文章编号：1000-3673（2026）01-0178-10 中图分类号：TM 721 文献标志码：A 学科代码：470·40

满足激励相容的综合能源微网群组合双向拍卖机制

邓莉荣[1]，冯然[2]，李振坤[1]，符杨[1]，葛晓琳[1]
（1．教育部海上风电技术工程研究中心(上海电力大学)，上海市 杨浦区 200090；
2．上海电力大学电气工程学院，上海市 杨浦区 200090）

Incentive-compatible Combinatorial Double Auction Mechanism for Multi-energy Microgrids

DENG Lirong[1], FENG Ran[2], LI Zhenkun[1], FU Yang[1], GE Xiaolin[1]
(1. Engineering Research Center of Offshore Wind Technology Ministry of Education (Shanghai University of Electric Power), Yangpu District, Shanghai 200090, China;
2. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

ABSTRACT: Amid the energy crisis, integrated energy systems have undergone rapid development. An incentive-compatible combinatorial double auction mechanism for multi-energy microgrids was proposed to facilitate fair and efficient trading of heterogeneous energy. Firstly, a one-shot combinatorial double auction model was established, allowing sellers to package combined heat and electricity units based on their varying power ratios, thereby addressing the inefficiency of single-energy transactions. Both buyers and sellers participated in bidding, breaking the monopoly of one-sided auctions. In imperfectly competitive markets, participants had incentives to bid untruthfully; therefore, we proposed an iterative auction mechanism. The auctioneer dynamically adjusts prices and sequences based on supply-demand scenarios. Participants update the energy trade strategy by solving subproblems sequentially or in parallel, using the latest market data from each round. Multiple information exchanges and computations led buyers and sellers to an optimal strategy. The participants were treated as price-takers, avoiding false bids while protecting their reservation price and valuation. Simulations demonstrated the effectiveness of the mechanism in reducing transaction costs, enhancing efficiency, and ensuring incentive compatibility in electricity-heat trading.

KEY WORDS: multi-energy microgrids; heterogeneous energy; combinatorial double auction; incentive compatibility

摘要：在能源危机背景下，综合能源系统得到了快速发展。为适应综合能源微网群中买卖双方对异质能源公平高效交易的需求，提出了一种满足激励相容的组合双向拍卖机制。首先，建立了一次性组合双向拍卖模型。卖方根据自身运行特性按照不同的电、热比例打包多样化的热电组合单元，避免了单一能源独立交易的低效率。设定买卖双方均参与投标，打破单向拍卖的垄断性。在不完全竞争市场中，一次性组合双向拍卖中的参与者有虚假报价的动机，为此，提出了一种迭代式拍卖机制。拍卖商根据系统供需场景动态调整价格和拍卖顺序。每轮中参与者获取最新的市场价格和供需信息，按照拍卖顺序串行或并行求解子问题，调整购、售能量方案。通过多轮的信息交互和计算，系统迭代收敛至最优交易策略。迭代式机制中，买卖双方均是价格接受者，可抑制虚假报价，同时保留了参与者的限价和估值，有效保护了隐私信息。最后，算例仿真验证了所提机制在电热耦合交易中能够降低交易成本、提升拍卖效率、保证激励相容。

关键词：综合能源微网群；异质能源；组合双向拍卖；激励相容

DOI：10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2111

0 引言

能源危机对传统能源结构和人类社会发展造成巨大冲击。为解决能源可持续供应问题，综合能源系统被视为一种重要途径[1-2]。综合能源微网作为一种小型的综合能源系统，具有生产者和消费者的双重身份[3]。综合能源微网数量增加，逐渐形成了综合能源微网群，各微网间的能量互济进一步提升了其运行方式的灵活性，并拓展了能量交易的渠道[4]。然而，由于微网群中的微网数量有限，无法满足完全竞争市场假设。因此，在这种不完全竞争环境下，设计一种满足激励相容的市场机制尤为重要[5-6]。

作为一种能够实现公平竞争和优化资源利用效率的交易机制，拍卖是一种有效手段[7]。按照拍卖的物品种类和数量划分，可分为单项拍卖和组合拍卖[8]。按照市场结构划分，可分为单向拍卖和双向拍卖[9]。在涉及多种资源的复杂拍卖中，拍卖商

基金项目：国家自然科学基金项目(52307116)、上海市扬帆计划(22YF1414500)、上海市晨光计划(22CGA68)。

Project Supported by the Funds of the National Natural Science Foundation of China (52307116), Shanghai Sailing Program (22YF1414500), Shanghai Chenguang Program(22CGA68).

不仅面临单向拍卖中一方垄断问题的挑战，还需要解决传统拍卖机制在灵活性和效率上的不足[10]。为解决上述问题，组合双向拍卖应运而生。在组合双向拍卖中，一方面，参与者对其感兴趣的物品进行组合投标，可有效降低交易次数与交易成本，也满足了对灵活化和多样化交易的需求；另一方面，买卖双方均参与拍卖，能够兼顾双方的利益，实现资源高效分配。目前，组合双向拍卖多用于云计算、频谱拍卖[11]等领域，在能源市场领域的研究相对较少。

组合双向拍卖在能源市场中的应用多为多单元同质商品的交易[12]。例如，文献[13]中拍卖商组织买卖双方对不同时段的储能电量进行组合拍卖。文献[14]中买卖双方组合拍卖的商品是各时段的绿证。文献[15]在微电网群中为参与者设计了对电能组合投标的拍卖机制。以上研究均属于单一能源的组合拍卖，对来自不同卖方或不同时段的能源进行组合。但是，综合能源市场有对异质能源组合拍卖的需求。例如，热电联产机组(combined heat and power，CHP)同时产生电和热，其中背压式机组输出的电、热功率按照固定的线性比例，而抽凝式机组的电-热可行域可以灵活调整产出比例[16]。为解决这一问题，文献[17]开始探索 CHP 和买方之间的电热交易。拍卖流程是先电能、后热能交易，最后筛选出电、热均发生交易的 CHP，但未能改变两种能源按照先后顺序独立交易的本质。此外，该交易未考虑 CHP 的运行约束，所得结果可能在实际中不可行。同时，以上研究均采用一次性拍卖(one-shot auction)，即只经过一轮拍卖就确定成交结果。然而一次性组合双向拍卖在参与者数量较少时，不能保证激励相容[18]。

一直以来，维克里-克拉克-格罗夫斯(Vickrey-Clarke-Groves，VCG)机制被认为是实现激励相容的有效方法。然而，该机制的信息交换量大、计算复杂度极高。VCG 机制还会导致收支不平衡，即使拍卖的物品极具价值，也可能出现零收益的情况。另一种让组合拍卖实现激励相容的方式是将一次性拍卖改进为迭代式拍卖(iterative auction)。迭代式拍卖是一种渐进的或动态的机制，在物品分配前需要进行多轮竞标。在经济学领域，有经典研究[18]指出，相较于一次性拍卖，迭代式拍卖具有降低求解问题复杂性、减少隐私信息暴露、适用于实际工程等优点。迭代式的单向拍卖包括降价拍卖(荷式拍卖)和升价拍卖(英式拍卖)。降价拍卖中，拍卖商逐步降低价格，卖方根据当前价格上报供给量，保留自己的限价信息，实现卖方激励相容[19-20]。升价拍卖中，拍卖商逐步提高价格，买方按当前价格上报需求量，保留估值信息，实现买方激励相容[21]。但是，迭代式单向拍卖仅考虑了买方或卖方一类参与者真实报价。为实现买卖双方真实报价，迭代式双向拍卖是一种有效途径，但在能源交易领域鲜有研究。文献[22]基于贪婪算法提出了一种迭代式双向拍卖机制。拍卖商向买卖双方的叫价从 0 开始，以相同的价格时钟方向上升，买卖双方分别进行子问题求解，实现多轮拍卖。然而由于卖方不愿意以低价出售商品，可能会出现拍卖次数增多情况。这表明，在相同的价格时钟方向下，市场无法高效运作。

本文针对综合能源微网群的电、热耦合同步交易，提出了满足激励相容的组合双向拍卖机制。和已有研究工作相比，本文的创新和贡献如下：

1）建立了综合能源微网群一次性组合双向拍卖模型。卖方根据自身运行特性将电能、热能按照不同的比例打包成组合单元，有效降低交易成本。采用双向拍卖方式，打破单向拍卖中的垄断问题。

2）设计了买卖双方均满足激励相容的迭代式拍卖机制。在同一轮拍卖中，买卖双方采用不同的价格时钟方向：卖方侧价格下降，买方侧价格上升，从而快速找到市场均衡价格。买卖双方自身的限价和估值作为私有信息保留，保护了隐私，并能实现个体理性、收支非负。

3）提出了一种供需驱动的自适应顺序拍卖方法。基于系统供需场景，拍卖商动态调整价格并制定拍卖顺序。在供需极端不平衡时，单向调价且并行拍卖；在供需较平衡时，双向调价且串行拍卖，促进供需快速匹配，提高拍卖收敛速度。

1 一次性组合双向拍卖模型

综合能源微网群系统运行框架如图 1 所示。系统分为上级能源网层，微网群层，以及微网层。在微网层，微网基于负荷预测完成内部优化调度，根据净剩能量划分为买方和卖方微网；在微网群层，拍卖商执行组合双向拍卖，协调微网间的能量互济；上级能源网层通过区域电、热市场平衡微网群之间未成交的供需量。

为了实现微网群层的能量互济，提出了一次性组合双向拍卖模型，该模型主要包括投标和竞胜标确定两个环节。首先，综合能源卖方微网和买方微网在拍卖商组织下提交投标信息。随后，拍卖商根据收集到的投标信息决定中标参与者，交易份数和交易价格。

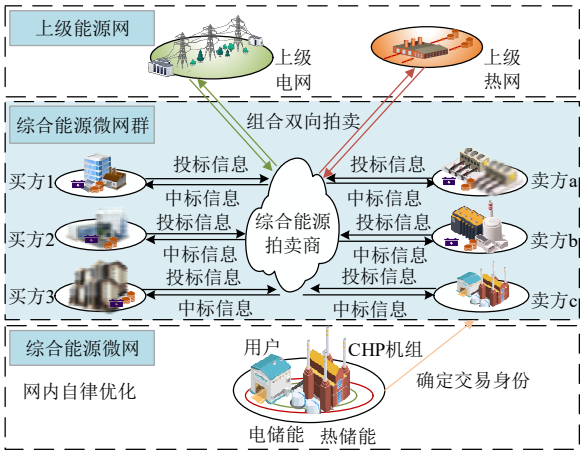


图 1　综合能源微网群运行框架

Fig. 1　Operation framework of multi-energy microgrids

1.1　投标

卖方微网基于自身运行特点，将电力与热能以多种比例组合，形成多样化的能量单元。能量单元可分为热电组合单元、纯电单元、纯热单元 3 种类型，对应索引集合分别是 I^{unit}，$I^{\text{ind,e}}$，$I^{\text{ind,h}}$。设卖方微网 k 的单元 i 中的电功率和热功率分别为 $a_{k,i}^{\text{e}}, a_{k,i}^{\text{h}}$。$i \in I^{\text{ind,e}}$ 时，$a_{k,i}^{\text{e}}=1, a_{k,i}^{\text{h}}=0$；$i \in I^{\text{ind,h}}$ 时，$a_{k,i}^{\text{e}}=0, a_{k,i}^{\text{h}}=1$。

图 2 为综合能源微网群一次性组合双向拍卖的投标过程。买方微网 l 的投标包括电、热最大需求 $D_l^{\text{e}}, D_l^{\text{h}}$ 和能量单位估值 $w_l^{\text{e}}, w_l^{\text{h}}$。卖方微网 k 的投标包括能量单元 $a_{k,i}^{\text{e}}, a_{k,i}^{\text{h}}$，电、热生产上限 $A_k^{\text{e}}, A_k^{\text{h}}$ 和单位限价。卖方 k 对单元 i 的单位限价根据单元类型而不同，纯电单元为 $v_k^{\text{ind,e}}$，纯热单元为 $v_k^{\text{ind,h}}$，热电组合单元的单位电、热限价分别是 $v_k^{\text{unit,e}}, v_k^{\text{unit,h}}$。卖方微网中存在能源耦合生产设备，如 CHP 机组。然而，在单一能源拍卖模式下，卖方可能因无法同时售出电能、热能而导致能源浪费，降低整体经济效益。为了充分发挥电热耦合特性，提高能源利用率，卖方倾向于优先售出热电组合，因此 $v_k^{\text{unit,e}} \le v_k^{\text{ind,e}}$，$v_k^{\text{unit,h}} \le v_k^{\text{ind,h}}$。

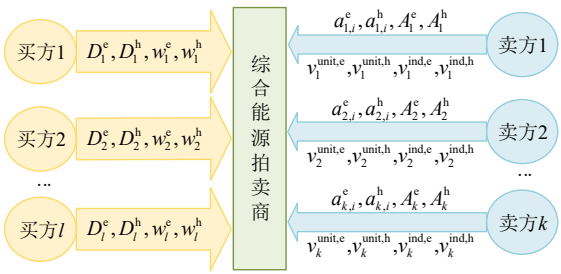


图 2　综合能源微网群一次性组合双向拍卖投标过程

Fig. 2　Bidding process of the one-shot combinatorial double auction for multi-energy microgrids

1.2　竞胜标确定

拍卖中获胜者的分配被称为竞胜标确定问题(winner determination problem)。拍卖商以社会福利最大化为目标，以买方的需求、卖方的生产上限等为约束，确定最优交易结果。

$$\max \sum_l \sum_k \sum_i n_{l,k,i} W_{l,k,i} - \sum_k \sum_i m_{k,i} V_{k,i} \tag{1a}$$

$$\text{s.t.} V_{k,i} = \begin{cases} v_k^{\text{ind,e}} a_{k,i}^{\text{e}}, i \in I^{\text{ind,e}} \\ v_k^{\text{ind,h}} a_{k,i}^{\text{h}}, i \in I^{\text{ind,h}} \\ v_k^{\text{unit,e}} a_{k,i}^{\text{e}} + v_k^{\text{unit,h}} a_{k,i}^{\text{h}}, i \in I^{\text{unit}} \end{cases} \tag{1b}$$

$$W_{l,k,i} = w_l^{\text{e}} a_{k,i}^{\text{e}} + w_l^{\text{h}} a_{k,i}^{\text{h}} \tag{1c}$$

$$0 \le \sum_k \sum_i n_{l,k,i} a_{k,i}^{\text{e}} \le D_l^{\text{e}}, \forall l \tag{1d}$$

$$0 \le \sum_k \sum_i n_{l,k,i} a_{k,i}^{\text{h}} \le D_l^{\text{h}}, \forall l \tag{1e}$$

$$\sum_i m_{k,i} a_{k,i}^{\text{e}} \le A_k^{\text{e}}, \forall k \tag{1f}$$

$$\sum_i m_{k,i} a_{k,i}^{\text{h}} \le A_k^{\text{h}}, \forall k \tag{1g}$$

$$m_{k,i} = \sum_l n_{l,k,i}, \forall k, \forall i \tag{1h}$$

$$n_{l,k,i} \in N^+, \forall l, \forall k, \forall i \tag{1i}$$

$$m_{k,i} \in N^+, \forall k, \forall i \tag{1j}$$

式中：$V_{k,i}$ 是卖方 k 对单元 i 的限价；$W_{l,k,i}$ 是买方 l 对于卖方 k 所售的单元 i 的估值；$m_{k,i}$ 是卖方 k 所售的单元 i 的份数；$n_{l,k,i}$ 是买方 l 对于卖方 k 所售单元 i 的购买份数；N^+ 代表正整数集合。

式(1a)旨在实现社会福利最大化。约束式(1b)和式(1c)分别定义了 $V_{k,i}$ 和 $W_{l,k,i}$ 的计算方法；式(1d)和式(1e)确保买方 l 的能量购买量满足负荷约束；式(1f)和式(1g)限制卖方 k 的能量销售总量不超过生产上限；式(1h)保证买卖双方交易份数均衡；式(1i)和式(1j)确保买卖双方购售单元的份数为正整数。

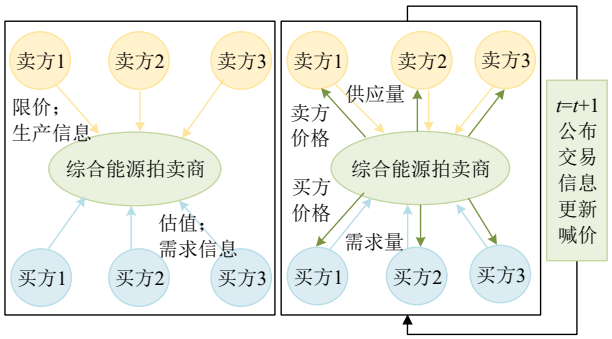
2　迭代式组合双向拍卖机制

由于综合能源微网群系统处于市场发展初期，且受限于区域资源禀赋，通常微网数量较少，一般无法满足完全竞争的市场假设。在此背景下，一次性组合双向拍卖可能无法实现激励相容。因此，提出了一种满足激励相容的迭代式组合双向拍卖机制。图 3 为两种方法的信息交互过程。

在一次性组合双向拍卖中，所有信息在一次交互中完成交换，参与者有虚假报价以获利的冲动。相比之下，在迭代式组合双向拍卖中，拍卖商每次公布市场价格，买卖双方作为价格接受者，根据市场价格采取最优策略，向拍卖商反馈意向交易量，而无需上报自己的限价和估值信息，参与者的隐私

得以保护并确保了激励相容性。

本节首先构建了买卖双方子问题，然后提出了迭代式拍卖框架，随后给出了算法流程，最后介绍了结算机制。



(a) 一次性拍卖　　(b) 迭代式拍卖

图 3　两种方法的信息交互示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the information interaction between the two methods

2.1　综合能源卖方子问题

为了将模型(1)分解为卖方子问题和买方子问题，引入拉格朗日乘子$\lambda_{k,i}$以及惩罚系数ρ，将买卖双方交易的耦合约束式(1h)松弛到目标函数中，实现耦合约束的分解。

在每轮拍卖中，卖方根据拍卖商传达的市场信息进行决策，为此引入单次参与拍卖的信息成本c^{mes}。式(2a)—(2c)描述了迭代式综合能源组合双向拍卖中卖方k的子问题模型。

$$\begin{cases}\max\limits_{m_{k,i}} \underbrace{\sum\limits_i m_{k,i}P_{k,i}-\sum\limits_i m_{k,i}V_{k,i}-c^{\mathrm{mes}}t}_{\text{生产者剩余}} \\ \quad \underbrace{-\sum\limits_i \lambda_{k,i}m_{k,i}-\dfrac{\rho}{2}\sum\limits_i \| m_{k,i}-\sum\limits_l n_{l,k,i}\|_2^2}_{\text{供需平衡}} & (2a)\\ \text{s.t. } P_{k,i}=\begin{cases}p_k^{\mathrm{ind,e}},i\in I^{\mathrm{ind,e}}\\ p_k^{\mathrm{ind,h}},i\in I^{\mathrm{ind,h}}\\ p_k^{\mathrm{unit,e}}a_{k,i}^{\mathrm{e}}+p_k^{\mathrm{unit,h}}a_{k,i}^{\mathrm{h}},i\in I^{\mathrm{unit}}\end{cases} & (2b)\\ (1\mathrm{b}),(1\mathrm{f}),(1\mathrm{g}),(1\mathrm{j}) & (2c)\end{cases}$$

式中：$P_{k,i}$表示卖方k售出单元i所获得的费用；其中，$p_k^{\mathrm{ind,e}}$，$p_k^{\mathrm{ind,h}}$，$p_k^{\mathrm{unit,e}}$，$p_k^{\mathrm{unit,h}}$分别是拍卖商向卖方公布的纯电、纯热单元单位价格、热电组合单元中电能和热能的单位售出价格。t为拍卖的当前轮次。$\sum\limits_l n_{l,k,i}$为拍卖商传递的买方l对卖方k能量单元i的最新购买份数。

式(2a)表示卖方k的目标是最大化生产者盈余，同时尽可能平衡供需份数。约束(2b)定义了$P_{k,i}$的计算方法。

2.2　综合能源买方子问题

在每轮拍卖中，买方根据拍卖商传达的市场信息进行决策。式(3a)—(3c)构成迭代式综合能源组合双向拍卖中买方l的子问题模型。

$$\begin{cases}\max\limits_{n_{l,k,i}} \underbrace{\sum\limits_k\sum\limits_i n_{l,k,i}W_{l,k,i}-\sum\limits_k\sum\limits_i n_{l,k,i}P_{l,k,i}-c_l^{\mathrm{mes}}t}_{\text{消费者剩余}} \\ \quad \underbrace{+\sum\limits_k\sum\limits_i \lambda_{k,i}n_{l,k,i}-\dfrac{\rho}{2}\sum\limits_k\sum\limits_i \| m_{k,i}-\sum\limits_{r\in I_{-l}} n_{r,k,i}-n_{l,k,i}\|_2^2}_{\text{供需平衡}} & (3a)\\ \text{s.t. } P_{l,k,i}=\begin{cases}p_l^{\mathrm{ind,e}},i\in I^{\mathrm{ind,e}}\\ p_l^{\mathrm{ind,h}},i\in I^{\mathrm{ind,h}}\\ p_l^{\mathrm{unit,e}}a_{k,i}^{\mathrm{e}}+p_l^{\mathrm{unit,h}}a_{k,i}^{\mathrm{h}},i\in I^{\mathrm{unit}}\end{cases} & (3b)\\ (1\mathrm{c}),(1\mathrm{d}),(1\mathrm{e}),(1\mathrm{i}) & (3c)\end{cases}$$

式中：$P_{l,k,i}$是买方l为卖方k的能量单元i支付的费用；$p_l^{\mathrm{ind,e}}$，$p_l^{\mathrm{ind,h}}$，$p_l^{\mathrm{unit,e}}$，$p_l^{\mathrm{unit,e}}$分别是拍卖商向买方l宣布的纯电单元、纯热单元、热电组合中的电、热的单位价格；I_{-l}是除了买方l的剩余买方的集合；$m_{k,i}$表示拍卖商传递的卖方k能量单元i的最新售卖份数。$\sum\limits_{r\in I_{-l}} n_{r,k,i}$是拍卖商传递的其余买方对卖方$k$单元$i$的最新购买份数。

式(3a)表示买方l的目标是最大化消费者剩余，同时尽可能平衡供需份数。约束(3b)定义了$P_{l,k,i}$的计算方法。

2.3　迭代式拍卖架构

1）初始信息收集与首轮拍卖。

拍卖商收集初始市场信息并发布。市场信息包括：上级电网/热网售能价格和购能价格，卖方提供的能量单元种类和电热构成等。

第一轮(t=1)，拍卖商分别向买卖双方宣布初始价格：向卖方的初始叫价为上级能量网的售能单价；向买方初始叫价为上级能量网的购能单价。引导各参与者优先参与微网群层级的能量互济，同时避免因价格过高或过低导致的交易失衡。

所有参与者同时求解买卖双方子问题(目标函数中暂不考虑供需平衡项)，完成首轮拍卖。

2）对偶乘子更新与供需量计算。

综合能源拍卖商获取拍卖结果，即买卖双方的交易份数($n_{l,k,i}$和$m_{k,i}$)，更新对偶乘子：

$$\lambda_{k,i}(t+1)=\lambda_{k,i}(t)+\rho(m_{k,i}(t)-\sum\nolimits_l n_{l,k,i}(t)) \quad (4)$$

拍卖商计算系统供需情况。

$$\begin{cases}E^{\mathrm{sell}}=\sum\limits_k\sum\limits_i m_{k,i}a_{k,i}^{\mathrm{e}},\ H^{\mathrm{sell}}=\sum\limits_k\sum\limits_i m_{k,i}a_{k,i}^{\mathrm{h}}\\ E^{\mathrm{buy}}=\sum\limits_l\sum\limits_k\sum\limits_i n_{l,k,i}a_{k,i}^{\mathrm{e}},\ H^{\mathrm{buy}}=\sum\limits_l\sum\limits_k\sum\limits_i n_{l,k,i}a_{k,i}^{\mathrm{h}}\end{cases} \quad (5)$$

式中：E^{sell}，H^{sell}是卖方侧出售的总电量、总热量；E^{buy}，H^{buy}是买方侧购买的总电量、总热量。

3）价格调整。

拍卖商执行价格调整过程。卖方侧价格逐步下降：

$$\begin{cases} p_k^{\{\cdot\},\mathrm{e}}(t+1)=p_k^{\{\cdot\},\mathrm{e}}(t)-\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{e}}\delta_k^{\{\cdot\},\mathrm{e}} \\ p_k^{\{\cdot\},\mathrm{h}}(t+1)=p_k^{\{\cdot\},\mathrm{h}}(t)-\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{h}}\delta_k^{\{\cdot\},\mathrm{h}} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{e}},\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{h}}$ 分别为卖方侧电、热价格调整系数；$\delta_k^{\{\cdot\},\mathrm{e}},\delta_k^{\{\cdot\},\mathrm{h}}$ 分别为卖方侧电、热功率的单位价格下降步长；$\{\cdot\}$ 表示 {ind,unit}。

买方侧价格逐步上升。

$$\begin{cases} p_l^{\{\cdot\},\mathrm{e}}(t+1)=p_l^{\{\cdot\},\mathrm{e}}(t)+\beta^{\{\cdot\},\mathrm{e}}\delta_l^{\{\cdot\},\mathrm{e}} \\ p_l^{\{\cdot\},\mathrm{h}}(t+1)=p_l^{\{\cdot\},\mathrm{h}}(t)+\beta^{\{\cdot\},\mathrm{h}}\delta_l^{\{\cdot\},\mathrm{h}} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$\beta^{\{\cdot\},\mathrm{e}},\beta^{\{\cdot\},\mathrm{h}}$ 分别为买方侧电、热价格调整系数；$\delta_l^{\{\cdot\},\mathrm{e}},\delta_l^{\{\cdot\},\mathrm{h}}$ 分别为买方侧电、热功率的单位价格增长步长。

表 1 不同系统供需场景下的价格调整系数
Table 1 Price adjustment coefficient under different system supply and demand conditions

场景	系统供需情况	价格调整系数选择
1	$\lvert E^{\mathrm{sell}}-E^{\mathrm{buy}}\rvert\geq\Delta E$ $\lvert H^{\mathrm{sell}}-H^{\mathrm{buy}}\rvert\geq\Delta H$	$\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{e}}=\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{h}}=1$ $\beta^{\{\cdot\},\mathrm{e}}=\beta^{\{\cdot\},\mathrm{h}}=0$
2	$\lvert E^{\mathrm{sell}}-E^{\mathrm{buy}}\rvert\geq\Delta E$ $\lvert H^{\mathrm{sell}}-H^{\mathrm{buy}}\rvert\leq\Delta H$	$\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{e}}=\beta^{\{\cdot\},\mathrm{h}}=1$ $\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{h}}=\beta^{\{\cdot\},\mathrm{e}}=0$
3	$\lvert E^{\mathrm{sell}}-E^{\mathrm{buy}}\rvert\leq\Delta E$ $\lvert H^{\mathrm{sell}}-H^{\mathrm{buy}}\rvert\geq\Delta H$	$\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{h}}=\beta^{\{\cdot\},\mathrm{e}}=1$ $\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{e}}=\beta^{\{\cdot\},\mathrm{h}}=0$
4	$\lvert E^{\mathrm{sell}}-E^{\mathrm{buy}}\rvert\leq\Delta E$ $\lvert H^{\mathrm{sell}}-H^{\mathrm{buy}}\rvert\leq\Delta H$	$\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{e}}=\alpha^{\{\cdot\},\mathrm{h}}=1$ $\beta^{\{\cdot\},\mathrm{e}}=\beta^{\{\cdot\},\mathrm{h}}=1$

系统不同供需情形下价格调整系数的选择方法如表 1 所示。表中 $\Delta E,\Delta H$ 分别是电、热供需情况限值。拍卖商根据总供应量和总需求量的差值判断系统供需情形，若差值高于限值，说明买卖双方交易能力差异巨大，属于供需不平衡的极端情形，包括场景 1, 2, 3，此时，对意向交易量较高的一方进行价格调整，另一方价格保持不变。若电热供应与需求的差值均不高于限值，说明供需总量较为接近，属于非极端情形，即场景 4，此时，对买卖双方均进行价格调整。

4）动态拍卖。

拍卖商公布市场最新价格和上一轮交易量信息。为确保信息有效传递，促进买卖双方快速达成一致，拍卖商根据供需情况确定拍卖顺序。

极端情形(场景 1, 2, 3)，执行并行拍卖：买卖双方并行求解各自子问题。

非极端情形(场景 4)，执行串行拍卖：上一轮中意向交易量较少的一方优先计算子问题，然后拍卖商将最新的交易份数传递给另一方，后者再求解相应的子问题。

5）迭代收敛。

重复步骤 2）—4），直到满足交易终止条件：

①系统收支非负性：卖方各种售卖商品(包括纯电、纯热单元、热电组合)中的电能、热能的单位价格均不高于买方电能、热能的单位价格。

$$p_k^{\{\cdot\},\mathrm{e}}(t)\leq p_l^{\{\cdot\},\mathrm{e}}(t) \tag{8}$$

$$p_k^{\{\cdot\},\mathrm{h}}(t)\leq p_l^{\{\cdot\},\mathrm{h}}(t) \tag{9}$$

②满足系统负荷：卖方侧总供应量不低于买方侧总需求量。

$$E^{\mathrm{sell}}(t)\geq E^{\mathrm{buy}}(t) \tag{10}$$

$$H^{\mathrm{sell}}(t)\geq H^{\mathrm{buy}}(t) \tag{11}$$

算法一描述了整个迭代式拍卖流程。

算法一：迭代式组合双向拍卖

$t\leftarrow$1(initialization)；公布能量单元信息；卖买双方初始拍卖价格参考上级电网/热网售能、购能价格；
所有卖方 k 求解其子问题：(2)，目标函数不考虑供需平衡项，获得当前轮中最优 $m_{k,i}(1),\forall i$；
所有买方 l 求解其子问题：(3)，目标函数不考虑供需平衡项，获得当前轮中最优的 $n_{l,k,i}(1),\forall k,\forall i$。
while 买方侧价格≤上级网络售能价格&&卖方侧价格≥上级网络购能价格 **do**
  拍卖商更新对偶乘子并计算系统供需量：(4)(5)
  拍卖商根据表 1 确定价格调整系数，进行价格调整：(6)(7)
  $t\leftarrow t$+1;
  拍卖商宣布当前轮价格和上一轮成交份数
  if 系统供需为场景 1-3 **then**
    买卖双方并行拍卖；
  end if
  if 系统供需为情形 4 **then**
    if $E^{\mathrm{sell}}\geq E^{\mathrm{buy}}$ 且 $H^{\mathrm{sell}}\geq H^{\mathrm{buy}}$ **then** //串行拍卖
      所有买方 l 求解其子问题：(3)；
      拍卖商传递 $\Sigma_l n_{l,k,i}(t)$ 给卖方；
      所有卖方 k 求解其子问题：(2)；
    elseif $E^{\mathrm{sell}}\leq E^{\mathrm{buy}}$ 且 $H^{\mathrm{sell}}\leq H^{\mathrm{buy}}$ **then** //串行拍卖
      所有卖方 k 求解其子问题：(2)；
      拍卖商传递 $m_{k,i}(t)$，$\Sigma_{r\in I_{-l}} n_{r,k,i}(t)$ 给买方；所有买方 l 求解其子问题：(3)；
    else
      买卖双方并行拍卖；
    end if
  end if
  if 终止条件满足，即(8)—(11)成立 **then**
    break
  end if
end while

2.4 结算机制

拍卖商按照终止轮中拍卖商向买卖双方侧的叫价进行结算，首先向买方收取资金，再对卖方支付资金，结余的资金用作系统运营维护。买方 l 的总资金支付为

$$O_l=n_{l,k,i}P_{l,k,i} \tag{12}$$

卖方 k 的总财政收入为

$$R_k = \sum_i m_{k,i} P_{k,i} \tag{13}$$

2.5　各主体职能

各主体的职能及作用如图 4 所示。在综合能源系统中，各微网首先通过内部资源优化调度确定身份。买卖双方在每轮拍卖中求解各自子问题，并上传需求量、供应量信息，最后分别支付、收取资金。而拍卖商作为中枢，收集市场信息，更新并传递对偶乘子，计算并传递供需量，制定价格调整方案和拍卖顺序，判断拍卖终止条件，执行资金结算。各主体通过协作与信息交互，实现资源优化配置和交易效率提升。

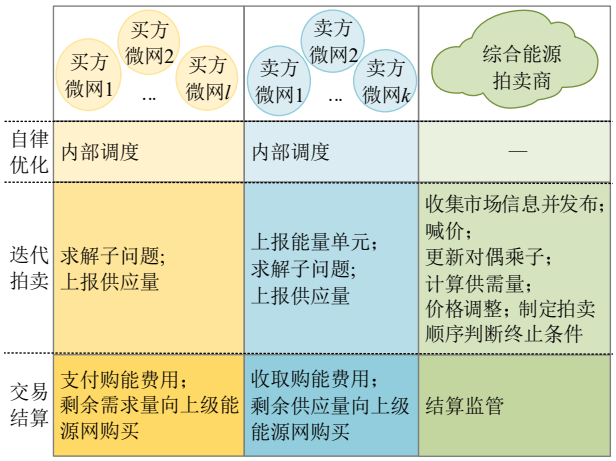


图 4　拍卖中各主体的职能及作用

Fig. 4　Defined roles and functionalities of each entity involved in the auction

3　算例分析

仿真验证所提综合能源微网群组合双向拍卖机制的有效性。采用 Matlab R2020a 软件结合 Yalmip 插件和 Gurobi 求解器进行求解。计算机配置为 AMD Ryzen 7 6800H 处理器，主频 3.20 GHz，内存 16 GB。

3.1　算例设置

买卖双方的交易信息详见附录 B。算例中的主要参数，包括卖方生产上限、买方最大需求、能量单元等，参考文献[4,23-24]设置。为验证所提机制的有效性，设计了 6 种算例进行对比。在 Case 1—4 中，综合能源系统设置为 3 卖方 3 买方微网群，Case 5 扩展为 6 卖方 8 买方的综合能源微网群系统。以下为详细说明：

Case 1：卖方仅售卖单种能源商品(纯电单元、纯热单元)的一次性拍卖。

Case 2：综合能源一次性组合双向拍卖。

Case 3：买卖双方交易能力较为均衡情况下的综合能源迭代式组合双向拍卖。

Case 4：卖方侧电热售卖能力均较强的极端情况(场景 1)下的迭代式组合双向拍卖。

Case 5：6 卖方 8 买方综合能源微网群中进行迭代式组合双向拍卖。

3.2　单能源拍卖与组合拍卖仿真对比

表 2 是 Case 2 中卖方交易结果。卖方除了可以售卖热电组合单元外，还可售卖纯电、纯热单元。卖方售出的热电组合单元占自身售出能量的绝大部分，即卖方优先售出打包的热电组合单元。买方的交易结果即购买的单元份数如表 3 所示。以买方 1 的购买行为为例，买方 1 通过热电组合单元满足了全部电能需求和 98%的热能需求，剩余 2%的热能需求则通过购买纯热单元满足。因此，在所提机制下买方优先购买热电组合单元。

表 2　Case 2 下卖方交易结果

Table 2　Sellers' transaction results under Case 2

卖方	不同单元交易份数					
	热电组合单元 a1	热电组合单元 a2	热电组合单元 b1	热电组合单元 c1	纯电单元	纯热单元
a	77	17	—	—	1	0
b	—	—	33	—	0	5
c	—	—	—	50	0	0

表 3　Case 2 下买方交易结果

Table 3　Buyers' transaction results under Case 2

买方	不同单元交易份数									
	a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	c1	c2	c3
1	3	13	0	1	27	0	3	0	0	0
2	44	4	0	0	0	0	2	14	0	0
3	30	0	0	0	6	0	0	36	0	0

为验证组合拍卖相较于传统单能源交易的优越性，表 4 对比了 Case 1 和 Case 2 下所有参与者的剩余价值(卖方盈余/买方剩余)。由表 4 可知，Case 1 下的总社会福利为 5031 元，Case 2 下为 8209 元，Case 2 下的社会福利比 Case 1 高出了 63.2%，即单能源交易的社会福利低于组合双向拍卖机制的社会福利，因此组合双向拍卖机制可以有效降低交易成本。

表 4　Case 1 和 Case 2 下所有参与者的剩余价值

Table 4　Residual values of auction participants under Case 1 and Case 2

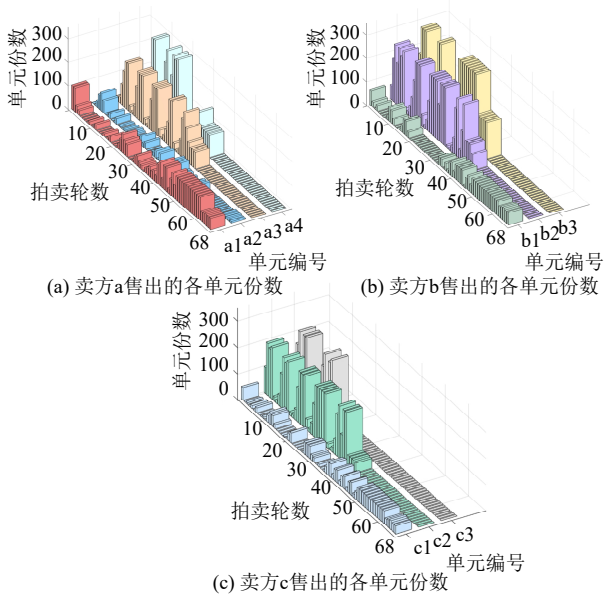
场景	不同参与者的剩余价值/元						
	卖方 a	卖方 b	卖方 c	买方 1	买方 2	买方 3	系统
Case 1	1485	732	135	600	1104	975	5031
Case 2	1962	807	1336	886	1553	1665	8209

3.3　迭代式的综合能源组合双向拍卖仿真

3.3.1　非极端情形下迭代式拍卖结果

以 Case 3 为例，展示非极端情形下迭代式交易结果，卖方所售热电组合随拍卖轮数的变化、买卖双方购售能量随拍卖轮数的变化分别如图 5、图 6

所示。在首轮拍卖中，拍卖商向卖方的叫价最高，向买方叫价最低(为 0)，因此首轮拍卖中卖方倾向于售出能量单元以最大化盈余，并达到生产上限；买方则希望满足自身最高负荷。随着拍卖进行，买卖双方获取到对方的供、需信息，卖方侧最终策略是优先售卖热电组合单元；买方侧最终策略是优先购买热电组合单元，其中买方 2 的电、热单位估值最高，最终其购得的能量最多。终止轮中买卖双方购售能量平衡，双方交易策略达成一致。图 7 展示了买卖双方价格随拍卖轮数的变化情况。由图 7 可知，在第 68 轮中买方电能、热能的单位价格均不低于卖方侧单位价格。

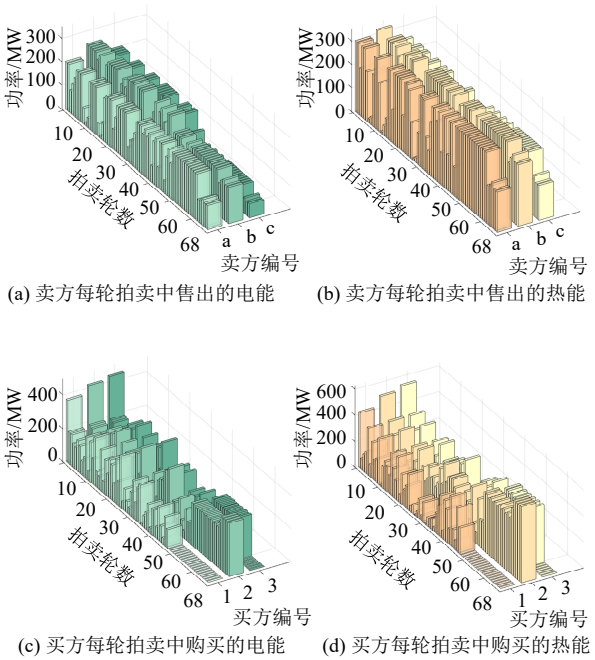


(a) 卖方a售出的各单元份数 (b) 卖方b售出的各单元份数

(c) 卖方c售出的各单元份数

图 5 Case 3 中卖方所售单元份数

Fig. 5 Units sold by sellers under Case 3



(a) 卖方每轮拍卖中售出的电能 (b) 卖方每轮拍卖中售出的热能

(c) 买方每轮拍卖中购买的电能 (d) 买方每轮拍卖中购买的热能

图 6 Case 3 中参与者交易功率

Fig. 6 Participants' trading power under Case 3

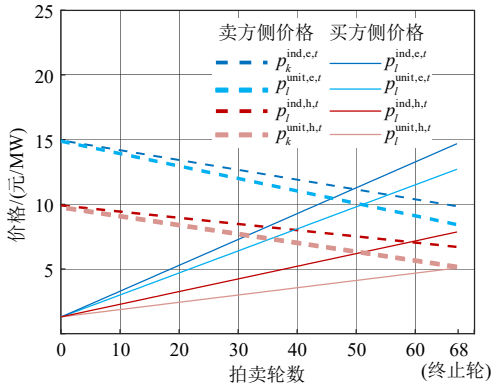


图 7 Case 3 中拍卖商向买卖双方侧的叫价

Fig. 7 Price called for buyers and sellers by the auctioneer under Case 3

3.3.2 拍卖顺序验证

买卖双方策略达成一致的标志是 $m_{k,i}=\sum_l n_{l,k,i},\forall k,\forall i$，即被松弛的式(1h)成立。由式(4)可知，当式(1h)成立时，$\lambda_{k,i}^{t+1}-\lambda_{k,i}^{t}=0,\forall k,\forall i$。基于此，表 5 对比了 Case 3 中分别采用“先买后卖”、“先卖后买”、“买卖并行”3 种拍卖顺序时，买卖双方达成一致策略的轮数。

表 5 买卖双方达成一致的轮数

Table 5 Number of rounds agreed by buyers and sellers

场景	不同拍卖顺序达成一致的轮数		
	先卖后买	先买后卖	买卖并行
Case 3	68	121	118

由表 5 可知，在 Case 3 中，若采用“先卖后买”的拍卖顺序，经过 68 轮拍卖达成一致并结束拍卖；若采用“先买后卖”的拍卖顺序，经过 121 轮拍卖达成一致；若采用“买卖并行”的拍卖顺序，则经过 118 轮达成一致。这证明了在非极端情形下，所提出的串行拍卖顺序可以针对不同的供需情况有效减少拍卖轮数，提升拍卖效率。

3.3.3 极端情形下迭代式拍卖结果

以 Case 4 为例，卖方侧售卖能量的能力较强，展示极端情形(情形 1)下迭代式交易情况，算例参数设置详见附录 E。

表 6、7 展示了 Case 4 的交易结果。图 8 展示了买卖双方价格随拍卖轮数的变化情况。由图 8 可知，在 28 轮之前，系统供需情况一直处于情形 1，只调整了卖方侧价格，买方侧价格不变。28 轮之后，系统供需情况处于情形 4，买卖双方价格同时进行调整。由表 6、7 可知，当满足拍卖终止条件时，各买方在最终交易结果中，购得的能量满足自身负荷需求，限价最低的卖方 a 售卖了电能和热能。分析表明，在买卖双方能源交易能力差异巨大的极端情形下，所提机制仍然适用。

表 6　Case 4 下卖方售出的能量
Table 6　Energy sold by the sellers under Case 4

卖方	售出的电/kW	售出的热/kW
a	370	720
b	0	0
c	0	0

表 7　Case 4 下买方购买的能量
Table 7　Energy bought by buyers under Case 4

卖方	售出的电/kW	售出的热/kW
a	100	200
b	120	220
c	150	300

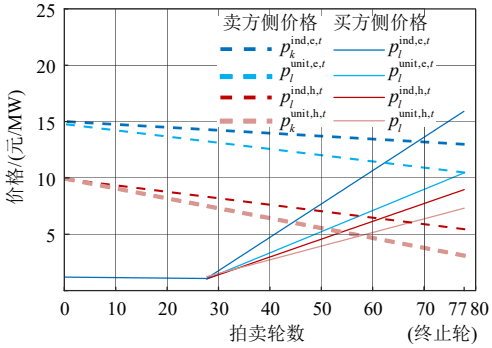


图 8　Case 4 中拍卖商向买卖双方侧的叫价
Fig. 8　Price called for buyers and sellers by the auctioneer under Case 3

3.4　一次性拍卖与迭代式拍卖性质验证

3.4.1　激励相容验证

定义卖方的报价系数是上报限价与真实限价的比例，买方的报价系数是上报估值与真实估值的比例。一次性拍卖下各参与者剩余价值的计算方法见附录 B 中(b4)(b5)。所提迭代式拍卖下个体剩余价值的计算方法见式(14)(15)。

卖方 k 的生产者盈余为

$$S_k=\sum_l\sum_i n_{l,k,i}(P_{k,i}-V_{k,i}) \tag{14}$$

买方 l 的消费者剩余为

$$U_l=\sum_k\sum_i n_{l,k,i}(W_{l,k,i}-P_{l,k,i}) \tag{15}$$

1）一次性拍卖激励相容验证。

设置每个拍卖参与者的报价系数从 0.2 到 3 变化，卖/买方对于所有单元的电、热单位限价/估值同时变化。Case 2 中所有拍卖参与者的剩余价值随报价系数的变化如图 9 所示。由图 9 可知，在一次性拍卖中，所有卖方和买方在报价系数为 1(即真实报价)时的剩余价值并非是最大的，参与者通过虚假报价可以获得更多剩余价值。即综合能源一次性组合双向拍卖不满足激励相容。

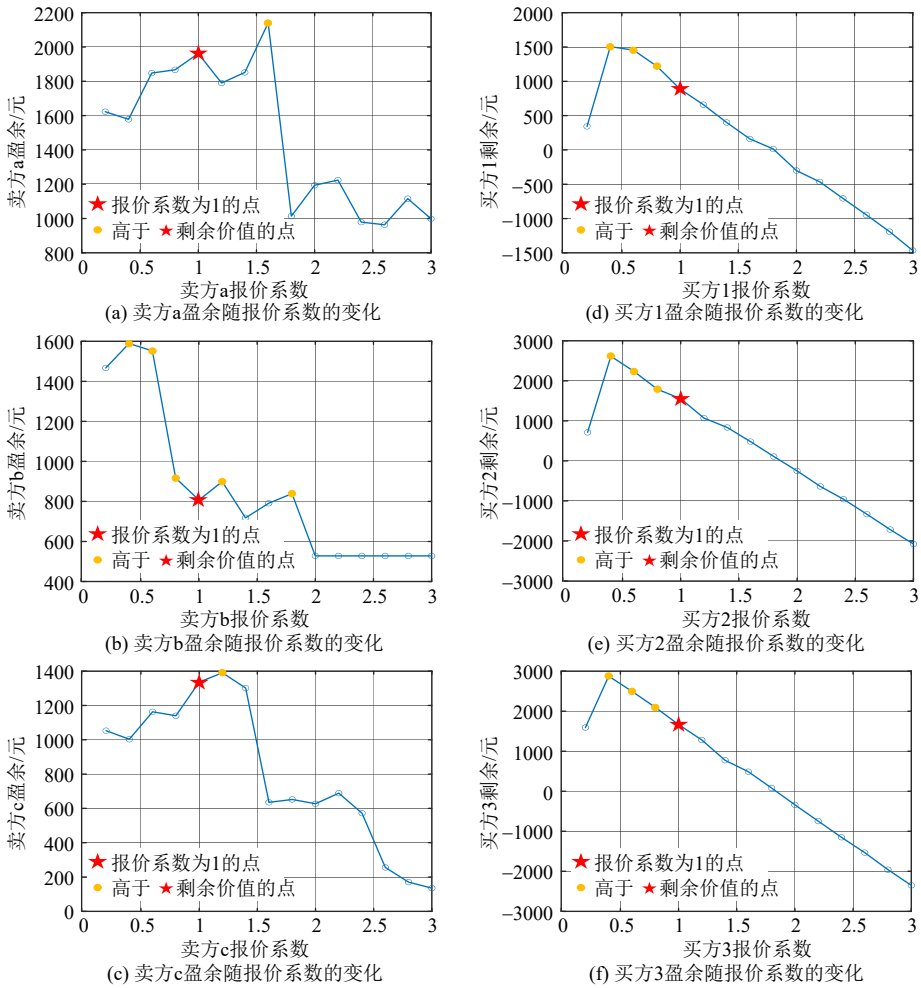


图 9　Case 2 不同报价系数下的参与者剩余价值
Fig. 9　Bidders' surplus value with different quotation coefficients under Case 2

2）迭代式拍卖激励相容验证。

设置每个拍卖参与者的报价系数分别为 1.0、0.5、1.2。表 8 对比了在 Case 2 和 Case 3 下所有参与者的剩余价值。由表 8 可知，迭代式拍卖中参与者的报价系数不会影响其剩余价值，参与者无法通过虚假报价获利，所提迭代式拍卖满足激励相容。

这是因为在所提机制中，每个参与者都作为价格接受者上报自己的需求量或供应量，而自身的限价或估值作为私有信息保留，不再具有扭曲成交价格的能力。买卖双方始终以最大化自身剩余价值为目标，在每轮拍卖中真实反映交易意愿，否则无法实现最优剩余价值。

3.4.2 个体理性验证

由表 8 可知，在 Case 2 和 Case 3 下，各参与者的剩余价值均非负，即一次性拍卖与迭代式拍卖均满足个体理性，参与者不会以损害自己的利益为代价参与拍卖。

表 8 Case 2 和 Case 3 下所有参与者的剩余价值
Table 8 Residual values of auction participants under Case 2 and Case 3

拍卖参与者	报价系数	剩余价值/元	
		Case 2	Case 3
卖方 a	1.0	1962	2397.3
	0.5	1686	2397.3
	1.2	1790	2397.3
卖方 b	1.0	807	1852
	0.5	907	1852
	1.2	899	1852
卖方 c	1.0	1336	1314
	0.5	1234	1314
	1.2	1391	1314
买方 1	1.0	886	0
	0.5	1056	0
	1.2	660	0
买方 2	1.0	1553	1584.4
	0.5	1604	1584.4
	1.2	1070	1584.4
买方 3	1.0	1665	0
	0.5	1720	0
	1.2	1281	0
系统	1.0	8209	7147.7
	0.5	8207	7147.7
	1.2	7091	7147.7

3.4.3 收支非负验证

表 9 为 Case 2 和 Case 3 中资金结算情况。由表 9 可知，在一次性拍卖下，拍卖商从买方收取的资金等于向卖方支付的资金。迭代式拍卖下，拍卖商从买方收取的资金高于向卖方支付的资金。两种拍卖机制均满足系统收支非负。

表 9 Case 2 和 Case 3 下资金结算结果
Table 9 Payment result under Case 2 and Case 3

项目	不同场景下的资金结算/元	
	Case 2	Case 3
买方款项	7371	7105.3
卖方款项	7371	6518
系统结余	0	587.3

3.4.4 社会福利最大化验证

由表 8 可知，在所有参与者均真实报价时，迭代式拍卖和一次性拍卖下的社会福利分别为 7147.7 元和 8209 元。这种结果是合理的，由式(1a)可知，一次性拍卖将社会福利最大化内化在目标函数中。而所提迭代式拍卖侧重于实现激励相容。为达到这一目标，迭代式拍卖在一定程度上牺牲了部分社会福利。这也侧面验证了 Myerson-Satterthwaite 定理，即不可能存在同时满足激励相容、个体理性、社会福利最大化、收支平衡 4 种性质的市场机制。由于综合能源微网群在一个地域中存在的数量是有限的，因此设计面向微网群的拍卖机制时，需要在激励相容性和其余性质之间寻求平衡。

4 结论

随着多元互补的综合能源微网群逐渐引起重视，亟需提出一种在不完全竞争环境中合理高效、公平竞争的综合能源微网群交易机制。本研究针对综合能源微网群对电、热等异质能源耦合交易的需求，基于组合双向拍卖理论设计了一种满足激励相容的交易机制。主要结论如下：

1）所提机制允许卖方售卖电热组合单元，从而有效避免了单一能源独立交易的低效率。同时，买卖双方都参与拍卖过程，打破了单向拍卖的垄断性。将组合双向拍卖理论在综合能源市场进一步扩展应用，为推动发展新模式提供了一种新思路。算例表明本文所提机制下的社会福利相较于传统的单能源拍卖机制提升了 63.2%。

2）提出了一种基于系统供需场景，动态调整价格并制定拍卖顺序的方法，确保了供需信息的有效传递，减少了无效的拍卖回合，为涉及异质能源的复杂交易优化了拍卖效率。

3）设计了一种迭代式的拍卖方式，为买卖双方设置了不同的价格时钟方向。迭代式拍卖中参与者作为价格接受者，无法在改变报价系数下获利。所提机制下买卖双方均满足激励相容，适应了不完全竞争环境，提高了交易的公平性和效率。

后续可将所提迭代式拍卖机制扩展到包含更多类型异质能源(如天然气、氢能等)和更多类型交

易参与者(如储能系统、电动汽车等)的综合能源系统中，以验证所提机制的适用性。

附录见本刊网络版(http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml)。

参考文献

[1] 盛煊，林舜江，梁炜焜，等. 考虑灵活性的城市综合能源系统区间优化调度[J/OL]. 中国电机工程学报，2024：1-12[2024-09-18]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240167.
SHENG Xuan，LIN Shunjiang，LIANG Weikun，et al. Interval optimal dispatch of urban integrated energy system considering flexibility [J/OL]. Proceedings of the CSEE，2024：1-12[2024-09-18]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240167(in Chinese).

[2] DENG Lirong，FU Yang，GUO Qinglai，et al. Energy and reserve procurement in integrated electricity and heating system：a high-dimensional covariance matrix approach based on stochastic differential equations[J]. Energy，2024，304：132042.

[3] ZHOU Yuzhuo，ZHAI Qiaozhu，XU Zhanbo，et al. Multi-stage adaptive stochastic-robust scheduling method with affine decision policies for hydrogen-based multi-energy microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2024，15(3)：2738-2750.

[4] 杜炜，窦迅，王镇，等. 考虑热电余量交易的微网群优化调度[J]. 电网技术，2020，44(10)：3777-3786.
DU Wei，DOU Xun，WANG Zhen，et al. Optimal scheduling for microgrid clusters considering heat-electricity margin transaction [J]. Power System Technology，2020，44(10)：3777-3786(in Chinese).

[5] 王剑晓，夏清，李庚银，等. 基于多市场均衡的综合能源市场机制设计[J]. 中国电机工程学报，2021，41(17)：5789-5802.
WANG Jianxiao，XIA Qing，LI Gengyin，et al. Mechanism design for integrated energy markets based on multi-market equilibrium [J]. Proceedings of the CSEE，2021，41(17)：5789-5802(in Chinese).

[6] 李咸善，王苗. 考虑源荷不确定性的多微电网鲁棒优化调度与VCG机制竞价策略[J]. 电网技术，2023，47(6)：2330-2343.
LI Xianshan，WANG Miao. Robust optimal scheduling of multi-microgrid and bidding strategy of VCG mechanism considering renewable energy-load uncertainty[J]. Power System Technology，2023，47(6)：2330-2343(in Chinese).

[7] VICKREY W. Counterspeculation，auctions，and competitive sealed tenders[J]. The Journal of Finance，1961，16(1)：8-37.

[8] 高赐威，林固静，宋梦，等. 基于组合拍卖的广义共享储能运营机制设计[J]. 中国电机工程学报，2024，44(16)：6307-6319.
GAO Ciwei，LIN Gujing，SONG Meng，et al. Operation mechanism design for generalized shared energy storage based on combinatorial auction[J]. Proceedings of the CSEE，2024，44(16)：6307-6319(in Chinese).

[9] LI Qihui，JIA Xiaohua，HUANG Chuanhe，et al. A dynamic combinatorial double auction model for cloud resource allocation [J]. IEEE Transactions on Cloud Computing，2023，11(3)：2873-2884.

[10] YIN Baocai，WENG Haoen，HU Yongli，et al. Multi-Agent deep reinforcement learning for simulating centralized double-sided auction electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2025，40(1)：518-529.

[11] LIU Xuelian，WU Jigang，CHEN Long，et al. Combinatorial double auction for resource allocation in mobile blockchain network[J]. Wireless Networks，2021，27(5)：3299-3312.

[12] EHRHART K M，OTT M，SEIFERT S，et al. Combinatorial auctions for renewable energy—potentials and challenges[J]. Energy Policy，2024，186：113988.

[13] 孙偲，郑天文，陈来军，等. 基于组合双向拍卖的共享储能机制研究[J]. 电网技术，2020，44(5)，1732-1739.
SUN Cai，ZHENG Tianwen，CHEN Laijun，et al. Energy storage sharing mechanism based on combinatorial double auction[J]. Power System Technology，2020，44(5)：1732-1739(in Chinese).

[14] 骆钊，刘德文，贾芸睿，等. 考虑绿色氢能证书和水电制氢的综合能源系统优化运行[J]. 电网技术，2024，48(4)：1445-1454.
LUO Zhao，LIU Dewen，JIA Yunrui，et al. Optimal operation of integrated energy system considering green hydrogen certificate and hydrogen production by hydropower[J]. Power System Technology，2024，48(4)：1445-1454(in Chinese).

[15] ZAIDI B H，HONG S H. Combinatorial double auctions for multiple microgrid trading[J]. Electrical Engineering，2018，100(2)：1069-1083.

[16] DENG Lirong，LI Zhengshuo，SUN Hongbin，et al. Generalized locational marginal pricing in a heat-and-electricity-integrated market [J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2019，10(6)：6414-6425.

[17] BLOCK C，NEUMANN D，WEINHARDT C. A market mechanism for energy allocation in micro-CHP grids[C]//Proceedings of the 41st Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2008). Waikoloa：IEEE，2008：172-172.

[18] WILSON R. Incentive efficiency of double auctions[J]. Econometrica，1985，53(5)：1101-1115.

[19] BISWAS S，NARAHARI Y. Iterative Dutch combinatorial auctions[J]. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence，2005，44(3)：185-205.

[20] LANGE S，SOKOLOWSKI P，YU Xinghuo. An efficient，open-bid procurement auction for small-scale electricity markets[J]. Applied Energy，2022，314：118867.

[21] AUSUBEL L M. An efficient ascending-bid auction for multiple objects[J]. American Economic Review，2004，94(5)：1452-1475.

[22] BISWAS S，NARAHARI Y. Approximately efficient iterative mechanisms for combinatorial exchanges[C]//2009 IEEE Conference on Commerce and Enterprise Computing. Vienna：IEEE，2009.

[23] 宋晓通，陈佳琪，师芊芊. 多主体博弈背景下的综合能源微网优化调度[J]. 高电压技术，2023，49(8)：3163-3172.
SONG Xiaotong，CHEN Jiaqi，SHI Qianqian. Optimal scheduling of integrated energy microgrid under the background of multi-agent game[J]. High Voltage Engineering，2023，49(8)：3163-3172(in Chinese).

[24] 李鹏，吴迪凡，李雨薇，等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报，2021，41(4)：1307-1321.
LI Peng，WU Difan，LI Yuwei，et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE，2021，41(4)：1307-1321(in Chinese).



邓莉荣

在线出版日期：2025-05-14。
收稿日期：2024-12-03。

作者简介：
邓莉荣(1993)，女，讲师，主要从事综合能源系统，电力市场，电力系统优化调度、海上风电等方面的研究工作，E-mail：denglr@shiep.edu.cn；
符杨(1968)，男，通信作者，教授，博士生导师，主要从事风力发电与并网技术、智能配电网规划与优化运行等研究工作，E-mail：mfudong@126.com。

（责任编辑　赵梓含）

附录 A

主要符号对照表

$a_{k,i}^{\mathrm{e}}$，$a_{k,i}^{\mathrm{h}}$	单元 i 中的电量、热量
A_k^{e}，A_k^{h}	卖方 k 的电、热生产上限
c_l^{mes}，c_k^{mes}	买方 l、卖方 k 的信息成本
$\delta_l^{\mathrm{ind,e}}$，$\delta_l^{\mathrm{ind,h}}$	买方侧纯电、纯热单元的单位价格增长步长
$\delta_l^{\mathrm{unit,e}}$，$\delta_l^{\mathrm{unit,h}}$	买方侧热电组合单元的电、热价格增长步长
$\delta_k^{\mathrm{ind,e}}$，$\delta_k^{\mathrm{ind,h}}$	卖方侧纯电、纯热单元的单位价格下降步长
$\delta_k^{\mathrm{unit,e}}$，$\delta_k^{\mathrm{unit,h}}$	卖方侧热电组合单元的电、热价格下降步长
D_l^{e}，D_l^{h}	买方 l 的电、热负荷
E^{sell}，H^{sell}	卖方侧出售的总电量、总热量
E^{buy}，H^{buy}	买方侧购买的总电量、总热量
I_{-l}	除了买方 l 的其余买方集合
I^{unit}	热电组合单元的索引
$I^{\mathrm{ind,e}}$，$I^{\mathrm{ind,h}}$	纯电、纯热单元的索引
$\lambda_{k,i}$	被松弛的约束所对应的对偶乘子
$m_{k,i}$	卖方 k 所售单元 i 的份数
$n_{l,k,i}$	买方 l 对卖方 k 所售单元 i 购买份数
O_l	买方 l 的总资金支付
$\pi_{l,k,i}$	卖方 k 与买方 l 所交易的 i 的价格
$p_l^{\mathrm{ind,e}}$，$p_l^{\mathrm{ind,h}}$	拍卖商向买方 l 宣布的纯电、纯热单元的单位价格
$p_l^{\mathrm{unit,e}}$，$p_l^{\mathrm{unit,h}}$	拍卖商向买方 l 宣布的热电组合中的电、热的单位价格
$p_k^{\mathrm{ind,e}}$，$p_k^{\mathrm{ind,h}}$	拍卖商向卖方宣布的纯电、纯热单元的单位价格
$p_k^{\mathrm{unit,e}}$，$p_k^{\mathrm{unit,h}}$	拍卖商向卖方宣布的热电组合中的电、热单位价格
$P_{k,i}$	卖方 k 售出的单元 i 的费用
$P_{l,k,i}$	买方 l 为卖方 k 的单元 i 支付的费用
ρ	惩罚系数
R_k	卖方 k 的总财政收入
S_k、U_l	卖方 k 的盈余、买方 l 的剩余
$v_k^{\mathrm{ind,e}}$	卖方 k 对纯电单元的单位限价
$v_k^{\mathrm{ind,h}}$	卖方 k 对纯热单元 i 的单位限价
$v_k^{\mathrm{unit,e}}$，$v_k^{\mathrm{unit,h}}$	卖方 k 对热电组合的单位电、热限价
$V_{k,i}$	卖方 k 对单元 i 的限价
w_l^e、w_l^h	买方 l 对于电、热功率的单位估值
$W_{l,k,i}$	买方 l 对于卖方 k 所售单元 i 的估值

附录 B

综合能源一次性组合双向拍卖结算方法

综合能源拍卖商通过竞胜标确定问题计算出交易成功的买方和卖方，并将中标信息传送给相应的参与者。接着，拍卖商进行资金的结算。在一次性拍卖下采用将社会福利在买卖双方均分的方式进行结算[13]。

卖方 k 与买方 l 进行交易的热电组合 i 的价格为

$$\pi_{l,k,i}=(V_{k,i}+W_{l,k,i})/2,\forall l,\forall k,\forall i \tag{b1}$$

买方 l 的总资金支付为

$$O_{l,os}=\sum_k\sum_i n_{l,k,i}\pi_{l,k,i},\forall l \tag{b2}$$

卖方 k 的总财政收入为

$$R_{k,os}=\sum_l\sum_i n_{l,k,i}\pi_{l,k,i},\forall k \tag{b3}$$

买方 l 的剩余(consumer surplus)为

$$S_{l,os}=\sum_k\sum_i n_{l,k,i}(W_{l,k,i}-\pi_{l,k,i})=\sum_k\sum_i n_{l,k,i}(W_{l,k,i}-V_{k,i})/2,\forall l \tag{b4}$$

卖方 k 的盈余(producer surplus)为

$$S_{k,os}=\sum_l\sum_i n_{l,k,i}(\pi_{l,k,i}-V_{k,i})=\sum_l\sum_i n_{l,k,i}(W_{l,k,i}-V_{k,i})/2,\forall k \tag{b5}$$

附录 C

算例参数设置

卖方所提供的各单元中能量如表 C1 所示，用括弧表示一种热电组合单元，括弧内两个数字分别表示该热电组合单元中的电能、热能大小，单位为 kW。

表 C1　卖方 a 所提供的单元能量

Table C1　Unit energy provided by Seller a

卖方	热电单元 a1/kW	热电单元 a2/kW	纯电单元 a3/kW	纯热单元 a4/kW
a	(2,3)	(1,4)	1	1

表 C2　卖方 b 所提供的单元能量

Table C2　Unit energy provided by Seller b

卖方	热电单元 b1/kW	纯电单元 b2/kW	纯热单元 b3/kW
b	(3,5)	1	1

表 C3　卖方 c 所提供的单元能量

Table C3　Unit energy provided by Seller c

卖方	热电单元 c1/kW	纯电单元 c2/kW	纯热单元 c3/kW
c	(2,5)	1	1

卖方提供的能量单元的单位限价如表 C4 所示。

表 C4　卖方的电、热单位限价

Table C4　Sellers' unit reservation prices for electricity and heat

卖方	$v_k^{\mathrm{unit,e}}$/(￥/kW)	$v_k^{\mathrm{ind,e}}$/(￥/kW)	$v_k^{\mathrm{unit,h}}$/(￥/kW)	$v_k^{\mathrm{ind,h}}$/(￥/kW)
a	2	4.8	1	3.6
b	3	6	2	3.6
c	3	7.2	1	4.8

买方认为，无论是从打包出售的热电组合单元购买，还是从单独出售的纯电、纯热单元中购买，所获得的能量是等效的。表 C5 为买方的电、热单位估值。

表 C5　买方的电、热单位估值

Table C5　Electricity and heat valuation of buyers

买方	w_l^e/(￥/kW)	w_l^h/(￥/kW)
1	12	4.8
2	13.5	7.2
3	12	6

卖方上报的信息除了单元能量信息、单位能量限价还有能量总生产上限。表 C6 为 3 个卖方的电、热生产上限。卖方售出的电能不能超过其电生产上限，同时卖方售出的热能不能超过其热生产上限。表 C7 为 3 个买方的电、热最大需求。

表 C6　卖方的电、热生产上限
Table C6　Electricity and heat production limits of sellers

卖方	电生产上限/kW	热生产上限/kW
a	200	300
b	250	320
c	200	250

表 C7　买方的电、热最大需求
Table C7　Maximum electricity and heat demand of buyers

买方	电最大需求/kW	热最大需求/kW
1	100	200
2	120	220
3	150	300

附录 D

激励相容数学证明

1）卖方激励相容性证明

卖方的目标函数为(2a)，$P_{k,i}$为卖方 k 的单元 i 的最终售出费用，由拍卖商确定，仅与其制定的初始价格和价格调整步长有关，与卖方报价无直接关联；$V_{k,i}$为卖方 k 对单元 i 的真实限价，$V_{k,i}$是关于 $v_k^{\mathrm{ind,e}},v_k^{\mathrm{ind,h}},v_k^{\mathrm{unit,e}},v_k^{\mathrm{unit,h}}$ 的函数；$m_{k,i}$为卖方售出的交易份数，由子问题求解确定。

卖方 k 的生产者盈余为(14)。若卖方 k 在优化自身子问题时采用虚假限价 $v_k^{\mathrm{ind,e,un}},v_k^{\mathrm{ind,h,un}},v_k^{\mathrm{unit,e,un}},v_k^{\mathrm{unit,h,un}}$，则会导致自身子问题的供给方案发生变化，但最终交易价格 $P_{k,i}$ 不受其控制。则可得

$$S_k(v_k^{\mathrm{ind,e}},v_k^{\mathrm{ind,h}},v_k^{\mathrm{unit,e}},v_k^{\mathrm{unit,h}})= S_k(v_k^{\mathrm{ind,e,un}},v_k^{\mathrm{ind,h,un}},v_k^{\mathrm{unit,e,un}},v_k^{\mathrm{unit,h,un}}) \quad \text{(d1)}$$

则所提机制下卖方满足激励相容。

2）买方激励相容性证明

买方的目标函数为(3a)。$P_{l,k,i}$为买方 l 对卖方 k 的单元 i 的最终购买费用，由拍卖商决定，与买方的估值无直接关系；$W_{l,k,i}$是买方 l 对卖方 k 的单元 i 的真实估值，是关于 w_l^{e}、w_l^{h} 的函数；$n_{l,k,i}$为买方购买的交易份数，由子问题求解确定。

买方 l 的消费者剩余为(15)。若买方 l 在优化自身子问题时采用虚假估值 $w_l^{\mathrm{e,un}}$、$w_l^{\mathrm{h,un}}$，则会导致自身子问题的供给方案发生变化，但最终交易价格 $P_{l,k,i}$ 不受其控制。则可得

$$U_l(w_l^{\mathrm{e}},w_l^{h})=U_l(w_l^{\mathrm{e,un}},w_l^{\mathrm{h,un}}) \quad \text{(d2)}$$

则所提机制下买方满足激励相容。

附录 E

Case 4 算例参数

在 Case 4 中，为模拟卖方能源交易能力差异显著的场景，我们调整了卖方的电力和热力生产上限，如表 E1 所示。通过这一调整，卖方侧表现出显著的能源供应优势，而买方侧的需求相对有限。

表 E1　Case 4 中卖方的电、热生产上限
Table E1　The maximum capacity for electricity and heat generation by the sellers under Case 6

卖方	电生产上限/MW	热生产上限/MW
a	600	900
b	750	960
c	600	750

附录 F

为进一步验证所提机制的合理性和有效性，我们设计了 Case 5，将综合能源微网群系统扩展至包含 6 个卖方和 8 个买方微网，以模拟更复杂的市场环境并进行全面验证。我们增加了买方微网 3、4、6、7、8 以及卖方微网 d、e、f，全部参与者的详细参数如表 F1-F6 所示，交易结果如表 F7-F8 所示。

表 F1　卖方 d 所提供的单元能量
Table F1　Unit energy provided by Seller d

卖方	热电单元 d1/MW	纯电单元 d2/MW	纯热单元 d3/MW
d	(2,5)	1	1

表 F2　卖方 e 所提供的单元能量
Table F2　Unit energy provided by Seller e

卖方	热电单元 e1/MW	热电单元 e2/MW	纯电单元 e3/MW	纯热单元 e4/MW
e	(3,4)	(2,4)	1	1

表 F3　卖方 f 所提供的单元能量
Table F3　Unit energy provided by Seller f

卖方	热电单元 f1/MW	热电单元 f2/MW	纯电单元 f3/MW	纯热单元 f4/MW
f	(1,2)	(1,4)	1	1

表 F4　Case 5 中卖方的单位限价
Table F4　Sellers' unit reservation prices under Case 5

卖方	$v_k^{\mathrm{unit,e}}$/ (￥/MW)	$v_k^{\mathrm{ind,e}}$/ (￥/MW)	$v_k^{\mathrm{unit,h}}$/ (￥/MW)	$v_k^{\mathrm{ind,h}}$/ (￥/MW)
a	1	2.4	0.67	2
b	1.5	3	1.33	2
c	2	3.6	2.33	2.67
d	1.25	1.8	1	1.3
e	1.5	2.4	1.33	2
f	1.5	3	1.33	2.67

表 F5　Case 5 中卖方的电、热生产上限

Table F5　Electricity and heat production limits of sellers in Case 5

卖方	电生产上限/MW	热生产上限/MW
a	200	300
b	250	320
c	200	250
d	220	400
e	250	350
f	300	500

表 F6　Case 5 中买方的电、热最大需求

Table F6　Maximum electricity and heat demand of buyers under Case 5

买方	电最大需求/MW	热最大需求/MW
1	300	600
2	360	660
3	450	900
4	330	630
5	390	660
6	450	960
7	360	660
8	480	990

表 F7　Case 5 中生产者盈余

Table F7　Producer surplus in Case 5

卖方	盈余/￥
a	1452.9
b	1315.5
c	581.1
d	931.7
e	1815.5
f	483.1

表 F8　Case 5 下资金结算结果

Table F8　Payment result under Case 5

资金结算/￥	Case 2
买方款项	7949.5
卖方款项	6579.8
系统结余	1369.7

在 Case 5 中，我们改变拍卖参与者的报价参数，各参与者的剩余价值没有变化，也就是说所提迭代式拍卖中参与者的报价系数不会影响其剩余价值，参与者无法通过虚假报价获利，所提迭代式拍卖满足激励相容。由表 F7 可知，各参与者的剩余价值非负，即所提迭代式拍卖满足个体理性。由表 F8 可知，系统从买方收取的资金高于向卖方支付的资金，即所提迭代式拍卖满足收支非负。则在 6 买方 8 卖方的综合能源微网群系统中，所提机制仍有效。