

天然气集输管道常见自动化仪表的安全可靠性分析

杨 凡 张 琳 姜锦波（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：天然气集输管道作为能源输送的核心载体，其安全高效运行依赖自动化仪表的精确监控与控制能力。管道系统涵盖井口采集、集气站处理、长距离输送及终端分配等环节，传输过程伴随高压、腐蚀性介质及复杂工况波动。自动化仪表需在持续运行中维持测量准确性，任何功能失效均可能触发工艺失衡或安全事故。研究仪表安全可靠性问题，需系统性分析设计选型、环境适配、维护策略全周期要素，为复杂工况下的稳定控制提供理论支撑与实践依据。

关键词：自动化仪表；安全可靠性；天然气集输管道；评估方法

中图分类号：TE973 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)032-0163-03

Safety and reliability analysis of common automation instruments in natural gas gathering and transportation pipelines

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

Abstract: As the core carrier of energy transmission, the safe and efficient operation of natural gas gathering and transmission pipelines relies on the precise monitoring and control capabilities of automated instruments. The pipeline system covers various stages such as wellhead collection, gas gathering station processing, long-distance transportation, and terminal distribution. The transmission process is accompanied by high pressure, corrosive media, and complex operating conditions. Automated instruments need to maintain measurement accuracy during continuous operation, and any functional failure may trigger process imbalance or safety accidents. To study the safety and reliability issues of instruments, it is necessary to systematically analyze the design selection, environmental adaptation, and maintenance strategy elements throughout the entire cycle, providing theoretical support and practical basis for stable control under complex working conditions.

Keywords: automation instruments; Safety and reliability; Natural gas gathering and transmission pipelines; evaluation method

现代天然气集输体系通过分布式仪表网络实现全流程监控，仪表安全可靠性直接影响管道运行风险等级。仪表自身设计缺陷可能造成量程覆盖不足或抗干扰能力薄弱，外部环境中的极端温湿度、机械振动与电磁干扰加速性能退化。人为因素中的安装偏差、维护疏漏进一步扩大故障影响范围。现有评估方法需融合失效机理分析与动态数据建模，构建覆盖仪表全生命周期的可靠性保障机制。科学应对多维度影响因素，可显著降低非计划停产与安全事故发生概率。

1 天然气集输管道与自动化仪表概述

1.1 天然气集输管道系统简介

天然气集输管道系统构成天然气开采、初步加工及输送的核心脉络，起始于分布广泛的油气井口装置，将不同气井产出的含杂质原始天然气进行物理汇集。这些未经处理的天然气通过连接管网流向区域性的集气站，在集气站内主要实施气液初步分离和必要的简单增压操作，以满足后续运输的基本压力需求。经集气站初步处理的气流随后汇入天然气处理厂，在处理厂复杂的工艺单元中气体经历深度净化，最终完成净化的商品天然气注入长距离大口径主干输气管道，依

靠压缩机站提供的输送压力能源源不断地向城市门站、大型工业用户或储气库进行长途稳定输送，严格遵循设计的压力、流量参数保障供应安全。整个系统环节紧密衔接环环相扣，要求极高的密闭性和运行连续性，承载着将分散资源转化为可用清洁能源的责任链条^[1]。

1.2 常见自动化仪表类型及作用

1.2.1 流量仪表

天然气流量数据的准确获取关乎贸易交接与工艺调节的根本需求。孔板流量计借助标准节流件产生压差换算流量，在稳定工况中保持经济实用优势。涡轮流量计依靠转子转速与流速的正比特性实现动态响应，适用中高压洁净气流的高精度计量场景。超声波流量计利用声波在介质中的传播时差原理，非接触式测量特性避免流阻损失，尤其适合大口径管道贸易结算。多声道设计有效克服流场分布不均的干扰，其双向计量能力对调峰管道具有独特价值。电磁流量计虽在气态介质中受限，却在管道积液监测环节提供关键液量数据。

1.2.2 压力仪表

管道承压状态的实时监控构成系统安全的核心防线。机械式压力表通过波登管形变驱动表盘指针，提

供现场快速巡检的直观参照。压力变送器将膜片感应到的压力信号转化为标准电流输出，成为控制系统获取压力数据的神经末梢。智能型产品集成温度补偿与自诊断功能，显著提升极端工况下的数据可信度。扩散硅传感器凭借卓越的稳定性，在压缩机出口振动区域展现独特优势。安装于管道关键节点的压力安全联锁装置，直接触发截断阀动作避免超压事故，其响应速度与可靠性指标具有不可替代的价值。

1.2.3 温度仪表

介质温度变化直接影响气质组分与设备效率。热电偶利用塞贝克效应产生的热电动势，在-200℃至1800℃宽量程内捕捉温度瞬变，适用于燃烧器监测等高温场景^[2]。铂电阻温度计（RTD）依靠金属电阻随温度变化的线性特征，在-200℃至650℃范围提供更优精度，成为分离器、脱水塔等核心设备的首选。安装位置设计需避免阀门节流引起的虚假温升，传感器护套材质选择必须考虑硫化氢腐蚀影响。无线温度监测系统的推广，正逐步解决架空管道测点布线困难的实际问题。

1.2.4 液位仪表

气液分离设备的界面控制决定处理效果与设备安全。磁翻板液位计通过磁性浮子驱动双色指示器，为操作人员提供罐体液位的物理可视依据。雷达液位计向液面发射微波并接收回波，非接触测量彻底解决粘稠介质挂料导致的误判风险。差压变送器通过计算液相静压换算液位高度，其毛细管填充液选择必须与介质化学特性兼容。高液位联锁与低液位保护的双重配置，防止分离器气体带液或泵设备空转损伤。射频导纳技术对界面乳化层具有卓越识别能力，在三相分离工况彰显特殊价值。

2 自动化仪表安全可靠性影响因素分析

2.1 仪表自身因素

设计阶段的原理验证缺失可能导致量程冗余不足，超限工况下传感器永久损坏。核心传感元件材质抗硫化物应力腐蚀能力不足时，高压含硫天然气长期接触诱发晶间裂纹。微处理器板卡焊点虚接在机械振动场景下逐步扩大接触电阻，信号漂移程度与运行时间呈现正相关趋势。转子轴承润滑脂高温碳化增加涡轮流量计转动阻力，流量示值偏差超过允许范围。电子元件老化速率随环境温度升高呈指数增长，集成电路板漏电流累积干扰信号采集精度。隔离膜片长期承受脉动压力产生金属疲劳，压力变送器零点输出发生不可逆偏移。

2.2 外部环境因素

寒带地区零下45℃极低温环境致使润滑脂凝固，

调节阀执行机构动作延迟触发工艺联锁。压缩机房持续低频振动造成接线端子松脱，温度变送器间歇性断线引发虚假高报。雷击感应电压沿电缆窜入控制回路，安全栅保护电路设计余量不足导致主板烧毁。海洋环境盐雾渗透腐蚀电位端子，热电阻测量回路阻值异常升高。高含砂天然气长期冲刷节流装置锐缘，孔板开孔边缘产生可见磨损凹坑影响流出系数准确性。强电磁场干扰超出仪表屏蔽层设计规格，流量信号出现周期性毛刺波动。

2.3 人为因素

安装过程中垫片未对准产生附加应力，差压变送器高低压室密封失效。组态软件参数设置界面量程单位混淆，导致控制系统读取压力值放大十倍。维护规程未明确智能阀门定位器零位校准周期，长时间运行后定位精度持续衰减。防爆接线盒密封圈更换选用普通橡胶材质，硫化氢渗透引发接线柱腐蚀短路。应急维修时未对电磁流量计电极阻抗测试匆忙复位，相同故障两周后重复发生^[3]。培训教材未涵盖新型超声波液位计声速补偿设定要点，操作人员习惯性沿用旧设备设置流程产生液位虚高。

3 自动化仪表安全可靠性评估方法

3.1 定性评估方法

故障模式与影响分析（FMEA）系统梳理仪表各组件可能出现的失效形态，详细记录每种失效对测量功能产生的具体后果，依据严重程度与发生频率制定优先级排序清单。该方法特别关注单一元器件失效引发连锁反应的场景，例如温度传感器信号断路导致加热炉联锁误触发。故障树分析（FTA）运用布尔逻辑符号构建从顶事件到底层原因的树状因果链，清晰展示压力安全阀拒动与执行机构卡涩、电磁阀失电之间的逻辑关联。

3.2 定量评估方法

可靠性数学模型中失效率 $\lambda(t)$ 的积分运算得出仪表在指定周期内的存活概率，威布尔分布函数的形状参数可精准描述不同寿命期的故障特征。历史运行记录统计显示，过滤减压装置膜片平均无故障工作时间（MTBF）可达七年，而振动环境中的接线端子 MTBF 不足三年。蒙特卡洛模拟在计算机中重现十万次虚拟运行过程，输出智能变送器十年使用周期内的故障概率分布云图。贝叶斯网络将仪表老化程度、环境腐蚀速率、维护频次等多源信息纳入动态评估，修正单纯依赖静态手册数据的局限性。考虑多台超声波流量计并联运行的实际冗余设计，马尔可夫模型准确计算贸易计量系统整体可用性指标。

3.3 综合评估方法

模糊层次分析法（FAHP）将运维人员对电磁干

扰严重性的主观评价转化为定量权重，科学平衡变送器屏蔽层厚度和接地电阻值改进措施的投入效益。将定量评估得出的故障率数据导入原始 FTA 模型，重新校准减压阀弹簧疲劳断裂这一底层事件的概率参数。基于状态的维护（CBM）策略依据在线监测的振动频谱特征动态调整阀门定位器校准周期，避免固定周期保养造成的过度维护或维护不足。RCM 逻辑决断图整合关键性分析和故障后果分类成果，区分流量计传感器必须实施预防性更换与允许运行至失效的两类部件管理策略^[4]。

4 提高自动化仪表安全可靠性的措施

4.1 仪表选型与采购

材质兼容性审查必须覆盖介质中硫化氢与二氧化碳分压指标，高压变送器隔离膜片优先选用哈氏 C-276 合金保证耐蚀余量。冗余配置原则要求关键流量计量回路并联安装两套独立测量系统，变送器供电线路取自不同母线段消除单点失效风险。防爆等级认证需匹配实际区域划分，压缩机房 1 区环境选用 Ex d IIC T4 组别隔爆型产品。量程上限设定考虑瞬态冲击压力保护，节流装置计算书审核验证常用流量点处于 β 值推荐区间。历史故障数据库显示振动环境仪表优先采用压阻式而非电容式传感原理，采购技术协议明确规定润滑脂适用温度下限匹配当地极端气候。

4.2 安装与调试

压力变送器取压口方位设计规避冷凝液积聚，测量气体流量时取压管沿工艺管道向上倾斜 15 度。电缆屏蔽层在控制室单端接地避免地回路干扰，本质安全回路与非本安线路分槽敷设保持 300mm 物理间隔。调节阀安装后行程测试包含阶跃响应曲线记录，定位器初始设置参数覆盖阀芯特性与执行机构气缸容积匹配。流量计前后直管段长度严格满足前 10D 后 5D 最低要求，存在涡流风险位置加装整流器消除流速分布畸变。回路完整性验证使用精确度优于 0.01% 的过程校验仪施加标准信号，调试报告必须包含 24h 零点漂移测试数据。

4.3 运行与维护

预测性维护体系依据振动分析图谱调整轴承润滑周期，超声波检漏仪每季度扫描阀门填料函逸散排放点。校准计划结合漂移趋势动态优化，贸易交接用超声波流量计实施在线比对误差超过 0.2% 时启动离线标定。冬季来临前全面检查仪表伴热回路电流值，电伴热系统绝缘电阻测试结果低于 50 兆欧立即更换加热元件。备件仓库执行三级分类管理，安全联锁阀电磁线圈等 A 类备件保持双库存量。维护工单闭环管理要求故障处理后 72h 内补充根本原因分析，同型号温

度计套管开裂事件需修订检测规范增加壁厚测量项。

4.4 环境防护

热带地区控制系统机柜配置双制冷回路空调，内部温度维持在 $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 降低元器件老化速率。雷击高发区信号回路安装多级防雷栅，三级防护电路设计包含气体放电管、压敏电阻与 TVS 二极管协同作用。海岸区域仪表箱体选用 316L 不锈钢材质，箱门密封条每年更换一次防止盐雾渗透腐蚀电路板。振动超过 5mm/s 区域采用液压抗震支架固定变送器，电缆进线口配置防振格兰头消除应力传递。强电磁环境优先选择 4 ~ 20mA+HART 通讯而非现场总线协议，关键信号线穿壁厚 2mm 镀锌钢管并实施连续电气贯通。

4.5 人员培训与管理

岗位能力矩阵明确要求安全仪表系统维护人员取得 TÜV 功能安全工程师认证，实操考核包含实际搭建紧急切断逻辑回路。仿真培训平台植入调节阀膜片破裂、热电阻导线短路等典型故障场景，强化应急处置肌肉记忆。作业许可制度规定在运行的流量计本体操作必须申请工艺隔离票，涉及联锁保护修改需经总工程师签署授权文件。交接班记录本设置仪表隐性缺陷专项栏，压力表指针卡涩等轻微异常强制书面交接。技术台账推行电子化知识图谱管理，检维修经验与制造厂技术通告自动关联至对应设备档案^[5]。

5 结语

提升自动化仪表安全可靠性需贯穿设备全生命周期管理流程。仪表选型需严格验证材料兼容性与环境适应性，安装过程遵循防干扰布线规范与调试标准。运行阶段建立基于状态监测的预测性维护体系，校准周期依据实际漂移特性动态优化。极端环境实施差异化防护策略，人员资质管理结合情景化培训与责任追溯制度，技术档案推行故障模式与改进措施的闭环管理。持续优化设备管理流程与技术防护手段，方可实现天然气输送本质安全目标。

参考文献：

- [1] 张永华. 天然气集输常见自动化仪表的安全可靠性分析 [J]. 当代化工研究, 2024,(16):122-124.
- [2] 赵妍, 王鑫, 马克远. 仪表自动化技术在天然气管道工程中的应用 [J]. 化工管理, 2025,(19):90-93.
- [3] 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, 2023,40(11):60-61.
- [4] 任丽颖. 自动化仪表在天然气行业中的应用分析 [J]. 中国设备工程, 2022,(18):201-203.
- [5] 张忠楠. 自动化仪表在天然气行业中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021,41(01):154-156.