

天然气管道输送自动化技术研究

马 阳 (中国石油化工股份有限公司华北油气分公司采气一厂, 河南 郑州 450000)

摘要: 天然气管道输送自动化技术正从单一的监测控制向智能感知、自主优化及数字孪生驱动的智能系统快速迈进, 高精度监测体系的构建使得泄漏与压力变化等关键运行参数可实时获取, 智能控制系统显著提高了压缩机群、调压阀门及站场设备的协同调节效率, 统一的调度平台通过多源数据融合与工况仿真实现跨区域的预测性调度, 数字孪生与人工智能的深度融合进一步推动输送系统实现前馈调控与滚动优化。本文主要对天然气管道输送自动化技术研究现状及应用策略进行了分析, 从而为保障我国天然气管道的输送效率和输送安全奠定基础。

关键词: 天然气管道; 管道输送; 自动化技术; 研究现状; 应用策略

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 035-0120-03

Research on Automation Technology for Natural Gas Pipeline Transportation

Ma Yang (No.1 Gas Production Plant, North China Oil & Gas Company, SINOPEC, Zhengzhou Henan 450000, China)

Abstract: Automation technology for natural gas pipeline transportation is rapidly evolving from simple monitoring and control towards intelligent perception, autonomous optimization, and digital twin-driven smart systems. The establishment of a high-precision monitoring system enables real-time acquisition of key operational parameters such as leaks and pressure fluctuations. Intelligent control systems significantly enhance the coordinated regulation efficiency of compressor groups, pressure-regulating valves, and station equipment. A unified dispatching platform achieves cross-regional predictive scheduling through multi-source data integration and operational condition simulation. The deep integration of digital twins and artificial intelligence further promotes feedforward control and rolling optimization of the transportation system. This paper analyzes the current research status and application strategies of automation technology in natural gas pipeline transportation, thereby laying a foundation for ensuring the efficiency and safety of China's natural gas pipeline operations.

Keywords: Natural gas pipeline; Pipeline transportation; Automation technology; Research status; Application strategies

随着我国能源结构持续优化以及天然气在终端用能结构中比重的不断提升, 长输天然气管道网络规模快速扩张, 跨区域和超长距离成为新型管网体系的重要特征, 传统依赖人工调控及分散式管理的运行模式已难以满足现代天然气输送过程中对于实时性和经济性的要求^[1]。自动化和智能化技术的深度融合正驱动天然气管道行业进入以感知全面化和控制协同化为核心的新阶段, 管道输送自动化研究与应用因此成为油气储运领域的重点方向。在此背景下, 本研究以天然气管道输送自动化技术为核心, 对输送自动化技术的研究现状和应用策略分别进行深入分析和研究, 为推动长输天然气管网的安全稳定运行奠定基础。

1 天然气管道输送自动化技术概述

天然气管道输送自动化是指在管道运输过程中全天候地利用先进传感监测仪器和方法以及信息决策单元, 根据实时监测信息并自主在线优化, 最终实现天然气管道输送全过程安全、经济、稳定运行, 并用最少的人为干预实现输送工况的安全、高效运行。天然气管道输送自动化是现代油气储运的关键技术之一,

一般分为三层, 分别是现场感知与执行层、过程控制层、监控与管理层。

天然气管道通过这些技术的运用, 实现天然气管道输送过程的连续在线监控和输送能效优化等, 从而减少人为操作和判断的误差, 提高调控的准确度和稳定性。随着分布式光纤监测和大数据技术的发展, 自动化系统的监测维度从点式监测发展为连续化和分布式监测, 实现了管道振动和温度应变等参数的高频率和长距离连续探测, 为管道输送自动化的调控部分提供了精准的数据支持^[2]。

天然气管道输送自动化除了包括监控、调节、反馈的基本控制链, 还包括其他功能, 如能效管理和应急联动等, 逐渐呈现出从自动化向智能化演进的趋势。在传统自动化阶段, 一般利用 SCADA 系统平台实现集中监控和参数调节, 如管输压力的自动调节、阴极保护系统电位的自动保持等。而随着人工智能算法和数字孪生技术的发展, 自动化系统的逐渐自学习和自适应能力, 例如基于机器学习的预测模型可以对管道压力波动和压缩机能耗状况进行预测, 实现输送调度

的前馈调节；基于数字孪生的虚拟管网实现管网仿真和优化，将工况在异常发生前提供最优的控制策略。在应急中，自动系统通过实时数据融合和联动控制实现泄漏快速定位和阀站自动切断，从而缩短时间和减少事故的影响。

2 天然气管道输送自动化技术研究现状分析

天然气管道输送自动化技术的研究在国内外均已形成较为系统的技术体系和实践基础，但发展阶段和重点方向存在一定差异。从国外研究现状看，欧美等天然气管网相对成熟的地区较早完成了管道自动化和遥测系统的建设，围绕监控与数据采集、远程终端、智能阀站及压缩机自动控制等方面开展了系统研究，并在长输管道及跨国管网中实现了大规模应用。

相关研究重点集中在三个方面，首先是提升管道运行状态的高精度感知与远程监控能力，通过完善传感器体系和数据采集结构，实现压力和流量等多参数的实时监测，并利用报警模式识别和变化率组合等方法实现输气管道破裂与泄漏的快速识别和响应，从而显著提高运行安全性和可靠性。

其次是构建开放式和可扩展的 SCADA 架构，将现场仪表和安全系统进行一体化集成，支持跨区域和长距离管网的集中调度与分级控制，部分研究已经将云平台 and 工业互联网理念引入管道 SCADA 系统，以降低运维成本并提升系统弹性与扩展能力^[3]。

最后是探索人工智能和物联网技术在管道自动化中的深度应用，利用机器学习和模式识别开展能耗优化及故障诊断，利用 AI 对油气与氢气等多能源输送过程进行全生命周期智能管理，以及在偏远地区构建基于物联网与开源 SCADA 的远程站控系统，以提高自动化系统的智能化水平和经济性。由此可见，国外在天然气管道输送自动化方面已经从监控与控制阶段逐步迈向智能感知到自适应控制的综合智能化阶段，研究更强调跨学科技术的集成应用和系统级可靠性评估。

同时，国内天然气管道输送自动化研究起步略晚，但在国家管网规模快速扩张和西气东输等重大工程以及碳达峰和碳中和战略的推动下，近年来发展速度很快，已基本完成从局部自动化向全线自动化以及再向网络化监控与调度的演进。国内研究普遍以长输管道 SCADA 系统为核心，围绕自动控制与通信标准体系以及集中监控平台建设和统一调度系统架构展开，强调通过一个标准体系和一个平台的建设目标，实现多条干线和多区域管网的统一监测和一体化调度^[4]。另一方面，伴随我国天然气管道网络向全国一张网格局发展以及数字化转型的推进，学术界和工程界正在将自

动化研究从传统 SCADA 层面扩展至数字孪生管网以及智能调度优化等场景下的快速评估与联动控制，关注点逐步由单一安全监控拓展到网络结构优化和绿色低碳运行等多维目标。

由此可见，国内研究在大规模管网集中调度以及与国家能源安全方面形成了自身特色，但在高端传感装备以及自主可控的开放式 SCADA 平台等方面仍有较大提升空间。未来国内天然气管道输送自动化技术研究将更加重视与人工智能和能源系统综合优化的深度融合，逐步由自动化运行迈向智能化运营和自主优化决策，以支撑我国天然气管网的高质量发展和能源体系的安全与高效运行。

3 天然气管道输送自动化技术应用策略研究

3.1 构建多维度高精度感知体系

随着天然气长输管网的逐步延伸和工况条件的日趋复杂，管道及站场运行状态监测对自动化系统的迫切需求日益提升，首先应在全线以及关键地点部署综合感知设施，应用常规仪表和新型技术，实现多物理量、多维度的连续性监测。采用分布式光纤沿线布设，可提供米级乃至亚米级空间分辨率的泄漏识别能力，对冲击振动和土体扰动等异常信号进行捕捉，高频率压力传感器和流量计可形成压力波诊断基础，为管道破裂和水合物堵塞的识别提供参数依据。在站场内部署智能化设备状态监测子系统，包括压缩机组数据采集终端、智能电源保护单元，通过边缘计算单元将多源数据融合预处理，从而减轻通信负担、提升异常识别效率^[5]。

3.2 建立智能化自动控制体系

自动化的本质是对输送参数的控制，因此应建立由智能控制器和执行机构构成的控制系统，实现站场和全网层面的控制。在站场层面，应实现站场压缩机的自动启停和调压系统自动控制等基本功能，引入和应用模糊控制、模型预测控制等先进控制算法，提高调节响应速度和稳定性。在管段层面，可以基于压力流量动态分布方程，引入基于摩阻变化的流态识别算法，实现不同输送工况下的自动调节，例如根据昼夜用气峰谷与输送压力级数间的对应关系，实现自动调整输送压力级差^[5]。

还可以建立跨站场的联动控制，将站场压缩机群运行策略和干线阀门连锁相结合，进行多目标优化，对能耗和压力稳定性进行综合优化，实现全网范围内的能源利用最优和工况稳定。自动控制系统还应具备在极端事件或异常情况下，自动控制系统的应急逻辑切换和阀门自动切断、电源冗余快速切换的能力，保证系统安全性。

3.3 推进调度管理平台的构建与智能化升级

我国天然气管网处于跨省跨区互联互通和多气源、多气向并存的情况下，采用站场级控制已难以适应管网整体调度运行的需要，因此需要建设统一的自动化调度系统，实现对多条干线和用户负荷端的集中统一调度。

基于 SCADA 系统的数据采集和传输特性，该调度系统应集成了 GIS 管线图、输气仿真模块等子系统，通过模型推演实现对若干小时乃至数天后压力、流量变化趋势的模拟，调度人员可依据模拟结果前置调整压缩机的启停顺序以及跨区域输量协调等管理策略，还可以建立针对异常工况的智能调度模式，例如使用基于机器学习的故障分类模型实现泄漏类型的自动辨识，并推荐最优调控策略，通过自动化的联动指令实现区域隔离并调整其他区域的负荷分配。对于大型管网且有多个气源输入的管网，还可以建立优化调度算法，基于不同气源的价格指标以及能耗指标对输气路径进行优化选择，从而兼顾经济性和安全性。

3.4 加强自动化系统的安全防护与可靠性设计

天然气管道输送通常以高压长输管道为主，自动化系统涉及的场景多且跨度大，对系统的安全性和可用性要求极高。首先，从硬件上考虑双电源输入、双通信链路等多级冗余，确保单一故障不影响系统基本功能，在通信网络层面，采用网络层面冗余、加密传输、工业入侵检测系统、工业防火墙等措施，防止恶意攻击造成调度系统不可用。采用异常特征和设备健康模型等方法，建立智能诊断子系统，实现自动化设备的健康监测，如压缩机轴承的高频振动、阀门执行机构的行程卡阻等，对沿线管段，结合地质灾害、地震等系统，建立多部门的联动控制，实现复杂外部环境大跨度变化时，自动调整工况。通过全生命周期构建基于安全管理体系的可防御和可恢复的高韧性管道自动化系统，将自动化系统的架构到更新全部纳入可靠性管理中。

3.5 推动自动化技术和智能化算法与数字孪生平台深度融合

在新一代信息技术推动下，天然气管道自动化技术将从单一自动控制，向智能化、自主化技术发展，通过引入数字孪生技术，建立虚拟管网，将状态监控数据、设备模型等信息对映到虚拟管网中，从而在虚拟管网中进行工况仿真和风险预测，通过工况波动、峰谷气量变化等工况条件，数字孪生平台可提前模拟多种调度策略带来的影响，给出最优调度策略，通过机器学习等方法建立智能预测模型，例如压力波动前馈预测、第三方破坏预测等，并将预测结果自动输入

自动控制系统，实现预测性控制和滚动优化，随着模型不断通过学习历史数据进化，系统可逐步具备自适应能力，实现从规则控制到智能控制的转变，此外还可通过人工智能实现输气调度优化、能耗最小化控制等，实现自动化与智能化深度融合的输送体系。

3.6 构建全生命周期自动化运维生态体系

在天然气管道输送自动化不断深化的背景下，未来的技术应用不仅需要依赖设备层面的监控与控制，更需要构建贯穿规划到更新的全生命周期自动化运维生态体系，实现管网运行模式从传统管理型向协同型全面升级。应在管道建设阶段就纳入自动化系统的顶层设计，将站场自动化及后期智能运维手段统一规划，避免传统先建设和再接入的割裂式模式。这种前置式设计可根据管道类型和区域特征制定差异化自动化配置方案，从根本上提升系统融合度与运行效率。应在运行阶段推进自动化和业务流程的深度整合，通过将调度指令流和应急响应流统一纳入自动化平台，实现调控中心与监测人员之间的信息同步和流程闭环，使调控从以人为中心转变为以数据为驱动和以系统为纽带的协同运行模式。

4 结论

综上所述，我国天然气管网已具备从传统自动化向智能化全面升级的技术基础，随着多维度感知技术、智能控制算法、数字孪生平台及智能调度系统的逐步成熟，天然气管道运行的可视化程度、安全性和能效水平显著提升，管网调控模式也逐步从分散式管理向协同优化和预测性调度转变。同时，我国需要在系统集成和智能算法研发等方向持续推进，以实现管网运行的智能化与高韧性。

参考文献：

- [1] 刘凯. 天然气管道输送自动化与控制技术研究 [J]. 化工设计通讯, 2022, 48(10): 171-173.
- [2] 苟亚军. 天然气管道输送中自动化技术的应用 [J]. 化工管理, 2022, (30): 56-58.
- [3] 温强. 探析天然气管道输送自动化技术的应用 [J]. 石化技术, 2022, 29(04): 255-256.
- [4] 张盼, 王江超. 天然气管道输送自动化技术的运用及研究 [J]. 当代化工研究, 2021, (17): 73-74.
- [5] 刘逸龙, 张岩, 王强. 关于天然气管道输送自动化技术的应用探析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2016, 36(21): 58-59.

作者简介：

马阳 (1989-), 男, 汉族, 陕西子洲人, 大学本科, 工程师, 从事石油天然气开发工作。