



上海交通大学学报  
Journal of Shanghai Jiaotong University  
ISSN 1006-2467, CN 31-1466/U

## 《上海交通大学学报》网络首发论文

题目： 基于碳排放流模型的分布式产消者 P2P 电-碳交易机制  
作者： 詹博淳，冯昌森，王晓晖，张恒，马军伟，文福拴  
DOI： 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.139  
收稿日期： 2023-04-17  
网络首发日期： 2023-07-27  
引用格式： 詹博淳，冯昌森，王晓晖，张恒，马军伟，文福拴. 基于碳排放流模型的分布式产消者 P2P 电-碳交易机制[J/OL]. 上海交通大学学报.  
<https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.139>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于碳排放流模型的分布式产消者 P2P 电-碳交易机制

詹博淳<sup>1</sup>, 冯昌森<sup>2</sup>, 王晓晖<sup>3</sup>, 张恒<sup>3</sup>, 马军伟<sup>4</sup>, 文福拴<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027; 2. 浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023;  
3. 国网经研院有限公司, 北京 102200; 4. 国网山西省电力有限公司信息通信公司, 太原  
030001)

**摘要:** 在针对配电系统层面设计分布式交易机制时, 需要考虑产消者间的双边碳交易。本文提出一种考虑电能交易碳足迹的 P2P 电-碳交易机制。首先, 分析了储能装置的碳排放特性, 建立了考虑储能装置的碳排放流(Carbon Emission Flow, CEF)模型。接着, 建立了基于碳排放流模型的产消者 P2P 电-碳交易模型, 基于 Benders 分解法将原问题分解为网络约束主问题和产消者优化调度松弛子问题, 采用分布式求解方法确定产消者最优 P2P 电-碳交易量, 以保护产消者隐私。然后, 建立了基于纳什议价模型的产消者 P2P 电-碳交易结算模型, 依据产消者在电-碳交易中的贡献度分配合作收益。最后, 以改进的 IEEE 33 节点配电系统为例对所提交易模型进行验证, 仿真结果表明所提机制可在保证配电网安全运行的前提下, 有效促进需求侧碳减排, 并公平地分配产消者合作收益。

**关键词:** 碳排放流; 电能交易; 碳排放权交易; Benders 分解; 纳什议价

**中图分类号:** TM 73;F 426.61

**文献标志码:** A DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.139

## A P2P Electricity-Carbon Trading Mechanism for Distributed Prosumers Based on Carbon Emission Flow Model

Zhan Bochun<sup>1</sup>, Feng Changsen<sup>2</sup>, Wang Xiaohui<sup>3</sup>, Zhang Heng<sup>3</sup>, Ma Junwei<sup>4</sup>, Wen Fushuan<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. College

收稿日期: 2023-04-17 修回日期: 2023-07-13 录用日期: 2023-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1910216), 国家电网有限公司科技项目资助(SGSXXT00JFJS2250157)

作者简介: 詹博淳(1999-), 硕士生, 从事电力市场、区块链技术在电力系统中的应用研究。

通信作者: 文福拴, 教授, 博士生导师, E-mail: wenfs@hotmail.com。

of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 3.

State Grid Economic and Technical Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China; 4.

Information and Telecommunication Company, State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd.,

Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** It is necessary to consider the carbon emission trading between prosumers when designing a distributed transaction mechanism in a distribution system. In this paper, a P2P electricity-carbon transaction mechanism with the carbon footprint of electricity trading taken into account is established. First, the carbon emission characteristic of energy storage system is analyzed, and a carbon emission flow model considering energy storage system is established. Next, a P2P electricity-carbon transaction model based on the carbon emission flow model is established. Based on the improved Benders decomposition method, the original problem is decomposed into the main problem considering network constraints and the subproblem of optimal scheduling for prosumers. Through the interactive iteration of variables, the optimal P2P electricity-carbon trading amount of prosumers is solved to protect the privacy of prosumers. Then, a P2P electricity-carbon trading settlement model based on the Nash bargaining model is established, and the cooperation benefit is distributed according to the contribution of prosumers in the electricity-carbon transaction. Finally, the effectiveness of the proposed model is demonstrated by case studies on the improved IEEE 33-bus distribution system. The proposed model can not only ensure the secure operation of the distribution system, but also promote the reduction of demand-side carbon emission and fairly distribute the benefit among cooperative prosumers.

**Key words:** carbon emission flow; electricity trading; carbon emission trading; Benders decomposition; Nash bargaining

国家能源局发布《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》<sup>[1]</sup>, 要求推进分布式能源就地消纳, 健全能源产业链碳足迹核算标准, 完善全产业链碳排放量化评估。因此, 在遵循市场规律和保障电力系统安全稳定运行的前提下, 有必要针对产消者分布式交易的特点建立一种公平、透明的碳足迹量化方法和电-碳交易机制, 以促进分布式能源就地消纳和需求侧碳减排<sup>[2-3]</sup>。

为协调电力市场中新兴的产消者, 近年来学术界已针对其分布式交易开展广泛研究。现有的分布式产消者 P2P 交易模型主要分为三类: 基于拍卖的交易模型、基于博弈的交易模型和基于一致性算法的交易模型。文献[4]建立了基于自适应进取性交易策略的连续双向拍卖机制。文献[5]建立了基于供需随机拆分的多段报价拍卖模型。上述基于拍卖的交易模型未考虑网络安全运行约束。文献[6]建立了基于最优反应学习算法的产消者非合作博弈竞价模型。文献[7]建立了考虑舒适度需求的住宅建筑间非合作博弈交易模型。上述基于博弈的交易模型对于实际大规模非线性的电能管理和交易问题, 其纳什均衡解不一定存在。文献[8]建立了基于次梯度算法的产消者双边合同交易模型; 文献[9]提出了基于边际电价和交替方向乘子法的 P2P 交易竞价一致性算法。基于一致性算法的交易模型有较高的求解效率和良好的收敛特性。本文建立了一种基于 Benders 分解法的 P2P 交易模型, 将集中优化问题分解为网络约束问题和产消者问题分布式优化求解, 以保护产消者隐私。

学术界已针对市场主体参与碳排放权市场的交易策略开展广泛研究。文献[10]建立了基于委托拍卖的发电公司碳配额分配和交易决策模型。文献[11]建立了同时考虑碳配额和碳税的发电主体交易决策模型。文献[12]考虑了风光发电的不确定性, 建立了基于信息间隙决策的发电主体碳交易决策模型。上述研究针对发电侧主体建立了碳排放量控制和交易策略, 并未考虑需求侧终端产消费外购电能的间接碳排放。然而电能需求是源侧碳排放的内在驱动因素, 已有学者针对需求侧的碳排放义务开展研究。文献[13]建立了与电力潮流对应的 CEF 模型, 量化了电力网络中碳排放量的分布。文献[14]建立了基于潮流追踪法的日前日内碳排

放流双向分配模型，引入网损分配系数追踪实时功率和碳流偏差。文献[15]建立了电-气-热综合能源系统的 CEF 模型，量化了与多类型能源流耦合的碳排流。上述研究重点分析了碳排放流的计算方法。进一步地，文献[16]针对终端用户参与电力市场和碳排放权市场，建立了基于 CEF 模型的主动需求响应两阶段优化模型。文献[17]建立了基于改进比例共享原理的需求侧碳足迹分配模型。文献[18]建立了基于 Aumann-Shapley 值的源荷双层调度模型，通过调整荷侧用电需求实现源荷两侧碳排放总量控制和经济效益最优。上述研究并未考虑需求侧终端产消者间双边碳交易。基于此，本文建立了考虑储能装置的 CEF 模型以量化产消者从上级电网购电的间接碳排放，进而建立了考虑碳排放成本的分布式产消者 P2P 电-碳交易优化模型。

## 1 考虑储能装置的 CEF 模型

基于 CEF 模型对分布式产消者电能交易进行碳足迹跟踪，量化分布式产消者从供电公司购买电能导致的间接碳排放。当储能装置闲置或放电时，可视其为发电设备，碳排放密度不变。当储能装置充电时，则可视其为吸收电能的负载。储能装置的碳排放密度为：

$$e_{i,\text{bess}}^{t+1} = \begin{cases} e_{i,\text{bess}}^t & P_{i,\text{c}}^t = 0 \\ \frac{e_{i,\text{bess}}^t E_{i,\text{bess}}^t + e_{i,\text{N}}^t P_{i,\text{c}}^t \Delta t}{E_{i,\text{bess}}^t + P_{i,\text{c}}^t \Delta t} & P_{i,\text{dc}}^t = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $e_{i,\text{bess}}^{t+1}$  和  $e_{i,\text{bess}}^t$  分别为时段  $t+1$  和时段  $t$  位于节点  $i$  的储能装置碳排放密度； $E_{i,\text{bess}}^t$  为时段  $t$  节点  $i$  储能装置的电量； $P_{i,\text{dc}}^t$  和  $P_{i,\text{c}}^t$  分别为时段  $t$  产消者  $i$  储能装置的放电功率和充电功率。

进而可得出考虑储能装置的节点  $i$  和支路  $b$  的碳排放密度为：

$$e_{i,\text{N}}^t = \frac{P_{i,\text{dg}}^t e_{i,\text{dg}} + P_{i,\text{dc}}^t e_{i,\text{bess}}^t + \sum_{b \in L_i^+} |P_b^t| e_{b,\text{B}}^t}{P_{i,\text{dg}}^t + P_{i,\text{rg}}^t + P_{i,\text{dc}}^t + \sum_{b \in L_i^+} |P_b^t|} \quad (2)$$

$$e_{b,\text{B}}^t = e_{i,\text{N}}^t, i = \Gamma_b \quad (3)$$

式中： $e_{i,\text{N}}^t$  和  $e_{b,\text{B}}^t$  分别为时段  $t$  节点  $i$  和线路  $b$  的碳排放密度； $e_{i,\text{dg}}$  为节点  $i$  化石能源发电机组的碳排放密度； $L_i^+$  为向节点  $i$  注入功率的线路集合； $P_{i,\text{rg}}^t$  和  $P_{i,\text{dg}}^t$  分别为时段  $t$  节点  $i$  的可再生能源设备和化石能源发电设备出力； $P_b^t$  为时段  $t$  线路  $b$  的有功功率； $\Gamma_b$  为向线路  $b$  注

入功率的节点集合。

当节点  $i$  为配电网络中的变电站节点时, 其碳排放密度为上级电网注入电能的碳排放密度; 当节点  $i$  为参与 P2P 交易的分布式产消者节点时, 其碳排放密度取决于配电网络的功率流和节点各设备出力; 线路  $b$  的碳排放密度等于向线路  $b$  注入功率的节点的碳排放密度<sup>[19-20]</sup>。

## 2 分布式产消者 P2P 电-碳交易机制

配电侧分布式产消者通过 P2P 电能交易和与供电公司交易满足电能需求, 通过 P2P 碳配额交易和碳排放权市场交易达到碳排放考核要求。P2P 电能交易和碳配额交易周期分别与电力现货市场交易周期和碳排放权市场交易周期相同。为研究需求侧碳排放考核对于产消者交易决策的影响, 本文将需求侧碳配额的分配考核周期  $T$  设定为 1 日, 碳排放权市场的交易周期  $T_c$  设定为 6h, 电力现货市场交易周期  $T_e$  设定为 1h。

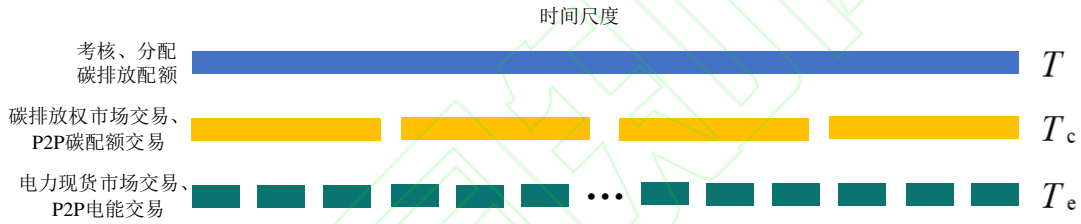


图 1 电力现货市场、碳排放权市场和 P2P 交易时间尺度

Fig. 1 Time scale of electricity spot market, carbon emission trading market and P2P trading

### 2.1 产消者 P2P 电-碳交易模型

产消者本质为合作关系, 通过 P2P 电能交易最大化消纳分布式可再生能源, 减少电能交易成本和对上级电网的依赖性, 在实现电能共享的同时也减少了间接碳排放量。产消者 P2P 电-碳交易目标为一个碳排放考核周期  $T$  内总成本最低:

$$\min C_{\text{total}} = \sum_{t \in T} \sum_{i \in A} \left[ \lambda_{\text{bg}}^t P_{i,\text{bg}}^t - \lambda_{\text{sg}}^t P_{i,\text{sg}}^t + c_{i,\text{rg}} P_{i,\text{rg}}^t + c_{i,\text{bess}} (P_{i,\text{dc}}^t + P_{i,\text{c}}^t) + \lambda_{\text{bc}}^t M_{i,\text{bc}}^t - \lambda_{\text{sc}}^t M_{i,\text{sc}}^t \right] \quad (4)$$

式中:  $C_{\text{total}}$  为产消者碳排放考核周期  $T$  内的总成本;  $A$  为参与 P2P 交易的产消者集合;  $\lambda_{\text{bg}}^t$  和  $\lambda_{\text{sg}}^t$  分别为时段  $t$  产消者向供电公司购电和售电的价格;  $P_{i,\text{bg}}^t$  和  $P_{i,\text{sg}}^t$  分别为时段  $t$  节点  $i$  处产消者向供电公司的购电功率和售电功率;  $c_{i,\text{rg}}$  和  $c_{i,\text{bess}}$  分别为节点  $i$  处产消者可再生能源发电设备和储能装置的成本系数;  $\lambda_{\text{bc}}^t$  和  $\lambda_{\text{sc}}^t$  分别为时段  $t$  碳排放权市场的碳配额购买价格和

出售价格； $M_{i,bc}^t$  和  $M_{i,sc}^t$  分别为时段  $t$  节点  $i$  处产消者在碳排放权市场的购碳数量和售碳数量。

约束条件包括：

(1) 产消者设备出力约束：

$$(1 - h_{rg}) P_{i,rg,max}^t \leq P_{i,rg}^t \leq P_{i,rg,max}^t \quad (5)$$

$$S_{i,bess}^t = S_{i,bess}^{t-1} + \left( \eta_{i,c} P_{i,c}^t - \frac{1}{\eta_{i,dc}} P_{i,dc}^t \right) \frac{\Delta t}{Q_{i,bess}} \quad (6)$$

$$S_{i,bess}^{\min} \leq S_{i,bess}^t \leq S_{i,bess}^{\max} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{i,c}^t \leq y_{i,bess}^t P_{i,c,max} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{i,dc}^t \leq (1 - y_{i,bess}^t) P_{i,dc,max} \quad (9)$$

式中： $P_{i,rg,max}^t$  为时段  $t$  节点  $i$  处产消者可再生能源设备预测最大发电功率； $h_{rg}$  为可再生能源发电的最大弃能率； $S_{i,bess}^t$  为时段  $t$  节点  $i$  处产消者电池储能装置的荷电状态； $S_{i,bess}^{\min}$  和  $S_{i,bess}^{\max}$  分别为其荷电状态的下限和上限； $\eta_{i,dc}$  和  $\eta_{i,c}$  分别为其放电效率和充电效率； $P_{i,dc}^t$  和  $P_{i,c}^t$  分别为其时段  $t$  的放电功率和充电功率； $P_{i,dc,max}$  和  $P_{i,c,max}$  分别为其最大放电功率和最大充电功率； $Q_{i,bess}$  为其额定容量； $y_{i,bess}^t$  为其时段  $t$  充放电状态的二元变量，充电和放电分别取 1 和 0。

(2) 功率平衡约束：

$$P_{i,rg}^t + P_{i,dc}^t - P_{i,c}^t - P_{i,L}^t = P_{i,sm}^t + P_{i,sg}^t - P_{i,bm}^t - P_{i,bg}^t \quad (10)$$

$$P_{i,sm}^t + P_{i,sg}^t \leq \zeta (1 - y_{i,e}^t) \quad (11)$$

$$P_{i,bm}^t + P_{i,bg}^t \leq \zeta y_{i,e}^t \quad (12)$$

$$P_{i,sm}^t, P_{i,sg}^t, P_{i,bm}^t, P_{i,bg}^t \geq 0 \quad (13)$$

$$\sum_{i \in A} P_{i,bg}^t = \kappa_{bg}^t \quad (14)$$

$$\sum_{i \in A} P_{i,sg}^t = \kappa_{sg}^t \quad (15)$$

$$\sum_{i \in A} P_{i,sm}^t = \sum_{i \in A} P_{i,bm}^t \quad (16)$$



式中：  $P_{i,L}^t$  为时段节点  $i$  处产消者的负荷；  $P_{i,bm}^t$  和  $P_{i,sm}^t$  分别为其时段  $t$  在 P2P 电能交易中的购电功率和售电功率；  $\kappa_{bg}^t$  和  $\kappa_{sg}^t$  分别为时段  $t$  所有产消者向配电公司的总购电功率和总售电功率。为避免节点  $i$  处产消者时段  $t$  同时购买和出售电能，  $y_{i,e}^t$  为时段  $t$  节点  $i$  处产消者电能交易状态的二元变量，产消者购买电能和出售电能分别取 1 和 0，  $\zeta$  为一足够大的正数。

(3) 碳配额平衡约束：

$$M_{i,0} = M_{\text{total}}^T \frac{\sum_{t \in T} P_{i,L}^t}{\sum_{i \in A} \sum_{t \in T} P_{i,L}^t} \quad (17)$$

$$M_{i,0} - \sum_{t \in T} P_{i,bg}^t e_{i,N}^t = \sum_{t \in T} (M_{i,sm}^t + M_{i,sc}^t - M_{i,bm}^t - M_{i,bc}^t) \quad (18)$$

$$M_{i,sm}^t + M_{i,sc}^t \leq \zeta (1 - y_{i,c}^t) \quad (19)$$

$$M_{i,bm}^t + M_{i,bc}^t \leq \zeta y_{i,c}^t \quad (20)$$

$$M_{i,sm}^t, M_{i,sc}^t, M_{i,bm}^t, M_{i,bc}^t \geq 0 \quad (21)$$

$$\sum_{i \in A} M_{i,bc}^t = \kappa_{bc}^t \quad (22)$$

$$\sum_{i \in A} M_{i,sc}^t = \kappa_{sc}^t \quad (23)$$

$$\sum_{i \in A} M_{i,bm}^t = \sum_{i \in A} M_{i,sm}^t \quad (24)$$

式中：  $M_{i,0}$  为基于预测负荷比例分配<sup>[3]</sup>的节点  $i$  处产消者初始碳配额数量；  $M_{\text{total}}^T$  为考核周期  $T$  区域初始碳配额总量；  $M_{i,bm}^t$  和  $M_{i,sm}^t$  分别为时段  $t$  节点  $i$  处产消者在 P2P 碳交易中购买碳配额数量和出售碳配额的量；  $\kappa_{bc}^t$  和  $\kappa_{sc}^t$  分别为时段  $t$  所有产消者在碳排放权市场购买碳配额数量和出售碳配额总量；  $y_{i,e}^t$  为时段  $t$  节点  $i$  处产消者碳配额交易状态的二元变量，产消者购买碳配额和出售碳配额分别取 1 和 0。

(4) 网络约束：

$$P_{ij,F}^t = P_{j,S}^t + \sum_{k \neq i: (j,k) \in L} P_{jk,F}^t + r_{ij} (I_{ij}^t)^2 \quad (25)$$

$$P_{i,S}^t = P_{i,rg}^t + P_{i,dc}^t - P_{i,c}^t - P_{i,L}^t \quad (26)$$

$$Q_{ij,F}^t = Q_{j,S}^t + \sum_{k \neq i: (j,k) \in L} Q_{jk,F}^t + \chi_{ij} (I_{ij}^t)^2 \quad (27)$$



$$(V_j^t)^2 = (V_i^t)^2 - 2(r_{ij}P_{ij,F}^t + \chi_{ij}Q_{ij,F}^t) + (r_{ij}^2 + \chi_{ij}^2)(I_{ij}^t)^2 \quad (28)$$

$$I_{ij}^t{}^2 (V_i^t)^2 = P_{ij,F}^t{}^2 + Q_{ij,F}^t{}^2 \quad (29)$$

$$(V_{i,\text{down}})^2 \leq (V_i^t)^2 \leq (V_{i,\text{up}})^2 \quad (30)$$

$$0 \leq (I_{ij}^t)^2 \leq (I_{ij,\text{up}})^2 \quad (31)$$

式中：  $L$  为系统线路集合；  $P_{ij,F}^t$  和  $Q_{ij,F}^t$  分别为时段  $t$  线路  $(i, j)$  的有功潮流和无功潮流；  $P_{i,S}^t$  和  $Q_{i,S}^t$  分别为时段  $t$  节点  $i$  注入的有功功率和无功功率；  $r_{ij}$  和  $\chi_{ij}$  分别为线路  $(i, j)$  的电阻和电抗；  $I_{ij}^t$  为时段  $t$  线路  $(i, j)$  的电流；  $V_i^t$  和  $V_j^t$  分别为时段  $t$  节点  $i$  和节点  $j$  的电压模值；  $V_{i,\text{up}}$  和  $V_{i,\text{down}}$  分别为节点  $i$  的电压模值上限和下限；  $I_{ij,\text{up}}$  为线路  $(i, j)$  的电流上限。

## 2.2 基于 Benders 分解法求解 P2P 交易模型

定义  $\Delta P_i^t$  为时段  $t$  节点  $i$  处产消者电能交易总量，包括 P2P 电能交易量和与配电公司的交易量；定义  $\Delta M_i^t$  为时段  $t$  节点  $i$  处产消者碳配额交易总量，包括 P2P 碳配额交易量和在碳排放权市场交易量，即：

$$\Delta P_i^t = P_{i,\text{sm}}^t + P_{i,\text{sg}}^t - P_{i,\text{bm}}^t - P_{i,\text{bg}}^t = P_{i,S}^t \quad (32)$$

$$\Delta M_i^t = M_{i,\text{sm}}^t + M_{i,\text{sc}}^t - M_{i,\text{bm}}^t - M_{i,\text{bc}}^t \quad (33)$$

将式(14)-(16)代入式(32)、式(22)-(24)代入式(33)，整理可得：

$$\sum_{i \in A} \Delta P_i^t = \kappa_{\text{sg}}^t - \kappa_{\text{bg}}^t \quad (34)$$

$$\sum_{i \in A} \Delta M_i^t = \kappa_{\text{sc}}^t - \kappa_{\text{bc}}^t \quad (35)$$

为保护产消者隐私，减少产消者与负责安全校验的配电公司间共享的信息，如产消者可再生能源发电数据、储能装置信息等隐私数据，基于 Benders 分解法<sup>[21-22]</sup>将式(4)目标函数分解为网络安全约束主问题和产消者优化调度子问题，通过变量的交互迭代分布式求解。网络安全约束主问题决策变量为  $\Delta P_i^t$ ， $P_{i,\text{bg}}^t$ ， $P_{i,\text{sg}}^t$ ， $\Delta M_i^t$ ， $M_{i,\text{bc}}^t$  和  $M_{i,\text{sc}}^t$ ，约束条件包括碳排放流约束(1)-(3)、产消者电能交易总量平衡约束(14)(15)(34)、碳配额交易总量平衡约束(22)(23)(35)和网络约束(25)-(31)，即：

$$\min \zeta = \sum_{t \in T} (\lambda_{bg}^t \kappa_{bg}^t - \lambda_{sg}^t \kappa_{sg}^t + \lambda_{bc}^t \kappa_{bc}^t - \lambda_{sc}^t \kappa_{sc}^t) \quad (36)$$

$$s.t. (1)-(3),(14)-(15),(22)-(23),(25)-(31),(34)-(35) \quad (37)$$

产消者优化调度子问题的目标函数为原目标函数中产消者设备出力相关项, 约束条件包括产消者各设备出力约束(5)-(9)、每个产消者的电能平衡约束(10)-(13)、碳配额平衡约束(18)-(21)和辅助变量约束(39)-(41), 即:

$$\min C_i = \sum_{t \in T} [c_{i,rg} P_{i,rg}^t + c_{i,bess} (P_{i,dc}^t + P_{i,c}^t)] \quad (38)$$

$$\bar{X}_i^t = X_i^t \quad (39)$$

$$X_i^t = \{\Delta P_i^t, P_{i,bg}^t, P_{i,sg}^t, \Delta M_i^t, M_{i,bc}^t, M_{i,sc}^t\} \quad (40)$$

$$\bar{X}_i^t = \{\Delta \bar{P}_i^t, \bar{P}_{i,bg}^t, \bar{P}_{i,sg}^t, \Delta \bar{M}_i^t, \bar{M}_{i,bc}^t, \bar{M}_{i,sc}^t\} \quad (41)$$

$$s.t. (5)-(13), (18)-(21) \quad (42)$$

式中:  $X_i^t$  为主问题中相关变量集合,  $\bar{X}_i^t$  为子问题辅助变量集合。

在常规 Benders 分解法中, 含整型变量的优化问题为主问题求解<sup>[14]</sup>。2.1 节建立的产消者 P2P 电-碳交易模型中包括储能装置的充放电状态变量、产消者电能交易状态变量和碳配额交易状态变量, 均为整型变量, 且在产消者优化调度子问题中求解, 因此需要对子问题进行拉格朗日松弛<sup>[23-24]</sup>:

(1)子问题有可行解

当子问题(38)-(42)在主问题给定  $X_i^t$  下有最优解时, 将子问题松弛并求解生成 Benders 切割, 引入辅助变量后松弛形式的子问题可表述为:

$$\begin{cases} \min Q_i = \sum_{t \in T} [c_{i,bess} (P_{i,dc}^t + P_{i,c}^t) + c_{i,rg} P_{i,rg}^t + \pi_{i,x}^t (\bar{X}_i^t - X_i^t)] \\ s.t. (42) \end{cases} \quad (43)$$

其中  $\pi_{i,x}^t$  为约束条件(39)的拉格朗日乘子。

基于松弛子问题的解  $\bar{X}_i^t$ , 可获得向主问题返回的 Benders 切割:

$$\eta_i \geq \sum_{t \in T} [c_{i,rg} \bar{P}_{i,rg}^t + c_{i,bess} (\bar{P}_{i,dc}^t + \bar{P}_{i,c}^t) + \pi_{i,x}^t (\bar{X}_i^t - X_i^t)] \quad (44)$$

其中  $\eta_i$  为子问题  $i$  返回主问题的子问题  $i$  目标函数近似值参数。

(2)子问题无可行解

在子问题的求解中，约束条件(39)将主问题的解赋给子问题，可能导致子问题(38)-(42)在该解下无可行解，违反电能平衡约束(10)和碳配额平衡约束(18)。当子问题(38)-(42)无可行解时，为了形成有效的 Benders 切割，需要将约束条件(10)和(18)松弛：

$$\min(\alpha + \beta) \quad (45)$$

$$P'_{i,rg} + P'_{i,dc} - P'_{i,c} - P'_{i,L} + \alpha = P'_{i,sm} + P'_{i,sg} - P'_{i,bm} - P'_{i,bg} \quad (46)$$

$$M'_{i,0} - \sum_{t \in T} P'_{i,bg} e'_{i,N} + \beta = \sum_{t \in T} (M'_{i,sm} + M'_{i,sc} - M'_{i,bm} - M'_{i,bc}) \quad (47)$$

$$s.t. (5)-(9)、(11)-(13)、(19)-(21) \quad (48)$$

通过求解问题(45)-(48)可获得约束条件的最小松弛和对应的乘子  $\pi'_{i,x}$ ，进而可求解松弛子问题：

$$\begin{cases} \min Q_i = \sum_{t \in T} [c_{i,bess} (P'_{i,dc} + P'_{i,c}) + c_{i,rg} P'_{i,rg} + \pi'_{i,x} (\bar{X}'_i - X'_i)] \\ s.t. (5)-(9)、(11)-(13)、(19)-(21)、(46)-(47) \end{cases} \quad (49)$$

在获得可行松弛子问题的解  $\bar{X}'_i$  后，基于式(44)求解向主问题返回的 Benders 切割。加入 Benders 切割约束的主问题表述为：

$$\begin{cases} C_T = \min \left[ \sum_{t \in T} (\lambda'_{bg} K'_{bg} - \lambda'_{sg} K'_{sg} + \lambda'_{bc} K'_{bc} - \lambda'_{sc} K'_{sc}) + \sum_{i \in A} \eta_i \right] \\ \eta_i \geq \sum_{t \in T} \left\{ c_{i,rg} \bar{P}'_{i,rg}(l) + c_{i,bess} [\bar{P}'_{i,dc}(l) + \bar{P}'_{i,c}(l)] + \pi'_{i,x}(l) [\bar{X}'_i(l) - X'_i] \right\} \quad \forall l \in \{1, 2, \dots, k-1\} \\ s.t. (37) \end{cases} \quad (50)$$

在 Benders 分解法的第  $k$  轮迭代中，主问题基于原约束和第  $l$  轮 ( $l=1, 2, \dots, k-1$ ) 迭代形成的 Benders 切割约束，求解满足网络约束的交易计划，包括产消费间 P2P 电-碳交易量、与配电公司的交易功率和在碳市场交易碳配额数量。子问题基于主问题最优解优化产消者设备出力，生成新的 Benders 切割，并添加到主问题约束中，以进一步逼近原问题最优解。基于 Benders 分解法求解 P2P 电-碳交易模型的具体流程如下：

步骤 1：设置原问题的初始下界  $LB = -\infty$ ，初始上界为  $UB = \infty$ ，迭代轮次  $k=1$ 。在没有附加切割平面的约束下求解主问题(36)-(37)，得到主问题的初始解  $X'_i(1)$ ，基于主问题潮流计算出配电网节点的碳排放密度，跳转至步骤 3；

步骤 2: 基于第  $k-1$  轮迭代中子问题形成的 Benders 切割, 求解主问题(50), 获得主问题的解  $X_i^t(k)$  和节点的碳排放密度, 更新下界  $LB = \sum_{i \in A} \eta_i(k)$ , 跳转至步骤 3;

步骤 3: 节点  $i$  处产消者基于第  $k$  轮主问题的解  $X_i^t(k)$  和节点碳排放密度求解子问题(38)-(42)。若有可行解, 则获取式(39)的拉格朗日乘子  $\pi_{i,x}^t$ , 并跳转至步骤 4, 否则跳转至步骤 5;

步骤 4: 第  $k$  轮迭代子问题  $i$  有可行解, 基于乘子  $\pi_{i,x}^t$ , 求解松弛子问题(43), 得到松弛子问题最优解  $\bar{X}_i^t(k)$ , 进而基于式(44)求解第  $k$  轮迭代子问题  $i$  向主问题返回的 Benders 切割, 跳转至步骤 6;

步骤 5: 第  $k$  轮迭代子问题  $i$  无可行解, 基于式(45)-(48)求解约束条件的最小松弛和对应的乘子  $\pi_{i,x}^t$ , 进而求解松弛子问题(49), 得到松弛子问题的最优解  $\bar{X}_i^t(k)$ , 并基于式(44)求解第  $k$  轮迭代子问题  $i$  向主问题返回的 Benders 切割, 跳转至步骤 6;

步骤 6: 更新上界  $UB = \sum_{i \in A} C_i(k)$ , 进行迭代终止判定: 若  $UB - LB \leq \omega$ , 则跳转至步骤 7; 否则  $k=k+1$ , 并跳转至步骤 2;

步骤 7: 输出 P2P 电-碳交易方案, 包括产消者间 P2P 电-碳交易量、与配电公司的电能交易量和在碳排放权市场交易的碳配额数量。

### 3 产消者 P2P 电-碳交易结算模型

2.1 小节建立的产消者 P2P 电-碳交易模型以产消者总成本最低为目标, 将产消者的分布式资源优化配置, 进而确定产消者最优 P2P 电-碳交易量。在交易结算环节, 建立基于纳什议价<sup>[25]</sup>的 P2P 交易结算模型, 根据产消者贡献度进行收益分配。基于纳什议价的 P2P 交易结算模型包括 P2P 电能交易结算和碳配额交易结算:

$$\max \prod_{i \in A} \left\{ \left[ C_{i,ele}^N - (C_{i,ele}^H + C_{i,ele}^{P2P}) \right]^{\tau_{i,ele}} \left[ C_{i,car}^N - (C_{i,car}^H + C_{i,car}^{P2P}) \right]^{\tau_{i,car}} \right\} \quad (51)$$

$$C_{i,ele}^H = \sum_{t \in T} \left[ c_{i,rg} P_{i,rg}^t + c_{i,bess} (P_{i,dc}^t + P_{i,c}^t) + \lambda_{bg}^t P_{i,bg}^t - \lambda_{sg}^t P_{i,sg}^t \right] \quad (52)$$

$$C_{i,car}^H = \sum_{t \in T} (\lambda_{bc}^t M_{i,bc}^t - \lambda_{sc}^t M_{i,sc}^t) \quad (53)$$

$$C_{i,ele}^H + C_{i,ele}^{P2P} \leq C_{i,ele}^N \quad (54)$$

$$C_{i,car}^H + C_{i,car}^{P2P} \leq C_{i,car}^N \quad (55)$$

$$\sum_{i \in A} C_{i,ele}^{P2P} = 0 \quad (56)$$

$$\sum_{i \in A} C_{i,car}^{P2P} = 0 \quad (57)$$

式中：  $C_{i,ele}^N$  和  $C_{i,car}^N$  分别为节点  $i$  处产消者参与集中式电-碳交易时的电能总成本和碳配额总成本，电能总成本包括产消者与配电公司的交易成本和设备发电成本，碳配额总成本为在碳排放权市场的交易成本；  $C_{i,ele}^H$  为 P2P 交易模式下节点  $i$  处产消者的基础用电成本，包括设备发电成本和与配电公司交易成本；  $C_{i,car}^H$  为 P2P 交易模式下节点  $i$  处产消者在碳排放权市场的交易成本；  $C_{i,ele}^{P2P}$  和  $C_{i,car}^{P2P}$  分别为节点  $i$  处产消者的 P2P 电能交易结算费用和碳配额交易结算费用；  $\tau_{i,ele}$  和  $\tau_{i,car}$  分别为节点  $i$  处产消者 P2P 电能交易结算和碳配额交易结算的议价因子，由节点  $i$  处产消者在 P2P 电-碳交易中的贡献度决定，即节点  $i$  处产消者的 P2P 交易量权重决定，计算公式如下：

$$\tau_{i,ele} = \frac{\sum_{t \in T} (P_{i,sm}^t + P_{i,bm}^t)}{\sum_{i \in A} \sum_{t \in T} (P_{i,sm}^t + P_{i,bm}^t)} \quad (58)$$

$$\tau_{i,car} = \frac{\sum_{t \in T} (M_{i,sm}^t + M_{i,bm}^t)}{\sum_{i \in A} \sum_{t \in T} (M_{i,sm}^t + M_{i,bm}^t)} \quad (59)$$

将基于纳什议价的 P2P 交易结算模型目标函数式(51)取对数，转化为凸优化问题求解：

$$\begin{cases} \min \sum_{i \in A} \left\{ -\tau_{i,ele} \left[ C_{i,ele}^N - (C_{i,ele}^H + C_{i,ele}^{P2P}) \right] - \tau_{i,car} \left[ C_{i,car}^N - (C_{i,car}^H + C_{i,car}^{P2P}) \right] \right\} \\ s.t. (52) - (59) \end{cases} \quad (60)$$

## 4 算例与结果

### 4.1 参数设置

采用改进的 IEEE 33 节点配电系统进行算例分析。该系统的拓扑结构如附录中的图 A1 所示。假设参与分布式交易的产消者有 12 个，分别位于节点 2、3、4、6、9、13、17、20、21、23、28、32，编号为产消者  $a \sim l$ 。假设每个产消者均配备电池储能装置和光伏发电设备，各产消者设备基本参数如附录中的表 A1，负荷数据和可再生能源发电设备各时段最大出力取自文献[24]。各时段配电公司购售电价格取自文献[16]，碳排放权市场中碳配额价格取自

文献[18], 其他参数为<sup>[25-26]</sup>:  $e_{\text{sub},N}=0.85\text{kg/kWh}$ ,  $M_{\text{total}}^T=50\text{kg}$ ,  $\zeta=10^4$ ,  $\omega=10^{-3}$ ,  $h_{\text{rg}}=0.02$ 。

## 4.2 算法计算性能分析

图 2 为 Benders 分解法收敛过程中相关变量的变化情况。可以看出上下界差值作为收敛判定条件, 虽然在迭代过程中有明显的振荡, 但产消者的总成本逐渐增加, 最终在第 17 次迭代时稳定到收敛解处。这是因为主问题是原始优化问题的松弛形式, 松弛随着子问题返回切割平面数量的增加而逐渐收紧。

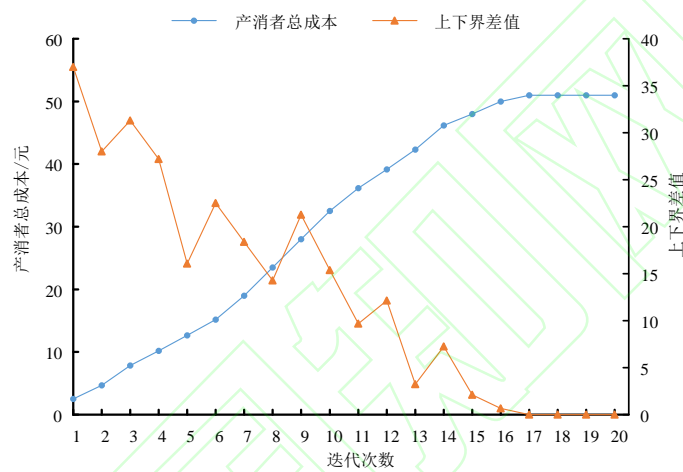


图 2 Benders 分解法迭代过程

Fig.2 Iterative process of improved Benders decomposition

表 1 比较了所提算法与 ADMM 算法<sup>[25]</sup>和集中式算法的计算结果。可以看出, Benders 分解法能收敛到集中式算法的全局最优解, 收敛到最优解所需的迭代次数少于 ADMM 算法, 平均计算时间与 ADMM 算法相比缩短了 3.8%, 也无需考虑 ADMM 算法中的步长敏感性问题<sup>[25]</sup>。

表 1 算法计算结果比较

Tab.1 Comparison of computational performance

产消者数量/ 个	Benders 分解			ADMM			集中式算法	
	迭代次数/ 次	总计算时间 /s	最优解/ 元	迭代次数/ 次	总计算时间 /s	最优解/ 元	总计算时间 /s	最优解/ 元
12	17	209.78	51.04	19	218.07	51.04	6.28	51.04
20	23	577.30	76.97	28	601.58	76.97	13.42	76.97

30	36	1634.76	108.65	47	1695.74	108.65	25.76	108.65
----	----	---------	--------	----	---------	--------	-------	--------

表 2 为 Benders 分解法主问题和松弛子问题每轮迭代的平均计算时间。由于子问题为相互独立的产消者优化调度问题，不随着产消者总体规模的增加发生改变，因此子问题的计算时间并未显著增加，迭代的平均计算时间均低于 1.5 秒。然而，当产消者数量增加时，主问题的平均计算时间显著增加，从 2.48 秒增加到 77.29 秒。这是因为主问题的约束条件包含网络安全约束和子问题返回的 Benders 切割约束，这些约束条件的数量随着产消者规模的增加而增加，加剧了主问题的计算负担。上述分析表明基于 Benders 分解法的布式求解算法能在保证计算效率和收敛性能的基础上，减少产消者信息共享，保护产消者隐私。

表 2 算法平均计算时间

Tab.2 Average algorithm running time by iteration

产消者数量/个	每轮迭代平均计算时间/s	
	主问题	子问题
5	2.48	0.75
12	11.46	0.88
20	24.13	0.97
30	44.25	1.16
50	77.29	1.28
100	167.34	1.42

### 4.3 产消者 P2P 交易策略分析

图 3 为各时段 P2P 市场交易电量、与供电公司交易电量和自产电量。与供电公司交易量为负表明产消者向供电公司售电，自产电量包括产消者可再生能源设备发电量和电池储能装置发电量，自产电量为负表明电池储能装置充电量大于可再生能源设备发电量。可以看出，自产电量最高峰时段对应可再生能源发电量高峰时段，同时也是向供电公司出售电能最多的时段。在 1:00-5:00 由于可再生能源发电量处于低谷期，P2P 电能交易量在产消者电能消费结构的占比较低，产消者主要通过向供电公司购电满足用电需求。而在 10:00-15:00 可再生能源发电设备发电量增加，P2P 交易量在产消者电能消费结构的占比明显提升，说明通过 P2P 交易促进了分布式可再生能源的消纳。



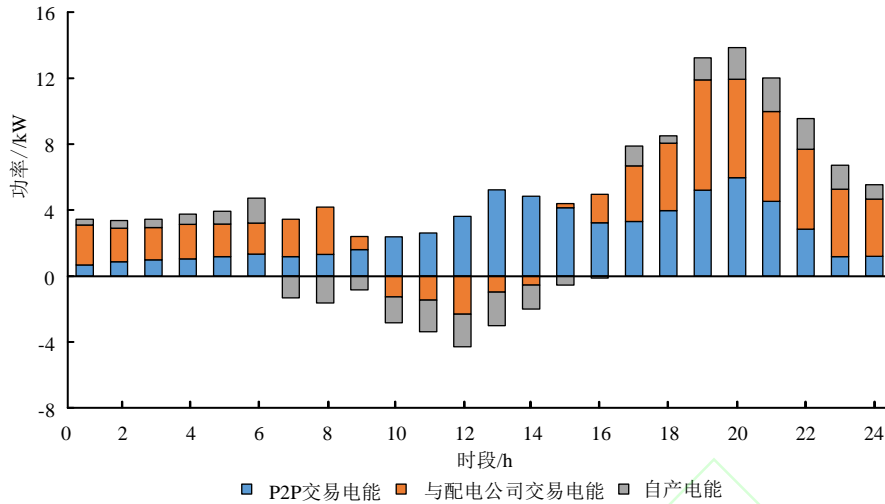


图 3 24 时段产消者电能消费结构

Fig.3 Energy consumption structure of prosumers in 24 periods

以产消者  $e$  为例进一步说明分布式产消者的交易策略。图 4 为各时段产消者  $e$  储能装置的调度计划，图 5 为各时段产消者  $e$  的电能交易计划和节点碳排放密度。可以看出，由于午间分布式光伏发电量充足，产消者  $e$  的储能装置的充电行为主要集中在午间，而在晚间负荷高峰时段放电满足部分电能需求。在 6:00-15:00 时段产消者  $e$  将富余的电能部分出售给其余产消者和供电公司，部分存储在储能装置中，在 15:00 时储能装置存储电量达到上限，此时段储能装置相当于吸收可再生电能的负载，节点的碳排放密度减小；在 17:00-23:00 的用电需求高峰期，产消者  $e$  调度储能装置放电满足部分电能需求，同时由于其从供电公司购买电能比例提高，节点的碳排放密度增大。上述分析表明建立的考虑储能装置的碳排放流模型可有效量化产消者的碳足迹。

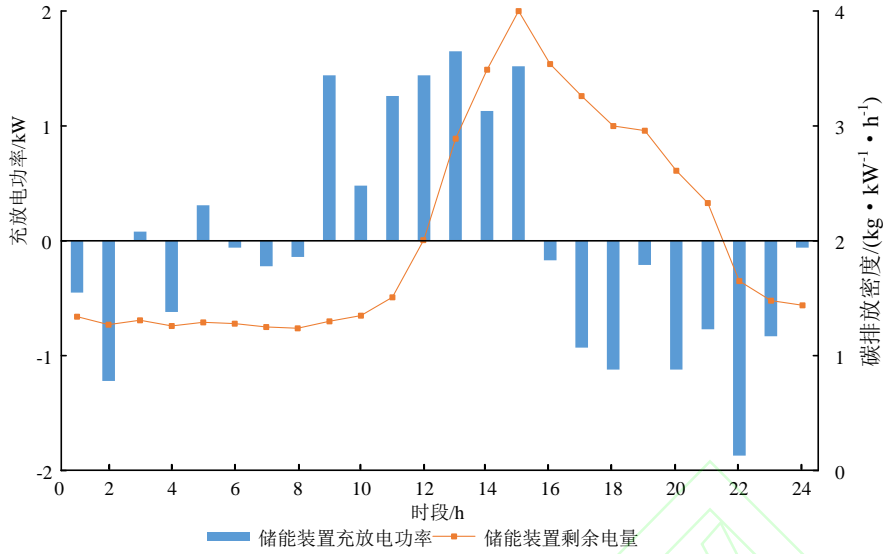


图4 产消者 e 储能装置调度计划

Fig.4 Scheduling plans of energy storage system for prosumer e

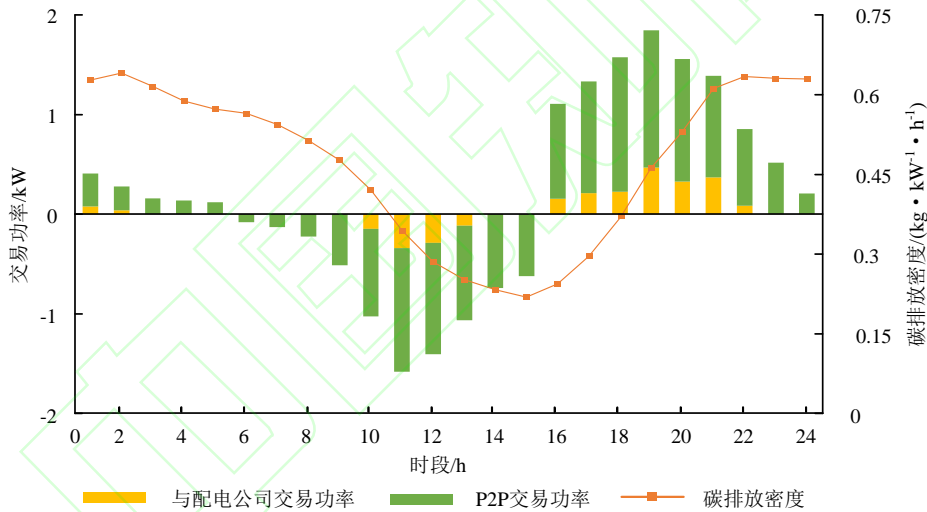


图5 产消者 e 电能交易计划和节点碳排放密度

Fig.5 Energy trading plans and carbon intensity for prosumer e

图6 为各产消者 24 时段 P2P 交易总量结果，图7 为基于纳什议价模型的 P2P 交易结算结果，其中成本为负值表示产消者出售电能或碳配额所获得的收益，图中阴影部分为各产消者的 P2P 电能交易结算费用和碳配额交易结算费用。可以看出，12 位产消者参与直接 P2P 交易后用能成本均有所降低，其中产消者 i 的 P2P 电能交易量和碳配额交易量最大，因此其 P2P 电-碳交易贡献度和议价因子高于其他产消者，从而使其在交易结算中收益最大，与集

中式交易相比其总成本降幅为 47.6%，所有产消者平均成本降幅为 28.9%。

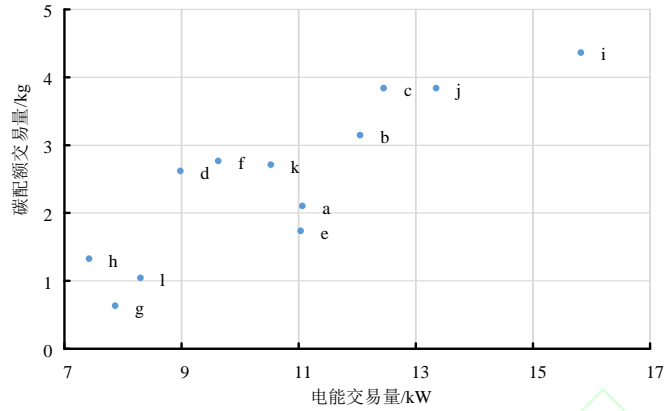
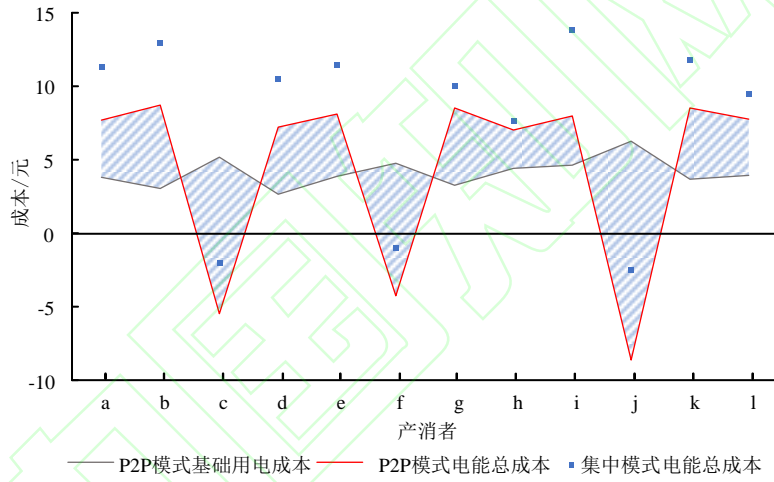
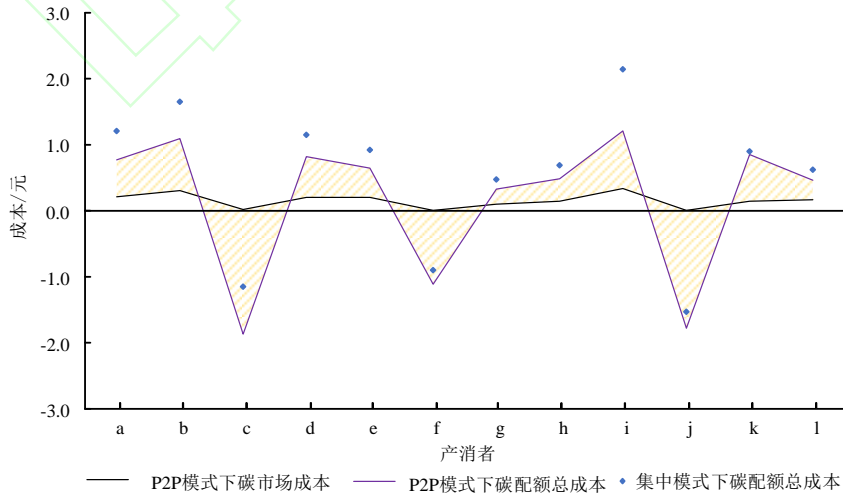


图 6 各产消者 24 时段 P2P 交易量

Fig.6 Total P2P trading amount of each prosumer in 24 periods



(a) P2P 电能交易结算



(b) P2P 碳配额交易结算

图 7 P2P 交易结算费用

Fig.7 Settlement fee of P2P trading

#### 4.4 对比分析

对比以下三种交易模式来分析所提模型对分布式产消者收益和碳排放总量的影响,进而说明本文所提模型的合理性和可行性。

模式 1: 产消者间可进行 P2P 电能交易和碳配额交易, 考核产消者的间接碳排放量, 即本文所提交易模式。

模式 2: 不考虑产消者间的电能交易和碳配额交易, 考核产消者的间接碳排放量。其只能通过自产自消或与配电公司交易以满足电能需求, 通过碳排放权市场满足碳排放权需求。

模式 3: 考虑产消者间 P2P 电能交易, 但不考核产消者的间接碳排放量, 产消者间无 P2P 碳配额交易。

表 3 为三种模式对比结果, 其中 P2P 交易率定义为 P2P 交易量占总交易量的比率。在模式二中, 0:00~24:00 的交易周期里 12 位产消者优化调度后与配电公司的净交易电量为 103.44kWh, 电力交易成本为 74.48 元, 设备调度成本为 18.98 元, 电能总成本为 93.46 元。在碳排放权市场的碳配额交易量为 32.75kg, 碳排放权交易总成本为 6.37 元。模式三不考核产消者的间接碳排放量, 产消者总成本仅为电能成本, 产消者间 P2P 电能交易量为 43.32kWh, 电能交易成本相较模式二降低了 39.7%, 碳排放量降低了 14.9%。

在模式 1 中, 产消者间 P2P 电能交易量和碳配额交易量分别为 64.32kWh 和 15.23kg, 虽然考核产消者的间接碳排放量导致了额外的排放权成本, 但产消者总成本相较模式三而言增幅不显著, 这是因为间接碳排放考核提高了产消者 P2P 电能交易率, 减少了其与配电公司的交易电量; 同时由于产消者间的碳配额交易无网络约束限制, 因此模式 1 的 P2P 碳配额交易率略高于 P2P 电能交易率。在碳排放量方面, 模式 1 的碳排放量相较模式 2 和模式 3

分别降低了 28.2%和 15.6%。上述分析表明所提交易模式能有效促进产消者 P2P 交易，同时有助于减少碳排放量。

表 3 三种模式下得到的结果比较

Tab.3 Comparisons of results attained by three modes

序号	产消者总成本/元		P2P 交易率/%		碳排放量/kg
	电能成本	碳排放权成本	电能交易率	碳配额交易率	
模式 1	49.21	1.83	55.44	61.78	59.42
模式 2	93.46	6.37	0	0	82.75
模式 3	48.17	0	38.68	0	70.44

## 5 结论

本文构建了基于 Benders 分解法的 P2P 电-碳交易模型和基于纳什议价模型进行 P2P 收益结算分配，通过对所提模型进行算例仿真分析，得出以下结论：

(1) 通过引入对需求侧产消者的间接碳排放量考核，基于碳排放流模型量化产消者的购电碳足迹，可有效促进产消者改变用能行为，进而促进碳减排。

(2) 基于 Benders 分解法求解 P2P 产消者电-碳交易方案，有良好的收敛性能和计算效率，同时分布式的求解方法能有效保护产消者的隐私数据信息。

(3) 基于纳什议价的 P2P 收益结算方案依据产消者电-碳交易总量对收益进行分配，结果表明引入 P2P 电-碳交易有助于降低产消者的用电成本和碳排放权成本，同时有效考虑产消者在 P2P 电-碳交易中的贡献度，实现收益的公平分配。

在后续研究中，拟将所提模型部署在区块链平台进行仿真分析，同时考虑分布式产消者提供辅助服务的补偿与收费方式。

## 参考文献：

- [1] 国家能源局. 能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划 [EB/OL]. (2022-10-09)[2023-04-05]. [http://www.nea.gov.cn/2022-10/09/c\\_1310668927.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-10/09/c_1310668927.htm).  
National energy administration. Action plan for energy carbon peaking and carbon neutrality standardization improvement [EB/OL]. (2022-10-09)[2023-04-05]. [http://www.nea.gov.cn/2022-10/09/c\\_1310668927.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-10/09/c_1310668927.htm).
- [2] 秦博宇, 周星月, 丁涛, 等. 全球碳市场发展现状综述及中国碳市场建设展望[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(21): 186-199.  
QIN Boyu, ZHOU Xingyue, DING Tao, et al. Review on development of global carbon market and prospect of China's carbon market construction[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(21): 186-199.
- [3] CAO Z W, ZHOU X, HU H, et al. Toward a systematic survey for carbon neutral data centers[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022, 24(2): 895-936.

- [4] 王健, 周念成, 王强钢, 等. 基于区块链和连续双向拍卖机制的微电网直接交易模式及策略[J]. **中国电机工程学报**, 2018, 38(17): 5072-5084.  
WANG Jian, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Electricity direct transaction mode and strategy in microgrid based on blockchain and continuous double auction mechanism[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2018, 38(17): 5072-5084.
- [5] 高红均, 张凡, 刘俊勇, 等. 考虑多产消者差异化特征的社区微网系统 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.
- [6] 刘连光, 潘明明, 田世明, 等. 考虑源网荷多元主体的售电竞争非合作博弈方法[J]. **中国电机工程学报**, 2017, 37(6): 1618-1626.  
LIU Lianguang, PAN Mingming, TIAN Shiming, et al. A non-cooperative game analysis of a competitive electricity retail considering multiple subjects of source-grid-load [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2017, 37(6): 1618-1626.
- [7] CUI S C, WANG Y W, SHI Y, et al. A new and fair peer-to-peer energy sharing framework for energy buildings[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2020, 11(5): 3817-3826.
- [8] MORSTYN T, TEYTELBOYM A, MCCULLOCH M D. Bilateral contract networks for peer-to-peer energy trading[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2018, 10(2): 2026-2035.
- [9] KIM J, DVORKIN Y. A P2P-dominant distribution system architecture[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2020, 35(4): 2716-2725.
- [10] WANG B X, DUAN M S. Consignment auctions of emissions trading systems: an agent-based approach based on China's practice[J]. **Energy Economics**, 2022, 112: 106187.
- [11] YANG Y X, XU X. Production and carbon emission abatement decisions under different carbon policies: supply chain network equilibrium models with consumers' low-carbon awareness[J]. **International Transactions in Operational Research**, 2023: 1-31.
- [12] FENG F, DU X, SI Q, et al. Hybrid game optimization of microgrid cluster (MC) based on service provider (SP) and tiered carbon price[J]. **Energies**, 2022, 15(14): 5291.
- [13] KANG C Q, ZHOU T R, CHEN Q X, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2015, 6(5): 2386-2394.
- [14] YAN Z Y, ZHOU T, ZHANG H, et al. Real-time carbon flow algorithm of electrical power systems based on network power decomposition[C]//2021 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science. Shenyang. IEEE, 2021: 467-470.
- [15] CHENG Y H, ZHANG N, WANG Y, et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2019, 10(4): 3562-3574.
- [16] WANG Y Q, QIU J, TAO Y C, et al. Carbon-oriented operational planning in coupled electricity and emission trading markets[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2020, 35(4): 3145-3157.
- [17] POURAKBARI-KASMAEI M, LEHTONEN M, CONTRERAS J, et al. Carbon footprint management: A pathway toward smart emission abatement[J]. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2020, 16(2): 935-948.
- [18] NAN J P, FENG J R, DENG X, et al. Hierarchical low-carbon economic dispatch with source-load bilateral carbon-trading based on aumann-shapley method[J]. **Energies**, 2022, 15(15): 5359.
- [19] 赵伟, 熊正勇, 潘艳, 等. 计及碳排放流的电力系统低碳规划[J]. **电力系统自动化**, 2023, 47(9): 23-33.  
ZHAO Wei, XIONG Zhengyong, PAN Yan, et al. Low-carbon planning of power system considering carbon emission flow. **Automation of Electric Power Systems**, 2023, 47(9): 23-33.
- [20] 张笑演, 王槽裕, 黄蕾, 等. 考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的综合能源园区优化调度[J/OL]. **电力系统自动化**, (2022-11-16)[2023-04-05].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20221114.1633.004.html>.  
ZHANG Xiaoyan, WANG Luyu, HUANG Lei, et al. Optimal dispatching of park-level integrated energy

system considering augmented carbon emission flow and carbon trading bargain model[J/OL]. **Automation of Electric Power Systems**, (2022-11-16)[2023-04-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20221114.1633.004.html>.

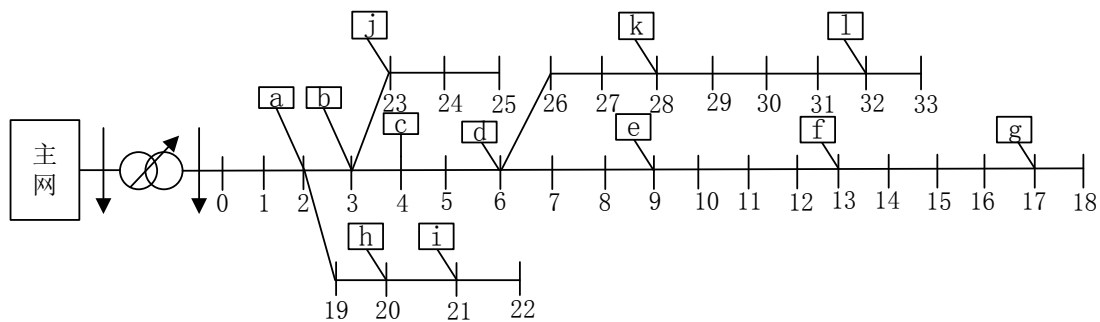
- [21] RAHMANIANI R, AHMED S, CRAINIC T G, et al. The benders dual decomposition method[J]. **Operations Research**, 2020, 68(3): 878-895.
- [22] ZOU J K, AHMED S, SUN X A. Stochastic dual dynamic integer programming[J]. **Mathematical Programming**, 2019, 175(1): 461-502.
- [23] JOSÉ I, ANTÓNIO C, FILIPE S. Network-secure bidding strategy for aggregators under uncertainty[J]. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, 2022, 30: 100666.
- [24] Lu S, Gu W, Zhang C, et al. Hydraulic-thermal cooperative optimization of integrated energy systems: A convex optimization approach[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**. 2020, 11(6): 4818-4832.
- [25] LI G G, LI Q Q, YANG X, et al. General Nash bargaining based direct P2P energy trading among prosumers under multiple uncertainties[J]. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2022, 143: 108403.
- [26] SI F Y, HAN Y H, XU Q Q, et al. Cloud-edge based we-market: autonomous bidding and peer-to-peer energy sharing among prosumers[J/OL]. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, (2022-07-15)[2023-04-05]. <https://ieeexplore.ieee.org/document983117>.

附录:

附表 1 分布式产消者基本参数

Tab. 1 Basic parameters of distributed prosumers

名	数值
$c_{bess} / (\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	[0.55,0.3,0.45,0.6,0.35,0.4,0.45,0.2,0.3,0.4,0.15,0.4]
$\eta_B$	0.95
$Q_B / (\text{kW} \cdot \text{h})$	4
$c_{rg} / (\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	[0.02,0.03,0.04,0.01,0.03,0.02,0.04,0.03,0.04,0.05,0.02,0.05]
$h_{rg}$	0.02
$S_B^{\max}$	0.95
$S_B^{\min}$	0.05



附图 1 IEEE 33 节点配电系统拓扑结构

Fig.1 Topology of the IEEE 33-node distribution system