

燃煤电厂脱硝电价研究

——基于经营期电价与模拟退火算法

周建国¹, 梁怀涛¹, 赵毅²

(1. 华北电力大学 经济管理系, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学 环境工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:本文在经营期电价方法计算脱硝电价的基础上, 为了简化该法复杂的计算过程, 提出运用模拟退火算法思想对脱硝电价的计算进行优化, 并建立了基于经营期电价与模拟退火算法的脱硝电价计算模型, 最后, 以新建电厂国华太电四期(2×600MW)烟气脱硝工程为例, 验证了模型的合理性。

关键词:燃煤电厂; 脱硝电价; 经营期电价; 模拟退火算法; 内部收益率

中图分类号:F426 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-980X(2010)08-0068-04

脱硝电价, 是国家为控制 NO_x 排放, 对使用脱硝技术的发电企业在正常电价基础上增加的补偿电价部分。有关资料表明, 我国大气排放的氮氧化物有 70% 来自于煤炭的直接燃烧, 2005 年以后燃煤电厂的燃煤量将超过煤炭消费总量的一半, 2020 年将超过 76%^[1-2], 采用脱硝电价政策, 以经济补偿形式继续推进燃煤电厂脱硝势在必行。

目前如何确定脱硝电价, 国家还没有出台统一的标准, 补偿多少还没有统一的规定, 学术界相关的研究也很少。在脱硫电价方面, 我国颁布了《燃煤发电机组脱硫电价及脱硫设施运行管理办法(试行)》, 规定新建机组的脱硫电价为每度电 0.015 元/(kW·h), 对在役机组没有统一规定, 基本按所在厂实际的投资和运行成本费用进行定价^[3-4]。有学者提出利用经营期电价法确定脱硫电价^[3], 经营期电价法^[3]是一种从项目经济寿命期出发核算电价的方法, 如果用该方法确定脱硝电价, 能够保证投资者在整个项目经济寿命期内有一个合理回报^[5], 然而, 用该方法测算脱硝电价, 求解过程极为复杂, 需反复测算试算、工作量极大。用模拟退火算法可以实现对非线性和复杂系统的优化计算^[8]。

根据均衡价格理论^[7], 脱硝电价可从两个角度进行计算: 一是脱硝“产品”的供给方, 燃煤电厂对脱硝成本的补偿要求; 二是脱硝“产品”的需求方, 政府对脱硝成本的支付意愿。本文从脱硝“产品”的供给方(燃煤电厂)对脱硝成本的补偿要求的角度出发,

根据从外部性内部化理论^[7], 建立了基于经营期电价与模拟退火算法的脱硝电价模型, 采用经营期电价法测算脱硝电价, 以模拟退火算法简化经营期电价法的测算过程, 最后以国华太电四期(2×600MW)烟气脱硝工程为实例进行深入研究, 验证该脱硝电价计算方法的正确性。

1 脱硝电价定价的理论依据

1.1 外部性内部化与脱硝电价的核算

外部性是某市场主体在生产或消费时, 强加给其他人的附带成本或效益的经济现象^[7]。庇古认为, 环境污染的外部性不能通过市场来解决, 必须依靠政府干预, 使“外部性内部化”^[7]; 政府通过征收附加税或者发放补贴, 将生产者或消费者产生的外部费用或收益纳入其生产或消费决策, 由他们自己承担或“内部消化”。燃煤电厂控制 NO_x 减排产生了外部正效应, 其内部化的方式为, 国家给燃煤电厂在电价上予以补贴, 即脱硝电价。国家给燃煤电厂补贴的具体数额, 可以从燃煤电厂成本收益的角度进行核算^[11]。

1.2 经营期电价

经营期电价法从燃煤电厂成本收益出发, 在综合考虑电力项目经济寿命周期内各年度的成本和还贷需要的变化情况的基础上, 按照使项目在经济寿命周期内各年度的净现金流量, 能够满足按项目注册资本金计算的财务内部收益率为条件测算电价。

收稿日期: 2010-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70671039)

作者简介: 周建国(1965—), 男, 河北固安人, 华北电力大学经济管理系企业与经济研究所所长, 副教授, 博士研究生, 研究方向: 电厂环境技术经济分析与评价、电力工程投资管理分析; 梁怀涛(1987—), 男, 山东潍坊人, 华北电力大学经济管理系硕士研究生, 研究方向: 电力行业技术经济及管理研究; 赵毅(1956—), 男, 华北电力大学环境工程学院教授, 博士生导师, 研究方向: 大气污染控制工程。

其基本数学公式如下:

$$\sum_0^T (CI_t - CO_t) \times (1 + IRR)^{-t} = 0。$$

其中: CI_t 是第 t 年的现金流入量, 为销售收入、回收固定资产残值、回收流动资金的和。

CO_t 为第 t 年的现金流出量, 其主要包括: 自有资本金流出、经营成本、所得税、销售税金、本金偿还、利息偿还、职工福利、其他。

$CI_t - CO_t$ 为净现金流量; T 为经营年限。

IRR 表示的是资本金的内部收益率, 是指电力项目在经营期内, 各年净现金流量的现值累计为零的折现率。

1.3 模拟退火算法

模拟退火算法^[6]是 20 世纪 80 年代初期发展起来的求解优化问题的一种随机性方法, 它以优化问题的求解与物理系统退火过程的相似性为基础, 利用 Metropolis 算法并适当地控制温度的下降过程实现模拟退火, 从而达到优化问题的目的。

模拟退火算法是一种求解多元函数全局最小值的方法, 这种算法可以有效地摆脱局部极小值, 以任意接近于 1 的概率达到全局最小值点。模拟退火算法通用性强, 对问题信息的依赖性较少, 因而不论在组合优化问题还是在连续空间优化问题上都有广泛的应用^[14,16]。利用模拟退火算法, 可以对经营期电价法的复杂的测算过程进行优化。

2 基于经营期电价与模拟退火算法的脱硝电价模型

经营期电价的整个计算过程是一个试算过程, 在假定脱硝电价为一个值的情况下, 计算出总的成本费用, 销售收入等。用上述数据计算出项目的内部收益率, 再将内部收益率与国家规定的收益率作比较, 如果计算结果比国家的收益率高, 则降低假定脱硝电价的值, 进行下一步测算。如果较之低, 则提高脱硝电价的值。整个试算过程是一个复杂的过程, 需要反复测算, 进行手工测算, 需要花费很长时间, 效率极低, 计算出的结果也不精确。因此在这里利用模拟退火算法在非线性以及复杂系统中的良好适用性来改进整个试算过程, 将经营期电价的测算方法放入到模拟退火算法中进行测算。

2.1 利用模拟退火算法对脱硝电价计算的优化

在经营期电价法的基础上, 取模拟退火算法的目标函数为 $\min |gf(p, IRR)|$, 其中, $f(p, IRR) = \sum Ts0(CI_t(p) - CO_t(p) \times (1 + IRR)^t)$, IRR 表示资本金的内部收益率, $CI_t(p)$ 表示第 t 年在脱硝电价为 p 时的现金流入量, $CO_t(p)$ 表示第 t 年在脱硝电价为 p 时的现金流出量。脱硝电价 p 及资本金的内部收

益率 IRR 遵循的条件为 $\sum_0^T (CI_t - CO_t) \times (1 + IRR)^{-t} = 0$, 即目标函数的最优值应为 0。

电价增量(脱硝电价) P 放入现金流量表中, 计入每年的现金流量中的销售收入中。用于计算每年的现金流入量 $CI_t(p)$ 和现金流出量 $CO_t(p)$ 。首先对目标函数中的参数进行随机取值, 然后利用模拟退火算法对目标函数进行反复迭代运算, 可取得多组符合目标函数的解组合, 取其中 IRR 值符合目标内部收益率的解为最优解即可。

2.2 模拟退火算法退火过程的实现

本过程主要实现对目标函数的优化计算, 确定最优的脱硝电价与内部收益率。具体运算过程如下:

阶段 1: 给定初始温度 t_0 , 随机假定一个初始的脱硝电价 P 和一个初始的资本金内部收益率 IRR , 令最优脱硝电价 $Best1 = P$ 、最优内部收益率 $Best2 = IRR$, 当前状态 $p(0) = P, IRR(0) = IRR, m = 0, i = 0$ 。

阶段 2: 令 $t = ti$, 以 $t, Best1, Best2, p(i), IRR(i)$ 为参数调用抽样过程, 返回其得到的最优解 $Besta, Bestb$ 和当前状态 P', IRR' , 令 $p(i+1) = P', IRR(i+1) = IRR'$ 。

阶段 3: 如果以 $Best1$ 和 $Best2$ 为参数的目标函数值不小于以 $Besta$ 和 $Bestb$ 为参数的目标函数值, 那么将参数 m 的值增加 1。

如果情况相反, 则将 $Besta$ 的值赋予 $Best1$ 。将 m 的值赋予 0。

阶段 4: 温度降低策略。温度降低越快, 陷入局部的概率就越大, 但温度降低太慢会导致算法速度太慢。本文采用一种快速的非线性降低法。

$$t_i = \frac{t_0}{1+i} (i = 1, 2, \dots, n)$$

阶段 5: 如果参数 m 的值大于参数 $maxstep1$ 的值, 那么本阶段转向阶段 6 继续进行, 如果 m 的值小于参数 $maxstep1$ 的值, 转向阶段 2 继续向下进行。

阶段 6: 以 $Best1$ 为最优脱硝电价、 $Best2$ 为最优内部收益率输出, 算法结束。

2.3 模拟退火算法 Metropolis 抽样过程

本过程主要是对退火过程中原始状态与新产生的状态进行比较和判断, 若新状态优于退火过程中的状态, 则将新状态返回到退火过程中进行继续计算, 若新状态不如退火过程中的状态, 则新状态将以一定概率被接受, 如果新状态没有被接受, 则继续产生一个新的状态, 直至被接受为止。具体运算过程如下:

阶段 1: $K = 0$, 令初始状态 $P'(0) = P(i), IRR(0) = IRR(i)$, 初始最优脱硝电价 $Besta = Best1$, 资

本金内部收益率 $Bestb = Best2, q = 0, acceptnum = 0$ 。

阶段 2: 在状态 $p'(k), IRR'(K)$ 的邻域中随机产生新的状态 p, IRR , 可利用随即函数在解空间中随即选取产生一个新的脱销电价和内部收益率, 计算目标函数差: $\Delta f = f(p, IRR) - f(p'(k), IRR'(K))$ 。

阶段 3: 如果目标函数差 $\Delta f \leq 0$, 则 $p'(k+1) = p, IRR'(K+1) = IRR, Besta = p, Bestb = IRR, q = 0, acceptnum = acceptnum + 1$ 。

阶段 4: $k = k + 1$ 。如果 p 与 IRR 以概率 $\exp(-\Delta f/t)$ 被接受, 那么将 p 的值赋予 $p'(K+1)$ 将 IRR 的值赋予 $IRR'(K+1)$, 将参数 q 的值归零, 将参数 $acceptnum$ 的值加 1

如果 p 与 IRR 不被接受, 那么将 $p'(K)$ 的值赋予 $p'(K+1)$, 将 $IRR(K)$ 的值赋予 $IRR'(K+1)$, 参数 q 的值加 1

如果参数 q 的值不小于参数 $maxstep2$ 的值, 那么转向阶段 5 继续进行运算。如果参数 q 的值小于参数 $maxstep2$ 的值, 转向阶段 2 继续运算。

阶段 5: 以 $P' = P'(k), IRR'(K)$ 为当前状态、 $acceptnum$ 为接受次数、 $Besta$ 、 $Bestb$ 为最优输出, $Besta$ 即为最优的脱销电价, 输出到退火过程中, 该算法结束。

由模型进行迭代运算, 计算出的脱销电价与内部收益率的解的组合有多种组合, 每种组合均满足使目标函数达到最小值, 选取解组合中内部收益率满足要求的对应的脱销电价为最终的脱销电价。

3 基于经营期电价与模拟退火算法的脱销电价模型的案例研究

本文以新建电厂国华太电四期(2×600MW)烟

气脱硝工程^[18]为例。验证脱销电价定价模型的重要性。该工程为江苏苏源环保工程股份有限公司于 2004 年 10 月承建, 是我国第一个采用国内自主知识产权技术和第一个由国内企业总承包建设的烟气脱硝工程^[18], 具有较典型的研究价值。

3.1 脱销工程的有关技术经济参数

国华太电四期工程项目总投资为 47696 万元, 自有资本金比例为 20%, 其余资金从商业银行融资获得, 融资利息按 2002 年 2 月 21 日中国人民银行颁发的固定资产 5 年期以上贷款年利率 5.76% 计算。本工程每年发电量为 660000 万 kW/h, 设备用电量为 800 kW/h。上网电价(不含脱销电价部分)为 0.39 元/kWh。电厂脱硝工程新增定员 2 人, 年人均工资为 30000 元, 福利费综合费率按工资总额的 55% 计算; 内部收益率 IRR 取 8%; 大修费用按按脱硝装置造价的 1% 预提; 固定资产折旧采用直线法, 净残值率为 5%, 折旧年限取 20 年。

3.2 成本收入的计算与现金流量表的生成

1) 年经营成本。

电厂新增员工 2 人, 人均工资 30000 元, 福利费综合费率按工资总额的 55% 计算。则人均工资福利费用为 33000 元。

长期贷款为 38157 万元, 长期贷款利率为 5.76%, 共分 15 年还清贷款, 每年还贷 2543.8 万元。

脱销装置用电量按 $800kW \times 2$ 计算, 电费为 0.39 元/kWh。则每年的电费为 $8800000 \times 0.39 = 3432000$ 元。

财务费用一年为 3164820 元。大修费用为脱销装置造价的 1%。具体数据见表 1。

表 1 年经营成本表

序号	费用名称	单位	数量	单价	合价(元)
1	吸收剂	t/年	5104	2800	14291200
2	电费	Kwh/年	8800000	0.39	3432000
3	大修预提费	元/年			2412797
4	工资福利费	元/年	2	63000	126000
5	折旧摊销	元/年			15281024
6	吸收剂摊销	元/年			10067831
7	财务费用	元/年			3164820
年运行成本		元		48775672	

2) 收入计算。

本工程中的主要收入包括销售收入、回收固定资产残值和回收流动资金等, 其中销售收入为上网

电量与上网电价的积。其中由表 2 可知, 每年的上网电量为 620400 万 kwh, 而根据模型, 初始的脱销电价可设为 p , 则每年因增加脱销电价而增加的销

售收入为 $620400 \times p$ 。

固定资产折旧年限为 20 年,残值率为 5%,采用直线折旧,折旧率为:

固定资产折旧率 = $\frac{1-5\%}{20} \times 100\% = 4.75\%$ 。

在经营期的最后一年回收固定资产残值,计入

现金流入项目中。

3)现金流量表。

根据以上分析构建本项目的现金流量表,见表

2。

表 2 现金流量表^[18]

项目\年份	0	1	2	...	20
现金流入(万元)	0	$620400p$	$620400p$	...	$620400p+582\ 1422$
销售收入(万元)	0	$620400p$	$620400p$	...	$620400p$
上网电量(万 kwh)	0	620400	620400	...	620400
脱硝电价(元/kwh)	0	P	p	...	p
回收固定资产残值(万元)	0	0	0		582\ 1422
其他		0	0		0
现金流出(万元)	9539	9859. 5672	9697. 0672	...	4877. 5672
资本金投入(万元)	9539				
年经营成本(万元)	0	4877. 5672	4877. 5672	...	4877. 5672
本金偿还(万元)	0	2543. 8	2543. 8	...	—
利息支付(万元)	0	2438. 2	2275. 7	...	—
其他	0	0	0	...	0
净现金流量(万元)	-9539	$620400p-9859. 5672$	$620400p-9697. 0672$	...	$620400p-4295. 425$
累计净现金流量(万元)	-9539	$620400p-19398. 5672$	$1240800p-29258. 1344$	...	

注:第 2 行,第 4 列的参数“ $620400 \times p$ ”,简化为“ $620400p$ ”,下同。

3.3 基于经营期电价与模拟退火算法的脱硝电价计算

模拟退火算法中的目标函数为: $\min |f(p, IRR)|$
 $f(p, IRR) = \sum_0^T (CI_t(p) - CO_t(p)) \times (1 + IRR)^{-t}$ 。

根据上述现金流量表可得 $f(p, IRR)$ 为:

$f(p, IRR) = (-9539 + 620400p - 9859. 5672)(1 + IRR)^{-1} + (620400p - 9697. 0672)(1 + IRR)^{-2} + \dots + (620400p - 4295. 425)(1 + IRR)^{-20}$ 。

约束条件:本模型中初始解得选取为随机选取,脱硝电价 p 选取范围可设为 0 元/kwh 至 0.50 元/kwh,内部收益率 IRR 的取值范围可设为 0% 至 15%。 (P, IRR) 的约束条件为 $\sum_0^T (CI_t - CO_t) \times (1 + IRR)^{-t} = 0$ 。在本次算法试验中,初值为随机选择,对最终结果并不造成影响,选择初值为(0.023, 0.035)。算法中退火过程终止值为 230, Metropolis 抽样过程终止值为 315。初始温度 t_0 设为 200, 终止温度设为 0。

将数据加入模型中得到解的组合如表 3。

表 3 解的组合

序号	1	2	3	...
P (元/kWh)	0.035278	0.058782	0.063738	...
IRR (%)	4.7593	7.4114	8.0021	...

选取内部收益率 IRR 最接近 8%的一组解所对应的脱硝电价为最优解。由解的组合表可知, IRR 为 0.080021 的值是最接近 8%的内部收益率,其对应的脱硝电价为 0.063738 元/kWh。

4 结论

本文根据外部性内部化理论,从脱硝“产品”的供给方(燃煤电厂)对脱硝成本的补偿要求的角度出发,建立了基于经营期电价与模拟退火算法的脱硝电价模型,以国华太电新建机组为实例,对所建立的脱硝电价定价模型进行了验证。根据国外研究资料,脱硝成本一般为脱硫成本的 5~6 倍,我国现行的脱硫电价为 0.015 元/kWh,脱硝电价也应该为脱硫电价的 5~6 倍,因此,脱硝电价的上述计算结果基本合理。可见,该脱硝电价模型有一定的理论意义与参考价值。

参考文献

[1] 高捷,王禹,张蓓.我国大气氮氧化物污染控制对策[J].环境保护科学,2004,10(30):1-3.
[2] 王长会.我国氮氧化物的污染现状和治理技术的发展及标准介绍[J].机械工业标准化与质量,2008,3(11):20-21.
[3] 任鑫芳.火电厂 SO₂ 减排政策与脱硫电价机制研究[D].华北电力大学,2008.
[4] 廖永进,王力,骆文波.火电厂脱硫电价研究与探讨[J].中国电力,2008(3):71-74.
[5] 金建刚,刘具群.一种改进模拟退火算法求解目标优化[J].科技咨询导报,2007,28:148.
[6] 金明.基于模拟退火算法的输电网中长期规划研究[J].青岛大学学报,1999,12(1):80-85.
[7] 刘传江,侯伟丽.环境经济学[M].武汉:武汉大学出版社,2006:30-39.

(下转第 97 页)

- 1988(9):17-26.
- [6] MCKINNON R I. The value-added tax and the liberalization of foreign trade in developing economies: a comment[J]. Journal of Economic Literature, 1973, 11(2): 520-524.
- [7] JOSEPH E. Stiglitz, Andrew Weiss. Informational Imperfections in the Capital Market and Macro-Economic Fluctuations[Z]. NBER Working Papers.
- [8] BENCIVENGA V R, SMITH B D. Financial intermediation and endogenous growth[J]. Review of Economic Studies, 1991, 58(2): 195-209.
- [9] BRUCE D S, ROSS M S, et al. Liquidity of secondary capital markets: Allocative efficiency and the maturity composition of the capital stock[J]. Economic Theory, 1995, 7(1): 19-50.
- [10] KING R G, LEVINE R. Finance, entrepreneurship and growth: Theory and evidence[J]. Journal of Monetary Economics, 1993, 32(3): 513-542.
- [11] ARESTIS P, DEMETRIADES P O. Financial development and economic growth: assessing the evidence[J]. Economic Journal, 1997, 107(442): 783-99.
- [12] JOHANSEN S. Statistical analysis of cointegration vectors[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 1988, 12(2-3): 231-254.
- [13] GRANGER C W J. Causality, cointegration, and control[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 1988, 12(2-3): 551-559.

The Relationship between Stock Market and Economic Growth in China: An Empirical Study from Cointegration Analysis

Shen Xiaogang

(School of management, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: heoretically, the stock market is regarded as an important indicator for marketing economy. However, the real economies have proved that there are complicated interaction relationship among different countries and different developing stages. In this paper, the economic growth rate and stock price index of China from 1992 to 2007, which are taken as indicators for economic growth and stock market, are studied through unit root test and cointegration test. The study results indicate that they are not cointegrated and the stock market doesn't incentive economy growth.

Key words: cointegration test; stock market; economic growth, China

(上接第 71 页)

- [8] VAN LEARHOVEN P J M, Aats E H L. Simulated Annealing: Theory and Applications[D]. Reidal Publishing Company, 1987.
- [9] 刘季江. 电力市场中火力发电厂计及脱硫成本的电价预测[D]. 华北电力大学, 2006.
- [10] 刘波. 经营期上网电价的测算及实例[J]. 中国物价, 1999(11): 28-30.
- [11] 戴立新, 李美叶. 外部环境成本内部化的经济学透视[J]. 中国管理信息化, 2007, 10(2): 53-55.
- [12] 李嘉龙, 王炳焱. 上网电价定价方法比较[J]. 电力技术经济, 2006, 18(3): 32-35.
- [13] 朱颢东, 钟勇. 一种改进的模拟退火算法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(6): 32-35.
- [14] 江加和, 宋子善, 沈为群. 模拟退火算法在连续变量全局优化问题中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(5): 556-559.
- [15] 朱法华, 赵国华. 燃煤电厂烟气脱销的政策要求与建议[J]. 中国电力, 2008, 41(2): 51-54.
- [16] DEKKERS A, AARTS E. Global optimization and simulated annealing[J]. Mathematical Programming, 1991, 50: 367-393.
- [17] FOGEL D B. An introduction to simulated evolutionary optimization[J]. IEE Transaction On euralNeurals, 1994(79): 191-200.
- [18] 孙克勤, 钟秦. 火电厂烟气脱硝技术及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 132-137.

Research on Denitration Electricity Price in Coal-fired PowerPlant: Based on Operation Period Price and Simulated Annealing

Zhou Jianguo¹, Liang Huaitao¹, Zhao yi²

(1. School of Business Administration, North China Electric Power University, Baoding, 071003, China;

2. School of Environmental Engineering, North China Electric Power University, Baoding, 071003, China)

Abstract: Based on the method of operation period price to calculate the denitration electricity prices, in order to simplify the complicated calculation process, this paper uses the simulated annealing algorithm proposed ideas to optimize the calculation of the denitration electricity prices, and establishes the denitration electricity prices model which based on the operation period price and simulated annealing. At the end, it takes the new power plant, denitration project of guohua power plant as an example, verify the reasonableness of the model

Key words: coal-fired power plant; denitration price; operation period price; simulated annealing; internal rate of return