

天然气场站仪表自动化的应用

王文阳（哈密新捷燃气有限责任公司，新疆 哈密 839000）

摘要：本文围绕天然气场站仪表自动化的架构、关键技术与应用实践展开深入探讨，阐述了由现场设备层、站控系统层与调度中心层构成的分层分布式控制系统，通过对流量计量、压力温度监控、安全仪表系统及气体检测等关键自动化仪表的分析，揭示了其在提升计量精度、保障本质安全方面的核心价值。最后，本文从技术融合、系统集成、安全防护、智能运维等维度，提出了提升自动化应用水平的战略性优化路径，为构建高效、安全、智能的现代化天然气场站提供借鉴和参考。

关键词：天然气场站；仪表自动化；技术应用；优化路径

中图分类号：TE978 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）033-00100-03

Application of instrument automation in natural gas stations

Wang Wenyang (Hami Xinjie Gas Co., Ltd., Hami City Xinjiang Uygur Autonomous Region 839000, China)

Abstract: This article delves into the architecture, key technologies, and application practices of the instrument automation system in natural gas stations. It elucidates the hierarchical distributed control system, which consists of the field device layer, station control system layer, and dispatch center layer. Through the analysis of key automation instruments such as flow metering, pressure and temperature monitoring, safety instrumented systems, and gas detection, the article reveals their core value in enhancing metering accuracy and ensuring intrinsic safety. Finally, from the perspectives of technology integration, system integration, security protection, and intelligent operation and maintenance, this article proposes strategic optimization paths to enhance the level of automation application, providing references and insights for building efficient, safe, and intelligent modern natural gas stations.

Keywords: natural gas station; instrument automation; technology application; optimization path

天然气作为清洁能源的重要组成部分，其输送与分配过程的安全、高效运行对国家能源战略具有重要意义。仪表自动化系统作为场站运行的“神经中枢”，不仅实现了对关键工艺参数的实时监测与控制，更在风险预警、能效优化与设备维护等方面发挥着核心作用。本文立足于仪表自动化技术的实际应用，结合典型场景与系统架构，探索其优化路径与发展方向，以期为天然气场站建设与高质量发展提供有益借鉴。

1 天然气场站仪表的自动化控制系统架构

天然气场站作为能源输送与分配的关键节点，其仪表自动化控制系统架构与生产效率、安全性和运维成本等密切相关。现代天然气场站普遍采用分层分布式架构，通过物理层、数据采集层、控制层、通信层和管理层的协同，对现场设备和决策系统进行全流程自动化管理。从当前现状来看，天然气场站自动化控制系统按照实时性、可靠性与扩展性的原则要求，系统采用三级分层架构，即现场设备层、站控系统层和调度中心层。其中，现场设备层包含压力变送器、温度传感器、流量计等执行机构，站控系统层主要部署PLC或RTU实现本地控制与数据预处理，而调度中心层则通过冗余光纤网络整合多站点数据，实现全局监控与决策支持^[1]。为解决现场数据实时处理与云端分析的矛盾，可引入边缘计算节点，在调压站部署工业

级边缘网关，对压力、流量等数据进行本地预处理，仅将关键指标上传至云端。云端则运用云计算资源进行长期趋势分析和设备健康评估，同时通过边缘AI算法即时诊断阀门故障，将响应时间缩短至毫秒级。

2 天然气场站仪表自动化的应用场景

2.1 生产过程监控

生产过程监控是自动化仪表的核心应用场景，可对工艺参数保持实时感知，并可通过数据驱动提升生产效率提升，优化能耗系数。采用现场仪表、边缘计算、云端分析相结合的三级架构，现场仪表将压力、温度、流量等原始数据传输至边缘网关，网关对数据进行初步清洗与标度变换后，以每秒10次的频率上传至调度中心。调度中心通过组态软件构建三维工艺流程图，将进站压力、分离器液位、加热器温度等参数以动态数字、趋势曲线和颜色报警的形式直观展示^[2]。此外，生产过程监控中的仪表自动化还可根据下游用户需求预测，实时调整输气量和输气压力，避免因供需不匹配导致的输气事故。

2.2 安全风险防控

安全风险防控通过多层级监测、智能预警与应急联动，可构建形成覆盖泄漏、火灾、爆炸等全链条的安全防护网。在可燃气体泄漏的监测与定位方面，可在进站区、调压计量区、出站区等关键区域部署激光

甲烷泄漏检测仪，当某区域内管线因法兰密封失效导致微量泄漏时，立即捕捉甲烷浓度变化，并通过三角定位算法快速锁定泄漏点位置，并在 GIS 地图上标注红色警示图标。同时，自动启动关联动作，关闭泄漏点上下游阀门、开启排风系统、触发声光报警。对于火灾与爆炸风险的智能预警，则可配置红外火焰探测器，对明火或电火花进行实时监测。

2.3 设备维护管理

随着天然气场站现代化水平的不断提高，设备维护管理同样面临更高要求，而仪表自动化的应用则可通过状态监测、故障诊断与预测性维护，优化设备全生命周期成本。在轴承等压缩机关键部位安装三向振动传感器，实时采集加速度、速度与位移参数，仪表自动化系统可利用频谱分析方法识别振动特征频率，系统结合温度传感器数据，判断故障类型，并触发维护预警。基于设备运行数据与机器学习算法，仪表自动化系统还可在分析设备运行效率、维修频率与备件消耗等要素的基础上，构建预测性维护模型，辅助优化设备更新周期，同步降低单台设备全生命周期维护成本。

3 关键自动化仪表在场站中的应用分析

3.1 流量计量系统

在天然气长输管道末端、城市门站、储配站等关键节点，流量计量系统通过高精度传感器、智能算法与自动化控制技术的深度融合，可将单点测量向全流程优化方向拓展。传统机械式流量计因压损大、维护频繁等问题而在实际应用中暴露出诸多弊端，而以自动化仪表为依托的智能流量计则可完全避免上述问题。以差压式流量计为例，其可准确测量流体通过节流装置产生的压差，并快速自动计算流量，尤其适用于大口径管道。再如，超声波流量计则利用时差法测量流体流速，具有无压损、量程比宽等优势，即便在低流量工况下仍可保持 $\pm 0.5\%$ 的精度。针对天然气组分变化、温度压力波动对流量的影响，流量计量系统可通过内置的温度压力补偿算法动态修正流量值，自动调用在线气相色谱仪数据^[3]。

3.2 压力与温度监控系统

3.2.1 压力监控系统

压力波动是天然气管道泄漏、堵塞或设备故障的直接信号，基于仪表自动化的压力监控系统可采用 $\pm 0.1\%FS$ 精度的智能压力变送器，实时监测管道压力变化，预警潜在泄漏，并可设置黄色、橙色、红色三级预警阈值。通过 SCADA 系统整合压力与流量数据，识别异常工况，当压力下降但流量未同步减少时，系统判定为管道破裂，立即启动应急切断程序。同时，压力数据实时上传至调度中心，辅助降低巡检频率。

3.2.2 温度监控系统

分布式温度传感器网络是温度监控系统的核心构成部分，主要在加热炉、换热器、管道关键节点部署 PT100 温度传感器，实时监测加热器温度，确保加热后温度稳定，避免因温度过高导致设备设施损坏。针对高温高压环境，系统利用算法建立温度与压力的关联模型，当温度异常升高且压力未同步变化时，判定为设备过热，立即触发降温程序。随着物联网技术与大数据技术在本领域的融合，可将温度监控系统与压力监控系统进行深度关联，以优化驱动设备运行状态。

3.3 安全仪表系统（SIS）与紧急切断系统（ESD）

在天然气场站中，安全仪表系统（SIS）与紧急切断系统（ESD）采用高可靠性硬件、冗余逻辑控制与故障安全设计方法，构建形成从风险监测到应急响应的全流程防护体系。其中，SIS 是涵盖传感器、逻辑控制器与执行机构的完整安全系统，其核心功能是在工艺参数超出安全阈值时，触发联锁动作使设备进入预定义的安全状态。而 ESD 作为 SIS 的关键子系统，则专注于工艺流程的紧急切断，通过快速关闭阀门、停运压缩机等操作，阻止危险物质泄漏或反应失控。以某天然气场站部署的 ESD 系统为例，系统采用双电磁阀设计，主阀为故障关闭型，备用阀为气动弹簧复位型，通过压力和流量关联算法准确识别泄漏，在三秒内关闭上下游阀门，较人工操作响应时间缩短 90% 以上^[4]。

3.4 气体检测与环境监控系统

研究表明，气体泄漏与环境异常是引发天然气场站爆炸、中毒等重大事故的核心诱因。对此，可利用气体检测与环境监控系统构建防控体系，整合高精度传感器网络、物联网通信技术与智能分析算法，保障场站安全运行。传统催化燃烧式传感器存在灵敏度衰减快、易中毒的问题，而三电极结构等新型电化学传感器则凭借高精度、长寿命、抗干扰能力等优势，成为主流选择，其泄漏检测灵敏度可从 500ppm 提升至 10ppm，而误报率则可降低 80% 以上。针对酸性天然气场站，系统集成 H₂S/CO 双参数传感器，对多种不同类型气体保持协同监测，并运用交叉验证算法消除环境干扰。在实践中，已有项目尝试利用 LSTM 神经网络分析历史数据，构建气体浓度基线模型，以提高异常检测整体效能。

4 提升天然气场站仪表自动化应用水平的有效策略

4.1 推动智能传感与边缘计算深度融合

传统天然气场站自动化系统往往面临数据延迟、算力局限与安全风险等多重困境问题，而边缘计算与智能传感的融合，则可通过本地化数据处理与毫秒级响应，降低风险系数。对此，可运用标准化集成方法

在硬件层配置异构传感器，并无缝对接压力变送器、流量计等设备，实现站控系统统一接入。而在软件层，则可部署的烟火检测算法，在边缘设备上可实时分析视频流，减少现场检查次数，满足 $7 \times 24h$ 监控需求。为应对数据孤岛与标准化缺失等问题，可细化完善《燃气场站物联网数据接口规范》，要求新设备支持统一化的加密传输协议，同时部署轻量级入侵检测系统，防止多源数据融合与边缘设备安全防护等难题。

4.2 构建基于数字孪生的全生命周期管理系统

随着天然气场站自动化系统复杂性的增加，传统管理模式在应对设备老化、运维成本、系统优化等方面弊端凸显。数字孪生技术作为实现信息物理系统深度融合的重要工具，可为场站仪表自动化系统提供新的技术支撑。对此，可在项目规划和设计阶段，在数字孪生平台上进行仪表测点、管线走向和控制柜布局的三维协同设计，自动进行碰撞检测，提前发现仪表管线与结构、电气桥架的冲突，将问题消灭在图纸阶段，避免施工返工。在系统投运前，可将实际的 PLC、SIS 控制程序直接与数字孪生模型进行连接，在虚拟环境中对复杂的控制逻辑、安全联锁和紧急停车（ESD）序列进行充分的测试和验证，降低现场调试的风险和周期。

4.3 强化系统集成与数据协同能力

从以往实践来看，天然气场站各类独立运行的子系统各自拥有独立的数据源、控制逻辑和操作界面，极易形成“信息孤岛”。因此，强化系统集成与数据协同，打破壁垒，实现数据信息的无缝流动与价值挖掘，是提升场站自动化应用水平的关键所在。对此，可构建统一数据平台，整合来自不同厂商、不同协议的实时过程数据、设备状态数据、视频监控数据等，并通过数据标准化与建模，将异构数据转化为统一的信息资产。在数据平台的基础上，推动安全仪表系统与过程控制系统深度交互。当 SIS 触发报警或联锁动作时，系统不仅执行安全动作，还将事件的根本原因实时推送至 SCADA 操作界面，并自动在设备管理系统中生成检修工单^[5]。

4.4 完善网络安全与功能安全防护体系

随着工业互联网、物联网技术的深度渗透，场站仪表自动化系统面临网络攻击、数据泄露、设备失控等多重风险。实践表明，某调压站因压力变送器校准偏差导致出口压力超标，引发管道振动，直接经济损失超 500 万元。对此，在硬件安全加固中，可部署防爆型边缘计算终端，在危险区域实现本地化决策，同时构造可信执行环境，缩短控制指令认证时间，阻断非法指令。在网络层，则可利用身份认证、微隔离技

术限制设备访问权限，利用时间敏感网络（TSN）实现传感器数据低时延传输。建立设备准入白名单，要求仪表供应商提供安全芯片源码审计报告，重点对新采购的智能阀门执行器实施安全审查，拦截存在后门漏洞的设备。

4.5 优化预测性维护与智能诊断机制

传统天然气场站的设备维护往往依赖于定期预防性维护和事故后纠正性维护。前者容易导致过度维护，造成资源浪费和意外损伤；后者则意味着高昂的非计划停机成本与安全风险。随着传感器技术与数据分析能力的发展，可构建以预测性维护为核心、以智能诊断为支撑的现代化运维体系，提升场站可靠性、安全性与经济性。其一，摒弃简单的固定阈值报警，利用回归分析、长短期记忆神经网络等算法，学习设备性能的正常退化曲线，从而在性能参数即将超出允许范围之前发出预警。其二，当预测模型判定某设备需要维护时，系统应能自动在计算机化维护管理系统中生成预防性维护需求，并依据诊断结果推荐维护方案、所需工具和备件。

5 结语

天然气场站仪表自动化的应用是推动行业智能化、数字化发展的关键力量。因此，需立足天然气场站探索构建分层分布式自动化控制系统架构，实现全流程自动化管理，并引入智能传感与边缘计算技术，提升数据处理效率与响应速度，并且进一步强化系统集成与数据协同能力，完善网络安全与功能安全防护体系，优化预测性维护与智能诊断机制，推动天然气场站向更高效、更安全、更经济的方向迈进，为全球能源转型和可持续发展贡献力量。

参考文献：

- [1] 刘齐钦. 基于天然气场站液位计和数显表图像的读数方法研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2024.
- [2] 张波, 王继洋. 输气场站安全仪表的故障诊断与预警机制 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(12).
- [3] 马倩倩, 董常龙, 李光让. 数字化无人值守天然气场站建设探讨及实践 [J]. 油气田地面工程, 2024, 43(04):63-67.
- [4] 何群, 梁晓龙, 贾春龙, 等. 天然气输气站场计量仪表在线监测与智能分析系统的研究与应用 [J]. 仪器仪表标准化与计量, 2025(03):25-26+32.
- [5] 王刚. 现代天然气场站仪表自动化的应用发展趋势探讨 [J]. 价值工程, 2024(05):111-112.

作者简介：

王文阳 (1987-), 男, 汉族, 河北献县人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 天然气场站仪表管理。