

管道输送多级泵轴系动力学分析及故障诊断技术研究

丁胜开（国家石油天然气管网集团有限公司云南分公司，云南 昆明 650000）

摘要：随着现代工业化进程的不断推进，多级泵在长距离管道输送领域的应用愈发广泛，尤其在输油泵系统中，其高效、稳定地运行直接关系到能源输送的可靠性和经济性。然而，由于多级泵轴系结构的复杂性及运行工况的多变性，轴系动力学特性分析与故障诊断成为影响设备寿命和运维效率的关键因素。本文从多级泵轴系动力学特性入手，研究常见故障模式及其诊断方法，探讨在线监测与智能诊断技术的应用前景，并探索充分结合智能诊断系统与故障联锁保护机制保障无人值守模式下系统安全稳定运行的具体措施。

关键词：管道输送；多级泵；动力学分析；无人值守；故障诊断；连锁保护

0 引言

管道输送技术是现代能源领域的重要支柱，其高效、安全的特点使其成为石油、天然气等资源长距离运输的主要方式。作为管道输送系统的核心设备，多级泵肩负着维持管道压力、保证流体稳定输送的重要使命。然而，多级泵的长时间运行过程中，轴系由于载荷变化、振动干扰和磨损等因素，易出现各种动力学问题及故障，针对多级泵轴系的动力学分析及故障诊断技术的研究，具有重要的理论价值与工程意义。

1 管道输送多级泵轴系动力学特性分析

1.1 多级泵轴系结构与运行特点

多级泵作为管道输送系统中的核心设备，其轴系结构和运行特点对整体性能和可靠性有重要影响。多级泵轴系通常由转子、轴承、密封装置和联轴器等组成，其中转子是关键部件，由多个叶轮和导流壳构成。运行过程中，多级泵轴系需要承受复杂的机械载荷、液体动压作用以及外界环境的干扰。具体而言，轴系的振动特性复杂，振动源包括转子的旋转不平衡、径向力波动及泵内流体的激振力。特别是当轴系工作在临界转速附近时，共振现象会显著增强振动幅值，可能导致结构损伤或设备失效。多级泵常年高负荷运行，轴承和密封装置易产生渐进式磨损，导致轴心偏移、间隙变化和密封性能下降。

1.2 动力学建模方法

针对多级泵轴系的复杂结构和动态行为，动力学建模是深入研究其特性的基础。目前，动力学建模包括集中参数模型、有限元模型和多体动力学仿真。集中参数模型是最基础的建模方法，将轴系简化为一系列质量块、弹簧和阻尼元件，适用于轴系基本动力学特性分析。有限元模型则通过对轴系进行离散化处理，将其划分为多个有限单元，利用数值方法求解其模态

特性和动态响应。这种方法能够较精确地模拟轴系的振动和应力分布，尤其适合非均匀材料和复杂几何结构的分析。多体动力学仿真是一种结合动力学与接触力学的建模方法，能够模拟轴系与其他部件之间的相互作用，尤其适合研究联轴器耦合、轴承支撑以及转子—液体耦合等复杂场景。

1.3 动力学分析结果与故障特性关联

通过动力学建模与分析，可以提取多级泵轴系的关键动态参数，为故障诊断提供理论依据。振动频谱分析能够揭示轴系的振动特性，例如转子不平衡通常在基频及其倍频处表现为显著的频谱峰值，而轴承故障则在特定频段出现侧带信号。模态分析揭示了轴系的固有频率和模态变形模式，通过比较模态频率与外界激励频率的接近程度，可以判断共振风险并优化结构设计。

同时，轴系的位移场和应力场分析有助于识别高应力区域，为设计改进和故障预测提供指导。例如，轴承处的应力集中可能成为疲劳裂纹的初始位置，而转子表面的不均匀位移可能导致附加负载的积累，动力学分析结果能够有效关联故障特性，为多级泵轴系的运行状态评估和优化设计奠定坚实基础。

2 常见故障模式及诊断方法

2.1 轴系常见故障模式

多级泵轴系在长期运行中易发生多种故障，其主要模式包括转子不平衡、轴承磨损或失效、轴心偏移和密封装置故障。转子不平衡是最常见的故障之一，通常由叶轮质量分布不均、积垢或加工误差引起，其表现为运行过程中显著的振动和附加力矩。轴承磨损或失效则是由于长期载荷、润滑不良或颗粒污染造成的，其典型特征为异常摩擦声及振动幅度增加。

轴心偏移通常是由于轴承磨损、不对中安装或结

构变形导致的，结果是转子与定子之间的间隙变化，可能引发擦碰或过载现象。密封装置故障主要表现为介质泄漏，导致轴系附加阻力增加，同时也可能造成环境污染和能源浪费。综合来看，这些故障模式既独立存在又相互关联，给多级泵的可靠性和安全性带来巨大挑战。

2.2 故障诊断方法

为了及时发现和诊断多级泵轴系的故障，可采用多种诊断技术，其中振动信号分析是最常用的方法。通过在关键部位安装加速度计或位移传感器，采集轴系运行时的振动数据，并利用时域、频域或时频联合分析方法提取特征参数。温度监测是另一种重要手段，特别是对轴承和密封装置的温度变化进行跟踪，可间接反映润滑状态和磨损程度。

声音信号分析则通过采集轴系运行中的摩擦声，结合频谱分析和模式识别技术，识别异常声源和故障类型。此外，基于数据驱动的智能诊断技术正在逐步取代传统方法，机器学习算法和神经网络在故障模式分类和特征提取中展现出强大优势。例如，通过训练卷积神经网络对振动信号进行自动特征提取和分类，可实现高精度的故障诊断。

2.3 智能诊断技术的发展

随着工业物联网和人工智能的快速发展，智能诊断技术已成为多级泵故障诊断的研究热点。在线监测系统是智能诊断的重要组成部分，通过在轴系关键部位布设传感器，实时采集振动、温度及压力等数据，并借助云计算平台实现大数据分析建模。深度学习技术的引入进一步提升了故障诊断的智能化水平，卷积神经网络和递归神经网络等算法能够在复杂工况下实现自适应的故障识别。与此同时，基于边缘计算的智能终端设备也开始应用于多级泵系统，能够在本地完成实时分析和初步诊断，大幅降低了数据传输的延迟和成本。未来，智能诊断技术将进一步向高精度、低成本和易操作方向发展，为无人值守的管道输送系统提供可靠保障。

3 管输泵在线监测与无人值守技术

3.1 在线监测系统的构建

在线监测系统是实现多级泵高效管理和智能诊断的基础，一个完整的在线监测系统包括传感器网络、数据传输模块、数据分析平台和故障联锁机制。传感器网络由安装在轴承、转子和密封装置等关键部位的传感器组成，实时采集振动、温度、压力等运行数据。

数据传输模块通过有线或无线方式，将传感器数据发送至控制中心或云端平台，常见传输技术包括工业以太网和低功耗广域网。数据分析平台则依托人工智能算法对采集数据进行处理与分析，生成运行状态报告和故障预警信息。此外，故障联锁机制通过将诊断结果与控制系统联动，能够在故障发生时自动停机或调整运行参数，从而避免故障扩展和设备损坏。

3.2 无人值守模式的挑战

在长距离管道输送系统中，多级泵的无人值守模式是实现降本增效的重要途径。然而，无人值守模式对系统的可靠性、智能化和安全性提出了更高要求。设备的高可靠性是无人值守的前提，需通过提高材料质量、优化设计和加强监测手段，确保设备在长时间运行中保持稳定。无人值守模式下的多级泵系统需要适应复杂多变的工况，如温度、湿度和负载条件的波动，这要求监测与诊断系统具备高度的智能化水平，以适应不同的运行环境。

无人值守模式还面临着网络安全与数据传输稳定性的双重挑战。特别是在基于云计算和物联网技术的场景下，数据的加密传输和防火墙配置成为保障系统安全的关键。为此，需要构建一个可靠、高效、智能的综合管理平台，为无人值守模式的普及提供坚实技术支持。

3.3 在线监测技术的优化与发展方向

在线监测技术的优化与发展集中在传感器性能提升、数据处理效率强化以及智能化水平提高三大方向。高灵敏度 MEMS 传感器和耐高温、抗干扰的光纤传感器的应用，显著增强了多级泵轴系振动、温度等参数的监测精度，为复杂工况下的实时监控提供了技术保障。同时，依托 5G 网络、边缘计算和深度学习技术，在线监测系统实现了数据的低延迟传输、智能特征提取和动态趋势预测，大幅提升了实时性和诊断准确性。未来，在线监测将向多源信息融合、低功耗运行和云端智能诊断方向发展，以构建高可靠性、低成本的全生命周期管理平台，为无人值守模式下的设备运行和维护提供更科学高效的解决方案。

4 智能诊断与故障联锁技术

4.1 智能诊断技术的演进

智能诊断技术的发展经历了从传统信号分析到人工智能驱动的转变。在传统方法中，傅里叶变换、短时傅里叶变换和小波变换等时频分析技术被广泛应用于故障特征提取，但这些方法对复杂信号的非线性和

随机性处理能力有限。随着机器学习的引入,支持向量机、K 近邻 (KNN) 和随机森林等算法在多级泵故障模式分类中得到了广泛应用。然而,这些方法依赖于人工提取特征,存在一定的局限性。

近年来,深度学习技术的快速发展为智能诊断带来了革命性变化。通过卷积神经网络 (CNN),可以直接从传感器数据中自动提取特征,避免了人为偏差,极大提升了故障识别的效率和准确性。循环神经网络及其改进模型 LSTM 在处理时间序列数据方面表现出色,能够更准确地预测轴系运行趋势和故障演化路径。例如,将传感器采集的实时数据输入 LSTM 模型,可以有效预测转子不平衡和轴承疲劳的累积效应,为预防性维护提供科学依据。

未来,智能诊断技术将更加注重小样本学习和无监督学习的研究,以应对实际工况中故障数据稀缺的问题。通过这些技术,系统能够在没有大量标注数据的情况下,依靠少量的样本信息就能进行准确的故障识别与预测。同时,强化学习算法的引入为实时优化多级泵的运行参数提供了新的可能性,使得系统能够在动态环境中自主调整运行策略,从而实现从故障诊断到主动防护的跨越。这种自适应优化能力不仅能提升设备的运行效率,还能显著延长设备的使用寿命,减少停机时间,为管道输送系统的智能化发展奠定坚实基础。

4.2 故障联锁系统的设计原则

故障联锁系统是确保多级泵安全运行的重要技术手段,其设计需要满足及时性、可靠性和兼容性的基本要求。系统必须具备快速响应能力,在故障发生的第一时间触发联锁保护动作,避免故障蔓延造成更大损失。这需要系统硬件具备高性能处理器和低延迟的传输模块,同时软件算法要足够高效,以确保从数据采集到决策执行的全过程在毫秒级完成。

系统的可靠性尤为关键,包括硬件设备的稳定性和软件算法的抗干扰能力。例如,在传感器故障或数据丢失的情况下,系统应能够通过冗余设计或数据补全算法继续正常运行,确保实时数据的完整性和准确性。同时,系统还需要具备故障容错能力,即在部分模块失效时,整体功能不受影响,避免单点故障导致整个系统瘫痪。系统架构应当具备分布式处理能力,能够在各模块之间灵活调度资源,并实时切换至备份系统或备用算法,最大程度上减少故障对运行的影响。

故障联锁系统需要具备良好的兼容性,以适应不

同型号多级泵和复杂工况的需求。这包括模块化设计、开放式接口和自适应算法的应用。例如,通过模块化设计,可以根据不同管道输送场景灵活配置监测与保护功能;开放式接口则方便系统与其他工业控制系统的集成;而自适应算法则能够根据泵的具体工况动态调整联锁策略,提高运行效率和安全性。

4.3 联锁系统的实际应用案例

在实际应用中,故障联锁系统已在长输管道的关键站点得到广泛部署。例如,某输油站点针对多级泵转子不平衡问题设计了一套综合联锁保护方案。该方案通过在转子和轴承部位安装高精度振动传感器,实时采集信号并传输至中央控制系统。当振动幅值超过设定阈值时,系统会立即发出警报,同时触发泵的停机程序,避免因转子剧烈振动导致的轴承损坏和密封失效。该系统的实际运行数据显示,联锁保护触发时间不超过 50 毫秒,显著提升了设备的安全性和稳定性。

另一个案例是基于 AI 的智能联锁系统应用于海上油气平台的输油泵组。该系统结合深度学习算法和专家系统,能够在故障征兆出现前发出预测性警报。例如,在轴承温度逐步升高但尚未达到报警值时,系统通过历史数据分析和趋势预测提前判断可能存在润滑油污染问题,并触发相关维护操作。这种主动防护模式不仅减少了设备停机时间,还降低了维护成本,为无人值守的远程操作提供了技术支持。

5 结语

多级泵作为管道输送系统中的关键设备,其轴系动力学特性分析与故障诊断技术研究具有重要意义。通过深入探讨多级泵轴系的结构特点、动力学行为及常见故障模式,结合在线监测与无人值守技术的发展趋势,可以提升设备运行的可靠性以及故障判断效率。同时,智能诊断技术和故障联锁系统的不断优化,为管道输送系统的智能化和自动化管理提供了坚实保障。未来,多级泵技术将在智能化、绿色化和高可靠性方向上不断突破,为能源高效输送、可持续发展和复杂工况适应性提供更加完善的解决方案。

参考文献:

- [1] 王昊昱,王延锋. 径向式导叶多级泵非定常压力脉动特性分析 [J]. 机械设计, 2024,41(07):44-52.
- [2] 高谦,张海,刘嘉庆,等. 多级泵常见故障分析及处理 [J]. 设备管理与维修, 2023(10):80-82.
- [3] 李爱娟. 多级离心泵常见故障分析及维修方法 [J]. 设备管理与维修, 2020(16):50-51.