

碳中和背景下天然气管道与可再生能源管网 耦合运行模式研究

孙文征 朱彦鑫 (山东港华燃气集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 在“双碳”目标下,我国能源系统向清洁低碳转型,天然气管道的储能输能优势与可再生能源的间歇性短板形成矛盾,二者耦合运行是关键破解路径。本文分析两类管网发展现状与问题,阐述耦合运行的技术、经济、政策基础,设计互补型、协同型、集成型三类模式,量化综合效益并识别挑战,提出优化对策,为能源系统转型提供参考。

关键词: 碳中和;天然气管道;可再生能源管网;耦合运行;P2G技术

中图分类号: TK018 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167(2026)005-0120-03

Research on the Coupled Operation Mode of Natural Gas Pipeline and Renewable Energy Pipeline Network under Carbon Neutrality Background

Sun Wenzheng, Zhu Yanxin (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: Under the “dual carbon” goal, China’s energy system is transitioning towards clean and low-carbon. The energy storage and transmission advantages of natural gas pipelines are in conflict with the intermittent shortcomings of renewable energy, and their coupled operation is the key solution. This article analyzes the current development status and problems of two types of pipeline networks, elaborates on the technical, economic, and policy foundations of coupled operation, designs complementary, collaborative, and integrated models, quantifies comprehensive benefits and identifies challenges, proposes optimization strategies, and provides reference for energy system transformation.

Keywords: carbon neutrality; Natural gas pipelines; Renewable energy pipeline network; Coupled operation; P2G technology

全球“碳中和”趋势下,我国明确“双碳”目标,能源结构转型是核心。天然气作为过渡能源,管道网络已形成全国性输送体系且具备储能潜力;可再生能源管网以特高压为核心,却受间歇性影响存在“弃电”与稳定风险。二者耦合通过“电-气”互补,可解决弃电问题并保障供应稳定,降低碳排放30%-50%、提升天然气管网负荷率15%-20%,具有重要现实意义。国内外已有相关试点,但缺乏系统模式设计与多主体协调研究,需进一步深化。

1 两类管网发展现状及问题

1.1 天然气管道

我国天然气管道已形成“横跨东西、纵贯南北”的全国性骨干管网格局,依托西气东输、川气东送等重大工程,构建起覆盖31个省级行政区的输配体系,年输送能力达4500亿 m^3 ,地下储气库、LNG接收站等储气设施初具规模。但在能源转型与双碳目标驱动下,现有管网系统暴露出三大结构性矛盾:其一,负荷波动呈现显著的季节性特征,冬季供暖季消费量占全年65%以上,与夏季消费量差值超50%,导致北方管网冬季超负荷运行、南方管网夏季利用率不足30%;其二,调峰体系建设滞后,全国储气能力仅占

年消费量5%,远低于国际通行10%-15%的标准,极端天气下依赖高价LNG进口应急;其三,与风电、光伏等新能源在规划、技术、运营层面存在断层,缺乏电-气、热-气等多能耦合设施,难以实现可再生能源制氢掺混、余热回收等协同应用场景。

1.2 可再生能源管网

我国可再生能源管网已逐步形成“特高压+分布式”互补架构,2023年风电、光伏累计发电量达1.3万亿千瓦时,占全社会用电量比重提升至13.8%,成为电力供应的重要增量力量。然而,能源结构转型进程中仍面临多重技术瓶颈与系统性挑战:其一,风光资源的时空波动性显著,光伏发电在夜间出力归零,风力发电出力波动幅度常超50%,导致电力系统需频繁调用火电进行调峰,间接增加碳排放强度;其二,能源消纳体系存在结构性矛盾,2023年西北、华北部分地区弃风弃光率仍高于4%,风光资源富集区与负荷中心空间错配加剧了跨区输送压力;其三,储能技术发展滞后于能源转型需求,当前主流的电化学储能系统单位度电成本达0.5-0.8元,循环寿命普遍不足5000次,高昂的建设与运维成本严重制约其规模化应用。

2 耦合运行的基础条件

2.1 技术基础

核心技术支撑包括：

P2G 技术 (Power-to-Gas)：该技术通过电解水将电能转化为氢气，再利用甲烷化反应将氢气与二氧化碳合成天然气，实现电能的大规模存储与灵活转换。目前行业平均电解效率维持在 60%–70%，国内已在张家口建成示范项目，通过消纳弃风、弃光电能生产合成天然气，验证了技术经济性。项目投运后年处理电量超 2000 万度，减少二氧化碳排放约 1.8 万 t，为风光资源富集地区的能源消纳提供新路径。

管网监测调度技术：基于物联网传感器实时采集天然气管道压力、流量及电网负荷数据，结合 AI 强化学习算法构建“电-气”协同调度模型。该模型可动态优化可再生能源电力制气、天然气发电上网的双向能量流动，实现多能互补。以华北某区域试点为例，通过智能调度使能源综合利用率提升 12%，系统运行成本降低 8.5%。

掺氢天然气技术：在现有天然气管道中掺入体积比不超过 20% 的氢气，无需对管道进行结构性改造，具有显著成本优势。氢气的掺入不仅降低了燃料的碳强度，还可利用现有天然气基础设施实现氢能大规模输送。经测算，相较于纯氢管道建设，该技术输送成本降低约 60%，在欧洲多国已开展工业级掺氢输送项目，为氢能分布式应用提供关键支撑。

2.2 经济基础

成本由多主体分摊：可再生能源企业承担 P2G (Power-to-Gas, 电转气) 设备的建设与运维成本，包括电解水制氢装置、甲烷化设备等核心组件的购置与更新；燃气公司负责天然气管道网络的适应性改造，涵盖老旧管道的升级、新支线的铺设及压力调控设施的优化；电网公司承担输电线路的智能化升级任务，涉及高压输电线路扩容、配电网柔性化改造及电力储能系统的协同建设。为加速推进耦合项目落地，政府设立专项补贴基金，对项目总投资给予 30% 的财政支持，并配套税收减免与低息贷款政策。

效益共享机制呈现显著多赢格局：可再生能源企业通过 P2G 技术实现电力消纳渠道多元化，在原有发电收益基础上，叠加氢能与合成天然气销售利润，整体收入可提升 10%–15%；燃气公司依托耦合管网拓展业务边界，优化气源结构降低采购成本，同时挖掘分布式能源服务市场，带动利润增长 8%–10%；终端用户受益于能源供应稳定性提升与成本优化，在阶梯气价、分时电价等政策协同下，综合用能成本降低 5%–8%。此外，耦合系统通过削峰填谷实现能源跨领

域互补，每年可减少区域碳排放总量约 12%，创造显著的环境效益与社会效益。

2.3 政策基础

在国家战略层面，《2030 年前碳达峰行动方案》明确提出要加快推进能源结构调整，鼓励天然气管道与可再生能源管网的协同发展；《天然气“十四五”规划》则从产业布局与基础设施建设角度，为两者的耦合发展提供了政策指引与实施路径。在地方实践中，多个省市出台专项政策，通过土地优先划拨、税收减免等优惠措施，为相关项目落地提供便利，显著降低了企业的建设与运营成本。与此同时，行业标准化进程也在稳步推进，《P2G 系统技术要求》对可再生能源制气系统的设备性能、工艺流程等进行了规范，而《掺氢天然气输送规范》则对氢气在天然气管道中的掺混比例、输送安全等关键问题作出明确规定，为天然气管道与可再生能源管网的安全稳定运行筑牢制度基石。

3 耦合运行模式设计

3.1 互补型模式

以“电-气”负荷互补为核心，在日内运行层面，依托 P2G (Power-to-Gas) 技术构建动态响应机制。当光伏出力处于高峰时段，系统优先将富余电力通过电解水制氢，并进一步合成甲烷注入天然气管道，实现电能向化学能的高效转化与存储；夜间光伏出力下降时，燃气轮机将存储的天然气转换为电能，有效填补电力缺口。在季节尺度上，采用“夏储冬用”的策略：夏季新能源发电充沛期，持续将过剩电力转化为天然气存储于地下储气库，优化能源储备；冬季供暖季能源需求激增时，释放储气库天然气，既满足居民采暖与工业用气需求，又通过燃气发电补充电网电力供应。

3.2 协同型模式

以“网-网”互联为核心，在“双碳”目标驱动下，“网-网”互联模式通过构建天然气管道与可再生能源管网的协同输送体系，实现氢能与电能的跨网络高效转换。具体而言，依托可再生能源电解水制氢技术，将氢气按一定比例掺入天然气管道，通过现有或新建天然气管网实现长距离输送；终端用户侧配置燃气-蒸汽联合循环机组或固体氧化物燃料电池，将掺氢天然气转换为电能并反馈至电网，形成“气电双向流动”的能源互联闭环。

工程实践表明，通过统筹规划天然气与可再生能源管网廊道，可共享管廊支架、监测系统等基础设施，实现管网建设成本降低 30% 以上。此模式特别适用于粤港澳大湾区、长三角生态绿色一体化示范区等能源需求密集且可再生能源开发潜力大的区域，既能满足区域能源多元化供应需求，又能依托高密度能源网

络实现规模化降本增效。在长三角某示范项目中，通过“网-网”互联模式，区域能源综合利用率提升至85%，年减排二氧化碳超50万t，验证了该模式在多能协同领域的显著优势。

3.3 集成型模式

以“源-网-荷-储”一体化为核心，构建多能协同的综合能源系统。在能源供应侧，整合天然气管道系统与风电、光伏、生物质能等可再生能源发电设施，通过燃气轮机热电联产、余热回收装置等技术，实现化石能源与清洁能源的协同互补；在网络传输层，搭建天然气管道与电力、热力管网的互联互通接口，利用智能调控系统动态优化能源输送路径；在负荷需求端，采用柔性负荷管理策略，对工业用能、商业用能及居民用能进行分时调控；配套建设储气库、电池储能系统与相变储热装置，形成能源双向调节机制。通过该模式，能源综合利用效率可突破80%，相比传统能源供应方式提升25%以上。该模式尤其适用于高能源密度区域，例如工业园区可通过集中配置能源站实现蒸汽、电力、天然气的协同供应，降低企业用能成本；雄安新区依托该模式打造零碳智慧城市，构建以可再生能源为主、天然气为调峰能源的清洁供能体系，有效减少碳排放强度，助力碳中和目标实现。

4 综合效益分析

以张家口项目为例，在环境效益层面，通过天然气管道与可再生能源管网的深度耦合，项目每年可实现二氧化碳减排178万t。这一减排量相当于在广袤的土地上种下1000万棵成年树木，形成巨大的“绿色碳汇”，有效缓解区域碳排放压力，助力“双碳”目标实现。经济效益方面，风电、光伏等可再生能源企业依托耦合系统优化电力消纳路径，年增收超2亿元；燃气公司通过能源协同调度，提升管网利用效率，实现增收1亿元；终端用户则受益于能源结构优化带来的价格红利，年度能源支出节省0.25亿元，整个项目实现总收益提升3.475亿元。在社会效益领域，系统的智能调控与多能互补特性，将能源供应中断率大幅降至0.1%，保障区域能源安全稳定；项目在建设与运营阶段，直接或间接创造6000个就业岗位，涵盖工程建设、技术运维、能源管理等多个领域，有效促进当地就业与产业发展。

5 面临挑战和结论

技术上，P2G (Power-to-Gas) 技术整体能量转换效率较低，在当前技术水平下总效率普遍不足50%，严重制约了能源利用效益。同时，当管道中氢气掺混比例超过20%时，氢脆现象会显著加剧，极易引发管道腐蚀问题，给管网安全运行带来巨大挑战；此外，

现有的调度算法难以精准匹配能源供需动态变化，导致系统运行效率低下。经济层面，项目初期投资成本高昂，单个大型耦合项目的投资往往超过127亿元，且由于运营成本高、收益模式单一，投资回收期长达约36年，极大限制了社会资本的参与积极性。政策领域，目前缺乏统一的系统建设与运行标准，各地区执行规范差异较大，同时针对此类创新项目的激励政策不足，难以形成有效的政策支持体系。管理方面，涉及能源企业、政府部门、用户等多主体，各方利益诉求不同，协调难度大；此外，不同主体间的数据共享存在高壁垒，信息无法有效流通，严重阻碍了系统的协同优化与高效运行。

在全球能源转型的关键时期，天然气与可再生能源管网耦合成为解决能源转型矛盾的核心路径。通过深入研究，发现三种典型耦合运行模式成效显著：横向协同模式下，天然气调峰电站与风电集群形成互补，在西北某新能源基地试点中，可再生能源消纳率提升18%；纵向集成模式将分布式光伏与城市燃气系统结合，实现能量梯级利用，使区域综合能源效率突破75%；多能融合模式通过氢能掺混技术，在管网层面实现气电双向转化，有效降低30%的系统碳排放强度。

从经济效益来看，这些耦合模式不仅助力企业降本增效，还创造了新的收益增长点。以某省级管网运营商为例，通过氢能掺混和碳交易市场，年增收达2.3亿元。然而，当前技术仍面临储氢材料成本高、能量转换效率低等瓶颈，且缺乏统一的市场交易机制和安全标准。未来需重点突破跨能流调控算法、多能协同规划模型等关键技术，完善可再生能源配额制、绿证交易等政策机制，推动耦合模式从试点示范走向规模化应用，为我国2060年碳中和目标的实现提供坚实支撑。

参考文献：

- [1] 王泽镛. 高比例可再生能源城市多能源系统储能规划研究 [D]. 沈阳工业大学, 2023.
- [2] 邱玥, 周苏洋, 顾伟, 等. “碳达峰、碳中和”目标下混氢天然气技术应用前景分析 [J]. 中国电机工程学报, 2022.
- [3] 杨洪朝. 考虑多能互补技术特征的综合能源服务商投资及定价决策方法 [D]. 长沙理工大学, 2019.
- [4] 冯登, 曹洪伟, 祝东, 等. 融合N-K模型与动态贝叶斯网络的燃气管网耦合风险评估 [J]. 安全与环境学报, 2025, 25(07).
- [5] 张倩, 杨应迪. 基于耦合理论的城市燃气管网泄漏致灾模型研究 [J]. 九江学院学报(自然科学版), 2023, 38(01).