

Online Diagnosis Technology and Maintenance Strategy for Internal Leakage of High Pressure Natural Gas Pipeline Valves

Zhen Chen Qihao Liao Lingxiang Wang Longfei Hu

Hubei Branch of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430400, China

Abstract

Given the prominent characteristics of high-pressure natural gas pipeline valve internal leakage—including strong concealment, progressive evolution, and risk amplification through coupling effects—such leaks compromise pressure regulation accuracy in gas transmission systems, affect process stability, and increase risks of energy consumption escalation, equipment abnormal wear, and station switching incidents. This study addresses the challenges of detecting, classifying, and managing internal leaks under non-disruptive operation conditions. Starting from the formation mechanisms and fault manifestations of internal leaks, we systematically analyze the response patterns of key physical parameters (pressure, flow rate, acoustic vibration) under high-pressure conditions. Subsequently, we propose online diagnostic techniques and condition recognition methods for complex noise environments. By integrating risk differentiation across leakage severity levels, we establish a hierarchical maintenance strategy and diagnosis-maintenance coordination mechanism. The final closed-loop operation and maintenance framework—comprising “online detection → condition assessment → maintenance decision-making → performance feedback”—provides valuable guidance for valve condition-based maintenance, operational risk control, and lean operation practices.

Keywords

high-pressure natural gas pipeline; valve internal leakage; online diagnosis; multi-source sensing

高压天然气管道阀门内漏在线诊断技术与维修策略

陈真 廖启豪 王凌翔 胡龙飞

国家石油天然气管网集团有限公司湖北分公司, 中国·湖北 武汉 430400

摘要

由于高压天然气管道阀门内漏有隐蔽性强、渐进演化明显、风险耦合放大的突出特征, 故会破坏输气系统压力调控的精度, 影响工艺稳定性, 也易造成能耗增大、设备异常磨损、站场切换风险升高。因此, 文章围绕不停输条件下内漏难感知、难分级、难处置的问题, 从内漏形成机理及故障表征出发, 系统、严谨地分析了压力、流量、声振诸种物理量在高压工况下的响应规律, 继而提出复杂噪声背景下的在线诊断技术及状态识别方法, 再结合不同内漏等级的风险差异, 自然、合理地构建起分层维修策略及诊断—维修协同机制, 最终给出“在线感知—状态评估—维修决策—效果反馈”的闭环运维思路, 对阀门状态检修、运行风险控制及精益运维都具有极好的指导意义。

关键词

高压天然气管道; 阀门内漏; 在线诊断; 多源感知

1 引言

高压天然气长输管道是能源输配体系中极其重要的基础设施, 阀门作为实现介质切断、调节、工况切换的基本控制单元, 其运行状态对输气系统的安全性、稳定性、经济性都具有直接而重大的影响。不过也十分清楚地认识到, 在高压、高频调节、复杂介质冲刷的工况下, 阀门密封副容易发生磨损、变形、颗粒嵌入等失效形式, 因而内漏故障时有发生。

更值得重视的是, 早期内漏泄漏量极小, 外部表征极弱, 隐蔽性极强, 但若长期未予治理, 必然导致压力控制精度下降、站场联锁逻辑失常、设备寿命缩短, 甚至增大异常工况下处置的风险。故而传统以停输检查、定期检修方式管理阀门的方法不能很好地适应连续输气条件下精细化管理的要求。

2 高压天然气管道阀门内漏特征及在线诊断需求分析

2.1 阀门内漏的形成机理与典型故障特征

高压天然气管道阀门内漏绝不是单因素造成的, 而

【作者简介】陈真(1983—), 男, 中国湖北武汉人, 本科, 工程师, 从事油气储运研究。

是密封结构、介质条件、运行制度、制造装配诸种因素耦合作用的结果。阀门长期处于高压差、频繁启闭、高速介质冲刷的工况下,故密封副表面极易发生磨粒磨损、冲蚀损伤及接触疲劳,密封比压下降,由此自然地由面接触过渡到局部间隙泄漏通道。若天然气中混有微细颗粒、液滴或腐蚀性组分,颗粒嵌入、表面刻蚀都会直接破坏密封面的几何完整性,泄漏路径遂从离散微孔发展为连续渗流通道。更重要的是,球阀、闸阀、截止阀等不同阀型在密封结构、流道形式、受力方式上各不相同,因此其内漏的表征也具有十分明确、可区分的特点:球阀多见局部密封带失效后的持续微泄漏,闸阀典型故障为闸板与阀座贴合不均所致的间隙泄漏,截止阀在节流冲刷工况下更易发生密封面损伤加剧的问题。

2.2 阀门内漏对天然气管道运行的影响机制

阀门内漏对天然气管道运行的过程性、系统性及放大性,故其危害绝不止是单体设备密封性能变差,更会沿着输气工艺链条向调控、能耗、安全、设备寿命诸种因素逐层传递。具体而言,承担截断、分输、旁通、压力调节诸种功能的关键阀门内漏后,工艺隔离效果变差,因此阀后压力响应滞后、流量调节偏差增大,站场工况切换时的控制精度和稳定性都直接恶化。在压缩机启停、管段切换、过滤分离、紧急联锁等运行场景中,若阀门不能可靠切断,系统边界条件就会发生偏移,既增大工艺计算及调度执行的不确定性,也极易造成联锁逻辑误判、操作时序紊乱。更严重的是,长期持续内漏会造成无效输送及节流损失增大,压缩机、调压装置及附属设备长期处于偏离最优工况的状态,由此带来额外能耗、机械负荷增大,最终自然地加速相关设备的磨损老化。

2.3 高压天然气管道阀门内漏在线诊断的技术需求

阀门内漏诊断必须从传统的停输解体检查转向面向运行现场的在线识别模式,因此其最根本的技术需求是在不停输条件下实现微小泄漏的早期感知、内漏等级的准确判别以及诊断结果对维修决策的直接可靠支撑。但毋庸讳言,高压管道站场环境本身噪声极多,压缩机振动、调压噪声、流量波动及电磁干扰都会对内漏信号造成干扰,故此在线诊断技术必然要具备多源感知、特征互证、抗噪辨识诸种能力:从压力、流量、声发射、振动及温度诸种物理量中提取与内漏相关的弱特征,同时主动、有力地抑制正常工况扰动引起的误报。更重要的是,不同阀型、不同开度状态、不同安装位置会导致泄漏表征规律的变化,故诊断模型宜有良好的工况适应性及参数迁移能力,防止因阈值僵化或样本不足而导致识别精度下降。从工程应用的角度再进一步考虑,在线诊断系统除要符合传感器耐压、防爆、长期稳定运行的基本要求外,还要兼顾监测布点成本、数据传输效率、边缘计算能力及现有站控系统的兼容性,最终让所得的诊断结果真正成为可执行的检修建议和明确的风险预警信息。

3 高压天然气管道阀门内漏在线诊断关键技术研究

3.1 基于压力、流量与声振特征的多源在线感知技术

高压天然气管道阀门内漏在线感知的根本问题是连续运行状态下可靠、及时地提取泄漏引起的弱扰动信息,并与正常调节波动、设备背景噪声、工艺切换扰动予以明确区分。压力信号能自然、直接地反映阀前阀后压差分布及局部流动阻力变化,故密封副形成微小泄漏通道之后,阀后静压恢复过程、压差波动幅值及短时脉动特征都会出现明显异常。流量信号有利于检测阀门关闭工况下非指令性的介质穿越现象,因此对中度及以上内漏极其敏感。与此形成极好补充的是,声振信号更宜于表征高速微泄流引发的湍流冲击、结构耦合振动及高频声发射响应,在微小内漏早期识别中有先兆性优势。

3.2 阀门内漏状态识别与诊断模型构建方法

阀门内漏状态识别的根本不是单纯发现异常,而是要建立从多源特征到泄漏等级稳定、可靠的映射关系,因此诊断结果才要有可解释性、可分级性,以及直接的工程应用价值。因此对于现场应用,宜采用“阈值初筛+特征融合判别”的两级建模思路:先用阀门全关或指定工况下的压差波动均方根、相对流量偏差、声发射能量均值、振动加速度均方根诸指标做快速初筛,排除明显正常状态,再在精细诊断阶段用特征归一化、主成分压缩或加权融合的方法构造内漏判别向量,配合支持向量机、随机森林或轻量化神经网络完成泄漏等级识别,同时引入滑动时间窗、多时段投票、工况标签修正诸种机制来系统、严谨地降低误报概率。为方便论文后续表述,表 2-1 中给出了面向工程应用的阀门内漏状态判别指标示例,可直接作为状态识别模型的输入特征及等级划分的依据。

3.3 在线诊断系统的工程实现路径与应用要点

阀门内漏在线诊断系统的工程实现路径及应用要点可以十分自然、妥帖地以“测得准、传得稳、算得快、接得上、用得住”为总体框架,故其常规实现路径可明确归纳为监测点布设、数据采集、边缘分析、平台联动和运维闭环五个环节。具体而言:监测点布设要结合阀门类型、上下游管段长度、工艺流程位置、维护可达性诸种因素合理确定,因此关键截断阀、调节阀及启停切换频繁的控制阀宜列为优先监测对象。数据采集层要满足高压、防爆、抗电磁干扰、长期稳定运行诸种工程要求,宜对高频声振通道及低频工艺参数通道分别做分层采样并严格对时,切实避免多源数据失配对诊断结果的影响。边缘分析单元宜部署轻量化、高可靠的特征提取及初步判别算法,做到异常就地筛查、预警数据压缩上传,由此减轻站控系统及中心平台的数据负担。系统接口层要与 SCADA、站控 PLC 及设备管理平台无缝对接,让诊断结果自动、实时地关联阀门台账、运行工单、维修记

录,真正实现从状态评估到检修执行的业务闭环。

4 阀门内漏维修策略优化与诊断—维修协同机制构建

4.1 基于内漏等级的分层维修决策策略

对于轻微内漏阀门,虽然密封能力已有早期衰减,但是尚未影响工艺稳定性,因此宜采用运行监视、参数复核、启闭特性检查、局部预防性维护诸种手段相结合的策略,主动缩短监测周期,及时校核阀反馈,清除可能诱发密封失效的颗粒沉积,从而延缓缺陷扩展。与此形成极好对照的是中度内漏,此时密封副已经形成较稳定泄漏通道,阀门功能可靠性处于下降阶段,故应正式纳入计划性检修窗口,结合站场负荷变化及输气调度安排,系统、有序地进行密封面修复、阀座更换、执行机构联调及装配精度校正,做到风险控制与检修成本两者的平衡。而严重内漏显然已经造成阀门隔离能力的实质性失效,对站场切换、联锁保护、异常工况处置都直接构成重大威胁,因此必须结合工艺可切换性及供气保障要求,组织停输或局部隔离处置,及时、可靠地更换关键密封组件、阀杆传动部件及所有内部受损结构,必要时整体返厂修复。

4.2 在线诊断结果驱动的维修工艺优化路径

在线诊断结果驱动的维修工艺优化路径传统阀门检修一般依靠运行年限、启闭次数或定期停输安排来安排维修,因此容易出现“轻故障过修、重故障迟修”的资源错配问题,而在线诊断结果中所含的泄漏等级、异常持续时间、特征波动趋势及复合风险评价诸种参数,恰恰为维修时机选择、维修方式匹配、备件资源配置提供了极其可靠的依据。具体而言:当诊断系统判定内漏特征处于稳定低幅状态时,维修工艺宜以运行调整、预防性保养为主;当压差波动、流量偏差、声振指标三者同步抬升时,即说明密封副退化进入加速区,此时宜主动锁定检修窗口,合理配置密封件、阀座组件及专用工装。维修结束之后,又宜利用复役阶段的在线监测数据对密封恢复效果予以客观、定量的验证,确认是否达到预期修复质量,由此自然、妥帖地为后续同类阀门的维修方案优

化提供反馈。

4.3 阀门内漏在线诊断与维修协同的运维模式创新

在线诊断系统作为前端感知基础,以设备健康评估作为中间决策环节,以维修执行及质量验证作为末端闭环单元,同时把 SCADA 数据、检修记录、备件寿命信息、历史故障样本都统一纳入设备全寿命管理体系之中,由此建立阀门健康档案及内漏演化数据库,进而客观、可靠地识别不同阀型、不同工况、不同服役阶段的失效规律,因此也自然而然地为维修策略标准化、阈值动态修正、重点设备差异化管控提供明确依据。运维组织方式本身发生重大变化,设备管理、工艺运行、仪控维护、检修执行诸种职能不再是分散响应关系,而是围绕同一状态数据平台协同联动,诊断结论可直接触发工单生成、风险预警、资源调度诸种动作。

5 结论

以压力、流量、声振信息为基础构建多源在线感知及状态识别体系,有利于提高微小内漏的检测能力及等级判别精度,也自然地为不停输条件下的阀门健康评估提供了可靠支撑。更难得的是,把在线诊断结果与分层维修决策、工艺优化、效果验证诸部分有机衔接,可真正促成阀门维护从周期检修向状态检修合理转变,兼顾安全性与经济性,对提高设备本质安全水平、优化运行管理流程均有直接而重大的意义。

参考文献

- [1] 李蓉雪,杨理践,刘斌,等. 高压天然气管道声谐振检测方法研究[J/OL]. 仪器仪表学报, 1-12[2026-03-29].
- [2] 李小鸥,王旭,王佳帅,等. 开放空间高压天然气管道小孔泄漏扩散特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21 (S2): 7-14.
- [3] 牛婷. 高压天然气管道输送过程中的能耗分析与节能优化策略[J]. 中国储运, 2025, (12): 78-79.
- [4] 黄璠,胡高攀,洪君华,等. 阀门内漏的原因分析及解决措施[J]. 阀门, 2025, (07): 786-790.
- [5] 叶国阳,徐玉全. 基于支持向量机优化的阀门内漏声发射检测分类模型[J]. 自动化应用, 2025, 66 (14): 213-217+221.