

天然气量价耦合非线性销售优化模型构建及应用

赵思睿¹, 刘定智², 张曦², 侯浩远¹, 张元涛², 左丽丽^{1*}, 吴长春^{1*}

1 中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程研究中心/石油工程教育部重点实验室/城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249

2 中国石油天然气股份有限公司规划总院, 北京 100083

* 通信作者, zuolili@cup.edu.cn; wucc@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-12-11

国家自然科学基金面上项目(52174064)资助

摘要 在国家天然气产业“X+1+X”政策下, 针对直面市场竞争的销售环节, 天然气价格对下游客户市场的开发至关重要。针对天然气销售公司与下游客户签订的阶梯气价结算合同在制定过程未充分考虑客户购气能力的不足, 本文通过分析客户量价关系对阶梯价格的影响, 结合天然气供应链结构, 建立了天然气量价耦合非线性优化模型。该模型以天然气销售公司总利润最大为目标函数, 以天然气供应链各环节气量、供销气量以及客户各阶梯气价为决策变量, 考虑各环节气量上下限约束、各客户调价空间约束、节点流量平衡约束、客户量价关系约束、阶梯价格约束、客户类型约束等, 调用GUROBI求解器中的空间分支定界算法对该混合整数二次规划模型进行求解。将模型及算法应用于某省网大型多气源多客户(含10个气源和121个客户)的供销系统中, 计算时间不超过5秒, 算法求解效率高。与阶梯价格方案固定的销售情况相比, 所得各客户销量及气价方案使得总效益最高提升17.2%, 具有较好的优化效果。本文构建的模型及算法应用于不同客户类型的案例中, 同时兼顾了客户和天然气销售公司的利益。可用于天然气销售公司与下游客户进行价格复议时推荐调价方案, 并为天然气销售公司制定阶梯气价销售方案提供依据。

关键词 天然气客户; 阶梯气价; 量价关系; 非线性优化; 调价方案

中图分类号: TE01; F426.22

Construction and application of a natural gas volume-price coupled nonlinear sales optimization model

ZHAO Sirui¹, LIU Dingzhi², ZHANG Xi², HOU Haoyuan¹, ZHANG Yuantao², ZUO Lili¹, WU Changchun¹

1 National Engineering Research Center of Oil and Gas Pipeline Transportation Safety/Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Planning & Engineering Institute of PetroChina, Beijing 100083, China

Abstract The “X+1+X” policy in the national natural gas industry has positioned the price of natural gas as a crucial factor for the development of the downstream customer market. The sales segment, which is directly exposed to market competition,

引用格式: 赵思睿, 刘定智, 张曦, 侯浩远, 张元涛, 左丽丽, 吴长春. 天然气量价耦合非线性销售优化模型构建及应用. 石油科学通报, 2024, 02: 354-364

ZHAO Sirui, LIU Dingzhi, ZHANG Xi, HOU Haoyuan, ZHANG Yuantao, ZUO Lili, WU Changchun. Construction and application of a natural gas volume-price coupled nonlinear sales optimization model. Petroleum Science Bulletin, 2024, 02: 354-364. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.026

heavily relies on this pricing strategy. In response to the shortcomings of the ladder gas price settlement contract signed between the natural gas sales company and downstream customers, which does not fully consider the customers' gas purchasing ability in the process of formulation, this paper analyzes the impact of customer volume-price relationship on the ladder price, and establishes a natural gas volume-price coupled nonlinear sales optimization model of the natural gas supply chain. The model takes the maximum total benefit of the natural gas sales company as the objective function, and takes the gas volume of each link in the natural gas supply chain, the natural gas supply and sales volume as well as the customers' ladder prices as the decision variables. The constraints of the model include the upper and lower limits of the gas volume of each link, pricing adjustment space constraints for each customer, the node flow balance constraints, the constraints of customers' volume-price relationship, the constraints of the ladder price, the constraints of the type of different customer, etc. The proposed complex mixed-integer quadratic optimization model is solved using the spatial branch and bound algorithm in the GUROBI solver. This method is applied to a large-scale multi-gas source and multi-customer supply and demand system (including 10 gas sources and 121 customers) within a provincial network. Remarkably, the computation time does not exceed 5 seconds, demonstrating the high efficiency of the model and algorithms. When compared to the current sales situation with a fixed ladder pricing scheme, the optimized sales volume and gas price scheme for each customer resulted in a total benefit increase of 17.2%. This significant improvement underscores the effectiveness of the proposed model. Importantly, the model and algorithm developed in this paper can be applied to a variety of customer types, ensuring that the interests of both customers and natural gas sales companies are considered. The model has shown promising application effects and can be used to recommend price adjustment plans in cases of price reconsideration between natural gas sales companies and downstream customers, and provides a solid foundation for natural gas sales companies to formulate more effective and beneficial ladder gas price sales schemes.

Keywords gas customers; ladder gas price; volume-price relationship; non-linearity; price adjustment plan

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.026

0 前言

“双碳”目标的提出给天然气管网的发展带来挑战,同时也提供了机遇。随着我国低碳经济的发展,天然气作为清洁低碳的化石能源,其消费量快速增加。根据国家发展改革委和统计局公布的数据显示^[1-4],我国天然气的产量和消费量快速增长,并且消费量的增长速度远超产量。2019年,国家管网公司的正式成立打破了天然气行业上、中、下游的一体化经营模式,天然气市场体系发生了一定程度的变化,形成了多气源多渠道供应、下游市场充分竞争的市场环境^[5-6]。在此大背景下,天然气价格对下游客户市场的开发至关重要,合理的价格有利于促进天然气的消费^[7-8]。随着天然气阶梯价格制度的推行,销售公司与客户签订合同时考虑用气结构,且各个用气区间下对应的价格有所不同^[9]。从销售公司的角度出发,为了提高销售收入,应尽可能的使客户购买气量越大,单位气量销售价格越高。但实际情况下,每个客户所能承受的价格上限以及气量需求不同,存在单位气量销售价格越高,客户购买量反而越小的情况,此时销售收入不一定最大。因此,在新形势下天然气销售公司需以天然气供应链整体效益最大为目标,以客户需求为导向,在充分考虑客户量价关系基础上对天然气销量和价格进行耦合优化,制定合理的价格政策,为不同特性的客户

提供个性化的定价方案,进而提高客户粘性,与客户建立互利双赢、长期合作的良好关系。

国内外学者针对能源系统供应链的决策优化开展了大量研究,多集中于管网能耗优化^[10-13]、路径优化^[14-16]以及购销方案优化^[17-19]等方面。其中,在购销方案优化上,陈传胜等^[20]针对天然气用气高峰期会出现气源短供的问题,分别建立了以利润最大和缺气指数最小为目标函数的混合整数线性规划模型,考虑节点流量平衡约束、站场平衡、客户需求约束、产供储销平衡等约束,使用CPLEX求解器对该模型进行求解,得到不同工况下的供气策略,可为天然气用气高峰期合理分配供气提供应急方案。王梦茜等^[21]从市场竞争角度建立了柴油批零一体营销量价优化模型,建立量价关联方程模型,描述经济变量间的联立关系,研究零售市场与批发市场的量价均衡。邢文婷等^[22]针对现行阶梯气价制定不合理的情况,提出一种居民阶梯气价优化模型,采用蚁群算法对模型进行求解,结果表明该模型同时兼顾了客户和销售公司的利益,并能够为政府部门制定和推行气价政策提供依据。另外,在电力行业中,初保驹等^[23]在新电改背景下,为了降低用户用电的成本,优化电力系统中的资源配置,使用户享受分时电价以及阶梯电价带来的红利,以电网峰谷差最小化为目标,综合考虑价格约束以及成本约束,建立阶梯分时电价优化模型,结果表明该模型在

新电改背景下居民用电领域中具有可行性和操作性,促进新电价政策更好的实施。

截至目前,鲜有研究天然气销售环节对销量和价格的联合优化,也极少考虑客户量价关系对阶梯气价的制定以及总效益的影响。为此,针对天然气销售公司,分析了当前阶梯气价实施过程中存在的问题,考虑客户可能存在的非线性量价关系对销售环节的影响,本文建立了天然气量价耦合非线性优化数学模型,以总效益最大为目标函数,使用GUROBI求解器对该混合整数非线性优化模型进行求解,并将其应用于不同客户类型的案例中,验证了该优化模型的适用性。优化结果可用于价格复议时推荐调价方案,为未来完全市场化后推荐合理定价有一定的指导意义。

1 天然气供应链及销售气价模式

近年来,国内天然气市场快速发展,消费量稳步提升。在天然气产业市场化改革大背景下,天然气销售合同的签订与执行是上下游企业运营的核心关系之一。天然气供应链包括上游生产环节、中游运输环节以及下游的分销环节。天然气资源从长输管道下载后,会存在和一级销售商的交付过程,再由一级销售商直接零售或是批发给二级销售商后再零售给终端用户(图1),以国内大型资源供应商如中石油作为一级销售商为例,一级销售商主要销售对象为批发客户和直供终端客户,而批发客户也可以作为二级销售商将部分天然气销售给终端用户,例如居民用户、商业用户、工业用户等。

天然气价格体系可分为出厂价、门站价以及终端价,其中门站价由出厂价和管输费构成,终端价由门站价和配气费构成,价格的制定以行政为主、市场为辅,由政府部门根据生产与供应成本再加合理利润确定。当前市场化背景下,出厂价和管输费由国家发改委制定,城市配送服务费由地方政府制定。在价格形成方面,为了合理引导市场用气,更好发挥天然气综合价值,批发价格由一级销售商(中石油公司)定价,目前主要采用阶梯结算方式签订合同,各阶梯气量的意义不同,主要包括居民气量、均衡气量(通常包含两档)、调峰气量,如果再考虑线上竞拍和线下额外用气情况,实际结算的阶梯数量更多;中石油直供的终端客户价格由城市门站价和城市燃气管网配气费组成,其中城市门站基准价格由政府指导定价,终端具有调价权。由于终端客户对价格的敏感度、承受能力不同,所需的服务要求不同,为了突出多样化营销的优势,需双方要充分利用弹性价格机制进行调整,消费旺季可在基准门站价格基础上适当上浮,各省可根据市场供求关系自行上浮20%以内。消费淡季适当下浮,利用价格杠杆促进削峰填谷,鼓励供需双方通过天然气交易中心等平台进行公开透明交易,充分发挥市场机制作用,形成市场交易价格。

目前,各省份使用的仍为2019年发布的基准门站价格表,调整频次低,未能及时反映天然气市场价格变化。仅有部分省市出台了阶梯气价与天然气门站价的联动机制,但现有的阶梯气价动态调整机制仅考虑了天然气上下游的价格关系,没有考虑客户天然气需求的变化对气价的影响。故本文针对天然气阶梯计价

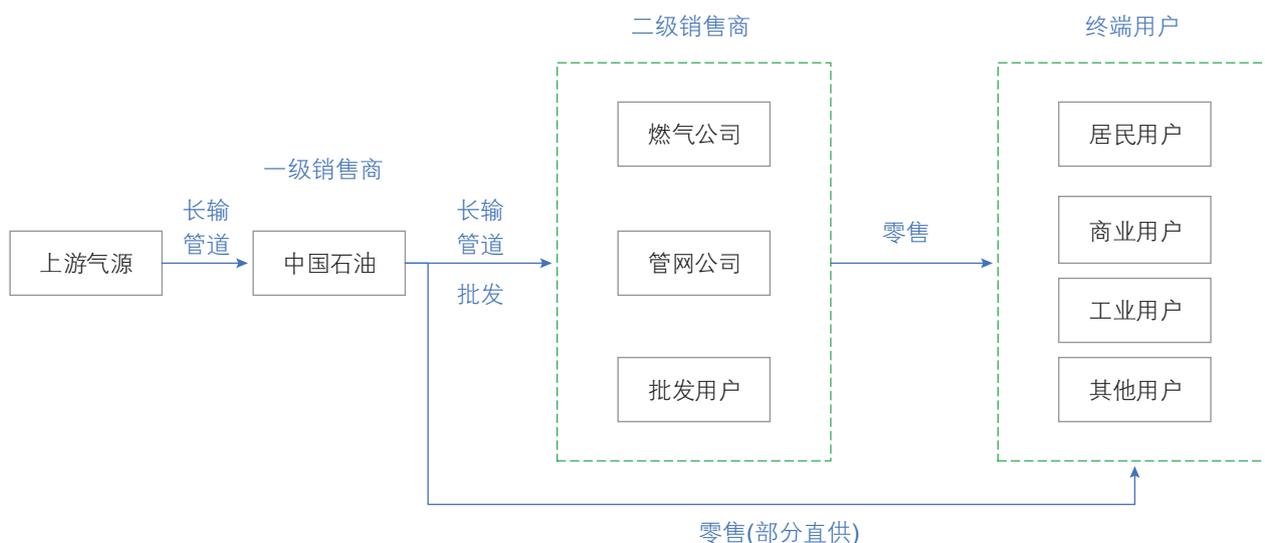


图1 天然气供应链简化示意图

Fig. 1 Simplified diagram of the treatment of the elements of the natural gas industry chain

收费模式，充分考虑客户量价关系，形成了天然气销量和气价的双变量耦合优化技术，进而得到考虑客户实际需求下的最优阶梯价格方案。

2 量价耦合优化模型

2.1 模型假设

本文在已知每个周期内各气源的供应量上下限、各客户的需求上下限、已有管道的输气能力，各客户的量价关系以及给各个客户定制的初始合同价格方案的基础上，考虑天然气供应链的整体结构以及供销平衡，以销售公司利益最大化为目标函数，建立混合整数非线性规划模型，优化各客户的天然气销售量和销售价格。为方便模型的建立及求解，提出以下假设：

(1)将气源和客户均考虑为管网拓扑结构图上的节点，与对应的站场以虚拟边的形式(图2)相连，边的容量为其对应的供应/需求能力。

(2)由于重点分析销售端的销量和价格，对于省内天然气供应链中可能存在的压缩机、调压阀、阻力件等中间元件和管道不进行压力、温度等工艺参数的计算，认为已知其输气能力上下限。

(3)本研究中的省内供销系统中的客户包括批发客户以及终端客户，其中批发客户指陶瓷、玻璃等大型客户以及资源供应商外部的城燃分销商客户，终端客户指直供的大型工业、化工等客户以及资源供应商内部的城燃分销商客户。

(4)将省内天然气销售系统中终端客户天然气价格以阶梯计价模式进行考虑，批发客户以阶梯结算模式进行考虑，并且认为阶梯方案已知，不参与价格优化。各项成本以边际成本进行考虑，即增加一方气所增加的成本，并且认为各项边际成本为常数。

(5)由于终端具有调价权，认为每个终端客户具有

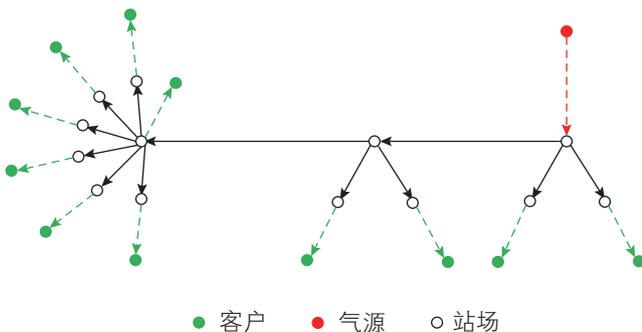


图2 管网各元件处理简化示意图

Fig. 2 Simplified diagram of the treatment of the elements of the pipeline network

一定的调价空间。

(6)认为客户对天然气可接受价格与需求量之间的关系为分段线性关系。

(7)认为省内同类客户价格相同。

2.2 目标函数

天然气管网供应链由客户、管段、站场、气源等组件组成，为了方便建立模型，以 $S = \{1, 2, \dots, i_{\max}\}$ 表示天然气管网供应链中所有客户编号的集合，以 $R = \{1, 2, 3, \dots, j_{\max}\}$ 表示各个气源编号的集合，以 $P = \{1, 2, 3, \dots, k_{\max}\}$ 表示管网中各个管段编号的集合，以 $C = \{1, 2, 3, \dots, o_{\max}\}$ 表示管网中各个中间元件编号的集合。将天然气销售量以及销售价格作为决策变量，在示范省份天然气供销约束条件下，考虑客户量价关系，以省公司效益最大为目标函数，建立混合整数二次规划模型，目标函数由销售收入、气源成本及管输成本组成。表达式如下：

$$\max F_1 = f_1 - f_2 \quad (1)$$

式中， F_1 为总效益，元； f_1 为销售收入，元； f_2 为供应链总成本，元。

2.2.1 销售收入

销售收入源于客户的用气费用，由各客户的实际用气量、用气价格决定。由于现有天然气计价方大多采用阶梯气价的销售方式，故本文在销售端采用阶梯计价的销售方式进行优化计算，以 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示该销售公司所有的终端客户，以 $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 表示每个客户所对应的天然气阶梯价格阶梯数，即客户天然气量对应的档次个数。由于该模型中价格和气量均为决策变量，则该模型的销售收入表达式为：

$$f_1 = \sum_{N=1}^n \sum_{M=1}^m P_{NM} \cdot Q_{NM} \quad (2)$$

式中， P_{NM} 与 Q_{NM} 均为决策变量，即优化后的销量与价格； P_{NM} 为第 N 个客户第 M 段阶梯的天然气价格，元/ m^3 ； Q_{NM} 为第 N 个客户第 M 段阶梯的天然气销量， m^3 ； f_1 为总销售收入，元。

2.2.2 供应链总成本

供应链总成本包括上游各类气源的供气成本以及管道输送时产生的管输成本。

$$f_2 = \sum C_R(Q_{R,j}) + \sum C_P(Q_{P,k}) + \sum C_C(Q_{C,o}) \quad (3)$$

式中， $C_R(Q_{R,j})$ 为第 j 个气源供气成本，元； $C_P(Q_{P,k})$ 为第 k 条管段的输气成本，元； $C_C(Q_{C,o})$ 为第 o 个中间元件的输气成本，元。

2.3 约束条件

约束条件为：由于物理因素、商业因素、生产因素等各方面原因，决策变量必须要满足相等或者不相等的数学关系式。本模型中约束条件主要包括节点平衡约束、上下限约束(包括各环节气量和客户气价的上下限)、量价关系约束、阶梯价格约束等。

2.3.1 节点平衡约束

在天然气管网中，流入某一节点的流量等于流出该节点的流量，其约束表达式为：

$$\sum Q_{n,in} - \sum Q_{n,out} = 0 \quad (4)$$

式中， $Q_{n,in}$ 为流入第 n 个节点的流量， $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ； $Q_{n,out}$ 为流出第 n 个节点的流量， $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

2.3.2 上下限约束

模型中同时存在天然气销售气量以及气价两个决策变量，为了构造优化模型的可行域，并且使优化得到的销量/价格方案具有一定的合理性，需要对两个决策变量进行约束。天然气气量上下限约束是考虑决策变量的变化范围，对决策变量本身所施加的上下限约束，其约束表达式为：

$$Q_{i,min} \leq Q_i \leq Q_{i,max} \quad (5)$$

式中， $Q_{i,max}$ 为气源供应上限、管段正反输能力、客户销售合同最大量， $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ； $Q_{i,min}$ 为气源供应下限、管段正反输流量下限、客户销售合同最低量， $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

与各环节流量的上下限类似，还需建立客户气价的上下限约束，从销售的角度也可以理解为每个客户的调价空间，具体约束表达式为：

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (6)$$

式中， $P_{i,max}$ 为第 i 个客户销售价格的上限，元； $P_{i,min}$ 为第 i 个客户销售价格的下限，元。

2.3.3 阶梯价格约束

近年来，天然气阶梯气价的推行具有重要的意义，在节能降耗的同时，也体现了社会的公平性，并能解决“交叉补贴”的问题，从而有利于天然气能源的可持续发展。阶梯气价是指对客户用气量进行分段计价，价格随着用气量的增加呈阶梯变化的计价方法，此时，价格与销量的关系呈阶梯直线(图3)。

图中每一个红点的横坐标代表每一段阶梯的端点流量值，纵坐标代表每一段流量的价格。若对于某客户存在 N 个阶梯价格，令其销量 Q 在任一阶梯价格 P_i 区间内的销量为 q_i ，则对于该客户的销售收入 $R(Q)$ ，可通过以下公式表示：

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i \quad (7)$$

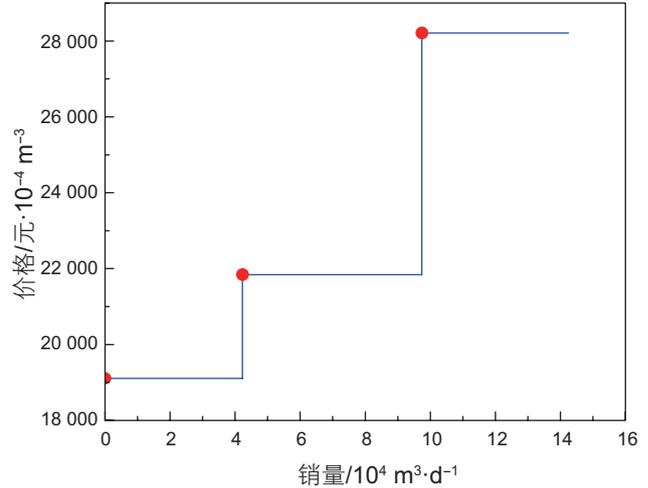


图3 客户阶梯价格样式图

Fig. 3 Customer's ladder price style chart

$$R(Q) = \sum_{i=1}^N P_i \cdot q_i \quad (8)$$

对于阶梯直线的价格，需建立分段线性约束进行表示。针对分段线性问题，通过引入多个0-1变量，可以将其转化为混合整数规划问题。在此，本文对应 N 个阶梯引入了 $N+1$ 个0-1变量 τ_k ($k=0 \sim N$)来建立阶梯价格的约束，对于每一个阶梯区间内的销量 q_i ，存在以下约束：

$$\begin{aligned} \tau_{k+1}(Q_{k+1} - Q_k) &\leq q_i \leq \tau_k(Q_{k+1} - Q_k), \\ k &= i-1, i \in [1, N] \\ \tau_0 &= 1, \tau_N = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中， $R(Q)$ 为总销售收入； Q_{k+1} 和 Q_k 分别为原阶梯价格中第 i 个区间流量右端点值和左端点值； τ_{k+1} 和 τ_k 为每个阶梯引入的两个0-1变量。

2.3.4 客户量价关系约束

站在客户角度，在不同价格下，客户可接收的销量可能不同，即客户对于天然气的购买存在一定规律的量价关系。量价关系约束与阶梯气价约束不同，阶梯气价是供需双方的合同行为，是商业条款和一种收款方式，主要描述在多少销量下卖多少价格，其中销量为自变量，气价为因变量。而量价关系是客户的一种属性，主要描述客户在多少价格下可以买多少气量，价格为自变量，客户可接受的销量为因变量。本文中所有客户的量价关系近似看作分段线性关系(图4)。

客户的量价关系可以用函数关系式 $Q=f(P)$ 来表示，其中 Q 为量价关系中的纵坐标即客户可接受的销量， P 为量价关系中的横坐标即气价，该函数关系式为分段线性关系，通过取几个确定的量价关系点可以构造出该客户的量价关系。从图4可以看出，客户会

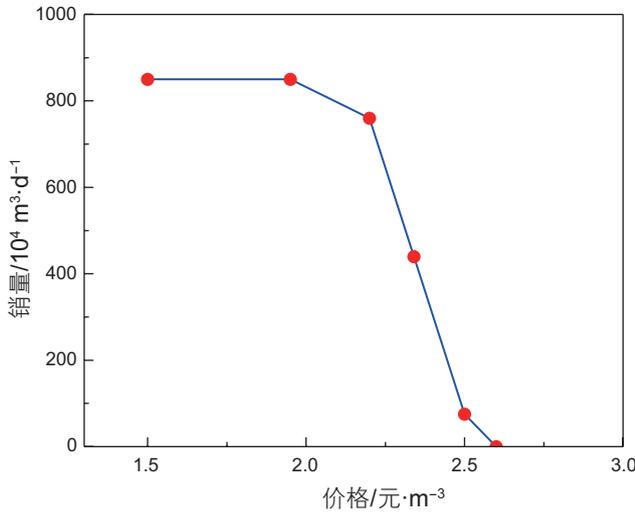


图4 客户量价关系样式图

Fig. 4 Customer's volume-price relationship style chart

随着气价的增加而减少气量的购买，随着气价的降低而增加气量的购买，但该趋势并不是没有边界的，在求解过程中会受到客户气价以及销量上下限的约束，即公式(5)以及公式(6)。

当原阶梯价格曲线中(优化前的阶梯价格曲线)中第 n 个客户的第 m 段阶梯端点流量值超过量价关系中可接受销量的最大值时，此时可取消该阶梯段销售方案，将新阶梯价格曲线(优化后的阶梯价格曲线)中第 n 个客户的第 m 段阶梯价格设为 0，即：

$$P_{n,m} = 0 \tag{10}$$

当原阶梯价格曲线中(优化前的阶梯价格曲线)中第 n 个客户的第 m 段阶梯端点流量值小于量价关系中可接受销量的最大值时，此时在新阶梯价格曲线(优化后的阶梯价格曲线)中第 n 个客户的第 m 段阶梯价格会受到该段阶梯端点流量值在量价关系曲线上对应价格的限制，即：

$$Q_{n,m} = f(P_{n,m}) \tag{11}$$

式中， $Q_{n,m}$ 表示在第 n 个客户在第 m 段阶梯端点对应的销量， $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ； $P_{n,m}$ 表示第 n 个客户的第 m 段阶梯的价格， $\text{元}/\text{m}^3$ 。

此外，考虑量价关系对阶梯价格方案进行优化时，由于客户量价关系曲线通常为随着价格的上升客户销量降低的趋势，与终端用户在采暖季时随着销量的增加客户气价升高的上升型阶梯价格方案的趋势并不一致。为了使得优化后的阶梯价格方案与优化前的阶梯价格方案趋势一致，需人为在模型中增加上升型阶梯价格趋势的限制。为了便于优化模型处理，结合调研到采暖季各阶梯价格之间存在一定的比例系数 $\alpha > 1$ ，即当原阶梯价格方案为上升型时：

$$\alpha P_{n,m-1} \leq P_{n,m} \tag{12}$$

2.3.5 客户类型约束

在省网供销系统中存在的不同类型的客户，在进行量价耦合优化时，为了避免价格歧视的情况，对于属于同一类型的不同客户，需要保证对应阶梯的价格相等。对每种用户类型 t 引入辅助变量 Z_t 进行约束，对于类型为 t 的客户 i ，此时需满足：

$$P_{i,m} = Z_t \tag{13}$$

除此之外，对于客户类型不明确的情况，可以根据客户原始阶梯价格合同方案进行约束，对于原始阶梯方案对应阶梯价格相等的客户，也需要保证优化后的阶梯价格相等。此时则需要对每个阶梯下的各客户对应价格进行预分类再施加约束。

2.4 求解算法

由于目标函数中包含两个决策变量(价格和销量)相乘，且约束条件中存在 0-1 二元变量，所建立的天然气量价耦合模型即为混合整数二次非凸规划模型。目前，已有较多成熟的商业求解器可以求解混合整数二次非凸规划问题，如 LINGO、CPLEX、GUROBI 等，其中 GUROBI 求解器在石油天然气行业中使用广泛，且具有求解速度快、求解精度高等特点，因此本文使用 Python 编程语言调用 GUROBI 商业求解器进行编程求解计算。其中 GUROBI 求解混合整数二次非凸规划问题采用空间分支定界法进行求解，它和传统的分支定界法区别在于，松弛不再是简单的线性松弛，而是对每个约束和优化目标中的函数利用其凸的下逼近/凹的上逼近函数进行逼近，用于提供下界进行剪枝^[24]。给出空间分支定界法的算法流程图(图 5)，将通过松弛模型得到的下界解记为 L ；将使用内点法得到的上界解记为 U 。

3 案例应用

对量价耦合模型开展测试需要紧密联系客户，为了验证模型与算法的可行性和合理性，本文针对某省网的多气源多客户的供销模型(10 个气源、121 个客户)开展量价耦合优化研究。由于收入等级、消费特性不同，不同客户的量价关系曲线会有所不同，并且阶梯气价方案的制定与客户类型也相关。因此，本节对客户类型开展分情况、分类别的优化研究，对表 1 所示三类案例进行模型及算法测试。

测试平台为 win11 i5-12500H 16GB RAM，在计

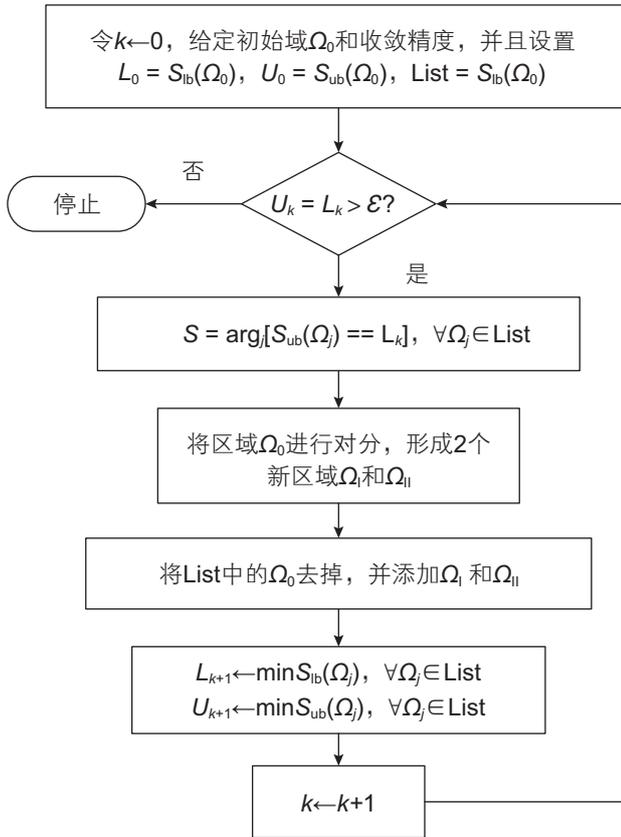


图5 空间分支定界算法流程图

Fig. 5 Flowchart of the algorithm for the spatial branch and bound method

算速度上, 3个案例由于模型中考虑的约束增加, 相应增加了对于限制客户类型的辅助变量, 算法计算时间逐渐增加。但针对案例中的某大型省网供销模型的计算时间均不超过5秒, 由此可证明我们所设计的模型及算法的高效性。具体案例的描述和结果分析见后文详细介绍。

3.1 基础数据

将本文构建的量价耦合优化模型及算法应用于某省网的大型供销模型中, 其拓扑结构(图6)包含10个气源、121个客户、53根管段、78个中间元件。由于中间元件处理方式同管段一致, 在拓扑结构图里将两者不做区分。

考虑省网实际情况下批发客户远多于终端客户, 为了便于分析多客户在大型管网结构中开展量价耦合优化的效果, 本文仅针对其中3个可调价的终端客户

表1 量价耦合优化模型及算法测试案例

Table 1 Details of volume-price coupling optimization model and algorithm test cases

客户类型	计算时间/s	变量数
不考虑	3.564	连续型: 509, 整数型: 884
已知	3.749	连续型: 511, 整数型: 884
未知	4.152	连续型: 515, 整数型: 884

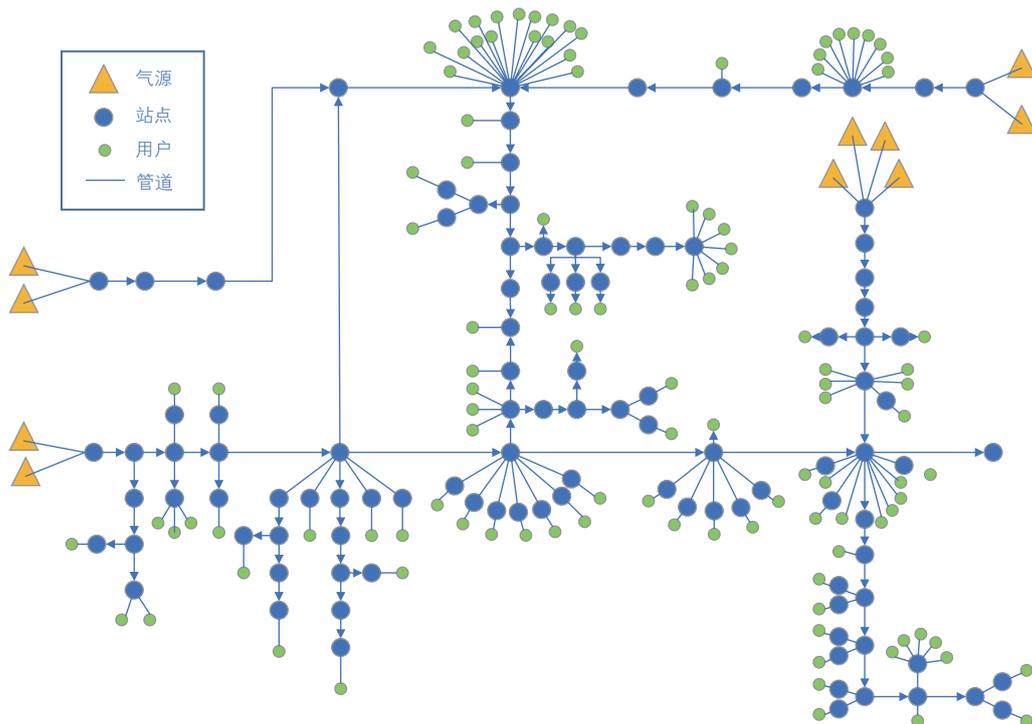


图6 某省网供销拓扑结构图

Fig. 6 Topology diagram of a provincial network for supply and distribution

优化前后价格方案进行分析。已知省网中3个可调价客户的量价关系(图7)、销量上下限(表2)。

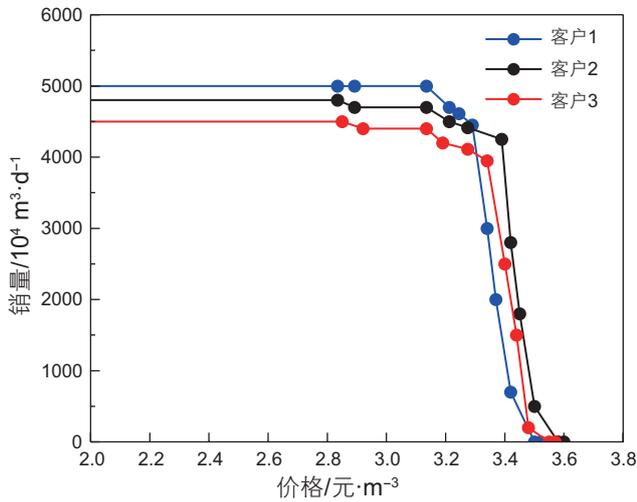


图7 客户量价关系
Fig. 7 Each Customer's volume-price relationships

3.2 优化结果

由于系统中包含多客户的量价耦合优化,客户的类型会影响到阶梯价格方案的制定,在实际签合同同时为了避免价格歧视,需要考虑同种类型客户阶梯价格相同,因此在模型中添加相应的约束条件。本文针对该省网供销系统,细分出三类案例进行求解和讨论。第一类是不考虑客户类型的优化,即忽略3个客户的类型特征,也可认为3个客户为三种独立类型的客户;

表2 客户销售气量上下限

Table 2 Upper and lower limits on the volume of gas sold by customers

客户	气量下限/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	气量上限/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$
1	0	5152.70
2	0	4523.48
3	0	4139.49

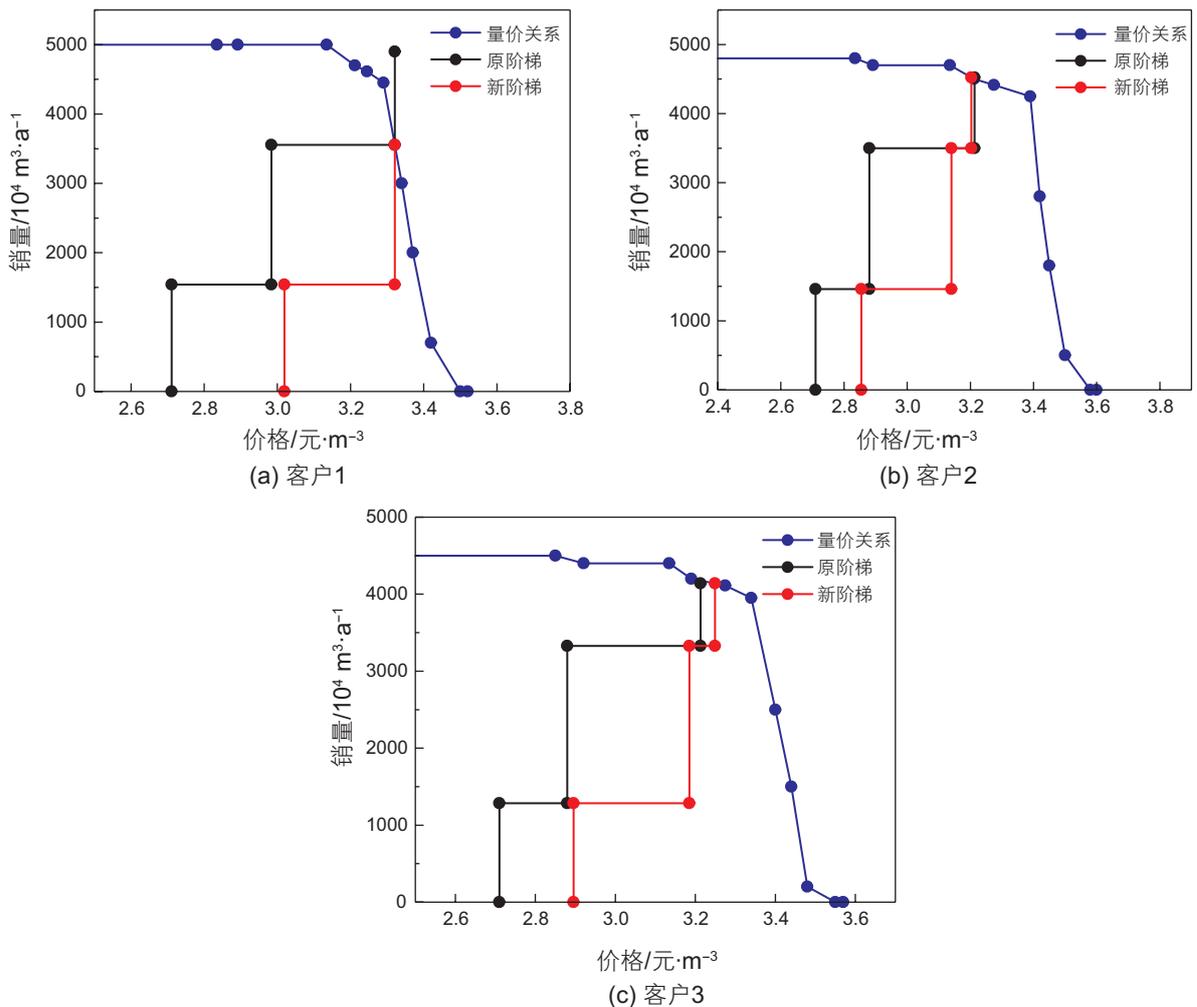


图8 各客户优化前后的阶梯价格方案
Fig. 8 Ladder price scheme before and after optimization in each client

第二类是规定了客户的类型,即客户类型已知,认为客户2和客户3属于同一类型,且与客户1区分开;第三类是按输入的原始阶梯价格(即合同价格)是否相同,由程序决定是否增加同种类型约束。

本节中首先针对第一类不考虑客户类型的优化结果进行讨论,分析在量价关系约束下阶梯价格方案优化前后的变化。然后对三类案例的计算结果进行统一讨论,分析对客户类型增加约束后优化结果的变化。

在不考虑客户类型的案例下,基于Python语言编程,利用GUROBI求解器对所建立的量价耦合优化模型及算法进行求解,得到了3个客户优化后的阶梯价格方案(图8),3个客户优化后各自的销量依次为3553.84万 m^3 、4523.48万 m^3 、4139.49万 m^3 。

由图8可以看出,客户1只针对前两个阶梯开展了优化,这是由于最后一个阶梯的原价格超出了该客户的承受能力,即在客户量价关系曲线右侧。优化后的新阶梯价格与原阶梯价格相比,两个阶梯的价格均有所上升,该客户对应的销售收入(阶梯曲线与纵坐标组成的面积)明显得到了提升。客户2同客户1一致,前两个阶梯的价格均得到了提升,最后一个阶梯优化后的新阶梯价格与原阶梯价格相比有所降低,但

是在该新价格下对应客户量价关系曲线的购气量达到了客户2的气量上限,所产生的总销售收入得到了提升。客户3的优化结果则是3个阶梯的价格均得到了提升,说明新阶梯价格方案充分利用了客户的量价关系对应的购气能力。通过这3个客户的优化结果可以看出,不考虑客户量价关系时的所制定的合同价格方案要么是没有充分利用客户的购气能力,要么是超过了客户的购气能力,考虑客户量价关系后,优化得到的新价格方案基本是围绕着客户量价关系制定,总体的销售收入得到了提升。

对客户类型增加相应约束后,得到了第二类和第三类案例下的优化结果。三类案例下各客户优化前后的阶梯价格方案(表3)以及最优销量和总效益(表4)。此外,为了便于对比优化的效果,本文分析了在客户量价关系下保持原始阶梯价格方案固定不变时该省网供销系统的总效益(表4)。

从表3可以看出,当考虑客户2和客户3为同一类型时,两个客户各阶梯的价格数值相等,且价格向同等阶梯下价格较低的客户2靠齐,目的是在保证效益最大化的同时,防止价格歧视现象,降低原先价格高的客户的阶梯价格。同样,当客户原始阶梯价格相

表3 多客户量价耦合优化前后价格方案对比

Table 3 Comparison of ladder price schemes before and after optimization of multi-customers volume-price coupling

算例类型	客户	阶梯1			阶梯2			阶梯3		
		流量点	原价格	新价格	流量点	原价格	新价格	流量点	原价格	新价格
不考虑客户类型	1	1541.8728	27 110	30 190.02	3553.8428	29 840	33 209.0197	4900	33 210	33 210
	2	1460	27 110	28 546.88	3500	28 800	31 401.5654	4108.65	32 130	32 029.5967
	3	1285	27 110	28 957.71	3328	28 800	31 853.4820	4000	32 130	32 490.5516
客户类型已知	1	1541.8728	27 110	30 190.02	3553.8428	29 840	33 209.0197	4900	33 210	33 210
	2	1460	27 110	28 546.88	3500	28 800	31 401.5654	4108.65	32 130	32 029.5967
	3	1285	27 110	28 546.88	3328	28 800	31 401.5654	4000	32 130	32 029.5967
客户类型未知	1	1541.8728	27 110	28 546.88	3553.8428	29 840	33 209.0197	4900	33 210	33 210
	2	1460	27 110	28 546.88	3500	28 800	31 401.5654	4108.65	32 130	32 029.5967
	3	1285	27 110	28 546.88	3328	28 800	31 401.5654	4000	32 130	32 029.5967

(注:各阶梯流量点单位为 10^4m^3 ;各阶梯价格单位为元/ 10^4m^3)

表4 多客户量价耦合优化结果

Table 4 Multi-customer volume-price coupling optimization results

客户	不考虑客户类型		客户类型已知		客户类型未知		阶梯价格固定		量价耦合优化后总效益提升幅度
	计算销量/ $10^4 \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	总效益/ 万元							
1	3553.84		3553.84		3553.84		3553.84		14.5%~17.2%
2	4523.48	18871.9	4523.48	18 689.3	4523.48	18 436	4523.48	16 095.68	
3	4139.49		4139.49		4139.49		4139.49		

同时,对应的新阶梯价格相等。例如三个客户的第一段阶梯的原阶梯价格都为 27 110 元/万 m³,当不考虑客户类型时,三个客户优化后的新阶梯价格分别为 30 190.02 元/万 m³、28 546.88 元/万 m³、28 957.71 元/万 m³;当考虑客户类型且未知时,三个客户优化后的新阶梯价格均为 28 546.88 元/万 m³,且向不考虑客户类型时优化后阶梯价格低的客户 2 靠齐。同样,客户 2 与客户 3 的第二段阶梯的旧阶梯价格都为 28 800 元/万 m³,考虑客户类型时认为两个客户为同一类型,优化后的新阶梯价格均为 31 401.5654 元/万 m³,且向不考虑客户类型时优化后阶梯价格低的客户 2 靠齐。该优化结果满足实际约束,所得方案较为合理,验证了该模型的准确性。

从表 4 前三种算例优化结果的对比可以看出,随着客户类型限制的增加,尽管客户销量未发生变化,但是模型中省网供销系统的总效益越来越低,这是由于客户类型的限制,优化模型的约束增加,可行域减少,最优解(阶梯价格)的值便相对降低。表 4 中第四列为按照原始阶梯价格方案固定进行销售情况下该省网供销系统产生的销量和总效益结果,将前三种算例计算出的总效益与其相比较,可以看出开展量价耦合优化后该省网供销系统的总效益得到了较大的提升,总效益提高了 14.5%~17.2%。

4 结论

针对天然气销售公司原始阶梯气价制定不合理,没有充分考虑气价与客户需求相互影响的问题,本文聚焦天然气销售环节,考虑节点流量平衡约束、各环

节气量上下限约束、客户调价空间、阶梯价格约束、客户量价关系约束等,以天然气销售公司所获利润最大为目标,建立了考虑量价关系的天然气量价耦合优化模型,可同时对客户销量以及价格方案进行联动优化,使用 GUROBI 求解器进行求解,给出量化的价格策略和销量策略,得到如下结论。

(1)利用所开发的天然气量价耦合非线性优化模型及算法针对某省网的多气源多客户的大型供销模型(10 个气源、121 个客户)进行求解,该混合整数非线性优化模型包含 515 个连续变量、884 个整数变量,求解规模较大,算法计算时间不超过 5 秒,具有较高的求解效率。

(2)通过对优化前后的阶梯气价方案分析可知,不考虑客户量价关系时的所制定的合同价格方案存在没有充分利用客户的购气能力或是远远超过了客户的购气能力的瓶颈问题,考虑客户量价关系后,优化得到的新价格方案基本是围绕着客户量价关系制定。针对某省网多气源多客户的供销系统,与阶梯价格方案固定的销售情况对比,总效益提升了 14.5%~17.2%,可见本文所形成的优化模型及算法具有较好的优化效果。

(3)本文提出的针对客户类型的分情况、分类别优化研究,对销售环节的精细优化具有一定参考意义,可用于销售公司与客户在价格复议时推荐调价方案,并在签订天然气销售合同及调整计划时提供借鉴。

最后,建议各销售公司在制定阶梯气价方案时,应坚持公平、公正、公开的原则,合理设置阶梯气量和价格,根据本省的天然气供应链结构以及各个客户的购气需求,及时调整气价,以保障客户和销售公司双方的利益,与客户建立互利双赢、长期合作的良好关系。

参考文献

- [1] 国家能源局石油天然气司,国务院发展研究中心资源与环境政策研究所,国土资源部油气战略研究中心.中国天然气发展报告 2022[G].北京:石油工业出版社,2022.[The Oil and Gas Department of the National Energy Administration, the Resource and Environmental Policy Research Institute of the Development Research Center of the State Council, and the Oil and Gas Strategy Research Center of the Ministry of Land and Resources. China natural gas development report 2022 [G]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.]
- [2] 国家能源局石油天然气司,国务院发展研究中心资源与环境政策研究所,国土资源部油气战略研究中心.中国天然气发展报告 2021[G].北京:石油工业出版社,2021.[The Oil and Gas Department of the National Energy Administration, the Resource and Environmental Policy Research Institute of the Development Research Center of the State Council, and the Oil and Gas Strategy Research Center of the Ministry of Land and Resources. China natural gas development report 2021 [G]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.]
- [3] 国家能源局石油天然气司,国务院发展研究中心资源与环境政策研究所,国土资源部油气战略研究中心.中国天然气发展报告 2020[G].北京:石油工业出版社,2020.[The Oil and Gas Department of the National Energy Administration, the Resource and Environmental Policy Research Institute of the Development Research Center of the State Council, and the Oil and Gas Strategy Research Center of the Ministry of Land and Resources. China natural gas development report 2020 [G]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.]
- [4] 油气战略研究中心.中国天然气发展报告 2016[G].北京:石油工业出版社,2016.[Oil and Gas Strategic Research Center. China

- natural gas development report 2016 [G]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.]
- [5] 陈蕊, 孙文字, 吴珉頔. 国家管网公司成立对中国天然气市场竞争格局的影响[J]. 天然气工业, 2020, 40(03): 137–145. [CHEN R, SUN T Y, WU M J. Influence of the establishment of the National Oil & Gas Pipeline Network Corporation on the competition pattern of natural gas market in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(03): 137–145.]
- [6] 刘剑文, 杨建红, 王超. 管网独立后的中国天然气发展格局[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 132–140. [LIU J W, YANG J H, WANG C. Natural gas development pattern in China after pipeline network independence[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 132–140.]
- [7] 乔佳, 丁斌, 姜鑫, 等. 天然气消费影响因素模型构建与应用分析[J]. 煤气与热力, 2023, 43(04): 13–17+26. [QIAO J, DING B, JIANG X, et al. Construction and application analysis of influencing factors model of natural gas consumption[J]. GAS & HEAT, 2023, 43(04): 13–17+26.]
- [8] 张培鑫. 基于多主体动态博弈的天然气定价模型研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018. [ZHANG P X. Research on natural gas pricing model based on multi agent dynamic game theory [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.]
- [9] 孙慧, 杨雷, 都兴恺. 中国天然气产业链优化的思路与建议[J]. 油气与新能源, 2023, 35(01): 1–7+16. [SUN H, YANG L, DU X K. Ideas and suggestions on optimization of natural gas industry in China[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(01): 1–7+16.]
- [10] 左丽丽, 戴材炜, 赵思睿, 等. 分枝定界法与内点法耦合的含环路输气管网运行优化[J]. 油气储运, 2023, 42(3): 343–351. [ZUO L L, DAI C W, ZHAO S R, et al. Optimization on operation of gas pipeline network with cyclic structures by coupling branch-and-bound method with interior point method[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(3): 343–351.]
- [11] MENG Y Z, CHEN R R, DENG T H. Two-stage robust optimization of power cost minimization problem in gunbarrel natural gas networks by approximate dynamic programming[J]. Petroleum Science, 2022, 19(5): 21.
- [12] SU H, ZIO E, ZHANG J J, et al. A method for the multi-objective optimization of the operation of natural gas pipeline networks considering supply reliability and operation efficiency[J]. Computers & Chemical Engineering, 2019, 131: 106584.
- [13] 王馨艺, 王淼, 冯瑶, 等. 基于事故工况下的天然气干线管道供气可靠性评价[J]. 油气储运, 2019, 38(04): 392–397. [WANG X Y, WANG M, FENG Y, et al. Evaluation on the gas supply reliability of gas trunk pipelines based on accident condition[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(4): 392–397.]
- [14] SANAYE S, MOHMOUDIMEHR J. Optimal design of a natural gas transmission network layout[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(12): 2465–2476.
- [15] 何能家, 周军, 张戴新, 等. 天然气管输容量分配优化决策研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2023, 38(4): 71–80+87. [HE N J, ZHOU J, ZHANG D X, et al. Research on optimization decision of natural gas pipeline capacity allocation[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science), 2023, 38(4): 71–80+87.]
- [16] 步亚冉, 左丽丽, 吴长春, 等. 进口/出口计费模式下天然气管网输入/输出能力验证的两阶段鲁棒模型[J]. 石油科学通报, 2023, 05: 671–681. [BU Y R, ZUO L L, WU C C, et al. A two-stage robust model for verifying the input/output capacity of a gas pipeline network under entry/exit tariff mode. Petroleum Science Bulletin, 2023, 05: 671–681.]
- [17] GABRIEL S A, ZHUANG J F, KIET S. A large-scale linear complementarity model of the North American natural gas market[J]. Energy Economics, 2005, 27(4): 639–665.
- [18] RIOUX B, GALKIN P, MURPHY F, et al. The economic impact of price controls on China's natural gas supply chain[J]. Energy Economics, 2019, 80: 394–410.
- [19] HAMEIM, FARAHANIRZ, HUSEINIMM, et al. A distribution planning model for natural gas supply chain: A case study[J]. Energy Policy, 2009, 37(3): 799–812. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.10.030.
- [20] 陈传胜, 周军. 基于用户满意度的天然气购销决策优化[J]. 油气储运, 2022, 41(10): 1225–1234. [CHEN C S, ZHOU J. Optimization of natural gas purchase and sales decision based on user satisfaction [J] Oil and Gas Storage and Transportation, 2022, 41 (10): 1225–1234.]
- [21] 王梦茜, 张亚, 陈东锋, 等. 柴油批零一体营销量价优化建模与应用[J]. 国际石油经济, 2020, 28(09): 79–83. [WANG M Q, ZHANG Y, CHEN D F, et al. Modeling and application of volume and price optimization for diesel wholesale and retail integrated marketing [J] International Petroleum Economy, 2020, 28 (09): 79–83.]
- [22] 邢文婷, 张宗益, 吴胜利. 居民阶梯气价优化模型构建[J]. 价格理论与实践, 2015(12): 164–166. [XING W T, ZHANG Z Y, WU S L. Construction of an optimization model for residential ladder gas prices [J]. Price Theory and Practice, 2015 (12): 164–166.]
- [23] 初保驹, 朱少林. 新电改背景下阶梯分时电价模型优化研究[J]. 价格理论与实践, 2020(02): 43–46+174. [CHU B J, ZHU S L. Research on the optimization of the step time of use electricity price model under the background of the new electricity reform [J]. Price Theory and Practice, 2020 (02): 43–46+174.]
- [24] 丁涛, 郭庆来, 柏瑞, 等. 考虑风电不确定性的区间经济调度模型及空间分支定界法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3707–3714. [DING T, GUO Q L, BAI R, et al. Interval economic dispatch model with uncertain wind power injection and spatial branch and bound method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3707–3714.]