

输送设备轴端密封失效的动态监测技术探讨

朱振宇 韩雨晖

北京航天石化技术装备工程有限公司 北京 100176

摘要: 输送设备轴端密封失效直接影响设备运行稳定性,传统监测方法难以捕捉动态失效特征。本文聚焦轴端密封失效的动态监测技术,分析密封结构特性与失效诱因,构建多物理场监测指标体系,提出接触式与非接触式融合监测架构,研究信号降噪、特征提取及时序分析方法,建立失效模式识别与趋势预测模型,开发多级动态预警系统。通过多源数据融合与边缘计算优化,实现密封失效的早期精准预警,为复杂工况下密封系统可靠性维护提供技术支持。

关键词: 输送设备;轴端密封;动态监测;信号处理;失效预警

引言:输送设备在工业生产中应用广泛,轴端密封作为关键部件,其性能直接影响设备运行稳定性与安全性。然而,轴端密封在复杂工况下易失效,传统监测方法存在局限性。动态监测技术能实时感知密封状态,及时发现潜在失效风险。研究输送设备轴端密封失效的动态监测技术,对提高设备可靠性、降低维护成本、保障工业生产安全具有重要意义。

1 输送设备轴端密封失效的动态监测基础要素

1.1 轴端密封的核心结构与动态工作特性

轴端密封系统通常由动环、静环、弹性元件、辅助密封件及传动机构等核心部件构成。动环随主轴旋转,当主轴转速达到1000-3000转/分钟时,形成流体动压效应;静环通过弹性元件实现动态跟随补偿,两者接触面形成动态密封边界。在设备运行过程中,密封面承受周期性机械载荷与流体压力波动,接触应力分布随转速变化呈现非线性特征^[1]。当密封介质黏度在1-100厘泊范围内、温度在-20-150摄氏度区间、压力梯度在0.1-10兆帕/米时,共同影响密封界面润滑状态,形成混合摩擦、边界摩擦等复杂工况。弹性元件的预紧力衰减特性与辅助密封件的蠕变行为,导致密封间隙随运行时间呈现动态漂移规律,在运行1000小时后,密封间隙可能增大0.01-0.05毫米,为失效监测带来技术挑战。

1.2 密封失效的关键动态诱因与演化规律

密封失效过程呈现明显的阶段性演化特征。初始阶段,微动磨损导致密封面粗糙度增加,引发局部泄漏通道形成;中期阶段,流体冲蚀与化学腐蚀协同作用加速密封材料劣化,泄漏量呈指数增长趋势;末期阶段,密封元件结构性损伤引发灾难性失效。振动载荷通过改变密封面接触状态影响磨损速率,压力脉动导致密封间隙周期性扩张与收缩,温度梯度引发材料热应力集中,三

者构成失效演化的主要动态诱因。密封介质中的固体颗粒会加剧磨粒磨损,而润滑膜破裂则直接导致干摩擦状态,这些因素相互作用形成复杂的失效机理网络。

1.3 动态监测的核心指标体系构建依据

监测指标体系需反映密封系统多物理场耦合特性。振动频谱分析可捕捉密封面磨损引发的特征频率成分,当磨损导致密封环偏磨时,会出现频率为轴频2-5倍的特征频率;声发射信号能识别微裂纹扩展的瞬态能量释放,裂纹扩展时声发射信号幅值会显著增大;温度场分布反映摩擦生热与热传导平衡状态,正常工作时密封面温度在50-80摄氏度,异常时可能超过100摄氏度;压力脉动监测揭示密封腔体动态密封性能,压力波动频率在1-10赫兹时,可反映密封状态的稳定性。多参数联合监测可突破单一指标的局限性,通过构建泄漏量-振动能量-温度梯度的三维评价空间,实现密封状态的全息表征。指标阈值设定需考虑设备工况波动范围,建立基于运行历史的动态基准模型,确保监测系统的环境适应性。

1.4 动态监测的技术适配性要求

监测技术选型应兼顾测量精度与工程实用性。接触式传感器需满足密封结构空间限制,传感器尺寸应小于20毫米×20毫米×10毫米;非接触式测量需克服介质干扰问题,对于黏度大于50厘泊的介质,需采用特殊的光学或声学测量方法。高速旋转部件的监测要求传感器具备抗冲击性能,能承受的冲击加速度不低于10g;高温工况需解决热漂移补偿难题,当温度超过100摄氏度时,传感器测量误差应控制在±1%以内。数据采集系统需实现多通道同步采样,采样通道数不少于8通道,采样频率应覆盖密封失效特征频段,对于振动信号,采样频率不低于10千赫兹。无线传输技术需平衡功耗与数据完整性,传输距离在50-100米时,数据丢包率应低于0.1%;边缘计

算单元应具备实时特征提取能力,处理延迟不超过10毫秒。监测系统架构设计需考虑与现有设备控制系统的兼容性,预留标准数据接口支持后续功能扩展,接口传输速率不低于1兆比特/秒。

2 输送设备轴端密封失效动态监测核心技术体系

2.1 接触式动态监测技术原理与应用架构

接触式监测通过直接测量密封元件的物理参数实现状态感知。应变片技术基于金属电阻应变效应,将密封环应力变化转换为电信号输出,需解决高温环境下的蠕变补偿问题^[2]。压电传感器利用正压电效应捕获密封面微振动,其高频响应特性适用于早期磨损检测。电涡流位移传感器通过电磁感应原理非侵入测量密封间隙,需针对金属密封环优化工作频率以抑制趋肤效应。接触式测量单元通常采用模块化设计,集成于密封辅助结构中,通过滑环或无线能量传输解决旋转部件供电难题,数据采集模块需具备抗电磁干扰能力以保障信号完整性。

2.2 非接触式动态监测技术核心机制

振动监测依托加速度传感器捕捉密封系统特征频率,通过频谱分析识别动环不平衡或轴承缺陷引发的异常振动。红外热成像技术利用普朗克定律检测密封面温度分布,结合热传导模型反演接触状态,需校准介质发射率参数以提高测量精度。超声波泄漏检测基于声波衰减特性定位泄漏点,通过设定阈值区分正常湍流与异常泄漏信号。光纤光栅传感器利用布拉格反射原理监测密封结构应变,其抗腐蚀特性适用于恶劣工况,但需解决温度交叉敏感问题。非接触式技术部署需考虑介质特性对测量路径的影响,采用多波长复合探测提升环境适应性。

2.3 多源传感融合监测技术的协同逻辑

多源数据融合通过时空对齐实现信息互补。振动与温度数据联合分析可区分磨损与腐蚀主导的失效模式,泄漏信号与压力脉动关联建模能提升泄漏量估算精度。特征层融合采用主成分分析降维处理,决策层融合运用D-S证据理论处理不确定性信息。时间同步通过GPS授时或脉冲同步信号实现,空间配准采用坐标变换矩阵校正传感器安装偏差。融合算法需兼顾实时性与准确性,采用增量式学习机制适应密封性能渐变过程,通过构建知识图谱实现监测结果的因果推理。

2.4 动态监测系统的硬件集成与信号传输设计

硬件集成遵循IP65防护标准构建分布式架构,传感器节点采用低功耗设计延长续航时间。信号调理电路集成滤波、放大及模数转换功能,针对不同物理量优化采样参数。数据传输采用工业以太网与无线ZigBee混合组网,关键信号通过光纤传输确保抗干扰性。边缘计算单

元部署特征提取算法,仅上传异常数据以减少通信负荷。上位机系统采用模块化软件架构,支持多协议数据接入与可视化展示,预留OPCUA接口实现与设备控制系统的互联互通。硬件冗余设计保障系统可靠性,看门狗电路与自诊断功能提升容错能力。

3 轴端密封失效动态监测信号处理关键技术

3.1 监测信号的预处理技术

轴端密封动态监测过程中,原始信号常受机械振动、电磁干扰及流体脉动等多重因素影响,导致噪声混叠与幅值失真^[3]。降噪环节需结合信号特性选择自适应算法,小波阈值法通过分解信号至不同尺度,对高频噪声分量进行选择性抑制,同时保留失效特征相关的低频信息,当分解层数在3-5层时,降噪效果最佳。滤波处理则需根据频带分布设计数字滤波器,如有限脉冲响应(FIR)滤波器可避免相位失真,适用于对时序精度要求较高的场景,滤波器阶数在10-20阶时,滤波效果较好。针对多传感器信号的时间偏移问题,需采用基于互相关函数的时延估计方法,通过计算信号间相似性峰值位置实现毫秒级时间对齐,当信号采样频率为10千赫兹时,时间对齐精度可达±0.1毫秒,确保后续特征融合的准确性。

3.2 失效特征信号的提取方法

密封失效引发的信号变化往往表现为微弱瞬态特征,需采用非线性动力学方法增强可检测性。经验模态分解(EMD)可将复杂信号自适应分解为若干本征模态函数(IMF),其中包含失效特征的高频IMF分量可通过能量熵或峭度值进行筛选。对于周期性失效模式,如密封环偏磨导致的周期性冲击,可利用Teager能量算子增强瞬态冲击的幅值特征,结合短时能量分析定位故障发生时刻。此外,高阶统计量方法如双谱分析可抑制高斯噪声干扰,提取由密封面摩擦非线性引起的相位耦合特征。

3.3 动态信号的时序分析与频域分析技术

时序分析侧重捕捉信号随时间演变的动态特性,递归定量分析(RQA)通过计算递归图中的确定性、层流性等指标,可量化密封失效过程中系统复杂度的突变。频域分析则需兼顾稳态与瞬态成分,加窗傅里叶变换通过滑动窗口实现局部频谱估计,适用于分析泄漏量突变引发的频带能量转移。对于非平稳信号,Wigner-Ville分布虽存在交叉项干扰,但结合平滑伪Wigner-Ville分布可有效抑制虚假成分,突出密封失效特征频率的时变特性。

3.4 信号特征与密封失效状态的关联映射方法

建立特征-状态映射需解决高维特征空间中的模式可分性问题。流形学习算法如局部线性嵌入(LLE)可将高维特征投影至低维流形,揭示密封磨损、腐蚀等不同失

效模式的内在分布规律。深度学习方面,卷积神经网络(CNN)可自动提取信号的时空特征,通过堆叠卷积层与池化层实现特征降维,结合全连接层完成失效状态分类。对于剩余寿命预测任务,长短期记忆网络(LSTM)通过门控机制记忆历史状态信息,可有效建模密封性能退化的时序依赖性,输出连续的寿命概率分布。

4 轴端密封失效动态监测的失效识别与预警技术

4.1 基于动态特征的密封失效模式识别逻辑

失效模式识别依托多维度动态特征融合分析^[4]。针对磨损、腐蚀、泄漏等典型失效模式,提取振动信号的时频域特征、温度场的梯度分布特征及泄漏信号的能量熵特征,构建高维特征向量。采用改进的深度卷积神经网络对特征向量进行自动分类,网络结构引入注意力机制强化关键特征权重,通过残差连接解决深层网络梯度消失问题。针对数据不平衡问题,运用生成对抗网络合成少数类样本,提升模型对罕见失效模式的识别能力。识别结果通过混淆矩阵评估分类精度,结合领域知识修正误判样本,实现模型持续优化。

4.2 失效趋势的动态预测模型构建技术

趋势预测采用数据驱动与机理模型融合的方法。基于长短期记忆网络构建时间序列预测模型,输入历史监测数据与工况参数,输出未来一段时间的失效指标预测值。为捕捉非线性退化规律,引入门控循环单元增强模型对长期依赖关系的处理能力。结合密封材料磨损的Archard模型,构建物理约束的混合预测框架,通过卡尔曼滤波融合数据模型与机理模型的预测结果,提升预测稳定性。模型更新采用滚动学习策略,每新增一批监测数据即重新训练最后几层网络参数,适应密封性能的动态变化。

4.3 多级预警阈值的动态设定方法

预警阈值设定需兼顾设备安全与运行效率。基于历史失效数据统计分布确定初始阈值,采用核密度估计方法拟合失效指标的概率密度函数,通过设定不同置信水平划分预警等级。考虑工况波动对阈值的影响,引入协

变量调整机制,根据转速、压力等参数动态修正阈值基准。采用马尔可夫链模型预测密封状态转移概率,当短期转移概率超过阈值时触发提前预警。阈值优化通过强化学习算法实现,以误报率与漏报率为代价函数,自动调整阈值参数直至收敛至最优解。

4.4 动态监测与预警系统的运行保障技术

系统运行保障涵盖数据质量、模型可靠性与硬件稳定性。数据质量监控采用滑动窗口统计方法检测异常值,通过三西格玛准则标记离群点,结合相邻时刻数据相关性进行修正。模型可靠性评估引入蒙特卡洛模拟,通过注入随机噪声测试模型鲁棒性,设定模型性能衰退阈值触发再训练流程。硬件冗余设计采用双传感器热备份机制,主传感器故障时自动切换至备用传感器,切换过程通过硬件看门狗电路保障无间断运行。系统自诊断功能定期检测通信链路状态与电源稳定性,故障信息通过加密通道上传至维护终端,指导现场快速处置。

结束语

输送设备轴端密封失效动态监测技术通过多维度指标构建、多源传感融合及先进信号处理与预警方法,实现了对密封状态的精准感知与及时预警。实际应用中,需结合设备具体工况,不断优化监测方案,提升系统可靠性与适应性。该技术为保障输送设备稳定运行提供了有力手段,有助于推动工业生产向智能化、高效化方向发展。

参考文献

- [1]张凤娇,刘建伟.无线传感器在刮板输送设备监测系统中的应用[J].机械工业标准化与质量,2023(12):53-56.
- [2]渠婷婷,刘宏飞,王金平,等.刮板输送设备动力部工况监测及故障报警装置研究[J].机械工业标准化与质量,2023(8):37-39.
- [3]张伟,常奇惠.带式输送机在线监测与故障诊断系统的研究探讨[J].煤,2025,34(10):89-91.
- [4]聂政,付正,孟祥雪,孙林,贾政,朱楠.设备运行在线动态监测技术应用研究[J].中国设备工程,2021(S01):37-39.