

天然气长输管道压缩机组优化运行与故障诊断技术

刘裕萍 王雨蒙

北京东方华智石油工程有限公司, 天津市, 300000;

摘要: 天然气长输管道作为能源输送的主动脉, 压缩机组是保障管道高效、安全运行的核心动力装备, 其运行状态直接关系到能源供应的稳定性与经济性。本文围绕天然气长输管道压缩机组的优化运行与故障诊断两大核心技术领域, 系统梳理了国内外相关研究与应用进展。在优化运行方面, 重点阐述了基于工况匹配的参数优化、智能控制策略及全生命周期能效管理技术; 在故障诊断方面, 详细分析了传统诊断方法、基于数据驱动的智能诊断技术及多模态数据融合诊断体系的发展现状。最后, 结合当前技术瓶颈, 展望了未来压缩机组在智能化、数字化及协同化方向的发展趋势, 为我国天然气管网核心装备运维技术的升级提供参考。

关键词: 天然气长输管道; 压缩机组; 优化运行

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.038

引言

随着我国能源结构转型的深入推进, 天然气作为清洁高效的化石能源, 在能源消费中的占比持续提升。天然气长输管道凭借运量大、损耗低、成本优的优势, 已成为天然气跨区域输送的主流方式。压缩机组作为长输管道的心脏, 承担着为天然气增压、保障管道内介质稳定流动的关键职责, 其运行效率与可靠性直接影响管道输送能力、能耗水平及安全系数。据统计, 压缩机组的能耗占长输管道运营总能耗的 70%以上, 而机组非计划停机可能导致管道输送中断, 造成巨大的经济损失与社会影响。

近年来, 我国天然气管网建设进入全国一张网整合升级阶段, 陕京四线、西气东输等重大管道工程的规模化运营, 对压缩机组的运行性能与运维水平提出了更高要求。一方面, 面对复杂多变的工况条件(如进气压力波动、环境温度变化、下游需求调整等), 如何实现压缩机组的优化运行以降低能耗、提升输送效率, 成为行业关注的核心问题; 另一方面, 压缩机组结构复杂、运行工况恶劣, 易出现转子不平衡、轴承磨损、喘振等故障, 传统运维模式难以满足实时监测与精准诊断的需求, 亟需发展高效的故障诊断技术以实现从被动维修向主动预测的转型。在此背景下, 系统综述天然气长输管道压缩机组优化运行与故障诊断技术的研究进展, 明确当前技术瓶颈与发展方向, 具有重要的理论与实践意义。

1 天然气长输管道压缩机组优化运行技术

压缩机组优化运行的核心目标是在保障管道输送需求与设备安全的前提下, 通过优化运行参数、改进控

制策略、强化过程管理等方式, 最大限度降低能耗、提升运行效率。近年来, 随着智能化技术的发展, 压缩机组优化运行技术已从传统的工况匹配优化逐步向智能控制与全生命周期管理升级。

1.1 基于工况匹配的运行参数优化

压缩机组的运行效率与工况参数(如转速、压比、流量、进出口压力等)密切相关, 基于工况匹配的参数优化是提升机组运行效率的基础手段。传统参数优化主要基于机组出厂性能曲线, 通过人工调整转速、回流阀开度等参数, 实现机组运行状态与管道输送需求的匹配。但这种方式存在响应滞后、精度不足等问题, 难以适应复杂多变的实际工况。

近年来, 基于实时工况数据的动态优化技术得到广泛应用。通过在机组关键部位部署传感器, 实时采集进气压力、温度、流量及机组振动、功率等数据, 建立机组运行状态与能耗的关联模型, 动态调整运行参数以实现能效最优。例如, 国家管网集团在托克托压气站项目中, 通过神经网络算法对 2 万多条现场数据进行修正学习, 形成智能决策模型, 可在 5 分钟内给定安全区域内的最优机组运行建议, 显著提升了机组运行效率。此外, 针对多机组并联运行的压气站, 研究人员提出了基于负荷分配的协同优化策略, 通过建立多目标优化模型(最小化总能耗、均衡机组磨损), 合理分配各机组的运行负荷, 避免部分机组过载运行, 延长机组使用寿命。

1.2 智能控制技术的突破与应用

智能控制技术是实现压缩机组优化运行的核心支

撑,其发展历程经历了从传统自动控制到智能自适应控制的跨越。长期以来,大功率压缩机组的智能控制技术被国外垄断,我国主要依赖进口控制系统,存在技术壁垒高、维护成本高的问题。为突破国外技术封锁,我国科研团队联合企业开展关键核心技术攻关,取得了显著成果。

北京管道公司联合沈鼓集团、大连理工大学等单位开发的一键启站,智能运行技术,创造性地开创了新的技术路线,对国产压缩机组的控制程序代码进行了超过90%的重构,实现了压缩机组的远程智能控制。该技术通过六大控制器联动的自动加载并网方法,使机组并网耗时由国际先进设备的225分钟缩短至20分钟,仅为国际先进水平的8%;同时,实现了启机操作由3-4人减少至1人,大幅提升了劳动生产率。该项目在压缩机自动并机、神经网络算法应用、性能参数预测等方面达到国际领先水平,标志着我国大功率压缩机组智能控制技术实现了从追赶到领跑的跨越。

此外,模型预测控制(MPC)、模糊控制、自适应控制等智能算法在压缩机组控制中的应用日益广泛。模型预测控制通过建立机组动态模型,预测未来一段时间内的运行状态,提前调整控制策略,有效避免了喘振等不稳定工况的发生;模糊控制则凭借其对非线性系统的良好适应性,能够在参数不确定的情况下实现稳定控制,已成功应用于压缩机组的转速控制与压力调节中。

1.3 全生命周期能效管理技术

全生命周期能效管理技术将优化运行理念贯穿于压缩机组的设计、运行、检修、报废全流程,通过全流程数据采集与分析,实现机组能效的持续提升。西安交通大学开发的压缩机全生命周期管理系统,建立了模块化、集成化的数据环境,涵盖设计规划、运行工作、检修维护三个核心阶段。在设计阶段,通过性能计算与选型设计技术,实现机组结构与工况需求的最优匹配;在运行阶段,通过实时数据采集与动态监测,优化运行参数;在检修维护阶段,通过零部件寿命预测与维修预警,避免过度维修与欠维修,降低运维成本。

国家管网集团建设的关键设备智能监测平台,集中采集全国400余台压缩机组的振动、工艺参数等实时运行数据,构建了采集-处理-存储-应用-迭代的全流程数据治理体系。通过对数据的深度分析与挖掘,不仅实现了机组运行状态的实时优化,还为上游装备制造企业提

供故障案例数据,反哺设备设计研发,形成了运行优化-数据反馈-设计改进的闭环管理模式,有效提升了产业协同竞争力。

2 天然气长输管道压缩机组故障诊断技术

压缩机组故障诊断技术的核心目标是及时识别机组运行过程中的异常状态,精准定位故障类型与原因,为运维决策提供支持。随着传感器技术、数据处理技术及人工智能技术的发展,故障诊断技术已从传统的人工分析逐步向数据驱动的智能诊断升级,诊断精度与效率大幅提升。

2.1 传统故障诊断方法

传统故障诊断方法主要依赖人工经验与简单的信号分析,包括振动信号特征分析法、噪音监测法、热力诊断法等。振动信号特征分析法是应用最广泛的传统方法,通过分析机组关键部位的振动振幅、相位、频谱等特征,推断故障类型。例如,转子不平衡故障的振动频谱主频为工频,时域波形为正弦波,轴心轨迹为椭圆,这些特征成为人工判断的重要依据。但该方法对操作人员的经验要求极高,分析结果具有主观性,且属于事后分析,无法实现故障预警。

噪音监测法通过检测机组运行过程中的噪音信号,结合振动信号判断气缸磨损、气阀漏气等故障;热力诊断法则通过监测机组的水温、排水量、冷却器效率等热力参数,分析故障原因。这两种方法操作简单、成本较低,但诊断精度有限,易受环境干扰,主要适用于简单故障的初步判断。

2.2 基于数据驱动的智能诊断技术

随着大数据与人工智能技术的发展,基于数据驱动的智能诊断技术成为故障诊断领域的研究热点。该技术通过采集机组运行过程中的多源数据,利用机器学习、深度学习等算法构建诊断模型,实现故障的自动识别与预警,大幅降低了对人工经验的依赖。

在机器学习算法应用方面,支持向量机、贝叶斯网络、BP神经网络等算法已广泛用于压缩机组故障诊断。中石化重庆天然气管道有限公司开发的智能监控系统,采用三层贝叶斯网络构建故障识别单元,能够检测压缩机组的故障类型与故障概率,并通过机器学习更新故障数据库,提高了诊断的动态灵活性。但传统机器学习算法多为浅层算法,数据分析能力有限,诊断效果依赖于

特征工程的质量，在处理复杂非线性故障时存在局限性。

深度学习算法凭借其强大的特征提取与非线性拟合能力，在压缩机组故障诊断中展现出显著优势。研究人员将梅尔频率倒谱系数（MFCC）与深度神经网络结合，用于离心压缩机振动故障诊断。通过对振动信号进行预加重、分帧、加窗、快速傅里叶变换等处理，提取 MFCC 特征，利用深度神经网络训练诊断模型，实现了对转子不对中、转子不平衡、油膜振荡、喘振等故障的精准识别。国家管网集团构建的高质量数据集，融合振动、温度、压力等多源时序数据，训练的诊断预警模型故障诊断准确率达 95%，转子/轴承等关键故障零漏检，年均识别各类异常 200 余起。

2.3 多模态数据融合诊断体系

单一类型的数据难以全面反映压缩机组的运行状态，多模态数据融合诊断体系通过整合振动、声发射、热力、油液等多源数据，构建联合特征空间，显著提升了复杂故障的识别能力。西安交通大学针对往复压缩机与隔膜压缩机，开发了集成多源信号的故障诊断方法：基于气缸内热力过程特征和阀片声发射信号，实现气阀故障的精准诊断；基于活塞杆应变重构 p-V 图，提出了无损故障诊断方法，解决了传统侵入式方法破坏气缸完整性的问题；基于油-气压力伴随关系，集成声发射与油-气压无损监测，实现了隔膜压缩机故障的根源追溯。

国家管网集团的关键设备智能监测平台，构建了覆盖 400 余台机组、30TB 规模的高质量数据集，涵盖 20 余种故障类型、150 余起典型故障案例。通过多模态数据融合训练，模型能够有效识别复杂工况下的潜在故障，2024 年实现非计划停机次数同比减少 40.9%。多模态数据融合诊断体系不仅提高了故障诊断的精度与可靠性，还为故障预测与健康管理（PHM）奠定了坚实基础。

3 技术瓶颈与发展趋势

尽管我国在天然气长输管道压缩机组优化运行与故障诊断技术领域取得了显著进展，但仍面临诸多技术瓶颈：一是故障样本稀缺问题突出，尤其是极端工况下的故障案例较少，导致智能诊断模型在特殊场景下的泛化能力不足；二是多源数据的标准化与融合难度大，不同厂家、不同类型机组的数据格式不统一，制约了跨平台数据共享与模型迁移；三是智能控制与故障诊断的协同性不足，目前多数系统仍处于各自为战的状态，未能

实现运行优化与故障预警的深度融合；四是边缘计算能力有待提升，在偏远地区的压气站，数据传输延迟与带宽限制影响了智能算法的实时应用。

未来，压缩机组优化运行与故障诊断技术将朝着智能化、数字化、协同化、绿色化的方向发展：一是构建基于数字孪生的全生命周期运维体系，通过建立机组的数字孪生模型，实现运行状态的实时映射、故障模拟与运行优化的虚拟仿真，提升运维的精准性与前瞻性；二是发展联邦学习与边缘智能技术，在保护数据隐私的前提下，实现多站机组数据的联合建模，同时提升边缘设备的本地计算能力，降低对云端的依赖；三是推动智能控制与故障诊断的深度协同，将故障诊断结果实时反馈至控制系统，实现运行参数的动态调整与故障的主动抑制；四是强化数据要素的市场化配置，进一步完善数据治理体系，推动故障案例、运行数据等资产的产品化运营，反哺装备设计与技术创新；五是聚焦低碳化运行优化，结合新能源消纳需求，实现压缩机组与可再生能源的协同运行，降低单位输送能耗。

4 结论

天然气长输管道压缩机组优化运行与故障诊断技术是保障能源输送安全、提升运营效率的核心支撑。近年来，我国在该领域取得了一系列突破性成果，智能控制技术实现了从追赶到领跑的跨越，数据驱动的故障诊断技术大幅提升了诊断精度与效率，全生命周期管理理念逐步深入人心。但与此同时，故障样本稀缺、数据格式不统一、协同性不足等技术瓶颈仍亟待解决。

未来，需进一步加强跨学科、跨领域的技术协同创新，重点突破数字孪生、联邦学习、边缘智能等关键核心技术，推动压缩机组运维技术从数据智能驱动向数字孪生驱动升级，实现运行优化与故障诊断的深度融合。通过技术创新与模式革新，持续提升压缩机组的运行效率与可靠性，为我国天然气管网全国一张网的高质量运行提供坚实的技术保障，助力能源结构转型与双碳目标的实现。

参考文献

- [1] 黄翼虎. 长输原油管道加热炉自动控制技术的研究 [D]. 浙江大学, 2005.
- [2] 王立坤. 原油管道泄漏检测若干关键技术研究 [D]. 天津大学, 2003. DOI: 10. 7666/d. y540471.