

排污总量控制下的电力交易市场与排污权交易市场分析

刘 贞, 张希良, 张继红, 李明慧, 唐松林

(清华大学能源环境经济研究所, 北京 100084)

摘要: 世界上很多国家针对电力行业出台基于总量控制的排污权交易市场, 而总量和初始排污权的分配是排污权交易市场的核心问题。采用演化博弈理论, 依据经济与环境协调发展的关系, 以减少单位减排量使发电量减少量和增加单位减排量使发电量增加量之间的比例关系确定排污控制总量。在此基础上构建了基于多主体博弈的 Swarm 仿真模型, 并给出了一个仿真实例。政府制定排污控制总量, 发电企业在产品市场和排污权市场中进行价格、产量决策。通过仿真发现随着排污总量的不断减少, 电能生产存在一个先减少、后增加、再减少的过程, 并且减少与增加的幅度是不同的, 这为电力行业制定排污总量提供了科学依据。

关键词: 排污权交易; 演化博弈; 经济与环境; Swarm 仿真; 总量控制

Equilibrium analysis on emission trading and electricity market under total emissions control

LIU Zhen, ZHANG Xi-liang, ZHANG Ji-hong, LI Ming-hui, TANG Song-lin

(Institute of Energy-Environment-Economy Study, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The total emission control of the pollutant emission, the core of which is the reasonable allocation of the initial emission permits, is an important way of the environment protection and sustainable development in the world. The total pollutant emission is solved by a dynamic evolution model according to the proportional relation between reduced or increased product when the total pollutant emission is reduced or increased and the relation between economical and environment coordinated development. When total pollutant emission is given, the initial emission permits are allocated by equilibrium analysis on enterprise's game behavior. A simulation model based on multi-agent is constructed, and an example based on simulation model is implemented. In model, the total pollutant emission is decided by government, then the enterprise makes price and volume policy in product and emission permits market. Through simulation experiment, the total pollutant emission in market and initial emission permits of every enterprise can be solved, and the reason why emission permits trading is infrequent is explained.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.90410016).

Key words: emission trading; evolution gam; economical and environment; Swarm simulation; total emissions control

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0004-05

0 引言

燃煤发电企业所产生的气体污染约占总气体污染的40%。世界上很多国家针对电力行业出台基于总量控制的排污权交易市场, 而初始排污权的合理分配是总量控制的核心^[1]。要解决初始排污权分配问题, 首先需要确定可供分配的排污总量, 也就是在排污权交易市场中, 排污权总量控制在什么样的范围内才合理。

当前国内外研究此类的文献中, 政府通常依据

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(90410016); 中国博士后科学基金(20090450367); 浙江省电力公司科技项目(T/UZ08008)

环境容量确定排污总量, 如在文献[2]中, 规定一个长期排污总量目标为环境容量。现行的排污权交易制度中, 是在初始排污权基础上, 每个发电商进行交易, 交易一次, 则成交量为交易申报的80%。使达到排污权总量的减少, 直至达到总量控制目标。在文献[3]中, 排污控制总量是由政府部门根据区域环境质量目标设定的。这种总量控制方法独立于产品交易体系之外, 而在现实情况中, 它们之间存在交互作用。控制水平过高则使电力企业规模发展减缓, 电力企业发展过缓, 会使电力企业无能力采取更高效的减排措施, 导致不能达到总量控制标准; 同样, 标准过低, 电力企业不愿意采取排污措施, 对以后的环境优化产生负面影响^[4]。

对于初始排污权分配方法主要有两类^[5]: 一类

是免费分配。如文献[6]根据机制设计原理, 依据社会福利最大化条件构建了初始排污权免费分配模型, 并分析了免费分配决策机制存在的问题。文献[7]基于经济最优性、公平性和生产连续性原则, 构建了初始排污权免费分配的一个多目标决策模型。另一类是有偿分配: 主要包括公开拍卖和固定价格出售^[8]。与免费分配方式相比, 排污权拍卖的最大优势在于: 拍卖能激励企业技术创新, 提高技术水平。但这种机制会减少非赢利行业的竞争力, 造成一定的社会福利损失。

本文采用演化博弈分析方法, 构建了基于智能 Agent 的多主体博弈仿真模型。通过仿真模型设计了两个仿真实验, 一个是排污总量固定时的排污权交易市场, 该实验的目的是为了观察在给定排污总量的情况下, 各个发电企业在电力交易市场和排污权交易市场中的定价和产量行为。以解决在给定固定排污总量时, 不同发电企业之间的初始排污权如何分配。另一个是排污总量不固定的产品交易市场和排污权交易市场。该实验的主要目的是为了观察在排污总量不断变化的过程中, 各个发电企业在电力交易市场和排污权交易市场中的定价和产量行为, 并确定最优排污总量。通过实验可以解释, 为什么排污权交易市场可以很快达到均衡。

为了解决初始排污权的分配及总量控制问题, 本文提出由经济与环境协调发展来确定排污总量的方法, 同时解释了排污权市场交易清淡的经济因素。与其它文献通过环境容量来确定排污总量的方法相比, 本文更侧重于通过经济与环境协调发展过程, 以减少单位减排量使经济产品减少量之间的比例关系确定排污控制总量, 即经济产品的减少比率大于单位减排比率, 则这种总量控制是不经济的。如果增加排污量, 使经济的增加比率少于环境破坏的比率, 则认为这种总量控制是具有环境破坏性。通过这种经济与环境之间的互动来确定排污总量指标。在仿真过程中考虑于电力交易市场与排污权交易市场之间的相互影响。

1 基于多主体博弈的 Swarm 仿真模型

在博弈过程中, 政府确定排污总量, 发电企业在给定排污总量的基础上, 在电力交易市场和排污权交易市场上与其它发电企业进行博弈, 以寻求最优产量策略。

1.1 排污权交易市场仿真概述

博弈主体包括政府和电力企业。政府寻求经济与环境协调发展目标。电力企业寻求在排污权市场与电力交易市场上的总体利益最大化目标。其博弈

过程可以描述如下。

(1) 初始时, 政府给定一个排污总量, 通过免费发放等方式给电力企业分配排污权。

(2) 电力市场交易决策: 在生产过程中, 依据其所获取的排污权进行生产。依据其生产成本及现有装机容量决定最优发电量。依据现有的排污技术、所拥有的排污权和最优发电量来决定在排污权市场购买或卖出排污权。电力市场采用边际出清价方式, 即每个发电企业提出其供给量和供给价, 电力交易中心按照市场需求的方式, 由低到高的方式对每个发电企业的报价产品进行采购。成交价以市场出清价, 其高于出清价的电量不参与交易。

(3) 排污权交易市场决策: 需要购买或卖出排污权的发电企业在排污权市场上进行交易。如果在排污权市场上购买或卖出排污权, 则在下一次电能生产时增加或减少其排污权。排污权交易市场采用高低匹配的竞价方式。高低匹配亦称为撮合交易^[9], 即买家按照报价由高到低依次安排优先级, 卖家按照报价由低到高依次安排优先级。首先交易优先级的卖家和买家, 然后交易优先级次高的市场参与者, 以此类推。交易完成后则转向(2)进行产品市场决策。

(4) 当市场达到均衡时, 政府再次调整排污总量, 转向(1)开始新一轮博弈。

为了便于分析发电商在两个市场上的交易, 我们对电力交易市场及发电企业作以下假设:

① 假定发电企业 i 的成本函数:

$$c_i(q_i) = a_i + b_i q_i \quad (1)$$

其中: a_i 、 b_i 为生产成本系数。 q_i 为产量。

② 发电企业 i 的市场需求函数:

$$p = f(Q) = l - kQ \quad (2)$$

其中: l 、 k 为市场需求函数系数。 $Q = \sum_{i=1}^n q_i$ 为市场供给量。

③ 发电企业的决策目标函数:

$$\begin{aligned} \text{Max } \pi_i &= f(Q)q_i - c_i(q_i) + p_w(w_{\text{best}} - w_i) \\ \text{ST. } q_i &< q_{i,\text{Max}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$q_i < q_{i,w}$$

其中: π_i 为发电企业 i 在博弈中所获取的利润。 $p q_i - c_i(q_i)$ 是发电企业 i 在电力交易市场上所获取的利润。 p_i 为电力交易市场出清价, q_i 为发电企业 i 在电力交易市场中的销量, $c_i(q_i)$ 为发电企业 i 的生产成本函数。 $p_{i,w}(w_{i,\text{best}} - w_i)$ 是发电企业 i 在

排污权交易市场获取的利润。 $p_{i,w}$ 是发电企业 i 在排污权交易市场的成交价。 $w_{i,best} = dq_{i,best}$ 是发电企业 i 产量最优时的排污权, $w_i = dq_i$ 是发电企业 i 的现有排污权。

1.2 发电企业在电力交易市场上的博弈仿真模型

在仿真系统中, 每个发电企业是一个独立的参与者, 具有独立的决策能力和自适应学习能力, 并且可以依据利益最大化原则动态调整自己的发电量和报价决策。其古诺博弈均衡时的产量:

$$q_{i,best} = \frac{l - (n+1)b_i + \sum_{i=1}^n b_i}{k(n+1)} \quad (4)$$

由于发电企业的最优发电量还受到装机容量和排污权拥有量的限制。因此其在生产中的决策函数为三者最小值。即:

$$q_i = \min(q_{i,w}, q_{i,best}, q_{i,max}) \quad (5)$$

其中: $q_{i,max}$ 为装机容量; $q_{i,w} = \frac{w_i}{d}$ 为排污权许可下的生产量, 其中 d 为单位排污量, w_i 为其排污权拥有量。

市场价格:

$$p_{act} = l - k \sum_{i=0}^n q_i \quad (6)$$

企业 i 卖出或购入的排污权:

$$w_{i,trad} = \begin{cases} d(q_{i,best} - q_{i,w}) & q_{i,best} \leq q_{i,max} \\ d(q_{i,max} - q_{i,w}) & q_{i,best} > q_{i,max} \end{cases} \quad (7)$$

为了实现其利润最大化目标, 在电力交易市场和排污权交易市场上所获取的边际收益相等。即发电企业 i 排污权销售价格:

$$p_{i,w}^{t-1} = d(p_{act} - b_i) \quad (8)$$

1.3 发电企业在排污权市场上的博弈仿真模型

由于电力交易市场是完美信息市场, 且假定每个发电企业均按成本报价, 因此卖出价格可由市场来确定。

排污权交易市场中高低匹配竞价机制的具体规则可以描述如下:

(1) 计算所有购买排污权的发电企业、销售排污权的发电企业之间每笔申报价格折算后的价差, 计算公式为:

$$P_d = P_b - P_s \quad (9)$$

其中: P_d 为价差; P_b 为购买排污权的发电企业的申报价格; P_s 为销售排污权的发电企业的申报价格。

(2) 按价差从大到小排序。价差小于零的不能成交, 不参与排序。

(3) 按照排序从价差最大的一笔交易开始, 计算购、售双方每笔交易的成交量和成交价:

①待成交量是指价差不小于零的各组价、量中, 购、售发电企业在上一笔成交之后, 剩下的是未成交的排污权。

②成交价格为购买排污原始申报价格与销售排污权原始申报价格的算术平均值:

$$P_{i,w}^t = \frac{P_s + P_b}{2} \quad (10)$$

(4) 按照价差排序计算下一笔的成交价和成交量。如果同一组价、量在不同笔交易中同时出现, 则应从该组的待成交量中先扣减该笔之前已成交部分的量, 再成交; 如果某一组价、量的待成交量为零, 则该组价、量成交完毕。

(5) 价差相同时, 则按待成交量的比例分配。

(6) 市场中没有达成交易的发电企业, 对其卖出或买入排污权的价格进行调整, 并转向电力交易市场。

2 仿真实验

仿真中假设电力交易市场的需求函数为: $P_d = 1.5986 - 0.0055Q_d$ 。各发电企业的生产容量及生产成本函数系数如表 1 所示。排污总量调整系数 $\Delta w = 0.05$ 。排污权交易调整系数 $\Delta S = 0.1$ 。单位排污量 $d = 1$, 也就是每单位排污 0.1 g。

表 1 发电企业生产的相关参数

Tab.1 Parameters of every power enterprise

发电企业	生产容量	成本系数 a	成本系数 b
发电企业 1	75.4	0.10	0.050
发电企业 2	16.5	0.15	0.058
发电企业 3	30.0	0.84	0.057
发电企业 4	20.0	0.88	0.058
发电企业 5	44.0	0.89	0.045
发电企业 6	144.0	0.95	0.060
发电企业 7	40.6	0.11	0.065

仿真实验进行了两次, 一次是在排污总量固定时排污权交易市场交易出清情况, 及其对电力交易市场的影响。一次是在排污总量以单位量不断减少的过程中, 观察排污权交易市场交易出清的情况。

2.1 总量固定时排污权交易市场博弈仿真

图 1 和图 2 给出了排污权交易市场中各个发电

企业进行博弈的均衡过程。其中图 1 给出了各个发电企业的排污权成交量。在排污权交易市场中, 成本高的发电企业(企业 6 和 7), 其排污权向生产成本低的发电企业(企业 1、3 和 5) 的流动。

图 2 给出了各个发电企业的交易价格。其边际成本由上至下是越来越大。这主要是因为, 电力市场中的成交价是相同的, 因此, 生产成本越低的发电企业, 其边际产品的收益越高, 当电力交易市场达到均衡时, 电力交易市场的边际收益和排污权市场的边际收益是相同的。因此其排污权交易的报价也较高。

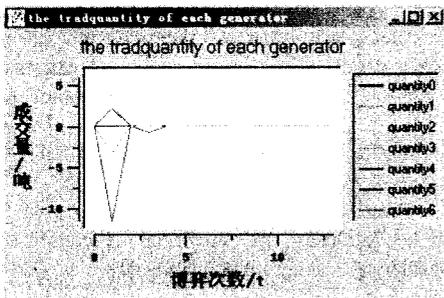


图 1 排污权交易市场中各发电企业的交易量

Fig.1 Trading volume of every power enterprise in emission permit's markets

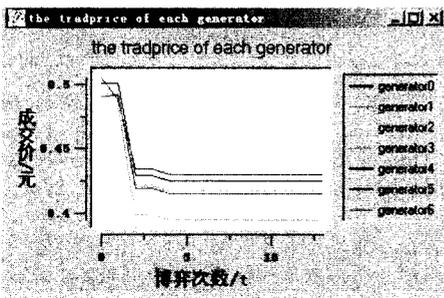


图 2 排污权交易市场中各发电企业的成交价

Fig.2 Trading price of every power enterprise in emission permit's markets

2.2 总量变化时两市场均衡仿真

图 3 给出了排污总量每减少一单位, 电力交易市场上成交总量的变化情况。从图 3 中可以看出, 随着排污权交易市场中排污总量的减少, 电力交易市场上发电量也不断地以不同的变化幅度变化。单位减排相同时, 总的减排量不断减少时, 存在一个区域, 引起产量增加。同样存在单位减排引起相同的产量减少。存在单位减排, 引起发电量突然跃变性减少。这个变化因素对政府制定经济与环境协调策略具有重要意义。

图 4 给出了排污权交易随排污控制总量变化而变化的趋势图。市场中的排污权成交量随着排污总

量的减少而减少, 其交易量有一个先增加后减少的过程。初始时, 卖出排污权的企业多, 购买排污权的企业少, 市场处于供给大于需求阶段, 因此其成交量少。随着总体排污权的减少, 卖出排污的发电企业变少, 但购买排污权的发电企业个数增加, 市场供求双方处于相对均衡阶段, 因此总的成交量增加。但随着总体排污权的进一步减少, 虽然购买排污权的发电企业增多, 但卖出排污权的发电企业个数减少, 市场供给小于需求, 因此其成交量也减少。

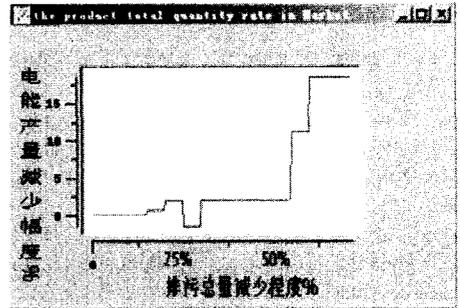


图 3 发电量增加量随排污总量单位递减的变化曲线

Fig.3 Output increase curve along with the decreasing of total emission quantity

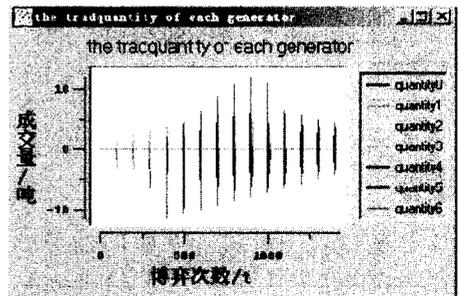


图 4 排污权成交量随排污总量单位递减的变化曲线

Fig.4 Emission permit trading volume curve along with the decreasing of total emission quantity

3 结论

从仿真过程中可以得到以下结论: (1) 在排污权交易机制的总量控制中, 可以通过对排污总量的控制, 使市场中排污权的供求相对均衡。此时的成交量最大。但交易一旦达成, 市场立即处于出清状态, 交易变得冷淡。随着技术创新的发展, 排污权有剩余, 或新的发电企业的进入, 排污权交易市场又开始进行交易。但其均衡也能很快地达到。也就是说排污权交易市场交易是否兴旺与排污技术的发展有关, 反过来, 排污权交易市场激励发电企业采用新的排污技术。(2) 在排污权交易机制的总量控制中, 在总量确定时, 存在一些临界点, 如果大于

这个临界点时,则会造成每减排一单位的污染,其经济损失的比率大于增加一单位污染所产生的经济收益的比率。此时,若再减少污染排放,就会产生过度激励问题,影响社会总体福利。这些临界点对于制定排污总量具有参考意义。(3) 给定排污总量,对于初始排污权分配,可能采用电力交易市场中成交量最大时各个发电企业所拥有的排污权数量。在竞争环境,成交量最大时,市场价格最低,整个社会的福利也就最大。

参考文献

- [1] 吴亚琼, 赵勇, 吴相林, 等. 初始排污权分配的协商仲裁机制[J]. 系统工程, 2003, 21(5): 70-74.
WU Ya-qiong, ZHAO Yong, WU Xiang-lin, et al. The Bargaining and Arbitration Mechanisms of the Allocation of the Initial Emission Permits[J]. Systems Engineering, 2003, 21(5): 70-74.
- [2] Portney P R, Stavins R N. Public Policies for Environmental Protection [M]. Published in the United States of American, 2002.
- [3] 吴健, 马中. 美国排污权交易政策的演进及其对中国的启示[J]. 环境保护, 2004, 8: 59-64.
WU Jian, MA Zhong. Allonsance Trading Policy of Pollutant Discharged in U.S.A and Its Inspiring to China[J]. Environmental Protection, 2004, 8: 59-64.
- [4] 马中, Dan Dudek, 吴健, 等. 论总量控制与排污权交易[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1): 89-92.
MA Zhong, DAN Dudek, WU Jian, et al. Discussion on Total Emissions Control and Emission Trading[J]. China Environmental Science, 2002, 22(1): 89-92.
- [5] Ottar Mestad. Allocation of Emission Permits with Leakage Through Capital Market[J]. Resource and Energy Economics, 2007, 29: 40-57.
- [6] Gangadharan L. Transaction Cost in Pollution Markets: an Empirical Study [J]. Land Economics, 2000, (76) : 601- 614.
- [7] 李寿德, 黄桐城. 初始排污权分配的一个多目标决策模型[J]. 中国管理科学, 2003, 12(6): 40-44.
LI Shou-de, HUANG Tong-cheng. A Multi - Objectives Decision Model of Initial Emission Permits Allocation[J]. China Management Science, 2003, (6) : 40-44.
- [8] 施圣炜, 黄桐城. 期权理论在排污权初始分配中的应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(1): 52-55.
SHI Sheng-wei, HUANG Tong-cheng. Option Theory Used in Initial Emission Permits Allocation[J]. China Population, Resources and Environment, 2005, 29(17): 1-5.
- [9] 夏清, 孙正运. 考虑交易成本的区域市场撮合交易模型[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 1-5.
XIA Qing, SUN Zheng-yun. Application of High-low Match Methods to Regional Electricity Market Considering Transaction Costs[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 1-5.

收稿日期: 2008-11-25; 修回日期: 2009-03-20

作者简介:

刘 贞(1973-), 男, 博士, 研究方向为电力经济、电力市场。E-mail: zhenliu@tsinghua.edu.cn

(上接第 3 页 continued from page 3)

4 结束语

本文将数字式锁定放大器应用到光学电流互感器的微弱光电信号检测中,通过 Labview 仿真了数字式锁定放大器在 OCT 中对微弱信号的检测,由结果可知在小电流情况下,数字式锁定放大器不仅能很好地抑制 OCT 光电探测器中的主要噪声,同时能反映最初的正确电流信息,明显提高了光学电流互感器的稳态测量精度。

参考文献

- [1] 李岩松, 张国庆, 于文斌, 等. 提高光学电流互感器准确度的组合法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 43-47.
LI Yan-song, ZHANG Guo-qing, YU Wen-bin, et al. Combined Method to Improve the Accuracy of Optical Current Transducer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 43-47.
- [2] 李岩松, 张国庆, 于文斌, 等. 自适应光学电流互感器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 100-105.
LI Yan-song, ZHANG Guo-qing, YU Wen-bin, et al. Adaptive Optical Current Transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 100-105.
- [3] 王廷云, 罗承沐, 田玉鑫. 电力系统中光电电流互感器研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 38-41.
WANG Ting-yun, LUO Cheng-mu, TIAN Yu-xin. Study on Optical Current Transformer in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 38-41.
- [4] 李岩松, 张国庆, 于文斌, 等. 基于自适应滤波的光学电流互感器的信噪分离[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 64-67.
LI Yan-song, ZHANG Guo-qing, YU Wen-bin, et al. Signal Noise Decomposed in Optical Current Transducer Based on Adaptive Filter[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 64-67.
- [5] 叶嘉雄, 常大定, 陈汝均. 光电系统与信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [6] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [7] 陈佳圭. 微弱信号检测[M]. 北京: 中央广播电视大学出版社, 1987.
- [8] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

收稿日期: 2008-11-25; 修回日期: 2008-12-28

作者简介:

周 浩(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制; E-mail: zhouhao1018@163.com

李岩松(1970-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。