

浅谈长输天然气管道压缩机组振动监测与故障诊断技术

王文平 叶尔博 李朝辉 陈志国 闫 龙 (中油国际管道有限公司, 北京 100029)

摘要: 长输天然气管道压气站作为天然气输送过程中的关键节点, 其压缩机组承担着维持管道压力和保障气流连续供应的核心功能。确保压缩机组运行状态的安全性和可控性, 及时发现潜在隐患问题, 对保障管道连续输送、高效运行具有重大意义。本文围绕长输天然气管道压气站压缩机组的振动监测与故障诊断展开研究, 系统分析了压缩机组在运行过程中可能出现的主要振动问题, 进而提出了针对性的技术对策, 旨在为长输天然气管输系统的可靠运行提供技术保障。

关键词: 压缩机组; 振动监测; 故障诊断; Mark VIe 控制系统; 冗余; 涡流传感器; 交换机
中图分类号: TE974 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 007-0115-03

A Brief Discussion on Vibration Monitoring and Fault Diagnosis Technology of Compressor Units in Long-Distance Natural Gas Pipeline

Wang Wenping, Ye Erbo, Li Zhaohui, Chen Zhiguo, Yan Long (CNPC International Pipeline Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: As a key node in the natural gas transmission process, the compressor station of long-distance natural gas pipelines plays a core role in maintaining pipeline pressure and ensuring the continuous supply of gas flow. Ensuring the safety and controllability of the operation status of compressor units and timely identifying potential hidden dangers is of great significance for the continuous and efficient operation of the pipeline. This paper focuses on the vibration monitoring and fault diagnosis of compressor units in long-distance natural gas pipeline compressor stations, systematically analyzes the main vibration problems that may occur during the operation of compressor units, and then proposes targeted technical countermeasures, aiming to provide technical support for the reliable operation of long-distance natural gas pipeline transmission systems.

Keywords: Compressor unit; Vibration monitoring; Fault diagnosis; Mark VIe control system; Redundancy; Eddy current sensor; Switch

压缩机组在长输管道系统中长期连续运行, 其部件受力复杂, 存在转子、轴承、联轴器、基础等多层次的动力耦合关系。通过科学、系统的振动监测和特征分析, 可实现对机组运行状态的动态掌握, 为早期识别潜在风险提供技术支撑。不同类型振动问题在时域、频域和时频域呈现特定特征, 通过多维特征提取和对比分析, 可区分转子不平衡、轴系不对中、轴承磨损、转子碰摩以及气动激振等典型故障, 从而形成针对性的诊断技术体系。

1 长输天然气管道压缩机组开展振动监测与故障诊断的重要性

长输天然气管道压气站压缩机组为管道系统的关键动力设备, 它的运转状态直接决定着天然气输送的连续性、稳定性。从设备运行特性上讲, 压缩机组内部的转子、轴承、联轴器等重要部件在长时间运行过程中不可避免会出现磨损、松动或装配状态的变化, 这些隐性劣化过程很难通过常规巡检来发现, 但是振动信号对结构状态的变化很敏感, 可以在故障没有显性化之前反映出异常征兆。通过对振动数据进行不间断采集和分析, 可以实现对机组运行状态的动态掌握,

为早期发现潜在风险提供技术支持。从运行管理的角度来说, 振动监测及故障诊断技术的应用, 可以将事后处理转变为事前识别, 运行管理由被动应对转变为积极干预, 提高机组运行的安全性和可靠性。同时根据振动特征做出的诊断结果可以给运行参数的优化、检修计划的制定提供依据, 减少不必要的解体检查, 提高运维工作的针对性、效率^[1]。

2 长输天然气管道压缩机组振动监测信号采集与传输的实现方式

本文中提及的以 LM2500+DLE 技术为代表的燃气驱动型压缩机组由燃气轮机、动力涡轮和离心压缩机三部分组成, 机组振动数据的采集和上传通过本特利内华达 3500 振动监测系统搭配人机界面软件来实现, 包括轴径向振动、轴向位移、振动加速度等关键运行参数。动力涡轮和离心压缩机转轴上的振动探头或电涡流传感器通过延伸电缆和前置放大器能够直接非接触测量转轴工作状态, 接入系统监测模块, 依靠航空衍生型燃气轮机振动监测器 3500/44M 和位移监测器 3500/40M 模块, 实现对压缩机组各类振动参数的采集。其中, 3500/44M 采集燃机和动力涡轮振动加速度信号,

3500/40M 采集动力涡轮和压缩机转轴上以电涡流传感器信号为输入类型的径向振动和轴向位移数据。本特利振动监测系统配置冗余以太网通讯模块与 GE 压缩机组 Mark VIe 控制系统相融合,以局域网光电交换机为接口,通过 Modbus TCP/IP 通讯协议进行数据交互,实现压缩机组振动监测系统与过程控制系统间双向、实时数据互通,并执行机组振动保护程序逻辑。对于离心式压缩机来说,本特利内华达 3500 振动监测系统提供了可靠的硬件保护及软件诊断功能,完全满足转子动力学的监测要求。

3 长输天然气管道压缩机组常见振动故障类型识别

3.1 转子不平衡引起的振动特征

转子不平衡是压缩机组运行过程中经常出现的振动问题之一,其实质就是转子质量分布偏离旋转轴线,在旋转时产生离心力周期性地作用在轴系结构上。在运行时该类问题一般是振动幅值随转速的增大有明显增加,并在额定转速处最为明显,振动方向主要是径向分量,轴向分量较弱。从频谱特征上看,不平衡振动主要集中在转频成分上,频谱中一倍频峰值明显,并且稳定性好,不随负荷变化而漂移。长期存在的该类振动会使轴系动态偏载状况加剧,支撑部位受力周期性波动,从而引起其他振动问题的叠加出现,表现出整体振动水平偏高并且不能自行衰减的特点^[2]。

3.2 轴系不对中振动表现形式

轴系不对中表现为驱动端与从动端旋转中心存在角度偏差或平行偏差,在运行过程中该偏差被周期性地放大并转化为复杂的振动响应。振动特征不同于单一转频响应,在频谱中会同时出现一倍频和二倍频成分,部分工况下还会出现更高阶频率分量。振动方向有明显的轴向增强特征,轴向振动幅值比径向振动要大得多,随着时间的推移越来越严重。轴系不对中状态下,振动水平对于转速变化比较敏感,在启动、升速阶段尤为明显,进入稳定运行后仍然保持较高的幅值,不能通过运行参数调整得到有效缓解,表现出持续性和结构性问题特征。

3.3 轴承磨损损伤振动特征

轴承磨损损伤所引起的振动问题具有渐进性、隐蔽性,早期时振动幅值变化不明显,但是信号内部结构已经发生变化。随着磨损的加重,高频成分的振动信号开始增多,时域波形从平稳的状态变为不规则的波动,局部冲击的特征也开始显现出来。频域分析中可以发现和轴承结构有关的一些频率成分逐渐突出,随着时间的推移幅值逐渐增大。该类振动对于运行工况的变化很敏感,当负荷出现波动或者转速轻微改变的时候,高频响应会出现放大。进入损伤后期,振动

信号宽频带能量分布增加、背景噪声水平变高,信号稳定性变差,支撑状态变坏之后对系统动态响应的影响一直存在。

3.4 转子碰摩振动响应特征

转子碰摩属于压缩机组运行中的一种异常接触现象,它的振动响应具有突发性以及非线性。在发生碰摩的时候,振动信号中常会出现不规则的冲击脉冲,时域波形会变得严重畸变,周期性特征被破坏。频谱分析结果表明,除了转频成分外,低频分量和高频分量同时增大,频谱结构比较复杂,而且随时间的变化也很大。振动幅值在短时间内出现快速上升,并且伴随着不稳定的波动,重复性不好。该类振动一般对运行状态变化比较敏感,启动、停机或者负荷变化时更容易出现,而且一旦形成,往往会持续恶化,对机组稳定运行造成很大影响^[3]。

3.5 气动激振引发的异常振动现象

气动激振引起的振动问题主要是由气体流动状态异常造成的,对转子系统产生周期性的或者随机的激励作用。该类振动的显著特点就是其频率成分不能完全与转速成正比,频谱中除了转频外,还常有与流动有关的频率成分,且随工况变化有明显的漂移。时域上振动信号的幅值波动大、稳定性差,无周期性。此类异常振动在部分运行区间内比较明显,气流状态发生变化的时候,振动水平就会突然增大或者突然减小。气动激振所引起的振动比机械结构问题更具有工况依赖性,持续时间不确定,容易和其他振动源叠加,使得振动特征识别变得非常困难。

4 长输天然气管道压缩机组基于振动信息的故障诊断方法

4.1 转子不平衡振动特征提取技术

转子不平衡振动特征提取技术的核心目标是准确捕捉与转频相关的主要振动特征,全面分析因转子质量分布偏差引起的振动状态。这项技术可以用来实现设备故障的早期发现、定位,并可对其进行有效的监视及预防。首先,原始振动信号需要做去趋势处理,消除长期漂移,带通滤波用来抑制噪声,保证转频能量的完整性。在特征提取时主要分析一倍转频幅值、相位稳定度、径向能量分布等。多测点数据的对比有利于精确定位不平衡的位置和偏向方向,横向与轴向振动的对比可以提高诊断的精度。利用幅值变化率分析、轨迹重构等手段可以提高识别的可靠性与准确性,从而达到早期干预的目的。

4.2 轴系不对中振动模式识别技术

轴系不对中振动模式识别技术通过精确识别因轴系角度或平行偏差引起的振动模式,进行状态诊断。

技术的核心就是多频率成分的耦合特征分析和模式区分。在频域分析中提取转频、二倍转频等频率成分,并计算出轴向振动能量占比,从而得到轴向响应的增强特征。以多维特征向量为基础建立判别模型,就可以把不同的轴系不对中状态映射到相应的模式区上,从而实现对模式的准确识别。除此之外,加上时间序列的统计分析、多测点同步分析来提高识别精度和抗干扰的能力。特征参数归一化处理可以使不同负荷、转速下仍能保持高精度的诊断,从而给设备的调整和优化提供科学依据。

4.3 轴承磨损损伤振动诊断技术

轴承磨损损伤振动诊断技术以高频信息捕捉、冲击特征强化为基本原则,分层处理、多特征分析的方式来实现各个磨损阶段的准确识别。在数据采集和处理阶段要先对原始的振动信号做去趋势、去噪、滤波等处理,去掉运行中出现的低频漂移和环境干扰,但保留高频冲击成分。之后用包络解调技术提取调制信号中的冲击特征,再对解调信号进行频谱分析,可以突出与轴承滚动体、滚道、保持架结构有关的特有频率,从而达到早期发现损伤信号的目的。为了更好地描述振动信号的时间变化特征,可以采用短时傅里叶变换或者连续小波变换做时频分析,得到冲击能量随时间的变化趋势,给磨损状态分级判断提供量化依据^[4]。

4.4 转子碰摩振动响应解析技术

转子碰摩振动响应解析技术以非线性特征识别、异常冲击分析为主,主要针对压缩机组运行过程中,转子与机壳或者其他部件发生接触时所引发的复杂振动行为展开分析。信号预处理阶段要保留宽频带信息,通过去趋势、去噪、滤波等手段去除背景干扰,但是不能过度滤波造成冲击特征丢失,保证碰摩瞬态信号的完整性。解析时,先借助时域波形分析与频谱结构联合判定办法,找出不规则冲击脉冲,瞬态振幅峰值以及频谱里宽带能量突然上升的特征,进而大致确定碰摩事件出现的时间点和频率区间。对机组振动数据进行采集、监测和信号分析,这对于转子碰摩诊断来说尤为重要。动力涡轮的加速度振动信号超过 25.4mm/s 时,机组控制系统触发保护程序逻辑自动降速机组到 IDLE 怠速状态,来避免高振动损坏转子。通过振动监测系统对离心压缩机轴径向振动信号监测,根据数据的变化进行分析和预测,判定转子有无异常振动或者碰摩,当压缩机转轴径向振动大于 70 μm,可判定转子异常振动或摩擦,运行机组会立即保护停机。轴位移信号异常变化,也会对判定转子振动起到辅助支持作用。这些监测数据为转子碰摩响应分析打下了基础,将振动响应解析技术与之结合,

可以准确判定出碰摩事件以及其影响范围,从而提前做好预防工作。

4.5 气动激振异常振动辨别技术

气动激振异常振动辨别技术是以工况相关特征提取、异常状态识别为核心,对压缩机组在气流激励下产生的非周期性或者随机振动进行准确识别。在实施过程中,首先需要同时采集振动信号和关键运行参数信息,即转速、压力、流量等信息,才能保证振动特征能够和运行状态相对应,实现工况归一化处理,从而消除由于转速或者负荷波动引起的幅值变化干扰。例如,本特利监测系统提供连续、在线监测功能,适用于机械保护应用,并完全符合美国石油协会 API670 标准对该类系统的要求。它是本特利内华达采用传统框架形式的系统中功能最强、最灵活的系统,具有其他系统所不具备的多种性能和先进功能。系统用于连续、永久性监测应用于多种行业的旋转和往复机械,尤其适用于要求极高可靠性和可用性的自动停机机械保护应用中^[5]。

5 结论

对长输天然气管道压气站压缩机组运行过程出现的多种类型振动,进行基于振动信息的故障诊断研究有很高的工程价值。针对转子不平衡、轴系不对中、轴承磨损损伤、转子碰摩、气动激振等典型的振动问题,建立不同的特征提取与识别技术体系,可以有效地对复杂振动信号进行解析,给异常状态准确判定提供可靠的依据。总体来讲,以振动特征为主导的诊断技术体系的构建,可以提高压气站压缩机组运行状态识别的准确性及稳定性,对保证长输天然气管道系统的连续运行有着十分重要的支撑作用。

参考文献:

- [1] 肖航. 本特利 3500 振动监测系统在管线压缩机组的故障分析 [J]. 石化技术, 2024,31(08):101-103.
- [2] 车慧敏, 张旭. 离心式压缩机组轴电流故障分析与应对措施 [J]. 机械管理开发, 2024,39(03):226-228.
- [3] 薛长泉. RWB(II)-496 螺杆压缩机在线振动监测及控制系统应用 [J]. 中国设备工程, 2018(S2):71-73.
- [4] 王猛. 基于 3 层 C/S 结构的离心式压缩机组振动监测系统 [J]. 油气储运, 2017,36(12):1401-1407.
- [5] 李君华, 邓剑. 压缩机组振动监测与诊断 [J]. 中国修船, 2006(S1):67-69.

作者简介:

王文平 (1984-), 男, 汉族, 黑龙江牡丹江人, 大学本科, 工程师, 长期从事长输油气管道站控 SCADA 系统和压缩机组控制系统编程调试、故障分析及运维管理工作。