

天然气压缩机故障诊断与预测性维护

薄喜宇 胡启佳 王晓龙 史宁岗
国家管网集团北京管道有限公司 北京 102101

摘要：本文聚焦于天然气压缩机故障诊断与预测性维护这一关键领域。首先阐述了天然气压缩机在能源行业的重要地位以及开展故障诊断与预测性维护的必要性。接着详细介绍了常见的天然气压缩机故障类型及其产生原因，包括机械故障、电气故障等。在故障诊断方法方面，深入探讨了基于振动分析、油液分析、温度监测以及智能算法等多种技术的诊断原理与应用。随后，着重论述了预测性维护的策略，涵盖数据采集与处理、健康评估模型构建以及维护决策制定等环节。通过实际案例分析，验证了所提出方法的有效性。最后对天然气压缩机故障诊断与预测性维护的未来发展趋势进行了展望，旨在为提高天然气压缩机的运行可靠性与维护效率提供理论支持与实践指导。

关键词：天然气压缩机；故障诊断；预测性维护；智能算法；健康评估

1 引言

天然气是清洁高效能源，在全球能源结构中地位重要，天然气压缩机是其核心设备，其安全稳定运行关乎供应链可靠性与经济性，故障会带来巨大损失和安全威胁。传统维护方式中，定期维护缺乏对设备实际状态的精准把握，有过度或不足维护问题；事后维修会使设备进一步损坏，增加维修难度和成本。如今，物联网等技术发展催生故障诊断与预测性维护技术，能提前发现隐患、预测故障，提高设备可靠性和可用性，降低成本，开展相关研究意义重大。

2 天然气压缩机常见故障类型及原因分析

2.1 机械故障

2.1.1 活塞环磨损

活塞环是核心密封与传热部件，在300mm气缸中，密封面压力0.5-1.5MPa。长期运行中，活塞环与气缸壁每分钟摩擦数百次，摩擦系数0.1-0.3。如500kW压缩机运行5000小时，磨损量0.5-1mm，密封性能下降，气体泄漏增10%-20%，压缩机效率降5%-10%，排气温度升10-20°C，加速其他部件磨损。原因包括：润滑不良，如润滑油粘度不合适（正常ISOVG68-150）或供油量不足（正常0.5-1L/min）；气体含杂质，固体颗粒直径大于10μm会加剧磨损；活塞环材质不合适，如硬度不当，与气缸壁匹配差。

2.1.2 连杆轴承损坏

连杆轴承连接连杆和曲轴，承受交变载荷。正常运行时，与轴颈间隙0.05-0.15mm。损坏时，压缩机振动加速度增2-3倍，产生异常振动和噪音（声压级90-100dB）。原因有：润滑油不足或变质，粘度降30%或含水量超0.5%会降低润滑效果；轴承间隙过大，超设计值

20%会导致油膜破裂，产生干摩擦；过载运行，负荷超额定20%会加速磨损和损坏。

2.1.3 气阀故障

气阀控制气体进出气缸，影响压缩机排气量和效率。如5000m³/h排气量压缩机，气阀故障可能导致排气量降15%-20%，效率降10%-15%。常见故障有阀片断裂、弹簧失效、气阀密封不严。阀片断裂因气体冲击（压力脉动超设计值30%）、疲劳损坏（启闭10⁷-10⁸次现裂纹）或安装不当（角度偏差超0.5°）；弹簧失效使气阀开启延迟0.01-0.02s、关闭提前0.01-0.02s；气阀密封不严使气体泄漏增5%-10%，降低效率。

2.2 电气故障

2.2.1 电动机故障

电动机是动力源，功率100-1000kW。常见故障有绕组短路、断路、接地。绕组短路使电流增2-3倍，数分钟内温度升50-100°C，甚至烧毁；绕组断路致电动机无法启动或运行中停止；接地可能引发漏电，接地电阻小于0.1Ω时，漏电电流达数十安培，危及安全。原因包括：绝缘老化，运行5-10年后，绝缘电阻降50%-80%；过载运行，负荷超额定15%加速绝缘老化；受潮，环境湿度超80%时，绝缘性能降30%-50%；机械损伤，如轴弯曲、轴承损坏致定子和转子摩擦，损坏绕组绝缘。

2.2.2 控制系统故障

控制系统实现压缩机启动、停止、调速等功能。故障可能导致压缩机运行异常。常见故障有传感器、控制器、执行器故障。传感器故障使控制系统无法准确获取运行状态，如压力传感器精度降10%，排气压力控制误差达5%-10%；控制器故障影响指令发出和执行，如PLC程序错误致压缩机无法按设定程序运行；执行器故障使

控制动作无法实现，如电动调节阀卡死致进气量无法调节，影响排气量和压力。

3 天然气压缩机故障诊断方法

3.1 基于振动分析的故障诊断

振动分析是天然气压缩机故障诊断中常用的一种方法。当压缩机内部零部件出现故障时，如活塞环磨损、连杆轴承损坏、气阀故障等，会产生异常的振动信号。通过在压缩机的关键部位安装振动传感器，实时采集振动信号，并对其进行时域分析、频域分析和时频分析，可以提取出反映故障特征的信息，从而判断压缩机的运行状态和故障类型。时域分析主要关注振动信号的幅值、均值、方差等统计特征参数，通过观察这些参数的变化来判断设备是否存在故障。频域分析则是将时域信号通过傅里叶变换转换为频域信号，分析信号的频率成分和能量分布^[1]。不同的故障类型通常会在特定的频率段产生特征频率，通过识别这些特征频率可以准确诊断故障。时频分析方法如短时傅里叶变换、小波变换等，能够同时分析信号的时域和频域特征，适用于非平稳振动信号的分析，对于检测压缩机的瞬态故障具有较好的效果。

3.2 基于油液分析的故障诊断

油液分析技术通过对压缩机润滑油中的磨损颗粒、污染物和化学成分进行分析，来判断设备的磨损状态和故障情况。润滑油在压缩机的运行过程中不仅起到润滑作用，还会携带设备内部的磨损信息和污染物。常用的油液分析方法包括光谱分析、铁谱分析和颗粒计数等。光谱分析可以检测润滑油中各种金属元素的含量，通过分析金属元素含量的变化来判断设备的磨损部位和磨损程度。铁谱分析则是将润滑油中的磨损颗粒沉积在铁谱片上，通过显微镜观察颗粒的形态、大小和数量，从而判断设备的磨损类型和严重程度。颗粒计数用于测量润滑油中不同尺寸颗粒的数量分布，帮助评估设备的污染状况和润滑油的清洁度。

3.3 基于温度监测的故障诊断

温度是反映天然气压缩机运行状态的重要参数之一。压缩机在正常运行过程中，各部件的温度会保持在一定的范围内。当部件出现故障时，如摩擦增大、气体泄漏、冷却系统故障等，会导致局部温度升高。通过在压缩机的关键部位安装温度传感器，实时监测温度变化，并将监测数据与正常范围进行比较，可以及时发现设备的异常情况^[2]。例如，当活塞环磨损严重时，气缸内的气体泄漏量增加，会导致排气温度升高；连杆轴承损坏时，轴承部位的摩擦增大，温度也会明显上升。通过对温度数据的长期监测和分析，还可以建立温度变化趋势

模型，预测设备的故障发展趋势，提前采取维护措施。

3.4 基于智能算法的故障诊断

随着人工智能技术的发展，智能算法在天然气压缩机故障诊断中得到了广泛应用。常用的智能算法包括神经网络、支持向量机、决策树等。神经网络具有强大的非线性映射能力和自学习能力，能够通过对大量故障样本的学习，建立故障特征与故障类型之间的映射关系。在故障诊断时，将采集到的设备运行数据输入到训练好的神经网络模型中，即可快速准确地诊断出故障类型。支持向量机是一种基于统计学习理论的分类算法，它能够在有限样本的情况下获得较好的泛化能力，适用于小样本故障诊断问题。决策树则是一种基于树结构的分类方法，通过对故障特征进行递归划分，构建决策树模型，实现对故障类型的分类诊断。

4 天然气压缩机预测性维护策略

4.1 数据采集与处理

数据采集是预测性维护的基础，需要采集天然气压缩机运行过程中的各种数据，包括振动信号、温度、压力、油液参数等。为了确保数据的准确性和完整性，应合理选择传感器的类型和安装位置，并采用高精度的数据采集设备。采集到的原始数据往往包含噪声和干扰信息，需要进行预处理以提高数据质量^[3]。常用的数据预处理方法包括滤波、去噪、归一化等。滤波可以去除数据中的高频噪声，保留有用的信号成分；去噪方法如小波去噪、中值滤波等能够有效消除数据中的随机噪声；归一化处理则可以将不同量纲的数据转换到统一的范围内，便于后续的分析和处理。

4.2 健康评估模型构建

健康评估模型是预测性维护的核心，它能够对压缩机的健康状态进行量化评估，并预测故障的发生时间和发展趋势。构建健康评估模型需要综合考虑压缩机的历史运行数据、故障数据以及相关领域知识。常用的健康评估方法包括基于物理模型的方法和基于数据驱动的方法。基于物理模型的方法通过建立压缩机的物理模型，结合设备的运行参数和故障机理，计算设备的健康指标。这种方法需要深入了解设备的物理特性和故障机理，建模难度较大，但具有较高的准确性和可解释性。基于数据驱动的方法则利用机器学习算法对采集到的数据进行训练和分析，建立健康评估模型。这种方法不需要建立复杂的物理模型，能够自动学习数据中的特征和规律，适用于复杂设备的健康评估。

4.3 维护决策制定

根据健康评估模型的结果，制定合理的维护决策是

预测性维护的最终目标。维护决策应综合考虑设备的健康状态、故障的严重程度、维护成本、生产计划等因素^[4]。当设备的健康状态良好时，可以适当延长维护周期，减少不必要的维护工作；当设备出现轻微故障隐患时，可以安排计划性维护，在合适的时间对设备进行检修和保养，避免故障的进一步发展；当设备出现严重故障或故障发展趋势迅速时，应立即停止设备运行，进行紧急维修，以确保设备和人员的安全。

5 实际案例分析

5.1 案例背景

某天然气压缩站拥有5台往复式天然气压缩机，每台压缩机的功率为800kW，排气量为8000m³/h。在运行过程中，这些压缩机频繁出现故障，平均每月故障次数达到3-4次，导致生产效率低下，维护成本增加，每年维护费用高达200万元。为了解决这一问题，该压缩站引入了基于振动分析和智能算法的故障诊断与预测性维护系统。

5.2 系统实施

在每台压缩机的关键部位（如气缸、曲轴箱、连杆等）安装了振动传感器、温度传感器和压力传感器，振动传感器灵敏度为50mV/g，频率响应范围为1-5000Hz；温度传感器测量精度为±0.3°C；压力传感器量程为0-25MPa，精度为±0.1%。采集到的数据通过无线传输方式发送到监控中心，数据采集频率为10kHz。在监控中心，对采集到的数据进行预处理，采用巴特沃斯滤波器进行滤波，滤波截止频率为2000Hz，然后使用小波去噪方法去除随机噪声。利用神经网络算法对处理后的数据进行分析，神经网络结构为输入层8个节点（对应振动、温度、压力等8个参数），隐藏层15个节点，输出层4个节点（对应4种常见故障类型），通过收集150组故障样本对神经网络进行训练，训练误差控制在3%以内，建立故障诊断模型和健康评估模型。

5.3 应用效果

通过应用故障诊断与预测性维护系统，该压缩站实现了对天然气压缩机运行状态的实时监测和故障预警。在系统运行期间，成功提前预测了多起活塞环磨损、连杆轴承损坏等故障，及时安排了维护计划，避免了故障的进一步恶化，减少了设备停机时间。同时，根据健康评估模型的结果，优化了维护周期，降低了维护成本。与传统的维护方式相比，设备的可靠性提高了30%，维护成本降低了20%，取得了显著的经济效益和社会效益。

结语

天然气压缩机故障诊断与预测性维护是保障天然气压缩机安全、稳定运行，提高能源行业生产效率和经济效益的重要手段。本文详细介绍了天然气压缩机的常见故障类型及原因，阐述了基于振动分析、油液分析、温度监测和智能算法等多种技术的故障诊断方法，论述了预测性维护的策略，包括数据采集与处理、健康评估模型构建和维护决策制定等环节。通过实际案例分析，验证了故障诊断与预测性维护系统的有效性和可行性。未来，随着多技术融合、智能化与自动化以及远程监测与诊断等技术的发展，天然气压缩机故障诊断与预测性维护将迎来更广阔的发展前景，为能源行业的可持续发展提供有力保障。

参考文献

- [1]王宇航,谷文渊,张红叶,等.天然气压缩机的故障处理[J].石化技术,2024,31(07):75-76+151.
- [2]李斌.天然气压缩机常见故障与处理措施[J].大众标准化,2025,(07):106-108.
- [3]郭锋锋.天然气压缩机常见故障及应对措施[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(02):15-17.
- [4]叶启兴.天然气压缩机的运行与维护措施探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(23):15-16.