

天然气站场压缩机故障预测与基于振动信号的智能诊断

靳丁琿, 李志文, 程士瀚

国家管网集团北京管道有限公司, 北京 100020

DOI:10.61369/ERA.2026030011

摘要 : 本文围绕振动信号的故障特性提取与智能诊断技术开展深刻研究。首先剖析压缩机典型故障和振动信号的映射联系, 进而探究时域、频域及时频域的特性提取办法优化路径, 重点研究基于机器学习与深度学习的智能诊断模型构建逻辑, 最后结合站场实际运用场景提出故障预测体系的实施架构。研究显示, 通过振动信号的精细化解析与智能算法的交融运用, 可达成压缩机早期故障的精确辨识与趋势预测, 为设备运维给予科学支撑。

关键词 : 天然气站场; 压缩机; 故障预测; 振动信号; 智能诊断

Prediction and Intelligent Diagnosis of Compressor Faults Based on Vibration Signals in Gas Station

Jin Dinghui, Li Zhiwen, Cheng Shihan

Petrochina Beijing Gas Pipeline Co.,Ltd. Beijing 100020

Abstract : This paper focuses on the in-depth research of fault feature extraction and intelligent diagnosis technology based on vibration signals. Firstly, the typical faults of the and the mapping relationship with the vibration signals are analyzed, and then the optimization path of the characteristic extraction method in the time domain, frequency domain and time-frequency domain is explored. construction logic of intelligent diagnosis model based on machine learning and deep learning is studied, and finally the implementation architecture of fault prediction system is proposed according to the actual application scenario of the. The research shows that through the refined analysis of vibration signals and the integration of intelligent algorithms, the accurate identification and trend prediction of early faults of the compressor can be achieved, which provide scientific support for equipment operation and maintenance.

Keywords : gas station; compressor; fault prediction; vibration signal; intelligent

引言

天然气站场压缩机在高压、持续运行工况之下, 容易因为转子不平衡、轴承磨损、气阀泄漏等故障致使设备停机, 甚至诱发安全事故, 造成巨额经济亏损。传统故障诊断依靠人工巡查与离线检测, 存在诊断延迟、主观性强等局限, 难以契合智能化站场的运维需要。振动信号作为设备运行状态的“全息载体”, 能够直观体现零部件的力学改变与故障演化规则, 基于振动信号的诊断技术已成为压缩机状态监测的核心方向。本文立足工程实际, 深刻剖析振动信号与故障机理的内在联系, 优化特性提取与诊断模型, 构建兼具精确性与实用性的故障预测体系, 为天然气站场压缩机的可靠运行提供技术保障^[1]。

一、压缩机典型故障与振动信号机理解析

(一) 核心部件故障类型

天然气站场压缩机的故障主要汇聚在转子系统、轴承组件、气阀机构及密封装置四大核心部件。转子系统作为动力传输核心, 容易出现不平衡、不对中及弯曲变形等故障, 其中不平衡故障占比超过40%, 主要由叶轮磨损、介质结垢等因素引发; 轴承组件承担转子支撑功能, 常见故障包含滚珠磨损、保持架损坏及

润滑失效, 其故障演化速度快, 容易引发连锁停机; 气阀机构的故障以阀片破损、弹簧失效为主, 直接作用于气体压缩效率, 导致排气压力异常; 密封装置故障多呈现为泄漏, 不仅造成天然气损耗, 还可能诱发安全风险^[2]。

(二) 故障同振动信号的映射关联状况

故障呈现情形下, 压缩机零部件的运动形态产生异常状况, 引致振动信号的特征参量出现变化情形, 造就明确的映射关联状态。转子不平衡故障会催生和转速频率成正比例的简谐振动现

象,于振动信号的频域图形之中体现为转速基频位置的峰值状况;转子不对中故障则会激发2倍转速频率的振动成分状况,同时伴随着轴向振动增强的态势;轴承滚珠磨损故障会产生特征频率为 $f=z \times n \times (1-d^2/D^2)/(2 \times 60)$ 的振动信号情况(在此处 z 代表滚珠数目, n 代表转速情况, d 代表滚珠直径状况, D 代表滚珠直径情形),特征频率及其谐波成分变成为故障辨识的关键要点;气阀故障的振动信号体现为非平稳特性增强的状况,时域信号的峰值因子、峭度等参量显著提升的态势,同时频域分布呈现出宽频带的特征情况。这种映射关联为依托振动信号的故障诊断供给了理论根基状况^[9]。

二、振动信号特征提取办法

(一) 时域特征提取方面

时域特征提取是借助剖析振动信号的时域波形参量,反映故障的时域特性情况,具备计算简便、实时特性强劲的优势状况。经常运用的时域特征参量涵盖峰值、峰值因子、峭度、偏度、均方根值以及脉冲指标等内容。峰值能够直观地反映振动信号的最大振幅情况,适宜用于辨识剧烈冲击类型的故障状况;峰值因子是峰值同均方根值的比值情况,对早期磨损类型的故障具备敏感性;峭度作为衡量信号分布陡峭程度的参量情况,在故障初始时期会显著增大,随着故障程度加剧而逐渐趋向平稳状态,是早期故障诊断的核心指标内容;均方根值反映振动信号的能量大小情况,能够从整体上评估设备运行的状态情形。在实际运用过程中,需要结合多种时域参量构建特征向量情况,规避单一参量的局限性质,比如将峭度同峰值因子相结合,能够有效地辨别轴承磨损与气阀故障情况^[10]。

(二) 频域特征提取层面

频域特征提取通过傅里叶变换手段将时域信号转变为频域信号情况,揭示故障的频率分布规律情形,适宜用于辨识周期性故障状况。傅里叶变换能够把复杂的时域信号分解成不同频率的正弦成分情况,通过剖析频域图形中的峰值位置、幅值以及谐波分布情况,确定故障的类型状况。比如,转子不平衡故障在频域图形之中体现为基频位置的高幅值峰值情况,而轴承故障则会出现特定的特征频率峰值状况^[9]。为解决傅里叶变换针对非平稳信号适应能力较差的问题,在实际运用过程中经常采用功率谱密度剖析手段,通过计算信号的功率谱分布情况,增强频率特征的辨识程度情况。频域特征提取的关键之处在于准确辨识故障特征频率情况,排除电网干扰、基础振动等背景噪声的影响状况^[6]。

(三) 时频域特征提取操作

面向压缩机故障所产生振动信号具备的非平稳性质特征,时频域特征实时提取的方式方法,能够在同一时间体现出信号涵盖的时间以及频率方面的信息内容,对时域和频域所采用方法存在的不足进行弥补完善。一般会运用到时频域剖析方法,包含有小波开展变换、短时傅里叶实施变换以及经验模态进行分解等形式。小波开展变换借助伸缩以及平移方面的操作举动,达成对信号开展多分辨率的剖析工作,能够卓有成效地提取出非平稳信号

当中存在的局部性特征,特别是在气阀出现故障、密封产生泄漏等非周期性故障的诊断工作上适用;短时傅里叶实施变换依靠滑动形式的时间窗口,把信号进行分段式的处理操作,在时间窗口范围之内开展傅里叶变换工作,对时间分辨率和频率分辨率进行平衡协调,适用于故障发展演变过程的动态化剖析;对经验模态进行分解,将构成复杂的信号拆分开来,成为若干个本征模态函数,每一个本征模态函数都与信号不同的频率分量形成对应关系,能够精确无误地将故障特征和噪声信号分离开来。时频域特征开展提取工作的核心要点,在于对分解参数进行优化处理,提升特征所具备的辨识度以及稳定性水平^[7]。

三、基于振动信号构建的智能诊断模型体系

(一) 机器学习诊断模型架构

机器学习模型通过针对故障特征向量开展训练学习的活动,搭建起故障类型和特征参数之间形成的映射模型,达成故障的自动化识别目标。通常会使用到的模型,包括支持向量机、决策树、随机森林以及K近邻算法等类型。支持向量机通过构建起最优的分类超平面,在高维度的特征空间范围之内,实施故障的分类工作,具备泛化能力强、对小样本数据适应能力良好的优势特点,适用于压缩机早期出现故障时的诊断工作;决策树模型通过递归的方式,对特征空间进行划分操作,搭建起直观清晰的分类规则,便于对诊断结果作出解释说明,适合现场负责运维的人员进行使用;随机森林通过集成多个决策树的形式,降低单一模型出现过拟合的风险概率,提升诊断结果的准确程度,能够对存在多特征、多故障类型的诊断场景进行处理应对。机器学习模型所具备的性能,关键之处在于特征的选择工作以及参数的优化工作,需要借助主成分开展分析、因子实施分析等方式方法,进行降维处理操作,提升模型的运算效率水平^[8]。

(二) 深度学习诊断模型架构

深度学习模型依靠自身强大的特征自动化提取能力,不需要人工进行特征参数的设计工作,适用于复杂类型故障的诊断场景。卷积神经网络(CNN)作为具有典型性的深度学习模型,通过卷积层和池化层的交替式运算操作,自动提取出振动信号蕴含的深层特征,能够有效地识别出不同故障类型之间存在的特征差异;循环神经网络(RNN)针对振动信号具备的时序特性,通过记忆单元捕捉信号存在的时间依赖关系,适用于故障发展演变过程的动态化诊断工作;长短时记忆网络(LSTM)对RNN存在的梯度消失问题进行了改进优化,能够更好地对长序列的振动数据进行处理操作,提升故障预测结果的准确程度。深度学习模型开展训练工作,需要数量庞大的标注数据,在实际应用过程当中,可以通过数据增强技术手段,对样本集合进行扩充操作,同时结合迁移学习的方法方式,利用相似设备产生的故障数据,对模型训练工作提供辅助支持,降低对目标设备故障数据的依赖程度^[9]。

(三) 模型融合与重构

单个诊断模型存在适用场景的限定范畴,模型融合能够整合各模型的优势特性,提升诊断结果的可靠程度与鲁棒性能。常见

的融合办法包含加权投票方式、堆叠集成方式以及贝叶斯融合方式。加权投票法依照各模型的诊断准确概率分配权重数值,综合做出故障类型的决策判断;堆叠集成法把多个基础模型的输出结果作为输入内容,构建次级分类模型,进一步优化诊断结论;贝叶斯融合法基于贝叶斯概率理论体系,融合各模型的后验概率分布,提高诊断结果的置信水平。模型优化需要结合站场实际工作状况,考量温度数值、压力参数等环境要素对振动信号的作用影响,通过引入注意力运行机制、自适应学习率调节手段等方式,提升模型针对工况变化的适应能力^[10]。

四、故障预测体系的推行与运用

(一) 数据采集系统搭建

数据采集工作是故障预测体系的根基基础,需要结合压缩机的结构特点与运行工况条件,合理规划振动传感器的布置位置。传感器应当安装在转子轴承座体、气阀腔体空间、气缸缸体结构等关键部位区域,选用加速度传感器类型,测量方向涵盖径向维度与轴向维度,采样频率需要符合 Nyquist 定理要求,通常设定为故障特征频率的5-10倍数值,确保完整捕捉故障信号波形。数据采集系统需要具备实时传输功能、存储功能与预处理功能,通过边缘计算设备对原始信号进行滤波操作、去噪处理,消除电网干扰因素、机械共振现象等噪声信号影响,提升数据质量水平。同时,需要同步采集设备运行参数(转速数值、压力参数、温度指标)与环境参数数据,为故障诊断工作提供多维度的数据支撑体系。

(二) 故障预测流程规划

故障预测流程包含数据采集环节、特征提取环节、模型推理环节、故障预警环节四个阶段环节。首先借助传感器采集振动信号数据与运行参数信息,传输至数据处理中心平台;其次采用时域分析、频域分析、时频域分析相结合的特征提取方法,构建多维度的特征向量集合;接着输入训练成熟的智能诊断模型,推理

判断设备运行状态情况与故障类型类别;最后依据故障严重程度等级与演化趋势走向,发出不同等级的预警信号信息,同时生成运维建议内容。故障预测流程需要具备实时性能与自主性能,能够自动触发数据采集操作、分析处理流程与预警发布机制,减少人工干预程度,满足智能化运维管理需求。

(三) 应用成效与实践价值

基于振动信号的智能诊断与故障预测体系在天然气站场的应用实践,能够实现压缩机故障的早期识别判断与趋势预测分析,将故障诊断时间提前3-7天周期,有效防范突发停机事故发生。实践结果表明,该体系针对转子不平衡状态、轴承磨损现象等典型故障的诊断准确概率达到95%以上比例,针对气阀故障问题、密封泄漏情况等复杂故障的诊断准确概率达到88%以上水平,显著降低设备故障发生频率与运维成本支出。同时,故障预测体系生成的运维建议能够指导运维人员实施精准检修作业,缩短停机时间长度,提高设备利用效率,为天然气站场的安全运行、高效运行提供有力保障支撑。

五、结论

本文以天然气站场压缩机的故障预测与智能诊断为核心内容,对典型故障和振动信号间的映射关联展开深度剖析,对时域、频域以及时频域的特征提取办法实施优化操作,搭建起机器学习与深度学习相互结合的智能诊断模型架构,提出一整套故障预测体系的施行框架内容。相关研究成果显示,借助振动信号开展的智能诊断技术可以精确辨认压缩机的早期故障情形,给设备的运维工作供给科学合理的依据支撑,具备至关重要的工程应用价值体现。往后的研究方向能够将焦点聚焦于极端工况环境下的故障诊断技术领域,通过强化学习技术与数字孪生技术的融合运用方式,进一步提升故障预测工作的准确性程度和前瞻性水平,搭建覆盖全生命周期的设备健康管理体系架构,为天然气站场的智能化升级进程提供助力支持。

参考文献

- [1] 李玮璞,钟晓峰,陈奕铭,陈宏盛,刘家畅,邱天友,杨永胜,程丽.天然气站场压力波动对螺栓法兰连接系统密封性能的影响[J].润滑与密封,1-7.
- [2] 伍奕,张杰,高继江.基于用能单元的输气站场能耗指标建立及应用[J].石油石化节能,2018,8(10):54-56+12.
- [3] 张尚洲.天然气站场工艺管道吹扫试压策略分析[J].当代化工研究,2018,(08):167-168.
- [4] 华松.车用压缩天然气站场的安全管理探讨[J].化工管理,2017,(29):248.
- [5] 张轩,王华青,向奕帆,吴海辰,张利勋,杨峰,丁昱,孙波浪.余热制冷技术在天然气输气站场应用的可行性研究[J].石油石化节能,2016,6(04):12-14+8.
- [6] 刘松杰,李山山.天然气站场工艺管道吹扫试压方法[J].管道技术与设备,2016,(01):55-57.
- [7] 韩世川,周丽娜.我国车用压缩天然气站场安全管理对策[J].价值工程,2014,33(19):140-141.
- [8] 郭李平.吕梁市城市天然气站场布置规划应用[J].山西建筑,2014,40(01):36-37.
- [9] 李晓倩,蒿云.压缩天然气加气站的前景展望及站场设计[J].煤炭与化工,2013,36(08):124-126.
- [10] 王洪喜,孙盛,吴中林,关中原.西气东输站场放空天然气回收需求与工艺[J].油气储运,2012,31(05):363-365+406.