

文章编号: 1000-8241(2017)02-0185-07

基于广义 Nash 均衡模型的管道运输均衡配置

高玉洁 梁丽萍 闫志闯

太原理工大学经济管理学院

摘要: 为了利用有限的管道网络资源来实现天然气的均衡配置,以运营商利润最大化为目标函数,天然气运输量为约束条件,建立并求解基于广义 Nash 均衡理论的天然气管道运输模型。该模型突破了传统 Stackelberg 博弈中市场参与者之间明显的行动顺序,突出了运营商之间相互影响、相互合作的关系,实现了天然气资源均衡配置的目的,提高了天然气的利用价值,为天然气上游生产企业、管道运营企业与终端销售企业进行市场判断以及制定生产销售决策提供帮助。数值算例表明:利用广义 Nash 均衡理论不但可以准确客观地为天然气市场参与者提供定量的决策信息,而且算法简便,实用性强,为我国天然气市场化改革提供了可行方法和理论依据。(图 3,表 2,参 22)

关键词: 管道运输; 均衡配置; 天然气; 光滑牛顿法

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.02.010

网络出版时间: 2016-9-6 8:44:43

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20160906.0844.006.htm>

Balanced distribution of pipeline transportation based on generalized Nash equilibrium model

GAO Yujie, LIANG Liping, YAN Zhichuang

College of Economics and Management, Taiyuan University of Technology

Abstract: In order to realize balanced natural gas distribution by using the limited resources of pipeline networks, a natural gas pipeline transportation model based on the generalized Nash equilibrium theory was established and then solved by taking the operators' profit maximization as the objective function and the natural gas transport volume as the constraint condition. This model breaks through the obvious action sequence of market participants in the traditional Stackelberg game and highlights the interactive and cooperative relationship between operators, so that natural gas resource is distributed in a balanced pattern and utilized in a better way. It is contributive for the upstream production enterprises, pipeline operators and terminal sales companies to conduct market judgments and make production and marketing decisions. This model is applied to a numerical example. It is shown that the generalized Nash equilibrium theory is convenient and practical and can provide the natural gas market participants with the quantitative decision information accurately and objectively. It provides the feasible method and theoretical basis for the reform of natural gas market in China. (3 Figures, 2 Tables, 22 References)

Key words: pipeline transportation, balanced distribution, natural gas, smoothing Newton method

随着全球科技与经济的飞速发展,天然气作为当今高效清洁的能源之一,其需求量不断增大。据国际能源组织(IEA)统计,世界天然气消费量以年均 2.6% 的速度不断增加,预计 2035 年世界天然气贸易总量将达到 $1.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。我国 93% 的已探明天然气地质储量分布在岩性地层、盆地深层(塔里木、柴达木盆地)及海域(渤海、东海)等领域。

管道运输因具有安全、节能、低耗等特点成为天然气通向市场的主要运输方式^[1-2]。在天然气需求快速增长的情形下,将有限的管道网络资源进行均衡使用配置是管道运输中将面临的主要问题。因此,气体运输优化设计是实施管道建设维护的基础,是完善天然气管输价格机制、降低库存成本和分销成本的前提。研究我国天然气管道运输均衡有利于政府调控市场,

降低国民能源消费支出,具有重要的现实意义。

O' Neill^[3-9]等从成本最小化或经济利益最大化的角度建立了天然气管道运输均衡配置的数学规划模型,对气体运输流量的配置进行了合理规划,并对运输价格进行了预测;丁浩等^[10-17]提出了基于 Stackelberg 博弈的天然气管道运输两阶段动态博弈定价模型。Stackelberg 博弈是一种顺序博弈,市场参与者在进行决策时存在明显的顺序性,而在私营化的管道运输系统中运营商之间没有明显的行动顺序,是一种相互影响的非合作博弈。基于此,利用广义 Nash 均衡理论

建立了由生产商、管道运营商、存储运营商以及市场营销商构成的管道运输均衡模型。

1 问题描述及假设条件

天然气管道运输系统由 P 个生产商、 R 个存储运营商、 M 个市场营销商及一个管道运营商构成(图 1)。市场参与者在追求利润最大化或成本最小化的过程中,通过不同参与者之间的自由竞争和同类参与者的交互达到均衡状态。

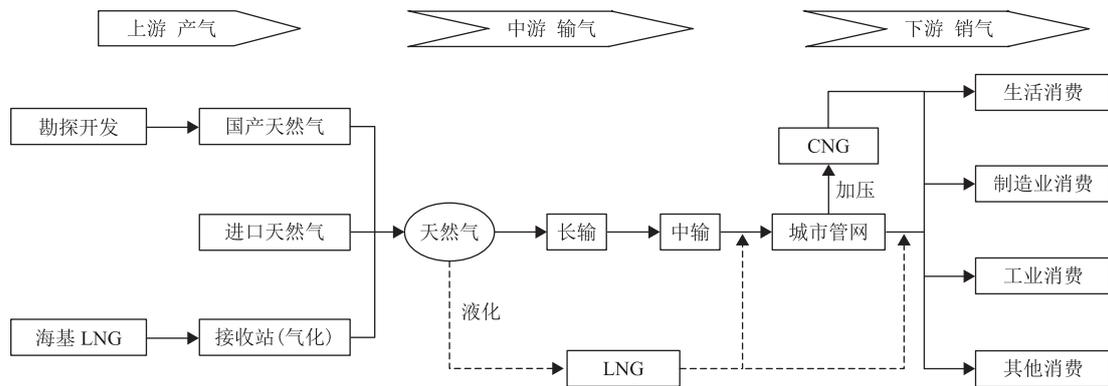


图 1 天然气管道运输系统构成示意图

为了便于模型的建立,对天然气管道运输模型作如下假设:

(1)天然气管道运输系统 $G=[N, L(n)][N$ 为生产或消费节点, $L(n)$ 为管道的集合],定向弧 $l \in L(n)$ 的两端分别为生产节点与消费节点。其中,生产商位于生产节点,存储商、销售者及消费市场均位于消费节点。

(2)在天然气管道运输系统中,假设气体的运输周期为一年,根据用户对天然气的不同需求将一年划分为两个阶段 $s=1, 2$ 。 $s=1$, 为 4—10 月,表示气体消费低谷阶段; $s=2$, 为 11 月至次年 3 月,表示气体消费高峰阶段。

(3)天然气消费市场中用户对气体的需求弹性、价格承受能力以及供气的连续性表现出很大差异,由此可将天然气消费者的类型划分为生活消费、工业消费、制造业消费、其他消费。

2 天然气管道运输均衡模型

2.1 生产商模型

对于任意的生产商 $p \in P$, 建立其优化模型。

目标函数:

$$\text{Max} \sum_{s=1}^2 [d_s \lambda_{ns} q_{ps} - d_s f_p(q_{ps})] \quad (1)$$

约束条件:

$$q_{ps} \leq \bar{q}_p \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^2 d_s q_{ps} \leq \eta_p \quad (3)$$

其中式(2)为流量约束,式(3)表示生产商 p 生产气体的数量不超过其预测值。

式中: q_{ps} 为生产商 p 在阶段 s 的气体生产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; λ_{ns} 为位于节点 n 处的生产商在阶段 s 销售气体的单价, $\text{元}/\text{m}^3$; d_s 为阶段 s 的天数; $f_p(q_{ps})$ 为生产商的生产成本函数, $10^3 \text{ 元}/\text{d}$; \bar{q}_p 为生产商的产量最大值, 10^4 m^3 ; η_p 为生产商对一年内气体产量的预测值, 10^4 m^3 。

2.2 管道运营商模型

目标函数:

$$\text{Max} \sum_{s=1}^2 (d_s \tau_{ls} f_{ls} + d_s \tau_{ls}^{\text{reg}} f_{ls}) \quad (4)$$

约束条件:

$$f_{ls} \leq \bar{f}_l \quad (5)$$

其中,式(5)为流量约束。

式中: τ_{ls} 为管道运营商在阶段 s 沿弧段 l 所收取的管道运输费用的单价, $\bar{\text{元}}/\text{m}^3$; f_{ls} 为生产商在阶段 s 沿弧段 l 输送的气体, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; \bar{f}_l 为弧段 l 的管道气体容量最大值, 10^4 m^3 。

2.3 存储运营商模型

对于任意的存储运营商 $r \in R$, 建立优化模型。

目标函数:

$$\text{Max}[d_2 \gamma_{n2} x_{r2} - d_1 f_r (\sum_{l \in L(n)} g_{lr}) - \sum_{l \in L(n)} d_1 (\tau_{l1} + \tau_{l1}^{\text{reg}} + \lambda_{n1}) g_{lr}] \quad (6)$$

约束条件:

$$d_2 x_{r2} = d_1 \sum_{l \in L(n)} g_{lr} (1 - l_l) (1 - l_r) \quad (7)$$

$$x_{rs} \leq \bar{x}_r \quad (8)$$

$$\sum_{l \in L(n)} g_{lr} \leq \bar{g}_r \quad (9)$$

$$d_2 x_{r2} \leq \bar{k}_r \quad (10)$$

式(7)为流量守恒, 式(8)~式(10)为流量约束。

式中: γ_{ms} 为存储运营商销售气体的单价, $\bar{\text{元}}/\text{m}^3$; x_{rs} 为存储运营商的日销售量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; g_{lr} 为生产商沿弧段 l 运输给存储运营商 r 气体的流量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; \bar{x}_r 为存储运营商在用气高峰提取气体的最大量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; \bar{g}_r 为存储运营商购买气体的最大值, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; \bar{k}_r 为最大存储量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; $f_r (\sum_{l \in L(n)} g_{lr})$ 为存储运营商 r 的成本函数, $10^3 \text{ 元}/\text{d}$; l_l 为气体沿管道运输的损失率; l_r 为存储运营商 r 储存气体的损失率; τ_{ls}^{reg} 为政府宏观调控费用, $\bar{\text{元}}/\text{m}^3$ 。

2.4 市场营销商模型

市场营销商与需求市场有着直接的联系, 根据决定市场价格的逆需求函数可计算出市场营销商的利润, 对于任意的市场营销商 $m \in M$, 建立其优化模型。

目标函数:

$$\text{Max} \sum_{k=1}^4 \left\{ [d_1 f_{n1}^k (h_{m1}^k + h_{-m1}^k) h_{m1}^k + d_2 f_{n2}^k (h_{m2}^k + h_{-m2}^k + \mu_{m2}^k + \mu_{-m2}^k) (h_{m2}^k + \mu_{m2}^k)] - \left[\sum_{s=1}^2 \sum_{l \in L(n)} d_s (\tau_{ls} + \tau_{ls}^{\text{reg}} + \lambda_{ns}) h_{lms} \right] + d_2 r_{n2} \mu_{m2} \right\} \quad (11)$$

约束条件:

$$\sum_{k=1}^4 d_s h_{ms}^k - \sum_{l \in L(n)} d_s (1 - l_l) h_{lms} = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^4 d_s \mu_{ms}^k - d_s \mu_{ms} = 0 \quad (13)$$

式(12)、式(13)为流量守恒。

式中: μ_{ms} 为市场营销商购买存储气体的数量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; h_{ms} 为市场营销商从生产商处购买气体的数量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; h_{ms}^k 为市场营销商向需求部门 k 销售生产气体的数量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; μ_{ms}^k 为市场营销商向需求部门 k 销售存储气体的数量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; $f_{ns}^k (h_{m1}^k + h_{-m1}^k)$ 、 $f_{ns}^k (h_{m2}^k + h_{-m2}^k + \mu_{m2}^k + \mu_{-m2}^k)$ 为销售者与需求部门 k 在阶段 s 的逆需求函数。

需要特别注意的是, 目标函数中出现的逆需求函数取需求部门 k 和阶段 s (4-10月), 为了便于计算, $f_{n1}^k (h_{m1}^k + h_{-m1}^k)$ 表示市场营销商 m 向需求部门 k 供应的气体数量为 h_{m1}^k , 其他市场营销商向需求部门 k 供应的气体数量为 h_{-m1}^k 。

3 广义 Nash 均衡问题理论分析及求解算法

3.1 理论分析

受 Wardrop^[18] 个体优化和全局优化均衡理论的启发, 在天然气管道运输系统中, 如果各个运营商在运输气体流量中成本相等且最小, 此时整个管道运输系统达到个体优化均衡点; 如果在天然气管道运输系统中总边际成本在已运输气体流量中相等且最小, 此时管道运输系统达到全局优化的均衡点。实际上, 天然气管道运输系统中个体优化的均衡点即广义 Nash 均衡点, 而全局优化均衡点则是局外人(政府、气体行业等)对整个管道运输系统均衡进行协调和控制。

广义 Nash 均衡^[19-22] 问题一般可描述为以下形式:

目标函数:

$$\text{Max} F^v(x^v, x^{-v}) \quad (14)$$

约束条件:

$$h^v(x^v, x^{-v}) \leq 0 \quad s^v(x^v) \leq 0 \quad (15)$$

设 x^* 是一个广义 Nash 均衡解, 则存在数对 $(\mu^*_v, \lambda^*_v) \in R^v R^{m^v}$, 使得 $(x^*_v, \mu^*_v, \lambda^*_v)$ 满足 Karush-Kuhn-Tucker 条件:

$$\partial_x L_v[(x^v, x^{*v}), \mu_v, \lambda_v] = 0 \quad (16)$$

$$\mu_v[-h^v(x^v, x^{*v})] = 0 \quad (17)$$

$$\lambda_v[-s^v(x^v)] = 0 \quad (18)$$

其中: $L_v(x, \mu_v, \lambda_v) = F^v(x) + \mu^T h^v(x) + \lambda^T s^v(x)$ 是第 v 个参与者的极小化问题的 Lagrange 函数。综合上述 K 个 Karush-Kuhn-Tucker 条件并引入 Fischer-Burmeister(SFB) 函数 $[\phi_{\text{SFB}}(\varepsilon, a, b) = a + b - \sqrt{\varepsilon^2 + a^2 + b^2}]$, 等式可写为:

$$E(\varepsilon, x, \mu, \lambda) = \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \partial_x L(x, \mu, \lambda) \\ \phi_{\text{SFB}}[\varepsilon, \mu, -h(x)] \\ \phi_{\text{SFB}}[\varepsilon, \lambda, -s(x)] \end{pmatrix} = 0 \quad (19)$$

在此, 如果常数 $\varepsilon > 0$ 足够小, 则 $E(\varepsilon, x, \mu, \lambda)$ 是一个光滑的映射。从而求解广义 Nash 均衡问题通过互补问题转化为非线性方程组问题, 涉及光滑牛顿算法求解。

3.2 求解算法

采用光滑牛顿算法对上述问题进行求解, 光滑牛顿法的主要原理是运用 Fischer-Burmeister 函数的 Kanzow 光滑化函数将均衡解满足的 KKT 条件转化为等价的非光滑方程组问题 $E(\varepsilon, y) = 0$ 。在一定条件下, 证明了 $\varepsilon \neq 0$ 时 E 的雅克比矩阵以及 $E = 0$ 时 E 的 Clarke 广义雅克比的非奇异性, 进而求解该非光滑方程组。下面给出求解方程组 $E(\varepsilon, y) = 0$ 的光滑牛顿算法。

设 $\phi(\varepsilon, y) := \|E(\varepsilon, y)\|^2$, 令 $\bar{\varepsilon} > 0, r \in (0, 1)$ 满足 $r\bar{\varepsilon} < 1$, 定义 $\theta(\varepsilon, y) := r \min\{1, \phi(\varepsilon, y)\}$ 。

步骤 1: 选取常数 $\delta > 0, \sigma \in (0, \frac{1}{2})$, 令 $\varepsilon_0 := \bar{\varepsilon}$, 给定

初始点 $y_0 \in R^n \times R^l \times R^m$, 置 $k := 0$ 。

步骤 2: 若 $E(\varepsilon_k, y^k) = 0$ 则停止。否则, 令 $\theta_k := \theta(\varepsilon_k, y^k)$ 。

步骤 3: 通过 $E(\varepsilon_k, y^k) + JE(\varepsilon_k, y^k)(\Delta \varepsilon_k, \Delta y^k) = \theta_k \begin{pmatrix} \bar{\varepsilon} \\ 0 \end{pmatrix}$ 计算 $(\Delta \varepsilon_k, \Delta y^k)$ 。

步骤 4: 令 l_k 满足 $\phi(\varepsilon_k + \delta^l \Delta \varepsilon_k, y^k + \delta^l \Delta y^k) \leq [1 - 2\sigma(1 - r\bar{\varepsilon})\delta^l] \phi(\varepsilon_k, y^k)$ 的最小非负 l 。置 $(\varepsilon_{k+1}, y^{k+1}) := (\varepsilon_k + \delta^l \Delta \varepsilon_k, y^k + \delta^l \Delta y^k)$

步骤 5: 令 $k = k + 1$, 转入步骤 2。

4 数值分析

目前我国天然气管道运输业处于市场垄断状态, 故无案例对上述模型进行实证分析。该模型选择模拟数据代入得出均衡解。假设天然气供应链网络有一个生产节点 $n_1(l)$, 一个消费节点 $n_2(l)$, 连接这两个节点的管道弧段为 l 。生产节点处有 2 个生产商, 消费节点处有 2 个存储运营商、2 个市场营销商、4 个需求部门。假设成本函数为数量变量的二次函数形式: $a_1 x^2 + a_2 x$ 。

将各运营商的成本函数系数分别记为: 生产商, $a_1 = 0.008, a_2 = 0.006$; 存储运营商, $a_1 = 0.003, a_2 = 0.04$ 。

消费者需求函数系数(表 1)形式为: $A - B f_{ns}^k (h_{m1}^k + h_{-m1}^k), A - B f_{ns}^k (h_{m2}^k + h_{-m2}^k + \mu_{m2}^k + \mu_{-m2}^k)$ 。表 2 中列出了模型中的其他参数系数。

表 1 天然气管道运输模型中消费者需求函数系数

需求部门	A		B	
	s=1	s=2	s=1	s=2
生活消费	410	710	30	100
制造业消费	380	750	46	60
工业消费	1 910	1 270	300	180
其他消费	1 290	750	130	96

表 2 天然气管道运输模型中参数系数

参数	数值	参数	数值
\bar{q}_p	10 000	\bar{k}_r	10 000
$prod_p$	2 000	l_i	0.05
\bar{f}_i	10 000	l_r	0.01
\bar{x}_r	20 000	τ_{ls}^{reg}	0.45
\bar{s}_r	20 000	—	—

在政府补贴(0.45 元/m³)和运营商的共同作用下, 可得均衡配置结果(图 2、图 3)。在天然气管道运输达到均衡状态时, 管道运营商的运输价格为 0, 一方面政府的补贴可以弥补管道运营商的亏损, 另一方面我国管道运营商与生产商属于同一利益群体, 因此管道运营商不会出现亏损。从气体的消费结构来看, 工业消费部门用气比较稳定, 气体均衡价格分别为 3.257 元/m³、4.97 元/m³; 生活消费部门在 11—3 月气体消费量最大为 38.44×10^4 m³。此外, 在天然气消费量波动的情况下, 仍可以采用该模型对天然气进行重新配置, 为气体管理部门提供决策参考。

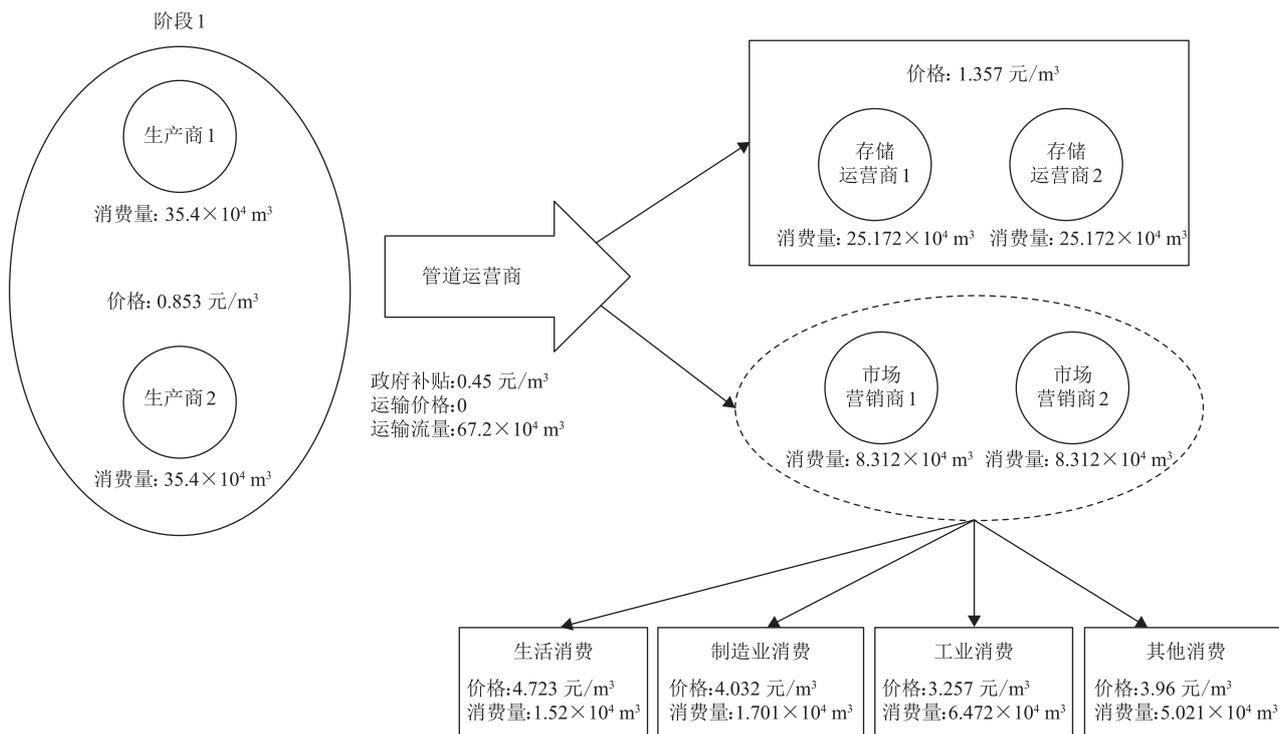


图 2 阶段 1(4-10月)气体价格流量关系图

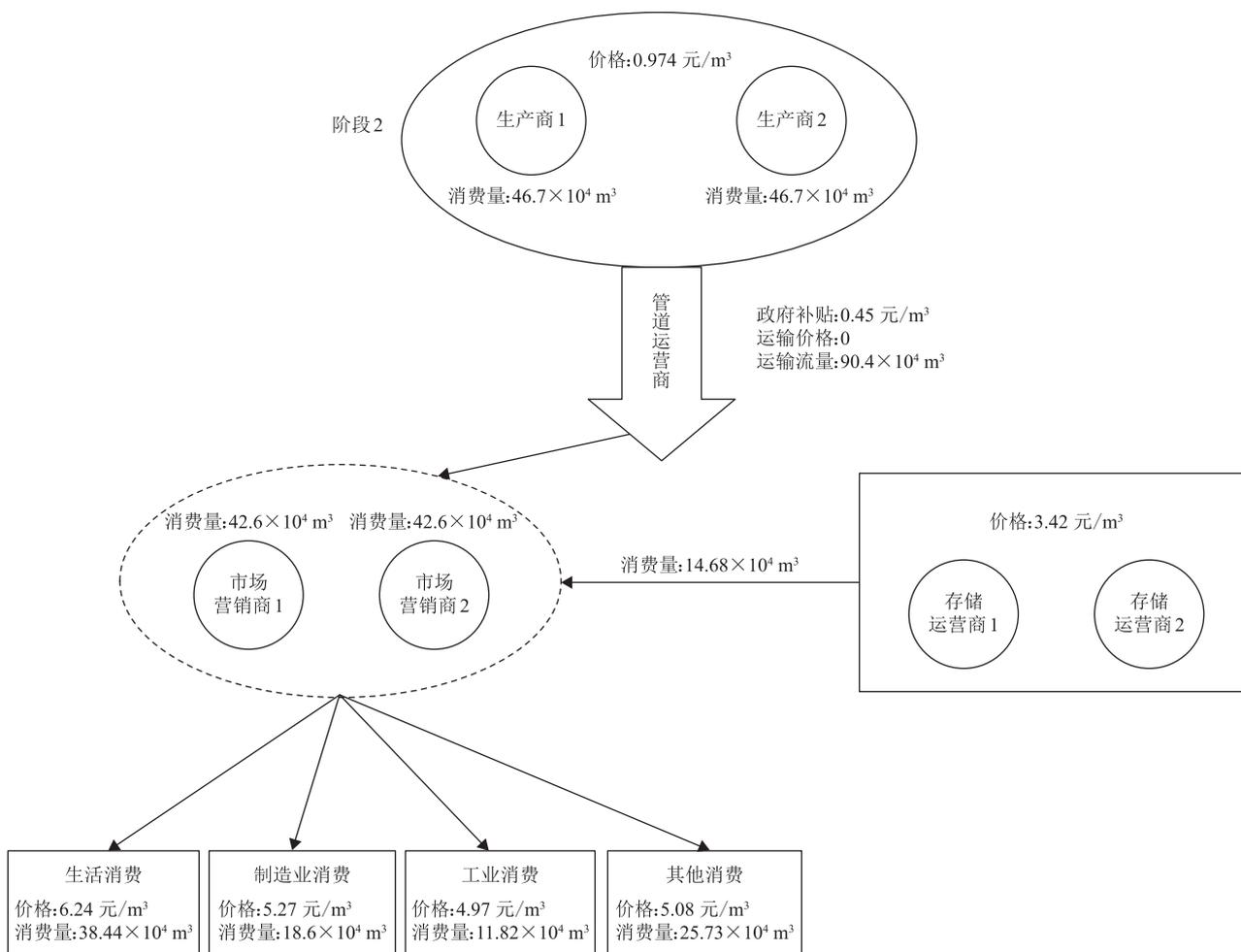


图 3 阶段 2(11月至次年3月)气体价格流量关系图

5 结束语

天然气运输由生产商、管道运营商、存储运营商以及市场营销商的运输工作共同组成,是庞大和复杂的系统性工作。从运营商角度出发,建立了天然气管道运输均衡模型,仿真分析了政府调控对均衡解以及运营商利润的影响,分别探究了管道运输过程中不同运营商的行为和均衡条件,采用光滑牛顿法进行了数值分析,可为政府和运营商的决策提供一定的理论依据。管道网络划分越细,计算结果越准确,但计算量也呈指数增长,因此在实际应用中可将管段进行适当的归并和简化再计算。未来的研究方向是考虑各方运营商之间信息不对称的情形,即运营商在不确定其他运营商的信息而作出的决策,以及管道运输系统中生产商的不确定性、用气需求的随机性等问题。

参考文献:

- [1] CHABRELIE M F, 张祁. 2010—2015 年世界天然气供需展望[J]. 国际石油经济, 2007, 15(6): 15-19.
CHABRELIE M F, ZHANG Q. 2010-2015 world natural gas supply and demand outlook[J]. International Oil Economy, 2007, 15(6): 15-19.
- [2] 彭莹. 天然气供应链网络均衡定价机制研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013: 12-18.
PENG Y. The study on equilibrium pricing mechanism of natural gas supply chain network[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2013: 12-18.
- [3] O'NEILL R P, WILLIARD M, WILKINS B, et al. A mathematical programming model for allocation of natural gas[J]. Operations Research, 1979(27): 857-873.
- [4] HAURIE A, ZACCOUR G, LEGRAND J, et al. A stochastic dynamic Nash-Cournot model for the European gas market[R]. Montreal: Ecole des Hautes Etudes Commerciales, 1987.
- [5] FRIESZ T L, VITON P A, TOBIN R L. Economic and computational aspects of freight network equilibrium models: A synthesis[J]. Working Papers in Regional Science, 1985, 25(1): 29-49.
- [6] WOLF D, SMEERS Y. The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm[J]. Management Science, 2000, 46(11): 1454-1465.
- [7] GABRIEL S, KIET S, ZHUANG J. A mixed complementarity-based equilibrium model of natural gas markets[J]. Operations Research, 2005, 53(5): 799-818.
- [8] GABRIEL S, ZHUANG J, KIET S. A large-scale complementarity model of the North American natural gas market[J]. Energy Economics, 2005, 27(4): 639-665.
- [9] RUUD E, GABRIEL S, FRANZISKA H, et al. A complementarity model for the European natural gas market[J]. Energy Policy, 2008, 36(4): 2385-2414.
- [10] 丁浩, 董光亮, 杜吉家. 基于 Stackelberg 微分博弈模型的天然气管输定价研究[J]. 河南科学, 2012, 30(4): 517-520.
DING H, DONG G L, DU J J. Research on natural gas pipeline transmission pricing based on Stackelberg differential game[J]. Henan Science, 2012, 30(4): 517-520.
- [11] 司江伟, 陈月璇, 丁浩. 天然气管道运输中两阶段动态博弈定价模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(1): 170-174.
SI J W, CHEN Y X, DING H. Two-stage dynamic game pricing model for natural gas pipeline transportation[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2010, 34(1): 170-174.
- [12] 聂光华. 基于 Stackelberg 博弈的天然气管输定价机制研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 184-188.
NIE G H. Natural gas pricing mechanism based on Stackelberg game model[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2013, 37(6): 184-188.
- [13] 刘洪军. 天然气管输定价方法研究[J]. 油气储运, 2000, 19(5): 51-53.
LIU H J. Study on pricing method for pipeline transportation of natural gas[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2000, 19(5): 51-53.
- [14] 陈月璇, 王菊娥. 竞争阶段天然气管道运输的博弈定价模型[J]. 统计与决策, 2012(21): 63-66.
CHEN Y X, WANG J E. Pricing model for natural gas pipeline transportation in competitive stage[J]. Statistics & Decision, 2012(21): 63-66.
- [15] 介翔. 不同政策措施下的天然气管道运输博弈定价分析[J]. 会计之友, 2014(7): 36-39.
JIE X. Pricing analysis of natural gas pipeline transportation

under different policy measures[J]. Friends of Accounting, 2014(7):36-39.

[16] 樊明武. 我国天然气行业的垄断性与价格机制研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 139-141.

FAN M W. An investigation of monopolization and pricing mechanism on China natural gas industry[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(6): 139-141.

[17] 彭莹, 肖建忠, 王小林, 等. 中国天然气市场均衡价格分析——基于变分不等式转换的古诺模型研究[J]. 资源科学, 2015, 37(10): 1983-1991.

PENG Y, XIAO J Z, WANG X L, et al. Equilibrium pricing of natural gas in China based on the cournot model of variational inequality transformation[J]. Resources Science, 2015, 37(10): 1983-1991.

[18] WARDROP J G. Some theoretical aspects of road traffic research[J]. Operational Research, 1953, 4(4): 72-73.

[19] 赵晶, 屈彪. 求解广义纳什均衡问题的一种下降算法[J]. 菏泽学院学报, 2010, 32(2): 1-4.

ZHAO J, QU B. A descent method for solving the generalized Nash equilibrium[J]. Journal of Heze University, 2010, 32(2): 1-4.

[20] 许吉祥, 候剑, 谭彦华, 等. 求解广义纳什均衡问题的指数型惩罚函数方法[J]. 运筹与管理, 2015, 24(1): 81-88.

XU J X, HOU J, TAN Y H, et al. Exponential penalty function method for generalized Nash equilibrium problem[J]. Operations Research and Management Science, 2015, 24(1): 81-88.

[21] 卫婴婴, 徐玲玲, 韩德仁. 惩罚框架下求解广义 Nash 均衡问题的分解算法[J]. 中国科学, 2014, 44(3): 295-305.

WEI Y Y, XU L L, HAN D R. A decomposition method based on penalization for solving generalized Nash equilibrium problems[J]. Science China, 2014, 44(3): 295-305.

[22] 蒋金广, 李靖, 屈彪. 求解广义 Nash 均衡问题的一种新算法[J]. 泰山学院院报, 2008, 30(6): 37-41.

JIANG J G, LI J, QU B. A new method of the generalized Nash

equilibrium problem[J]. Journal of Taishan University, 2008, 30(6): 37-41.

(收稿日期: 2015-12-14; 修回日期: 2017-02-01; 编辑: 杜娟)

基金项目: 国家软科学基金资助项目“煤炭富集区生态补偿政策研究”, 2014GXQ4D177。

作者简介: 高玉洁, 女, 1992 年生, 在读硕士生, 2014 年毕业于太原理工大学市场营销专业, 现主要从事组织行为学与人力资源管理研究。地址: 山西省晋中市榆次区大学街 209 号, 030600。电话: 18734867461, Email: 913408761@qq.com

下 期 要 目

双金属复合管环焊工艺及强度设计现状与趋势
.....杨专钊, 等

油气管道运行维护技术研究进展及展望
.....李莉, 等

基于 DEA 的输油管道高后果区管理效能评价
.....帅义, 等

非对称烷烃体系气液相平衡预测模型的改进
.....黄辉荣, 等

管道机器人橡胶密封碗运移力学模型
.....谭桂斌, 等

基于压力波的清管器在线定位算法
.....王雪莉, 等

油气管道生产监控系统时钟同步方案
.....杨喜良, 等

基于光纤光栅应变箍传感器的管道局部腐蚀监测
.....任亮, 等

基于分布式光纤振动传感的清管器跟踪定位方法
.....田孝忠, 等

天然气管道检测器速度控制装置研制及应用
.....臧延旭, 等