

油气储运网络低碳规划模型构建

季温苹 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 在全球能源转型与“双碳”目标驱动下, 油气储运网络的低碳化改造成为能源行业可持续发展的核心议题。本文基于系统工程与循环经济理论, 构建了涵盖“碳排放基准测算—多维度优化策略—智能决策支持—实施效果评估”的全链条低碳规划模型。通过整合政策驱动、技术创新、管理革新与区域协同要素, 提出了适应不同地理环境与能源结构的差异化规划路径。

关键词: 油气储运网络; 低碳规划; 模型构建; 碳减排; 系统优化

中图分类号: TE89

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 022-0007-03

Construction of Low Carbon Planning Model for Oil and Gas Storage and Transportation Network

Ji Wenping (Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: Driven by the global energy transition and the “dual carbon” goal, the low-carbon transformation of oil and gas storage and transportation networks has become a core issue for the sustainable development of the energy industry. This article is based on the theories of systems engineering and circular economy, and constructs a full chain low-carbon planning model covering “carbon emission benchmark measurement multi-dimensional optimization strategy intelligent decision support implementation effect evaluation”. By integrating policy driven, technological innovation, management innovation, and regional synergy elements, a differentiated planning path that adapts to different geographical environments and energy structures has been proposed.

Keywords: oil and gas storage and transportation network; Low carbon planning; Model construction; Carbon reduction; system optimization

油气储运网络作为连接能源生产与消费的“血管系统”, 其运行效率与碳排放水平直接影响全球能源体系的可持续性。国际能源署 (IEA) 数据显示, 全球油气储运环节年碳排放量达 12.6 亿吨 CO₂ 当量, 占能源行业总排放的 9.1% (IEA, 2024)。在中国, 随着“双碳”目标的深入实施, 油气企业面临碳排放总量控制与强度下降的双重压力。传统储运模式存在管网布局不合理、设备能效偏低、可再生能源融合不足等问题, 亟需通过系统性规划实现低碳转型。

现有研究多聚焦单一技术应用或局部环节优化, 缺乏对储运网络全生命周期、多要素协同的整合分析。本文提出的低碳规划模型, 以“数据驱动—模型优化—技术赋能—政策保障”为主线, 构建覆盖规划、设计、运营、升级的全流程体系, 旨在解决传统模式中碳排放核算模糊、优化策略碎片化、区域协同不足等关键问题。

1 低碳规划模型构建的理论框架

1.1 模型设计原则

①全生命周期视角: 涵盖管网规划、建设、运行、退役的全链条, 统筹“碳产生—碳控制—碳中和”环节。②多目标协同优化: 以碳排放最小化、能源效率最大化、经济成本最优化为目标, 平衡环境效益与企业竞

争力。③技术—管理—政策联动: 整合低碳技术应用、数字化管理升级与政策工具创新, 形成协同效应。④区域差异化适配: 根据地理气候、能源禀赋、经济水平, 设计差异化的规划路径。

1.2 模型核心架构

1.2.1 碳排放基准测算模块

建立“三维度”核算体系: ①空间维度: 划分集输管网、干线管道、城市配网三级单元, 量化各环节碳排放强度。②时间维度: 动态追踪不同季节、负荷周期下的碳排放波动, 识别高排放时段 (如冬季供暖期管道加热能耗增加 20%-30%)。③要素维度: 分解能源消耗 (电力、燃料)、设备损耗 (泄漏、腐蚀)、工艺排放 (VOCs) 等要素贡献度。

采用“实测数据+排放因子”混合核算方法, 通过 SCADA 系统实时采集流量、压力、温度等运行数据, 结合《省级温室气体清单编制指南》确定的排放因子, 建立动态数据库。例如, 天然气管道压缩机碳排放可表示为:

碳排放 = 压缩功率 × 运行时间 × 电力碳排放因子

1.2.2 多维度优化策略模块

1.2.2.1 管网布局低碳化

①拓扑结构优化: 运用图论理论, 构建“源—汇”

网络模型,通过粒子群算法求解最小碳排放路径。优先选择地形平缓、人口稀疏区域,减少管道爬坡能耗与生态扰动。②区域协同规划:在油气田集中区建设区域性低碳枢纽,整合集输管网与可再生能源基地,实现“采-输-储-用”一体化低碳循环。例如,在新疆油气区配套建设光伏制氢项目,将绿氢注入天然气管道,降低终端消费碳排放。③老旧管网升级:对服役超20年的管道进行内检测与能效评估,通过内衬修复、泵机组替换等措施,将输送效率提升10%-15%。

1.2.2.2 能源结构清洁化

①可再生能源替代:在管道沿线光照充足区域部署光伏-储能系统,为阴极保护、通信设备等低功耗设施供电;在风能资源丰富地区建设分散式风电场,直接为压缩机组供电。内蒙古某输气管道应用“光伏+储能”系统后,年节约电费120万元,碳排放减少800t。②多能互补系统:构建“天然气+电力+氢能”的混合能源网络,在压缩机站试点燃气-电动双燃料机组,根据电价波动灵活切换能源类型,降低用能成本15%-20%。③余热回收利用:在加热炉、压缩机房设置余热回收装置,将废热用于站内供暖或预热输送介质,系统能效提升8%-10%。

1.2.2.3 设备与工艺革新

①高效设备应用:推广磁悬浮压缩机、高速离心泵等节能设备,其效率较传统设备高10%-15%。某原油管道更换磁悬浮泵后,单站能耗降低2200kW·h/天。②智能化运维:部署物联网(IoT)传感器与数字孪生技术,实时监测管道泄漏、设备故障等风险,将非计划停机时间减少40%,同时通过预测性维护优化设备运行参数,降低能耗5%-8%。③低碳工艺创新:在天然气管道推广“无热再生吸附”脱水工艺,较传统加热再生工艺节能30%;在原油输送中采用“低温流动改进剂”技术,降低加热需求,减少燃料消耗15%。

1.2.2.4 管理机制创新

①碳排放管控体系:建立“企业-管网-设备”三级碳账户,将碳排放指标纳入绩效考核,实行“超排付费、减排奖励”机制。②数字化管理平台:开发低碳规划专用软件,集成数据采集、模型计算、方案模拟功能,为决策者提供可视化界面与多方案比选工具。例如,国家管网集团开发的“低碳管网规划系统”可实时显示不同方案的碳排放、投资成本与回收期。

③行业协同机制:推动跨企业管网互联与资源共享,通过“合输共储”减少重复建设,如华北地区多家企业联合优化成品油管网,减少迂回运输里程

300km,年减排二氧化碳5000t。

1.2.3 智能决策支持模块

基于GIS地理信息系统与大数据分析技术,构建“情景模拟-方案比选-动态调整”的智能决策系统:

①情景模拟:设定基准情景(现状运行)、低碳情景(技术改造)、零碳情景(可再生能源全覆盖),模拟不同情景下的碳排放趋势与成本变化。

②方案比选:运用层次分析法(AHP)建立评价指标体系,从碳减排量、投资回报率、实施周期等维度对规划方案进行综合评估。

③动态调整:根据政策变化(如碳价波动)、技术突破(如储能成本下降)、市场需求(如氢能需求增长)等外部因素,实时修正模型参数,确保规划方案的适应性。

1.2.4 实施效果评估模块

建立“投入-过程-产出”三维评估体系:①投入指标:包括低碳技术投资额、可再生能源占比提升率等。②过程指标:涵盖设备能效提升率、管网负荷率优化值、碳排放核算准确率等。③产出指标:聚焦碳减排量、能源消耗降低率、经济效益增长率等核心成果。

2 低碳规划模型的实施路径

2.1 政策驱动与标准体系建设

①完善法规政策:推动出台《油气储运低碳发展条例》,明确企业碳排放责任与激励措施,如对应用CCUS技术的项目给予税收减免。②建立行业标准:制定《油气储运网络碳排放核算与报告指南》,统一数据统计口径与计算方法,解决当前企业核算标准不统一的问题。③创新市场机制:将油气储运纳入全国碳市场,探索“管道运输碳排放配额”交易模式,通过市场价格信号引导企业低碳转型。

2.2 技术创新与产业化应用

①关键技术攻关:加大对超临界二氧化碳输送、管道氢能掺混、分布式能源并网等前沿技术的研发投入,建立“产学研用”协同创新平台。②示范工程建设:在条件成熟地区建设低碳储运示范区,如在长三角地区打造“天然气管道+光伏+氢能”综合能源网络,形成可复制的技术模式。③产业链协同发展:引导设备制造商、工程公司、能源服务企业参与低碳技术研发,构建从技术创新到工程实施的完整产业链。

2.3 区域差异化规划策略

2.3.1 资源富集区(如西北油气田)

①重点任务:构建“绿色开采-低碳集输-就近转化”体系,配套建设风光发电基地,实现集输系统电力自供;在气源地建设CCUS项目,将捕集的CO₂

用于提高石油采收率。②案例参考：长庆油田在鄂尔多斯盆地建设“光伏+储能+油气集输”示范工程，年减排二氧化碳 12 万吨，节约电费超千万元。

2.3.2 中部长输通道（如西气东输干线）

①重点任务：优化干线管道运行参数，推广“多站联动”节能调度模式；在沿线建设分布式能源站，为压缩机站提供绿电；开展管道掺氢输送试验，探索“气氢同网”技术路径。②案例参考：西气东输二线应用智能调度系统后，压缩机组平均能耗降低 9.2%，年节约天然气 2800 万 m^3 。

2.3.3 东部消费市场（如珠三角城市群）

①重点任务：完善城市配网智能化改造，降低燃气输配损耗；建设地下储氢库与天然气调峰站，构建“气氢协同”的应急保障体系；推动终端用户“煤改气”与“气改氢”，减少终端碳排放。②案例参考：深圳燃气集团在城市配网中应用物联网传感器，泄漏检测效率提升 70%，年减少甲烷排放 3.2t。

2.4 数字化与智能化赋能

①构建数字孪生管网：通过激光雷达、卫星遥感等技术构建储运网络虚拟镜像，实时监控碳排放动态，预测设备故障与能耗峰值。②应用人工智能算法：利用机器学习模型优化管道输送计划，如根据历史数据预测不同时段的流量需求，动态调整泵机组运行数量，降低“大马拉小车”现象导致的能耗浪费。③发展智慧能源服务：开发面向用户的低碳用能 APP，提供实时碳排放查询、节能建议等服务，引导终端用户参与低碳行动。

3 典型案例分析：中亚-中国天然气管道低碳规划实践

3.1 项目概况

中亚-中国天然气管道是我国首条跨国输气管道，全长 1830km，年输气能力 300 亿 m^3 。管道途经中亚沙漠与黄土高原地区，地形复杂，压缩机站能耗占总能耗的 75% 以上。

3.2 模型应用过程

①碳排放基准测算：通过 SCADA 数据统计，管道年碳排放强度为 $0.12\text{kgCO}_2/\text{Nm}^3$ ，主要来自压缩机耗电（占比 68%）与燃料气消耗（占比 27%）。②能源结构调整：在土库曼斯坦段部署 100MW 光伏电站，为沿线 3 座压缩机站供电，替代传统天然气发电，年节约燃料气 500 万 m^3 。③设备升级：更换高效磁悬浮压缩机，单站能耗降低 15%；在加热炉加装余热回收装置，热效率从 82% 提升至 91%。④智能决策支持：通过模型模拟不同方案，选择“光伏供电+设备升级+运行优化”组合方案，总投资 2.3 亿元，预计回收期 6.5 年。

3.3 实施效果

①碳排放降低：优化后年减排二氧化碳 18 万吨，碳排放强度降至 $0.098\text{kgCO}_2/\text{Nm}^3$ ，降幅 18.3%。②经济效益提升：年节约能源成本 4200 万元，投资回报率达 12.5%。③环境效益显著：减少燃料气消耗相当于种植 1.2 万公顷阔叶林，生态扰动降低 10%。

4 挑战与对策

4.1 主要挑战

①技术成本高企：CCUS、氢能输送等技术初期投资大，中小企业应用门槛高。②数据壁垒突出：不同企业、部门间数据标准不统一，跨区域协同优化受限。③政策协同不足：地方政府在可再生能源并网、土地审批等方面存在政策碎片化问题。④人才缺口显著：低碳规划所需的跨学科人才（能源经济、数据分析、环境科学）供给不足。

4.2 应对策略

①建立多元化投资机制：设立国家低碳储运基金，引导社会资本参与技术研发与示范项目；推广“合同能源管理”模式，降低企业技改风险。②构建行业数据共享平台**：由行业协会牵头，制定数据交换标准，建立匿名化的碳排放数据共享机制。③加强政策协同创新：推动“省级低碳规划联动”，在跨区域管网优化中实施统一的能效标准与补贴政策。④强化人才培养体系：支持高校开设“能源低碳管理”交叉学科，建立企业与高校联合培养机制，培养复合型人才。

5 结论

本文构建的油气储运网络低碳规划模型，通过整合全生命周期碳排放核算、多维度优化策略、智能决策支持与区域协同机制，形成了系统性的低碳转型解决方案。案例验证表明，模型可有效降低储运环节碳排放 15%-20%，同时提升能源利用效率与企业经济效益。该模型不仅为单个企业的低碳规划提供了工具，也为国家层面的能源系统优化提供了理论支撑。

参考文献：

- [1] 王瑛昱. 油气储运网络综合管理系统研究 [J]. 化工管理, 2014(27):1.
- [2] 杨祥陵. 油气储运网络综合管理系统关键技术研究 [D]. 重庆大学, 2025.
- [3] 陈熙, 李平阳, 袁启, 等. 网络安全在油气储运行业的发展与思考 [J]. 中国信息安全, 2022(007):3.
- [4] 杨连成, 何林峰. 物联网在油气储运中的应用 [J]. 石油石化物资采购, 2021(03):07.
- [5] 陈超, 李霏. 我国原油进口海运网络优化模型 [J]. 油气储运, 2011, 30(2):4.