

Research on reliability evaluation of combustible gas online detection in natural gas station

Cheng Liu Chao Liu

Northwest Branch of National Petroleum and natural gas pipeline network Group Co., Ltd., Weinan, Shaanxi, 710021, China

Abstract

The natural gas station is the key node of the urban and industrial energy transmission and distribution system. There is a long-term potential risk of combustible gas leakage in pressure regulation, metering and pipe network control. The combustible gas online detection system is composed of sensor array, data acquisition unit, signal processing module and alarm linkage mechanism, which is the first barrier of the station safety protection system. Based on the typical working conditions of natural gas stations, this paper proposes a comprehensive lifting path around sensitive materials. The research shows that the reliability improvement of online detection should not be limited to the performance optimization of a single sensor, but need to form a collaborative mechanism between the hardware structure, detection topology, data model and organization maintenance system to achieve the dynamic stability of early leakage identification ability and linkage control.

Keywords

natural gas station; Combustible gas detection; Online monitoring; Sensor drift

天然气站场可燃气体在线检测可靠性评估研究

刘程 刘超

国家石油天然气管网集团有限公司西北分公司，中国·陕西渭南 710021

摘要

天然气站场是城市与工业能源输配体系的关键节点，在压力调节、计量和管网控制中长期存在可燃气体泄漏的潜在风险。可燃气体在线检测系统由传感器阵列、数据采集单元、信号处理模块和报警联动机制构成，是站场安全防护体系的第一道屏障。本文基于天然气站场典型工况，系围绕敏感材料提出综合提升路径。研究表明，在线检测的可靠性提升不应局限于单一传感器性能优化，而需在硬件结构、检测拓扑、数据模型与组织维护体系之间形成协同机制，以实现泄漏早期识别能力与联动控制的动态稳定性。

关键词

天然气站场；可燃气体检测；在线监测；传感器漂移

1 引言

天然气能源在我国能源结构优化和低碳经济背景下呈现持续增长态势，其输配系统广泛分布于城市、工业集群和区域能源网络。站场作为输配系统的重要节点，承担压力调节、计量控制与管网分段功能，设备密集程度高、管件连接繁复，局部流速变化显著，任何气体泄漏都可能在短时间内形成爆炸性气团。本文基于天然气站场工况，首先对可燃气体在线检测技术进行系统综述，在分析主流检测方法机理的基础上，从传感器退化、环境干扰与系统结构三条路径构建可靠性分析框架。

2 可燃气体在线检测技术概述

2.1 主流检测原理及其适用性比较

天然气站场可燃气体在线检测技术的发展从单一敏感元件测量逐步演化为光学、热学和电化学机制并存的综合检测体系，其核心目标在于在复杂工况下实现对微浓度甲烷的稳定识别与连续量化。在典型应用中，催化燃烧式传感器以铂铑丝或贵金属颗粒作为催化核心，通过将甲烷氧化反应所释放的热量转化为敏感电阻的变化，从而建立气体浓度与输出信号的函数关系。这种检测方式具有响应快速、线性区间较宽的特征，尤其适用于中高浓度泄漏快速判断和爆炸性气团形成前的紧急预警，但其固有弱点在于对硅烷、硫化氢及油雾杂质的高敏感性，敏感层的催化活性随污染累积不可逆下降，表现为钝化与响应迟滞，使其在长期服役工况中需要高频维护与多次标定^[1-2]。相比之下，电化学式传感器通过

【作者简介】刘程（1981—），男，中国陕西西安人，本科，工程师，从事仪器仪表，控制系统研究。

目标气体在电极界面发生氧化还原反应形成法拉第电流，输出信号与气体浓度呈现稳定的线性关系，因此在低浓度泄漏识别中具备显著优势，尤其适用于站房密闭区域与人员活动集中的监测场景。但该类传感器依赖电解液维持离子传导，温度梯度与湿度波动会促使电解液蒸发或结晶，从而导致极化时间延长、背景噪声加剧，并使电极反应从扩散控制转向动力学控制，表现出明显的漂移效应。半导体式传感器包括 SnO_2 、 ZnO 、 Fe_2O_3 等敏感氧化物材料，其检测机理基于吸附态气体对表面载流子迁移率的调变效应，通过界面势垒变化引起电导变化，因此具有成本低、寿命长、量产稳定等工程优势，适用于大规模布点式检测网络。然而，站场工况中温湿度快速变化及表面污染会破坏表面状态均匀性，使其输出信噪比下降显著，尤其在存在油雾与粉尘的压缩机站表现出短期信号剧烈波动。针对上述局限，近年逐步引入基于光谱的非接触式检测技术，代表性方法包括非分散红外(NDIR)与调制激光光谱(TDLAS)，二者均基于甲烷在特定波段(如 $1.65 \mu\text{m}$ 、 $2.3 \mu\text{m}$ 或 $3.3 \mu\text{m}$)的吸收特性，通过检测光强衰减建立浓度反演模型。光谱检测在抗交叉干扰、响应速度与寿命稳定性方面均显著优于传统传感器，尤其在大体积空间、管廊及室外场景中表现突出，但该类设备对光路污染、光源调制质量与安装几何约束极其敏感，若缺乏反射优化或温湿补偿机制，检测误差会呈现指数放大趋势。因此，各类检测技术的适用性并非单纯由灵敏度决定，而是在测量机理、服役环境、污染承受能力与维护成本之间进行综合平衡^[3]。

2.2 站场检测系统的构成与运行逻辑

天然气站场的可燃气体检测系统具备典型的层次化结构，其运行逻辑不仅依赖单点传感器的测量能力，更依赖监测拓扑、数据采集策略、阈值设定模式与安全联动机制的协同表现。在硬件结构层面，检测节点通常围绕泄漏概率最高的部位进行布设，包括阀体密封面、调压阀出口、计量滑撬接口、焊缝及静电风险区域，形成点式敏感阵列，并通过有线或工业总线结构接入站控系统。采集模块以周期性轮询方式读取探头信号，在无预处理的情况下将原始值输入阈值判断单元，这种“瞬时值—静态阈值”的判定方式在突发泄漏爆发阶段具有较高有效性，但由于缺乏对浓度变化趋势、环境噪声及空间扩散行为的理解，使其在低浓度扩散或间歇性泄漏中表现出显著不稳定性。当站房空调运行、除湿设备开启或管道气流扰动发生时，局部浓度波动会在传感器附近形成非真实泄漏信息，而判定单元将其视为超标，产生误报警，进而推动操作人员对报警系统产生“脱敏效应”^[4]。进一步来看，报警逻辑往往与紧急切断阀、风机联动或工艺停输策略直接绑定，缺乏置信度评估与多级缓冲，导致一旦触发即形成大范围介入，造成高昂停输损失，因此许多站场人为提高报警门限以降低触发概率，反而放大泄漏不可控区间。由此可见，站场检测系统的运行逻辑不仅决定检测结果准确

性，更决定其可靠性结构是否具备长期可持续性，检测不应停留在“单点感知与静态阈值”阶段，而应通过多源冗余布设、趋势分析与动态阈值控制构建安全防护闭环。

3 天然气站场可燃气体在线检测系统的可靠性分析

3.1 传感器退化机理对检测精度的影响

天然气站场在线检测系统的可靠性首先受限于传感器材料与测量机构的退化规律，这种退化往往呈现渐进性累积特征而非突发性失效。在催化燃烧式传感器中，敏感层的贵金属或复合氧化物在长期暴露于含硫化氢、硅烷残留或润滑油雾的气氛下，会因中毒作用失去活性中心，导致氧化放热反应不足，进而出现响应滞后与线性区间收缩，形成“工作正常但读数偏低”的隐性漂移。电化学传感器依赖电解质维持电荷传输，其退化路径表现为电解液蒸发、极化时间增大和电极表面粗化，当站场昼夜温差、湿度变化或寒冷环境持续作用时，电极反应动力学条件发生改变，输出基线抬升或漂移，使低浓度泄漏信号淹没在背景噪声之中。半导体敏感材料退化机理则更与环境耦合相关， SnO_2 、 ZnO 等材料的表面态会因水分子吸附、温度冲击或油粒沉积而改变载流子迁移率，导致瞬态信号过度放大或抑制；这种“高敏—低稳”的特性在压缩机站和调压室中尤为突出^[5]。因此，传感器退化的实质是测量机制与环境边界条件之间长期博弈的结果，其表现并非离散故障，而是一种从灵敏下降到阈值误判逐渐扩散的“功能性失效”，是线上检测可靠性下降的最重要技术根源。

3.2 环境干扰与检测拓扑对系统稳定性的制约

传感器材料衰退是检测失准的内核因素，而站场气流组织、设备热源、建筑结构与布点逻辑则构成可靠性下降的外部驱动力。天然气泄漏在空间中并非均匀扩散，而呈现源头喷射、局部紊流与顶部漂移的分段特征，特别是在调压阀出口形成的高速微射流，会产生局部高浓度“气舌”，若传感器布置在其下风或偏风位置，探头读数可能长时间保持在正常范围，形成典型“漏检”。站房内空调、除湿或换热系统制造的温度梯度会改变气团密度分布，使低浓度泄漏被持续稀释，造成报警阈值长期未触发，而实际浓度已在设备间隙累积至爆炸下限区间。更为隐蔽的是空间错层效应，甲烷密度小于空气，泄漏后沿顶部梁位与封闭吊顶迁移，而多数站场检测布点集中在设备操作平面与人员行走路线，顶部区域缺乏监测点，使高风险区域长期处于感知真空状态。检测拓扑若仍停留在“单点感知—固定阈值—线性联动”的逻辑，将不可避免产生误报与迟报双重风险。天然气站场检测可靠性并非由传感器性能决定，而是由材料退化、环境耦合和拓扑策略共同构成的系统属性，任何单维度改进都不足以消除失效风险，唯有将检测部署、气流规律与动态阈值结合，才能在长期运行中保持检测体系的本质稳定。

4 提高检测系统可靠性的策略

4.1 检测硬件能力与站场布设结构的协同增强

提高天然气站场在线检测系统可靠性，首要任务是从硬件层面构建“抗退化—抗干扰—可校准”的传感器体系，使其在长期服役中维持稳定输出。针对催化燃烧传感器的毒化敏感，应采用多相催化复合结构，将贵金属纳米颗粒固嵌于多孔载体中，通过孔径梯度调节抑制硫硅有机物直接覆盖催化中心，从材料设计上延缓灵敏度衰减；电化学传感器则可引入固态电解质或凝胶体系以减少蒸发与结晶，使其在温湿波动环境下保持稳定电化学界面；半导体敏感单元可通过异质结结构和表面疏油涂层降低油雾吸附，提高载流子迁移率稳定性；而光谱检测应在设备层面构建主动维护能力，例如自清洁窗口、标定光源与即时光路反演，以避免污染累积导致的长期失真。在空间布设上，不应依赖“经验布点”，而应依据气体扩散动力学构建纵向三维探测结构。泄漏源附近部署高灵敏度短程探头用于捕捉最初逸散信号，沿设备间通道布置梯度探测点追踪扩散路径，在站房顶部和梁底形成高位冗余节点用于监测由浮力驱动的气团迁移，从而以“源头捕获—路径识别—顶部拦截”的拓扑结构弥补单层布点形成的盲区。

4.2 多源数据融合与智能诊断驱动的动态可靠性保障

在硬件可靠性与布设策略得到保障后，需进一步通过数据层面的智能化处理建立动态可靠性防护机制，使检测系统从“报警设备”转变为“风险智控平台”如图1。单点浓度与固定阈值比对的传统方式无法应对复杂扰动条件，因此必须引入多源融合逻辑，通过时间域趋势、空间梯度与模型反演构成多维判断矩阵。当多个探头在同一时间窗口内呈现缓慢上升趋势，即便其单点读数未超限，也应触发早期预警；在不同高度与区域出现浓度不对称时，则可借助扩散方程与站房气流模型判断泄漏位置，从而避免误将空调扰动或人员移动产生的局部气团误判为泄漏。进一步地，可通过机器学习方法构建“环境—传感—响应”映射模型，在长周期运行数据的训练中识别正常波动模式与退化异常模式，从而使系统对设备老化、季节变化与压力波动形成自适应阈值。当算法输出具有高置信度的泄漏判断时，控制系统不必立即触发停输，可先发出分级预警并引导人工复核。只有在多传感器一致性确认或浓度跃升呈指数趋势时，才进入联动状态，从机制上消除传统系统“要么不报，要么过度触发”的二元结

构。这样形成的检测体系不再依赖静态参数，而是通过反馈、修正与状态迁移实现动态演化。

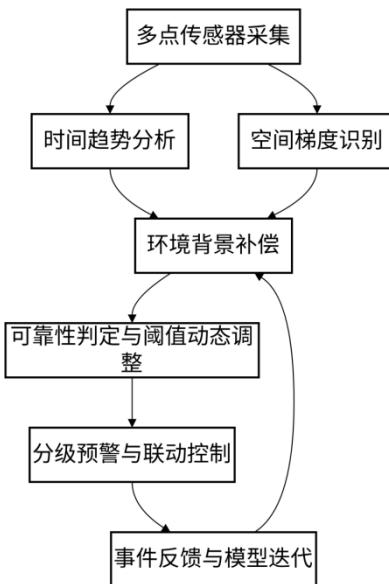


图1 多源融合与动态可靠性提升机制示意

5 结语

天然气站场可燃气体检测的可靠性不是单一传感器精度问题，而是材料退化、环境干扰、空间拓扑与算法判定的综合产物。研究表明，在复杂工况下，单点检测与静态阈值无法满足泄漏早期识别需求，而通过抗污染材料设计、三维布设结构、多源融合算法与反馈迭代机制，可形成从硬件到逻辑的全链条可靠性保障体系。

参考文献

- [1] 赵俊芳,孟金涛,张振宇,等.天然气站场露天区域可燃气体泄漏检测技术探究[J/OL].中国科技期刊数据库 工业A,2024(11)[2024-11-01].
- [2] 侯玉.天然气站场可燃气体检测仪表选型及优化设计[J].中国仪器仪表,2022,(4):85-88.
- [3] 田野,潘诚,陈海艳.天然气站场露天区域可燃气体泄漏检测技术研究[J].油气田地面工程,2022,41(3):73-77.
- [4] 刘广濂.激光式可燃气体探测器在天然气站场的应用[J].石油化工自动化,2020,56(1):83-85.
- [5] 牛占坡.云台扫描式激光可燃气体探测器在天然气站场的应用与实践[J].无线互联科技,2023,20(16):93-95.