

分布式能源项目与城镇燃气管网互联互通的关键技术及工程实践

周 旋 (博爱中石油昆仑燃气有限公司, 河南 焦作 454450)

摘 要: 本文以分布式能源项目接入城镇燃气管网的工程实践为研究对象, 结合豫西北区域博爱昆仑磨头门站互联互通工程案例展开分析。通过门站扩能改造实现供气能力 350 万方 / 日、管网辐射半径 300km 的压力适配体系, 构建含激光云台监测与管道生产管理系统的安全防护网络, 开发智能调度平台优化冬夏峰谷气量差比至 1.5:1。工程验证表明该技术体系支撑分布式能源用户连续供气稳定性达 99.9%, 应急响应时间缩短至 15 分钟, 管网利用率提升至 89%, 为城镇燃气管网突破特许经营壁垒、增强区域输配能力提供可复用的技术路径。

关键词: 燃气管网互联互通; 压力匹配; 安全监测; 智能调度; 分布式能源项目

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 023-0126-03

Key Technologies and Engineering Practices for the Interconnection Between Distributed Energy Projects and Urban Gas Pipeline Networks

Zhou Xuan (Boai PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd., Jiaozuo Henan 454450, China)

Abstract: This paper focuses on the engineering practice of integrating distributed energy projects into urban gas pipeline networks, with a case study on the Boai Kunlun Motou Gate Station interconnection project in the northwestern Henan region. Through capacity expansion and retrofitting of the gate station, a pressure adaptation system was established with a supply capacity of 3.5 million cubic meters per day and a pipeline coverage radius of 300 kilometers. A safety protection network incorporating laser cloud monitoring and pipeline production management systems was developed, along with an intelligent dispatching platform that optimized the seasonal gas consumption difference between winter and summer to a ratio of 1.5:1. Engineering validation demonstrated that this technical framework ensures 99.9% continuous gas supply stability for distributed energy users, reduces emergency response time to 15 minutes, and increases pipeline utilization to 89%. The study provides a replicable technical pathway for urban gas pipeline networks to overcome franchise barriers and enhance regional transmission and distribution capabilities.

Keywords: gas pipeline network interconnection; pressure matching; safety monitoring; intelligent dispatching; distributed energy projects

全球能源结构低碳转型加速推进的背景下, 天然气作为清洁化石能源在实现“双碳”目标进程中承担关键过渡作用。我国新型能源体系建设明确提出构建多能互补、互联互通的供能格局, 分布式能源项目凭借能效高、排放低的优势成为区域能源供应的重要节点。当前城镇燃气管网受限于传统特许经营模式, 供气主体单一、管网割裂运营等问题突出, 难以适应分布式能源项目灵活接入与多向交互的需求。高负荷连续生产的工业场景中, 分布式能源项目对气源稳定性、压力适配性及应急调峰能力提出更高标准, 现有燃气管网运行机制面临输配能力不足、安全冗余有限、调度响应滞后的系统性挑战。国家管网市场化改革政策驱动下, 城燃企业亟需突破传统门站单一接收功能, 向具备双向输配能力的分输站模式转型。分布式能源项目接入场景的压力波动控制、多气源协同调度、全时域安全监控等核心瓶颈, 亟需探索工程技术与管理机制的双重创新。

1 项目概况与核心问题

1.1 互联互通工程背景

豫西北区域作为河南省工业用气负荷核心区, 工业用户集群化特征显著, 龙佰集团钛白粉生产线、中铝中州铝业氧化铝生产基地等高耗能企业存在连续生产刚性需求。区域原有城镇燃气管网受制于特许经营壁垒, 形成“县域孤岛”供气格局——博爱昆仑等城燃企业仅能通过磨头门站单向接收西气东输气源, 管网末端压力衰减导致供能半径局限在 50km 范围, 无法覆盖跨区域工业用户集群。国家管网市场化改革推动“全国一张网”建设, 为打破企业间管网割裂状态提供政策窗口。工程本质是推动传统城镇燃气门站从“气源接收端”向“区域输配枢纽”的功能跃迁, 实现气源双向流动、负荷跨区调剂, 重构区域燃气输配体系。

1.2 关键挑战分析

①压力匹配失衡风险: 分布式能源项目用气负荷

波动剧烈,接入城镇中压管网引发压力瞬变。传统门站调压系统设计流量上限 100 万方/日,在突发增量下存在超压/欠压风险,需解决高压主干网与中压配网的阶跃式压差适配问题。

②多主体管网协同瓶颈:跨企业管网拓扑结构差异导致水力工况失调,焦作中裕管道设计压力 2.5MPa 低于磨头门站输出压力 4.0MPa,互联段需建立压力梯度缓冲机制;纵横安洛线管容利用率不足 40%,而博爱昆仑公司管容超载,管输能力错配引发气量调配效率损失。

③安全防护体系断层:分布式能源项目接入后管网运行工况复杂度倍增,原有独立 SCADA 系统无法实现跨企业管网全时域监控,局部泄漏可能沿联通管道扩散至多主体管网,传统隔离阀响应机制存在分钟级延迟缺口^[1]。

④调度响应滞后困境:冬夏峰谷差高达 3:1 时,龙佰集团调峰需求与中铝中州铝业基荷需求形成用气时序冲突,人工调度模式难以实现多气源的动态路径寻优,气量错配导致应急保供成本激增。

2 互联互通关键技术

2.1 压力匹配与流量控制

高压主干管网与城镇中压配网间的阶跃压差构成系统性风险,需建立动态压力适配机制。多级气动伺服调压阀组串联技术构成核心解决方案,以三级压力梯度衰减链重构输配压力体系。第一级高压减压阀将主干网 4.0MPa 压力降至 1.6MPa 中间阈值,第二级中压调节阀输出 0.8MPa 过渡压力,第三级低压精控阀稳定配网目标压力 0.4MPa。每级阀体配置独立 PID 控制模块,基于下游流量传感器实时反馈动态调整开度,消除用户端负荷瞬变引发的压力振荡^[2]。压力缓冲气垫罐技术作为关键补充设施,调压阀组下游部署高压储气容器,其预存气体在负荷骤增时补偿管网压降,负荷骤减时吸纳过剩气压;罐体压力状态通过磁致伸缩液位计连续监测,与调压阀组形成闭环协同控制。流量均衡分配技术依托文丘里管流量计阵列架构,在分输节点安装多通道计量单元,结合计算流体力学模型预测各支路流阻特性,动态分配跨企业管道的输气比例,从本质上规避管网水力工况失调。

跨区域输配环境下的流量稳定性依赖智能控制算法支撑,模糊自适应控制技术应用于多级调压阀组协同运行,构建压力-流量双变量解耦控制模型。其中模糊规则库定义为:规则为“如果压力偏差 e_p 为正且流量变化率 f 为负,则调整阀门开度 Δu ”,具体可表示为模糊关系:

$$\Delta u(k) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot R_i(e_p, f) \text{ 其中 } e_p = P_{set} - p, f = \frac{df}{dt}$$

其中 ω_i 为权重系数, R_i 为第 i 条规则输出,通过隶属函数实现自适应解耦。当龙佰集团钛白粉生产线启停引发用气量阶跃变化时,控制系统实时解算压力偏差导数与流量变化率^[3]。

2.2 安全防护与监测系统

分布式能源项目接入大幅提升管网运行风险维度,需构建全域覆盖的安全防控体系。空间监测层部署激光甲烷云台矩阵,磨头门站制高点安装红外光谱扫描仪阵列,以每分钟 360 度全景扫描模式覆盖半径三公里区域。当甲烷体积分数超过安全阈值,多光谱融合算法自动激活,结合三角定位原理精准标定泄漏源地理坐标,同步启动高清摄像记录泄漏扩散态势。地面感知层铺设分布式光纤振动传感网络,沿互联互通管道按标准间距埋设传感光缆,光时域反射技术实时解析背向瑞利散射信号。光纤声波传感系统在管道外壁敷设分布式传感光纤,相位敏感光时域反射计实时捕捉管道振动声波信号。当管道发生微小泄漏时,泄漏点湍流引发的 20-40kHz 特征频段声纹被精准捕获,小波包变换技术分离环境噪声与泄漏特征频率。压电陶瓷传感器阵列布设在法兰连接处等高风险节点,压电效应将机械振动转化为电荷信号,电荷放大器增强微泄漏振动特征^[4]。

2.3 智能调度平台构建

智能调度平台架构基于云边协同技术框架构建。边缘感知层部署智能物联终端体系,磨头门站关键节点安装高精度涡轮流量计与在线气质色谱仪,实时采集压力、温度、流量、组分等核心参数。用户端监测单元集成 RTU 远程终端,持续上传用气负荷曲线及生产设备状态信号。跨企业数据互通采用工业互联网 OPC-UA 协议,建立标准化数据映射模型,实现焦作中裕、国家管网等多源异构系统数据融合^[5]。数据传输层构建双环光缆冗余网络,时敏数据通过 TSN 时间敏感网络传输,保障控制指令端到端传输时延低于 50 毫秒。云平台数据湖采用列式存储架构,压缩存储十年历史运行数据,为决策分析提供全生命周期数据支撑。

决策引擎层实现调度智能化核心能力,负荷预测模块使用时空图卷积网络模型,融合气象预报、生产计划日历、宏观经济指标等 82 维特征向量。模型基于注意力机制动态加权历史用气模式相似性,生成未来 72h 负荷预测曲线,预测误差稳定控制在行业先进水平。多气源协同模块建立混合整数规划模型,目标函数统筹管输成本、气源价差、管容约束等要素。

业务应用层实现调度价值落地,管容交易平台建立双向拍卖机制,城燃企业可在线竞拍焦作中能管道

剩余管容资源。智能合约自动执行交易清算，生成包含输气时段、路径、价格的电子运单。平台采用微服务架构实现功能解耦，Kubernetes 容器编排技术保障高并发场景下的服务可靠性，形成从数据感知到决策执行的完整智能调度生态。

3 工程实践与应用

3.1 应用场景

高波动工业直供场景应用于龙佰集团钛白粉生产基地，该基地三条生产线具备分钟级启停特性，日用气负荷在 50 万方至 150 万方间剧烈波动。压力自适应系统部署多级气动伺服调压阀组，三级调压单元串联构建 4.0MPa 至 0.4MPa 压力衰减链。压力缓冲气垫罐预存 8000m³ 天然气，生产线突发启动时瞬时释放气流补偿管网压降。智能调度平台接入企业生产管理系统，提前获取窑炉点火计划调整供气曲线。当生产线全负荷运行时，调压阀组开度自动提升至 85% 工作区间，保障供气压力稳定在 0.39~0.41MPa 带宽范围。

城燃代输枢纽场景落地济源中裕燃气输配中心，该节点承接沁北工业园至济源城区燃气中转，日转输量稳定在 120 万方水平。管网拓扑重构工程新建两条 DN400 互联管道，与纵横安洛线形成环状输配网络。流量均衡系统基于文丘里计量阵列数据，应用计算流体力学模型优化支路流量分配。当冬季用气高峰来临，智能调度平台动态调整西气东输基荷气与山西煤层气比例，管容交易模块实时竞拍国家管网剩余管容资源。安全中枢平台接入中裕燃气 SCADA 系统，光纤振动传感网络沿 26km 联通管道布设，第三方施工侵扰事件触发模式识别引擎，自动生成防护等级提升指令。应急调峰功能调用 LNG 储气设施，在管网压力跌破 0.35MPa 阈值时启动气化补充流程。

3.2 实施效果验证

实施效果验证数据见表1所示:

表 1: 实施效果验证数据

验证指标	2019 年 基线	2020 年	2022 年	2024 年	验收标准
日供气能力 (万方)	100	350	520	520	≥ 350
管网辐射半径 (km)	50	150	250	300	≥ 300
连续供气稳定性	98.20%	99.50%	99.80%	99.94%	$\geq 99.9\%$
应急响应时间	45min	25min	18min	14'30"	$\leq 15\text{min}$
管网利用率	42%	68%	83%	89.20%	$\geq 85\%$
冬夏峰谷差比	3.0:1	2.3:1	1.7:1	1.48:1	$\leq 1.5:1$
调压响应速度	60s	15s	8s	4.8s	$\leq 5\text{s}$

验证指标	2019 年 基线	2020 年	2022 年	2024 年	验收标准
泄漏定位精度	500m	200m	100m	85m	≤ 100m
管容综合利用率		63%	79%	91.50%	≥ 85%

龙佰集团直供系统压力波动带压缩减至 $\pm 0.01\text{MPa}$ 范围，钛白粉生产线启停期间的供气压力稳定性达 99.92%。激光甲烷云台累计识别 3 次微泄漏事件，从报警到关断平均耗时 14min15s，泄漏扩散范围控制在直径 30m 内。2024 年冬季保供期间，智能调度平台动态匹配西气东输基荷气、山西煤层气、LNG 应急气，峰谷差比优化至 1.48:1 的历史最优水平。管网能效数字孪生体显示，调压单元运行能耗热点减少 73%，输配综合能耗下降 18.7%。跨企业管容交易平台完成焦作中能管道 62 笔管容交易，累计代输气量 1.7 亿方，管容综合利用率提升至 91.5%。光纤振动传感系统成功预警 17 次第三方施工侵扰，风险处置效率提升 40%。

4 结语

本研究深度融合压力自适应调控、全域智能安防与多源协同调度三大技术体系，成功构建支撑分布式能源高可靠性接入的区域燃气管网输配范式。工程实践验证了技术方案在破解高压阶跃压差、跨企业管网协同、用气负荷瞬变等核心瓶颈的有效性，为城镇燃气企业突破特许经营壁垒提供可复用的技术路径。创新建立的“管网物理联通－资源智能调度－安全主动防御”运行机制，推动传统门站从气源接收端向区域输配枢纽的功能跃迁。成果显著提升分布式能源项目连续生产保障能力与管网资源利用效率，其技术框架与实施路径对构建多能互补、互联互通的新型能源体系具有示范价值，为行业转型智慧能源服务商奠定工程实践基础。

参考文献:

- [1] 黄家阳. 城市燃气管网设计优化与智能调度方法研究 [J]. 石化技术, 2025, 32(07): 125-127.
- [2] 史平洋. 城市燃气老化管道改造的实施路径 [J]. 上海煤气, 2025, (03): 1-3.
- [3] 王学丹. 浅谈城镇燃气管网安全运行存在的问题及解决措施 [J]. 低碳世界, 2025, 15(06): 118-120.
- [4] 牛吉苹. 市政道路建设管网施工质量控制研究 [J]. 中国品牌与防伪, 2025, (06): 111-113.
- [5] 唐密密. 城市燃气工程管理数字化转型的应用 [J]. 石化技术, 2025, 32(06): 288-290.

作者简介:

周旋(1989-),男,汉族,河南汝州人,学历:本科,职称:工程师,职务:副总经理,研究方向:城镇燃气,管道天然气输配,燃气技术应用等。