

# 考虑滞后的寡头发电商报价动态模型及其复杂性

张新华<sup>1,2</sup>, 赖明勇<sup>2</sup>, 叶 泽<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学管理学院, 湖南 长沙 410076; 2. 湖南大学经济与贸易学院, 湖南 长沙 410079)

**摘要:**在发电商报价古诺模型基础上, 运用有限理性动态与自适应动态, 建立了考虑滞后的电力报价动态模型, 然后对动态模型的稳定域、倍岔、混沌等进行仿真分析; 在此基础上, 分别分析了滞后因子与不同报价动态对发电商的平均收益的影响, 然后运用状态滞后反馈控制方法, 对滞后报价动态模型进行了混沌控制分析; 分析结果表明: 1) 引入滞后因子有利于报价系统的稳定, 但并不一定能增加发电商的收益; 2) 在均衡状态下发电商获得最大的平均收益, 在 Nash 均衡形成前, 发电商宜采用自适应动态, 但失稳后则宜采用有限理性动态; 3) 选择合适的控制参数, 可维持报价系统 Nash 均衡的稳定, 但若发电商仅考虑短期收益, 则没有积极性去采用滞后控制策略。

**关键词:** 古诺博弈; 滞后动态; 混沌控制; 报价策略; 电力市场

**中图分类号:** F224.32; TM71 **文献标识码:** A

## 1 引言

我国的电力产业化改革进行了 20 多年, 取得了一定的成绩, 但也遇到不少问题, 但逐步建立与完善电力市场的改革趋势是必然的。目前有关电力市场方面的理论研究文献很多, 这些文献多侧重从发电商报价的角度来探讨电力市场, 相对来说以电网公司为研究主体的文献不多(文献[1, 2]探讨了电网公司的购电费用与风险控制等问题), 其根本原因是即使在成熟的电力市场条件下, 电网在很大程度上内仍旧是垄断(目前我国的电网垄断除发电以外的其它所有环节的), 而对垄断的电网公司而言, 其市场行为与寡头发电商是不对称的。下文仅对电力市场条件下发电商的理性报价行为进行探讨。

在电力市场化条件下, 发电商的报价策略及其调整在一定程度上决定着其收益的多寡。由于电力产业的基础性与特殊性, 发电商收益的多少在某种意义上决定着是否有稳定与可靠电力供给, 因此研究发电商的报价策略及其报价系统的稳定性, 对电力产业化改革能否顺利进行十分重要。从理论上讲, 发电商报价既是寡头博弈, 同时也是重复博

弈, 因此对有限理性的发电商而言, 在报价中不断调整自身报价, 以寻找均衡报价策略是可能的也是必需的。

研究电力市场环境下的发电商报价策略多年来一直是一个热点问题; 其中以博弈论为基本研究方法产生了一大批研究文献(如文献[3-5])。这些文献大多将发电商的报价行为模拟成各种各样的博弈模型, 并将博弈均衡看作发电商的最优报价; 但发电商是有限理性的参与者, 在报价实践中, 实际上很难直接实现理论上的博弈均衡(Nash 均衡)。同时也有一些文献运用非博弈论方法对发电商报价策略进行了探讨, 如文献[6]从次序统计量角度探讨了该问题。

为刻画电力报价均衡的形成, 近年来从有限理性博弈与动态系统角度, 对发电商报价动态调整进行研究的文献渐多, 如文献[7]建立了输电约束下的发电商报价古诺模型, 重点比较了输电约束对均衡的影响。文献[8]运用非线性自适应动态古诺模型分析了发电机组优化出力问题。文献[9]对网络约束下的两寡头古诺博弈模型及其稳定性等进行了分析。文献[10]考虑了发电商报价中的界约束, 并运用非线性互补方法对模型进行了求解; 但上述文献都未考虑报价滞后影响及其滞后动态失稳以后的控制等问题。有限理性理论应用于经济管理的其它领域见文献[11-14], 其中文献[14]考虑了延迟(滞后)决策动态在广告模型中的应用, 但仅考虑了一类动态, 也未探讨系统失稳后的控制问题。

收稿日期: 2008-07-02; 修订日期: 2009-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70501006); 中国博士后基金资助项目(20060400259); 湖南省教育厅青年项目(07B005)

作者简介: 张新华(1973-), 男(汉族), 湖南人, 长沙理工大学管理学院副教授, 博士后, 研究方向: 电力市场方面的研究。

在发电商报价实践中,发电商在确定自己的报价策略时,不但需要考虑当期收益对下一期报价的影响,还需要考虑以往历史收益情况对报价的影响,因此现有文献中未考虑滞后的发电商报价动态与报价实践是不符的。为此,本文同时考虑了有限理性动态、自适应动态(含最优反应动态),构建了发电商报价滞后动态模型,在数值仿真基础上,比较了上述动态的优劣,并进一步探讨了报价动态系统进入分岔、混沌状态后的控制问题。论文的研究结果表明:1)发电商考虑报价的滞后影响有利于维持电力报价市场的稳定,但并不一定能增加其收益;2)发电商在 Nash 均衡状态下获得收益最大,在失稳状态下,发电商选择合适的滞后控制参数,报价系统可维持在 Nash 均衡状态;但如发电商过分考虑其短期收益,则电力报价系统可能一直处于混沌状态中。上述研究结果,为发电商报价策略的选择与动态调整,以及电力竞价市场的稳定提供了新的思路。

## 2 寡头发电商报价古诺博弈模型

设发电商  $i(i = 1, \dots, n)$  的成本函数为:

$$G_i(q_i) = \alpha + \beta_i q_i + \gamma_i q_i^2 \quad (1)$$

其中:  $\alpha, \beta_i, \gamma_i$  为成本参数,则其边际成本函数为:

$$MC_i(q_i) = \beta_i + 2\gamma_i q_i$$

由于发电商的固定成本很高,为维护电力生产的可持续性,发电商不可能以边际成本报价;为简便,假设发电商仅改变边际成本函数的截距(常数)项,即其报价  $b_i$  为:

$$b_i(q_i) = \delta + 2\gamma_i q_i \quad (2)$$

式中,  $\delta > \beta_i$  为发电商的报价策略变量。设  $p$  为市场价格,在供需均衡处有  $b_i = p$ ,则有:

$$q_i = \frac{(p - \delta)}{2\gamma_i} \quad (3)$$

为简便,下文分析中不考虑发电商的发电量约束(如发电商的均衡电量大于其最大发电量,则取最大发电量;如发电商的均衡电量小于 0,则取 0;并将剩余电量在其余发电商之间重新分配)。对上式求和,则得供给曲线:

$$p = [2Q + \sum_{i=1}^n \delta_i / \gamma_i] / \sum_{i=1}^n 1 / \gamma_i \quad (4)$$

上式中,  $Q$  为市场的电力需求;不妨设市场需求为线性曲线:

$$Q = a - bp \quad (5)$$

其中  $a, b > 0$  为需求参数;由式(4)(5),则有:

$$p = [2a + \sum_{i=1}^n \delta_i / \gamma_i] / H \quad (6)$$

其中:  $H = 2b + \sum_{i=1}^n 1 / \gamma_i$ 。上式代入式(3),则有:

$$q_i = \frac{2a + \sum_{i=1}^n \delta_j / \gamma_j}{2\gamma_i H} - \frac{\delta_i}{2\gamma_i} \quad (7)$$

设发电商的收益函数为  $\pi_i(\delta_i)$ ,则有:

$$\pi_i(\delta_i) = \frac{[2a + \sum_{i=1}^n \delta_j / \gamma_j]^2}{4\gamma_i H^2} - \beta_i \frac{2a + \sum_{i=1}^n \delta_j / \gamma_j}{2\gamma_i H} + \frac{\beta_i \delta_i}{2\gamma_i} - \frac{\delta_i^2}{4\gamma_i} - \alpha \quad (8)$$

求上式的一阶条件,则有:

$$\delta_i^*(\delta_j) = \frac{\gamma_i H}{1 + \gamma_i H} \beta_i + \frac{\gamma_i [2a + \sum_{j \neq i}^n \delta_j / \gamma_j]}{\gamma_i^2 H^2 - 1} \quad (9)$$

上式即为发电商报价的最优反应动态,通过迭代,求解上式即得发电商报价的古诺博弈均衡解:

$$\delta_i^* = \frac{\gamma_i H - 1}{\gamma_i H} \beta_i + \frac{2aH + \sum_{i=1}^n (\gamma_i H - 1) \beta_j / \gamma_j^2}{\gamma_i H [H^2 - \sum_{i=1}^n 1 / \gamma_i^2]} \quad (10)$$

显然,发电商  $i$  的最优报价策略,由竞争对手  $j$  的成本函数系数  $\gamma_j, \beta_j$  以及电力市场需求参数  $a, b$  决定。

## 3 发电商报价动态模型

考虑寡头发电商在报价中基于自己上一期边际收益的变化,来调整自己的报价策略,则有:

$$\delta_i(t+1) = \delta_i(t) + \kappa_i(\delta_i(t)) \cdot \frac{\partial \pi_i(t)}{\partial \delta_i(t)}$$

其中,  $\kappa_i(\delta_i(t))$  为报价策略调整速度,如考虑线性调整,即有  $\kappa_i(\delta_i(t)) = \kappa \cdot \delta_i(t)$ ;其中  $\kappa$  为调整速度;上述动态即有限理性调整动态。

运用式(9)简化上式,则有:

$$\delta_i(t+1) = \delta_i(t) + \kappa \cdot \delta_i(t) \cdot M_i \cdot [\delta_i^*(\delta_j) - \delta_i(t)] \quad (11)$$

其中,  $M_i = (\gamma_i^2 H^2 - 1) / (2\gamma_i^3 H^2)$ 。

如考虑发电商基于自适应动态来调整自己的报价策略,则有:

$$\delta_i(t+1) = \theta \delta_i(t) + (1 - \theta) \delta_i^*(t) \quad (12)$$

其中,  $\theta \in [0, 1)$  为自适应因子,  $\delta_i^*(t)$  为  $t$  期的最优反应报价;若  $\theta = 0$  即为最优反应动态。

### 3.1 不考虑滞后的发电商报价动态模型

若发电商在选择下一期的报价策略时,仅考虑当期报价策略对下一期的影响(即 Markov 性),并设选择式(11)报价动态的发电商有  $n_1$  家,选择式(12)报价动态的发电商有  $n_2$  家,并有  $n_1 + n_2 = n$ ,则组成一个  $n$  维的报价动态系统:

$$\begin{cases} \delta_i(t+1) = \delta_i(t) + \kappa_i \cdot \delta_i(t) \cdot M_1 \cdot [\delta_i^*(\delta_1(t)) - \delta_i(t)] \\ \dots \\ \delta_{n_1}(t+1) = \delta_{n_1}(t) + \kappa_{n_1} \cdot \delta_{n_1}(t) \cdot M_{n_1} \cdot \\ \quad [\delta_{n_1}^*(\delta_{n_1}(t)) - \delta_{n_1}(t)] \\ \delta_{n_1+1}(t+1) = \theta_{n_1+1} \delta_{n_1+1}(t) + (1 - \theta_{n_1+1}) \delta_{n_1+1}^*(\delta_{(n_1+1)}(t)) \\ \dots \\ \delta_n(t+1) = \theta_n \delta_n(t) + (1 - \theta_n) \delta_n^*(\delta_n(t)) \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $\delta_{-i}(t) = \delta_1(t), \dots, \delta_{i-1}(t), \delta_{i+1}(t), \dots, \delta_n(t)$ 。显然上述动态系统的不动点满足:

$$\begin{cases} \delta_i(t) \cdot [\delta_i^*(\delta_1(t)) - \delta_i(t)] = 0 \\ \dots \\ \delta_{n_1}(t) \cdot [\delta_{n_1}^*(\delta_{n_1}(t)) - \delta_{n_1}(t)] = 0 \\ \delta_{n_1+1}(t) = \delta_{n_1+1}^*(\delta_{(n_1+1)}(t)) \\ \dots \\ \delta_n(t) = \delta_n^*(\delta_n(t)) \end{cases}$$

上述系统共有  $2^{n_1}$  个不动点<sup>[12]</sup>,但不难证明,除 Nash 均衡点外,其余不动点对应的雅可比矩阵至少有一个大于 1 的特征根,即仅 Nash 均衡点为式(13)报价动态系统的可能稳定点。

### 3.2 考虑滞后的发电商报价动态模型

在实践中,发电商的报价策略不仅受当期报价影响,同时也受历史报价策略之影响,为此,在式子(13)基础上建立考虑滞后的报价动态模型:

$$\begin{cases} \delta_i(t+1) = \delta_i(t) + \kappa_i \cdot \delta_i(t) \cdot M_i \cdot R_i \\ \delta_j(t+1) = \theta_j \delta_j(t) + (1 - \theta_j) R_j \end{cases} \quad (14)$$

其中:

$$\begin{cases} R_i = \sum_{s_i=0}^{S_i} \omega_{s_i} [\delta_i^*(\delta_i(t-s_i)) - \delta_i(t-s_i)] \\ R_j = \sum_{k_j=0}^{K_j} \omega_{k_j} \delta_j^*(\delta_j(t-k_j)) \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $i = 1, \dots, n_1, j = n_1 + 1, \dots, n, 0 \leq \omega_{s_i} \leq 1, 0 \leq \omega_{k_j} \leq 1$  且  $\sum \omega_{s_i} = 1, \sum \omega_{k_j} = 1$  为滞后因子;  $S_i, K_j$  分别为发电商  $i, j$  的历史决策对其报价决策影响

的滞后期长。显然,当  $S_i = K_j = 0$  时,式(14)即退化为式(13)。

若记  $y_{s_i} = \delta_i(t-s_i), z_{k_j} = \delta_j(t-k_j)$ ,则式(14)报价系统转化为较式(13)更高维度的动态系统;与式(13)系统一样,其稳定性分析非常复杂<sup>[12]</sup>,但同样不难证明仅 Nash 均衡点是可能的系统稳定点。

在式(14)中,发电商的策略变量实际上有 2 个:滞后因子与调整速度。简单地本文仅考虑  $S = K = 1$  的情况,即发电商进行报价决策时仅滞后一期。进一步地假定仅考虑两发电商参与的电力竞价市场,则有:

(1)  $n_1 = 2, n_2 = 0$ ,即两发电商都采用有限理性动态对自己的报价进行调整,则有:

$$\begin{cases} \delta(t+1) = \delta(t) + \kappa_1 \cdot \delta(t) \cdot M_1 \cdot R_1 \\ \delta(t+1) = \delta(t) + \kappa_2 \cdot \delta(t) \cdot M_2 \cdot R_2 \end{cases} \quad (16)$$

其中:

$$\begin{cases} R_1 = \omega_1 [\delta^*(\delta_2(t)) - \delta_1(t)] + (1 - \omega_1) \times \\ \quad [\delta^*(\delta(t-1)) - \delta(t-1)] \\ R_2 = \omega_2 [\delta^*(\delta_1(t)) - \delta_2(t)] + (1 - \omega_2) \times \\ \quad [\delta^*(\delta(t-1)) - \delta(t-1)] \end{cases}$$

(2)  $n_1 = 0, n_2 = 2$ ,即两发电商都采用自适应动态对自己的报价进行调整,则有:

$$\begin{cases} \delta(t+1) = \theta_1 \delta(t) + (1 - \theta_1) R_1 \\ \delta(t+1) = \theta_2 \delta(t) + (1 - \theta_2) R_2 \end{cases} \quad (17)$$

其中:

$$\begin{cases} R_1 = \omega_1 \delta^*(\delta(t)) + (1 - \omega_1) \delta^*(\delta_2(t-1)) \\ R_2 = \omega_2 \delta^*(\delta(t)) + (1 - \omega_2) \delta^*(\delta_1(t-1)) \end{cases}$$

(3)  $n_1 = n_2 = 1$ ,即一发电商采用有限理性动态,另一发电商采用自适应动态对自己的报价进行调整,则有:

$$\begin{cases} \delta(t+1) = \delta(t) + \kappa_1 \cdot \delta(t) \cdot M_1 \cdot R_1 \\ \delta(t+1) = \theta_2 \delta(t) + (1 - \theta_2) R_2 \end{cases} \quad (18)$$

其中:

$$\begin{cases} R_1 = \omega_1 [\delta^*(\delta_2(t)) - \delta_1(t)] + (1 - \omega_1) \times \\ \quad [\delta^*(\delta(t-1)) - \delta(t-1)] \\ R_2 = \omega_2 \delta^*(\delta(t)) + (1 - \omega_2) \delta^*(\delta_1(t-1)) \end{cases}$$

式(16)~(18)报价动态系统的稳定性分析类似,简单地下文仅对式(18)进行分析。若记  $y(t) = \delta_1(t-1), z(t) = \delta_2(t-1)$ ,则组成以下的发电商报价动态系统:

$$\begin{cases} y(t+1) = \delta_1(t) \\ z(t+1) = \delta_2(t) \\ \delta_1(t+1) = \delta_1(t) + \kappa \cdot \delta_1(t) \cdot M_1 \cdot \{ \omega_1 [\delta_1^*(t) - \delta_1(t)] \\ \quad + (1 - \omega_1) [\delta_1^*(z(t)) - y(t)] \} \\ \delta_2(t+1) = \theta \delta_2(t) + (1 - \theta) [\omega_2 \delta_2^*(t) \\ \quad + (1 - \omega_2) \delta_2^*(y(t))] \end{cases}$$

(19)

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\kappa M_1 \delta_1^* (1 - \omega_1) & \frac{\kappa M_1 \delta_1^* (1 - \omega_1) \gamma_1}{\gamma_2 (\gamma_1^2 H^2 - 1)} & 1 - \kappa M_1 \delta_1^* \omega_1 & \frac{\kappa M_1 \delta_1^* \omega_1 \gamma_1}{\gamma_2 (\gamma_1^2 H^2 - 1)} \\ \frac{(1 - \theta)(1 - \omega_2) \gamma_2}{\gamma_1 (\gamma_2^2 H^2 - 1)} & 0 & \frac{(1 - \theta) \gamma_2 \omega_2}{\gamma_1 (\gamma_2^2 H^2 - 1)} & \theta \end{bmatrix}$$

上述矩阵对应的特征方程为:

$$\lambda^4 + B_1 \lambda^3 + B_2 \lambda^2 + B_3 \lambda + B_4 = 0$$

其中:

$$B_1 = \kappa M_1 \delta_1^* \omega_1 - 1 - \theta$$

$$B_2 = \theta + \kappa M_1 \delta_1^* [1 - \omega_1 - \theta \omega_1 - \frac{(1 - \theta) \omega_1 \omega_2}{(\gamma_1^2 H^2 - 1)(\gamma_2^2 H^2 - 1)}]$$

$$B_3 = -\kappa M_1 \delta_1^* [1 - \omega_1 + \frac{(1 - \theta) [\omega_1 (1 - \omega_2) + \omega_2 (1 - \omega_1)]}{(\gamma_1^2 H^2 - 1)(\gamma_2^2 H^2 - 1)}]$$

$$B_4 = -\kappa M_1 \delta_1^* \frac{(1 - \theta)(1 - \omega_1)(1 - \omega_2)}{(\gamma_1^2 H^2 - 1)(\gamma_2^2 H^2 - 1)}$$

由 Jury 的局部稳定判别条件,  $E^*$  的稳定域须满足任一特征根  $|\lambda| < 1$ , 即有<sup>[15-16]</sup>:

$$\begin{cases} 1 + B_1 + B_2 + B_3 + B_4 > 0 \\ 1 - B_1 + B_2 - B_3 + B_4 > 0 \\ |B_4| < 1 \\ |B_3 - B_1 B_4| < |1 - B_4^2| \\ |(B_3 - B_1 B_4)^2 - (1 - B_4^2)^2| < |L_1 - L_2| \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $L_1 = (B_1 - B_3 B_4)(B_3 - B_1 B_4)$ ,  $L_2 = (1 - B_4^2)(B_2 - B_2 B_4)$ 。求解上述不等式组则得式 (19) 报价动态系统在  $E^*$  处的稳定域。

### 4 发电商报价动态模型分析

假定参与报价的两家发电商的有关成本参数为:  $\alpha = \alpha = 0, \beta = 2, \beta = 1.75, \gamma_1 = 0.01, \gamma_2 = 0.00815$ 。设电力需求曲线参数  $a = 2500, b = 50$ , 且是共同知识。

由式 (10), 可得 Nash 均衡时各发电商的均衡报价策略:  $\delta_1^* = 8.0458, \delta_2^* = 9.2632$ ; 此时的市场

由上文可知: 分析式 (19) 报价动态系统的稳定性, 仅需考察 Nash 均衡点  $E^* = (\delta_1^*, \delta_2^*, \delta_1^*, \delta_2^*)$  的局部稳定性即可, 其对应的雅可比矩阵为:

清除价  $p = 21.5097$ 。

由前面的分析不难知道, 式 (13) 实际上是式 (14) 在  $\omega_1 = \omega_2 = 1$  时的特殊情况。在考虑滞后的三类动态模型中, 为简便且不失一般性, 仅考虑式 (18) (即式 (19)), 但其分析方法对式 (16) ~ 式 (17) 同样适用 (结果略有差异, 但结论是一致的)。

#### 4.1 报价动态模型稳定域、分岔与混沌仿真

式 (20) 的解析求解比较难。图 1 给出了发电商 1 的滞后因子  $\omega_1 = 1$  情况下, 式 (19) 报价动态系统在 Nash 均衡点的稳定域 (横轴  $\kappa$  为发电商 1 的调整速度, 纵轴  $\theta$  为发电商 2 的自适应因子)。显然随着发电商 2 的滞后因子  $\omega_2$  的下降, 稳定域越来越大; 即滞后有利于维持系统的稳定。

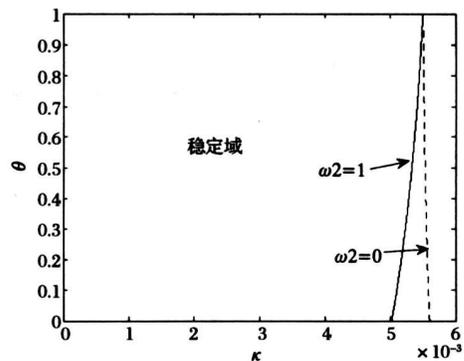


图 1  $\omega_1 = 1$  时式 (19) 动态系统的稳定域

图 2 为  $\omega_1 = 1, \omega_2 = 0.85, \theta = 0.5$  时, 发电商 1 - 2 的报价策略  $\delta_1, \delta_2$  与市场清除价的分岔图; 从图中不难看出: 当发电商 1 的调整速度  $\kappa \leq 0.0055$  时, 报价系统处于均衡状态; 当  $\kappa > 0.0055$  则系统随着  $\kappa$  的增大先后进入倍岔或混沌状态。

图 3 为  $\omega_1 = 1, \omega_2 = 0.85, \theta = 0.5, \kappa = 0.008$  时, 式 (20) 的混沌奇异吸引子, 其展示了进入混沌状

态后,发电商报价策略调整的复杂性。

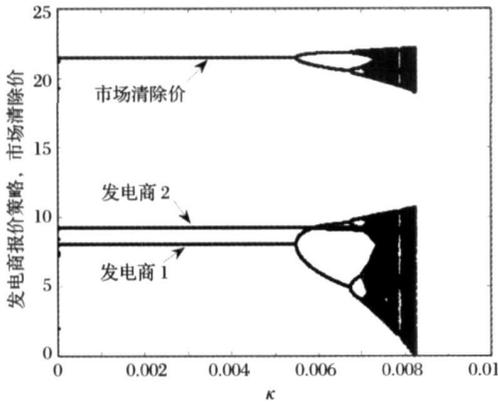


图2  $\omega_1 = 1, \omega_2 = 0.85, \theta = 0.5$  时式(19)的分岔图

经测试,选取不同的参数,其对应的混沌吸引子略有不同,但都展现了进入混沌以后发电商报价策略调整的复杂性。

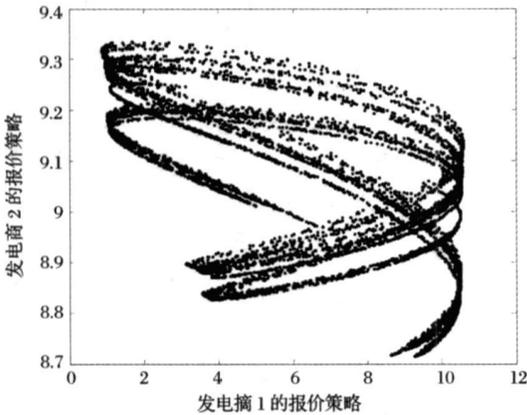


图3  $\omega_1 = 1, \omega_2 = 0.85, \theta = 0.5, \kappa = 0.008$  时式(19)的混沌奇异吸引子

### 4.2 滞后因子对发电商平均收益的影响分析

对发电商而言,在滞后报价动态模型中,选择合适的  $\omega$  值,对选择其报价策略同样重要。为分析,考虑发电商  $i$  的平均收益:

$$\bar{\pi}_i = \sum_{t=1}^T \pi_{it} / T$$

其中,  $\pi_{it}$  为发电商  $i$  在  $t$  期的收益,  $T$  为总的竞价(迭代)次数。

图4为  $T = 100$  时,  $\theta = 0.5, \omega_2 = 0.85$  情况下,  $\kappa = 0.005, 0.0065, 0.008$  时,发电商1的平均收益随其滞后因子  $\omega_1$  变化曲线:

图4从上至下依次给出了发电商 Nash 均衡收益、均衡过程中平均收益、分岔状态下的平均收益与混沌状态下的平均收益:

1) 当  $\kappa = 0.005$  时,式(19)系统处于均衡状态,显然发电商1的平均收益随  $\omega_1$  增大而增大;  $\omega_1 = 1$

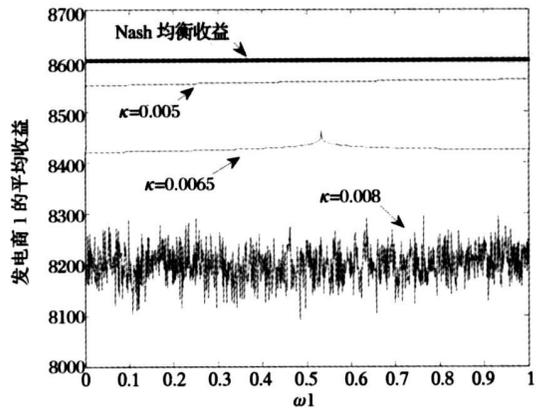


图4 滞后因子对发电商的平均收益影响

时,  $\bar{\pi}_1$  取最大值。随着竞价次数的不断增加,  $\bar{\pi}_1$  无限接近 Nash 均衡时的收益(因为在形成均衡前,报价系统有一个古诺调整过程;如果剔除该调整过程,则  $\bar{\pi}_1$  就是 Nash 均衡收益)。

2) 当  $\kappa = 0.0065$  时,式(19)系统处于倍岔状态,发电商1的平均收益在  $\omega_1^* = 0.532$  附近有一个最大值。当  $\omega_1$  离  $\omega_1^*$  越远,其对应的平均收益也越小。

3) 当  $\kappa = 0.008$  时,式(19)系统处于混沌状态,从图中很难找出某种简单的规律,即几乎不存在一个使发电商平均收益最大或最小的  $\omega_1^*$ 。

从图中明显地看出:均衡状态下发电商的平均收益最大,而混沌状态下平均收益最小,因此维持报价系统的稳定有利于发电商实现平均收益最大化。

### 4.3 不同报价动态对发电商收益的影响分析

上文考虑了发电商选择有限理性与自适应动态对报价策略进行调整,因此对发电商而言,需要在上述两种动态中选择收益相对较大的报价动态。

从上文分析不难看出:在均衡状态下,发电商获得 Nash 均衡收益;但在非均衡状态下(包括古诺调整过程中),不同的报价动态与滞后因子对发电商的收益可能有一定影响。

为便于比较,假设两发电商的成本参数相同,即:  $A = A = 0, B = B = 2, C = C = 0.01$ , 则有:  $\bar{D} = \bar{D} = 8.8571, p = 22.5714$ 。

图5为  $\omega_2 = 0.85, H = 0.5, J = 0.005$  时,报价动态系统在均衡过程中,两发电商的平均收益随  $\omega_1$  变化的曲线。显然,发电商2的平均收益比发电商1要大,此时发电商采用自适应动态较优。

图6~7分别为  $\omega_2 = 0.85, H = 0.5$  时,报价系统在分岔( $J = 0.006$ 与混沌( $J = 0.007$ )情况下,两个发电商竞价100次的平均收益随  $\omega_1$  变化的曲线。显

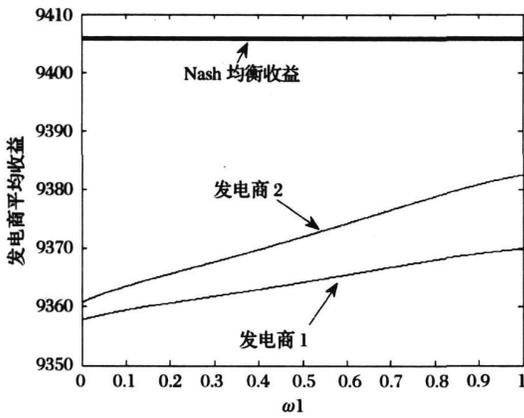


图 5 均衡过程中两发电商的平均收益

然发电商 1 的平均收益明显比发电商 2 要大, 即在非均衡状态下, 发电商采用有限理性动态对自己的报价策略进行调整相对较优(当  $H = 0$  时, 该结论同样成立; 即相对于最优反应动态而言, 有限理性动态同样是最优的)。

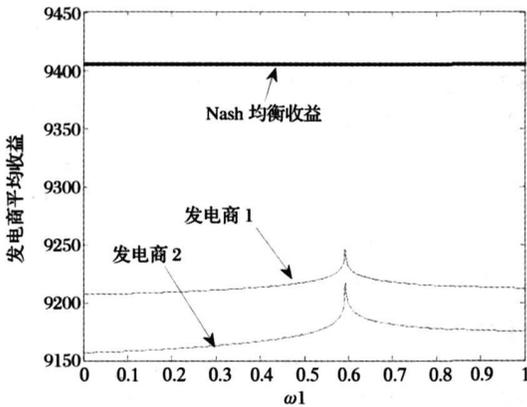


图 6 分岔状态下两发电商的平均收益

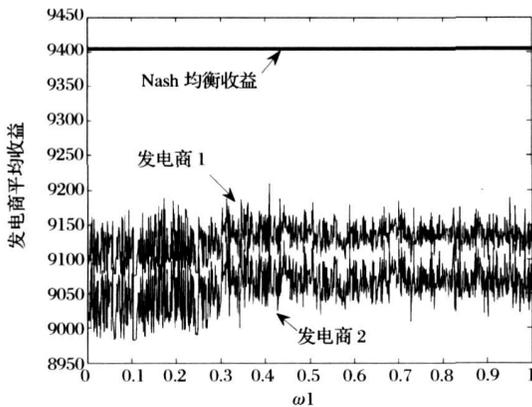


图 7 混沌状态下两发电商的平均收益

### 5 发电商报价动态混沌控制

从上一节的分析不难看出: 报价初期宜采用自适应动态调整自己的报价(式(17)模型), 以达到 Nash

均衡; 但一旦失去均衡, 进入倍岔或混沌状态, 则宜采用有限理性动态对自己的报价进行调整(式(16)模型), 以实现较高的平均收益; 但不管怎样, 发电商在 Nash 均衡状态时的平均收益最大, 因此对发电商而言, 维持报价系统的 Nash 均衡尤为重要。

由上述分析, 发电商报价动态系统混沌控制实际上就是对式(16)系统的混沌控制。对离散动态系统的混沌控制方法很多<sup>[17-18]</sup>, 但现有文献中多见的有状态反馈滞后、最小熵等方法, 下文考虑状态滞后反馈控制方法。在式(16)的基础上建立以下控制动态:

$$\begin{cases} D(t+1) = D(t) + J_1 \# D_1(t) \# M_1 \# R_1 + u(t) \\ D(t+1) = D(t) + J_2 \# D_2(t) \# M_2 \# R_2 \end{cases} \quad (21)$$

其中:  $u(t) = F \# e(t)$ ,  $F$  为控制参数, 且  $e(t) = D(t) - D(t-1)$ , 则有:

$$e(t+1) = F \# e(t) + J_1 \# D_1(t) \# M_1 \# R_1 \quad (22)$$

若记  $y(t) = D(t-1)$ ,  $z(t) = D(t-1)$ , 则式(21)(22)组成一个 5 维动态系统; 分析该系统的稳定性, 选择合适的控制参数  $F$ , 则可使电力报价系统走出混沌, 维持 Nash 均衡。

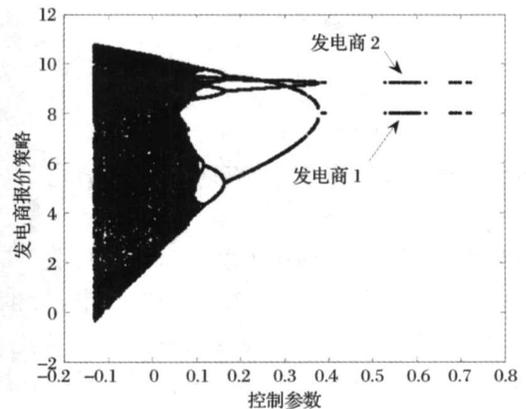


图 8 两有限理性发电商报价动态混沌控制

图 8 为  $X_1 = 1$ ,  $X_2 = 0.85$ ,  $J_1 = 0.008$ ,  $J_2 = 0.0035$  时, 式(21)报价动态系统的混沌控制图, 显然当控制参数  $F \setminus 0.393$  时, 选择合适的  $F$  值(非连续取值), 则报价动态系统可维持 Nash 均衡。

图 9 为控制参数  $F = 0.5$  时(其它参数取值同图 8), 发电商在式(16)动态与式(21)动态下的报价策略调整路径(其中虚线为式(16)动态下的发电商的混沌报价策略,  $/ * 0$  与  $/ + 0$  线分别为发电商 1 与 2 在式(21)动态下的报价策略收敛路径)。显然, 经过 30 多次(发电商 1 经历 39 次, 发电商 2 经历 33 次)的反馈控制, 发电商报价系统重新回到 Nash 均衡。

图 10 中为有限理性发电商在式(16)与式(21)动

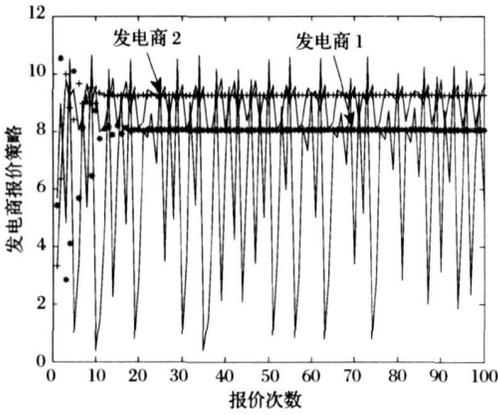


图9 混沌控制前后有限理性发电商的报价策略

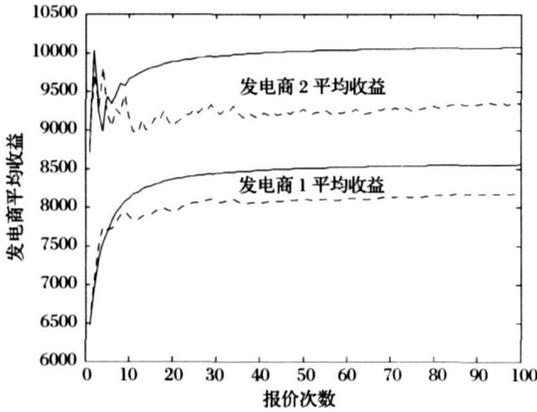


图10 发电商1采用控制策略时,混沌控制前后两有限理性发电商的平均收益

态下的平均收益比较情况(实线为式(21)动态下的收益,虚线为式(16)动态下的收益)。

显然,在式(21)动态下两发电商得到的收益明显比式(16)动态下多;但在最初的5次报价中,发电商1获得的平均收益比不采用控制策略要少;而发电商2则因为发电商1采用控制策略,获得了额外的收益。

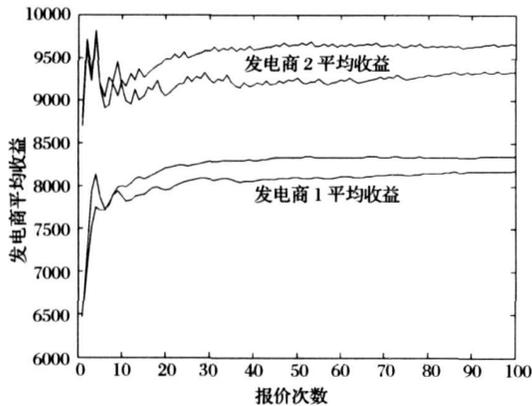


图11 发电商2采用控制策略时,混沌控制前后两有限理性发电商的平均收益

在式(21)中,若交换控制对象,即由发电商2对

报价策略进行滞后控制(其它变量、参数不变),则可得图11所示的混沌控制前后发电商平均收益比较图(为便于比较,仍选择控制参数  $F = 0.15$ , 此时电力报价系统并不收敛于 Nash 均衡,但并不影响分析结果)。

显然,图11与图10相比大体相同,即采用控制策略比不采用控制策略获得的收益要大,但在初期发电商2获得的收益比不采用控制策略要少,该结果与图10得到的结果是一致的:即采用滞后控制策略,在短期不会给自身带来额外收益,而在长期则可以,但给竞争对手带来了短期与长期的额外收益。因此,若发电商仅考虑短期收益,则没有积极性选择滞后控制策略;若两发电商都考虑短期收益,则可能产生/囚徒困境,从而使报价系统长期处于混沌状态中。

### 6 结 语

本文在发电商报价古诺博弈模型基础上,考虑了发电商采用有限理性动态与自适应动态(包括最优反应动态),建立考虑滞后的发电商报价动态模型,并对模型的稳定域进行分析;然后对模型的稳定域、倍岔、混沌进行了仿真,并分析了滞后因子、不同报价动态对发电商平均收益的影响;论文最后运用状态滞后控制方法对电力报价系统的混沌控制进行了分析。论文分析表明: 1) 滞后因素有利于报价系统维持 Nash 均衡稳定;但除报价系统进入倍岔状态外,给定竞争对手的滞后因子,对发电商考虑滞后并不一定能获得额外收益; 2) 当滞后报价动态系统经历均衡、倍岔、混沌状态时,发电商对应的平均收益依次递减,因此对发电商而言,维持滞后报价动态系统的稳定性尤为重要; 3) 选择合适的滞后控制参数,运用状态滞后反馈控制方法,可使报价动态系统维持 Nash 均衡状态; 4) 若发电商仅考虑短期收益,则可能没有积极性采用滞后控制策略,从而使报价系统处于混沌状态中。

从上述分析结论不难得出:对理性的发电商而言,在报价中考虑滞后因子,以尽量维持电力报价系统的稳定性,可使自己获得尽可能多的收益;一旦失去稳定,则应从长远利益出发,运用滞后控制方法使报价系统回到均衡状态,从而使电力竞价市场维持在一种均衡(Nash 均衡)状态中。

随着我国电力产业市场化改革的深入,为更好地适应市场化营运环境,发电商在重复报价中建立合适的报价动态模型至关重要(文献[19]的研究表明发电商还有待进一步提高其策略性市场行为)。虽然本文从边际收益与考虑滞后因子角度建立的发电商报价

模型(将影响报价的复杂因素转为对边际收益的影响,为此以边际收益作为策略调整的基础),为发电商报价策略的动态调整提供了理论框架,但上述研究是基于一些假设(譬如线性需求函数,二次成本函数等)展开,作为本文的延续,可以从以下几方面继续深入探讨:一是随机电力需求的下发电商报价动态模型;本文假定电力需求是线性函数,实际情况可能与此有差异,譬如在线性需求函数基础上,考虑存在噪音项,即随机需求;在随机电力需求下,发电商的报价动态模型的建模思路可能与本文类似,但求解方法与数值仿真相对比较复杂;二是最优的滞后期的选择问题;本文分析了滞后影响,但没有探讨到底考虑滞后多少期比较合适(类似计量经济学中的自回归期数的确定);此外上述两类情况融合起来对发电商报价策略进行研究,将会更贴近电力报价实践,得到的结论预计会拓展本文的研究结果。

#### 参考文献:

- [1] 刘吉成,谭忠富,陈广娟,侯建朝,王绵斌,曹福成. 差价合约下电网公司购电费用最小化的离散优化模型[J]. 中国管理科学, 2007, 15(6): 60-66.
- [2] 李莉,谭忠富,王建军,柏慧,王成文. 电网企业购买电能与电力备用的MSV风险控制方法[J]. 中国管理科学, 2008, 16(3): 109-115.
- [3] Fushuan Wen, Kumar David. optimal bidding strategies and modeling of imperfect information among competitive generators[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2001, 16(1): 15-21.
- [4] C. P. Rodriguez, G. J. Anders, A. K. David. Bidding strategy design for different types of electric power market participants[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2004, 19(2): 964-971.
- [5] 张新华,叶泽. 不确定需求下的电力竞价贝叶斯博弈模型[J]. 系统工程学报, 2007, 22(2): 215-219.

- [6] 张新华,叶泽. 基于次序统计量的发电公司竞价策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(12): 120-126.
- [7] 袁智强,侯志俭,宋依群. 考虑输电约束古诺模型的均衡分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 73-79.
- [8] 张宇波,罗先觉,薛钧义. 非线性市场需求下机组优化出力的自适应动态古诺模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 80-84.
- [9] 杨洪明,赖明勇. 考虑输电网约束的电力市场有限理性古诺博弈的动态演化研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 71-79.
- [10] 童小娇,王洁,杨洪明,张新华. 计及输电线路和投标变量界约束的电力市场动态投标模型及分析[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(5): 105-115.
- [11] 张骥骧,达庆利,王延华. 寡占市场中有限理性博弈模型分析[J]. 中国管理科学, 2006, 14(5): 109-113.
- [12] 姚洪兴,徐峰. 双寡头有限理性广告竞争博弈模型的复杂性分析[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(12): 32-37.
- [13] Jie Qi, Yongsheng Ding, Liang Chen. Complex dynamics of the generic and brand advertising strategies in duopoly[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 36: 354-358.
- [14] 徐峰,盛昭瀚,姚洪兴,陈国华. 延迟决策对一类双寡头广告博弈模型的影响分析[J]. 管理科学学报, 2007, 10(5): 1-8.
- [15] H. N. Agiza, A. S. Hegazi, A. A. Elsadany. The dynamics of Bowley's model with bounded rationality[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2001, 12: 1705-1717.
- [16] M. T. Yassen, H. N. Agiza. Analysis of a duopoly game with delayed bounded rationality[J]. Applied Mathematics and Computation, 2003, 138: 387-402.
- [17] Liang Chen, Guanrong Chen. Controlling chaos in an economic model[J]. Physica A, 374(2007): 349-358.
- [18] Hassan Salarieh, Aria Alasty. Chaos control in an economic model via minimum entropy strategy[J]. chaos, solitons and fractals(2007), doi: 10.1016/j.chaos.2007.08.045.
- [19] 张立辉,韩金山,赵洱崇. 中国电力企业对电力体制改革适应性的管理结构模型研究[J]. 中国管理科学, 2008, 16(2): 165-171.

### Delayed Dynamic Bidding Model and Its Complexity in Oligopoly Power Market

ZHANG Xin-hua<sup>1,2</sup>, LAI Ming-yong<sup>2</sup>, YE Ze<sup>1</sup>

(1. School of Management, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076;

2. School of Economy and Trade, Hunan University, Changsha 410079, China)

**Abstract:** In the paper, with bounded rational and adaptive dynamics, the delayed dynamic bidding model is presented based on Cournot game, and the stable region, bifurcation and stranger attractor of the Nash equilibrium are displayed respectively by numerical simulations, then the impact of delayed factor and different bidding dynamics on average payment of generators are analyzed. In addition, chaos control of delayed dynamic bidding model is discussed with state delayed feedback control method, and numerical simulations indicated that, 1) delayed factor is useful to maintain the stability of Nash equilibrium, but it is not certain to improve the payment of generators; 2) the maximal average payment is attained to generators in equilibrium state, and the optimal adjustment strategy of dynamics is to use adaptive dynamics before equilibrium, but bounded rational dynamics once loss of equilibrium; 3) Nash equilibrium of delayed dynamic model enables to be maintainable if suitable control parameter is chosen, but it is difficult to myopic generator.

**Key words:** cournot game; delayed dynamics; chaos control; bidding strategy; power market