

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231276

基于核仁聚类估计和数据驱动分布鲁棒优化的海量异构 产消者联盟能量管理策略

张智泉, 陈晓杰, 符杨, 李振坤, 邓莉荣

(上海风电技术教育部工程研究中心(上海电力大学), 上海 200090)

摘要: 随着分布式资源接入技术和可交易能源市场的快速发展, 海量异构多能产消者电热能源共享和源荷强不确定性给联盟能量管理带来极大挑战。基于此, 提出一种基于核仁聚类估计和数据驱动分布鲁棒优化的海量异构多能产消者联盟能量管理策略。该方法以联盟及个体在多重不确定性影响下的社会福利最大为目标, 建立了考虑电热网络动态差异性的海量产消者能量管理模型, 以解决联盟能量管理可扩展性、公平性和隐私性难以兼顾的问题。另外, 考虑到核仁计算的复杂度和源荷不确定性的不利影响, 分别提出了基于高斯混合聚类的核仁估计方法和基于数据驱动 Wasserstein 距离的分布鲁棒优化模型, 实现了模型求解速度与精度的均衡。算例结果表明, 所提方法有效提升了产消者联盟在多重不确定性影响下的社会福利, 实现了联盟能量管理可扩展性、公平性和隐私性的均衡, 促进了更多的产消者参与本地能源点对点(peer-to-peer, P2P)交易。

关键词: 产消者; 联盟能量管理; 社会福利; 核仁; 不确定性

Energy management strategy for massive heterogeneous prosumers alliance based on nucleolar clustering estimation and data-driven distributionally robust optimization

ZHANG Zhiquan, CHEN Xiaojie, FU Yang, LI Zhenkun, DENG Lirong

(Engineering Research Center of Offshore Wind Technology Ministry of Education
(Shanghai University of Electric Power), Shanghai 200090, China)

Abstract: There has been rapid development of distributed resource access technology and the tradeable energy market. Along with this, thermal energy sharing and strong uncertainty of source load for massive heterogeneous multi-energy producers and consumers bring great challenges to energy management of an alliance. Based on this, this paper proposes an energy management strategy for a massive heterogeneous multi-energy consumer alliance based on nucleolar cluster estimation and data-driven optimization of a distributed robust system. With the objective of maximizing the social welfare of the alliance and individuals under the influence of multiple uncertainties, the energy management model of a massive heterogeneous consumer alliance considering the dynamic differences of the electric heating network is established. This is to solve the problem that the scalability, fairness and privacy of alliance energy management are difficult to take into account. In addition, considering the complexity of nucleolar computation and the adverse effects of source load uncertainty, this paper proposes a nucleolar estimation method based on Gaussian mixture clustering and distributed robust optimization model based on data-driven Wasserstein distance, respectively, to achieve a balance between model solving speed and accuracy. The numerical results show that the proposed method effectively improves the social welfare of the producers and consumers alliance under the influence of multiple uncertainties, achieves the balance of scalability, fairness and privacy of the energy management of the alliance, and promotes more producers and consumers to participate in local energy peer-to-peer (P2P) transactions.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China and Smart Grid Joint Fund (No. U2066214).

Key words: prosumers; coalition energy management; social welfare; nucleolus; uncertainty

基金项目: 国家自然科学基金项目智能电网联合基金项目资助(U2066214); 上海科学技术委员会项目资助(21010501200); 新型电力系统运行与控制全国重点实验室开放基金课题(SKLD22KM19)

0 引言

随着分布式资源接入技术和可交易能源市场的快速发展,越来越多的能源用户从传统“消费者”向“产消者”转变^[1-3]。这些产消者可通过对能源生产和使用的协调分配,主动参与可交易能源市场的能源点对点(peer-to-peer, P2P)交易,以实现分布式清洁能源的就地消纳,提高能源综合利用率,极大减少了源端和传输端的碳排放量。然而,受多能强耦合、合作剩余分配和源荷多重不确定性的多重影响,与单一电能产消者群相比,多能产消者群系统的运行特性将有很大不同,单一电能能量管理方法已不能满足上述多主体多能耦合能源系统的需求,另外,为了抑制不确定性对能源共享的影响,最大限度实现本地能源就地消纳,促进更多的产消者以合作方式参与本地能源 P2P 交易,有必要研究一种满足多主体高效博弈、合作剩余合理分配的海量异构产消者联盟能量管理系统。

目前国内外学者针对多能产消者群能量管理已开展了一定研究,主要提出了两类方法:模型驱动和数据驱动。其中,模型驱动方法主要包括集中式优化^[4-5]、分布式优化^[6-8]和博弈论^[9-14]。在集中式优化方面,文献[4]利用互补约束将多个微网协同运行问题转化为随机数学规划问题。文献[5]提出了一种粒子群优化算法来降低不确定参数下联网微网的运行成本。虽然集中优化理论上可以保证全局优化,但该方法需要获取所有微网的完整信息以实现全局优化,这会大大增加系统通信需求,同时也带来了巨大计算负担,此外,该方法也无法保证微网的隐私需求,阻碍本地能源共享的实现。而分布式优化可通过交换局部有限信息,实现产消者群的全局协同运行,其主要方法包括交替方向乘子法(alternating direction multiplier method, ADMM)、分布式模型预测控制(distributed model predictive control, DMPC)和一致性算法。如文献[6]提出了一种基于 ADMM 算法的分布式能源(distributed energy resources, DERs)在线能量管理算法。文献[7]提出了一种基于多代理 ADMM 的网络化微电网点对点能源交易方法。文献[8]通过 DMPC 法解决了微网间合作和共享资源利用的公平性问题。由于这些分布式优化方法只需要有限的信息交互,可提供更好的隐私保护,避免对集中能源管理系统(energy management system, EMS)的依赖,具有较好的可靠性,但该类方法只能处理线性凸约束,不能解决不同利益相关者带来的利益分配问题。

博弈论作为解决多利益相关者决策问题的另一

种有效方法,得到了广泛应用。在已有基于博弈论的能量管理研究中,主要分为非合作博弈或合作博弈两种方法。关于非合作博弈,文献[9]针对电能产消者在能量管理和交易过程中出现的隐私泄漏问题,提出了基于非合作博弈的分布式纳什均衡能量管理策略,该方法能有效平衡产消者进行电能交易时的隐私安全与交易成本。文献[10]提出了一种基于非合作博弈的分布式协调控制方法,以解决多运营商的能源交易问题。文献[11]建立了一种微网群的非合作博弈优化模型,通过形成合理内部电价来满足微网群的需求侧响应。该方法可在保证解的稳定性的同时考虑多个微网的利益,但对博弈参与者的效用函数有严格的限制,如拟凹性、连续性等良好特性,此外,非合作博弈依赖于能源的动态定价,无法避免市场操纵行为,社会效益偏低。关于合作博弈,文献[12]提出了一种合作博弈来调度多微网系统日前运行,并基于 Shapley 值在微网间公平分配系统的最优成本。文献[13]提出了一种基于联盟博弈的局部电力交互算法,以确定联合运行的激励方案,并帮助微电网与邻近的微电网进行局部电力交易。文献[14]采用合作博弈和非合作博弈两种方式,考虑储能系统容量的优化,解决了多微网的经济调度问题。该方法主要关注联盟内利润分配的公平性及激励方法,可较好预防市场操纵行为,以实现个体及联盟社会福利的最大化,但合作剩余分配的核仁计算复杂度随产消者数量的增加呈指数增长,且异质能源交易也增加了合作剩余分配的复杂性,使得该方法计算量大、收敛速度慢。

综上所述,已有研究存在以下不足: 1) 未考虑海量产消者异构性和电热强耦合性对产消者个体能量管理及能源共享决策的影响; 未考虑密集海量电热交易受热延迟性和热损失的影响,此外,未充分考虑海量产消者通过合作运行产生的剩余环境效益,使得社会福利偏低; 2) 已有能量管理方法大都只适用规模较小的产消者群或微网群,海量异构产消者参与联盟使得核仁计算复杂度呈指数增长,计算量巨大,此外,未考虑海量产消者联盟能量管理在合作剩余分配过程中公平性和可扩展性的平衡; 3) 未充分考虑海量产消者源荷不确定的差异与耦合性,该问题贯穿联盟能量管理的各个环节,且逐节加剧,而现有方法主要以静态模型表征源荷不确定性,得到的最优决策方案非可泛化策略,故当出现产消者加入或退出时需要重新构建源荷不确定集,缺乏利用历史数据优化不确定集的能力。

基于此,本文提出一种基于核仁聚类估计和数据驱动分布鲁棒优化的海量异构产消者联盟能量管

理策略，以解决联盟能量管理可扩展性、公平性和隐私性难以兼顾的问题，实现海量产消者联盟在多重强不确定性交织影响下的社会福利最大化。该方法首先充分考虑了海量产消者异构性、电热强耦合性和电热异质性特征，通过在源网端分别核算碳减排量，建立了计及电热网络动态差异性和电热强耦合性的海量产消者能量管理模型，促进海量产消者形成合作联盟，以实现个体及联盟的社会福利最大化。接着，考虑到合作剩余分配的核仁计算复杂度随产消者数量的增加呈指数增长，且异质能源交易也加深了合作剩余分配的复杂性，本文提出了一种基于高斯混合聚类的核仁估计方法，以适应海量产消者参与联盟，并激励产消者合作的积极性。另外，考虑到海量产消者源荷不确定的差异与耦合性对联盟

稳定性以及能量管理有效性的不利影响，本文利用 Wasserstein 距离和数据驱动分别构造了源荷不确定性概率分布模糊集和支撑集，并采用强对偶理论将分布鲁棒优化模型转化为等效线性规划问题，最终采用交替方向乘子算法实现了模型求解速度与精度的均衡。最后，通过算例分析可知，所提方法有效提升了异构多能产消者联盟在多重不确定性影响下的社会福利，实现了联盟能量管理可扩展性、公平性和隐私性的均衡，促进了更多的产消者参与本地能源 P2P 交易。

1 海量异构产消者联盟的能量管理建模

图 1 为海量产消者联盟的合作运行框架图。

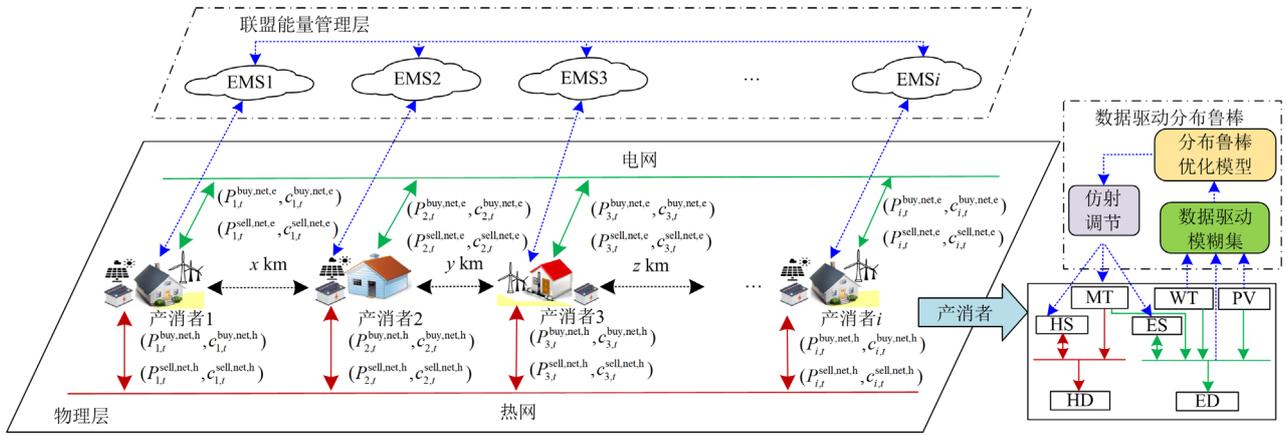


图 1 海量产消者联盟的合作运行框架图

Fig. 1 Cooperative operation frame of the alliance of mass prosumers

由图 1 可知，产消者为能源生产与消费的独立市场主体，互联形成产消者群后，彼此间能量交互博弈特性显著。每个产消者不仅可与外部能源网进行能源交互，还可根据自身电能和热能的盈缺情况参与能源共享。产消者以合作联盟方式参与能源交互的具体过程为：1) 在隐私保护前提下，联盟成员可通过共享一定交易信息，以 P2P 交易的方式达成最优能源交易量和价格。联盟成员在协商能源交易量和价格时，是以实现社会福利最大化为目标，通过提高购价或降低售价的策略，促进能源交易的达成，最终提升产消者间的交互能量，其中，产消者的社会福利包括经济效益和环境效益，经济效益的提升是通过增加产消者间的能量交互，以减少联盟与外部能源网的能量购售；环境效益的提升也是提升联盟内部的能量交互量，以促进分布式清洁能源的就地消纳，从而减少碳排放。2) 联盟核仁的计算与分配是维持联盟稳定性的关键，需要设计高效公平的合作剩余分配方法。考虑到海量产消者在参与

联盟时边际贡献呈较大差异性和复杂性，当海量产消者参与联盟的能源共享时，计算其核仁并形成合理的合作剩余分配方法。

1.1 考虑综合效益的联盟能量管理目标函数

从经济和环境效益角度出发，考虑到海量产消者源荷不确定^[15-16]的差异与耦合性对联盟稳定性以及能量管理^[17-18]的不利影响，本文建立了基于数据驱动分布鲁棒优化的能量管理模型，以实现海量产消者联盟在源荷预测误差最恶劣概率分布场景下的期望社会福利最大化。

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \left\{ W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}) + \inf_{P \in F} E_{\tilde{P}} [W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t})] \right\} \quad (1)$$

式中： W_i^{pros} 为产消者 i 在一个运行周期的社会福利， $W_i^{\text{pros}} = W_i^{\text{eco}} + W_i^{\text{env}}$ ，其中， W_i^{eco} 为产消者 i 进行能源共享及与外部能源网络交易的经济效益， W_i^{env} 为产消者 i 就地消纳可再生能源的环境效益； $\mathbf{x}_{i,t}$ 为产消者 i 在 t 时段的优化决策变量，其包括与上级能

源网交易量、P2P 交易量、微型燃气轮机出力和电热储能出力; F 为源荷不确定性的 Wasserstein 模糊集; \tilde{P} 为源荷预测误差最恶劣概率分布; E 为期望值; $\xi_{i,t}$ 为产消者 i 的源荷预测误差随机变量; \inf 表示求下界函数。由式(1)可知, 每个产消者的社会福利包括两个部分, 即不受预测误差影响的独立社会福利 $W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t})$ 和与预测误差有关的校正社会福利 $W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t})$ 。 $W_{i,t}^{\text{eco}}$ 的详细计算方法为

$$\begin{cases} W_{i,t}^{\text{eco}} = W_{i,t}^{\text{eco,intera}} + W_{i,t}^{\text{eco,net}} - C_{i,t}^{\text{cost}} \\ C_{i,t}^{\text{cost}} = C_{i,t}^{\text{OP}} + C_{i,t}^{\text{loss,h}} + C_{i,t}^{\text{net}} \\ W_{i,t}^{\text{eco,intera}} = c_{i,t}^{\text{sell,p2p,e}} P_{i,t}^{\text{sell,p2p,e}} - c_{i,t}^{\text{buy,p2p,e}} P_{i,t}^{\text{buy,p2p,e}} + \\ \quad c_{i,t}^{\text{sell,p2p,h}} P_{i,t}^{\text{sell,p2p,h}} - c_{i,t}^{\text{buy,p2p,h}} P_{i,t}^{\text{buy,p2p,h}} \\ W_{i,t}^{\text{eco,net}} = c_{i,t}^{\text{sell,net,e}} P_{i,t}^{\text{sell,net,e}} - c_{i,t}^{\text{buy,net,e}} P_{i,t}^{\text{buy,net,e}} + \\ \quad c_{i,t}^{\text{sell,net,h}} P_{i,t}^{\text{sell,net,h}} - c_{i,t}^{\text{buy,net,h}} P_{i,t}^{\text{buy,net,h}} - \\ \quad c_{i,t}^{\text{buy,net,g}} P_{i,t}^{\text{buy,net,g}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $W_{i,t}^{\text{eco,intera}}$ 和 $W_{i,t}^{\text{eco,net}}$ 分别为第 i 个产消者在 t 时段进行 P2P 交易的经济效益和与外部能源网络交易的经济效益; $C_{i,t}^{\text{cost}}$ 为第 i 个产消者在 t 时段的运行成本; $C_{i,t}^{\text{OP}}$ 、 $C_{i,t}^{\text{loss,h}}$ 、 $C_{i,t}^{\text{net}}$ 分别为第 i 个产消者在 t 时段的设备运维成本、第 i 个产消者与第 j 个产消者在交互热能时的热能传输损耗成本和第 i 个产消者与第 j 个产消者在能源共享时需要支付的过网费; $P_{i,t}^{\text{sell,p2p,e}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{sell,p2p,h}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{sell,net,e}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{sell,net,h}}$ 分别为第 i 个产消者卖给第 j 个产消者的电功率、第 i 个产消者卖给第 j 个产消者的热功率、第 i 个产消者卖给外部电网络的电功率和第 i 个产消者卖给外部热网络的热功率; $P_{i,t}^{\text{buy,p2p,e}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{buy,p2p,h}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{buy,net,e}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{buy,net,h}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{buy,net,g}}$ 分别为第 i 个产消者从第 j 个产消者购买的电功率、第 i 个产消者从第 j 个产消者购买的热功率、第 i 个产消者从外部电网络购买的电功率、第 i 个产消者从外部热网络购买的热功率和第 i 个产消者从外部气网购买的气功率; $c_{i,t}^{\text{sell,p2p,e}}$ 、 $c_{i,t}^{\text{sell,p2p,h}}$ 、 $c_{i,t}^{\text{sell,net,e}}$ 和 $c_{i,t}^{\text{sell,net,h}}$ 分别为第 i 个产消者卖给第 j 个产消者的电价、第 i 个产消者卖给第 j 个产消者的热价、第 i 个产消者卖给外部电网络的电价和第 i 个产消者卖给外部热网络的热价; $c_{i,t}^{\text{buy,p2p,e}}$ 、 $c_{i,t}^{\text{buy,p2p,h}}$ 、 $c_{i,t}^{\text{buy,net,e}}$ 、 $c_{i,t}^{\text{buy,net,h}}$ 和 $c_{i,t}^{\text{buy,net,g}}$ 分别为第 i 个产消者从第 j 个产消者购买的电价、第 i 个产消者从第 j 个产消者购买的热价、第 i 个产消者从外部电网络购买的电价、第 i 个产消者从外部热网络购买的热价和第 i 个产消者向气网购气的价格。

$$\begin{cases} C_{i,t}^{\text{OP}} = \alpha_{\text{pv}} P_{i,t}^{\text{PV}} + \alpha_{\text{wt}} P_{i,t}^{\text{WT}} + \alpha_{\text{mt}} (P_{i,t}^{\text{e,MT}} + P_{i,t}^{\text{h,MT}}) \\ \quad \alpha_{\text{es}} (P_{i,t}^{\text{ES,ch}} + P_{i,t}^{\text{ES,dis}}) + \alpha_{\text{hs}} (P_{i,t}^{\text{HS,ch}} + P_{i,t}^{\text{HS,dis}}) \\ C_{i,t}^{\text{loss,h}} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1, j \neq i}^N (\alpha_{\text{h}} \Delta P_{ij,t}^{\text{loss,h}}) \\ C_{i,t}^{\text{net}} = \frac{1}{2} (\alpha_{\text{e}} P_{ij,t}^{\text{p2p,e}} + \alpha_{\text{h}} P_{ij,t}^{\text{p2p,h}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: α_{pv} 、 α_{wt} 、 α_{mt} 、 α_{es} 和 α_{hs} 分别为光伏、风机、微型燃气轮机、电储能和热储能的出力成本系数; α_{h} 为热力管道传输费用系数; α_{e} 为电网传输费用系数; $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{WT}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{h,MT}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{e,MT}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ES,ch}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ES,dis}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{HS,ch}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{HS,dis}}$ 分别为光伏出力、风机出力、燃气轮机产生热功率和电功率、电储能充放电功率、热储能充放电功率; $\Delta P_{ij,t}^{\text{loss,h}}$ 为产消者 i 与产消者 j 管道间的热损耗功率; $P_{ij,t}^{\text{p2p,e}}$ 为产消者 i 与产消者 j 交易电功率; $P_{ij,t}^{\text{p2p,h}}$ 为产消者 i 与产消者 j 交易热功率。

在源端, 产消者通过自发自用与 P2P 交易实现分布式清洁能源就地消纳, 可减少化石能源发电的碳排放量。在传输端, 产消者购买的电能和热能, 由于经一定距离传输时会产生损耗, 现有电源结构仍以消耗化石原料为主, 因此这部分损耗也会间接产生碳排放。因此, 第 i 个产消者在 t 时段的环境效益 $W_{i,t}^{\text{env}}$ 为

$$\begin{cases} W_{i,t}^{\text{env}} = W_{i,t}^{\text{env,s,co}_2} + W_{i,t}^{\text{env,l,co}_2} \\ W_{i,t}^{\text{env,s,co}_2} = \mu (P_{i,t}^{\text{de,e}} + P_{i,t}^{\text{de,h}} + P_{i,t}^{\text{p2p,e}} + P_{i,t}^{\text{p2p,h}}) \times \bar{\eta} \\ W_{i,t}^{\text{env,l,co}_2} = \mu \alpha \% (P_{i,t}^{\text{de,e}} + P_{i,t}^{\text{de,h}} + P_{i,t}^{\text{p2p,e}} + P_{i,t}^{\text{p2p,h}}) \times \bar{\eta} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $W_{i,t}^{\text{env,s,co}_2}$ 和 $W_{i,t}^{\text{env,l,co}_2}$ 分别为第 i 个产消者在源端和传输端的碳减排效益; μ 、 $\bar{\eta}$ 和 $\alpha\%$ 分别为碳排放权交易价格、发电行业和供热行业的平均碳排放因子、输电、热损耗率; $P_{i,t}^{\text{de,e}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{de,h}}$ 分别为第 i 个产消者在 t 时段自发自用的电量和热量; $P_{i,t}^{\text{p2p,e}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{p2p,h}}$ 分别为产消者在 t 时段 P2P 交易电量和热量。

1.2 考虑电热网络动态差异性和电热强耦合性的产消者联盟运行约束

1.2.1 产消者联盟的运行约束

式(5)为产消者与上级能源网交易量约束; 式(6)为产消者 P2P 交易量约束; 式(7)为产消者间交易量平衡约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{sell,net,e}}, P_{i,t}^{\text{buy,net,e}} \leq P_{i,t}^{\text{net,e,max}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{sell,net,h}}, P_{i,t}^{\text{buy,net,h}} \leq P_{i,t}^{\text{net,h,max}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ij,t}^{\text{sell,p2p,e}}, P_{ij,t}^{\text{buy,p2p,e}} \leq P_{ij,t}^{\text{p2p,e,max}} \\ 0 \leq P_{ij,t}^{\text{sell,p2p,h}}, P_{ij,t}^{\text{buy,p2p,h}} \leq P_{ij,t}^{\text{p2p,h,max}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N (P_{ij,t}^{\text{sell,p2p,e}} + P_{ij,t}^{\text{buy,p2p,e}}) = 0, \forall t \\ \sum_{i=1}^N (P_{ij,t}^{\text{sell,p2p,h}} + P_{ij,t}^{\text{buy,p2p,h}}) = 0, \forall t \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{i,t,\max}^{\text{net,e}}$ 和 $P_{i,t,\max}^{\text{net,h}}$ 分别为产消者与外部电网交易时传输的最大电、热功率; $P_{ij,t,\max}^{\text{p2p,e}}$ 和 $P_{ij,t,\max}^{\text{p2p,h}}$ 分别为产消者 i 与产消者 j 交易时传输的最大电、热功率。

1.2.2 热力管网模型及运行约束

热力管网本质上是一个携带热能的流体网络, 主要承担传输热能, 反映了各个管道中热能、温度和热媒之间的变化关系。相较于电力网络, 热能在传输的过程中速度较慢, 因此热负荷处的温度变化较热源处的温度变化有一定的延迟效应, 此外, 热水在传输过程中伴随着能量的传递和损耗, 根据热传导基本原理, 热力管网 ij 中的热能模型如式(8)所示。

$$\begin{cases} t_{\text{delay}} = \left[K_{\text{delay}} \frac{L_{ij}}{v_{ij}} \right] \\ P_{ij,t}^{\text{h}} = km_{ij,t} T_{ij,t} \\ k = c\rho \end{cases} \quad (8)$$

式中: t_{delay} 为热延迟时间; K_{delay} 为热延迟系数, 其与管道自身的材质、深度等因素有关; L_{ij} 为产消者 i 与产消者 j 之间管道的长度; v_{ij} 为热水在 ij 管道中的流速; $P_{ij,t}^{\text{h}}$ 为热媒在 t 时刻流经管道 ij 的热能; $m_{ij,t}$ 为 t 时刻的流量; $T_{ij,t}$ 为 t 时刻的温度; c 为热媒比热容; ρ 为热媒密度。

管网内热能损失是与水温度有关的非线性函数, 为了满足 P2P 实时能量交易需求, 本文暂忽略了回水温度的影响, 故热能损耗约束为^[19]

$$\Delta P_{ij,t}^{\text{loss,h}} = \frac{T_{t,\text{sw}} - T_{t,\text{e}}}{T_{t,\text{sw}} - T_{t,\text{rw}}} \left(1 - e^{-\frac{2\pi(T_{t,\text{sw}} - T_{t,\text{rw}}) L_{ij}}{P_0 \sum R}} \right) \approx 2\pi \frac{T_{t,\text{sw}} - T_{t,\text{e}}}{\sum R} L_{ij} \quad (9)$$

式中: $T_{t,\text{sw}}$ 、 $T_{t,\text{rw}}$ 、 $T_{t,\text{e}}$ 分别为 t 时刻热网管道热源点供水温度、管道回水温度和管道周围环境的平均温度; P_0 为当热源点温度为 $T_{t,\text{sw}}$ 时管道内的热功率; $\sum R$ 为热媒与周围环境间的平均热阻抗。

热力管道热延迟和热损耗的能量守恒方程如式(10)所示。

$$\bar{P}_{ij,t}^{\text{h}} = P_{ij,t-t_{\text{delay}}}^{\text{h}} - \Delta P_{ij,t}^{\text{loss,h}} \quad (10)$$

式中, $\bar{P}_{ij,t}^{\text{h}}$ 、 $P_{ij,t-t_{\text{delay}}}^{\text{h}}$ 、 $\Delta P_{ij,t}^{\text{loss,h}}$ 分别为管道 ij 出口处的热能、 $t-t_{\text{delay}}$ 时刻管道 ij 入口处的热能和 t_{delay} 时间的热损耗。

热力管道 ij 中的流量约束和热功率约束为

$$\begin{cases} |m_{ij,t}| \leq v_{ij,t}^{\text{max}} S_{ij} \\ P_{ij,t}^{\text{h,max}} = kv_{ij,t}^{\text{max}} S_{ij} (T_{t,\text{sw}} - T_{t,\text{rw}}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{ij,t}^{\text{h,max}}$ 和 $v_{ij,t}^{\text{max}}$ 分别为 t 时刻管道 ij 中允许流过的最大热功率和最大流速; S_{ij} 为管道 ij 的横截面面积。

1.2.3 产消者内能源生产转换设备的运行约束

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{e,MT}} = \eta_{\text{e}}^{\text{MT}} P_{i,t}^{\text{buy,net,g}}, P_{i,t}^{\text{h,MT}} = \eta_{\text{h}}^{\text{MT}} P_{i,t}^{\text{buy,net,g}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{h,MT}} \leq P_{\text{max}}^{\text{h,MT}}, 0 \leq P_{i,t}^{\text{e,MT}} \leq P_{\text{max}}^{\text{e,MT}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} W_{i,t}^{\text{ES}} = (1 - \tau_{\text{e,bat}}) W_{i,t-1}^{\text{ES}} + [P_{i,t}^{\text{ES,ch}} \eta_{\text{e}}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{ES,dis}} / \eta_{\text{e}}^{\text{dis}}] \cdot \Delta t \\ W_{i,t}^{\text{HS}} = (1 - \tau_{\text{h,bat}}) W_{i,t-1}^{\text{HS}} + [P_{i,t}^{\text{HS,ch}} \eta_{\text{h}}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{HS,dis}} / \eta_{\text{h}}^{\text{dis}}] \cdot \Delta t \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} S_{i,\text{min}} \leq S_i \leq S_{i,\text{max}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{ES,ch}} \theta_{i,\text{ch}} \leq P_{i,t}^{\text{ES,ch,max}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{ES,dis}} \theta_{i,\text{dis}} \leq P_{i,t}^{\text{ES,dis,max}} \\ \theta_{i,\text{ch}} + \theta_{i,\text{dis}} \leq 1 \\ S_i(0) = S_i(T) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{\text{max}}^{\text{h,MT}}$ 和 $P_{\text{max}}^{\text{e,MT}}$ 分别为第 i 个产消者微型燃气轮机在时刻 t 产生热、电功率上限; $\eta_{\text{e}}^{\text{MT}}$ 、 $\eta_{\text{h}}^{\text{MT}}$ 分别为微型燃气轮机电、热转换系数; $W_{i,t}^{\text{ES}}$ 为 t 时刻储能设备的储电量; $\tau_{\text{e,bat}}$ 为自放电损耗率; $\eta_{\text{e}}^{\text{ch}}$ 、 $\eta_{\text{e}}^{\text{dis}}$ 分别为充、放电效率; $W_{i,t}^{\text{HS}}$ 为 t 时刻储热设备的储热量; $\tau_{\text{h,bat}}$ 为自放热损耗率; $\eta_{\text{h}}^{\text{ch}}$ 、 $\eta_{\text{h}}^{\text{dis}}$ 分别为充、放热效率; $S_{i,\text{max}}$ 、 $S_{i,\text{min}}$ 分别为储能系统容量的上、下限; $P_{i,t}^{\text{ES,ch,max}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ES,dis,max}}$ 分别为充电功率的上限和放电功率上限; $\theta_{i,\text{ch}}$ 、 $\theta_{i,\text{dis}}$ 分别为充放电状态的离散变量, 其中 0 为充电, 1 为放电; T 为调度周期; $S_i(0)$ 、 $S_i(T)$ 分别为 0 时刻和 T 时刻储能设备的容量。

1.2.4 产消者内电能平衡约束

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{WT}} + P_{i,t}^{\text{ES,dis}} + P_{i,t}^{\text{e,MT}} + P_{i,t}^{\text{buy,net,e}} + P_{i,t}^{\text{buy,p2p,e}} = \\ P_{i,t}^{\text{sell,net,e}} + P_{i,t}^{\text{sell,p2p,e}} + P_{i,t}^{\text{ES,ch}} + P_{i,t}^{\text{ED}} \\ P_{i,t}^{\text{h,MT}} + P_{i,t}^{\text{HS,dis}} + P_{i,t}^{\text{buy,net,h}} + P_{i,t}^{\text{buy,p2p,h}} = \\ P_{i,t}^{\text{sell,net,h}} + P_{i,t}^{\text{sell,p2p,h}} + P_{i,t}^{\text{HS,ch}} + P_{i,t}^{\text{HD}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{ED}}$ 为产消者 i 在 t 时刻的电负荷; $P_{i,t}^{\text{HD}}$ 为产消者 i 在 t 时刻的热负荷。

1.2.5 源荷不确定性的仿射调节约束

由于源荷出力具有随机波动性, 所以在实时阶段, 源荷实际出力与预测出力可能存在偏差, 令偏差为 $\hat{\xi} = [\hat{\xi}_1, \hat{\xi}_2, \dots, \hat{\xi}_N]$, 其中 $\hat{\xi} = \hat{\xi}^{\text{WT}} + \hat{\xi}^{\text{PV}} + \hat{\xi}^{\text{ED}}$, $\hat{\xi}^{\text{WT}}$ 、 $\hat{\xi}^{\text{PV}}$ 、 $\hat{\xi}^{\text{ED}}$ 分别为风电、光伏、电负荷预测误差矩阵。在实时阶段已知功率不确定性误差后, 本文采用仿射规则调节产消者与上级能源网交互功率、产消者间交互功率、微型燃气轮机、电储能、热储能和净电负荷的功率, 有

$$\begin{cases} \tilde{P}_{i,t}^{\text{sell,net,e}} = P_{i,t}^{\text{sell,net,e}} + \alpha^{\text{sell,net,e}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{sell,net,h}} = P_{i,t}^{\text{sell,net,h}} + \alpha^{\text{sell,net,h}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{buy,net,e}} = P_{i,t}^{\text{buy,net,e}} - \alpha^{\text{buy,net,e}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{buy,net,h}} = P_{i,t}^{\text{buy,net,h}} - \alpha^{\text{buy,net,h}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{sell,p2p,e}} = P_{i,t}^{\text{sell,p2p,e}} + \alpha^{\text{sell,p2p,e}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{sell,p2p,h}} = P_{i,t}^{\text{sell,p2p,h}} + \alpha^{\text{sell,p2p,h}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{buy,p2p,e}} = P_{i,t}^{\text{buy,p2p,e}} - \alpha^{\text{buy,p2p,e}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{buy,p2p,h}} = P_{i,t}^{\text{buy,p2p,h}} - \alpha^{\text{buy,p2p,h}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{h,MT}} = P_{i,t}^{\text{h,MT}} - \alpha^{\text{h,MT}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{e,MT}} = P_{i,t}^{\text{e,MT}} - \alpha^{\text{e,MT}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{ES,ch}} = P_{i,t}^{\text{ES,ch}} + \alpha^{\text{e,ch}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{ES,dis}} = P_{i,t}^{\text{ES,dis}} - \alpha^{\text{e,dis}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{HS,ch}} = P_{i,t}^{\text{HS,ch}} + \alpha^{\text{h,ch}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{HS,dis}} = P_{i,t}^{\text{HS,dis}} - \alpha^{\text{h,dis}} \hat{\xi}_{i,t} \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{RES}} = P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{WT}} - P_{i,t}^{\text{ED}} + \hat{\xi}_{i,t} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\alpha^{\text{sell,net,e}}$ 、 $\alpha^{\text{sell,net,h}}$ 、 $\alpha^{\text{buy,net,e}}$ 、 $\alpha^{\text{buy,net,h}}$ 、 $\alpha^{\text{sell,p2p,e}}$ 、 $\alpha^{\text{sell,p2p,h}}$ 、 $\alpha^{\text{buy,p2p,e}}$ 、 $\alpha^{\text{buy,p2p,h}}$ 、 $\alpha^{\text{h,MT}}$ 、 $\alpha^{\text{e,MT}}$ 、 $\alpha^{\text{e,ch}}$ 、 $\alpha^{\text{e,dis}}$ 、 $\alpha^{\text{h,ch}}$ 、 $\alpha^{\text{h,dis}}$ 分别为产消者与上级能源网交易电热量、与其他产消者交易电热量、能源生成与耦合设备出力的仿射调节速率变量; $\tilde{P}_{i,t}^{\text{sell,net,e}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{sell,net,h}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{buy,net,e}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{buy,net,h}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{sell,p2p,e}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{sell,p2p,h}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{buy,p2p,e}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{buy,p2p,h}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{h,MT}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{e,MT}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{ES,ch}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{ES,dis}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{HS,ch}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{HS,dis}}$ 、 $\tilde{P}_{i,t}^{\text{RES}}$ 分别为产消者与上级能源网交易电热量、与其他产消者交易电热量、能源生成与耦合设备、净电负荷经过分布鲁棒仿射调节后的真实出力情况; $\hat{\xi}_{i,t}$ 为第 i 个源荷出力偏差。

2 基于边际贡献高斯聚类的核仁估计法

在求得产消者联盟的总体社会福利后, 还需要对该总体社会福利进行合理的分配。因此, 联盟能源管理的价值函数定义为产消者合作运行提升的社会福利值 $v(\Gamma)$ 。

$$v(\Gamma) = \hat{W}^{\text{pros}}(\Gamma) - \sum_{i=1}^N W\{i\} \quad (17)$$

式中: $v(\Gamma)$ 为联盟内产消者通过合作提升的社会福利值, 即可分配给所有产消者的总收益; $\hat{W}^{\text{pros}}(\Gamma)$ 为联盟 Γ 内所有产消者通过合作运行实现的总社会福利值; $\sum_{i=1}^N W\{i\}$ 为联盟 Γ 内所有产消者分别独立运行时的社会福利值之和。

联盟博弈的分配方法主要有核仁法、谈判集法和夏普利值法等。其中, 核仁法的分配思想是寻找一个使所有联盟成员满意度最高的分配方案, 即核仁 \mathbf{o}^* 。即产消者联盟对分配方法 \mathbf{o} 的不满意程度是通过其过剩度 $e(\mathbf{x}, \Gamma)$ 来衡量的, 其为 $e(\mathbf{o}, \Gamma) = v(\Gamma) - \sum_{i \in \Gamma} o_i$, 其中, \mathbf{o} 为收益分配方案, o_i 为分配给产消者 $i (i \in N)$ 的收益。另外, 上述收益分配方案需要满足: 1) 所有收益都分配给产消者 $\sum_{i \in N} o_i = v(N)$;

2) 产消者合作后的社会福利高于合作前的社会福利 $o_i \geq v(\{i\})$ 。过剩度 $e(\mathbf{o}, \Gamma)$ 越小, 表示产消者 i 对分配方案 \mathbf{o} 的满意度越高, 核仁 \mathbf{o}^* 即为满意度最高的分配方案, 是使产消者的不满意程度最小化的结果。而核仁的求解是求解一系列线性规划问题, 即

$$\begin{cases} O_1: \begin{cases} \min e(\mathbf{x}, \Gamma) \\ \text{s.t.} \sum_{i \in \Gamma} x_i \geq v(\Gamma) - e(\mathbf{x}, \Gamma) \end{cases} \\ O_2: \begin{cases} \min e(\mathbf{x}, \Gamma) \\ \text{s.t.} \sum_{i \in \Gamma} x_i \geq v(\Gamma) - e(\mathbf{x}, \Gamma) \\ \sum_{i \in \Gamma} x_i \geq v(\Gamma) - e_1(\mathbf{x}, \Gamma) \end{cases} \\ \vdots \\ O_N: \begin{cases} \min e(\mathbf{x}, \Gamma) \\ \sum_{i \in \Gamma} x_i \geq v(\Gamma) - e(\mathbf{x}, \Gamma), \forall \Gamma \in \Phi^{\Gamma} \setminus \pi_{N-1} \\ \sum_{i \in \Gamma} x_i \geq v(\Gamma) - e_1(\mathbf{x}, \Gamma), \forall \Gamma \in \pi_1 \\ \vdots \\ \sum_{i \in \Gamma} x_i \geq v(\Gamma) - e_N(\mathbf{x}, \Gamma), \\ \forall \Gamma \in \pi_{N-1} \setminus \pi_{N-2}, \forall N \in \{2, 3, \dots, Z-1\} \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $e_N(\mathbf{o}, \Gamma)$ 为优化问题 O_N 的最优解; π_N 为优化问题 O_N 取得最优解时其约束为等式约束的联盟的集合; Z 为大联盟内包含的子联盟数量; $\Phi^{\Gamma} \setminus \pi_{N-1}$ 表示在集合 Φ^{Γ} 中去除 π_{N-1} 项数据后的集合。当优化问题 O_N 对应的 π_N 为空集时, 核仁求解完成。由式(18)可知, 需要求解 2^N 个线性规划问题才能求得核仁 \mathbf{o}^* 。因此, 联盟成员数量的增加会造

成核仁计算复杂度呈指数级增加,从而限制了联盟能量管理的可扩展性。

2.1 边际贡献聚类特征

产消者获得的合作收益取决于它们对联盟的贡献,而具有相似边际贡献的产消者通常会获得相似的合作收益分配,故产消者对联盟的边际贡献可作为产消者的差异性特征,其为

$$\Delta W_i = W^\Gamma - (W^{\Gamma \setminus i} + W_i^0) \quad (19)$$

式中: ΔW_i 为每个产消者的边际贡献度; $W^{\Gamma \setminus i}$ 为没有产消者 i 参与的联盟 Γ 社会福利; W_i^0 为产消者 i 独立运行的社会福利; W^Γ 为产消者 i 加入后的联盟 Γ 的社会福利。

为了便于后续分析,本文将各产消者的边际贡献进行均值归一化处理。

$$\Delta W_i' = \frac{\Delta W_i - \text{average}(\Delta W_i)}{\max(\Delta W_i) - \min(\Delta W_i)} \quad (20)$$

式中: $\text{average}(\Delta W_i)$ 为联盟边际贡献的均值; $\max(\Delta W_i)$ 为边际贡献样本中的最大值; $\min(\Delta W_i)$ 为边际贡献样本中的最小值; $\Delta W_i'$ 为归一化后的边际贡献值。

2.2 核仁估计法

考虑到海量异构产消者的边际贡献数据集较为复杂,无法提前确定聚类中心及聚类的数量,且聚类形状也较复杂,本文采用高斯混合聚类法对联盟内所有产消者进行边际贡献聚类分析,以识别产消者间的相似性与差异性,从而减少对相似产消者核仁的重复计算,实现核仁的高效估计,解决联盟能量管理可扩展性和公平性的平衡问题。

首先,对联盟 Γ 中 N 个产消者进行高斯混合聚类,假定最终聚类成 k 类产消者群体,设 d 维随机变量 $\mathbf{x} = (x^1, x^2, \dots, x^d)^T$, 则该模型可表示为

$$\begin{cases} p(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K \alpha_k N(\mathbf{x}_k | \boldsymbol{\mu}_k, \mathbf{S}_k) \\ N(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}_k, \mathbf{S}_k) = \frac{1}{\sqrt{|\mathbf{S}_k|} (2\pi)^{d/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_k)^T \mathbf{S}_k^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_k)\right\} \\ \sum_{k=1}^K \alpha_k = 1, 0 \leq \alpha_k \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中: α_k 、 $\boldsymbol{\mu}_k$ 和 \mathbf{S}_k 分别为混合聚类中第 k 类产消者群体的权重、均值和协方差矩阵; $p(\mathbf{x})$ 为高斯混合模型的概率密度函数。

由前文计算得到每个产消者的边际贡献为 $\Delta W_i'$, 将所有产消者的边际贡献构成边际贡献矩阵为 $\Delta W_i'$, 然后具体聚类算法流程如下: 1) 设定 $\boldsymbol{\alpha}$ 、 $\boldsymbol{\mu}$ 、 \mathbf{S} 的初始值; 2) 计算概率 $\gamma_k(\mathbf{x}_i) =$

$$\frac{\alpha_k N(\mathbf{x}_i | \boldsymbol{\mu}_k, \mathbf{S}_k)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k N(\mathbf{x}_i | \boldsymbol{\mu}_k, \mathbf{S}_k)}; 3) \text{ 求 } \boldsymbol{\mu}_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_i)} \sum_{i=1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_i) \mathbf{x}_i;$$

$$4) \text{ 求 } \mathbf{S}_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_i)} \sum_{i=1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_i) (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}_k) (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}_k)^T; 5) \text{ 求}$$

$$\boldsymbol{\alpha}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_k(\mathbf{x}_i); 6) \text{ 循环重复计算步骤 2)—步骤}$$

5), 直至算法收敛。最后, 可求数据 $\Delta W_i'$ 为第 k 类产消者群体的概率 $\gamma_k(\Delta W_i')$ 及 GMM 的参数 $\boldsymbol{\alpha}_k$ 、 $\boldsymbol{\mu}_k$ 、 \mathbf{S}_k , 分别表示为

$$\begin{cases} \gamma_k(\Delta W_i') = \frac{\alpha_k N(\Delta W_i' | \boldsymbol{\mu}_k, \mathbf{S}_k)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k N(\Delta W_i' | \boldsymbol{\mu}_k, \mathbf{S}_k)} \\ \boldsymbol{\mu}_k = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_k(\Delta W_i') \Delta W_i'}{\sum_{i=1}^N \gamma_k(\Delta W_i')} \\ \mathbf{S}_k = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_k(\Delta W_i') (\Delta W_i' - \boldsymbol{\mu}_k) (\Delta W_i' - \boldsymbol{\mu}_k)^T}{\sum_{i=1}^N \gamma_k(\Delta W_i')} \\ \boldsymbol{\alpha}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_k(\Delta W_i') \end{cases} \quad (22)$$

通过聚类后最终本文将 N 个产消者缩减成 k 类产消者, 此时核仁法的计算复杂度从原来的 2^N 降低为 2^k , 即只需要求解 k 类产消者群体的核仁, 求解方法如式(18)所示。

针对 100 个产消者组成联盟, 采用上述方法进行聚类分析, 聚类结果如图 2 所示。

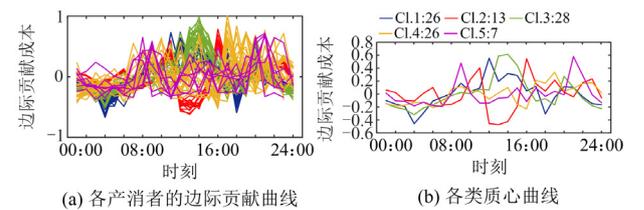


图 2 100 个产消者基于边际贡献的聚类结果

Fig. 2 Clustering results of 100 prosumers based on marginal contribution

图 2(a) 为 100 个产消者聚类后的边际贡献, 颜色相同的曲线表明该产消者的边际贡献分为一类。图 2(b) 为每类产消者群体的质心曲线, 其中 CL1:26 代表第一类产消者集群中共有 26 个产消者, 观察图 2(b) 可知, 聚类后产消者分为 5 类不同边际贡献产消者群体, 其中第一类含 26 个产消者, 第二类含 13 个产消者, 第三类含 28 个产消者, 第四类含 26

个产消者, 第五类含 7 个产消者。

3 基于 Wasserstein 距离模糊集和强对偶理论的模型转换

由于目标函数(式(1))需要求解源荷预测误差在随机变量 ξ 作用下的期望社会福利, 这就需要已知该随机变量 ξ 的概率分布函数, 而实际应用中无法获知真实的概率分布函数, Wasserstein 度量构造的模糊集可以保证样本的性能, 且随着样本数量趋于无穷大而收敛于真实概率分布^[19]。因此, 本文采用 Wasserstein 度量构造了源荷预测误差的模糊集 F , 并根据模糊集 F 对所提模型进行转换。

3.1 模糊集的构建

根据前文建立的一组源荷预测误差历史数据集 ($\hat{\xi} = [\hat{\xi}_1, \hat{\xi}_2, \dots, \hat{\xi}_N]$), 求得经验概率分布 $\bar{P}_N = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \delta_{\hat{\xi}_m}$, 并估计 P 值, 其中 $\delta_{\hat{\xi}_m}$ 为 $\hat{\xi}_m$ 的狄拉克测度, 而 Wasserstein 距离是测量估计概率分布和真实概率分布之间距离的一种方法。

$$W(\bar{P}_N, P) = \inf_{\mu} \left\{ \int_{\Xi^2} \|\xi - \hat{\xi}\| \mu(d\xi, d\hat{\xi}) \right\} \quad (23)$$

式中: Ξ 为源荷预测误差随机变量 ξ 的支撑集; μ 为 ξ 和 $\hat{\xi}$ 的联合分布, 分别与真实和经验概率分布 P 和 \bar{P}_N 相关。此外, 基于大数定律, 随着历史数据的增加, $\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{P}_N = P$, 即经验概率分布收敛到真实概率分布。故源荷预测误差模糊集可表示为 $F := \{W(\bar{P}_N, P) \leq \varepsilon(N)\}$, 其中, 真实概率分布 P 为一个 Wasserstein 球体, 其球心为经验概率分布 \bar{P}_N , $\varepsilon(N)$ 为球体半径, 它是置信水平 β 与样本数 N 的函数,

可表示为 $\varepsilon_M = H \sqrt{\frac{2}{N} \ln\left(\frac{1}{1-\beta}\right)}$, 其中 H 是一个常数, 表示随机变量的支撑直径, 其取值方法详见文献[20]。通过调整 ε_M 以控制分布鲁棒模型的保守性, 且满足 $\lim_{M \rightarrow \infty} \varepsilon(M) = 0$ 。

此外, 支撑集 Ξ 也可以使用源荷预测误差历史数据集 $\hat{\xi} = [\hat{\xi}_1, \hat{\xi}_2, \dots, \hat{\xi}_N]$ 计算得出。为方便计算, 本文采用正则化对数据集进行标准化 $\theta_n = (\delta)^{-0.5} (\xi_n - \mu) \forall n=1, 2, \dots, N$, 其中 δ 为数据集的方差, ξ_n 为第 n 个样本数据。标准化后不确定性参数数据集 θ 的均值为 0、方差为 I 。设 Φ 是 θ 的支撑集, 则可以定义为: $\Phi = \{\theta \in \mathbb{R}^T \mid -l \leq \theta_n \leq l\} \forall n=1, 2, \dots, N$, 其中 θ_n 为 θ 中的第 n 个元素; l 为 θ_n 的边界。因此, 所构造的支撑集 Φ 是要推导出一个合理的 l , 确保随

机事件 $\theta_n \in \Phi$ 的高概率, 同时可以使支撑集 Φ 足够小, 以保证其低保守性。 l 的计算过程详见参考文献[20]。当求出最优 l 时, 可以得到具有数据驱动性质的支撑集 $\Xi = (\Gamma^{\text{ti}})^{0.5} \Phi + \mu^{\text{ti}}$ 。

3.2 分布鲁棒优化模型的转换

上述建立的模型(式(1)—式(23))属于二层非线性数学规划问题, 该问题直接求解较为困难。为了提高模型求解的速度, 满足能源共享的需要, 本文采用大 M 法、McCormick 包络法和强对偶理论, 将原模型转化为混合整数线性规划模型, 便于快速求解。

首先对模型中的非线性项进行转化处理。1) 采用大 M 法对储能模型进行转换, 以储电为例, 有

$$\begin{cases} S_{i,\min} \leq S_i \leq S_{i,\max} \\ 0 \leq \delta \leq P_{i,t}^{\text{ES,ch,max}} \\ -M\theta_{i,\text{ch}} \leq \delta \leq M\theta_{i,\text{ch}} \\ -M(1-\theta_{i,\text{ch}}) + P_{i,t}^{\text{ES,ch}} \leq \delta \leq M(1-\theta_{i,\text{ch}}) + P_{i,t}^{\text{ES,ch}} \\ 0 \leq \rho \leq P_{i,t}^{\text{ES,dis,max}} \\ -M\theta_{i,\text{dis}} \leq \rho \leq M\theta_{i,\text{dis}} \\ -M(1-\theta_{i,\text{dis}}) + P_{i,t}^{\text{ES,dis}} \leq \rho \leq M(1-\theta_{i,\text{dis}}) + P_{i,t}^{\text{ES,dis}} \\ -M(1-\theta_{i,\text{dis}}) + P_{i,t}^{\text{ES,dis}} \leq \rho \leq M(1-\theta_{i,\text{dis}}) + P_{i,t}^{\text{ES,dis}} \\ \theta_{i,\text{ch}} + \theta_{i,\text{dis}} \leq 1 \\ S_i(0) = S_i(T) \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\delta = P_{i,t}^{\text{ES,ch}} \theta_{i,\text{ch}}$; $\rho = P_{i,t}^{\text{ES,dis}} \theta_{i,\text{dis}}$; M 为引入的大数值常数。

2) 采用 McCormick 包络对热网约束模型中的非线性项进行转换, 在约束式(8)中, 存在质量流量与节点温度的乘积构成的双线性项, 导致约束为非线性约束, 此处非线性约束的转换可使用 McCormick 包络, 其是一种经典的凸松弛方法, 具体原理及过程详见参考文献[21]。引入辅助变量 $H_{ij,t}$, 令 $H_{ij,t} = m_{ij,t} T_{ij,t}$, 对于含双线性项的非线性约束, McCormick 包络是一种经典的凸松弛方法, 其 McCormick 包络可以表示为

$$\text{Mc}(H_{ij,t} = m_{ij,t} T_{ij,t}) \triangleq \begin{cases} H_{ij,t} \geq \underline{m}_{ij,t} \cdot T_{ij,t} + m_{ij,t} \cdot \bar{T}_{ij,t} - \underline{m}_{ij,t} \cdot \bar{T}_{ij,t} \\ H_{ij,t} \geq \bar{m}_{ij,t} \cdot T_{ij,t} + m_{ij,t} \cdot \bar{T}_{ij,t} - \bar{m}_{ij,t} \cdot \bar{T}_{ij,t} \\ H_{ij,t} \leq \bar{m}_{ij,t} \cdot T_{ij,t} + m_{ij,t} \cdot \underline{T}_{ij,t} - \bar{m}_{ij,t} \cdot \underline{T}_{ij,t} \\ H_{ij,t} \leq \underline{m}_{ij,t} \cdot T_{ij,t} + m_{ij,t} \cdot \underline{T}_{ij,t} - \underline{m}_{ij,t} \cdot \underline{T}_{ij,t} \end{cases} \quad (25)$$

式中: Mc 表示非线性约束的 McCormick 包络; $\bar{m}_{ij,t}$ 、 $\underline{m}_{ij,t}$ 分别表示管道 ij 流量的上限值和下限值; $\bar{T}_{ij,t}$ 、 $\underline{T}_{ij,t}$ 分别表示管道 ij 温度的上限值和下限值。

其次, 针对目标函数中的期望函数, 采用强对偶理论对最坏场景期望的目标函数 $\inf_{\bar{P} \in F} E_{\bar{P}}[W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t})$,

$\xi_{i,t}$)进行变换,如式(26)所示。

$$\inf_{P \in F} E_{\hat{P}} [W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t})] = \sup_{\sigma \geq 0} \left\{ \frac{1}{N} \left(\sum_{n=1}^N \inf \left(W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t}) - \sigma \left\| \xi_{i,t} - \hat{\xi}_{i,t} \right\| \right) \right) + \sigma \varepsilon \right\} \quad (26)$$

式中: σ 为对偶变量; ε 为球体半径。

随后,该模型是 sup-inf 问题,难以直接求解,此处引入辅助变量 $\beta_m (\forall m=1,2,\dots,M)$,式(23)可以进一步转化为

$$\begin{aligned} & \sup_{\mathbf{x} \in X, \sigma \geq 0} \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \beta_m + \sigma \varepsilon \right) \\ & \text{s.t. } \inf \left(W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t}) - \sigma \left\| \xi_{i,t} - \hat{\xi}_{i,t} \right\| \right) \geq \beta_m \quad (27) \\ & \mathbf{Zy}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t}) \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t}) \quad \forall \xi_{i,t} \in \Xi \end{aligned}$$

根据文献[20]可知,如果 $W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t})$ 是关于 $\xi_{i,t}$ 的凸函数,则 $\inf \left(W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t}) - \sigma \left\| \xi_{i,t} - \hat{\xi}_{i,t} \right\| \right)$ 的最优解在 $\xi_{i,t}$ 的上下界 $(\bar{\xi}_{i,t}, \underline{\xi}_{i,t})$ 或在 $\hat{\xi}_{i,t} \in \Xi$ 上获得。此外, $\mathbf{y}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t})$ 和 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t})$ 也分别与 $\xi_{i,t}$ 具有线性关系,在支撑集 Ξ 下, $\inf(\mathbf{y}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t}) - \mathbf{g}(\mathbf{x}_{i,t}, \xi_{i,t}))$ 也必然在 $\xi_{i,t}$ 的上下界,式(27)为受预测误差影响的社会福利值对应的约束条件。

最后,式(26)可以转化为式(28)易于求解的形式。

$$\begin{cases} \max_{\mathbf{x} \in X, \sigma \geq 0} \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \beta_m + \sigma \varepsilon \right) \\ \text{s.t. } W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \bar{\xi}_{i,t}) - \sigma \left\| \bar{\xi}_{i,t} - \hat{\xi}_{i,t} \right\| \geq \beta_m \\ W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \underline{\xi}_{i,t}) - \sigma \left\| \underline{\xi}_{i,t} - \hat{\xi}_{i,t} \right\| \geq \beta_m \\ W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \hat{\xi}_{i,t}) \geq \beta_m \\ \sigma \geq 0 \\ \mathbf{Zy}(\mathbf{x}_{i,t}, \bar{\xi}_{i,t}) \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}_{i,t}, \bar{\xi}_{i,t}) \\ \mathbf{Zy}(\mathbf{x}_{i,t}, \underline{\xi}_{i,t}) \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}_{i,t}, \underline{\xi}_{i,t}) \end{cases} \quad (28)$$

由此可见,经过一系列转化,分布鲁棒模型为常见的混合整数线性规划问题,最终可以转化为

$$\begin{cases} \max_{\mathbf{x} \in X, \sigma \geq 0} \left(\mathbf{c}^T \mathbf{x} + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \beta_m + \sigma \varepsilon \right) \\ \text{s.t. } W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \bar{\xi}_{i,t}) - \sigma \left\| \bar{\xi}_{i,t} - \hat{\xi}_{i,t} \right\| \geq \beta_m \\ W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \underline{\xi}_{i,t}) - \sigma \left\| \underline{\xi}_{i,t} - \hat{\xi}_{i,t} \right\| \geq \beta_m \\ W_i^{\text{pros}}(\mathbf{x}_{i,t}, \hat{\xi}_{i,t}) \geq \beta_m \\ \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \\ \sigma \geq 0 \\ \mathbf{Zy}(\mathbf{x}_{i,t}, \bar{\xi}_{i,t}) \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}_{i,t}, \bar{\xi}_{i,t}) \\ \mathbf{Zy}(\mathbf{x}_{i,t}, \underline{\xi}_{i,t}) \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}_{i,t}, \underline{\xi}_{i,t}) \end{cases} \quad (29)$$

式中: $\mathbf{c}^T \mathbf{x}$ 为不受预测误差影响的社会福利值; \mathbf{A} 和 \mathbf{Z} 都为常数矩阵; \mathbf{b} 表示参数向量。

4 模型的求解策略

产消者协同优化时,各主体内部重要信息无法全部共享,若采用集中式算法不仅难以描述各主体间的能量交互过程,还会存在隐私泄露的风险。本文采用 ADMM 分布式算法,通过迭代获取最优能量交互值及产消者间的交易价格。采用 ADMM 分布式优化算法的具体流程如图 3 所示。

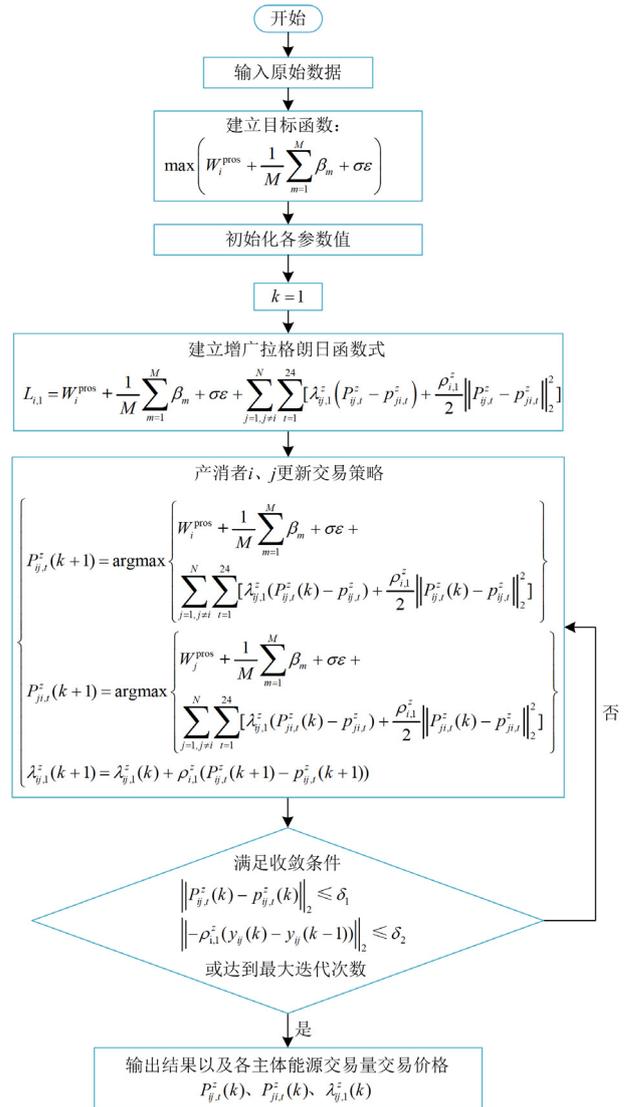


图 3 ADMM 算法的模型求解流程图

Fig. 3 ADMM algorithm model solving flow chart

本文模型求解的目标函数为在考虑源荷的不确定性条件下系统的社会福利最大化,即

$$\max \left(W_i^{\text{pros}} + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \beta_m + \sigma \varepsilon \right) \quad (30)$$

其中, 由于产消者间相互进行能源交易时, 交易量互为相反数, 有

$$\begin{cases} P_{ij}^z + P_{ji}^z = 0 \\ \sum_{i,j=1, i \neq j}^N W_{ij} = 0 \\ y_{ij}^z + y_{ji}^z = 0 \\ y_{ij}^z = P_{ij}^z \end{cases} \quad (31)$$

式中: z 代表能源的种类, 其中包括电能和热能; P_{ij}^z 、 P_{ji}^z 分别为产消者 i 与产消者 j 、产消者 j 与产消者 i 之间交易的能量。

为了实现去中心化市场清算算法^[22], 引入辅助变量进行重新表述, p_{ij}^z 、 p_{ji}^z 、 y_{ij}^z 为辅助变量。

5 算例验证

5.1 测试系统参数

本文以 100 个产消者组成的园区产消者联盟作为测试对象, 验证所提方法的有效性和优越性。产消者源荷预测数据、样本数及其他相关参数选自参考文献[16, 23-25]。储能系统各参数参照文献[26]。购售电、热参数参照文献[27-28]。热网模型数据参考文献[19], 每个产消者源荷数据如图 4 所示。

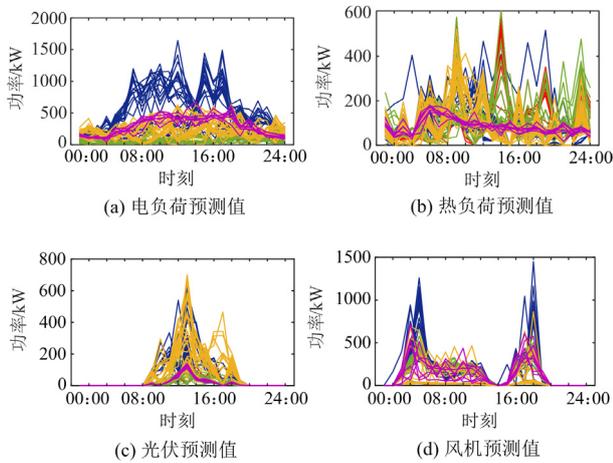


图 4 100 个产消者源荷预测值

Fig. 4 100 predicted source loads of prosumers

产消者与上级电网交易的电价采取分时电价, 其中售电价在谷时段(23:00—07:00)为 0.4 元/kWh, 在平时段(08:00—11:00, 15:00—18:00)为 0.75 元/kWh, 在峰时段(12:00—14:00, 19:00—22:00)为 1.2 元/kWh, 购电价格全天为 0.3 元/kWh, 售热价格全天为 0.5 元/kWh, 购热价格全天为 0.25 元/kWh, 售气价格全天为 3.5 元/m³, 环境效益相关参数

$\bar{\eta} = 0.5895$ MWh, $\mu = 50$ 元/t, $\alpha = 5.78\%$ 。

5.2 算例分析

5.2.1 热力管网动态特性对能源共享影响分析

为了分析热能传输的热延迟和热损耗特性对 P2P 交易的影响, 本文设置了两个场景进行了对比分析。场景一: 产消者进行 P2P 交易时, 不考虑热能传输的延迟和损耗; 场景二: 产消者进行 P2P 交易时, 考虑热能传输的延迟和损耗。表 1 为两种场景下产消者的总经济、总环境效益和总社会福利值比较。

表 1 不同场景下的社会福利

产消者类型	场景一	场景二	提升值
总经济效益/元	-249 160	-240 734	3.4%
总环境效益/元	96 162	99 899	3.9%
总社会福利/元	-152 998	-140 835	7.9%

由表 1 可知, 场景二较场景一的经济效益提升了 3.4%, 环境效益提升了 3.9%, 社会福利提升了 7.9%。这是因为在 P2P 交易传输的过程中, 损耗的热能一部分储存在热力管道中, 传输延迟相当于热网自身的储热能力, 因此在热负荷需求较大时可以适当弥补热负荷的需求, 从而可以降低微型燃气轮机的出力, 从而提升社会福利值。此处以社会福利提升较多的第五类产消者为例进行分析, 表 2 为场景一、场景二下第五类各产消者社会福利值。

表 2 第五类产消者社会福利比较

产消者	场景一社会福利/元	场景二社会福利/元	提升值/%
16	-1148	-1050	8.5
26	-1104	-992	10.2
27	-1223	-1079	11.8
29	-1078	-977	9.4
31	-1349	-1174	13
34	-1141	-1006	11.8
35	-1149	-1014	11.7

由表 2 可知, 对于第五类中的各个产消者来说, 场景二中的社会福利值较场景一都有明显的提升, 而且第五类产消者社会福利值提升值较其他产消者较为明显, 这是因为第五类产消者 P2P 交易热量较多, 更加突出了在热网中考虑热延迟和热损耗的必要性, 第五类产消者也是受到热网动态特性影响最大的一类产消者, 表明了考虑热网热延迟和热损耗能够提升社会福利值。图 5、图 6 分别为两种场景下产消者之间 P2P 热能交易图。

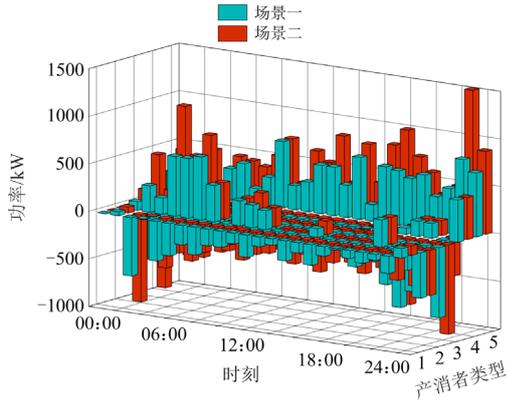


图 5 不同场景下的 P2P 交易热功率

Fig. 5 P2P transaction heat power in different scenarios

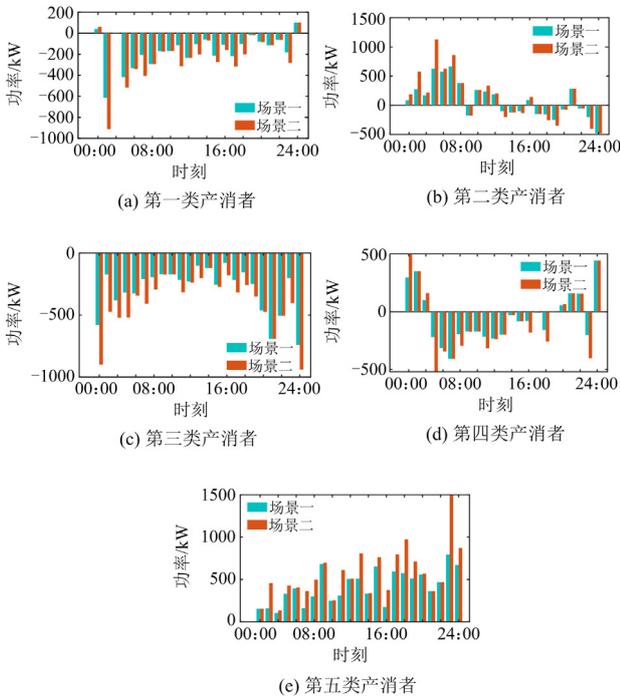


图 6 各类产消者 P2P 交易热功率

Fig. 6 P2P transaction heat power of various prosumers

由图 6 可知,在大多数时段,场景二比场景一的 P2P 交易量有所提升,表明考虑热力管道的热动态特性能够有效提升产消者 P2P 交易热量。这是因为考虑热能的热延迟和热损耗特性后,在 P2P 交易时,在前一个调度时段由于传输延迟,在供热管网中的热能可以弥补下一个时段热负荷的需求。当热负荷需求不高时,P2P 交易的多余热能可以通过热力管道进行热能的存储,动态模型具有虚拟储能特性,可以延迟传输,同时减少热能的损耗,因此当遇到热负荷需求较高的情况时,可以满足热负荷的

需求,促进 P2P 交易,实现对热能的跨时段转移,从而有效提高产消者的社会福利。

5.2.2 核仁聚类估计法的有效性验证

为了验证所提核仁聚类估计法的有效性和优越性,本文与经典核仁法进行了对比分析。其中,方法一:经典核仁法;方法二:本文所提改进核仁法。表 3 为两种方法下的核仁分配结果及计算时间。

表 3 不同场景下的核仁

产消者	方法	第一类	第二类	第三类	第四类	第五类
核仁	一	21 946	25 028	31 322	13 628	12 550
分配/元	二	21 940	25 074	31 342	13 581	12 537
计算	一	1789	2147	2684	1163	1163
时间/s	二	175	210	263	113	115

由表 3 可知,方法一与方法二对于核仁的分配结果基本相同,说明所提方法与经典核仁法具有相近的收益分配公平性,而在计算时间方面,所提方法的计算时间要明显优于经典核仁法,可极大地降低核仁计算时间。其中,第五类产消者群体中每个产消者的收益如表 4 所示。

表 4 第五类产消者收益分配

Table 4 The fifth type of income distribution

产消者	方法一收益分配	方法二收益分配
16	1798	1791
26	1793	1791
27	1797	1791
29	1777	1791
31	1801	1791
34	1790	1791
35	1794	1791

由表 4 可知,对于第五类产消者的具体分配结果,方法一采用了精确分配,方法二采用平均分配,方法二分配的结果与方法一基本相同,因为第五类产消者中边际贡献度相同的产消者趋向于分配到相同的收益,所以同为第五类产消者,产消者分配得到的收益基本相同。

此外,为了研究产消者聚类数量对所提改进核仁法的影响,本文分别计算了聚类数量为 5、8 和 10 时产消者联盟的社会福利值。表 5 为对 100 个产消者进行不同数目聚类时其社会福利及计算时间对比。

表 5 不同聚类数目比较

产消者数目(聚类数目)	100(5)	100(8)	100(10)	100(20)
社会福利/元	-140 835	-140 933	-140 962	-140 971
计算时间/s	877	8312	19020	31113

由表 5 可知, 随着聚类数目的不断增多, 其计算时间也呈指数增长^[29], 且其社会福利值在不同聚类数目下相差不大, 所以选取合适的聚类数目能大大降低计算难度, 减少计算时间。

最后, 为了验证所提方法的可扩展性, 本文比较了两种方法在产消者数量为 40、80、120、160 和 200 的计算时间。图 7 为不同数目产消者计算时间对比图。

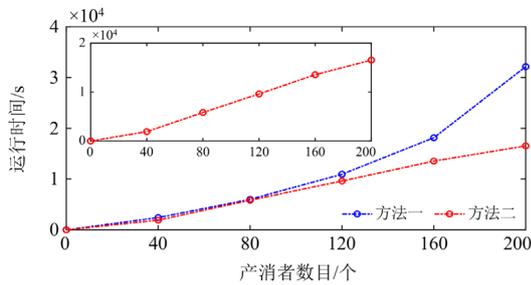


图 7 不同数目产消者计算时间

Fig. 7 Calculation time for different number of prosumers

由图 7 可知, 当采用方法一计算 P2P 交易及核仁时, 其运行时间随着产消者数目的增多呈指数增加^[29], 计算难度大。而采用方法二, 先对产消者数目进行聚类缩减, 再对其进行计算, 其计算时间与产消者数目近似呈线性关系, 随着产消者数目的增多, 两种方法差距越来越明显, 方法二大大减少了 P2P 交易和核仁的计算时间, 降低了计算难度。

5.2.3 所提方法的有效性验证

本节设置了两种场景, 以验证所提方法的有效性。场景一: 各类产消者只能与上级能源网络进行能量交互; 场景二: 产消者基于合作方式参与 P2P 能源交易。图 8 为各类产消者的经济效益对比图。

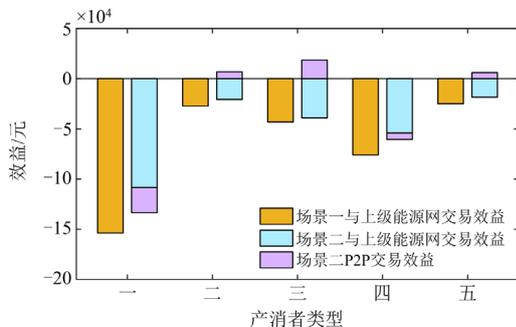


图 8 不同场景下的经济效益

Fig. 8 Economic benefits under different scenarios

由于产消者间电、热能交易价格小于向上级电、热网的购电、热价, 同时大于向上级电、热网的售电、热价, 所以如果 P2P 间交易的能量越多, 那么产消者与上级能源网交互的能量就越少, 这样产消者产生的经济效益就越多。

由图 8 可知, 由于场景一的产消者全额与上级能源网进行交互, 产消者与上级电网交互量大于场景二中的交互量, 而场景二中各产消者进行了 P2P 交易, 从而减少了与上级能源网的交互量, 所以场景一的经济效益较场景二的经济效益低。

图 9 为各类产消者在不同场景下的碳减排量及环境效益对比图。

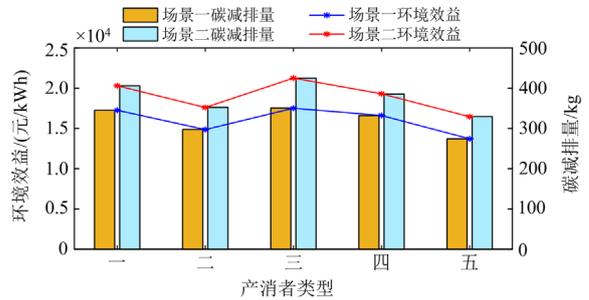


图 9 不同场景下的环境效益

Fig. 9 Environmental benefits under different scenarios

产消者的光伏及风机发电量主要由产消者的类型及自然条件决定。因为各类产消者不同场景下的电、热负荷需求是不变的, 其自发自用电量的源端与传输端碳减排量是相同的。其次产消者通过 P2P 交易的电量和热量可换算成相应的碳减排量。

由图 9 可知, 在场景一中, 其碳减排量和环境效益都是最低的, 这是因为产消者只能与上级能源网交互能量, 不参与 P2P 能量的交易。而场景二中各产消者参与 P2P 交易, 减少了与上级能源网的交互量, 减少了碳排放量, 从而提升了环境效益。

图 10 为不同场景下系统社会福利、经济效益和环境效益比较图。

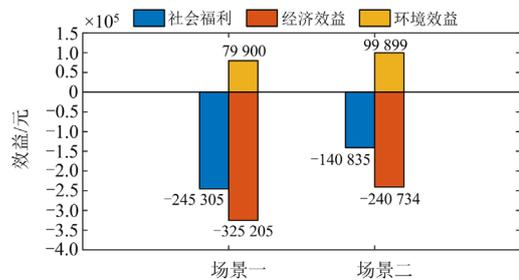


图 10 不同场景下的社会福利

Fig. 10 Social welfare under different scenarios

由图 10 可知,场景二的社会福利为 14 0835 元,比场景一提升了 43%,场景二的经济效益为 240 734 元,较场景一提升了 26%,场景二的环境效益为 99 899 元,比场景一提升了 25%。因此,参与 P2P 交易能够提升社会福利。此外,针对每个类别中产消者的社会福利值可以采用平均分配^[29]的原则,这是因为 100 个产消者中具有相似贡献度的产消者被分为一类,而本文考虑每个产消者获得的核仁回报取决于其对大联盟的贡献,意味着具有相似能量行为的产消者倾向于获得相似的回报。

图 11 为不同场景下产消者与上级电网及 P2P 交易的电量图。

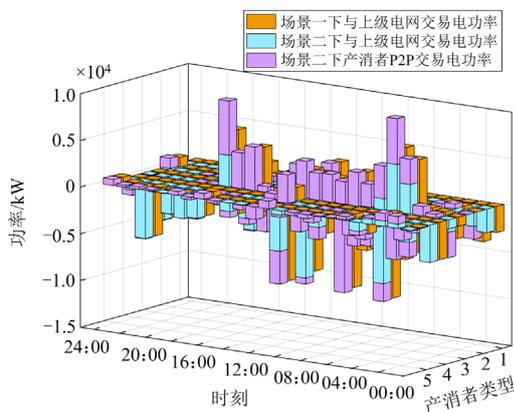
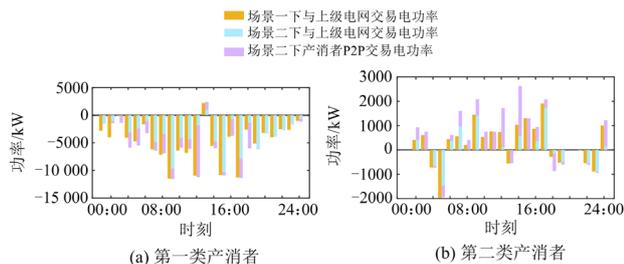


图 11 产消者交互电功率

Fig. 11 Prosumers interact electric power

由图 11 可知,在场景一下当五类产消者面临电能短缺问题时,只能与电网进行交易,而产消者频繁与电网进行交互,不仅增加了上级电网的调控压力,同时还增加了碳排放量,导致经济效益和环境效益都偏低。在 00:00—06:00、16:00—24:00 时段光伏出力较少,而在 06:00—16:00 时段内风机出力较少,且此时产消者之间无法进行 P2P 交易,需要通过上级电网实现功率平衡,因此在场景一下大部分时间段与上级电网的交易电量不为 0。场景二下各产消者进行 P2P 交易,从而减少与上级电网的交互量。下面对各类产消者进行具体分析。

图 12 为不同场景下各类产消者与上级电网及 P2P 交易的电量图。



(a) 第一类产消者

(b) 第二类产消者

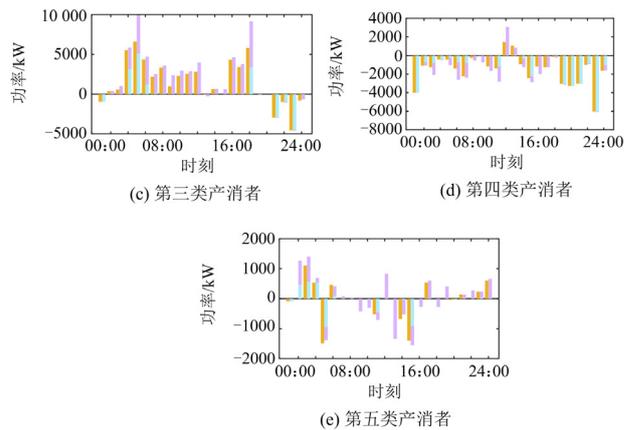


图 12 各类产消者交互电功率

Fig. 12 Various prosumers interact electric power with each other

由图 12 可知,在场景一下产消者只能与上级电网进行电能交易。在场景二中产消者与上级电网的交易量大幅降低,在 17:00 甚至降为 0,这是因为产消者采用合作联盟的方式进行 P2P 交易,从而减少与上级电网的交互量,大幅提升经济及环境效益。此外产消者在场景一下全额与电网进行交易,所以场景一下产消者 P2P 交易电量为 0。P2P 交易量与产消者类型存在一定的关系,例如在 06:00—08:00 时段,第二、三、五类产消者除了维持自身电负荷的需求外仍有多余的电能,此时可以供给由于电能短缺导致供能不足的第一、四类产消者。在 14:00—16:00 等时段,第一、四、五类产消者面临电能短缺的问题,此时可向电能充足的第二、三类产消者购买电能。为了保证社会福利的最大化,参与合作 P2P 交易的各类产消者会通过交易信息的共享和协商,通过提高购电价或者降低售电价的策略来提高电能 P2P 交易量,从而能够最大程度地实现分布式清洁能源的就地消纳。图 13 为各产消者在不同场景下与上级热网及 P2P 交易的热量图。

由图 13 可知,各类产消者在场景一下缺少的热量只能通过与热网进行热交互或提升设备的热出力来满足热负荷的需求,这不仅会增加热网和各类设备的调控压力,还增加了碳排放,从而降低了经济效益和环境效益。而在场景二下,各类产消者通过 P2P 进行热交易,降低了与热网交易的次数和热量。下面对各类产消者进行具体分析。

图 14 为各类产消者在不同场景下与上级热网及 P2P 交易的热量图。

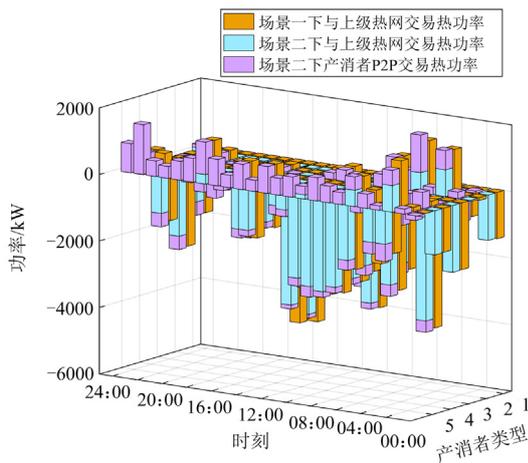


图 13 产消者交互热功率

Fig. 13 Prosumers interact heat power

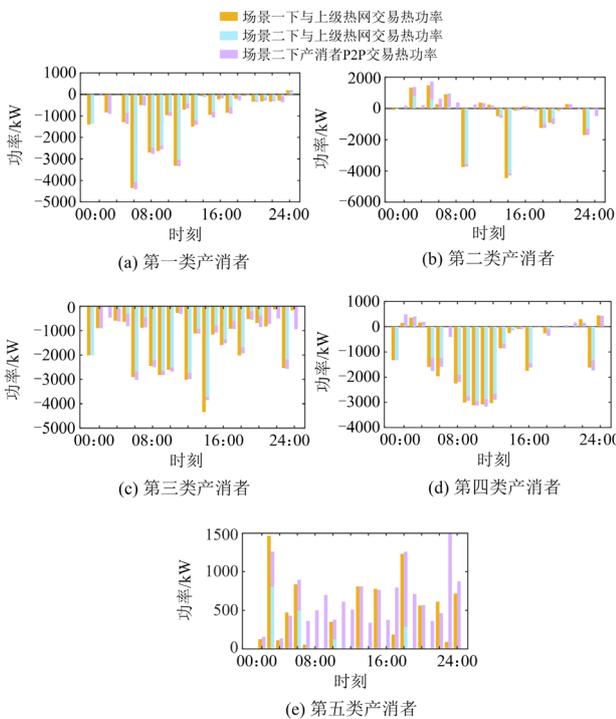


图 14 各类产消者交互热功率

Fig. 14 Various prosumers interact heat power with each other

由图 14 可知, 在场景一下产消者与热网进行全额热交易, 相较于场景一, 场景二产消者与上级热网的交易量减少, 对于第五类产消者来说, 热交易量减少幅度最为明显, 大多数时段甚至为 0, 表明越来越多的产消者愿意与其他产消者进行交易, 而不是与上级热网直接交易, 这是因为产消者通过合作联盟的方式实现了 P2P 热量的交易, 减少与上级热网的交易量, 从而提升了经济和环境效益。产消者在场景一下与热网进行全额交易, 所以产消者

P2P 交易热量为 0。在 01:00—24:00 时段, 第五类产消者除了满足自身热负荷的需求外仍有多余的热能, 此时其他四类产消者可以向第五类产消者购买热能。在 10:00—12:00 时段, 第一、三、四类产消者热能短缺, 此时可以向热能充足的第二、五类产消者购买热能, 从而减少向上级热网的购热量, 增加经济和环境效益。为了保证社会福利的最大化, 参与合作 P2P 交易的各类产消者通过交易信息的共享和协商, 采用提高购热价或者降低售热价的策略来提高热能 P2P 交易量。图 15 为各类产消者在场景二下的 P2P 交易电价图。

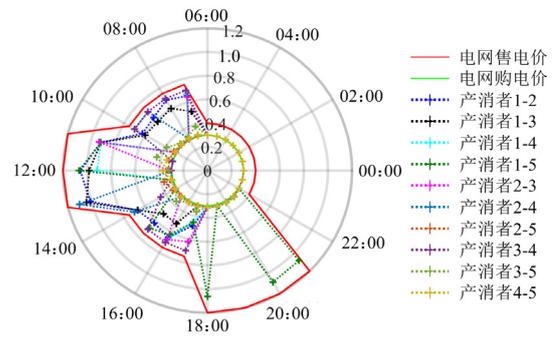


图 15 产消者 P2P 交互电价

Fig. 15 P2P interactive electricity price of prosumers

由图 15 可知, 为保证社会福利的最大化, 参与合作联盟的各产消者通过交易信息的协商和共享, 采用提高购电价或降低售电价的方法来促进 P2P 交易电量。产消者间电能交易价格小于向上级电网的购电价, 同时大于向上级电网的售电价, 从而提高了产消者参与 P2P 能源交易的积极性。其中产消者 1-2 表示第一类产消者和第二类产消者间交易的电价。图 16 为各类产消者在场景二下的 P2P 交易热价图。

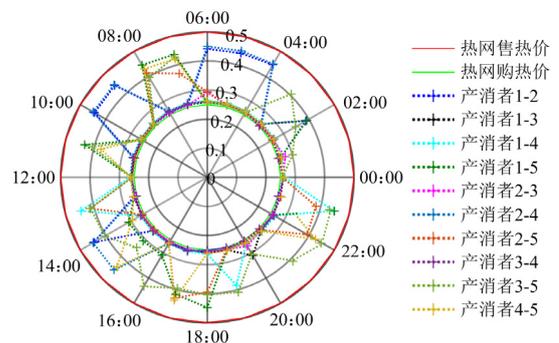


图 16 产消者 P2P 交易热价

Fig. 16 P2P interactive heat price of prosumers

由图 16 可知, 在 12:00—16:00 时段, 第五类产消者有多余的热能, 考虑到热延迟和热损耗的影

响，因为热延迟和热损耗都与管道的长度有关，产消者间的距离越远，产生的损耗越多，因此第五类产消者更愿意将多余的热能卖给离自己更近的第四类产消者，所以第四、五类产消者之间有较为明显的热能交易过程。产消者间热能交易价格小于向上级热网的购热价，同时大于向上级热网的售热价。

5.2.4 与其他不确定性方法的比较分析

图 17 对不同源荷预测误差样本下确定性优化与分布鲁棒优化的社会福利值进行了对比分析。

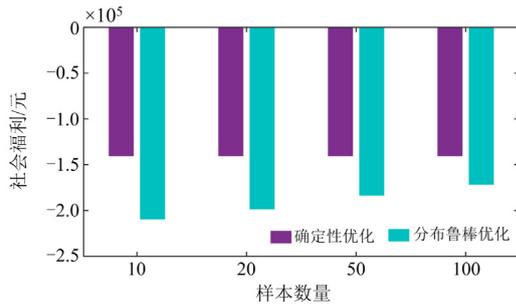


图 17 不同优化方法下的社会福利值

Fig. 17 Social welfare under different optimization methods

由图 17 可知，确定性优化由于未考虑源荷出力的预测误差，导致社会福利偏高，结果过于乐观，同时随着样本数目的增多其社会福利值不变，无法根据源荷预测误差的历史数据来反映社会福利值的波动情况；而分布鲁棒优化随着样本数目的增多，其社会福利值不断增大，越来越接近确定性优化的最高社会福利值，表明分布鲁棒优化具备反映预测误差的特性，能较好地弥补确定性优化的缺点。

此外，本文将分布鲁棒优化与经典鲁棒法^[30]、随机优化法^[31]进行对比分析，其中，置信度设置为 95%。图 18 为不同方法下社会福利值的比较图。

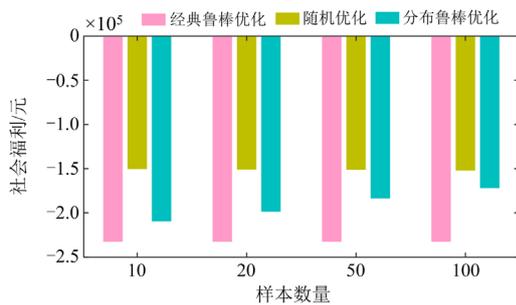


图 18 不确定性方法比较分析

Fig. 18 Comparative analysis of uncertainty method

由图 18 可知，分布鲁棒优化法计算的社会福利值处于随机优化法与经典鲁棒优化法之间^[32]，随机优化方法计算得到的社会福利值最高，经典鲁棒方法计算得到的社会福利值最低。其主要原因在于：

经典鲁棒优化模型没有考虑源荷不确定性变量的分布信息，从而导致其计算结果过于保守，社会福利值低；随机优化充分考虑源荷不确定性变量的分布信息，高估了真实的预期社会福利，所以保守性低，社会福利值高；本文采用的分布鲁棒优化方法，通过最坏场景分布下的运行结果，使得其计算结果在经典鲁棒和随机优化之间。此外，随着样本数目的不断增多，分布鲁棒优化方法的计算结果逐渐接近于随机优化方法，这是因为 Wasserstein 模糊集可以通过调整其半径来控制保守性，其半径又与样本数量有关，样本数量越多，半径越小，模糊集收敛于真实分布，模型保守性能降低，从而导致社会福利值提高。

6 结论

随着越来越多的传统能源用户转变为产消者，且愿意采用合作形式参与 P2P 能源交易，本文针对海量异构产消者之间大规模的能源共享及其能量管理问题，提出了一种基于核仁聚类估计和数据驱动分布鲁棒优化的海量异构产消者联盟能量管理策略。主要得出以下结论：

1) 产消者以社会福利最大化为目标建立合作联盟参与 P2P 电、热能源交易，并考虑热力管道的热延迟和热损耗，可获得比独立运行时更多的收益，表明参与合作联盟是多能产消者参与能源市场交易的可行模式。

2) 随着越来越多的产消者愿意加入到大联盟中，本文建立了能源市场环境下基于边际贡献高斯混合聚类的海量异构产消者联盟能量管理模型。该模型解决了由于产消者数目不断增多导致大联盟的能源管理模型求解困难的问题，同时该模型具有较高的核仁精度，且大大减少了计算时间。

3) 当源荷出力存在预测误差时，本文建立了基于 Wasserstein 模糊集的分布鲁棒优化源荷不确定性模型。该模型充分考虑了源荷预测误差的随机性，且该方法具有鲁棒性强以及数据驱动的特点。通过对该模型的求解，可在考虑源荷出力不确定性的基础上保障系统的社会福利最优。

关于将产消者分类后具体每个产消者的收益分配方案，在未来可进一步研究，探索更加公平合理的收益分配方法，促进产消者的合作运行。

参考文献

[1] 崔杨, 沈卓, 王铮, 等. 考虑绿证-碳排等价交互机制的区域综合能源系统绿色调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4508-4517.

- CUI Yang, SHEN Zhuo, WANG Zheng, et al. Green dispatch of regional integrated energy system considering green certificate-carbon emission equivalent interaction mechanism[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(12): 4508-4517.
- [2] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(4): 801-813.
- [3] 高红均, 张凡, 刘俊勇, 等. 考虑多产消者差异化特征的社区产消者系统 P2P 交易机制设计[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(4): 1455-1470.
- GAO Hongjun, ZHANG Fan, LIU Junyong, et al. Design of P2P transaction mechanism considering differentiation characteristics of multiple prosumers in community microgrid system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(4): 1455-1470.
- [4] WANG Z, CHEN B, WANG J, et al. Coordinated energy management of networked microgrids in distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(1): 45-53.
- [5] NIKMEHR N, NAJAF-RAVADANEGH S, KHODAEI A. Probabilistic optimal scheduling of networked microgrids considering time-based demand response programs under uncertainty[J]. *Applied Energy*, 2017, 198: 267-279.
- [6] MA W, WANG J, GUPTA V, et al. Distributed energy management for networked microgrids using online ADMM with regret[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 9(2): 847-856.
- [7] WANG Y, NGUYEN T L, XU Y, et al. Peer-to-peer control for networked microgrids: multi-layer and multi-agent architecture design[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(6): 4688-4699.
- [8] KAMAL F, CHOWDHURY B. Model predictive control and optimization of networked microgrids[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy System*, 2022, 138.
- [9] LI H, REN Z, TRIVEDI A, et al. A noncooperative game-based approach for microgrid planning considering existing interconnected and clustered microgrids on an island[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(4): 2064-2078.
- [10] LIU W, GU W, WANG J, et al. Game theoretic non-cooperative distributed coordination control for multi-microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 6986-6997.
- [11] LIU Y, CHENG G, ZHU J. Multi-objective non-cooperative game optimization for microgrid clusters based on NSGA-II coordinated interior-point method[C] // 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), July 26-29, 2021, Washington, DC, USA: 1-5.
- [12] MOVAHEDNIA, MOHADESE. A cooperative game approach for energy management of interconnected microgrids[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 239.
- [13] MEI J, CHEN C, WANG J, et al. Coalitional game theory based local power exchange algorithm for networked microgrids[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 133-141.
- [14] LIU X, GAO B, ZHU Z, et al. Non-cooperative and cooperative optimization of battery energy storage system for energy management in multi-microgrid[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2018, 12(10): 2369-2377.
- [15] 郝婷, 樊小朝, 王维庆, 等. 阶梯式碳交易下考虑源荷不确定性的储能优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(1): 101-112.
- HAO Ting, FAN Xiaochao, WANG Weiqing, et al. Optimal configuration of energy storage considering the source-load uncertainty under ladder-type carbon trading[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(1): 101-112.
- [16] ZHANG Xihai, GE Shaoyun, ZHOU Yue, et al. Distributionally robust optimization for peer-to-peer energy trading considering data-driven ambiguity sets[J]. *Applied Energy*, 2023, 331.
- [17] 史喆, 梁毅, 李华, 等. 计及灵活性多目标电-热-交通综合能源系统区间优化运行[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(21): 33-42.
- SHI Zhe, LIANG Yi, LI Hua, et al. Interval optimal operation of a multi-objective electric-thermal-transportation integrated energy system considering flexibility[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(21): 33-42.
- [18] 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.
- LI Na, WANG Wei, YANG Jiahui, et al. Optimal operation strategy of regional comprehensive energy service providers based on a demand-side game[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(2): 112-120.
- [19] 李晓露, 单福州, 宋燕敏, 等. 考虑热网约束和碳交易的多区域综合能源系统优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(19): 52-59, 131.
- LI Xiaolu, SHAN Fuzhou, SONG Yanmin, et al. Optimal dispatch of multi-region integrated energy systems considering heating network constraints and carbon trading[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(19): 52-59, 131.
- [20] 赵会茹, 王学杰, 李兵抗, 等. 考虑能量共享的多社区光储系统分布鲁棒优化调度[J]. *电力系统自动化*,

- 2022, 46(9): 21-31.
- ZHAO Huiru, WANG Xuejie, LI Bingkan, et al. Distributionally robust optimal dispatch for multi-community photovoltaic and energy storage system considering energy sharing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 21-31.
- [21] 杨畅, 李正烁. 计及可变流量调节模式的电热综合能源系统条件分布鲁棒优化调度[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14[2023-04-25]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230048>.
- YANG Chang, LI Zhengshuo. Conditional Blu rod optimization scheduling for electric heating integrated energy system with variable flow regulation mode[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14[2023-04-25]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230048>.
- [22] SUN Qinghan, ZHAO Tian, CHEN Qun, et al. Decentralized dispatch of distributed multi-energy systems with comprehensive regulation of heat transport in district heating networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(1): 97-110.
- [23] 胡健, 于娣, 张晓杰. 电力P2P交易中计及社会福利的产消者合作联盟[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12[2023-04-27]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222319>.
- HU Jian, YU Di, ZHANG Xiaojie. Cooperative alliance of producers and consumers with social welfare in power P2P transaction[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-12 [2023-04-27]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222319>.
- [24] FENG Changsen, WEN Fushuan, YOU Shi, et al. Coalitional game-based transactive energy management in local energy communities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1729-1740.
- [25] CHEN Tianyi, BU Shengrong, LIU Xue, et al. Peer-to-peer energy trading and energy conversion in interconnected multi-energy microgrids using multi-agent deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 715-727.
- [26] 姚文亮, 王成福, 赵雨菲, 等. 不确定性环境下基于合作博弈的综合能源系统分布式优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 43-53.
- YAO Wenliang, WANG Chengfu, ZHAO Yufei, et al. Distributed optimization of integrated energy system based on cooperative game in uncertain environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 43-53.
- [27] 崔明勇, 宣名阳, 卢志刚, 等. 基于合作博弈的多综合能源服务商运行优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3548-3564.
- CUI Mingyong, XUAN Mingyang, LU Zhigang, et al. Operation optimization strategy of multi integrated energy service companies based on cooperative game theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3548-3564.
- [28] 顾欣, 王琦, 胡云龙, 等. 基于纳什议价的多产消者综合能源系统分布式低碳优化运行策略[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1464-1482.
- GU Xin, WANG Qi, HU Yunlong, et al. Distributed low-carbon optimal operation strategy of multi-microgrids integrated energy system based on nash bargaining[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1464-1482.
- [29] HAN Liyang, MORSTYN T, MCCULLOCH M D, et al. Scaling up cooperative game theory-based energy management using prosumer clustering[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 289-300.
- [30] 杜锡力, 李笑竹, 陈来军, 等. 面向多场景调节需求的集中式共享储能鲁棒优化配置[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 5911-5921.
- DU Xili, LI Xiaozhu, CHEN Laijun, et al. Robust and optimized configuration of centralized shared energy storage for multi-scenario regulation demand[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5911-5921.
- [31] 高玉, 王琦, 陈严, 等. 考虑需求响应和能量梯级利用的含氢综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 51-59.
- GAO Yu, WANG Qi, CHEN Yan, et al. Optimal dispatch of integrated energy system with hydrogen considering demand response and cascade energy utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 51-59.
- [32] LI Jiayong, KHODAYAR M E, WANG Jianhui. Data-driven distributionally robust co-optimization of P2P energy trading and network operation for interconnected microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5172-5184.

收稿日期: 2023-09-28; 修回日期: 2023-12-05

作者简介:

张智泉(1984—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为综合能源系统市场化运行; E-mail: zzhiquan@126.com

陈晓杰(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为博弈格局下综合能源微网群的优化运行方法; E-mail: cchenxiaojie0915@163.com

符杨(1968—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要从事电力系统分析、风力发电并网技术研究和海上风电优化设计研究。E-mail: mfudong@126.com

(编辑 许威)