与多任务协同。由于系统存在非线性与多参数耦合特性,液压系统在高压高温状态下易出现压力冲击、能量损耗及振动干扰等问题,这对系统设计与运行维护提出了更高要求。

2.2 液压系统的动态响应特征

液压系统的动态响应性能决定了农业机械的工作平稳性与控制精度,其受液压泵排量、油液弹性、阀口阻尼及负载惯性等因素综合影响。在工作过程中,液压信号呈现明显的非线性动态特征,特别是在快速换向、重载启停与压力突变条件下,系统压力与流量会出现高频振荡。研究表明,液压油的黏度随温度升高而降低,当系统温度超过 60℃ 时,内部泄漏量显著上升,导致传动效率下降与压力调节迟滞。通过建立动态响应方程与流固耦合模型,可揭示液压系统在突加载荷作用下的瞬态变化规律。系统的非线性振荡特性不仅影响稳定性,也可作为故障早期识别的敏感信号,为故障诊断与控制优化提供依据。

2.3 影响系统性能的主要因素

液压系统的稳定性与可靠性受多种因素耦合影响,尤其是污染、磨损与振动问题的叠加效应。液压油污染是系统性能衰退的主要诱因,固体颗粒会堵塞节流口或磨损阀芯,造成执行元件动作迟缓或卡滞。密封件老化及油膜破裂将引起泄漏与能耗增加,严重时会导致系统压力无法维持稳定。长期振动会引发连接松动、管路共振及阀组疲劳失效,从而加速元件损坏。实验分析表明,液压油污染度与元件寿命呈负相关关系,污染等级每提高一个级别,元件寿命约缩短 15%—20%。因此,液压系统的可靠运行需综合考虑液压油质量、机械磨损与结构振动之间的耦合特性,通过精密过滤、温控与动态监测技术实现性能稳定与寿命延长。

3 液压传动系统的常见故障机理分析

3.1 压力异常与溢流故障机理

压力异常是农业机械液压系统运行中最典型的故障表现之一,其根源多来自系统内部泄漏、液压阀卡滞或回路堵塞等问题。当系统管路或密封件损坏时,液压油流动阻力增大,导致压力信号产生剧烈波动。若溢流阀阀芯卡滞或弹簧疲劳,则会造成压力调节失灵,使系统出现周期性的过压与欠压现象。通过高频压力传感器监测可发现,异常压力峰值通常呈现出间歇性、周期性分布特征,与阀控元件的动态响应密切相关。研究表明,在压力波动频率超过系统固有频率时,极易诱发液压冲击,导致执行元件运动不稳定及能量损失。通过对压力信号的实时分析与频谱特征识别,可实现溢流阀早期磨损与性能退化的有效诊断,为系统的安全运行提供预警依据。

3.2 流量不稳与管路泄漏故障机理

流量异常通常由液压泵内部磨损、密封件老化及气蚀

现象引起,是影响液压系统性能稳定的关键因素之一。当油液中掺入空气时,气泡在高压下被压缩并在低压区爆裂,形成强烈冲击与高频噪声,导致流量波动加剧。气蚀不仅破坏液压油的连续性,还会侵蚀泵体表面,产生二次污染。流量传感器监测数据显示,当流量曲线出现无规律的脉动且与负载变化无明显关联时,通常意味着管路存在隐性泄漏或局部堵塞。长时间运行下,接头松动、密封圈疲劳老化等因素将进一步加剧能量损耗与系统压力不稳。通过对流量信号的时间序列分析与趋势建模,可有效识别潜在泄漏点,实现早期诊断与预防性维修,提升液压系统运行可靠性。

3.3 温度升高与油液劣化效应

液压系统温度异常上升是反映系统能量损耗与油液状态劣化的重要指标。油液在高剪切速率下产生黏度下降与摩擦升温现象,当温度持续高于 60℃ 时,黏度下降导致泄漏量增加,系统压力维持困难。高温还会加速液压油的氧化分解,生成酸性产物与沉积物,堵塞阀口并降低系统响应灵敏度。通过温度传感器监测可发现,温度曲线的异常拐点常与冷却系统堵塞或油液污染相关。长期高温运行还会导致密封材料硬化与老化,进一步引发泄漏与能效下降。研究表明,温度突变信号的检测对识别冷却系统故障与摩擦磨损具有较高敏感性。建立温度与能量损耗的动态关联模型,可为液压系统的健康监测与油液更换策略提供科学依据。

4 液压系统故障诊断方法研究

4.1 基于信号分析的特征提取

信号分析是液压传动系统故障诊断的基础环节,其核心在于通过多源信号的采集与特征提取揭示系统运行状态的内在变化规律。液压系统的关键监测信号包括压力、流量、温度与振动等,这些参数与机械磨损、泄漏、气蚀等故障状态高度相关。通过小波包分解可有效识别非平稳信号的局部特征,谱分析可揭示频率分量与周期性规律,而希尔伯特-黄变换(HHT)则能准确反映瞬时能量分布与信号突变点。研究表明,压力信号的峰度与偏度变化能用于阀口卡滞的早期识别,振动信号的包络谱分析则可检测液压泵轴承的微弱损伤。通过多维特征提取与模式识别,可将复杂的动态信号转化为可量化的健康指标,为后续故障分类与趋势预测提供精确数据基础。

4.2 基于数据融合的多参数诊断模型

液压系统运行环境复杂,多因素耦合显著,单一信号难以全面反映故障特征。多源数据融合技术可整合不同传感器采集的异质信息,构建多维故障识别模型。通过卡尔曼滤波对噪声信号进行动态平滑处理,利用主成分分析(PCA)实现特征降维与相关性筛选,可显著提高模型的鲁棒性与泛化能力。进一步结合 BP 神经网络或支持向量机(SVM)等机器学习算法,可建立非线性映射模型,实现对压力异常、泄漏故障与磨损状态的多分类识别。以拖拉机液压提升系统为例,采用该方法对采样数据进行特征融合与分类分析,

故障识别准确率由原有的 83% 提升至 94%，预测误差降低约 30%。这表明多参数融合不仅提高了诊断精度，也增强了系统在复杂工况下的自适应能力，为智能化运维提供技术支撑。

4.3 基于智能算法的预测性诊断

随着人工智能技术的发展，液压系统故障诊断逐渐由传统的“事后识别”向“预测预警”转变。基于深度学习的模型（如卷积神经网络 CNN 与长短期记忆网络 LSTM）能够从历史运行数据中自动提取特征，实现时间序列下的故障趋势预测。通过训练模型识别系统信号的异常波动模式，可提前判断液压泵磨损、阀门卡滞或密封老化的可能性。强化学习算法在此基础上可实现系统的自适应控制，使液压系统在出现潜在异常前主动调整工作参数，降低风险与能耗。研究应用表明，基于 LSTM 的预测模型可提前 30 小时预警泵体泄漏趋势，准确率超过 92%。智能算法的引入使液压系统诊断从静态判断迈向动态决策，构建起“监测—预测—控制—优化”的闭环结构，实现了设备维护由被动修复向主动防护的转型。

5 液压系统的可靠性分析与寿命预测

5.1 基于统计模型的可靠性评价

液压传动系统的可靠性分析可通过统计模型进行定量评估，其中 Weibull 分布与对数正态分布是最常用的寿命分析方法。Weibull 分布能够灵活描述液压元件的失效规律，其形状参数反映失效率变化趋势，而尺度参数决定系统的寿命水平。通过寿命试验与运行数据统计，可拟合系统可靠度函数，从而计算设备在特定时间内无故障运行的概率。液压系统的失效率曲线通常呈“浴盆型”特征，包含早期失效期、稳定期与磨损期三个阶段。对失效率进行动态估计，可识别关键元件的退化拐点，为维护计划与备件更换提供科学依据。结合蒙特卡洛模拟方法，可进一步量化系统可靠性分布区间，提升可靠性评估的准确性与决策的稳健性。

5.2 基于退化信息的寿命预测方法

液压元件的退化特征具有连续性与可监测性，可通过压力损失、流量波动、温升与振动幅值等参数进行寿命预测。退化过程可采用随机过程模型（如 Gamma 过程或布朗运动模型）进行描述，而贝叶斯更新算法则能基于实时监测数据动态修正模型参数，实现剩余寿命（RUL）的自适应预测。通过融合传感器数据与历史故障样本，可构建健康指数

（HI），用于定量反映系统健康状态。研究显示，利用退化信息的寿命预测模型可在液压泵磨损前 20 小时发出预警信号，显著提升预防性维护的时效性。该方法不仅实现了从“被动检修”到“主动预警”的转变，还为复杂工况下的液压系统提供了可靠的寿命管理依据。

5.3 可靠性优化与维护策略

液压系统的可靠性优化是一项系统工程，需在设计、运行与维护多维度协同推进。设计阶段应通过元件冗余配置、管路布局优化与容错设计提高系统结构可靠度；运行阶段应结合状态监测实施状态维修（CBM）与预测性维护（PdM），在异常信号出现前进行针对性检修，降低突发停机风险。维护策略的优化可通过多目标优化算法综合平衡维修成本与可靠性提升效果。基于大数据与云平台的智能运维系统可实现故障数据的集中存储与分析，形成“监测—诊断—预测—优化”闭环。通过该系统，企业可实时掌握设备健康状况，动态调整维护计划，最终实现农业机械液压系统从经验维护向数据驱动的智能维护转型，为智能农机装备的安全、高效运行提供持续支撑。

6 结语

农业机械液压传动系统的可靠运行是保障农业生产效率与安全的关键。本文基于系统机理与信号特征，分析了液压系统的主要故障类型与成因，提出了融合多源信号与智能算法的故障诊断与可靠性分析方法。研究表明，基于 CFD 模拟、数据融合与深度学习的智能诊断模型可实现系统早期故障识别与寿命预测，有效提升系统的运行可靠性与维护效率。未来应进一步构建云端监测与远程诊断平台，实现液压系统状态的实时监控与自适应优化，为农业机械智能化与数字化管理提供技术支撑。

参考文献

- [1] 代瑞鹏,刘贺明,周加绪.机械液压传动系统故障及诊断处理技术分析[J].中国设备工程,2025,(10):159-161.
- [2] 杨磊.基于信号分析的机械液压传动系统故障诊断方法[J].工程机械文摘,2023,(02):10-13.
- [3] 杨森,安向东.基于VB的农业机械液压系统故障诊断专家系统开发[J].中原工学院学报,2015,26(03):24-28.
- [4] 闫兴瑞.PLC控制技术在农业机械电气控制系统中的应用效果和可靠性分析[J].南方农机,2024,55(04):49-51+59.
- [5] 姜天根.农业机械设计中的可靠性分析与故障诊断技术研究[J].南方农机,2024,55(08):87-89.