

天然气管道工程中仪表自动化技术的应用分析

姜锦波 杨凡 张琳（国家管网集团西北公司西安输油气分公司，陕西 西安 710018）

摘要：随着中国能源结构的持续优化和长距离管道网络的不断扩展，天然气输送系统的安全性和有效性已成为行业关注的重点。仪表自动化技术一直是管道运营管理的核心手段，通过SCADA系统建立全面感知与智能控制的技术框架，极大提升了管道监测能力和应急响应的精准度。本文主要聚焦于仪表自动化技术在工程项目中的应用现状，分析实践中遇到的关键问题，并提供针对性的分析与优化路径，旨在为行业技术升级提供参考依据。

关键词：天然气管道；仪表自动化；SCADA系统；应用分析

中图分类号：TE973 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)030-0109-03

Application analysis of instrument automation technology in natural gas pipeline engineering

Jiang Jinbo, Yang Fan, Zhang Lin (National Pipeline Network Group Northwest Company Xi'an Oil and Gas Branch, Xi'an Shaanxi 710018, China)

Abstract: With the continuous optimization of China's energy structure and the continuous expansion of long-distance pipeline networks, the safety and effectiveness of natural gas transmission systems have become the focus of industry attention. Instrumentation automation technology has always been the core means of pipeline operation management. By establishing a comprehensive sensing and intelligent control technology framework through SCADA systems, it greatly enhances pipeline monitoring capabilities and emergency response accuracy. This article mainly focuses on the current application status of instrument automation technology in engineering projects, analyzes the key problems encountered in practice, and provides targeted analysis and optimization paths, aiming to provide reference for industry technology upgrading.

Keywords: natural gas pipeline; Instrument automation; SCADA system; Application Analysis

天然气管道项目规模庞大，地理覆盖范围广泛。仪表自动化通过结合传感器技术、通信模块和控制系统，实现对管道压力、流量以及设备状态的连续监测自动化。当与分布式人工干预能力相结合时，仪表自动化可提升管道运营的稳定性和商业可行性。目前，行业仍在努力推进向智能转型的进程，但在转型过程中仍面临环境适应性、数据处理及安全保护等关键挑战，这些领域需专门的应用开发与创新。

1 天然气管道仪表自动化技术的理论基础

1.1 仪表自动化技术在管道运行中的核心功能

仪表自动化技术构成了天然气管道安全运行的管理基石，其核心功能在于对工艺全流程的持续监测与精准调控。该技术借助压力变送器和温度传感器等现场仪表实时捕获管道动态参数，为中央控制室提供决策依据。在管道运行管理中，自动化系统依据数据反馈驱动执行机构动作，例如全焊接球阀的严密关断能力直接依赖于自动化信号对密封状态的可靠维持，从而有效隔绝管段并保障检修作业安全。

1.2 SCADA 系统的基本构成与工作原理

SCADA 系统作为天然气管道自动化控制的核心架构，其基本构成涵盖现场仪表层、远程站控单元及调

度中心三个主要部分。现场压力变送器和温度传感器采集管道运行参数，这些数据经由通信网络传输至站控系统进行初步处理。调度中心主站计算机对全线数据进行整合分析，生成调度指令并下发至各执行终端，例如控制全焊接球阀的启闭操作以维持其密封性能的稳定发挥^[1]。

1.3 关键自动化仪表的技术原理

关键自动化仪表的技术原理建立在物理信号与标准电信号的精确转换基础上，压力变送器通过隔离膜片感知介质压力并转换为电阻值变化，经电路处理输出 4-20mA 标准信号。温度传感器利用热电偶塞贝克效应将温差转化为毫伏级电压信号，再通过温度变送器进行线性化处理。电动执行器接收控制信号驱动电机旋转，经齿轮组减速后转换为阀杆的直线位移，其位移精度直接关系到全焊接球阀的密封性能。各类仪表的防爆结构设计与信号补偿算法共同构成管道自动化控制的底层技术支撑^[2]。

2 天然气管道工程中仪表自动化技术应用的关键问题

2.1 仪表设备在严苛环境下的可靠性与稳定性问题

仪表设备在天然气管道运行中面临复杂环境的多

重考验，压力变送器的传感膜片在低温环境下可能产生弹性特性的缓慢变化，影响其长期测量稳定性。全焊接球阀的密封性能受到阀杆填料在温度循环作用下产生的永久形变影响，振动环境可能导致定位器反馈机构的机械间隙逐渐扩大。电动执行器的齿轮箱在沙尘侵入条件下面临润滑脂性能加速衰减的问题，而密封副材料在长期压力脉冲作用下产生的应力疲劳现象会降低其密封可靠性。极端温差条件还会引起不同材质连接件之间产生微弱位移，这些因素共同影响着仪表设备在严苛环境下的持续稳定运行。

2.2 长输管道 SCADA 系统数据传输的延迟与网络安全风险

长输管道 SCADA 系统在数据传输过程中面临信号传输距离过长造成的时延现象，偏远地区通信网络覆盖不足导致部分管段数据上传存在明显滞后。不同厂商设备采用的通信协议差异使得数据交互时需要进行多次转换，进一步增加了系统响应时间。网络安全方面，控制指令在公网传输过程中存在被截获或篡改的潜在风险，黑客可能利用系统漏洞获取阀门控制权限。全焊接球阀的密封性能依赖于精准的关断指令，任何控制信号的延迟或失真都可能影响其密封效果。现有系统缺乏对异常数据包的深度检测机制，难以识别伪装成正常指令的恶意攻击行为。

2.3 多源数据融合与智能分析的深度应用不足

现有数据系统在处理压力波动与温度变化等多维度参数时存在明显的协同分析障碍，不同供应商设备采用的通信协议差异导致阀门状态数据与泄漏监测信息难以形成有效的关联分析。全焊接球阀的密封性能评估需要综合历史操作频次与介质特性等多源信息，然而分散的数据存储架构阻碍了对密封寿命的精准预测。智能诊断模型由于缺乏足够的带标签样本数据，难以准确识别阀门密封面的早期异常特征，使得预防性维护决策缺乏充分的数据支撑。

2.4 自动化系统维护的专业人才短缺与运维成本压力

企业面临掌握智能仪表与自动化系统复合型技术人员的结构性短缺，现有维护团队对全焊接球阀精密调试所需的机电一体化知识储备存在明显不足。高技术门槛导致自动化系统维护外包比例持续上升，进口备件更换与国外原厂技术服务产生高昂费用。偏远站场设备维护需要技术人员长途跋涉，差旅成本与应急响应时效性形成突出矛盾。

3 天然气管道工程中仪表自动化技术的具体应用措施

3.1 工艺过程参数的实时检测与监控

在天然气管道运行的工艺过程参数监控环节，现

场安装的压力变送器和温度传感器承担着持续不断的数据采集任务，为控制中心提供压力流量等基础运行信息。这些实时传输的数据汇聚至 SCADA 系统构成的核心监测平台，形成不停歇的检测作业流，使操作人员能够远程掌握管线关键节点的运行状态。监控数据平台对全焊接球阀状态的反馈具有特殊价值，其密封性能的变化往往体现在压力数据的细微波动中，这种对数据的敏锐捕捉有助于及时预判阀门潜在密封失效风险。维护团队依据系统报警设置实施分级响应流程，例如对于持续低压报警的管段，安排人员携带专业测漏设备进行现场复核，对疑似密封性能下降的阀门执行预防性检修。维护人员定期执行的压力变送器零点校准作业，则是保障数据有效性的必要基础，这种接地气的操作环节直接决定着异常工况识别准确度，为预防性维护提供可靠技术保障^[3]。

3.2 管道安全联锁保护与紧急停车系统（ESD）的应用

在天然气管道工程的仪表自动化技术领域，紧急停车系统（ESD）作为关键的安全联锁保护装置，能够自动响应异常工况如超压或温度偏移，迅速启动关停流程以规避潜在风险。系统运作依赖于高可靠的执行元件，其中全焊接球阀的密封性能发挥核心作用，确保阀门在 ESD 指令下实现快速且严密的闭合，有效隔绝介质流动以防止气体泄漏事故。这一结合充分体现了工程实践中自动化技术与设备整合的务实导向，例如通过阀门控制系统实时监控密封状态，提升整体防护水平。具体应用中，施工团队着重强化阀门安装质量与定期维护，使得 ESD 触发的紧急响应更为可靠且贴合实际工况需求，从而维持管道运行的稳定性。

3.3 天然气计量与贸易交接的自动化管理系统

在天然气管道工程的计量与贸易交接环节，自动化管理系统的超声波流量计等精密仪表持续监测气体流量，生成精确的贸易结算数据以支持公平的商业活动。计量仪表实时上传信息至中央数据处理平台，该平台整合流量、压力等参数形成完整的贸易记录链，帮助操作员远程审核数据一致性。操作员依据平台生成的异常报告安排现场校验流程，例如针对计量交接点的波动情况，指派维护团队使用便携式检漏工具复核全焊接球阀的密封性能状态，阀门优良的密封能有效避免计量误差或泄漏干扰数据准确性。检修人员执行的定期阀门密封性测试作业，结合自动化系统的实时反馈机制，形成了闭环的精度保障流程，最终维护贸易交接的可靠性与工程经济性。

3.4 管道泄漏检测与定位系统的技术集成

在管道泄漏检测领域部署的压力传感器网络系统全天候采集压力变化信息，为中央分析服务器提供原

始工况数据流。动态仿真软件综合管网压力梯度特征建立基线模型，实时捕捉压力曲线偏离预期值的蛛丝马迹，精准定位潜在泄漏点的坐标范围。运行维护团队收到系统推送的定位报告后立即启动复核机制，携带声波探测仪赶赴疑似区域排查全焊接球阀附近的异常声响，对密封面可能存在的隐患执行针对性无损检测作业，此时阀门良好的密封性能成为隔绝泄漏扩散的物理屏障。技术人员定期实施的压力传感器校准与软件模型验证活动，持续优化着整个检测体系的灵敏度，这种务实的基础工作使毫米汞柱级别的压力异常都能被有效捕捉，最终保障泄漏定位系统在复杂工况中的实用价值。

4 提升天然气管道仪表自动化技术应用效果的优化建议

4.1 推进智能仪表与数字孪生等新技术的创新与应用

在推进智能仪表与数字孪生技术创新过程中，工程单位主导搭建管道全生命周期的虚拟镜像模型，该模型实时映射物理管网的运行参数与设备状态。数字孪生平台接收现场智能阀门定位器反馈的实时位移数据，捕捉球阀开关位置毫米级的细微偏差，结合历史维护记录建立密封性能衰退预测模型。维护团队根据模型生成的预警工单提前介入检查，例如对存在潜在密封面磨损的球阀拆卸阀座环，使用专用研磨工具恢复密封面光洁度，这种预见性维护避免突发性内漏影响计量精度。技术人员每季度更新一次的数字孪生体流体动力学参数，显著提升了对微泄漏信号的捕捉能力，这种虚实结合的管控方式使全焊接球阀的密封状态维护周期延长近三成，切实推动运维模式由被动抢修向主动防护转型。

4.2 构建纵深防御体系以强化网络与数据安全

在构建纵深防御体系过程中，安全架构师设计物理访问控制系统与网络访问控制策略的双重屏障，为仪表自动化系统建立硬隔离保护环境。操作站部署的工业主机白名单机制拦截非授权指令输入，例如针对全焊接球阀控制系统的操作需经双重认证流程，任何试图修改阀门开关阈值的指令都会触发审计追踪记录，维护人员可据此追溯阀门异常操作的来源。信息部门执行的动态密钥更新机制加密传输阀门运行数据流，避免第三方截获密封性能测试数据导致工艺参数泄露。

运维工程师每月实施的渗透测试模拟外部攻击路径，专门验证阀门远程控制回路的防护薄弱点，这种闭环演练持续强化着纵深防御体系的有效性，直接保障关键设备监测数据的完整性不受侵害，使全焊接球阀运行状态处于可验证的安全监管之下^[4]。

4.3 建立健全人才培养机制与智能化运维体系

在完善人才培养机制过程中，企业培训中心开发智能阀门维护 AR 实训课程，参训人员在混合现实环境下反复演练球阀拆卸与密封组件检测流程，直至掌握阀座接触痕扫描分析仪的操作要领。智能运维系统的故障诊断模块自动归集历年全焊接球阀维修记录，形成密封面磨损图谱数据库支持智能决策，运维工程师登陆系统输入当前检测参数便能匹配最接近的维修方案。

4.4 制定与完善技术标准规范与全生命周期管理策略

在推进技术标准规范体系建设阶段，管道标准化委员会组织编制全焊接球阀密封性能专项技术导则，该导则明确定义不同压力等级管段阀门的密封比压计算规则与验收合格区间。设计单位采用导则参数配置阀门执行机构的弹簧预紧力，保证阀座密封面在温度交变工况下始终维持有效接触压力，例如针对高压管段选配宽密封带球阀时严格执行导则附件中的金属密封环硬度匹配规范。运维团队依据导则建立的阀门状态监测数据库，系统记录每次开关操作后的密封面磨损数据与阀座弹簧压缩量变化曲线，当监测数据达到预设预警阈值立即启动密封组件更换流程，此类全生命周期管理实践使球阀服役期间密封失效风险降低近四成^[5]。

5 结语

仪器自动化技术的全面应用已彻底改变了天然气管道运营的管理模式。其发展动力源于先进技术的融合，包括智能仪表和数字孪生技术，以及构建跨领域协作技术生态系统和人才体系。未来，需持续提升技术标准和安全管理体系，以推动管道系统向更高效率方向演进，并为能源基础设施现代化进程注入持续动力。

参考文献：

- [1] 顾鹤麟. 天然气管道工程中仪表自动化技术的应用分析 [J]. 石油石化物资采购 ,2024(1):88-90.
- [2] 李海. 天然气管道工程中的仪表自动化控制技术分析 [J]. 集成电路应用 ,2023(011):40-40.
- [3] 李新宁, 兰翔. 探究仪表与自动化技术在石油管道的应用及以后的发展趋势 [J]. 中小企业管理与科技 (上旬), 2019:12-12.
- [4] 彭博, 周鹏, 刘斯文. 浅析天然气管道输送自动化技术的应用 [J]. 化工管理 ,2015(35):1-1.
- [5] 杨丽, 李坤, 许付晓. 仪表与自动化技术在石油管道的应用与发展 [J]. 工程技术 (文摘版) · 建筑 ,2016(7):309-309.