

发电商的模仿学习竞价策略

曾亮, 齐翔, 陈迎春

(华中科技大学控制科学与工程系, 湖北省 武汉市 430074)

Bidding Strategy for Generating Firm Based on Imitation Learning

ZENG Liang, QI Xiang, CHEN Ying-chun

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: In electricity markets with repeated games, GenCos' bidding strategies and learning behaviors are complex dynamic problems. The research thinking and simulation methods of the above hot issues are reviewed. To simulate and study GenCos' learning behaviors and the dynamic evolution process of electricity markets, a GenCo' bidding model based on imitation learning is presented. By importing the idea of learning in games and applying the proposed bidding model, the dynamic learning process, and its influence on the evolution process of games and market equilibrium in repeated bidding are analyzed under various information conditions. Simulation results show the convergency and efficiency of imitation learning. Meanwhile, GenCos' imitation learning in global view will produce quite different outcomes under full and partial information conditions. Under full information condition, the general market behavior converges at an intermediate equilibrium state between Walrasian equilibrium and Cournot-Nash equilibrium; under partial information condition, the general market behavior converges at Cournot-Nash equilibrium while the individual behavior of a GenCo diverges.

KEY WORDS: theory of learning in games; imitation learning; bidding strategy; dynamic evolution of games; market equilibrium; Cournot-Nash equilibrium

摘要: 在重复博弈的电力市场中, 发电商的竞价策略和个体学习行为是个复杂的动态问题。分析发电机竞价策略这一热点问题的最新研究思路和仿真方法。为模拟发电商的自主学习和市场的动态演化过程, 引入博弈学习理论, 建立基于模仿学习的发电机竞价策略模型, 分析不同信息条件下的学习动态过程, 及重复竞标时发电机模仿学习对博弈演变及市

场均衡的影响。仿真结果表明模仿学习具有较好的收敛性。另外, 完全信息条件下, 发电机全局学习能引导市场趋于瓦尔拉斯均衡和古诺-纳什均衡二者之间的一个均衡状态; 非完全信息条件下, 发电机全局学习的结果是市场总体行为收敛到古诺-纳什均衡, 而发电商的个体行为则与古诺-纳什均衡状态存在偏差。

关键词: 博弈学习理论; 模仿学习; 竞价策略; 博弈演变; 市场均衡; 古诺-纳什均衡

0 引言

电力市场并不是一个完全意义上的竞争市场, 而更接近于寡头垄断市场。为追求自身的利益最大化, 发电机可能利用电力市场的非完美性, 不按机组的边际成本报价, 而采用一定的竞价策略, 获得比完全竞争市场中更高的利润。

发电商的竞价策略也是一个受到广泛关注的研究主题。文献[1-3]归纳了发电机竞价策略这一研究领域国内外学者提出的模型和方法, 主要有下面3种: 1) 预测市场出清价(market clearing price, MCP)的方法, 发电机以略低于MCP的价格报价, 即可保证其所属机组被调度并获利; 2) 利用概率论、数理统计和模糊数学等预测竞争对手行为的方法^[4-6], 发电机在预测得出的对手的成本分布和报价策略下做出自己的最优反应; 3) 基于博弈论的策略性报价方法, 很多学者都发表了相关的研究成果, 如文献[7]研究了寡头垄断市场双边拍卖中的竞价策略问题, 比较了电力双边拍卖和发电侧单边拍卖的效率; 文献[8]应用网络优化方法研究了双边电力市场中的纳什均衡策略; 文献[9]建立了完全信息和非完全信息下电厂机组出力优化的改进古诺模型。

就目前的情况来看, 研究发电机竞价策略的思路拓宽了, 至少增加了下面的几种方法: 1) 基于

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60574088, 60774036)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60574088, 60774036).

多种经济学原理和其他相关理论的方法，如多心理账户^[10]、企业经营决策^[2]和安全、潜力和期望(security, potential/aspiration, SP/A)理论^[11]等都被用来构造报价决策模型和研究最优竞价策略；2) 基于实验经济学的方法，借鉴实验经济学的基本原理，在电力市场竞价实验平台上，通过可控制的实验对竞价策略的理论假设进行证明，并检验相应的实施效果^[12-13]；3) 发电商学习和应用博弈学习理论的方法，发电商会在重复进行的投标过程中学习，根据自己的成本函数、电能交易中心(power exchange, PX)或独立系统操作员(independent system operator, ISO)公布的前一阶段市场运行数据和其他市场信息动态调整其竞价策略，进行最优决策；文献[14]提出了基于猜测供给函数模型的发电商动态学习模型；文献[15]讨论了在电力现货市场中进行线性供应函数竞标时，发电商学习行为对市场均衡和价格的影响；此外，博弈学习理论也被用来描述发电商的动态学习和策略性报价行为，以及博弈重复进行时他们之间的相互作用，如强化学习^[16-20]、信念学习^[21-23]等。

不仅对发电商竞价策略问题研究的思路丰富了，仿真方法也趋于多样化。除了传统的模拟方法之外，多agent系统(multi-agent system, MAS)^[17,24]和协同进化算法^[25-26]等也被越来越多的学者采用。

为模拟发电商的自主学习和市场的动态演化过程，本文引入博弈学习理论，建立基于模仿学习的发电商竞价策略模型，通过在 IEEE 6 机 30 母线系统中进行仿真计算，分析不同信息条件下的学习动态过程，以及重复竞标时发电商模仿学习对博弈演变及市场均衡的影响，并检验学习过程的收敛性和有效性。

1 博弈学习理论背景

博弈学习理论是分析博弈演变及其均衡的重要方法。由于传统博弈均衡理论的缺陷和博弈学习模型的优点，对博弈学习理论的研究在西方博弈理论界迅速兴起，并成为现代博弈理论的一个重要分支^[27]。

学习被定义为由于经验而发生的在行为方面被观察到的变化。博弈中有关学习的理论很多：演化动态、强化学习、信念学习、老练(预期性)学习、经验加权吸引力学习(experience-weighted attraction learning, EWA)、模仿、方向学习和规则学习^[28-29]。

强化学习一词来源于行为心理学，是指从环境状态到动作映射的学习，以使动作从环境中获得

的累积奖赏值最大。只能利用不确定的环境奖赏值来发现最优行为策略是强化学习的主要特征和难点。

信念学习模型假设参与者根据过去的事件来更新他们认为别人会如何行动的信念，从而根据这些信念来决定哪种策略是最优的。一种广为接受的模型是“虚拟行动”。有时候市场参与者通过模仿其他人的策略来学习。模仿与自己类似的成功参与者，可能是一种启发式方法，从而能趋近于具有较高支付的策略。模仿学习在Huck、Normann和Oechssler^[30]研究的古诺寡头市场中有显著的表现；Apestequia和Huck等在文献[31]中介绍了模仿的一般化理论方法，并用实验手段检验了多种不同的模仿学习模型。

2 发电商的模仿学习竞价策略模型

2.1 完全竞争状态下单边电力市场出清模型

假定电力市场的发电侧有 n 个发电商(发电机组)。机组 i 的发电成本 $C_i(q_i)$ 是二次曲线：

$$C_i(q_i) = \frac{1}{2} a_i q_i^2 + b_i q_i + c_i, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中： a_i 、 b_i 、 c_i 为机组发电成本函数的系数，分别对应机组发电成本曲线的曲率、斜率和截距； q_i 为机组有功出力，出力约束为

$$q_{i,\min} \leq q_i \leq q_{i,\max} \quad (2)$$

式中 $q_{i,\min}$ 和 $q_{i,\max}$ 分别为机组的出力上下限。

假定市场电价 p 和总负荷 Q 的关系表示为反需求函数：

$$p = e - fQ = e - f \sum_{i=1}^n q_i, \quad e > 0, f > 0 \quad (3)$$

完全竞争状态下，所有发电商均按机组边际成本报价，提交的线性报价曲线为

$$B_i(q_i) = b_i + a_i q_i \quad (4)$$

记线性报价函数的逆函数为 $B_i^{-1}(p)$ 。

电力市场交易中心在收到所有发电商的报价后，按等报价法^[32]执行出清计算。假定市场结算机制为MCP方式，则发电商 i 的利润为

$$\pi_i(q_i, q_{-i}) = p q_i - C_i(q_i) \quad (5)$$

式中 q_{-i} 为所有其他发电商的出力情况。

2.2 重复竞标时发电商的模仿学习模型

人们经常通过模仿他人的行为来学习。在动物或儿童中模仿行为尤其普遍。同时，模仿也是最“低成本”的学习行为之一，因为参与者只需重复选择所观察到的策略，而无须形成自己的信念或评估所

有的策略^[28-29]。实际上,模仿行为在许多决策过程中占主导地位,特别是当外部环境复杂,并且存在很大的未知性时。在电力市场环境下,发电商通过观察其他市场参与者的策略性报价行为,并在后续的博弈中模仿学习,这是一种具有普遍性的决策心理,同时也为发电商寻求最优决策提供了一种启发式捷径。

当竞标重复进行时,发电商在不同信息条件下动态学习;并根据学习到的知识,在下一期投标时调整其产量,以实现利益最大化;而其余不进行模仿学习的发电商按边际成本提交线性报价曲线。

分别定义发电商*i*在第*t*和(*t*-1)期的产量为 q_i^t 和 q_i^{t-1} ,用来描述模仿学习特性^[30]的回归函数为

$$q_i^t - q_i^{t-1} = \beta_0 + \beta_1(r_i^{t-1} - q_i^{t-1}) + \beta_2(i_i^{t-1} - q_i^{t-1}) + \beta_3(v_i^{t-1} - q_i^{t-1}) \quad (6)$$

式中: r_i^{t-1} 为发电商*i*在(*t*-1)期(所有其他发电商的出力为 q_{-i}^{t-1} 的情况下)的最优反应(best reply, BR); i_i^{t-1} 为(*t*-1)期利润最大发电商的出力,对应发电商*i*模仿最优(imitate the best, IB)的行为; v_i^{t-1} 为(*t*-1)期所有其他发电商的平均出力,对应发电商*i*模仿平均(imitate average, AV)的行为; β_1 、 β_2 、 β_3 为对应的相关系数,分别度量了由最优反应、模仿最优和模仿平均所预测到的产量在产量决策方向上变化的程度^[29]。它们的不同取值代表了不同的显著性水平,也表征了作为模仿学习主体的发电商对待BR、IB和AV 3种学习效应的心理状态。

发电商*i*在(*t*-1)期的最优反应 r_i^{t-1} 可表示为

$$r_i^{t-1} = B_i^{-1*}(p) = \operatorname{argmax}_{q_i^{t-1}} \pi_i(q_i^{t-1}, q_{-i}^{t-1}) \quad (7)$$

当所有其他发电商的出力 q_{-i}^{t-1} 给定时,发电商*i*的最优发电量可由利润等式的一阶微分条件求得。由式(5),发电商的利润为

$$\pi_i(q_i^{t-1}, q_{-i}^{t-1}) = [e - f(q_i^{t-1} + \sum_{j \neq i} q_j^{t-1})] q_i^{t-1} - [\frac{1}{2} a_i (q_i^{t-1})^2 + b_i q_i^{t-1} + c_i] \quad (8)$$

其一阶微分条件为

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial q_i^{t-1}} = e - 2f(q_i^{t-1})^* - f \sum_{j \neq i} (q_j^{t-1})^* - a_i (q_i^{t-1})^* - b_i = 0 \quad (9)$$

发电商*i*的最优发电量为

$$(q_i^{t-1})^* = \frac{(e - b_i) - f \sum_{j \neq i} (q_j^{t-1})^*}{2f + a_i} \quad (10)$$

考虑机组出力的限制,把式(10)改写为

$$(q_i^{t-1})^* = \max\{0, \frac{(e - b_i) - f \sum_{j \neq i} (q_j^{t-1})^*}{2f + a_i}\} \quad (11)$$

即:

$$r_i^{t-1} = \max\{0, \frac{(e - b_i) - f \sum_{j \neq i} (q_j^{t-1})^*}{2f + a_i}\} \quad (12)$$

与 r_i^{t-1} 的求解过程类似,若所有其他发电商的报价(出力)作为市场信息在市场出清后正式发布, i_i^{t-1} 和 v_i^{t-1} 也可求得。

本文的重点在于分析不同信息条件下的学习动态过程,以及重复竞标时发电商模仿学习对博弈演变及市场均衡的影响,并检验学习过程的收敛性和有效性。仿真流程如图1所示。

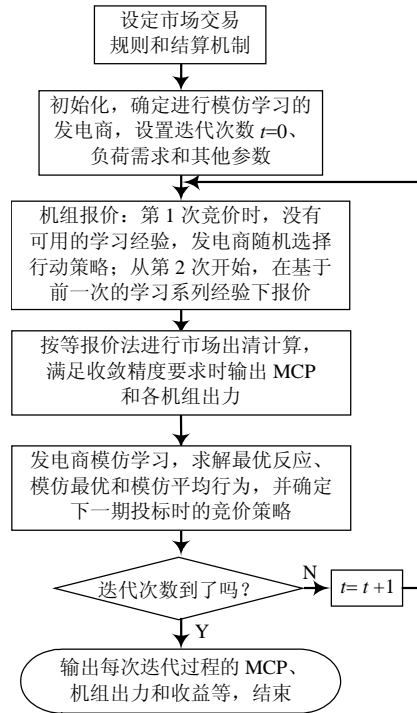


图1 仿真流程图

Fig. 1 Simulation flow chart

3 仿真算例及结果分析

仿真算例建立在 IEEE 6 机 30 母线系统上。各发电商成本函数如表 1 所示。

表 1 发电商的成本函数

Tab. 1 Cost coefficients of GenCos

发电商	$a_i/(\$/(\text{MW}^2 \cdot \text{h}))$	$b_i/(\$/(\text{MW}^2 \cdot \text{h}))$	$c_i/\$$
1	0.020 00	2.00	0
2	0.017 50	1.75	0
3	0.025 00	3.00	0
4	0.025 00	3.00	0
5	0.062 50	1.00	0
6	0.003 84	3.25	0

反需求函数为

$$p = 50 - 0.02 \sum_{i=1}^6 q_i \quad (13)$$

式中 p 为市场电价, $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 。为分析发电商在不同信息条件下的模仿学习动态过程, 设置了 2 种不同的信息条件。表 2 列出了这 2 种信息条件。

借鉴文献[30]的研究方法, 将式(6)中的相关系数 β_0 、 β_1 、 β_2 和 β_3 分别取为 1.330、0.260、0.078 和 0.194。为方便比较, 表 3 列出了按等报价法进行出

清计算后得到的瓦尔拉斯均衡(完全竞争均衡)和古诺-纳什均衡结果。

表 2 2 种信息条件
Tab. 2 Two kinds of information conditions

条件	发电商 i 在 t 期竞标前获知的信息	
	市场信息	竞标结果
完全信息	负荷需求, 成本	$q_j^{t-1}, \pi_j^{t-1}, \forall j$
不完全信息	负荷需求, 成本	$Q = \sum_{j=1}^6 q_j^{t-1}$

表 3 2 种均衡计算结果
Tab. 3 Market equilibrium benchmark

均衡条件	$p/(\$/(\text{MW}\cdot\text{h}))$	$Q/(\text{MW}\cdot\text{h})$	$q/(\text{MW}\cdot\text{h})$						购电费 用/ $\$$	$\Sigma\pi_i/\$$	$\pi_i/\$$					
			q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6			π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6
瓦尔拉斯均衡	8.968 5	2 051.6	348.427 3	412.488 3	238.741 8	238.741 8	127.496 7	685.676 9	18 400.0	6 596.3	1 214.0	1 488.8	712.5	712.5	508.0	1 960.5
古诺-纳什均衡	14.762 4	1 761.9	319.061 0	346.998 4	261.387 6	261.387 6	166.817 5	406.225 9	2 600.9	16 371.0	3 054.0	3 461.7	2 220.5	2 220.5	1 426.2	3 988.5

1) 完全信息条件下。

首先考虑完全信息条件下单个发电商模仿学习的情形, 即仅发电商 1 通过模仿学习动态调整其产量, 而其余发电商均按机组边际成本报价。此时发电商 1 的出力和收益如图 2 所示。图中把第 1 次竞价的随机数据用发电商 1 在瓦尔拉斯均衡状态下相应的出力和收益值替代。在模仿学习过程中, 发电商 1 的出力 q_1 和收益 π_1 都很快向瓦尔拉斯均衡收敛, 并达到新的市场均衡。与瓦尔拉斯均衡状态相比, 发电商 1 的出力 q_1 从 348.427 3 MW·h 下降到 340.508 7 MW·h, 收益却从 1 214.0 $\$$ 增加到 1 221.7 $\$$ 。这种单个发电商模仿学习, 导致其在出力减少时收益反而增加的情形, 同样适合市场中其他的发电商。可见发电商都有模仿学习的意愿。在新的市场均衡下, 市场出清价为 8.993 1 $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$, 与瓦尔拉斯均衡下的 8.968 5 $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 相比, 并没有太大的变化。

随其他发电商加入学习行列, 当所有发电商都通过模仿学习进行产量决策时, 市场出清价的收敛过程如图 3 所示。发电商全局学习时, 市场出清价收敛到 10.337 1 $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 附近, 明显高于瓦尔拉斯

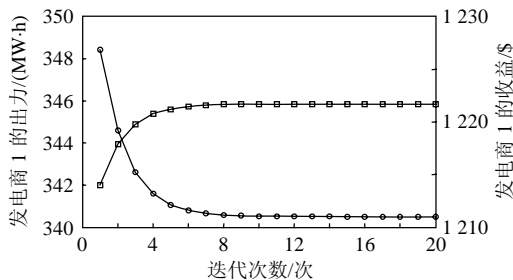


图 2 发电商 1 的出力和收益
Fig. 2 Output and profit of GenCo 1

均衡状态下的 8.968 5 $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 。与单个发电商模仿学习相比, 在同样的负荷需求下, 市场出清价有较大幅度的攀升, 各发电商的收益也有明显增加。如图 4 所示, 发电商 1~3 的收益分别收敛到 1 737.7、2 106.8 和 1 076.7 $\$$, 瓦尔拉斯均衡下对应的值分别为: 1 214.0、1 488.8 和 712.5 $\$$ 。这一点与所有发电商为追求自身利益的最大化, 而进行的策略报价类似, 因此, 重复竞标时发电商的全局模仿学习有利于所有发电商。

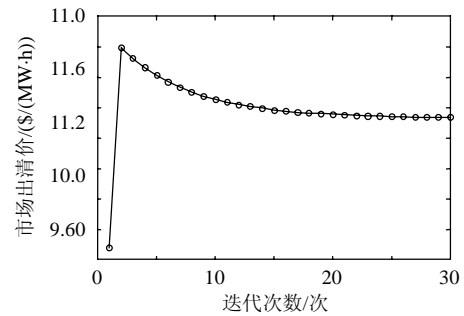


图 3 完全信息条件下市场出清价的收敛过程
Fig. 3 Convergence process of MCP under complete information condition

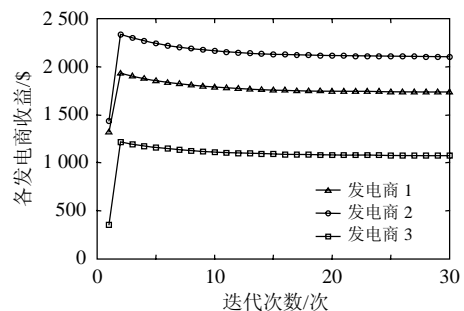


图 4 完全信息条件下发电商 1~3 的收益
Fig. 4 Profits of GenCo 1~3 under complete information condition

2) 非完全信息条件下。

非完全信息条件下，除了所有发电商出力之和 Q 外，发电商 i 并不知道其他发电商的具体出力信息，所以此时无法做出模仿最优行为，因此定义相关系数 $\beta_2=0$ ，其它相关系数 β_0 、 β_1 和 β_3 均保持不变。在非完全信息条件下，所有发电商都模仿学习时，市场出清价 p 和所有发电商出力之和 Q 的收敛过程分别如图 5~6 所示。为便于比较，图中把第 1 次竞价的随机数据用瓦尔拉斯均衡状态下相应的 p 和 Q 值替代。从图中可看出，市场出清价迅速攀升，而所有发电商出力之和则迅速下降，最终趋于古诺-纳什均衡。在新的市场均衡状态下， p 、 Q 分别收敛到 14.641 1 \$(/MW·h) 和 1 767.9 MW·h。

考察发电商的个体行为，非完全信息条件下发电商的收益如图 7 所示。这里把各发电商的第 1 次竞价策略从随机选择行动调整为从“完全竞争”的初始状态出发。在图 7 中做了归一化处理，图中表示的是各发电商在迭代过程中的收益相对于瓦尔拉斯均衡下对应收益的比值。例如发

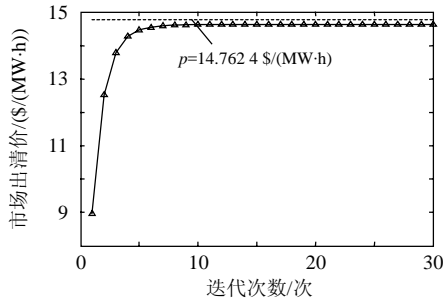


图 5 非完全信息条件下市场出清价的收敛过程
Fig. 5 Convergence process of MCP under incomplete information condition

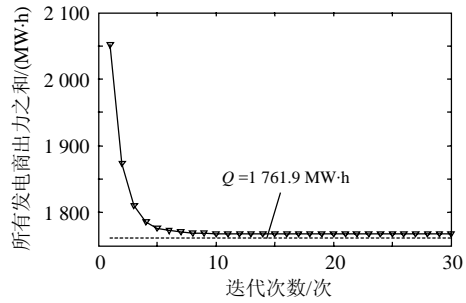


图 6 非完全信息条件下所有发电商出力之和的收敛过程
Fig. 6 Convergence process of GenCos' total output under incomplete information condition

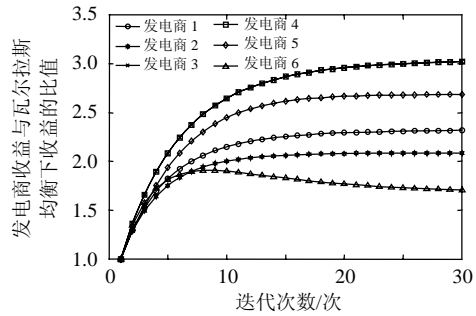


图 7 非完全信息条件下发电商的收益
Fig. 7 GenCos' profits under incomplete information condition

电商 2 的收益收敛到 3 107.7 \$，是瓦尔拉斯均衡下 1 488.8 \$ 的 2.09 倍，而古诺-纳什均衡下对应的收益为 3 461.7 \$。

发电商在各次迭代过程中出力的均值 q_i 和标准差 σ_i 及收益的均值 π_i 和标准差 σ'_i 如表 4 所示。表中分别列出了 30、50 次和第 21~50 次迭代计算的结果。由表 4 可知，非完全信息条件下，当发电商全局学习时，发电商的个体行为也会收敛到一个合理的均衡点，但不是古诺-纳什均衡。

表 4 发电商在各次迭代过程中出力和收益的均值和标准差
Tab. 4 Mean value and standard deviation of GenCos' output and profits

迭代次数	各发电商出力的均值/(MW·h)(标准差)						各发电商收益的均值/\$(标准差)					
	$q_1(\sigma_1)$	$q_2(\sigma_2)$	$q_3(\sigma_3)$	$q_4(\sigma_4)$	$q_5(\sigma_5)$	$q_6(\sigma_6)$	$\pi_1(\sigma'_1)$	$\pi_2(\sigma'_2)$	$\pi_3(\sigma'_3)$	$\pi_4(\sigma'_4)$	$\pi_5(\sigma'_5)$	$\pi_6(\sigma'_6)$
1~30	315.72 (9.30)	341.83 (23.06)	267.61 (14.29)	267.61 (14.29)	207.83 (30.42)	434.35 (91.56)	2 558.50 (399.87)	2 892.00 (391.87)	1 875.60 (380.55)	1 875.60 (380.55)	1 216.70 (230.50)	3 430.10 (353.65)
1~50	314.18 (7.40)	335.06 (19.62)	274.28 (13.75)	274.28 (13.75)	218.99 (27.17)	400.92 (81.69)	2 663.4 (333.89)	2 979.00 (320.08)	1 990.70 (325.54)	1 990.70 (325.54)	1 276.60 (192.18)	3 384.10 (278.08)
21~50	311.67 (0.34)	325.28 (0.67)	283.19 (1.81)	283.19 (1.81)	234.58 (1.98)	354.58 (6.38)	2 815.50 (8.99)	3 107.70 (2.90)	2 155.20 (13.70)	2 155.20 (13.70)	1 365.10 (2.42)	3 340.40 (42.37)

4 结论

本文旨在分析重复竞标时发电商模仿学习对博弈演变及市场均衡的影响，并检验学习过程的收敛性和有效性。

1) 本文提出的模仿学习模型在完全信息和非

完全信息条件下均具有较好的收敛性。

2) 市场中单个发电商的模仿学习会导致其在出力减少时收益反而增加的情形，因此发电商都有通过模仿学习，动态调整其竞价策略的意愿；全局学习行为有利于所有发电商。

3) 完全信息条件下，发电商全局学习能引导

市场趋于一个合理的均衡状态, 这是介于瓦尔拉斯均衡和古诺-纳什均衡二者之间的一个状态。

4) 非完全信息条件下, 发电商全局学习的结果是市场总体行为(市场出清价和各发电商出力之和)收敛到古诺-纳什均衡, 而发电商的个体行为(出力和收益)则与古诺-纳什均衡状态存在偏差。

参考文献

- [1] 文福拴, David A K. 电力市场中的投标策略[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(14): 1-6.
Wen Fushuan, David A K. Bidding strategies in electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(14): 1-6(in Chinese).
- [2] 高鑫, 王秀丽, 雷兵, 等. 独立发电商的策略报价研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 41-46.
Gao Xin, Wang Xiuli, Lei Bing, et al. Research on bidding strategy for an independent power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 41-46(in Chinese).
- [3] 武智勇, 康重庆, 夏清, 等. 基于博弈论的发电商报价策略[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 7-11.
Wu Zhiyong, Kang Chongqing, Xia Qing, et al. Strategic bidding with application of game theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 7-11(in Chinese).
- [4] Wen Fushuan, David A K. Optimal bidding strategies and modeling of imperfect information among competitive generators[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001, 16(1): 15-21.
- [5] Hao Shangyou. A study of basic bidding strategy in clearing pricing auctions[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(3): 975-980.
- [6] 杨莉, 文福拴, 吴复立, 等. 基于可能性理论的发电公司最优报价策略[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 12-17.
Yang Li, Wen Fushuan, Wu Fuli, et al. A possibility theory based approach for building optimal bidding strategies in electricity markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 12-17(in Chinese).
- [7] Kian A R, Cruz J B J, Thomas R J. Bidding strategies in oligopolistic dynamic electricity double-sided auctions[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(1): 50-80.
- [8] Song Haili, Liu C C, Lawarree J. Nash equilibrium bidding strategies in a bilateral electricity market[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(1): 73-79.
- [9] 张宇波, 罗先觉, 薛钧义. 非完全信息下电力市场中电厂机组出力优化的改进古诺模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 7-12.
Zhang Yubo, Luo Xianjue, Xue Junyi. Improved cournot model of generation unit output of generation companies under incomplete information in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 7-12(in Chinese).
- [10] 吕泉, 武亚光, 李卫东. 基于多心理账户的发电商报价决策模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 24-30.
Lü Quan, Wu Yaguang, Li Weidong. A novel bid decision-making model for generation companies based on multiple mental account [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 24-30(in Chinese).
- [11] 吕泉, 李卫东, 武亚光. 基于 SP/A 理论的发电商报价决策模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 29-34.
Lü Quan, Li Weidong, Wu Yaguang. Novel decision-making model for generation company based on SP/A theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 29-34(in Chinese).
- [12] 陈皓勇, 付超, 刘阳, 等. 寡头垄断电力市场实验设计与博弈分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 1-6, 27.
Chen Haoyong, Fu Chao, Liu Yang, et al. Experimental design and strategic gaming analysis of oligopolistic electricity markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 1-6, 27(in Chinese).
- [13] 胡朝阳, 许婧, 甘德强, 等. 电力市场竞价博弈实验方案设计与结果分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 10-16.
Hu Zhaoyang, Xu Jing, Gan Deqiang, et al. Design and analysis of auction experiment for electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 10-16(in Chinese).
- [14] 宋依群, 倪以信, 侯志俭, 等. 市场环境下发电公司的动态学习与市场猜测均衡[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1256-1259.
Song Yiqun, Ni Yixin, Hou Zhijian, et al. Dynamic learning of generation companies and conjectural equilibrium in electricity spot market[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(8): 1256-1259(in Chinese).
- [15] 刘有飞, 倪以信. 线性供应函数重复竞标时发电商学习对市场均衡的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 16-21.
Liu Youfei, Ni Yixin. Impacts of suppliers' learning behaviors on market equilibrium under repeated linear supply function bidding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 16-21(in Chinese).
- [16] Nanduri V, Das T K. A reinforcement learning model to assess market power under auction-based energy pricing[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(1): 85-95.
- [17] 马豫超, 蒋传文, 侯志俭, 等. 基于自加强学习算法的发电商报价策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 12-17.
Ma Yuchao, Jiang Chuanwen, Hou Zhijian, et al. Strategic bidding of the electricity producers based on the reinforcement learning [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 12-17(in Chinese).
- [18] 宋依群, 吴炯. 基于 Q 学习算法的发电公司决策新模型[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(4): 568-571.
Song Yiqun, Wu Jiong. A Q-learning algorithm based decision model for generation company[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(4): 568-571(in Chinese).
- [19] Xiong Gaofeng, Hashiyama T, Okuma S. An electricity supplier bidding strategy through Q-learning[C]. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Chicago, Illinois, USA, 2002, 3: 1516-1521.
- [20] 邹斌, 李庆华, 言茂松. 电力拍卖市场的智能代理仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 7-11.
Zou Bin, Li Qinghua, Yan Maosong. An agent-based simulation model on pool-based electricity market using locational marginal price[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 7-11(in Chinese).
- [21] 康重庆, 江健健, 夏清. 基于智能个体信念学习的电力市场模拟的理论框架[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 10-15.
Kang Chongqing, Jiang Jianjian, Xia Qing. Theoretical fundamental and concepts of electricity market simulation based on agents' belief learning[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 10-15(in Chinese).
- [22] 江健健, 康重庆, 夏清. 电力市场模拟中的报价中标概率函数与发电商个体学习模型[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 26-31, 39.
Jiang Jianjian, Kang Chongqing, Xia Qing. Bid acceptance probability and learning model of GenCo agent in electricity market simulation

- [J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 26-31, 39(in Chinese).
- [23] 江健健, 康重庆, 夏清. 电力市场模拟中基于信念的发电商智能个体决策模型[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 4-9.
Jiang Jianjian, Kang Chongqing, Xia Qing. A new belief-based bid decision model of GenCo agent in electricity market simulation [J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 4-9(in Chinese).
- [24] 任玉珑, 刘贞, 粟增德. 基于多主体的发电企业二阶段博弈模型仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 6-11.
Ren Yulong, Liu Zhen, Su Zengde. Simulation for two-phase game model of power plants based on multi-agent[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 6-11(in Chinese).
- [25] Chen H, Wong K P, Nguyen D H M, et al. Analyzing oligopolistic electricity market using coevolutionary computation[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2006, 21(1): 143-152.
- [26] Chen H, Wong K P, Chung C Y, et al. A coevolutionary approach to analyzing supply function equilibrium model[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2006, 21(3): 1019-1028.
- [27] 陈学彬. 博弈学习理论[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 1999: 1-3.
- [28] Camerer C F. Behavioral game theory: experiments in strategic interaction[M]. New Jersey: Princeton University Press, 2003: 118-189.
- [29] Camerer C F. 行为博弈: 对策略互动的实验研究[M]. 贺京同, 那艺, 冀嘉蓬, 等, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2006: 223-316.
- [30] Huck S, Normann H T, Oechssler J. Learning in cournot oligopoly-an experiment[J]. The Economic Journal, 1999, 109(454): 80-95.
- [31] Apesteguia J, Huck S, Oechssler J. Imitation — theory and experimental evidence[J]. Journal of Economic Theory, 2007, 136(1): 217-235.
- [32] 于尔铿, 周京阳, 吴玉生, 等. 发电竞价算法(二): 等报价法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 10-13.
Yu Erkeng, Zhou Jingyang, Wu Yusheng, et al. Generation bidding algorithm tutorials Part two: the equal bidding price method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 10-13(in Chinese).



曾亮

收稿日期: 2007-12-12。

作者简介:

曾亮(1980—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场优化调度方法、复杂系统分析和建模, zenglllo@163.com;

齐翔(1976—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为博弈论与拍卖机制及其在电力市场中的应用;

陈迎春(1972—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为复杂系统的分析和仿真、多目标进化算法等。

(编辑 谷子)