

Selection and Optimization Design of Combustible Gas Detection Instruments for Natural Gas Stations

Cheng Liu Zengzhan Zhang

Northwest Branch of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Weinan, Shaanxi, 710021, China

Abstract

In response to the impact of low temperature and high humidity environment in Weinan area of Shaanxi Province, China on the combustible gas detection system of natural gas stations, research is conducted on the selection of detection instruments and system optimization. By comparing the performance differences between catalytic combustion and infrared absorption instruments in detail, a detection network layout method based on a three-dimensional spatial coverage model is proposed. According to practical applications, the modified methane detection response time is shortened to 0.8-2.0 seconds, the system false alarm rate is reduced to 0.027% -0.355%, and maintenance efficiency is improved by 40% in extreme weather conditions. In the future, it is necessary to further explore intelligent diagnosis technology based on edge computing, so as to achieve more accurate leakage early warning and independent maintenance.

Keywords

natural gas station; Combustible gas detection; Instrument selection; System optimization; security operation

天然气站场可燃气体检测仪表选型及优化设计

刘程 张增战

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

针对中国陕西渭南地区低温高湿环境对天然气站场可燃气体检测系统的影响, 开展检测仪表选型与系统优化研究。通过详细对比催化燃烧式与红外吸收式仪表的性能差异, 特提出基于三维空间覆盖模型的检测网络布局方法, 根据实际应用表明: 改造后甲烷检测响应时间缩短至0.8-2.0秒, 系统误报率降低至0.027%-0.355%, 在极端天气下维护效率提升40%。未来还需进一步探索基于边缘计算的智能诊断技术, 以便实现更精准的泄漏预警与自主维护。

关键词

天然气站场; 可燃气体检测; 仪表选型; 系统优化; 安全运维

1 引言

随着我国天然气消费量持续增长, 站场安全监测系统面临严峻挑战。潼关压气分输站是国家管网集团西北公司所辖西二线站场的重要站场, 该区域处于秦岭山脉和太行山脉的夹角处并临近黄河。受黄河和地势的影响该区域的风力最高达到7级以上而且时间较长, 明显高于中部地区其他区域。其所在区域冬季极端低温(-15°C)与夏季高温($\text{RH} > 85\%$)环境对检测系统可靠性提出特殊要求^[1]。并且现有检测系统存在响应延迟(最大4.2秒)、误报率高(暴雨天气0.275%)等问题, 难以满足GB 50493-2019规范要求。

2 天然气站场可燃气体检测仪表选型研究

陕西渭南地区冬季低温多湿的气候环境对天然气站场可燃气体检测仪表的选型提出了特殊要求。国家管网集团西北公司运营的潼关压气站地处关中平原东部, 冬季平均温度 -5°C 至 3°C , 陕西渭南冬季寒潮频发, 阵风常达7级以上, 低温高湿叠加强风环境对天然气站场可燃气体检测仪表的防护等级、抗振性能及防爆密封性提出更高要求。此类工况易导致检测仪表出现冷凝水积聚、传感器漂移等问题, 直接影响泄漏监测的可靠性。同时要求检测系统同时具备快速响应能力和广域覆盖特性^[2]。

激光检测与点型红外检测在渭南站场应用中优势显著: 激光检测采用TDLAS技术, 具有高选择性、抗交叉干扰能力, 响应速度 ≤ 3 秒, 维护周期超18个月; 点型红外检测利用红外吸收原理, 对甲烷检测精度达ppm级, 寿命长达5年, 且不受水汽凝结影响, 完美适配低温高湿环境, 满足

【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。

GB50493 对复杂工况的严苛要求。

3 检测仪表系统优化设计方法

3.1 抗干扰技术实施方案

潼关压气站站场电磁干扰主要来源于 4 台变频调速压缩机（载波频率 2-6kHz）和 110kV 高压输电线路（电场强度 12kV/m）。检测仪表信号传输线在未屏蔽状态下测得共模噪声电压峰值达 3.7V，超过 ISA-92.00.01 规定的 1V 安全阈值。为此设计三级屏蔽体系：传感器本体采用 0.5mm 厚坡莫合金磁屏蔽罩，其相对磁导率 $\mu_r \geq 80000$ ；信号线外层包覆三层屏蔽结构，由内至外分别为镀锡铜丝编织层（覆盖率 85%）、铝箔层（厚度 0.1mm）、316L 不锈钢编织网（目数 120）；接线盒实施全封闭设计，缝隙处填充导电硅胶，确保屏蔽效能 $> 90\text{dB}^{[3]}$ 。

接地系统改造采用“树状-星型”复合拓扑，主干接地线截面积由原 16mm² 升级至 35mm² 镀锡铜缆。传感器外壳接地点与信号参考地严格分离，两者间距保持 $\geq 1.5\text{m}$ ，通过等电位连接器实现共地消除。对于距高压线 15m 范围内的检测点，增设环形接地极阵列：以传感器为圆心，半径 2m 圆周上均匀布置 6 根 2.5m 长镀铜钢棒，接地电阻值从改造前的 4.3Ω 降至 0.8Ω，符合 GB/T 21431-2015《建筑物防雷装置检测技术规范》要求。

线缆敷设实施空间隔离策略，动力电缆与信号线间距由原 0.3m 扩大至 0.8m，交叉角度控制在 $90^\circ \pm 5^\circ$ 。在受限区域，采用双层金属隔板（1mm 铝板+0.5mm 铜板）构建电磁屏蔽通道，通道两端做 360° 端接处理。信号传输改用双绞线对绞距从常规的 50mm 调整为 20mm，使差模干扰抑制比提升 18dB。针对变频器谐波干扰，在电源输入端加装三级 π 型滤波器，截止频率设置为载波频率的 1/10（即 200Hz），有效衰减 30MHz 以下的高频噪声。

3.2 系统冗余配置方法

国家管网集团西北公司依据 Q/SY GD 0214-2017《油气管道安全仪表系统设计规范》，在潼关压气站采用稳定的 4-20mA 信号。基本杜绝现场的信号干扰。

关键设备冗余设计包含四重保障：电源模块采用 1+1 热备模式，DC24V 双回路供电配备自动旁路装置；信号采集卡按 N+1 配置，预留 20% 冗余通道；控制柜内安装环境监测单元，当温度超过 55℃或湿度 $> 85\%$ 时自动启动备用柜体。总线介质选用阻燃型双绞屏蔽电缆，外层包裹耐 -40℃ 低温的聚氨酯护套，节点间距不超过 1200m 标准传输距离的 80%。

数据同步机制采用时间戳比对与差值补偿相结合的方式，主备系统每 15 秒进行状态校验。当检测到总线故障时，智能切换器在 300ms 内完成路径重构，确保 4 台压缩机组的压力数据不会丢失。针对渭南站防爆环境要求，总线连接器选用 IP67 防护等级的 316 不锈钢外壳，接插件镀层厚度

$\geq 50\mu\text{m}$ ，接触电阻稳定在 5mΩ 以下。系统配置自诊断功能，可实时监测 232 个 I/O 点的健康状态，异常数据包自动触发三重校验机制。

4 实际应用与效果验证

4.1 渭南站场改造案例分析

国家管网集团西北公司 2022 年对潼关压气站实施检测系统升级工程，重点改造压缩机房。原系统配置的 12 台单点式检测仪中，已超 8 年使用周期，最大检测延迟达 4.2 秒。改造工程采用 Honeywell XNX Universal 变送器替换老旧设备，其具备 HART 7 协议通信能力，配套安装 12 套新型红外/催化复合传感器^[5]。电缆沟布线改用阻燃型 MICAST 矿物绝缘电缆，耐温等级从 150℃提升至 260℃，电缆接头采用三重密封结构，防护等级达 IP68。

表 1 改造前后检测响应时间对比表

检测区域	改造前响应时间	改造后响应时间	优化幅度 (%)
	(s)	(s)	
储罐顶部	3.5	0.8	77.1
压缩机房	2.8	0.9	67.9
阀门组	4.2	1.2	71.4
装卸车区	1.9	0.6	68.4

系统架构升级包含三个层次：现场层部署 38 个防爆接线箱，实现信号采集单元与执行机构的物理隔离；控制层采用横河 CENTUM VP DCS 系统，将 I/O 点容量从 512 扩展至 2048；监控层集成三维可视化平台，支持 420 个检测点的实时浓度热力图显示。通讯协议升级为 OPC UA over TSN，使数据刷新周期从 1 秒缩短至 200ms。针对冬季冷凝问题，在传感器探头加装 PTFE 疏水膜，配合电伴热带维持腔体温度在 5℃以上。

施工过程中创新采用“模块化预制+滑移安装”工艺，将电缆沟单点安装耗时从 3 小时压缩至 45 分钟。储罐顶部检测单元通过磁力爬行机器人进行安装，避免搭设脚手架影响生产。系统调试阶段运用数字孪生技术，在虚拟环境中完成 132 个逻辑控制回路的测试验证。改造后站场检测覆盖率从 89% 提升至 99.6%，单日最大数据处理量由 2.7GB 增至 9.4GB，满足 GB/T 50493-2019 对大型天然气压气站的监测要求。

4.2 连续监测数据对比

2023 年渭南地区汛期（6-8 月）的监测数据显示，天然气压气站累计采集甲烷浓度有效数据点 287 万条，数据完整率达 99.7%。监测系统采用分布式存储架构，每小时对各区域检测值进行四分位距（IQR）分析，剔除因雷电干扰导致的异常数据。期间共记录到 12 次超过注意级阈值的浓度波动，最大峰值出现在 7 月 23 日暴雨期间，储罐 B-04 顶部检测到 1.2%LEL 瞬时值（见表 2）。

表 2 不同工况下误报率统计表

工况类型	检测次数	误报次数	误报率 (%)	主要干扰源
暴雨天气	32415	89	0.275	雷电电磁脉冲
设备启停	47893	67	0.140	变频器谐波
高温时段	69520	45	0.065	热辐射导致传感器漂移
检修作业	28756	102	0.355	焊接作业电火花

数据分析表明，暴雨天气下的误报率是晴天工况的 10.2 倍，主要集中在压力安全阀周边。7 月 12 日强降雨期间，32# 检测点因雨水渗入接线盒导致绝缘电阻下降至 $0.5\text{M}\Omega$ ，引发持续 6 小时的间歇性误报警。设备启停工况下，压缩机变频器产生的 5 次谐波（250Hz）与传感器信号频段重叠，造成 0.14% 的误报率。系统通过自适应滤波算法，将此类误报抑制率提升至 78%。

4.3 运行维护经验总结

国家管网集团西北公司针对渭南地区极端气候特征，建立分级维护响应机制。当气温低于 -15°C 时，启动三级防冻预案：维持探头温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ ；重点检查聚氨酯保温层密封性；最后在仪表风系统加装二级露点监测，控制压缩空气含水量 $< 0.5\text{g}/\text{m}^3$ 。暴雨红色预警期间，执行“三查两断”操作规程：查防雷接地电阻值（ $< 4\Omega$ ）、查接线盒防水等级（IP68）、查信号线绝缘阻抗（ $> 20\text{M}\Omega$ ）；切断非必要仪表的户外供电，中断无线传输模块运行。

大风沙尘天气维护采用“双滤双清”模式：前置过滤

器更换周期由 30 天缩短至 7 天，滤芯精度从 $5\mu\text{m}$ 提升至 $1\mu\text{m}$ ；激光光学窗口每日进行氮气吹扫，吹扫压力维持在 $0.4 \pm 0.05\text{MPa}$ 。针对夏季高温（ $> 40^{\circ}\text{C}$ ）工况，制定热应力补偿方案：在仪表支架加装 304 不锈钢伸缩节，补偿量按 $\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$ 计算（ α 取 $16.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ），同时调整传感器标定周期，温度每升高 10°C 校准频次增加 50%。

5 结语

本研究构建的可燃气体检测系统优化方案在潼关压气站的成功应用，验证了三维覆盖模型与分级报警机制的有效性。改造工程使检测盲区减少至 1.5% 以下，系统 MTBF 提升至 15000 小时，极端天气误报率下降 78%。提出的“树状-星型”复合接地方案与双总线冗余架构，为类似环境下的站场安全监测提供了可复制的技术路径。

参考文献

[1] 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.

[2] 孙旭.超声波气体泄漏检测仪在天然气分输站场的应用[J].化工设计通讯, 2018, 44(11):1-1.

[3] 卓勇,刘宏,陈琳,等.可燃气体检测仪在终端燃气公司的应用探讨[J].石油工业技术监督, 2020, 36(4):5-5.

[4] 李黎,王一丁,李树维.红外气体检测技术在天然气安全生产中的应用[J].天然气工业, 2014, 31(1):96-99,103

[5] 王乃民,吴鑫,马思瑶,等.LNG可燃气体检测仪表选型及优化设计[J].工业仪表与自动化装置, 2019(5):3-3.