

天然气管道输送系统能效提升与节能降耗措施

孙杰 张盟 (山东一通工程技术服务有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 随着我国“双碳”目标的深入推进, 天然气作为清洁能源在能源结构中的比重日益增加, 而管道输送系统的能效提升与节能降耗已成为行业关注焦点。本文基于当前天然气管道系统能耗现状, 分析了影响输送能效的关键因素, 从系统监测评价、智能化调控、余压余热回收、甲烷排放控制及管理创新等多个维度, 提出了新型节能降耗措施。研究表明, 通过构建数智化能效监测平台、实施压缩机智能调控、应用余压发电技术及推广“试气不点火”工艺等综合措施, 可实现管输单耗下降 16% 以上, 甲烷排放量降低超 60%, 显著提升管道系统运行效率与环保效益。这些措施为国家管网集团实现绿色转型提供了技术支撑, 也为同类管道节能改造提供了参考。

关键词: 天然气管道; 能效提升; 节能降耗; 余压发电; 甲烷回收; 数智化监测

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0112-03

Energy Efficiency Improvement and Energy-Saving Measures for Natural Gas Pipeline Transportation Systems

Sun Jie, Zhang Meng (Shandong Yitong Engineering Technology Service Co., Ltd., Jinan Shandong 250100, China)

Abstract: With the deepening advancement of China's "dual carbon" goals, natural gas, as a clean energy source, is increasingly playing a significant role in the energy structure. Enhancing the energy efficiency of pipeline transportation systems and reducing energy consumption have become focal points in the industry. Based on the current energy consumption status of natural gas pipeline systems, this paper analyzes key factors affecting transportation efficiency and proposes new energy-saving measures from multiple dimensions, including system monitoring and evaluation, intelligent regulation, waste pressure and heat recovery, methane emission control, and management innovation. The study demonstrates that by constructing a digitalized energy efficiency monitoring platform, implementing intelligent regulation of compressor units, applying waste pressure power generation technology, and promoting the "gas testing without ignition" process, comprehensive measures can achieve a reduction of over 16% in pipeline-specific energy consumption and a decrease of more than 60% in methane emissions, significantly improving operational efficiency and environmental benefits of pipeline systems. These measures provide technical support for the green transformation of the National Pipeline Network Group and serve as a reference for similar pipeline energy-saving retrofits.

Keywords: natural gas pipeline; energy efficiency improvement; energy saving and consumption reduction; waste pressure power generation; methane recovery; digital intelligent monitoring

天然气作为清洁、高效的化石能源, 在我国能源结构转型中扮演着重要角色。截至 2025 年, 我国天然气管道总里程已超过 10 万 km, 形成了覆盖全国、互联互通的“全国一张网”供气格局。然而, 管道输送过程中压缩机耗能、气体泄漏、余压浪费等问题导致的能源损失不容忽视。在“双碳”目标背景下, 国家管网集团西气东输公司 2024 年甲烷排放总量同比下降超六成, 但管道系统节能潜力仍有待深度挖掘。

传统的管道节能措施主要围绕设备效率提升和运行参数优化, 虽取得一定成效, 但面临瓶颈。随着数智化技术快速发展, 天然气管道节能降耗正从单一技术应用向系统化、智能化、精益化方向转变。本文立足这一趋势, 结合前沿技术实践与创新管理模式, 提出一系列能效提升措施, 为天然气管道绿色低碳发展提供新思路。

1 系统能效监测与评价体系构建

1.1 基于虚拟能的用能评价模型

建立科学合理的用能评价体系是提升管道能效的基础。刘国豪等人提出的考虑环境影响的管道输送场站系统用能评价分析模型, 创新性地将虚拟能概念引入系统能效评估。该模型不仅关注传统能量分析, 还综合考虑了污染物及温室气体排放的环境效应, 通过量化评估管道系统全生命周期能耗, 为节能措施优先序确定提供了理论依据。

该模型在原油输送场站的实践表明, 考虑输入及输出过程虚拟能对运行效率有显著影响。相较于传统能效分析方法, 新模型能够更全面地反映系统能源利用效率, 避免环境成本外部化。基于该模型的分析结果, 国家管网集团针对不同场站特点制定了差异化节能方案, 为管道系统“精准降耗”提供了方向性指导。

1.2 数智化能效监测平台

国家管网集团通过构建生产监视与应急指挥中心，形成了总部与所属各单位协同的“二级监视”机制。该平台依托 20 余万个数据直采点，实现了对 1.2 万 km 管道、99 座站场及 352 座阀室运行状态的 24h 动态可视化智能管理。平台核心功能包括（表 1）：

①实时能效分析：AI 助手对压缩机组能耗进行跟踪分析，及时调整机组匹配模式，拟合历史数据给出能耗管控建议；

②智能诊断预警：通过气体泄漏监测仪、水质监测传感器等专业设备，实时监控环境质量，发现异常及时预警；

③能效对标管理：创新实施“高效设备优先运行”管理，开展能效水平全面标定，确立高效设备主运行。

2 智能化调控与运行优化技术

2.1 压缩机组智能调控技术

压缩机组作为长输管道的“心脏”，亦是能耗“大户”，其能耗约占管道总能耗的 70%–80%。国家管网西气东输通过构建压缩机组智能调控系统，实现了能耗的精细化管理。该系统通过 AI 算法对机组历史运行数据深度学习，建立负荷–能耗优化模型，智能推荐最经济运行方案。

实践表明，该系统可实现智能优化机组运行 50 余台次，在管输商品量增加情况下，管输单耗下降 16%。此外，山东公司在泰安压气站实现西门子压缩机一键启停功能，启动时间从 30min 锐减至 10min，大幅降低启机能耗。

2.2 热值计量模式下的运行优化

传统的体积计量模式无法准确反映天然气能量价值，而热值计量模式可更公平地体现天然气商品属性。袁献忠在研究川气东送管道运行优化时，创新性地建立了热值计量模式下的管道运行优化模型。该模型以气源流量、压缩机开机数和压缩机转速为决策变量，旨在最大化管道运行经济效益。

应用结果表明，热值计量模式下川气东送管道的天然气销售利润较传统的体积计量模式提高了 10.82%，压气站能耗减少约 3.4%。这一成果为天然气交易方式改革背景下的管道优化运行提供了新思路。

2.3 基于 AI 算法的工艺参数优化

普光气田通过“工艺模拟+数字孪生”技术打造蒸汽管网智能诊断系统，实施“稳压力、减用量、减负荷”等 18 项优化措施，首次实现夏季前彻底停运 3 台保供动力锅炉，创下气田投产以来锅炉投用时间最短、耗气量最少新纪录。该技术通过数字孪生模型模拟不同工况下的系统能耗，为操作参数优化提供决策支持，使换热网络效率由 66% 跃升至 99%，除氧器蒸汽消耗降低 45%。

3 余压余热回收技术应用

3.1 余压发电技术实践与应用

天然气在输送过程中需要多次降压，传统调压阀将压力能转化为热能散失，造成能源浪费。余压发电技术通过发电机组替代传统调压阀，有效利用天然气压力差发电。

国家管网集团在该领域已取得显著成效：山东公

表 1：数智化能效监测平台关键功能与效益 *

功能模块	技术特点	应用效益
实时能效分析	AI 算法、大数据分析	管输单耗下降 16%，节约燃动力费超 1800 万元 / 年
智能诊断预警	多源传感器、数字孪生	能耗异常识别准确率提升 90%
能效对标管理	可视化节能标识、高效泵监测	关键设备运行可靠性显著提升

表 2：余压余热利用项目效果对比

项目位置	技术类型	发电能力	减排效益	应用特点
定远压气站	余热发电	280 万度 / 月	减标煤 11 万 t	压缩机尾气余热利用
山东公司	余压发电	300 万度 / a	减排 CO ₂ 1700t	突破膨胀机精密制造技术
乌鲁木齐作业区	余压发电	500 万度 / a	未公开	发电机组替代调压阀

司联合五家单位完成首台套天然气余压发电设备全速试验,突破膨胀机精密制造核心技术,形成自主知识产权方案。该设备预计年发电量约 300 万 kWh,可满足约 2000 户家庭一年用电量,并减排二氧化碳 1700 余 t。西部管道公司乌鲁木齐作业区创新实施余压发电技术,投运后年发电量预计达 500 万 kWh。

3.2 余热综合利用

天然气加压输送过程中产生的余热回收是节能降耗的重要途径。国家管网西气东输定远压气站通过余热利用每月可产出 280 万度绿电送入长三角的千家万户。自站场压缩机尾气余热发电项目投产以来,已累计发电超 3.4 亿度,直接减少近 11 万 t 的标准煤耗,成为节能降耗、提质增效的有效实践,表 2 为三个站的各项指标对比。

4 甲烷排放控制与创新管理

4.1 移动式放空回收技术

在长输管道进行改线、检修或设备调试等作业时,为确保维抢修作业安全,通常需要将管道内的天然气放空处理。国家管网西气东输采用移动式放空回收车,配备集成高效燃驱往复压缩机和智能控制系统,将作业中需要放空的天然气回收至原管道内,实现能源再利用。

2024 年以来,国家管网西气东输利用该技术回收天然气超 600 万 m^3 ,减排量达 7.8 万 t 二氧化碳当量。该技术不仅避免了能源浪费,更带来显著环保效益,为管道维护作业中的甲烷排放控制提供了有效解决方案。

4.2 试气不点火工艺创新

在天然气开采领域,传统试气作业采用放喷点火方式,造成大量能源浪费和环境污染。乌审旗苏里格气田推行“试气不点火”工艺,放喷混合流体经过除砂、脱液、降压等一系列处理后,进入生产管网集输系统,实现天然气回收。

该工艺大幅缩短了放喷燃烧时间,常规井平均减少 8 天,可回收天然气 8 万 m^3 ;水平井平均减少 10 天,可回收天然气 20 万 m^3 。这一创新不仅降低了试气过程的碳排放,还为企业带来直接经济效益,实现了绿色开采与降碳增收的双赢。

4.3 管理创新与制度保障

技术创新需要配套的管理机制支撑。普光气田创新实施“三精”节能管理模式,通过“精密监控-精准对标-精细控制”闭环管理,实现能效关键指标监控率、对标率“双 100%”。同时,通过开展创标夺旗劳动竞赛,建立以“提质降耗增效”为核心的考核机制,持续巩固普光气田国家级“绿色工厂”的示范

地位。

国家管网集团同时制定了科学完善的甲烷排放量统计方法,并实施多项甲烷排放管控措施,实现了 2024 年甲烷排放总量同比下降超六成的目标。

5 结论与展望

本文系统探讨了天然气管道输送系统能效提升与节能降耗的综合措施,通过理论与实践相结合,得出以下结论:

首先,数智化技术是提升管道能效的核心驱动力。通过构建智能化能效监测平台,实现对压缩机组的精细调控,可使管输单耗下降 16% 以上,显著降低系统运行能耗。

其次,余压余热回收具有巨大潜力。余压发电和余热利用技术不仅能够满足站场自身用电需求,还可将多余电力送入地方电网,实现能源梯级利用,提升综合能效。

再次,甲烷排放控制是短期内容应对气候变化的关键举措。移动式放空回收和试气不点火等技术可有效减少甲烷排放,同时回收宝贵的气体资源,创造经济效益。

最后,管理创新与技术创新的深度融合是实现持续节能的保障。“三精”管理模式、高效设备优先进行机制以及热值计量优化等举措,从制度层面确保了节能措施的落地与持续改进。

展望未来,天然气管道节能技术将向全生命周期低碳化、能量回收最大化和数字化深度赋能方向发展。随着“全国一张网”持续完善,管道系统能效提升将成为我国天然气产业绿色低碳转型的重要支撑,为国家“双碳”目标实现贡献力量。

参考文献:

- [1] 翟正斌. 关于天然气输送自动化管理的研究 [J]. 化工管理, 2018, (32): 93-94.
- [2] 朱小明. 关于天然气输送自动化管理的研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(14): 65-66.
- [3] 赵波, 朱玉贵. 城市天然气输送系统泄漏事故危害分析及处置对策研究 [J]. 消防技术与产品信息, 2013 (01): 21-24.
- [4] 钟倩倩. 离网太阳能发电系统在天然气管道输送工程中的应用 [J]. 电工技术, 2023, (14): 75-76+80.
- [5] 彭源. 天然气管道输送中天然气干燥系统 [J]. 化工管理, 2017, (24): 62.
- [6] 潘腾, 韩晓飞, 安迪, 等. 基于燃驱机组输气的天然气管道站场综合能耗测试 [J]. 节能, 2021, 40(11): 18-20.
- [7] 陈冬鸥. 基于单片机的天然气管道压力监测系统的设计 [J]. 电工技术, 2022, (22): 15-17.