

# 考虑价格风险管理的电力中长期竞价机制设计

高天华<sup>1,2</sup>, 蒲勇健<sup>2</sup>

(1. 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044; 2. 昆明理工大学管理与经济学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 在电力中长期交易中, 为探讨价格风险的管理方法, 本文采用机制设计的研究范式, 探讨中长期市场竞价机制的三个规则, 以弥补当前固定浮动比例机制的不足. 结果表明: 1) 新机制的支付规则可动态调整电价的浮动比例, 能将电价管控在一定范围, 并降低用户购电成本. 2) 新机制将促使发电商客观估计自身成本, 报出最可能的成本类型, 以反映出最真实的风险补偿需求. 3) 新机制能减轻发电商面临的风险, 发电商获得的租金随边际成本上限和风险规避系数的增加而增加, 监管部门可通过两者调节机制给予发电商的风险溢价. 总之, 本文认为监管部门应动态调整电价的浮动比例来管理风险, 并激励发电商报出真实的风险补偿需求.

**关键词:** 电力中长期市场; 成本风险; 激励相容; 个人理性

中图分类号: F272.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2026)01-0015-13

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2026.01.002

## Design of medium and long-term electricity bidding mechanism considering price risk management

Gao Tianhua<sup>1,2</sup>, Pu Yongjian<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** To address price risk management in the medium- and long-term electricity trading, this paper discusses three bidding mechanism rules within the framework of mechanism design, addressing the shortcomings of the current fixed-floating ratio pricing. The results show that: 1) The payment rules of the new mechanism can dynamically adjust the floating ratio of the electricity price, control the price within a certain range, and reduce the purchase cost for users. 2) The new mechanism can encourage power producers to objectively estimate their own costs and report their most likely cost types, thereby reflecting the most real risk compensation needs. 3) The new mechanism can mitigate the risks faced by power producers, and the rent they obtain increases with higher marginal cost ceilings and greater risk aversion coefficients. The regulators can adjust the risk premium through both parameters. In conclusion, this paper argues that regulators should dynamically adjust the floating ratio of electricity prices to manage risk and incentivize power producers to report their actual risk compensation needs.

**Key words:** medium and long-term electricity market; cost risk; incentive compatibility; individual rationality

收稿日期: 2022-05-24; 修订日期: 2024-04-15.

基金项目: 云南哲学社会科学规划智库资助项目(ZK2025YB14); 昆明理工大学人文社会科学培育资助项目(SKDYB202410); 遵义科技计划资助项目(遵市科合HZ字[2025]192号).

## 1 引言

近年来,我国电力体制改革不断推进,已基本实现“放开两头,管住中间”的政策目标<sup>[1]</sup>.一方面打破发电侧和售电侧的市场垄断,释放改革红利,降低社会用电成本;另一方面核定输配电价,促使电网盈利模式由购销价差向收取过网费转变<sup>[2]</sup>.但改革的同时也伴随着价格风险(本文把由价格变动引发的风险称为“价格风险”)事件的时有发生,比如2021年下半年,由于供给侧改革后煤炭行业产能受限,以及疫情后内外需的骤增,供需的严重失衡导致电煤价格大幅上涨<sup>[3,4]</sup>,使得发电企业面临巨大亏损,继而引发部分省市的限电和有序用电现象<sup>[5]</sup>.究其原因,除了电煤价格变动的外部因素之外,电力交易机制的不完善也是一个重要方面,因此探讨由市场机制不完善导致的价格风险,对稳定市场秩序,促进电力市场的健康发展具有举足轻重的作用.

站在电力交易机制的角度,当前价格风险来源于两方面:一是发电商在中长期市场签订的高比例电量合同.售电市场放开后,电力主要在中长期市场进行交易,发电商与售电公司(或大用户)签订长时段的物理合同(主要为年度和月度合同)来锁定远期电价,让中长期电量合同起到价格的压舱石作用.但当前中长期交易机制并不能对市场变化做出及时合理的反应,签订长时段的电量合同,将要求市场主体预测长时间内的供需关系和燃料成本等情况,必然会增加预测的难度,从而导致估计的发电成本与合同实际执行时的成本存在差异,如果燃煤价格的上涨导致发电成本高于签订的合同电价,那么发电商将面临亏损<sup>[6]</sup>;二是竞价中的信息不对称.当前我国电力中长期市场普遍采用基于电力库的统一价格出清机制(market clearing price, MCP),市场主体向交易机构投标,申报价格和数量,交易机构根据一定的规则确定出清价格和中标电量,并满足市场约束和供需平衡<sup>[7]</sup>.但理性的发电商会通过策略性投标实现更大的利润,而不是申报真实的边际成本<sup>[8]</sup>,即不满足激励相容约束,从而大量的策略性投标行为会导致电价波动,造成价格风险.

为此,监管部门采用“基准价+上下浮动”的方式,让市场形成的电价在固定范围内浮动,以此管控价格风险.2019年国家发改委出台的《关于深化燃煤发电上网电价形成机制改革的指导意见》(发改价格规〔2019〕1658号)规定浮动比例为标杆电价的 $[-15\%, +10\%]$ ,之后2021年出台的“1439号”文进一步将比例放宽为 $[-20\%, +20\%]$ .但市场专家认为,当前定价方式相当于煤电联动引起的价格变动只能在标杆电价的 $[-20\%, +20\%]$ 内变化,在燃煤价格市场化,理论上变化范围不受限的前提下,用确定的范围界定一个不确定的变化,显然缺乏灵活性和准确性<sup>[9,10]</sup>,并且“1439号”文后,大多发电商的电量合同都会顶格上浮20%<sup>[6]</sup>,表明固定浮动机制不能反映发电商对风险的真实补偿需求,存在夸大风险的可能,这会增加用户的购电成本,因此本文将分析两个方面的问题:一是设计能真实反映市场主体风险补偿需求的电力中长期竞价机制;二是探讨一种电价的动态浮动机制,弥补当前固定浮动机制的不足.

国内外学者主要从以下几个方面研究价格风险的管控:一是利用金融风险对冲或转移风险,这在国外的研究中很普遍,比如学者Conejo等<sup>[11]</sup>, Collins<sup>[12]</sup>, Safdarian等<sup>[13]</sup>和Li等<sup>[14]</sup>都讨论了市场主体通过期货市场或者远期合约对冲电价的波动风险;二是站在竞价策略和市场机制的角度,由于金融风险技术的运用通常需要建立在电力金融市场的基础上,而我国当前缺乏电力金融市场,所以国内研究更注重从竞价策略的角度去分析,比如林钦梁<sup>[15]</sup>和韩瑜<sup>[16]</sup>都应用博弈论方法优化发电商的报价策略,从而寻找到价格风险的最优管理方式.同时也有少量文献从市场机制的角度去探讨,比如叶泽<sup>[10]</sup>从理顺电力中长期市场和现货市场的关系入手分析价格风险的管理.陈皓勇等<sup>[17]</sup>则借鉴国外经验,利用多层次电力市场探讨能源绿色低碳转型背景下的电力市场风险管理,但这类研究以案例分析和经验总结为主,并没有具体的实施路径;三是从竞价机制的角度进行分析,代表性的为引入激励相容约束,降低策略性投标,从而抑制电价波动.比如Xu等<sup>[18]</sup>将VCG(Vickrey-Clark-Groves)机制应用于电力批发市场竞价机制中,依据参与主体对市场的福利贡献度确定支付,诱导发电商讲真话. Silva等<sup>[19]</sup>则在设计的结算规则中包含成本补偿和激励市场主体讲真话的信息补偿两部分,以实现激励相容,类似的还有Exizidis等<sup>[20]</sup>,邹小燕等<sup>[21]</sup>学者的研究.

上述文献为我国如何管控电力市场的价格风险提供了重要借鉴,但至少在三个方面值得完善:一是由于我国当前并未建立电力金融市场,所以利用金融风险技术进行的分析并不契合我国电力实践,并且电价是竞价形成的,竞价过程中的一系列规制必然影响电价的波动,所以电力市场价格风险的管理一方面可以借鉴国外的金融风险技术,更重要的应从电力市场内部机制出发,虽然国内有部分文献从市场机制的角度入手分析,但总体还处于经验总结的初步探索阶段;二是在竞价机制的设计研究中,大多都假定市场主体在参与竞价时知道自身的边际成本<sup>[18,19]</sup>,但这与实际并不相符,特别是电力中长期市场竞价中,由于交易长时段的电量,市场主体并不能准确知道合同在执行时的真实成本,所以在竞价机制设计中理应假定市场主体无法准确知道自身的成本类型;三是大多文献设计的激励相容机制相对复杂,难以应用于电力实践<sup>[20,21]</sup>.因此本文将考虑电力中长期交易存在的价格风险,采用经典机制设计理论的研究范式,推导满足激励相容和个人理性约束的三个规则,促使发电商报出客观估计的边际成本,改变目前固定浮动机制的管理方式,使中长期电量合同定价更能真实地反映发电商对风险的补偿需求,然后具体分析机制的实施过程,最后给出算例,总结相关结论和政策建议,本文与现有文献的对比如表1所示.

表 1 本文与现有文献的比较

Table 1 The comparison of this paper with existing literatures

序号	现有文献的不足	本文的贡献与创新
1	国内从市场机制角度进行的分析不充分,还处于经验总结阶段	从竞价机制的角度探讨价格风险的管理办法,并提出具体的三个规则
2	现有文献假定市场主体在参与竞价时知道自身的边际成本,与事实不符	本文假定市场主体在参与中长期市场竞价时不知道合同执行时的准确成本
3	设计的激励相容机制相对复杂,难以应用到电力实践	新机制基于现有机制进行改进,以此增强适用性,并具体分析新机制的实施过程

## 2 基本假定

MCP出清机制的具体流程如下: 1) 市场主体集中申报拟买入或卖出的交易电量与价格. 2) 交易中心将买方申报价格按照由高到低的顺序排列, 卖方申报价格按照由低到高的顺序排列, 依次形成交易对. 3) 交易中心在相关物理约束的前提下, 以社会福利最大化为目标出清市场, 获得出清电价和中标电量, 并计算各个市场主体的支付. 本文将参照上述流程进行分析, 同时为了简化问题, 只考虑卖方(发电商)的报价过程, 从而设定以下几个假设:

**假设1** 在某一限定区域的市场上存在 $I$ 个发电商. 发电商 $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ 的边际成本 $c_i$ 为私有信息, 且会面对成本的不确定性, 即发电商 $i$ 在参与竞价时并不知道自己的真实成本类型, 要事后才能准确得知, 但对 $c_i$ 的可能值有一个主观的概率分布, 设 $c_i \in [c_i, \bar{c}_i]$ , 服从分布 $F_i(c_i)$ , 概率密度为 $f_i(c_i)$ , 且为共同知识. 同时假定发电商的变动成本仅为售电业务产生, 固定成本通过容量市场等机制收回, 因此只需考虑发电商的变动成本.

**假设2** 参照统一出清机制, 可归纳出三个规则: 1) 排序规则, 交易中心把市场主体的报价进行排序, 决定出力顺序和购买顺序. 2) 分配规则, 决定市场主体的中标电量. 3) 支付规则, 计算各个市场主体的支付金额. 因此本文将针对这三个规则进行分析, 并采用直接机制的设计范式假定排序规则为 $r_i(c_i)$ , 决定发电商 $i$ 的出力顺序, 分配规则为 $q_i(c_i)$ , 决定发电商 $i$ 的中标电量, 支付规则为 $t_i(c_i)$ , 决定给予发电商 $i$ 的支付, 三个规则都为发电商边际成本报价 $c_i$ 的函数.

**假设3** 设交易机构为风险中性的, 由于只考虑发电商的竞价过程, 所以交易机构的出清目标由最大化社会福利变为最小化买方的支付成本<sup>[22]</sup>.

根据以上的假定, 如果发电商 $i$ 的报价为 $c_i$ , 那么在市场出清之前, 其预期中标电量的期望为

$$Q_i(c_i) = \int_{c_{-i}} q_i(c_i, c_{-i}) f_{-i}(c_{-i}) dc_{-i},$$

其中  $\mathbf{c}_{-i} = (c_1, c_2, \dots, c_{i-1}, c_{i+1}, \dots, c_I)$  为不包含发电商  $i$  的报价向量,  $f_{-i}(\mathbf{c}_{-i})$  为  $\mathbf{c}_{-i}$  的密度函数,  $\mathbf{C}_{-i}$  为  $\mathbf{c}_{-i}$  的所属区域. 同理发电商  $i$  获得的期望支付可表示为

$$T_i(c_i) = \int_{\mathbf{C}_{-i}} t_i(c_i, \mathbf{c}_{-i}) f_{-i}(\mathbf{c}_{-i}) d\mathbf{c}_{-i},$$

从而当发电商  $i$  预期中标电量为  $Q_i(c_i)$  时的利润为

$$\pi_i(c_i) = T_i(c_i) - c_i Q_i(c_i). \quad (1)$$

### 3 机制构建

#### 3.1 分配与支付规则

首先分析发电商为风险中性时, 分配和支付规则的推导. 由于发电商  $i$  在竞价时不知道自身的成本类型, 所以会预估一个边际成本报价, 此时激励相容约束就意味着发电商  $i$  在报出真实的预估成本  $c_i$  (发电商  $i$  客观估计的最可能的成本类型) 时能获得最大预期利润. 由此  $\forall c_i, \tilde{c}_i \in [c_i, \bar{c}_i]$ , 激励相容约束可写为以下不等式

$$T_i(c_i) - c_i Q_i(c_i) > T_i(\tilde{c}_i) - c_i Q_i(\tilde{c}_i). \quad (2)$$

同时由于发电商并不知道事前的成本类型, 所以当考虑成本风险时, 其事前个人理性约束应为预期的期望利润不低于零, 由此对  $\forall c_i \in [c_i, \bar{c}_i]$ , 个人理性约束可写为

$$\int_{c_i}^{\bar{c}_i} [T_i(c_i) - c_i Q_i(c_i)] f_i(c_i) dc_i \geq 0. \quad (3)$$

另外根据上文假设, 交易机构的目标函数可表示为

$$\sum_{i \in I} \int_{c_i}^{\bar{c}_i} T_i(c_i) f_i(c_i) dc_i. \quad (4)$$

在给出发电商激励相容和个人理性约束后, 下文将具体推导中长期市场竞价机制的三个规则. 首先激励相容约束使得发电商  $i$  说真话成为了最优机制, 因此由  $T_i(\tilde{c}_i) - c_i Q_i(\tilde{c}_i)$  对  $\tilde{c}_i$  求导, 得到关于  $\tilde{c}_i$  的一阶条件

$$T_i'(\tilde{c}_i) - c_i Q_i'(\tilde{c}_i) = 0. \quad (5)$$

同时最优性要求二阶条件是必要的, 所以有以下不等式成立

$$T_i''(\tilde{c}_i) |_{\tilde{c}_i=c_i} - c_i Q_i''(\tilde{c}_i) |_{\tilde{c}_i=c_i} \leq 0,$$

即

$$T_i''(c_i) - c_i Q_i''(c_i) \leq 0. \quad (6)$$

而对式(5)求微分, 式(6)可重新写为

$$Q_i'(c_i) \leq 0. \quad (7)$$

显然式(7)揭示了分配规则的一个重要特征, 即激励相容约束要求发电商  $i$  的预期中标电量为其报价  $c_i$  的非递增函数. 同时式(5)和式(7)构成的是一个局部的激励相容约束<sup>[23]</sup>, 确保发电商  $i$  在局部上不会说谎, 若检验这个局部条件也是全局的, 即要验证不等式(2)在区间  $[c_i, \bar{c}_i]$  上都成立, 证明见附录A.

同时由发电商  $i$  的利润函数(1)对  $c_i$  求导, 式(5)可进一步写为

$$\pi_i'(c_i) = -Q_i(c_i).$$

上式由  $c_i$  到  $\bar{c}_i$  积分可得

$$\pi_i(c_i) = \pi_i(\bar{c}_i) + \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i. \quad (8)$$

将式(1)代入式(8)中, 可得到激励相容的支付规则

$$T_i(c_i) = T_i(\bar{c}_i) + c_i Q_i(c_i) - \bar{c}_i Q_i(\bar{c}_i) + \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i. \quad (9)$$

然后再分析个人理性约束, 对式(3)分部积分, 并将式(5)代入, 个人理性约束可转化为

$$T_i(\bar{c}_i) - \bar{c}_i Q_i(\bar{c}_i) \geq - \int_{c_i}^{\bar{c}_i} F_i(c_i) Q_i(c_i) dc_i. \quad (10)$$

交易机构的目标为最小化支付成本, 如果发电商*i*报价为 $\bar{c}_i$ , 且给予的支付 $T_i(\bar{c}_i)$ 满足 $T_i(\bar{c}_i) > \bar{c}_i Q_i(\bar{c}_i) - \int_{c_i}^{\bar{c}_i} F_i(c_i) Q_i(c_i) dc_i$ , 那么降低 $T_i(\bar{c}_i)$ 就能减少交易机构的支付成本, 因此不等式(10)是紧的. 发电商*i*报价为 $\bar{c}_i$ 时的支付为

$$T_i(\bar{c}_i) = \bar{c}_i Q_i(\bar{c}_i) - \int_{c_i}^{\bar{c}_i} F_i(c_i) Q_i(c_i) dc_i.$$

如此将上式代入到式(9)中, 可得到满足激励相容和个人理性的支付规则, 即

$$T_i(c_i) = c_i Q_i(c_i) - \int_{c_i}^{\bar{c}_i} F_i(c_i) Q_i(c_i) dc_i + \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i. \quad (11)$$

由式(11)可知, 支付规则的第一项可看作对发电商*i*成本的补偿, 后两项可看作发电商*i*获得的信息租金, 即为激励发电商说真话而提供的补偿. 在结合利润函数(1)可知, 此时发电商*i*能赚取的利润也即是能获得的租金. 设发电商*i*获得的租金为 $U_i$ , 那么

$$U_i = - \int_{c_i}^{\bar{c}_i} F_i(c_i) Q_i(c_i) dc_i + \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i. \quad (12)$$

个人理性约束(3)也就表示为

$$\int_{c_i}^{\bar{c}_i} U_i(c_i) f_i(c_i) dc_i \geq 0.$$

而个人理性约束为紧的, 因此发电商*i*事前获得的期望租金为零. 另外由式(12)可知, 发电商*i*报价越高, 租金越少, 当发电商*i*报高成本 $\bar{c}_i$ 时, 其租金为

$$\bar{U}_i = - \int_{c_i}^{\bar{c}_i} F_i(c_i) Q_i(c_i) dc_i. \quad (13)$$

当发电商*i*报低成本 $c_i$ 时, 其租金为

$$\underline{U}_i = \int_{c_i}^{\bar{c}_i} [1 - F_i(c_i)] Q_i(c_i) dc_i. \quad (14)$$

比较式(13)和式(14), 若发电商是风险中性, 为揭示真实信息, 当发电商*i*报高成本时, 会受到惩罚, 获得负租金, 当发电商*i*报低成本时, 会得到奖励, 获得正租金, 而在区间 $[c_i, \bar{c}_i]$ 上, 发电商*i*事前能获得的期望租金为零. 这表明交易机构此时可以无代价的实施机制, 并获得帕累托最优结果, 也等价于交易机构将合作带来的收益转让给了风险中性的发电商, 此时发电商事后将获得租金但完全承担市场风险, 由此得到下列结论.

**命题1** 若发电商成本类型事前未知, 为满足激励相容和个人理性约束, 竞价机制的支付规则将使得风险中性的发电商事后获得租金, 但完全承担市场风险.

根据命题1, 当发电商是风险中性时, 若要使得该机制能够执行, 必须要求交易机构有足够的权力保障, 因为一旦发电商报高成本, 将会对其惩罚. 进而也可分析, 如果发电商为风险追求的, 那么其在获得租金的同时也会完全承担市场风险, 但追求风险将会促使发电商报价更为激进(报低价的概率增加), 事后发生亏损的风险较大. 因此上文推导的两个规则并不能为风险中性和风险追求的发电商减轻市场风险, 因此可进一步推导发电商为风险规避时的支付规则. 假定发电商*i*拥有绝对风险效用函数 $u_i(\pi_i) = 1 - e^{-\delta_i \pi_i}$ 且满足 $u_i' > 0$ ,  $u_i'' < 0$ 及 $u_i(0) = 0$ ,  $\delta_i$ 为发电商*i*的风险规避系数<sup>[23]</sup>, 那么此时激励相容约束仍然为式(2), 但个人理性约束变为

$$\int_{c_i}^{\bar{c}_i} u_i[\pi_i(c_i)] f_i(c_i) dc_i \geq 0,$$

同样对上式分部积分,有

$$u_i[\pi_i(\bar{c}_i)] \geq K_i, K_i = -\delta_i \int_{c_i}^{\bar{c}_i} e^{-\delta_i \pi_i} F_i(c_i) Q_i(c_i) dc_i. \quad (15)$$

当个人理性约束(15)为紧时,得到发电商*i*报高成本 $\bar{c}_i$ 时的支付为 $T_i(\bar{c}_i) = \bar{c}_i Q_i(\bar{c}_i) - \delta_i^{-1} \ln(1 - K_i)$ ,将其代入式(9)中,可得发电商为风险规避时,满足激励相容和个人理性约束的支付规则

$$T_i(c_i) = c_i Q_i(c_i) - \delta_i^{-1} \ln(1 - K_i) + \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i. \quad (16)$$

此时,发电商*i*的利润为 $\pi_i(c_i) = -\delta_i^{-1} \ln(1 - K_i) + \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i$ ,将其代入式(15)中,可计算出

$$K_i = \frac{\delta_i D_i}{\delta_i D_i - 1}, D_i = \int_{c_i}^{\bar{c}_i} e^{-\delta_i \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i} F_i(c_i) Q_i(c_i) dc_i. \quad (17)$$

由此支付规则(16)转化为

$$T_i(c_i) = c_i Q_i(c_i) + \delta_i^{-1} \ln(1 - \delta_i D_i) + \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i. \quad (18)$$

显然 $D_i > 0$ 且 $\ln(1 - \delta_i D_i) < 0$ ,这表明当风险规避的发电商*i*报高成本 $\bar{c}_i$ 时,也会受到惩罚,获得负租金,这同样需要交易机构拥有足够的权力保障机制的实施.同时与风险中性的情况相比,为确保风险规避的发电商参与,机制将支付风险溢金,且从后文的算例分析也可看出支付规则(18)会提供更多的租金,这体现了支付规则减轻风险的作用,由此得到下列结论.

**命题2** 若发电商成本类型事前未知,为满足激励相容和个人理性约束,竞价机制的支付规则将给予风险规避型发电商风险溢金,分担其部分市场风险.

根据命题2,监管部门可针对不同成本的发电商设定不同的风险规避系数,以体现不同的风险补偿需求.同时由上文分析,无论发电商为何种风险类型,当发电商报高成本 $\bar{c}_i$ 时,都会面临惩罚,这需要交易机构拥有足够的权利保障机制的实施,但在现实情况中,这一条件并不一定能完全满足,并且中长期合同的价格风险不是发电商主观产生,而是交易机制客观产生,所以对发电商进行惩罚并不合理.因此可改进支付规则(18),使得机制满足激励相容约束的同时,让报最高成本 $\bar{c}_i$ 的发电商获得零租金,即给予的支付仅仅覆盖其成本,如果事后合同执行时的成本真为 $\bar{c}_i$ ,那么此时发电商也能回收成本,不至于发生较大的亏损,如此通过这样的改进,使得机制一方面能满足激励相容约束,另一方面也能较好的为发电商减轻风险.改进过程如下:

根据式(17),设 $D_i^* = \int_{c_i}^{\bar{c}_i} [e^{-\delta \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i} - 1] F_i(c_i) Q_i(c_i) dc_i$ ,支付规则就变为

$$T_i(c_i) = c_i Q_i(c_i) + \delta_i^{-1} \ln(1 - \delta_i D_i^*) + \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i. \quad (19)$$

观察式(19)可知, $D_i^* \leq 0$ 且 $\ln(1 - \delta_i D_i^*) \geq 0$ .由于 $D_i^*$ 是 $c_i$ 的递增函数,所以当发电商*i*报价越高时, $D_i^*$ 和 $\ln(1 - \delta_i D_i^*)$ 越接近于零,此时发电商获得租金就越少,特别是当发电商报价 $\bar{c}_i$ 时,其支付就变为 $T_i(\bar{c}_i) = \bar{c}_i Q_i(\bar{c}_i)$ ,即仅能覆盖成本.同时 $D_i^*$ 是 $\delta_i$ 的递减函数,随着风险规避系数 $\delta_i$ 的增加, $\ln(1 - \delta_i D_i^*)$ 的值会增大,从而发电商*i*会获得更多的租金,表明改进后的规则同样会支付风险溢金.

综上,在设计电力中长期市场竞价机制中,分配规则 $Q_i(c_i)$ 为发电商*i*报价成本 $c_i$ 的非递增函数,支付规则为式(19).那么在实际竞价中,对于一个风险追求型发电商,报低价的概率较大,但报低价策略在获得较高租金的同时也承担较大的市场风险;对于一个风险规避型发电商,报高价概率较大,高价策略虽然一定程度上减轻风险,但租金又会减少.因此本文设计的分配和支付规则将促使发电商客观估计自身的成本,报出自身最可能的成本类型,如此便能反映出发电商最真实的风险补偿需求.同时支付规则(19)确定的电价可看作是在发电商报价基础上动态浮动一定比例后的价格,浮动比例与发电商报价呈负相关,与发电商风险规避系数呈正相关,所以可动态调整上浮比例,从而不仅能弥补当前固定浮动比例机制的不足,也能管控电价风险.

### 3.2 排序规则

在得到分配和支付规则后, 进一步推导排序规则, 将支付规则(19)代入到交易机构的目标函数(4)中, 有

$$\sum_{i \in I} \int_{c_i}^{\bar{c}_i} [c_i Q_i(c_i) + \delta_i^{-1} \ln(1 - \delta_i D_i^*)] f_i(c_i) dc_i + \sum_{i \in I} \int_{c_i}^{\bar{c}_i} \left[ \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i \right] f_i(c_i) dc_i,$$

其中上式后半部分通过分部积分可转化为  $\sum_{i \in I} \int_{c_i}^{\bar{c}_i} F_i(c_i) Q_i(c_i) dc_i$ , 最终交易机构的目标函数变为

$$\sum_{i \in I} \int_{c_i}^{\bar{c}_i} T_i(c_i) f_i(c_i) dc_i = \sum_{i \in I} \int_{c_i}^{\bar{c}_i} \left[ c_i + \frac{F_i(c_i)}{f_i(c_i)} \right] Q_i(c_i) f_i(c_i) dc_i + \sum_{i \in I} \delta_i^{-1} \ln(1 - \delta_i D_i^*). \quad (20)$$

由式(20)可知, 支付成本可分为两项: 第一项可看做以发电商报价计算出的购电成本, 第二项可看做机制支付给发电商的风险溢价. 交易机构的目标等价于最小化这两项, 可看出目标函数会根据成本分布函数修正发电商的报价, 因此可设排序规则为  $r_i(c_i) = c_i + \frac{F_i(c_i)}{f_i(c_i)}$ , 并按照从小到大的顺序进行排列. 另外概率密度函数的设置应满足单调风险率条件, 即  $\frac{d}{dc_i} \left[ \frac{F_i(c_i)}{f_i(c_i)} \right] > 0$ , 否则报价高的发电商反而可能在排序中获得优先权, 但根据Bagnoli和Bergstrom的研究, 对于大多数参数化的单峰概率密度, 都会满足这个条件<sup>[24]</sup>, 由此得到下列结论.

**命题3** 在考虑价格风险和激励相容约束的电力中长期市场竞价机制中, 设计的三个规则如下:

- 1) 排序规则为  $r_i(c_i) = c_i + \frac{F_i(c_i)}{f_i(c_i)}$ , 即依据  $r_i(c_i)$  按照从小到大的顺序进行排序;
- 2) 分配规则为  $q_i(c_i)$ , 且是报价成本  $c_i$  的非递增函数;
- 3) 支付规则为  $t_i(c_i) = c_i q_i(c_i) + \delta_i^{-1} \ln(1 - \delta_i D_i^*) + \int_{c_i}^{\bar{c}_i} q_i(c_i) dc_i$ .

**注 1** 由上文的定义可知,  $T_i(c_i), Q_i(c_i)$  为  $t_i(c_i), q_i(c_i)$  的期望, 为与前文假设的规则在写法上保持一致, 用  $t_i(c_i), q_i(c_i)$  代替  $T_i(c_i), Q_i(c_i)$ , 但并不会改变支付和分配规则的特征.

## 4 机制的实施与发电商决策

上文的分析只给出了排序规则和支付规则的具体形式和分配规则的特征, 本节将进一步探讨机制的具体实施过程和发电商的决策. 首先在机制的实施中, 发电商的报价就可看作其边际成本  $c_i$ , 因此可直接使用上文推导的排序规则, 用  $r_i(c_i)$  代替  $c_i$  决定发电商的出力顺序, 然而  $r_i(c_i)$  的大小与区间  $[c_i, \bar{c}_i]$  以及  $c_i$  的概率分布有关, 这不仅会影响发电商的出力优先权, 还会影响其利润, 因此交易机构应充分考虑机组类型, 燃料成本等因素对边际成本的影响, 采取科学的方法估计发电商边际成本的区间和分布, 文献[25]详细的介绍了美国PJM(Pennsylvania-New Jersey-Maryland)电力市场中发电商成本的计算方法. 同时分布函数  $F_i(c_i)$  和概率密度函数  $f_i(c_i)$  可根据实际收集的数据进行估计, 也可采用均匀分布, 正态分布等特殊分布形式, 但需满足单调风险率条件. 本文假定发电商的边际成本满足均匀分布, 由此可计算出  $F_i(c_i) = \frac{c_i - c_i}{\bar{c}_i - c_i}$ ,  $f_i(c_i) = \frac{1}{\bar{c}_i - c_i}$  和  $r_i(c_i) = 2c_i - c_i$ .

其次分配规则要求发电商的中标电量  $q_i(c_i)$  为报价的非递增函数. 本文设为简单的线性递减函数, 即  $q_i(c_i) = q_{i\max} \left( 1 - \frac{c_i - c_i}{c_i + \bar{c}_i} \right)$ , 其中  $q_{i\max}$  为发电商  $i$  的最大发电容量, 进而  $q_i(c_i)$  可表示为

$$q_i(c_i) = m - nc_i, m = q_{i\max} \frac{2c_i + \bar{c}_i}{c_i + \bar{c}_i}, n = q_{i\max} \frac{1}{\bar{c}_i - c_i}. \quad (21)$$

当然在理论上, 非线性等函数形式同样可作为分配函数, 只要能满足非递增的特性, 就能鼓励发电商讲真话, 但线性函数更为简单, 有利于具体实践, 因此本文设定如式(21)所示的分配规则. 最后在分配规则(21)的基础上推导发电商的支付规则, 将式(21)代入到式(19)中有

$$t_i(c_i) = c_i(m - nc_i) + \delta_i^{-1} \ln(1 - \delta_i D_i^*) + m\bar{c}_i - 0.5n\bar{c}_i^2 - mc_i + 0.5nc_i^2. \quad (22)$$

观察式(22), 发电商的支付为报价  $c_i$  的倒二次函数, 所以可通过参数(分配函数的设定, 风险规避系数  $\delta_i$  和

边际成本 $\bar{c}_i$ 调节支付函数的极大值,从而将电价控制在一定范围.同时交易机构在竞价前,将为不同类型发电商设定不同的风险规避系数,所以与统一出清机制(MCP)类似,新机制的竞价过程如下:1)市场主体集中申报拟买入或卖出的交易电量与价格.2)交易中心将买方申报价格按照由高到低的顺序排列,卖方申报价格按 $r_i(c_i)$ 的大小由低到高的顺序排列.3)交易中心将分配规则 $q_i(c_i)$ 计算出的电量设定为修正的发电商 $i$ 最大发电容量,然后在相关物理约束下,以社会福利最大化为目标出清市场,获得市场主体的中标电量.4)交易机构按照支付规则 $t_i(c_i)$ 计算每个发电商的支付.

按照以上的实施过程,可推导发电商的决策模型.首先由于本文未考虑买方的报价过程,所以可用需求曲线来刻画买方的需求特征.设逆需求曲线为 $p = A - Bq$ ,其中 $p$ 为电价, $q$ 为需求量, $A$ 为电力市场的最高电价,且 $A, B > 0$ .其次当存在市场逆需求曲线时,交易机构的目标函数就从总支付成本最小化转变为社会福利最大化.所以市场的出清模型为

$$\begin{aligned} \text{Max } W &= (Aq_0 - 0.5Bq_0^2) - \sum_{i \in I} [(2c_i - c_i)q_i + \delta_i^{-1} \ln(1 - \delta_i D_i^*)] \\ \text{s.t } \sum_{i \in I} q_i &= q_0 \\ q'_{i\max} &= m - nc_i \\ q_{i\min} &\leq q_i \leq q'_{i\max}, \end{aligned}$$

其中 $c_i$ 为发电商 $i$ 的报价, $q_i$ 为发电商 $i$ 的中标电量, $q_0$ 为市场总需求量, $q_{i\min}$ 为发电商 $i$ 的出力下限, $q'_{i\max}$ 为修正的发电商发电容量上限.

设 $\gamma$ 为第一个约束(电量平衡约束)的拉格朗日乘子, $\lambda_i, \mu_i$ 为第三个约束(发电商出力约束)的乘子.而发电商的利润函数为式(1),因此发电商的决策模型是双层的,上层模型为最大化发电商的利润,下层模型为交易机构的出清模型,这被称为MPEC(Mathematical Programming with Equilibrium Constraints)模型<sup>[26,27]</sup>,下层模型可通过KKT条件进行转化,最终形成带均衡约束的单层模型,发电商 $i$ 在新机制下的决策模型见附录B.同时为做出对比,以下写出MCP机制下交易机构的出清模型(发电商 $i$ 在MCP机制下的决策模型见附录C).

$$\begin{aligned} \text{Max } W &= (Aq_0 - 0.5Bq_0^2) - \sum_{i \in I} c_i q_i \\ \text{s.t } \sum_{i \in I} q_i &= q_0 \\ q_{i\min} &\leq q_i \leq q_{i\max}. \end{aligned}$$

## 5 算例分析

假定在某一限定区域内的电力市场上存在4个发电商.参考当前工商业用户的一般购电目录价<sup>[28]</sup>,设定最高电价 $A = 900$ 元/MW·h,电力的需求弹性较小,因此设定 $B = 0.01$ .同时我国电力工业以火电为主,火电的燃煤成本占电价成本的40%左右<sup>[29]</sup>,所以在考虑燃煤价格的因素下,设发电商的参数如表2所示,其中 $c_i^*$ 为发电商 $i$ 客观预估的边际成本.本节首先比较新机制和MCP机制下的排序规则和市场均衡,然后分析参数变化对租金的影响,最后考察模型的稳健性.

### 5.1 排序规则的比较

从表2可知,发电商1和发电商2的边际成本较低,所以相比其他发电商,在不影响排序的前提下,两者提高报价的空间更大.当发电商1和发电商2在各自成本区间内提高报价,其余发电商报最低价时,表3比较了MCP机制下(按报价大小排序)和新机制下(按 $r_i(c_i)$ 大小排序)4个发电商的出力顺序.

表 2 发电商的参数(单位: 元/MW·h或MW·h)

Table 2 The parameters of power producers

发电商序号	$c_i$	$\bar{c}_i$	最大出力	最小出力	$c_i^*$	$\delta$
1	200	240	30 000	0	230	0.01
2	220	260	10 000	0	260	0.02
3	230	280	10 000	0	260	0.03
4	260	350	20 000	0	330	0.04

表 3 发电商出力顺序的比较(单位: 元/MW·h)

Table 3 Comparison of output order of power producers

发电商序号	$c_i$	$r_i(c_i)$	MCP机制	新机制
1	220	240	1	3
2	227	234	2	2
3	230	230	3	1
4	260	260	4	4

由表3可知, 如果发电商1和发电商2提高报价, 那么在原机制下, 两者仍然可以优先出力, 并不会影响排序, 但在新机制下, 由于发电商1的报价相比自身成本区间下限提高得更多, 所以相比发电商2, 其排序更为靠后. 结果表明新机制的排序规则 $r_i(c_i)$ 鼓励发电商在各自的成本范围内报低价, 发电商不能只为了减轻风险而选择报高价, 要客观估计自身风险, 否则其出力顺序会靠后, 出现不中标的结果.

## 5.2 市场均衡的比较

利用求解器Gurobi寻找电力市场均衡. 由纳什均衡的定义, 给定对手的策略 $c_{-i}$ , 如果 $c_i'$ 是发电商 $i$ 的最优策略, 那么将满足不等式 $\pi_i(c_i', c_{-i}) \geq \pi_i(c_i, c_{-i})$ , 而当每个发电商都不再改变自身策略时, 市场就达到均衡, 以此思路, 求解市场均衡的算法具体为: 1) 赋初值 $(c_i)^0 = c_i$ . 2) 固定 $(c_{-i})^{t-1}$ , 求出最优的 $(c_i')^t$ ,  $t$ 表示迭代次数. 3) 如果 $(c_i')^t - (c_i')^{t-1} \leq 0.01$ , 那么结束迭代, 若不满足, 则重复第2)步. 根据求解算法, 首先比较支付规则(11)和(18)下发电商获得的租金, 然后比较MCP机制和新机制下发电商的最优策略以及相应的租金.

表 4 支付规则(11)下的市场均衡(单位: 元/MW·h或MW·h)

Table 4 The market equilibrium under payment rule (11)

发电商序号	最优报价	中标电量	租金/(元)
1	230	27 954.55	131 253.35
2	260	9 166.67	-12 257.43
3	260	9 411.76	85 546.52
4	329.99	3 467.02	33 240.55

表 5 支付规则(18)下的市场均衡(单位: 元/MW·h或MW·h)

Table 5 The market equilibrium under payment rule (18)

发电商序号	最优报价	中标电量	租金/(元)
1	230	27 954.55	275 207
2	260	9 166.67	-479.67
3	260	9 411.76	183 997
4	329.99	3 467.02	67 040.31

表 6 MCP机制下的市场均衡(单位: 元/MW·h或MW·h)

Table 6 The market equilibrium under MCP mechanism

发电商序号	最优报价	中标电量	出清电价
1	240	30 000	
2	260	10 000	
3	280	10 000	320
4	320	8 000	

表 7 新机制下的市场均衡(单位: 元/MW·h或MW·h)

Table 7 The market equilibrium under the new mechanism

发电商序号	最优报价	中标电量	租金/(元)	结算电价
1	230	27 954.55	27 7000	239.9
2	260	9 166.67	0	260
3	260	9 411.76	18 460.9	279.6
4	329.99	3 467.02	67 506.89	349.4

由表4和表5可知, 各发电商的报价和中标电量相同, 但支付规则(18)下, 发电商能获得更多的租金, 其中发电商2的报价为成本区间的最高价, 因而受到了惩罚. 仿真结果表明: 与风险中性相比, 当发电商为风险规避时, 机制能提供风险溢金. 由表6和表7可知, 低成本发电商在MCP机制下的报价明显高于 $c_i^*$ , 而在新机制下, 报价都接近 $c_i^*$ , 结果表明新机制满足激励相容约束, 鼓励发电商报出自身最可能的成本类型, 以反映出最真实的风险补偿需求. 如此对于发电商, 无论何种风险类型, 其最优策略都是报出自身客观估计的边际成本, 这对市场的价格发现具有重要意义. 同时发电商2获得了零租金, 其支付仅能覆盖成本, 而发电商4预估的边际成本为330元/MW·h, 但在MCP机制下, 市场出清电价为320元/MW·h, 所以一旦电量合同执行时边际成本真为330元/MW·h, 发电商4必将面临亏损, 相反在新机制下, 发电商4不仅能收回成本, 还能获得少量租金, 这表明新机制能减轻风险.

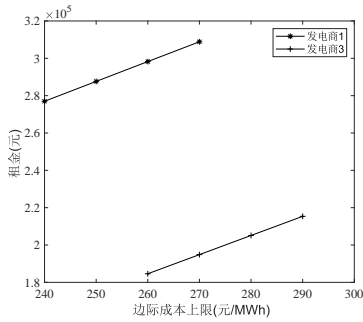


图 1 租金与发电商成本上限的关系

Fig. 1 The relationship between the rent and the cost of power producers

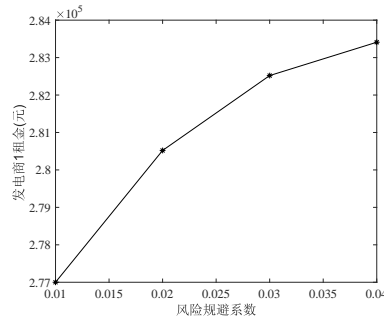
图 2 发电商1租金与 $\delta_1$ 的关系

Fig. 2 The relationship between the rent of power producer 1 and  $\delta_1$

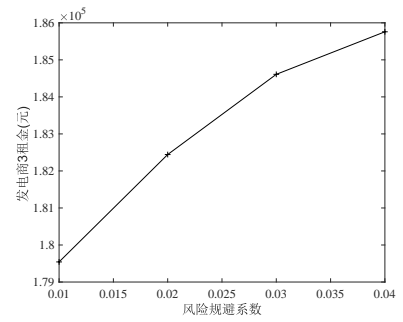
图 3 发电商3租金与 $\delta_3$ 的关系

Fig. 3 The relationship between the rent of power producer 3 and  $\delta_3$

另外发电商的结算电价为其支付与中标电量之比. 由表7可知, 各发电商的结算电价都未超过 $\bar{c}_i$ , 所以新机制能将电价控制在一定范围, 监管部门可通过参数的调节控制电价达到监管目标. 同时由各发电商的结算电价可计算出市场的平均结算电价为258.66元/MW·h, 若MCP机制下的出清电价满足固定浮动比例的要求, 那么新机制下电价显然更低, 能节省用户的购电成本.

表 8 考虑固定成本下发电商的报价(单位: 元/MW·h或MW·h)

Table 8 The offer of power producers considering the fixed cost

发电商序号	固定成本/(万元)	预估成本( $c_i^*$ )'	最优报价	中标电量
1	4 500	210	209.65	29 462.82
2	4 200	235	235	9 778.97
3	4 000	230	230	9 896.52
4	3 800	290	290	9 761.69

### 5.3 租金的变化

限于篇幅, 本节随机选择发电商1和发电商3来模拟发电商获得的租金与边际成本上限和风险规避系数的关系, 选择发电商2和发电商4能得到相同的结论. 从图1到图3可知, 租金随着边际成本上限和风险规避系数的增加而增加, 因此监管机构可通过提高发电商边际成本上限使机制缓解更大风险, 同时也可为高成本发电商设定较高的风险规避系数, 以体现更大的风险补偿需求.

### 5.4 模型的稳健性

最后考察模型的稳健性, 前文的分析并未考虑发电商 $i$ 的固定成本, 若放松假设, 设发电商 $i$ 的固定成本为 $H_i$ , 且由于机组的建设费用、折旧员工、薪酬等固定成本信息较为透明, 所以可认为固定成本为共同知识, 那么根据式(1)可写出发电商 $i$ 预期中标电量为 $Q_i(c_i)$ 时的利润为

$$\pi_i(c_i) = T_i(c_i) - c_i Q_i(c_i) - H_i, \quad (23)$$

此时激励相容约束同样为式(2), 个人理性约束则变为

$$\int_{c_i}^{\bar{c}_i} [T_i(c_i) - c_i Q_i(c_i)] f_i(c_i) dc_i \geq H_i, \quad (24)$$

如此进一步依据前文分析, 对照式(19)可推导出新机制下的支付规则, 即

$$T_i(c_i) = c_i Q_i(c_i) + H_i + \delta_i^{-1} \ln(1 - \delta_i D_i^*) + \int_{c_i}^{\bar{c}_i} Q_i(c_i) dc_i. \quad (25)$$

那么在支付规则(25)下的市场均衡如表8所示, 其中( $c_i^*$ )'表示发电商 $i$ 客观预估的边际成本, 固定成本的取值参考火电机组每月的折旧, 员工薪酬等. 从表8可知, 发电商 $i$ 的最优报价都接近自身的预估成本( $c_i^*$ )', 结果表明放松假设下新机制也满足激励相容约束, 具有一定的稳健性.

## 6 结束语

当前电力中长期市场中, 由于电量合同的成本不确定性和竞价中的信息不对称, 发电商面临着较大的价格风险. 为探讨风险的管理方法, 弥补当前固定浮动机制的不足, 本文使用经典的机制设计理论, 在考虑合同的价格风险下, 设计满足激励相容和个人理性的中长期市场竞价机制, 并推导三个规则. 研究表明: 1) 新机制的排序规则为基于修正的发电商报价 $r_i(c_i)$ 按照由小到大的顺序进行排列, 分配规则为发电商报价的非递增函数, 支付规则由给予发电商的成本补偿和信息租金两部分组成; 2) 新机制的支付规则可动态调整电价的浮动比例, 能将电价管控在一定范围, 并降低用户购电成本; 3) 新机制能减轻发电商面临的风险, 发电商获得的租金随边际成本上限和风险规避系数的增加而增加; 4) 新机制将促使发电商客观估计自身成本, 报出最可能的成本类型, 以反映出最真实的风险补偿需求.

因此, 在本文设计的激励相容竞价机制中, 无论何种风险类型的发电商, 都应客观估计自身成本, 报出最可能的边际成本. 监管部门也可根据发电商的边际成本上限和风险规避系数调节机制给予的风险溢金, 达到减轻风险的目的. 同时从本文的研究可看出, 电力市场的价格风险难以避免, 政府不应直接管控风险, 而是通过市场机制去解决, 且管控的目标应为让电价在一定范围内波动, 减轻价格风险带来的影响, 但当前固定浮动机制用确定范围界定一个不确定的变化, 缺乏灵活性和准确性, 发电商也存在夸大风险的可能, 所以应动态调整电价的浮动比例, 并激励发电商报出真实的风险补偿需求. 同时在本文设计的机制中, 发电商成本参数对三个规则有较大的影响, 因此准确估计发电商的成本对机制的顺利实施具有相当的重要性, 这可能成为新机制的缺点. 另外本文也仅研究了发电商参与竞价时的机制, 并未考虑买方的报价过程, 这也成为了今后的研究方向, 总之本文的分析是把机制设计理论运用在电力市场竞价机制上比较有意义的探索.

### 参考文献:

- [1] Yu Z. Beyond the state/market dichotomy: institutional innovations in china's electricity industry reform. *Journal of Environmental Management*, 2020, 264: 110306.
- [2] Kong Y, Feng C, Yang J. How does china manage its energy market? A perspective of policy evolution. *Energy Policy*, 2020, 147: 111898.
- [3] 陈 彬, 张泽一. 电荒背后的煤电博弈. *企业观察家*, 2021(10): 114-119.  
Chen B, Zhang Z Y. The game of coal power behind power shortage. *Enterprise Observer*, 2021(10): 114-119. (in Chinese)
- [4] 席菁华. 近20年来罕见大限电, 煤电联动何时破局. *企业观察家*, 2021(10): 82-85.  
Xi J H. The rare electricity shortage in the past 20 years, when to solve the coal electricity linkage. *Enterprise Observer*, 2021(10): 82-85. (in Chinese)
- [5] 陈轶丽. 拉闸限电: 原因、影响及启示. *河北企业*, 2022(6): 29-31.  
Chen Y L. Switching power limit: The reason, influence and enlightenment. *Hebei Enterprise*, 2022(6): 29-31. (in Chinese)
- [6] 叶 泽. 2021年中长期市场交易合同重签现象及其分析: 对2021年年度交易合同改签换签的反思. *中国电力企业管理*, 2022(1): 44-47.  
Ye Z. The analysis on the re-signing phenomenon of medium and long-term market contracts in 2021: Reflection on the re-signing of 2021 annual trade contract. *China Power Enterprise Management*, 2022(1): 44-47. (in Chinese)
- [7] Ajayi V, Weyman T. State-level electricity generation efficiency: Do restructuring and regulatory institutions matter in the US?. *Energy Economics*, 2021, 104: 105650.
- [8] Liu S, Yang Q, Cai H, et al. Market reform of Yunnan electricity in southwestern china: practice, challenges and implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 113: 109265.
- [9] 叶 泽. 中长期市场交易合同的价格风险管理及政策建议: 对2021年年度交易合同改签换签的反思. *中国电力企业管理*, 2022(4): 40-45.  
Ye Z. Price risk management and policy suggestions for medium and long-term market transaction contracts: Reflection on the re-signing of 2021 annual trade contract. *China Power Enterprise Management*, 2022(4): 40-45. (in Chinese)

- [10] 叶泽. 从理顺中长期市场与现货市场关系入手深化电力市场改革. 中国电力企业管理, 2022(16): 37–41.  
Ye Z. Deepen the reform of the power market by straightening out the relationship between the forward market and the spot market. China Power Enterprise Management, 2022(16): 37–41. (in Chinese)
- [11] Conejo A J, Garcia R, Carrion M, et al. Optimal involvement in futures markets of a power producer. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 703–711.
- [12] Collins R A. The economics of electricity hedging and a proposed modification for the futures contract for electricity. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(1): 100–107.
- [13] Safdarian A, Fotuhi M, Lehtonen M. Impacts of time-varying electricity rates on forward contract scheduling of discos. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 29(2): 733–741.
- [14] Li W, Wu C, Dong H, et al. Risk measurement and optimization model of coal generation contracts for the difference between prospect m-v and normal triangular fuzzy stochastic variables. Kybernetes, 2016, 45(8): 1323–1339.
- [15] 林钦梁. 电力市场价格风险及避险策略研究. 长沙: 湖南大学, 2011.  
Lin Q L. Research on Price Risk and Hedging Strategies in Electricity Market. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese)
- [16] 韩瑜. 电力市场化改革中发电企业价格风险规避研究. 济南: 山东大学, 2019.  
Han Y. Research on Price Risk Avoidance of Power Generation Enterprises in Electricity Market Reform. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese)
- [17] 陈皓勇, 肖东亮, 尚金成. 能源绿色低碳转型背景下的电力市场风险管理. 中国电力企业管理, 2022(13): 50–53.  
Chen H Y, Xiao D L, Shang J C. Risk management of electricity market in the context of green and low-carbon energy transformation. China Power Enterprise Management, 2022(13): 50–53. (in Chinese)
- [18] Xu Y, Low S H. An efficient and incentive compatible mechanism for wholesale electricity markets. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8: 128–38.
- [19] Silva C, Wollenberg B F, Zheng C Z. Application of mechanism design to electric power markets (republished). IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(4): 862–869.
- [20] Exizidis L, Kazempour J, Papakonstantinou A, et al. Incentive-compatibility in a two-stage stochastic electricity market with high wind power penetration. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2846–2858.
- [21] 邹小燕, 任玉珑. 考虑长期合同的发电市场竞价机制设计. 系统工程理论与实践, 2007(8): 118–126.  
Zou X Y, Ren Y L. The electricity auction mechanism design in generation market considering the long-term contract. System Engineering: Theory and Practice, 2007(8): 118–126. (in Chinese)
- [22] 荆朝霞, 朱继松. 月度电量集中竞价市场规则的仿真实验分析. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 42–48.  
Jing Z X, Zhu J S. Simulation experiment analysis on market rules for motherly centralized bidding. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 42–48. (in Chinese)
- [23] Laffont J J, Martimort D. The Theory of Incentives. Princeton: Princeton University Press, 2009.
- [24] Bagnoli M, Bergstrom T. Log-concave probability and its applications. Economic Theory, 2005, 26(2): 445–469.
- [25] PJM. PJM manual 15: Cost Development Guidelines. <http://www.pjm.com/>, 2013, 04.
- [26] 骆子雅. 电力差价合约机制的设计与应用. 广州: 华南理工大学, 2020.  
Luo Z Y. The Design and Application of Contract for Difference in Electricity Market. Guanzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [27] 蒲勇健. 发电商古诺博弈下差价合约的市场力抑制效应. 系统工程学报, 2018, 33(6): 754–762.  
Pu Y J. Market power inhibiting effects in electricity markets based on Cournot model. Journal of Systems Engineering, 2018, 33(6): 754–762. (in Chinese)
- [28] 纪鹏. 目录电价向市场化电价转轨不可逆转. 中国电力企业管理, 2020(7): 68–69.  
Ji P. The transition from catalog price to market price is irreversible. China Power Enterprise Management, 2020(7): 68–69. (in Chinese)
- [29] 中国电力企业联合会. 科学统筹, 精准谋划: 2020~2021年度全国电力供需形势解析. 中国电业, 2021(2): 8–11.  
CEC. Scientific overall and accurate planning: Analysis of national power supply and demand from 2020 to 2021. China Electric Power, 2021(2): 8–11. (in Chinese)

#### 作者简介:

高天华 (1989—), 男, 重庆人, 博士, 讲师, 研究方向: 能源经济学, Email: gaothua@foxmail.com;

蒲勇健 (1961—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 博弈论与能源经济学, Email: puyongjian@cqu.edu.cn.

**附录A**

对式(5)由 $\tilde{c}_i$ 到 $c_i$ 积分有

$$T_i(c_i) - T_i(\tilde{c}_i) = c_i Q_i(c_i) - \tilde{c}_i Q_i(\tilde{c}_i) - \int_{\tilde{c}_i}^{c_i} Q_i(c_i) dc_i.$$

进而推出

$$T_i(c_i) - c_i Q_i(c_i) = T_i(\tilde{c}_i) - c_i Q_i(\tilde{c}_i) + (c_i - \tilde{c}_i) Q_i(\tilde{c}_i) - \int_{\tilde{c}_i}^{c_i} Q_i(c_i) dc_i.$$

根据积分中值定理, 如果 $Q_i(c_i)$ 在 $[\tilde{c}_i, c_i]$ 上连续, 那么存在一个点 $\xi$ , 使得当 $\xi \in [\tilde{c}_i, c_i]$ 时, 有

$$\int_{\tilde{c}_i}^{c_i} Q_i(c_i) dc_i = Q_i(\xi)(c_i - \tilde{c}_i).$$

从而

$$(c_i - \tilde{c}_i) Q_i(\tilde{c}_i) - \int_{\tilde{c}_i}^{c_i} Q_i(c_i) dc_i = (c_i - \tilde{c}_i)[Q_i(\tilde{c}_i) - Q_i(\xi)].$$

由于 $Q_i(c_i)$ 是非递增的, 所以 $c_i$ 在区间 $[c_i, \bar{c}_i]$ 上, 无论 $c_i > \tilde{c}_i$ 还是 $c_i < \tilde{c}_i$ , 都会存在

$$(c_i - \tilde{c}_i) Q_i(\tilde{c}_i) - \int_{\tilde{c}_i}^{c_i} Q_i(c_i) dc_i > 0,$$

由此可证明不等式(2)在区间 $[c_i, \bar{c}_i]$ 上都成立, 局部的激励相容约束也是全局的, 并由式(5)式(7)刻画.

**附录B**

发电商 $i$ 在新机制下的决策模型如下

$$\begin{aligned} \text{Max } \pi_i &= t_i(c_i) - c_i^* q_i \\ \text{s.t. } c_i &\leq c_i \leq \bar{c}_i \\ A - Bq_0 &= \gamma \\ -(2c_i - c_i) + \gamma - \mu_i + \lambda_i &= 0 \\ \sum_{i \in I} q_i &= q_0 \\ q'_{i\max} &= m - nc_i \\ q_{i\min} &\leq q_i \leq q'_{i\max} \\ \mu_i(q'_{i\max} - q_i) &= 0 \\ \lambda_i(q_i - q_{i\min}) &= 0 \\ t_i(c_i) &= c_i q_i + \delta_i^{-1} \ln(1 - \delta_i D_i^*) + m\bar{c}_i - 0.5n\bar{c}_i^2 - mc_i + 0.5nc_i^2. \end{aligned}$$

其中 $c_i^*$ 为发电商 $i$ 真实预估的边际成本, 激励相容就意味着当发电商 $i$ 报价 $c_i^*$ 时能获得最大利润.

**附录C**

在MCP机制下, 拉格朗日乘子 $\gamma$ 的经济学含义为市场统一出清电价, 所以发电商 $i$ 的决策模型如下

$$\begin{aligned} \text{Max } \pi_i &= \gamma q_i - c_i^* q_i \\ \text{s.t. } c_i &\leq c_i \leq \bar{c}_i \\ A - Bq_0 &= \gamma \\ -c_i + \gamma - \mu_i + \lambda_i &= 0 \\ \sum_{i \in I} q_i &= q_0 \\ q_{i\min} &\leq q_i \leq q_{i\max} \\ \mu_i(q'_{i\max} - q_i) &= 0 \\ \lambda_i(q_i - q_{i\min}) &= 0. \end{aligned}$$