

基于序数势博弈的综合能源服务商 日前市场投标优化模型

梅文卿¹, 王克元², 刘晓峰¹, 刘 怀¹, 王嘉诚¹, 季振亚¹

(1.南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

(2.中国电子科技集团公司第五十八研究所,江苏 无锡 214035)

[摘要] 随着全球经济的持续高速增长与人口规模的不断扩张,能源需求的急剧攀升已成为不容忽视的挑战,迫切要求构建更为稳健与高效的能源供应体系. 综合能源服务商作为系统和用户之间的新兴中介,发挥着越来越重要的作用. 基于价格型需求响应,构建涵盖用户、综合能源服务商以及上级能源市场三方的多层次交易框架,并以综合能源服务商的收益最大为目标建立序数势博弈模型,最后通过分布式优化进行求解. 算例分析表明,所提方法能够在保障用户利益的前提下,提升综合能源服务商的收益以及市场稳定性,所提算法能够以较快的速度收敛至纳什均衡,从而可应用在大规模能源市场交易中.

[关键词] 综合能源服务商,需求响应,序数势博弈,分布式算法

[中图分类号] O643;X703 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2025)01-0012-10

Optimization Model for Day-Ahead Market Bidding of Integrated Energy Service Providers Based on Ordinal Potential Game

Mei Wenqing¹, Wang Keyuan², Liu Xiaofeng¹, Liu Huai¹, Wang Jiacheng¹, Ji Zhenya¹

(1.School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Research Institute 58, China Electronics Technology Group Corporation, Wuxi 214035, China)

Abstract: Amidst the sustained high-speed growth of the global economy and the continuous expansion of population size, the sharp increase in energy demand has emerged as a non-negligible challenge, urgently necessitating the establishment of a more robust and efficient energy supply system. Integrated Energy Service Providers (IESPs), as emerging intermediaries between the system and end-users, are playing an increasingly pivotal role. This study proposes a price-based demand response mechanism, which constructs a multi-layered transaction framework encompassing users, IESPs, and the upstream energy market. An ordinal potential game model is then formulated with the objective of maximizing the revenue of IESPs. Finally, distributed optimization is employed to solve the model. Case studies demonstrate that the proposed approach can enhance the revenue of IESPs and market stability while safeguarding user interests. Furthermore, the algorithm converges rapidly to the Nash equilibrium, rendering it applicable in large-scale energy market transactions.

Key words: integrated energy service provider, demand response, sequential potential games, distributed algorithm

近年来,随着全球经济的飞速发展和人口的不断增长,能源需求不断增加,能源高速、粗犷的利用方式,气候变化和环境污染等问题也日趋严峻^[1-3],因此当今社会发展对传统能源网络协调以及配置能力的要求日益提高. 寻求低碳清洁、安全高效的能源运营模式和市场化服务机制,进行能源的供给侧优化成为了世界各国关注的焦点^[4],而能源互联技术则有助于缓解现阶段所面临的困难^[5-7]. 综合需求响应涉及不同种类能源之间的耦合互补关系,使得用户不仅可以通过负荷转移,还可以通过用能转换来参与需求响应^[8].

在需求侧资源中,居民用户拥有用能弹性高、基数大的特征,需求响应参与潜力巨大^[9],而单个用户的负荷弹性水平无法达到参与需求响应的最低水平,柔性负荷浪费严重,因此,综合能源服务商(integrated

收稿日期:2023-11-22.

基金项目:江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB470020).

通讯作者:刘晓峰,博士,讲师,研究方向:需求响应、博弈论、电力市场等. E-mail:liuxiaofeng@njnu.edu.cn

energy service provider, IESP) 应运而生. IESP 是指一家公司或机构,通过整合多种能源资源和技术手段,为综合能源用户提供全方位的能源解决方案,包括能源供应、节能减排、能源管理等方面的服务. IESP 可以为综合能源用户提供一站式的服务,帮助用户实现能源效益最大化和成本最小化的目标. 作为上级能源市场与综合能源用户之间的桥梁, IESP 是需求侧实现能源互补的关键实体,通过整合庞大分散的用户的用电量,从而拥有单个综合能源用户不具备的参与需求响应的能力^[10].

现阶段,针对综合能源市场的研究尚不完善,现有的研究大多针对综合能源市场中参与者的行为进行分析,文献[11]针对单个 IESP 参与多能源市场交易决策进行了研究, IESP 通过对用户用能进行聚合从而以投标的形式参与日前市场,并得出最优决策使得 IESP 获得最高收益. 文献[12]为提高 IESP 的经济效益,构建了 IESP 与多用户博弈优化模型,考虑 IESP 风险成本和用户可承受度,建立了 IESP 与多用户优化互动的需求侧博弈模型. 文献[13]为实现 IESP 参与多能源市场交易,设计了 IESP 与电力和天然气市场之间的交互协同市场交易决策方案. 上述文献的研究大多针对能源市场、IESP 以及用户中的一方或两方决策行为进行分析,对于同时对综合能源市场中三方的参与者具体策略的研究较少,并且多为单个 IESP 参与综合能源市场的行为策略研究,对于多个 IESP 参与综合能源市场竞争的博弈行为研究不足.

现有的对 IESP 优化运行的研究大多引入了博弈论提高 IESP 的自主性,文献[14]为了提高 IESP 的经济效益,采用主从博弈建立 IESP 多用户博弈优化模型并求解. 文献[15]针对 IESP 的博弈策略进行了研究,建立了 IESP 之间非合作博弈的双层优化模型. 文献[16]采用演化博弈建立了不同类型 IESP 参与市场投标的竞合策略模型. 引入博弈论大多需要证明其 Nash 均衡的存在性,因此对于一些涉及多方参与者的博弈模型需要先进行复杂的 Nash 均衡存在性证明^[17],很大程度上限制了博弈论在综合能源市场中的应用. 然而,序数势博弈作为非合作博弈的独特分支,其有限递增性质可保证 Nash 均衡的存在,避免了对 Nash 均衡存在问题的证明^[18]. 因此,根据序数势博弈的性质,如果博弈模型能够构造为序数势博弈模型,则不需要再进行繁琐的 Nash 均衡存在性的证明. 此外,序数势博弈的求解策略在分布式优化方面具有卓越的性能,考虑到多个 IESP 在综合能源市场投标过程中的个体利益最大化诉求,因而利用势博弈进行求解具有较高的可行性.

基于以上背景,针对 IESP 日前市场投标场景下涉及的多元素主体间复杂博弈的互动关系,首先引入 IESP 作为用户的直接上级,由 IESP 整合规模用户的用能需求. 其次分别建立用户、IESP 和上级能源市场的收益函数;最后构造目标函数,基于序数势博弈理论构建势函数,并采用分布式优化求解纳什均衡.

1 IESP 参与下的综合能源市场交易模型

1.1 市场框架

设综合能源日前市场投标的场景下有 N_d 个 IESP, $i=1,2,\dots,N_d$. IESP_{*i*} 管理区域内有 N_{user} 个综合能源用户, $j=1,2,\dots,N_{user}$. 一天内共分为 T 个时段, $t=1,2,\dots,T$.

综合能源日前市场投标模型内部有多种主体,包括电力市场、天然气市场、IESP 以及用户等,其多种主体之间的关系如图 1 所示.

本文提出的市场框架是建立在能源市场、IESP 与用户三个主体的信息动态交互基础之上. IESP 从能源市场购买能源,负责满足其管理用户的用能需求. IESP 作为用户的直接上级,可直接与能源市场保持通信. 能源市场需要根据以往的经验发布当日的能源需求量以及需要响应时段, IESP 之间以自身的收益函数为目标通过竞价竞争中标量,各 IESP 在每一需求响应时段内上报能源报价以及投标能源需求量. 市场

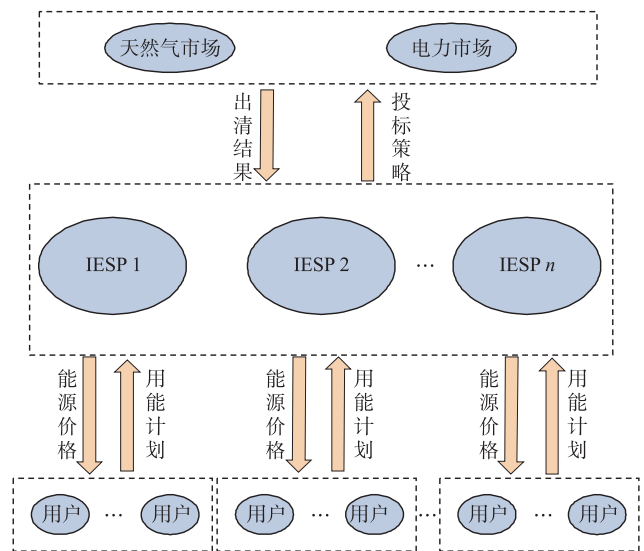


图 1 IESP 参与日前市场投标框架

Fig. 1 Bidding framework for IESP's participation in the day-ahead market

采用统一的出清模式,能源市场以自身收益函数为目标确定最优响应的能源分配方案,并将中标量以及出清价格下发给各个 IESP. 各 IESP 在充分挖掘用户需求响应潜力的前提下实现自身利益最大化,而用户则以提升自身收益为目标进行用能决策.

1.2 IESP 能源转换模型

参与综合能源日前市场投标的关键在于 IESP 的投标策略,IESP 通过向上级市场竞价购能再通过能源转换向用户售能以获取利润,其参与交易的诉求为利润函数 U_i 最大化. IESP 利润函数可建立为

$$\max U_i = \sum_{t=1}^T \rho_{E,\text{out}}^t E_{i,\text{out}}^t + \rho_{H,\text{out}}^t H_{i,\text{out}}^t - \rho_{E,\text{in}}^t E_{i,\text{in}}^t - \rho_{G,\text{in}}^t G_{i,\text{in}}^t. \quad (1)$$

式中, $\rho_{E,\text{out}}^t$ 和 $\rho_{H,\text{out}}^t$ 分别为 IESP_{*i*} 在 t 时段向用户收取的用电、用热的单价, $E_{i,\text{out}}^t$ 和 $H_{i,\text{out}}^t$ 分别为 IESP_{*i*} 所管理的综合能源用户在 t 时段总的用电量、总用热量,式(1)中前两项表示 IESP_{*i*} 向用户出售电热能的收益, $\rho_{E,\text{in}}^t$ 和 $\rho_{G,\text{in}}^t$ 分别为上级电力市场出清电价、上级天然气市场出清气价, $E_{i,\text{in}}^t$ 和 $G_{i,\text{in}}^t$ 分别为 IESP_{*i*} 在 t 时段向上级能源市场购买的电量、天然气量, T 为时段数且 $t \in [1, T]$, 其约束条件为

$$\rho_{E,\text{out}}^{t,\min} \leq \rho_{E,\text{out}}^t \leq \rho_{E,\text{out}}^{t,\max}, \quad (2)$$

$$\rho_{H,\text{out}}^{t,\min} \leq \rho_{H,\text{out}}^t \leq \rho_{H,\text{out}}^{t,\max}. \quad (3)$$

式中, $\rho_{E,\text{out}}^{t,\min}$ 和 $\rho_{E,\text{out}}^{t,\max}$ 分别为 IESP 向用户提供的最低供电单价、最高供电单价, $\rho_{H,\text{out}}^{t,\min}$ 和 $\rho_{H,\text{out}}^{t,\max}$ 分别为向用户提供的最低供热单价、最高用电单价.

综合能源用户既需要电力供应也需要热能供应,传统的纯发电机组和供热锅炉的效率较低,从而导致成本提高,因此 IESP 采用效率较高的热电联产(combined heat and power, CHP)机组,CHP 机组利用天然气燃烧后产生的热能进行发电,而剩余的热能则提供给用户以满足用户的用热需求,因此用户的电力由 CHP 机组及上级电力市场联合提供,而用户的热力则全部由 CHP 机组提供.

$$E_{i,\text{out}} = E_{i,\text{CHP}} + E_{i,\text{in}} = \eta_{\text{CHP},E} G_{i,\text{in}} + E_{i,\text{in}}, \quad (4)$$

$$H_{i,\text{out}} = H_{i,\text{CHP}} = \eta_{\text{CHP},H} G_{i,\text{in}}. \quad (5)$$

式中, $E_{i,\text{CHP}}$ 和 $H_{i,\text{CHP}}$ 为 CHP 机组的供电量以及供热量, $\eta_{\text{CHP},E}$ 为 CHP 机组气转电的功率, $\eta_{\text{CHP},H}$ 为 CHP 机组气转热的功率.

1.3 综合能源用户用能策略模型

综合能源用户消耗的是时段 t 内 IESP 向用户输出的电力和热力,设 IESP_{*i*} 管理的用户总数为 N_{user} , $E_{i,\text{out}}^t$ 和 $H_{i,\text{out}}^t$ 分别为 IESP_{*i*} 在 t 时段向用户输出的总的电力、热力, IESP_{*i*} 所管理的用户 j 在 t 时段的用电量、用热量分别为 $E_{i,j}^t$ 、 $H_{i,j}^t$, 因此可以得到:

$$E_{i,\text{out}}^t = \sum_{j=1}^{N_{\text{user}}} E_{i,j}^t, \quad (6)$$

$$H_{i,\text{out}}^t = \sum_{j=1}^{N_{\text{user}}} H_{i,j}^t, \quad (7)$$

$$E_{i,j}^{t,\min} \leq E_{i,j}^t \leq E_{i,j}^{t,\max}, \quad (8)$$

$$H_{i,j}^{t,\min} \leq H_{i,j}^t \leq H_{i,j}^{t,\max}. \quad (9)$$

式中, $E_{i,j}^{t,\min}$ 、 $E_{i,j}^{t,\max}$ 分别为用户 j 的电力需求在 t 时刻的最小、最大限制. $H_{i,j}^{t,\min}$ 、 $H_{i,j}^{t,\max}$ 分别为用户 j 的热力需求在 t 时刻的最小、最大限制.

为了体现出不同用户在各种电力以及热力价格情境下的不同反应,本文引入微观经济学中效用函数的概念进行建模. 效用函数以货币单位衡量,对不同时间段的用户效用进行建模,设 $W(E_{i,j}^t)$ 和 $W(H_{i,j}^t)$ 表示用户 j 在时段 t 中获得的效用,对电力和热力使用二次效用函数,

$$W(E_{i,j}^t) = \sum_{t=1}^T \alpha_{E,j} (E_{i,j}^t)^2 + \beta_{E,j} E_{i,j}^t, \quad (10)$$

$$W(H_{i,j}^t) = \sum_{t=1}^T \alpha_{H,j} (H_{i,j}^t)^2 + \beta_{H,j} H_{i,j}^t. \quad (11)$$

式中, $\alpha_{E,j}$ 、 $\beta_{E,j}$ 以及 $\alpha_{H,j}$ 、 $\beta_{H,j}$ 是从用户平时的用能习惯中推断出来的,为已知量,并且 $\alpha_{E,j} < 0$ 、 $\alpha_{H,j} < 0$. 因此,用户的收益函数 U_j 定义为用户的用能效用与用能费用的差值,

$$\max U_j = \sum_{t=1}^T (W(E_{i,j}^t) - \rho_{E,\text{out}}^t E_{i,j}^t) + \sum_{t=1}^T (W(H_{i,j}^t) - \rho_{H,\text{out}}^t H_{i,j}^t). \quad (12)$$

1.4 电力市场出清模型

在日前市场投标模型中,各个 IESP 向上级电力市场上报自身的购电价格 $\rho_{i,\text{ce}}^t$ 以及购电量 $E_{i,\text{in}}^t$. 电力市场的出清目标为社会福利最大,

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_d} \int_0^{E_{i,\text{in}}^t} \rho_{i,\text{ce}}^t(E_{i,\text{in}}^t) \Delta T dE_{i,\text{in}}^t - \sum_{t=1}^T \int_0^{E_{\text{se}}^t} \rho_{\text{se}}^t(E_{\text{se}}^t) \Delta T dE_{\text{se}}^t. \quad (13)$$

式中,

$$\rho_{\text{ce}}^{t,\min} \leq \rho_{i,\text{ce}}^t \leq \rho_{\text{ce}}^{t,\max}. \quad (14)$$

式(13)中, E_{se}^t 为电力市场的总供给电量, $\rho_{i,\text{ce}}^t(E_{i,\text{in}}^t)$ 为 IESP 对于电力的需求函数, $\rho_{\text{se}}^t(E_{\text{se}}^t)$ 为电力市场的供给函数, $\rho_{\text{ce}}^{t,\min}$ 和 $\rho_{\text{ce}}^{t,\max}$ 为允许上报的最小以及最大电能投标价格. 电力市场在日前投标市场中通过式(13)得出的最优供电量 E_{se}^{t*} ,

$$\rho_{E,\text{in}}^t = \rho_{\text{se}}^t(E_{\text{se}}^{t*}). \quad (15)$$

式中, $\rho_{E,\text{in}}^t$ 为出清价格.

1.5 天然气市场出清模型

IESP 在天然气市场上报自身购气价 $\rho_{i,\text{cg}}^t$ 与购气量 $G_{i,\text{in}}^t$, 天然气市场目标函数同样为社会福利最大,

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_d} \int_0^{G_{i,\text{in}}^t} \rho_{i,\text{cg}}^t(G_{i,\text{in}}^t) \Delta T dG_{i,\text{in}}^t - \sum_{t=1}^T \int_0^{G_{\text{sg}}^t} \rho_{\text{sg}}^t(G_{\text{sg}}^t) \Delta T dG_{\text{sg}}^t. \quad (16)$$

式中,

$$\rho_{\text{cg}}^{t,\min} \leq \rho_{i,\text{cg}}^t \leq \rho_{\text{cg}}^{t,\max}. \quad (17)$$

式(16)中, G_{sg}^t 为天然气市场总的天然气供给量, $\rho_{i,\text{cg}}^t(G_{i,\text{in}}^t)$ 为 IESP 对于天然气的需求函数, $\rho_{\text{sg}}^t(G_{\text{sg}}^t)$ 为天然气市场的供给函数. 式(17)中, $\rho_{\text{cg}}^{t,\min}$ 和 $\rho_{\text{cg}}^{t,\max}$ 为允许上报的最小以及最大天然气投标价格. 天然气市场在日前投标市场中通过式(16)得出的最优供气量为 G_{sg}^{t*} , 出清价格 $\rho_{G,\text{in}}^t$ 为,

$$\rho_{G,\text{in}}^t = \rho_{\text{sg}}^t(G_{\text{sg}}^{t*}). \quad (18)$$

因此,可知式(16)~式(18)为天然气市场出清模型的具体表达.

1.6 目标函数的构建

电力市场以及天然气市场中的总供应曲线为,

$$\rho_{E,\text{in}}^t = \rho_{\text{se}}^t(E_{\text{se}}^t) = \rho_{\text{se}}^t\left(\sum_{i=1}^N E_{i,\text{in}}^t\right) = a_{\text{se}} \sum_{i=1}^N E_{i,\text{in}}^t + b_{\text{se}}, \quad (19)$$

$$\rho_{G,\text{in}}^t = \rho_{\text{sg}}^t(G_{\text{sg}}^t) = \rho_{\text{sg}}^t\left(\sum_{i=1}^N G_{i,\text{in}}^t\right) = a_{\text{sg}} \sum_{i=1}^N G_{i,\text{in}}^t + b_{\text{sg}}. \quad (20)$$

式中, a_{se} 、 b_{se} 、 a_{sg} 、 b_{sg} 分别为相应曲线已知参数.

若想满足 IESP 的报量能够全部出清,则需满足 IESP 的投标价格等于市场. 以此次所有 IESP 的总投标量为最优供给量下的出清价格,

$$\rho_{i,\text{ce}}^t = \rho_{\text{se}}^t(E_{\text{in}}^t), \quad (21)$$

$$\rho_{i,\text{cg}}^t = \rho_{\text{sg}}^t(G_{\text{in}}^t). \quad (22)$$

依照上述策略进行竞价,可以在不影响用户用能的情况下实现购能价格最低,也就是 IESP 的购能成本最低.

根据式(6)~式(12)可以得出,式(12)关于响应用电量 $E_{i,j}^t$ 的一阶偏导数为

$$\frac{\partial U_j}{\partial E_{i,j}^t} = \sum_{t=1}^T (2\alpha_{E,j} E_{i,j}^t + \beta_{E,j} - \rho_{E,\text{out}}^t). \quad (23)$$

二阶偏导数为

$$\frac{\partial^2 U_j}{\partial E_{i,j}^t{}^2} = \sum_{t=1}^T 2\alpha_{E,j}. \quad (24)$$

式(12)关于响应用热量 $H_{i,j}^t$ 的一阶偏导数为

$$\frac{\partial U_j}{\partial H_{i,j}^t} = \sum_{t=1}^T (2\alpha_{H,j} H_{i,j}^t + \beta_{H,j} - \rho_{H,out}^t). \quad (25)$$

二阶偏导数为

$$\frac{\partial^2 U_j}{\partial H_{i,j}^2} = \sum_{t=1}^T 2\alpha_{H,j}. \quad (26)$$

由于 $\alpha_{E,j} < 0$ 与 $\alpha_{H,j} < 0$, Hessian 矩阵负定, 因而式(12)存在极大值. 即, 在给定电价 $\rho_{E,out}^t$ 和热价 $\rho_{H,out}^t$ 的情况下, 用户 j 的最优响应用电量以及最优响应用热量为

$$E_{i,j}^{t*} = \frac{\rho_{E,out}^t - \beta_{E,j}}{2\alpha_{E,j}}, \quad (27)$$

$$H_{i,j}^{t*} = \frac{\rho_{H,out}^t - \beta_{H,j}}{2\alpha_{H,j}}, \quad (28)$$

$$E_{i,j}^{t,\min} \leq E_{i,j}^{t*} \leq E_{i,j}^{t,\max}, \quad (29)$$

$$H_{i,j}^{t,\min} \leq H_{i,j}^{t*} \leq H_{i,j}^{t,\max}. \quad (30)$$

由式(23)~式(30)可知, 在任意给定的 $\rho_{E,out}^t$ 以及 $\rho_{H,out}^t$ 下, 用户均可制定出最佳用能策略, 当且仅当二者达到最优时, 博弈达到均衡.

由式(27)~式(28)可以得出, IESP 对用户的售电价格以及售热价格可以写成关于用户的用电量以及用热量的函数.

$$\rho_{E,out}^t = \rho_{E,out}^t(E_{i,out}^t), \quad (31)$$

$$\rho_{H,out}^t = \rho_{H,out}^t(H_{i,out}^t). \quad (32)$$

根据式(4)~式(5)可以得出,

$$E_{i,in}^t = \delta_1(E_{i,out}^t, H_{i,out}^t) = E_{i,out}^t - \frac{\eta_{CHP,E} H_{i,out}^t}{\eta_{CHP,H}}, \quad (33)$$

$$E_{in}^t = \sum_{i=1}^{N_d} \delta_1(E_{i,out}^t, H_{i,out}^t), \quad (34)$$

$$G_{i,in}^t = \delta_1(H_{i,out}^t) = \frac{H_{i,out}^t}{\eta_{CHP,H}}, \quad (35)$$

$$G_{in}^t = \sum_{i=1}^{N_d} \delta_1(H_{i,out}^t). \quad (36)$$

在分布式优化场景下, 市场价格的确定依赖于各 IESP 对其自身投标策略的预期量. 即, 上级能源市场的出清量以及出清价格可表示为,

$$\rho_{sh,E,in}^t = \rho_{se}(E_{sh,in}^t) = \rho_{se} \left(\delta_1(E_{sh,i,out}^t, H_{sh,i,out}^t) + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_d} E_{sh,j,in}^t \right), \quad (37)$$

$$\rho_{sh,G,in}^t = \rho_{sg}(H_{sh,in}^t) = \rho_{sg} \left(\delta_2(H_{sh,i,out}^t) + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_d} G_{sh,j,in}^t \right). \quad (38)$$

式中, $E_{sh,in}^t, \rho_{sh,E,in}^t$ 分别为电力市场的预计投标需求量与预计出清价格, $G_{sh,in}^t, \rho_{sh,G,in}^t$ 分别为天然气市场的预计投标需求量与预计出清价格.

同时, 为了避免 IESP 的投标策略与预计投标策略不同, 设置罚函数项 $\sigma(E_{in}^t, H_{in}^t)$,

$$\sigma(E_{in}^t, H_{in}^t) = \lambda [(E_{in}^t - E_{sh,in}^t)^2 + (G_{in}^t - H_{sh,in}^t)^2]. \quad (39)$$

式中, λ 表示惩罚因子, 为极大常数, 可保证 IESP 的实际决策与预期决策一致.

因此, 式(1)可以转化为,

$$\max U_i = \sum_{t=1}^T (\rho_{E,out}^t(E_{i,out}^t) E_{i,out}^t + \rho_{H,out}^t(H_{i,out}^t) \cdot H_{i,out}^t - \rho_{sh,E,in}^t \cdot \delta_1(E_{i,out}^t, H_{i,out}^t) - \rho_{sh,G,in}^t \cdot \delta_2(H_{i,out}^t) - \sigma(E_{in}^t, H_{in}^t)). \quad (40)$$

从上式可以看出,该函数将 IESP 的收益变换为与自身所管理用户的用能总量 $E'_{i,out}$ 、 $H'_{i,out}$ 以及其他 IESP 的市场投标策略量之和。

2 序数势博弈模型

传统集中式优化方法由于受建模规模的限制,难以兼顾日前市场投标模型的准确性和参与市场投标的 IESP 规模,且非合作博弈难以保证存在纳什均衡,而序数势博弈作为博弈论的一个子类,其自有的分布式优化特性使其建模、求解过程较少受到模型规模影响,从而可适用于大规模优化。鉴于此,通过验证所构建的非合作博弈模型满足序数势博弈条件,即可推出该博弈模型必定存在纯策略均衡解,且任何博弈参与者的加入或者推出都不会影响博弈的收敛性。

序数势博弈的概念,对于策略 $y=(y_i, y_{-i})$ 以及 $y'=(y'_i, y_{-i})$ 有,

$$U_i(y_i, y_{-i}) - U_i(y'_i, y_{-i}) \geq 0 \Rightarrow Q(y_i, y_{-i}) - Q(y'_i, y_{-i}) \geq 0, i \in \mathbf{N}. \quad (41)$$

序数势博弈的独特性质表明,任一参与者的策略调整所带来的收益变动趋势,与整体势函数的变动方向相契合。基于此特性,序数势博弈理论能够推导出以下结论:

(1)任何有限的序数势博弈均内含纯策略纳什均衡的存在,确保了博弈过程能够在有限步骤内收敛至稳定状态。

(2)任何有限序数势博弈可视为优化问题,其可行域由参与者的策略空间构成,目标函数则为序数势函数,函数取最优值标志博弈达到纳什均衡状态。

上述结论为 IESP 在日前市场中的非合作投标博弈提供了思路。可通过构建与之等效的序数势博弈模型,并求解序数势函数的极值点,从而找到纳什均衡解。本文建立的博弈模型为以 Q 为势函数的序数势博弈模型,其证明如下。

对于 IESP i ,将其两个不同的博弈策略记为 $\rho'_{E,out}$ 、 $\rho'_{H,out}$ 以及 $\rho'_{sh,E,in}$ 、 $\rho'_{sh,G,in}$,代入式(31)~式(33)可知,在两种不同的博弈策略下可以得到 $E'_{i,out}$ 、 $H'_{i,out}$ 以及 $H'_{i,out}$ 、 $H'_{i,out}$ 。将 IESP i 在两种不同投标策略下的收益函数 U_i 代入式(41)的左半边,可得:

$$\begin{aligned} U_i(E'_{i,out}, H'_{i,out}) - U_i(E'_{i,out}, H'_{i,out}) \geq 0 \Rightarrow \sum_{t=1}^T [\rho'_{E,out}(E'_{i,out}) E'_{i,out} + \rho'_{H,out}(H'_{i,out}) \cdot H'_{i,out} - \\ \rho'_{E,out}(E'_{i,out}) E'_{i,out} - \rho'_{H,out}(H'_{i,out}) \cdot H'_{i,out}] \geq \\ \sum_{t=1}^T [\rho'_{sh,E,in} \cdot \delta_1(E'_{i,out}, H'_{i,out}) + \rho'_{sh,G,in} \cdot \delta_2(H'_{i,out}) - \rho'_{sh,E,in} \cdot \delta_1(E'_{i,out}, H'_{i,out}) - \rho'_{sh,G,in} \cdot \delta_2(H'_{i,out})]. \end{aligned} \quad (42)$$

为了构建序数势函数以满足式(41),本文引用一个参数 m , m 为一个极大的正数,因此可以得到,

$$\log_m [\rho'_{sh,E,in} \cdot \delta_1(E'_{i,out}, H'_{i,out})] - \log_m [\rho'_{sh,E,in} \cdot \delta_1(E'_{i,out}, H'_{i,out})] < \rho'_{sh,E,in} \cdot \delta_1(E'_{i,out}, H'_{i,out}) - \rho'_{sh,E,in} \cdot \delta_1(E'_{i,out}, H'_{i,out}). \quad (43)$$

同理,可得,

$$\log_m [\rho'_{sh,G,in} \cdot \delta_2(H'_{i,out})] - \log_m [\rho'_{sh,G,in} \cdot \delta_2(H'_{i,out})] < \rho'_{sh,G,in} \cdot \delta_2(H'_{i,out}) - \rho'_{sh,G,in} \cdot \delta_2(H'_{i,out}). \quad (44)$$

因此,可以推断出:

$$\begin{aligned} \log_m [\rho'_{sh,E,in} \cdot \delta_1(E'_{i,out}, H'_{i,out})] + \log_m [\rho'_{sh,G,in} \cdot \delta_2(H'_{i,out})] - \log_m [\rho'_{sh,E,in} \cdot \delta_1(E'_{i,out}, H'_{i,out})] - \\ \log_m [\rho'_{sh,G,in} \cdot \delta_2(H'_{i,out})] < \rho'_{sh,E,in} \cdot \delta_1(E'_{i,out}, H'_{i,out}) + \rho'_{sh,G,in} \cdot \delta_2(H'_{i,out}) - \\ \rho'_{sh,E,in} \cdot \delta_1(E'_{i,out}, H'_{i,out}) - \rho'_{sh,G,in} \cdot \delta_2(H'_{i,out}). \end{aligned} \quad (45)$$

设 Q 为序数势函数,

$$\begin{aligned} Q = \sum_{t=1}^T (\rho'_{E,out}(E'_{i,out}) \cdot E'_{i,out} + \rho'_{H,out}(H'_{i,out}) \cdot H'_{i,out} - \log_m (\rho'_{sh,E,in}) - \log_m [\delta_1(E'_{i,out}, H'_{i,out})] - \\ \log_m (\rho'_{sh,G,in}) - \log_m [\delta_2(H'_{i,out})] - \sigma(E'_{in}, H'_{in})). \end{aligned} \quad (46)$$

由式(42)~式(45)可知,函数 Q 满足于式(41),且为一个严格的凸函数,因此通过结论(1)可知,由目标函数(39)构成的非合作博弈模型具有唯一的纳什均衡解。通过结论(2)可知,式中 Q 为与 IESP 日前市场投标非合作博弈模型的收益函数等价的序数势函数,参与博弈的任一 IESP 的收益变化趋势与势函数 Q 的趋势一致。因此,只需求解势函数 Q 的极值即可求出该非合作博弈模型的纳什均衡解。

3 分布式优化流程

序数势博弈的特性表明,无论是通过优化参与者个体的收益函数,还是直接求解势函数,最终均能导向相同的纳什均衡解.这一特性在保障各 IESP 利益最大化的同时,也促进了系统整体的最优化.基于此,IESP 在参与日前市场投标时,其博弈策略的动态调整机制可归纳如下,具体的优化算法流程如图 2 所示.

(1)前期数据准备

各 IESP 收集并整合其服务的综合能源用户次日用电、用热、柔性负荷需求及用能习惯等信息,并将其上传至上级能源网,为后续策略制定提供基础数据支持.

(2)优化策略制定

首先,上级能源网发布初步预测的电能、天然气需求量及相应的出清价格,供 IESP 参考.其次,IESP 基于预测信息,设定初始能源转换策略及价格方案.进一步,用户根据 IESP 提供的价格信息及自身需求(受式(8)和式(9)约束),调整用电、用热计划以优化成本(目标为式(12)).最后,IESP 根据用户响应情况,通过式(1)计算并调整售能策略,以实现自身收益最大化,并将新策略上报至上级能源网.

(3)策略迭代与优化

上级能源网基于上一轮 IESP 的投标数据,重新评估并发布新的预测能源出清量及出清价格. IESP 根据新发布的出清策略,重新评估并调整自身投标策略.

(4)均衡状态收敛

重复以上步骤(2)~(3),直至 IESP 的投标策略与上级能源网的预测出清策略趋向于一致,标志着日前市场投标达到纳什均衡状态,此时市场各方的策略选择均达到稳定,不再有显著变动.

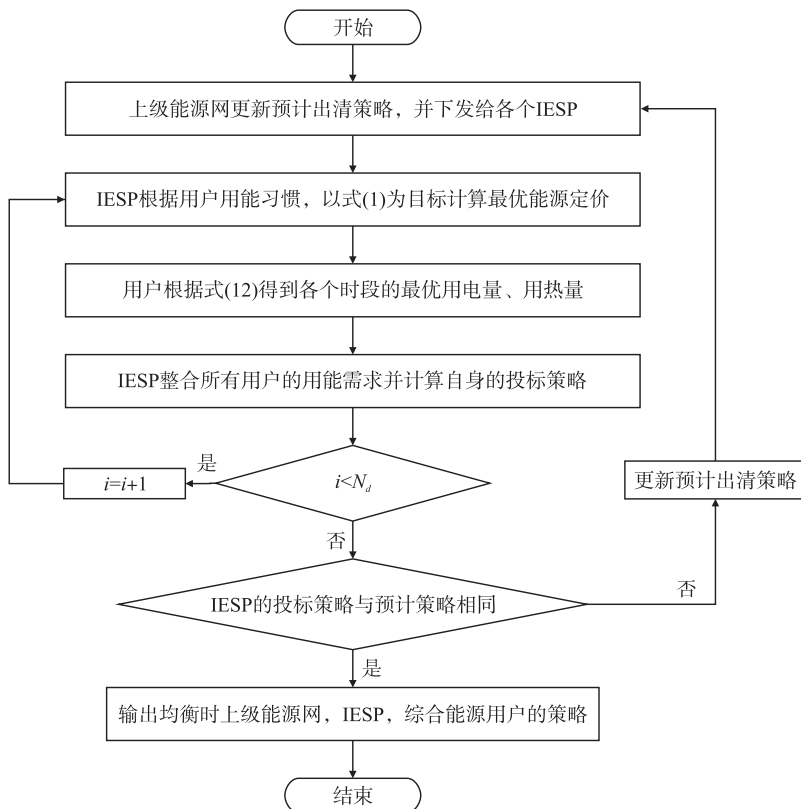


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithmic process

4 算例仿真分析

4.1 算例数据及假设

假设某区域内有 3 个 IESP 参与综合能源市场需求响应能源竞价.为了突出电热能源的耦合作用,本文

将用户的用能类型分为三类典型用户^[19]:A类用户类以用电成本最低,以满足自身用热需求为目标,用电以及用热效用函数的参数分别为 $\alpha_{A,E,j}=-0.4, \beta_{A,E,j}=0.8, \alpha_{A,H,j}=-0.45, \beta_{A,H,j}=0.72$. B类用户考虑用能成本与用能方式的均衡,其用电以及用热效用函数的参数分别为 $\alpha_{B,E,j}=-0.45, \beta_{B,H,j}=0.9, \alpha_{B,H,j}=-0.4, \beta_{B,H,j}=0.64$,具有较高的价格敏感性. C类用户以满足自身的用电需求,用热成本最低为目标,其用电以及用热效用函数的参数分别为 $\alpha_{C,E,j}=-0.5, \beta_{C,H,j}=1, \alpha_{C,H,j}=-0.35, \beta_{C,H,j}=0.56$. 电力市场参数为 $a_{se}=0.012$ 千元/(MW·h)², $b_{se}=0.25$ 千元/(MW·h),天然气市场参数为 $a_{sg}=0.008$ 千元/(m³)², $b_{sg}=0.25$ 千元/(m³). 为了提高用户的用能体验,本文将相同用能习惯的用户交给同一个IESP进行管理,因此IESP1管理1000户A类用户,IESP2管理1000户B类用户,IESP3管理1000户C类用户. 为了方便计算,假设每个IESP所管理的用户初始电力负荷以及热力负荷如图3所示,为避免用户数量导致的“维数灾”,IESP采取分组策略,将每100户视为一组统一调度,以简化控制、提升效率.

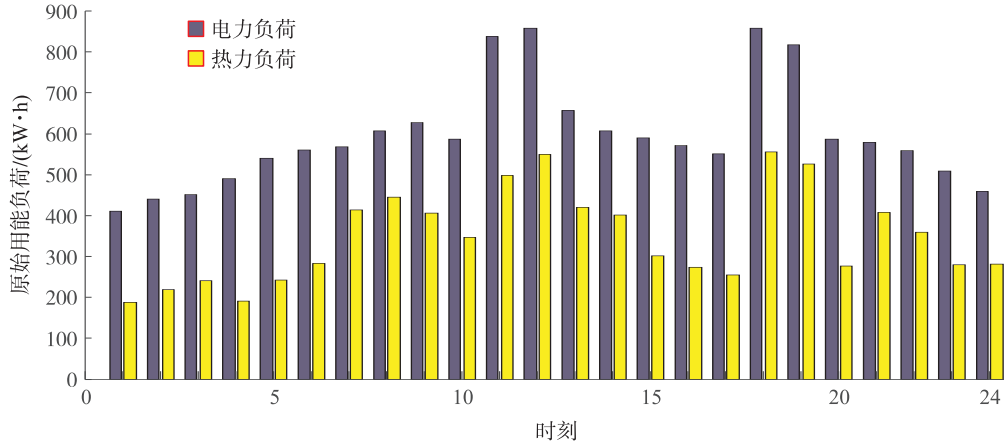


图3 原始负荷

Fig. 3 Raw load

4.2 算例结果分析

博弈过程中,IESP主导的变量是向上级能源市场购买的能源量以及价格,IESP通过调整对用户售能的价格激励用户进行响应. 3个IESP在参与博弈之前以及在纳什均衡状态下各个时段收获的电力负荷如图4所示. 3个IESP在价格调整前后所收获的用户热能负荷如图5所示.

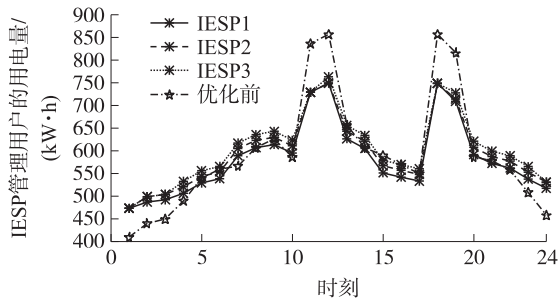


图4 优化前后的用户电力负荷

Fig. 4 Customer power load before and after optimization

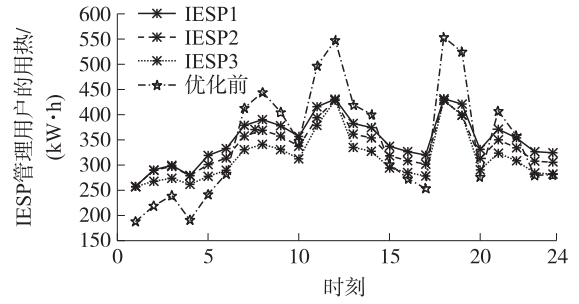


图5 优化前后的用户热力负荷

Fig. 5 Thermal load of customers before and after optimization

IESP1在参与博弈之前以及在纳什均衡状态下各个时段对用户售电单价如图6所示. IESP1在参与博弈之前以及在纳什均衡状态下各个时段对用户售热单价如图7所示.

由图4~图7可以看出,在优化前后,IESP功率曲线与负荷特性曲线较为相似,表明负荷特性对其市场策略影响显著. 以IESP1为例,在用能高峰时段,IESP1会通过提高用能价格来激励用户减少用能需求,如时段13,在用户能源负荷需求高的时刻,能源需求对能源价格的影响较大,反之在用能低谷时段,IESP1会用低于平时的价格激励用户用能,从而调整用户柔性负荷的用能时段,避免在用能高峰时段以较高的价格向上级能源市场购买能源,从而提高自身的售能收益.

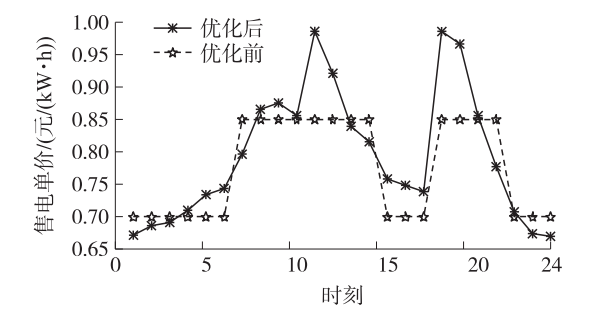


图 6 IESP1 优化前后的售电单价

Fig. 6 Unit price of electricity sold before and after IESP1 optimization

图 8 为优化前后的电力市场总的出清电量. 由图可见,优化前的出清电量峰谷差为 1 340.40 kW·h,而优化之后的出清电量峰谷差为 803.28 kW·h,优化前后出清电量的峰谷差降低了 40.07%,负荷曲线明显平缓,起到削峰填谷作用. 由于能源之间的耦合关系,天然气通过 CHP 机组的转换可以提供一部分电能,且各个 IESP 之间通过非合作博弈可以最大限度地平抑上级能源网的电能负荷,从而大大提高上级电网的稳定性.

为了验证本文提出的优化方式对上级能源市场, IESP 以及用户的影响,表 1 为 IESP 优化前后的收入情况,表 2 为优化前后上级能源市场的出清成本,表 3 为 3 类不同用能习惯用户在优化前后的用能效用.

表 1 IESP 优化前后的收益

Table 1 Benefits before and after IESP optimization 元		
类型	优化前收益	优化后收益
IESP1	10 813	11 100
IESP2	11 108	11 725
IESP3	11 510	12 474

表 2 上级能源市场优化前后的出清总价

Table 2 Total clearing price before and after optimization in the upper energy market 元		
项目	优化前总价	优化后总价
电能网	4 033.8	3 970.3
天然气网	7 689.9	7 448.5

从表 1~表 3 可以看出,优化后 3 个 IESP 的收益都产生了不同程度的提高,分别提高了 2.59%、5.26% 以及 7.73%,上级能源市场的出清总价也产生了不同程度的下降,其中电能市场的出清成本由 4 033.8 元降低到了 3 970.3 元,降低了 1.57%,天然气网的出清成本由 7 689.9 元下降到了 7 448.5 元,降低了 3.14%. 用户参与优化之后的用能效用相对于优化前的用能效用有微小提升,近似可以等同于优化之前的用能效用. 由此可见,综合考虑能源市场价格以及用户的用能特性, IESP 通过最优方式对用户的用能时段进行了改善,优化了整体负荷曲线,并有效减少了其在日前能源市场的购能成本. 本文所提出的优化方法在不伤害用户利益的前提下,大幅提高 IESP 的收益并且能够大幅减少上级能源网产能的压力,大大提高了上级能源网的运行稳定性.

为验证本文所提出的序数势博弈方法的性能,引入了文献[20]中的传统算法,表 4 显示了两方法在整个博弈周期内搜索纳什均衡的运行时间.

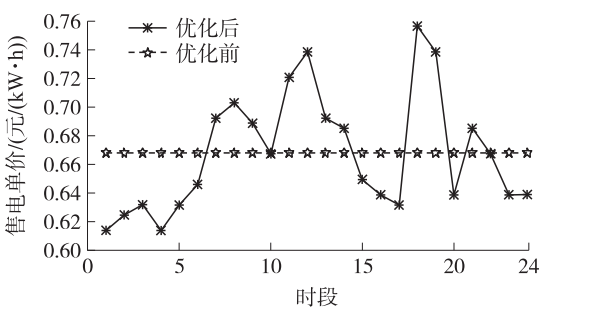


图 7 IESP1 优化前后的售热单价

Fig. 7 Unit price of heat sold before and after IESP1 optimization

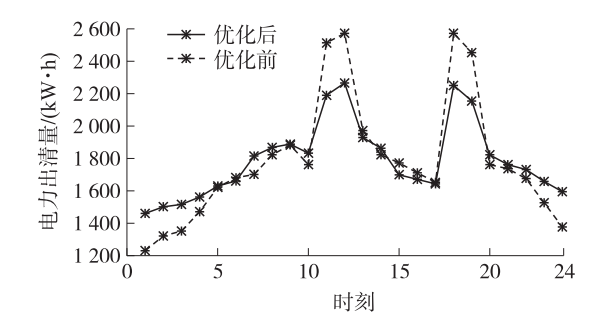


图 8 优化前后电力负荷

Fig. 8 Power load before and after optimization

表 3 3 类用户优化前后的用能效用

Table 3 Energy use utility before and after optimization for three types of users			
用户类型	项目	优化前	优化后
A 类用户	用电	16.63	16.73
	用热	15.25	15.30
	总和	31.88	32.03
B 类用户	用电	18.55	18.60
	用热	13.79	13.84
	总合	32.34	32.44
C 类用户	用电	20.34	20.42
	用热	12.32	12.35
	总和	32.66	32.77

表 4 所提方法与传统方法的优化时间

Table 4 Optimization time of the proposed method versus the conventional method		
IESP 的数量	本文提出的方法/min	传统方法/min
3	4.78	8.43
8	23.86	43.56
13	43.56	大于 60

该表显示,传统方法的运行时间随着 IESP 数量的增加而迅速增加,尤其是在 13 个 IESP 的情况下,运行时间已经超过了 1 h,而对于本文所提出的序数势博弈方法,运行时间以缓慢的速度增加。例如,当 IESP 的数量为 8 时,序数势博弈的方法比传统的方法运行时间少了 45.22%。因此采用本文所提出序数势博弈的方法可以大幅提高优化的效率,这对用能调度具有重要的意义,另外,传统方法中需要参与者之间进行频繁的数据通信,这可能会导致通信堵塞,然而,序数势博弈方法避免了复杂的信息交互,这可以缓解参与者之间的沟通压力。

5 结论

针对能源需求响应机制下 IESP 日前市场投标场景涉及的多元决策主体,上级能源市场,IESP 与综合能源用户之间的复杂博弈互动关系,本文提出多个 IESP 整合规模化用户用能需求参与日前能源市场竞价的多主体序数势博弈模型,研究结论如下:

(1) 在 IESP 参与日前市场的投标策略中,所构建的序数势博弈模型可将多主体策略优化问题转变为单一目标优化问题,所有参与者均围绕序数势函数作为优化导向,有效规避了 IESP 在日前市场中的不当竞争现象。

(2) 多个 IESP 通过参与日前市场投标在提升自身收益的同时还能通过调用用户需求响应资源,来达到削峰填谷的效果,此外还可大幅减轻上级能源网特别是电能网的发电压力,极大程度上提高了能源市场的稳定性。

(3) 相较于传统方法,本文提出的序数势函数方法具有极高的效率优势,各博弈参与者均保持独立与自治,能够灵活选择加入或退出博弈,确保了过程的顺畅进行,有效规避了收敛失败的风险。

[参考文献](References)

- [1] 张惠智,樊宇姣,贾嵘,等. 计及天然气管道泄漏的电-气综合能源系统潮流计算方法[J]. 电网技术,2023,47(12): 4829-4838.
- [2] YUAN,Z P,LI P,LI Z L,et al. A fully distributed privacy-preserving energy management system for networked microgrid cluster based on homomorphic encryption[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2024,15(2):1735-1748.
- [3] 韩宝慧,陆玲霞,包哲静,等. 基于多头概率稀疏自注意力模型的综合能源系统多元负荷短期预测[J]. 电力建设,2024,45(2):127-136.
- [4] 殷晨旭,孙永辉,谢东亮,等. 博弈视角下电-气互联综合能源系统多目标协同优化[J]. 电力系统自动化,2024,48(11):173-183.
- [5] 杨经纬,张宁,王毅,等. 面向可再生能源消纳的多能源系统:述评与展望[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):11-24.
- [6] 司方远,张宁,韩英华,等. 面向多元灵活资源聚合的区域综合能源系统主动调节能力评估与优化:关键问题与研究架构[J]. 中国电机工程学报,2024,44(6):2097-2119.
- [7] 刘海涛,董新洲,熊雄,等. 基于低压柔直的末端电网能源互联与能量微循环系统[J]. 电力系统自动化,2023,47(6): 40-47.
- [8] SANGOLEYE F, JAO J, FARIS K, et al. Reinforcement learning-based demand response management in smart grid systems with prosumers[J]. IEEE Systems Journal,2023,17(2):1797-1807.
- [9] 李昭昱,艾芊. 分时电价下居民用户用电需求响应估计方法[J]. 电力自动化设备,2023,43(10):121-127.
- [10] 刘敦楠,徐尔丰,许小峰. 面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J]. 电网技术,2018,42(3):681-689.
- [11] 彭钰茗,曾方迪,李更丰. 综合能源服务商参与多能源市场的决策建模研究[J]. 供用电,2018,35(11):27-33.
- [12] 李娜,王维,杨家辉,等. 基于需求侧博弈的区域综合能源服务商最优运营策略[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(2):112-120.
- [13] 吴彪,张少华,王琨,等. 多能源市场环境下综合能源服务商的需求响应策略研究[J]. 电网技术,2022,46(5):1800-1811.
- [14] 李鹏,马溪原,郭祚刚,等. 基于双层优化的综合能源服务商博弈策略[J]. 电网技术,2021,45(2):460-473.
- [15] 赵爱林. 基于演化博弈的综合能源服务商竞合策略研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2022.

(下转第 44 页)

1267–1276.

- [27] LI Y L, LI P Y, LIU L N. Source identification and potential ecological risk assessment of heavy metals in the topsoil of the Weining Plain(Northwest China)[J]. *Exposure and Health*, 2022, 14(2): 281–294.
- [28] 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 等. 阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4545–4555.
- [29] 程金, 张思文, 黄文卿, 等. 福建省耕地土壤 pH 空间分布及影响因素分析[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(12): 90–101.
- [30] 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 等. 张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(6): 3544–3561.
- [31] 冯韶华, 俞一帆, 张旭峰, 等. 中国农田土壤重金属污染源解析研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(9): 1300–1306.

[责任编辑: 严海琳]

(上接第 21 页)

- [16] 吴利兰, 荆朝霞, 吴青华, 等. 基于 Stackelberg 博弈模型的综合能源系统均衡交互策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 142–150.
- [17] WANG X W, LI L Y, LI J D, et al. Traffic-aware multiple association in ultradense networks: A state-based potential game[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(3): 4356–4367.
- [18] 曾君, 王侨侨, 刘俊峰, 等. 一种基于势博弈的微电网分布式运行优化算法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(24): 7195–7204.
- [19] BHATTI A B, BROADWATER R. Distributed nash equilibrium seeking for a dynamic micro-grid energy trading game with non-quadratic payoffs[J]. *Energy*, 2020, 202, 117709.
- [20] RAD M H A, WONG S W V, JATSKEVICH J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1(3): 320–331.

[责任编辑: 陈 庆]