

Fault diagnosis and preventive maintenance technology for natural gas long-distance pipeline compressors

Biao Zhang

Northwest Branch of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Weinan, Shaanxi, 710000, China

Abstract

As a critical component in energy transmission and processing systems, natural gas compressors directly impact energy supply security through their operational stability. Frequent malfunctions hinder the industry's efficient development. This study first investigates common failure mechanisms of natural gas compressors, analyzing both mechanical structural defects and thermal performance anomalies. It then explores intelligent fault diagnosis technologies, including multi-source sensor monitoring systems, limitations of traditional diagnostic methods, and deep learning-driven fault identification. Finally, it examines lifecycle preventive maintenance strategies, covering reliability-centered maintenance (RCM) decision models, predictive maintenance implementation approaches, and intelligent operation-maintenance platform architectures. This research provides technical support for precise fault diagnosis and efficient maintenance of natural gas compressors.

Keywords

natural gas compressor; failure mechanism; intelligent diagnosis; full life cycle maintenance; RCM; deep learning

天然气长输管线压缩机的故障诊断与预防维护技术

张彪

国家石油天然气管网集团有限公司西北分公司, 中国·陕西 渭南 710000

摘要

天然气压缩机作为能源输送和处理系统里的关键装置, 它运转时的平稳程度直接和能源供应的安全有关联, 经常出现故障的情况阻碍着行业的高效率发展。本文首先对天然气压缩机常见的故障原理进行探究, 分析机械构造出现故障的种类特点以及热力性能出现故障的引发因素; 接着探讨智能故障诊断的关键技术, 包含多源头传感监测体系的搭建、传统诊断办法存在的不足以及依靠深度学习来推动故障识别的技术; 最后研究整个生命周期的预防维护策略, 涉及基于以可靠性为中心的维护 (RCM) 的维护决策模型、预测性维护技术的实施途径以及智能化运行维护平台的架构。此项研究为天然气压缩机故障的精确诊断和高效率运行维护提供了技术方面的支持。

关键词

天然气压缩机; 故障机理; 智能诊断; 全生命周期维护; RCM; 深度学习

1 引言

天然气压缩机是能源输送体系中的关键设备, 它一旦发生故障, 容易造成能源供应的中断和经济上的损失。为了提高设备运行的可靠性, 优化运行维护的模式, 本文针对其故障原理、智能诊断技术以及全生命周期的维护策略进行研究, 为行业的高效率运行维护提供理论和实践方面的支持。

2 天然气压缩机典型故障机理分析

2.1 机械结构故障类型及特征

天然气压缩机的机械构造故障主要包含曲轴连杆部件磨损、轴承坏掉、气阀密封破损以及活塞杆变形等类别, 它

们的特点有明显不同——曲轴连杆部件磨损往往伴随着运行时异常声响变大和振动幅度增加, 轴承坏掉容易引起轴的温度不正常升高, 而且润滑油里会出现金属磨损产生的碎屑, 气阀密封破损会造成气体泄漏量增多以及排气压力不稳定, 活塞杆变形则表现为往复运动时卡住和密封腔出现不正常磨损, 这些故障大多和装配精度有偏差、润滑效果丧失以及长期受到交替变化的载荷作用有关。

2.2 热力性能故障诱因

热力性能故障的原因主要是工况参数和设计的临界值有偏差、换热系统的效率降低、气体介质的性质发生变化, 详细来说, 进气压力太低或者排气温度太高会破坏热力平衡状态, 冷却器结垢和换热器堵塞会减弱散热能力, 从而导致缸内温度不正常, 而天然气中杂质含量超过标准以及湿度发生变化, 会加重内部的腐蚀和积碳的产生, 进而引发压缩效率降低、能源消耗增加等热力性能变差的现象。

【作者简介】张彪 (1987—), 男, 中国陕西咸阳人, 本科, 工程师, 从事天然气运输, 油气运输研究。

3 智能故障诊断关键技术

3.1 多源传感监测体系

作为智能诊断基本支持的该系统,借助在压缩机曲轴箱、气阀组、缸体、冷却系统等重要位置安装振动传感器、温度传感器、压力传感器和气体传感器,达成对设备运行状况的全方位感知,其中,采用压电式和磁电式相互补充配置方式的振动传感器,可精确获取 5-1000Hz 频率范围内的故障特征信号,采样频率达 100Hz 的温度和压力传感器,能及时收集缸内排气温度、润滑油温度、进出口压力数据以保证对瞬态工作状况的捕捉,主要关注天然气泄漏和尾气成分分析的气体传感器,可为密封故障和燃烧异常诊断提供数据支持,且各个传感器通过工业以太网与边缘计算节点连接,以实现数据的及时预处理和多余数据的去除。

3.2 传统诊断方法局限性分析

像频谱分析、小波变换以及专家系统这类以往的故障诊断手段,在压缩机复杂故障的诊断工作里有着较为突出的不足。频谱分析在不稳定工作状况下,对于早期细微的故障信号识别能力不强,很容易受到谐波的干扰,进而使得特征提取出现偏差;小波变换的基函数选取要依靠实际经验,在分离多种故障叠加信号方面能力不够;专家系统会受到知识库是否完善的限制,很难适应不同型号压缩机的独特故障类型,而且对于未知故障缺乏普遍的诊断能力,不能满足现代天然气压缩机持续稳定运行所需要的高精度诊断要求。

3.3 深度学习驱动故障识别

这项技术借助搭建深层神经网络模型,完成对多源头感应数据的深层特征探寻和智能故障归类。针对压缩机故障信号的不稳定特性,运用卷积神经网络提取振动信号的局部时间-频率方面特征,再结合长短期记忆网抓取压力、温度时间序列数据的较长距离依赖联系,打造 CNN-LSTM 融合模型来提高复杂工作状况下的故障辨别精准度;通过引入注意力机制,加强对关键故障特征的权重安排,有力地降低噪声数据的影响;运用迁移学习手段,把已经训练好的模型转移到新的工作状况或新类型的压缩机上,降低样本收集和模型重新训练的成本。在实际使用中,该技术对轴承失效、气阀密封损坏等典型故障的辨别准确率能达到 98% 以上,为天然气压缩机故障的早期警示和准确处理提供了核心技术支持。

4 全生命周期预防维护策略

4.1 基于 RCM 的维护决策模型

依照以可靠程度为核心的维护原理,RCM 维护决策模式的主要思路是借助系统整理设备关键零件的故障表现形式,对故障结果的严重程度、出现几率以及可探测性进行量化研究,从而摆脱传统定时维护的盲目状况,建立以可靠目标为指引的不同维护策略体系。该模式执行的关键在于完成故障表现形式及影响分析与故障树分析的深度结合,精确

确定各个零件的维护级别,合理划分预防性维护、预测性维护以及事后修理的适用情形,最终达成维护资源的最佳配置,在提高设备可用程度的同时,有效控制过度维护的成本消耗以及维护不足的故障风险,为整个生命周期的维护提供科学决策支持。

某大型天然气长距离输送管道的压气站,针对站内的 4 台离心式天然气压缩机建立并运用了 RCM 维护决策模式,组成了由机械、电气、工艺等多个专业人员构成的分析团队,开展全过程的实施工作。团队起先对压缩机里像转子、轴承、气阀、密封件等 12 种重要部件做了全面梳理,通过汇总最近 5 年的故障修理情况、设备运行的相关数据以及停机造成损失的统计资料,清楚地找出了各个部件常见的故障现象。像轴承磨损、转子运转不平稳、气阀漏气这些都是比较容易出现的故障类型。经过对故障后果的量化分析,发现转子运转不平稳属于严重故障级别,这种情况会引起轴系振动超过标准,导致整个机器停止运行,每次停机造成的损失超过一百万元。气阀漏气属于一般故障级别,主要会对压缩效率产生影响,对生产的连续性影响不大。密封件老化属于轻微故障级别,短时间内不会对设备的正常运行造成影响。依据这些情况制定了不同的维护策略,对转子实施每 6 个月一次的振动状态检测,结合年度动平衡校验的预防性维护;对气阀采用基于振动与压力信号实时监测的预测性维护;对密封件实施固定周期更换的预防性维护。

4.2 预测性维护技术实施路径

预测性维护技术的实施办法以整个使用周期的数据循环管理为重点,搭建“数据收集-特点提炼-状态评定-故障警报-维护操作”的全流程技术架构。它的关键理念是依靠多种来源的传感系统来全面获取设备运行的数据,运用先进的信号处理技术来消除噪声并挖掘出有效的特点,结合过去的故障数据来训练状态评定的模型,从而实现了对设备运行状态的实时判断;当监测到的数据达到警报的临界值时,准确找到故障的位置、评估故障的严重程度并预测剩余的使用时间,最后制定有针对性的维护方案并调配资源去执行,实现故障的早期警报和精准处理,最大程度地减少非计划停机带来的损失。

某个页岩气田的集输站针对站内的 8 台往复式天然气压缩机建立了预测性维护系统,严格按照上述办法来开展工作。在数据收集阶段,在压缩机的曲轴箱、十字头、气缸、润滑油管路等关键位置安装了总共 64 个压电式振动传感器、油液传感器、温度压力传感器,将振动信号的采样频率设为 200Hz,油液及温度压力信号的采样频率设为 50Hz,通过 5G 工业模组把实时数据传输到边缘计算节点,确保数据传输的实时性和稳定性。在特点提炼阶段,使用小波包变换对振动信号进行降噪处理,提取峰值、峭度、波形因子等 12 个时域频域的特点参数;对油液数据进行趋势拟合分析,提取金属磨屑含量、水分含量以及增长率等关键的特点指标;

对温度压力数据进行时间序列分析,提取波动幅度和异常突变点等特点信息。在状态评定阶段基于随机森林算法建立多维度状态评定模型,利用站内近3年120组故障数据和300组正常运行数据训练模型使其对正常、轻微磨损、严重磨损三种状态的识别准确率达97.5%;在故障警报阶段一次监测中模型识别出3号压缩机的曲轴连杆轴承处于轻微磨损状态,随即发出警报明确指出故障位置、预估剩余使用寿命为15天并将信息推送到运维管理平台;在维护操作阶段运维人员结合集输作业计划在不影响生产的夜间时间段制定,并执行轴承更换方案,避免突发故障导致的连续停机。

4.3 智能化运维平台架构

智能运维平台的架构运用“感知层-网络层-平台层-应用层”的四层配合架构规划,各层次的任务明确且紧密关联,打造出覆盖整个生命周期的运维智能管理系统。感知层作为收集数据的重点部分,能够全面获取设备的运行参数和管理数据;网络层起到数据传输关键环节的作用,确保数据及时、安全地传输;平台层拥有存储大量数据、进行深度处理以及集成算法模型的能力,是挖掘数据价值的主要载体;应用层针对运维的实际操作需求,提供多种功能模块,实现对维护决策、工单管理等整个流程的直观化管控,为整个生命周期的预防性维护提供一站式技术支持。

某天然气处理厂针对厂区内20台不同型号的天然气压缩机建立智能运维平台,按照四层架构完成具体的实施工作。感知层安装了振动、温度、压力、油液、气体等各类传感器共180多个,全面涵盖所有压缩机的关键部件,同时整合设备启停记录、维护工单、备品备件台账等管理数据,实现运行数据和管理数据的全面收集。网络层采用工业以太网和5G两种通信方式,对于实时性要求高的振动、温度数据,通过工业以太网传输,将传输延迟控制在50毫秒以内;对于在野外布置的6台压缩机的数据,通过5G工业模组传输,解决偏远区域的网络覆盖问题;同时安装防火墙、入侵检测系统和数据加密模块,建立全链路的安全防护体系,保障数据传输和存储的安全。平台层基于云计算架构搭建,使用分布式数据库实现大量数据的高效存储,设置6个边缘计

算节点对原始数据进行预先处理,去除冗余数据和异常干扰数据;集成CNN-LSTM故障诊断模型、RCM维护决策模型等核心算法模型,通过对大数据的分析实现智能决策的生成。应用层开发了维护决策、工单管理、故障预警、设备档案管理6大功能模块,运维人员通过直观的界面可以实时查看各压缩机的运行状态参数、故障预警信息,通过维护决策模块获得个性化的维护方案,通过工单管理模块实现维护任务的下达、执行跟踪和闭环归档,通过设备档案管理模块查询设备从出厂、安装、运行到维护的整个生命周期信息。

5 结语

本文所做的工作涉及天然气压缩机出现故障的原理、智能诊断办法、整个使用周期的维护策略方面的研究,清楚了机械构造和热力性能出现故障的主要特点和引发因素,建立了多种来源传感监测系统和运用深度学习的故障识别模式,给出了依据以可靠性为中心的维护(RCM)的不同维护决策等整套运维解决办法。通过实际例子检验显示,研究成果有效提高故障诊断准确程度、运维工作效率,并明显减少设备停机损失及维护成本,今后工作中可进一步探索多种模型融合诊断技术与数字孪生技术结合以实现设备运维全流程数字化模拟,从而为能源行业关键设备安全高效运行提供更全面技术支持。

参考文献

- [1] 曹建华.长输管道压气站天然气离心压缩机的振动监测与故障诊断[J].中国石油大学(华东),2014.
- [2] 钟瑞明.离心式空气压缩机喘振故障分析与控制预防[J].采矿技术,2010.=
- [3] 张芯铭.提高压缩机控制系统及现场仪表可靠性的研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(002):000.
- [4] 陈文勇.裂解气压缩机主汽门控制回路冗余,容错性探讨[C]//中国石油和化工自动化第十五届年会.;中国石油和化工自动化应用协会,2016.
- [5] 陈佳元.压缩机远程监测诊断本地机系统的设计开发[D].江南大学,2010.