



## 基于智能合约的微电网P2P能源交易策略研究

李刚, 关雪, 杨会峰, 赵琳颖, 辛锐, 陈连栋

引用本文:

李刚,关雪,杨会峰,赵琳颖,辛锐,陈连栋. 基于智能合约的微电网P2P能源交易策略研究[J]. 智能系统学报, 2023, 18(4): 813–822.

LI Gang,GUAN Xue,YANG Huifeng,ZHAO Linying,XIN Rui,CHEN Liandong. Peer-to-peer energy trading strategy of microgrid based on smart contract[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2023, 18(4): 813–822.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202206006>

## 您可能感兴趣的其他文章

### 多元商品智能交易系统

Multi-commodity intelligent transaction system

智能系统学报. 2020, 15(6): 1188–1196 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201909007>

### 密集堆叠下的高相似度木块横截面检测

Highly similar wood blocks detection under dense stacking

智能系统学报. 2019, 14(4): 642–649 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201806001>

### 知识图谱的推荐系统综述

Review of recommendation systems based on knowledge graph

智能系统学报. 2019, 14(2): 207–216 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201805001>

### 融合协同过滤与用户偏好的旅游组推荐方法

A tourist group recommendation method combining collaborative filtering and user preferences

智能系统学报. 2018, 13(6): 999–1005 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201802011>

### 企业、政府与公众公共健康提升激励机制演化分析

Evolutionary analysis of incentive mechanisms for enterprises, governments, and the public to achieve environmental health improvements

智能系统学报. 2017, 12(2): 237–249 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201508012>

### 链路预测下能源供应链网络合作演化机制研究

On the evolution cooperation mechanism of energy supply chain networks under link prediction

智能系统学报. 2017, 12(2): 221–228 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201605003>

DOI: 10.11992/tis.202206006

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20230321.1746.024.html>

# 基于智能合约的微电网 P2P 能源交易策略研究

李刚<sup>1,2</sup>, 关雪<sup>1</sup>, 杨会峰<sup>3,4</sup>, 赵琳颖<sup>1</sup>, 辛锐<sup>3,4</sup>, 陈连栋<sup>3,4</sup>

(1. 华北电力大学 计算机系, 河北 保定 071003; 2. 复杂能源系统智能计算教育部工程研究中心, 河北 保定 071003; 3. 国网河北省电力有限公司信息通信分公司, 河北 石家庄 050021; 4. 河北省电力物联网信息通信技术创新中心, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 随着能源系统向着绿色低碳化转型发展, 大量新型产消者涌入交易市场, 给能源交易带来了诸多不确定性, 传统的集中式能源交易机制已不能满足新的需求。针对这一问题, 本文分析了区块链技术与能源交易模式的契合性, 在智能合约的基础上提出并构建了以产消者为研究对象的微电网点对点 (peer-to-peer, P2P) 能源交易模型, 以提高可再生能源的消纳比例; 为增加用户收益, 使用 3 种不同出清机制进行结算, 并设计了一种用户满意度反馈度量方法, 可为后续交易提供参考; 通过算例仿真, 结果表明出清机制不同程度上影响着用户的满意度与收益, 并且点对点能源交易策略优于传统的能源交易策略, 该成果为数字化转型背景下创新能源交易模式提供了新的思路。

**关键词:** 微电网; 能源交易; 区块链; 智能合约; 点对点; 产消者; 清算机制; 用户满意度

**中图分类号:** TP399; TM344.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2023)04-0813-10

中文引用格式: 李刚, 关雪, 杨会峰, 等. 基于智能合约的微电网 P2P 能源交易策略研究 [J]. 智能系统学报, 2023, 18(4): 813-822.

英文引用格式: LI Gang, GUAN Xue, YANG Huifeng, et al. Peer-to-peer energy trading strategy of microgrid based on smart contract[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2023, 18(4): 813-822.

## Peer-to-peer energy trading strategy of microgrid based on smart contract

LI Gang<sup>1,2</sup>, GUAN Xue<sup>1</sup>, YANG Huifeng<sup>3,4</sup>, ZHAO Linying<sup>1</sup>, XIN Rui<sup>3,4</sup>, CHEN Liandong<sup>3,4</sup>

(1. Department of Computer, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Engineering Research Center of Intelligent Computing for Complex Energy Systems, Ministry of Education, Baoding 071003, China; 3. State Grid Hebei Electric Power Company Limited Information and Communication Branch, Shijiazhuang 050021, China; 4. Hebei Electric Power Internet of Things Information and Communication Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** With the transformation of energy systems towards green and low-carbon development, a large number of new prosumers have flooded into the trading market, bringing a lot of uncertainties to the energy trading system. What's more, the traditional centralized energy trading mechanism can no longer meet the demand. Under the circumstances, this paper analyzes the compatibility of blockchain technology and energy trading mode, proposes and constructs a peer-to-peer (P2P) energy trading model for microgrids with prosumers as the research object on the basis of smart contracts, which helps to increase the proportion of renewable energy consumption. In order to increase user's benefits, three different clearing mechanisms are used for settlement, and a user satisfaction feedback measurement method is designed, which can provide a reference for subsequent transactions. The simulation analysis results show that the clearing mechanism affects the user's satisfaction and benefits to a varying degree, and that the P2P energy trading strategy outperforms traditional energy trading strategy, which provides a new idea for innovative energy trading mode under the background of digital transformation.

**Keywords:** microgrid; energy trading; blockchain; smart contract; peer-to-peer; prosumer; clearing mechanism; customer satisfaction

收稿日期: 2022-06-06. 网络出版日期: 2023-03-22.

基金项目: 河北省省级科技计划资助项目 (20310103D).

通信作者: 李刚. E-mail: [ququ\\_er2003@126.com](mailto:ququ_er2003@126.com).

近年来, 国内外能源环境面临诸多不确定性因素, 能源供应与需求之间存在严重不平衡现

象,大力发展可再生能源,是优化能源结构、实现绿色低碳发展目标的有力补充<sup>[1]</sup>。但随之而来的太阳能和风能等可再生能源不断增加所导致的间歇性、传输损耗等因素,给能源交易市场带来了不稳定性,可再生能源的高效利用以及就地消纳成为目前亟待解决的问题之一<sup>[2-3]</sup>。而微电网的出现以及产消者的接入可以很大程度改善上述问题,但传统集中式能源交易模式存在不信任、交易不透明、信息不对称等一系列问题,无法实现交易双方的点对点能源交易。因此,需要一种新兴技术打破信息孤岛,建立起交易双方之间信任的桥梁。

区块链作为一种分布式数据库技术,具有去中心化、公开透明、不可篡改等特性,并且它已经在诸多领域获得应用,如金融行业<sup>[4-5]</sup>、物联网<sup>[6]</sup>、电子数据行业<sup>[7]</sup>等。此外,区块链在能源领域的应用也受到了越来越多的关注<sup>[8-9]</sup>,主要集中在能源交易、能源计量、能源企业管理、能源金融等。例如,在能源交易领域,文献[10]提出了一个由股权交易和能量交易组成的点对点(peer-to-peer, P2P)能量共享交易模型;文献[11]在微电网下提出了一种考虑能源拥塞的点对点能源交易新方案;文献[12]针对不同类型产消者设计了基于连续双边拍卖机制的多类型产消者点对点能源交易框架。以上研究虽实现了点对点能源交易,但未考虑到交易双方之间存在的信任危机。文献[13]以云计算为研究背景提出了基于区块链的去中心化交易机制与方法,侧重于共识机制的研究;文献[14]

在博弈论和联盟链支撑下,构建了多主体参与的能源交易机制;文献[15]在区块链基础上以减少用户违约为目的提出信用管理机制,从而实现了基于信用的点对点电力交易模型。以上研究虽然借助区块链技术解决了信任危机,实现了点对点能源交易,但并未充分考虑点对点能源交易过程中的定价问题,以及点对点能源交易结束后用户对本次交易的满意程度。

基于此,本文将区块链技术中的智能合约引入能源交易环节。在这项工作中所做的主要技术贡献可以总结如下:1)相对于传统中心化能源交易,本文实现了基于区块链智能合约的点对点能源交易;2)构建了以产消者为研究对象的P2P能源交易模型,制定“价格制约”的双向拍卖(price constraints-double-sided auction, PC-DA);3)尝试提出多种清算机制进行结算,分别为平均价格、混合价格与平均混合价格;4)充分考虑用户满意度反馈,了解用户本次交易的满意程度。

## 1 区块链与能源交易的契合性

作为一种去中心化的分布式数据库账本,区块链融合了密码学、P2P网络、共识机制、智能合约等多种技术<sup>[16-18]</sup>。

能源交易是能源领域一个重要的研究方向,区块链凭借其去信任、公开透明、互联共享、自治安全等优点在能源交易领域得到广泛研究,这些特点也与P2P能源交易的诉求相契合,如表1所示。

表1 区块链与P2P能源交易的契合点

Table 1 Intersection of blockchain and peer-to-peer energy trading

区块链	P2P能源交易
去中心化、去信任	交易双方需要彼此相互信任
公开透明	需要一个公开透明、公平公正的交易平台
信息对称、互联共享、自治安全	需要打破数据孤岛,实现信息安全共享
可追溯、不可篡改	需要保证信息真实可查、不可篡改

将区块链运用于能源交易领域,将有效支撑多用户的广泛深度参与及多种类型信息的互联共享,有望提高交易效率、降低成本以及增加参与主体的收益,进一步实现P2P能源交易中信息流、能量流和价值流的相互协同。

## 2 基于智能合约的P2P能源交易模型

微电网作为一种区域性电网,为可再生能源

的消纳提供了有利场景条件<sup>[19-20]</sup>。在微电网背景下,P2P能源交易主要分为内部能源交易与外部能源交易。内部交易参与主体主要包括微电网运营商、产消者与消费者,其中,产消者和消费者简称为用户。外部交易参与主体主要为各微电网运营商。本文主要考虑微电网内部交易,并假定以下所述交易未做特殊说明时为内部交易。

智能合约是一段预先设定规则的代码集合,

具有自动化执行的功能<sup>[21-22]</sup>。本文所提出的P2P能源交易机制将基于智能合约运行,如图1所示。另外,本文所涉及变量在表2中进行说明。

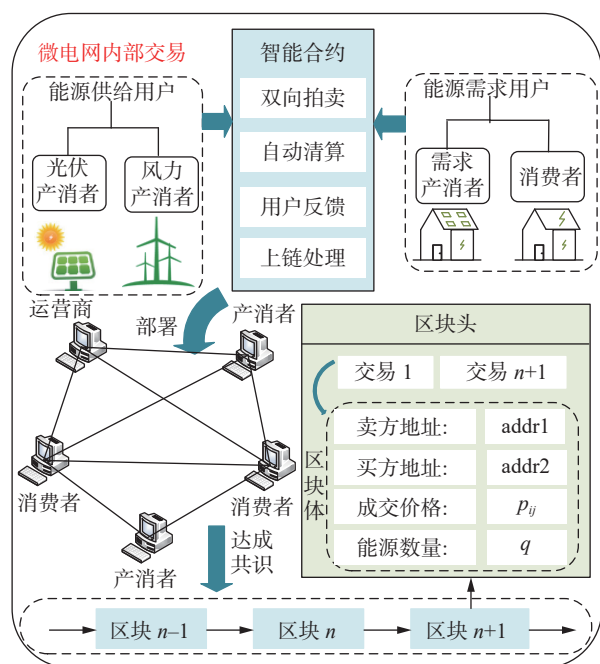


图1 基于智能合约的P2P能源交易框架

Fig. 1 Framework of peer-to-peer energy trading based on smart contracts

表2 变量表示与含义

Table 2 Variable representation and meaning

变量	含义
$S_{id}$	编号为id的微电网能源出售价格
$B_{id}$	编号为id的微电网能源购买价格
$m_{id}$	产消者总数
$n_{id}$	消费者总数
$M_{id}$	产消者 <i>i</i>
$N_{jid}$	消费者 <i>j</i>
$s_{id}$	产消者 $M_{id}$ 的出售价格
$u_{id}$	产消者 $M_{id}$ 的出售能源数量
$b_{jid}$	消费者 $N_{jid}$ 的购买价格
$v_{jid}$	消费者 $N_{jid}$ 的购买能源数量
$t$	代币
$r$	汇率
$e$	货币
$A_{ijid}$	产消者 $M_{id}$ 与消费者 $N_{jid}$ 交易的平均价格
$C_{ijid}$	产消者 $M_{id}$ 与消费者 $N_{jid}$ 交易的混合价格

续表2

变量	含义
$A_{ijid} + C_{ijid}$	产消者 $M_{id}$ 和消费者 $N_{jid}$ 交易的平均混合价格
$u_{ijid}^a$	产消者 $M_{id}$ 与消费者 $N_{jid}$ 交易的能源数量
$u_{id}^b$	产消者 $M_{id}$ 与微电网运营商交易的能源数量
$P_{ij}$	产消者 $M_{id}$ 与消费者 $N_{jid}$ 的成交价格
$a_{jid}v_{jid}^2 + b_{jid}v_{jid}$	消费者 $N_{jid}$ 购买能源所得效益
$a_{jid}, b_{jid}$	消费者 $N_{jid}$ 的效益系数
$v_{ijid}^a$	消费者 $N_{jid}$ 与产消者 $M_{id}$ 交易的能源数量
$v_{jid}^b$	消费者 $M_{id}$ 与微电网运营商交易的能源数量
$\lambda_{jid}$	消费者 $N_{jid}$ 的效益因子
$w_{jid}$	产消者 $M_{id}$ 的价格满意度反馈
$x_{jid}$	产消者 $M_{id}$ 的能源交易数量满意度反馈
$\omega_{id}, \mu_{id}, \eta_{id}$	产消者 $M_{id}$ 的偏好系数
$y_{jid}$	消费者 $N_{jid}$ 的价格满意度反馈
$z_{jid}$	消费者 $N_{jid}$ 的能源交易数量满意度反馈
$\varphi_{jid}, \Psi_{jid}, \gamma_{jid}$	消费者 $N_{jid}$ 的偏好系数

## 2.1 “价格制约”的双向拍卖

PC-DA 是在双向拍卖的基础上引入价格限制,用户超过范围的出价无法参与能源交易。微电网内部采用PC-DA进行产消者与消费者之间的P2P能源交易,PC-DA考虑交易双方出价的同时考虑能源数量。产消者分为3类:第1类生产能源全部自用;第2类生产能源除自用外,还将多余能源出售;第3类生产能源全部出售。假设微电网内部所有产消者以消费者类型进行P2P能源交易,则PC-DA均为消费者,无法产生匹配订单。假设微电网内部部分或全部产消者作为生产者类型进行P2P能源交易,则PC-DA既有生产者又有消费者,可能会产生匹配订单。因此,本文假设微电网内部产消者为第2类产消者,即自用的同时作为生产者将多余能源出售,参与能源交易。

在PC-DA过程中,参与能源交易的产消者 $M_{id}$ 依次发布 $s_{id}$ 和 $u_{id}$ ,消费者 $N_{jid}$ 依次发布 $b_{jid}$ 和 $v_{jid}$ 。首先,将产消者的 $s_{id}$ 按照从低到高依次排列,形成出售数组,其中出售价格小于微电网运营商的出售价格,即 $s_{id} < S_{id}$ ;同时,消费者的 $b_{jid}$ 按照从高到低依次排列,形成购买数组,其中购买价格大于微电网运营商的购买价格,即 $b_{jid} > B_{id}$ ;其次,判断出



售数组第 1 个元素的价格、能源数量与购买数组第 1 个元素的价格、能源数量是否满足要求,即是否同时满足  $s_{i_{id}} \leq b_{j_{id}}$  与  $u_{i_{id}} \geq v_{j_{id}}$ ; 最后,满足要求的交易双方形成匹配交易订单,然后依次进行迭代,直至不满足条件,剩余未进行匹配的用户将与微电网运营商进行交易,到此本轮交易结束。微电网内部的 PC-DA 如图 2 所示。

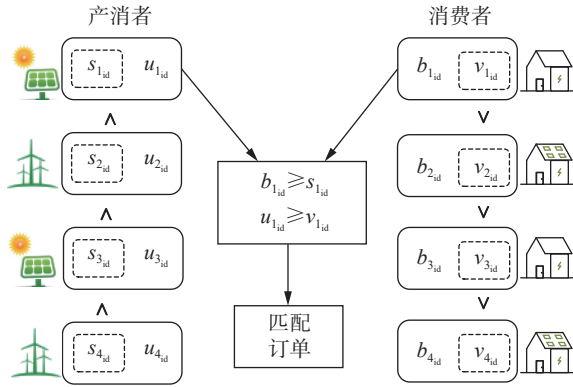


图 2 “价格制约”的双向拍卖

Fig. 2 Price constraints - double-sided auction

## 2.2 清算机制

清算机制的选择决定着交易双方的成交价格<sup>[23-24]</sup>。微电网运营商可以决定微电网的清算机制,为研究不同清算机制对用户满意度的影响,本文尝试采用 2 种清算机制进行分析,即平均价格清算机制和混合价格清算机制。

本文以智能合约标准 ERC20 为基本协议,将代币与能源价格采用汇率来进行换算。平均价格和混合价格均指的是现实世界货币,结算前需先兑换成代币,兑换机制为

$$t = r \times e \quad (1)$$

### 2.2.1 平均价格清算机制

平均价格 (average price, AP) 是指产消者  $M_{i_{id}}$  的  $s_{i_{id}}$  与消费者  $N_{j_{id}}$  的  $b_{j_{id}}$  两者平均值:

$$A_{i_{j_{id}}} = (s_{i_{id}} + b_{j_{id}}) / 2 \quad (2)$$

设置平均价格清算机制时间为 1 h, 该方式下 P2P 能源交易结束采用平均价格清算。当产消者出价与消费者出价相同时,则平均价格等于产消者出价等于消费者出价;当产消者出价大于消费者出价时,则无法形成匹配订单;当产消者出价小于消费者出价时,则根据两者的平均价格清算。

### 2.2.2 混合价格清算机制

混合价格 (mixed price, MP) 是指综合考虑产消者出价、消费者出价以及微电网价格得出的一种混合价格,这一价格表明混合价格不仅与产消者、消费者的出价有关,而且与微电网运营商的出售价格、购买价格有关。混合价格在平均价格

基础上进行微调,考虑微电网运营商出售价格与产消者出售价格的差值,消费者或产消者购买价格与微电网运营商购买价格的差值,前者差值越小表明产消者的收益越大,后者差值越大表明消费者或产消者的收益越大,因此,混合价格为

$$C_{i_{j_{id}}} = (s_{i_{id}} + b_{i_{id}}) / 2 - (S_{id} - s_{i_{id}}) / 2 + (b_{j_{id}} - B_{id}) / 2 \quad (3)$$

设置混合价格清算机制时间为 1 h, 该方式下 P2P 能源交易结束采用混合价格清算。

### 2.2.3 平均混合价格的清算机制

平均混合价格 (average price + mixed price, AP+MP) 是指 AP 与 MP 的平均值:

$$A_{i_{j_{id}}} + C_{i_{j_{id}}} = (A_{i_{j_{id}}} + C_{i_{j_{id}}}) / 2 \quad (4)$$

该 AP+MP 清算机制既考虑了产消者与消费者之间的平均价格,又考虑了 2.2.2 节中的混合价格,可以同时兼顾平均价格与混合价格,进一步提高用户的满意程度。设置基于 AP+MP 的价格机制清算时间为 1 h, 该方式下 P2P 能源交易结束采用反馈调整价格清算。

## 2.3 用户满意度反馈

### 2.3.1 产消者收益

产消者作为微电网一类特殊用户,自产自用的同时可将多余能源出售给其他用户<sup>[25]</sup>。因此,产消者作为生产者时收益包括出售能源给微电网内部用户、微电网运营商的收入以及投入有关设备的支出。产消者作为消费者时收益与普通消费者一致,具体参考消费者收益。产消者  $M_{i_{id}}$  作为生产者的收益  $I_{i_{id}}$  为

$$I_{i_{id}} = \sum_{j_{id}=1}^{n_{id}} p_{ij} u_{i_{j_{id}}}^a + B_{id} u_{i_{id}}^b - \ln \left( u_{i_{id}}^b + \sum_{j_{id}=1}^{n_{id}} u_{i_{j_{id}}}^a \right) \quad (5)$$

产消者投入有关设备的支出由于其特殊性无法用精确值进行衡量,故本文采用  $\ln$  函数描述产出能源与设备支出之间的关系。

### 2.3.2 消费者收益

消费者作为微电网一类普通用户,仅能购买能源,不能生产能源。消费者收益包括消费者购买能源所得效益以及从产消者或微电网运营商处购买能源的支出。则消费者  $N_{j_{id}}$  收益  $G_{j_{id}}$  为

$$\begin{cases} G_{j_{id}} = \lambda_{j_{id}} (a_{j_{id}} v_{j_{id}}^2 + b_{j_{id}} v_{j_{id}}) - S_{id} v_{j_{id}}^b - \sum_{i_{id}=1}^{m_{id}} p_{ij} v_{i_{j_{id}}}^a \\ \text{s.t. } v_{j_{id}} = v_{j_{id}}^b + \sum_{i_{id}=1}^{m_{id}} v_{i_{j_{id}}}^a \end{cases} \quad (6)$$

由于各消费者对能源喜好不同,购买相同能

源所得效益可能不同,为了计算方便,本文采用二次函数描述消费者购买能源与所得效益之间的关系。

### 2.3.3 用户满意度反馈度量方法

用户满意度反馈是指参与P2P能源交易的用户在本轮交易结束后针对该交易产生的满意程度,用户满意度反馈包括2类:产消者满意度与消费者满意度。其中,产消者满意度分为3部分:价格满意度、能源交易数量满意度和收益满意度。则产消者 $M_{id}$ 的满意度反馈值 $c_{id}$ 为

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{id} = \omega_{id} w_{id} - \mu_{id} x_{id} + \eta_{id} I_{id} \\ \text{s.t.} \\ \omega_{id} + \mu_{id} + \eta_{id} = 1 \\ w_{id} = \sum_{j_{id}=1}^{n_{id}} (p_{ij} - s_{id}) \\ x_{id} = u_{id} - \sum_{j_{id}=1}^{n_{id}} u_{ij}^a \\ B_{id} \leq p_{ij} \leq S_{id} \\ \forall i_{id} \in m_{id}, \forall j_{id} \in n_{id} \end{array} \right. \quad (7)$$

同理,消费者满意度反馈也分为3部分:价格满意度、能源交易数量满意度和收益满意度。则消费者 $N_{j_{id}}$ 的满意度反馈值 $d_{j_{id}}$ 为

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{j_{id}} = \phi_{j_{id}} y_{j_{id}} - \psi_{j_{id}} z_{j_{id}} + \gamma_{j_{id}} G_{j_{id}} \\ \text{s.t.} \\ \phi_{j_{id}} + \varphi_{j_{id}} + \gamma_{j_{id}} = 1 \\ y_{j_{id}} = \sum_{i_{id}=1}^{m_{id}} (b_{ij} - p_{ij}) \\ z_{j_{id}} = v_{j_{id}} - \sum_{i_{id}=1}^{m_{id}} v_{ij}^a \\ B_{id} \leq p_{ij} \leq S_{id} \\ \forall i_{id} \in m_{id}, \forall j_{id} \in n_{id} \end{array} \right. \quad (8)$$

## 3 基于智能合约的P2P能源交易

### 3.1 功能特征

本文所构建的基于智能合约的P2P能源交易主要分为5个核心功能:创建、交易、满意度、查询以及清算,简介如下。

**注册:**是指注册微电网、产消者以及消费者,它们均需由合约创建者完成,同时指定微电网运营商地址;产消者和消费者统一称为用户注册,且应指定用户类型(产消者或消费者)、隶属微电网编号以及用户地址。

**交易:**是指参与主体之间进行相互交易,主要包括产消者与产消者交易、产消者与消费者交易、产消者与微电网运营商交易以及消费者与微电网运营商交易。

**满意度:**是指微电网内部交易过程中,根据匹

配订单完成本轮P2P能源交易的产消者或消费者所产生的满意程度,并根据式(7)和式(8)分别计算产消者与消费者的满意度反馈值,然而,价格对满意度反馈值的影响主要表现在价格影响用户的收益,从而进一步影响用户的满意度反馈值,若价格的变化使得用户收益增加,则表明该成交价格对能源市场的反馈能力是正反馈,否则为负反馈。其中,正反馈表示该成交价格对能源市场是有益或无变化的,负反馈则表示该成交价格对能源市场具有一定损害。最后在交易结束后反馈给微电网运营商,可为后续能源交易起到参考作用。

**查询:**是指所有参与主体均可查询与能源交易相关的内容,包括微电网运营商的出售价格与购买价格、用户满意度反馈、参与主体购买与出售的能源数量与价格以及匹配交易订单等。

**清算:**是指在完成微电网内部交易或微电网外部交易之后,按照规定的清算机制计算金额,转换成代币后进行自动清算。

### 3.2 交易流程

基于智能合约的P2P能源交易步骤描述如下,流程如图3所示。

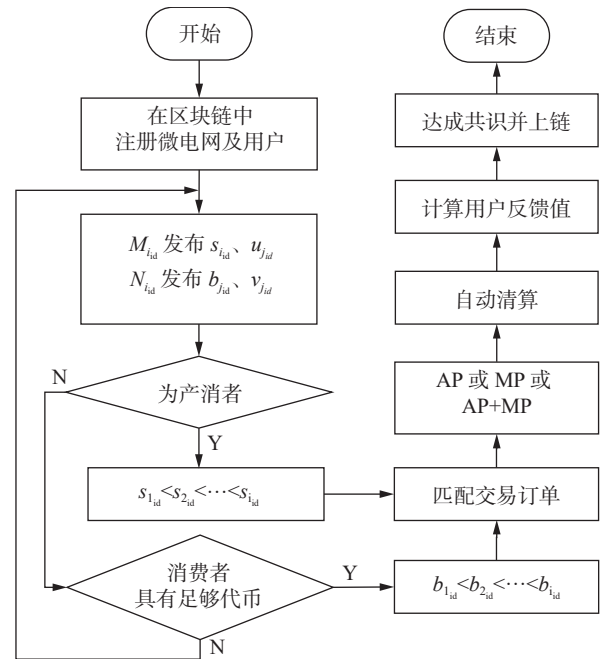


图3 基于智能合约的P2P能源交易流程

Fig. 3 Flow chart of peer-to-peer energy trading based on smart contracts

1) 合约创建者调用智能合约函数注册编号为 $id$ 的微电网,同时设置默认清算机制(AP或MP或AP+MP),并在该微电网下注册用户,即产消者和消费者,同时初始化微电网与用户。

2) 产消者 $M_{id}$ 调用智能合约函数发布 $s_{id}$ 和 $u_{id}$ ,

随后自动触发排序规则,按照  $s_{jid}$  从低到高排序加入出售数组;同理,消费者  $N_{jid}$  发布  $b_{jid}$  和  $v_{jid}$ ,并判断消费者  $N_{jid}$  是否有足够代币购买数量为  $b_{jid}$  的能源,若有足够代币,则自动触发排序规则,按照  $b_{jid}$  从高到低排序加入购买数组,否则消费者  $N_{jid}$  需重新报价或不参与本轮能源交易。

3)根据出售数组与购买数组一对一匹配,满足条件则生成交易订单,根据默认清算机制对交易订单进行自动清算。

4)交易订单清算完成后,计算所有参与本轮交易的产消者与消费者的满意度反馈值,从而微电网运营商可了解本轮交易用户的满意程度。

5)在达到规定时间后,负责打包的节点将形成的交易订单打包成区块,随后区块在网络中进行传播,等待共识节点达成共识后,将该区块进行上链处理,至此,本轮交易完成。

### 3.3 优越性

区块链的智能合约作为 P2P 能源交易的重要组成部分,在 P2P 能源交易中起着至关重要的作用,并具有一系列优点:

1)传统能源交易机制是在第三方作为交易中心的参与下完成的,而区块链与智能合约作为一种技术工具,打破了中心化的存在,为实现交易双方的 P2P 交易提供支撑,达到了去信任化的目标,实现了参与主体之间的点对点交易。

2)P2P 交易模型部署在智能合约上,有交易需求的用户可以注册身份参与能源交易,发布自身的需求后,只需等待智能合约对其进行撮合,无需人为干预,提高交易效率的同时降低了交易成本。

3)基于智能合约的自动清算机制,节省了大量人力、物力,并且交易双方无需担心付款等一系列问题。

4)交易订单最终存储在区块链上,且交易信息无法被篡改,若交易双方发生分歧时可以方便及时追溯。

## 4 算例分析

本文使用 solidity 语言编写智能合约函数,并将以太坊官方 remix 浏览器作为调试智能合约的工具,调试完成后,在本机下载 geth 客户端搭建区块链-私有链,并安装 MetaMask 钱包连接到私有链,同时利用 truffle 框架将测试成功的智能合约部署到链上,接下来用户可以调用智能合约函数注册用户,参与 P2P 能源交易。

首先注册一个编号 id 为 1 的微电网运营商,同时在该微电网下注册 10 个产消者与 10 个消费

者。产消者和消费者发布价格、能源数量如表 3 所示。另外,设置  $r=1$ 、 $\lambda_{ji}=1$ 、 $S_1=10$ 、 $B_1=4$ 、 $a_{ji}=0.4$ 、 $b_{ji}=0$ 。

表 3 用户发布的价格及能源数量

Table 3 User-published prices and energy quantities

$M_{iid}$	$S_{iid}$	$u_{iid}$	$N_{jid}$	$B_{jid}$	$v_{jid}$
$M_{11}$	5	30	$N_{11}$	10	45
$M_{21}$	8	50	$N_{21}$	8	48
$M_{31}$	7	35	$N_{31}$	5	30
$M_{41}$	10	40	$N_{41}$	9	25
$M_{51}$	4	50	$N_{51}$	8	33
$M_{61}$	7	30	$N_{61}$	7	35
$M_{71}$	6	45	$N_{71}$	6	50
$M_{81}$	9	25	$N_{81}$	5	45
$M_{91}$	10	55	$N_{91}$	4	40
$M_{101}$	5	38	$N_{101}$	8	30

### 4.1 交易流程

根据所构建的基于智能合约的 P2P 能源交易模型,用户匹配的交易订单如表 4 所示,其中,交易订单包括交易双方、成交能源数量和成交价格(AP、MP、AP+MP)。

表 4 用户的交易订单

Table 4 User transaction order

$M_{iid}$	$N_{jid}$	交易数量	AP	MP	AP+MP
$M_{51}$	$N_{11}$	45	7	7	7
$M_{51}$	$N_{41}$	5	6.5	6	6.25
$M_{11}$	$N_{41}$	20	7	7	7
$M_{11}$	$N_{21}$	10	6.5	6	6.25
$M_{101}$	$N_{21}$	38	6.5	6	6.25
$M_{71}$	$N_{51}$	33	7	7	7
$M_{71}$	$N_{101}$	12	7	7	7
$M_{31}$	$N_{101}$	18	7.5	8	7.75
$M_{31}$	$N_{61}$	17	7	7	7
$M_{61}$	$N_{61}$	18	7	7	7

由表 4 可知:达成交易意向的产消者和消费者出价均在  $(B_1, S_1)$  范围内,并且产消者可以与多个消费者进行交易,消费者也可以同多个产消者进行交易。同时表 4 给出了 3 种成交价格,分别为 AP、MP、AP+MP。

### 4.2 不同偏好系数的用户满意度反馈

能源成交数量、成交价格与收益不同程度地影响着产消者与消费者的满意程度。为了探究参数选择对用户满意度的影响,分别计算基于 AP、



MP 以及 AP+MP 不同偏好系数的用户满意度反馈, 偏好系数的选择分为 3 种情况, 如表 5 所示。

表 5 偏好系数  
Table 5 Preference coefficient

分类	$M_{id}$ 偏好系数选择	取值
情况1	$\omega_{id}$ 不变, 调整 $\eta_{id}$ 和 $\eta_{id}$	$\mu_{id}=0.1, \eta_{id}=0.5$ $\mu_{id}=0.5, \eta_{id}=0.1$
情况2	$\mu_{id}$ 不变, 调整 $\omega_{id}$ 和 $\eta_{id}$	$\omega_{id}=0.1, \eta_{id}=0.5$ $\omega_{id}=0.5, \eta_{id}=0.1$
情况3	$\eta_{id}$ 不变, 调整 $\omega_{id}$ 和 $\mu_{id}$	$\omega_{id}=0.5, \mu_{id}=0.1$ $\omega_{id}=0.1, \mu_{id}=0.5$
分类	$N_{id}$ 偏好系数选择	取值
情况4	$\varphi_{id}$ 不变, 调整 $\psi_{id}$ 和 $\gamma_{id}$	$\psi_{id}=0.1, \gamma_{id}=0.5$ $\psi_{id}=0.5, \gamma_{id}=0.1$
情况5	$\psi_{id}$ 不变, 调整 $\varphi_{id}$ 和 $\gamma_{id}$	$\varphi_{id}=0.1, \gamma_{id}=0.5$ $\varphi_{id}=0.5, \gamma_{id}=0.1$
情况6	$\gamma_{id}$ 不变, 调整 $\varphi_{id}$ 和 $\psi_{id}$	$\varphi_{id}=0.1, \psi_{id}=0.5$ $\varphi_{id}=0.5, \psi_{id}=0.1$

#### 4.2.1 基于 AP 的用户满意度反馈

在 AP 清算机制下, 分别对表 5 不同情况进行实验, 计算用户满意度反馈值, 结果如图 4、图 5 所示。

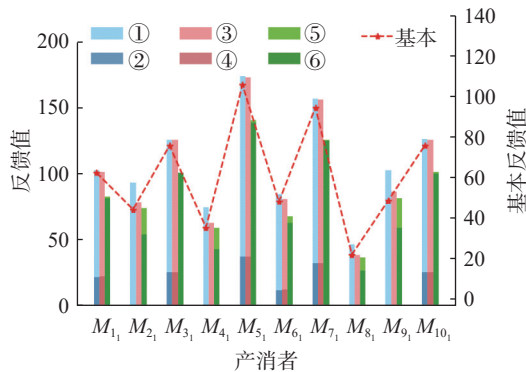


图 4 基于 AP 的产消者满意度反馈值  
Fig. 4 AP-based feedback values for prosumer

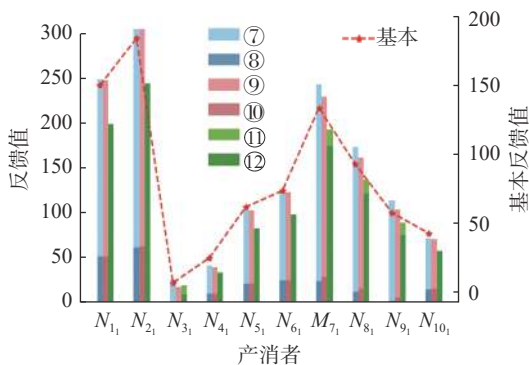


图 5 基于 AP 的消费者反馈值  
Fig. 5 AP-based feedback values for consumer

由图 4 可知, 对于第 1 种情况,  $\omega_{id}$  不变, 调整  $\mu_{id}$  和  $\eta_{id}$ ,  $\eta_{id}$  的值越大,  $\mu_{id}$  的值相应就越小, 即收益

反馈比例程度越大, 则产消者的满意程度越高; 对于第 2 种情况,  $\mu_{id}$  不变, 调整  $\omega_{id}$  和  $\eta_{id}$ ,  $\eta_{id}$  的值越大,  $\omega_{id}$  的值相应就越小, 即收益反馈比例程度越大, 则产消者的满意程度越高; 对于第 3 种情况,  $\eta_{id}$  不变, 调整  $\omega_{id}$  和  $\mu_{id}$ ,  $\omega_{id}$  的值越大,  $\mu_{id}$  的值相应就越小, 即价格反馈比例程度越大, 则产消者的满意程度越高。

由图 5 可知, 对于第 4 种情况,  $\varphi_{id}$  不变, 调整  $\psi_{id}$  和  $\gamma_{id}$ ,  $\gamma_{id}$  的值越大,  $\psi_{id}$  的值相应就越小, 即收益反馈比例程度越大, 则消费者的满意程度越高; 对于第 5 种情况,  $\psi_{id}$  变, 调整  $\varphi_{id}$  和  $\gamma_{id}$ ,  $\gamma_{id}$  的值越大,  $\varphi_{id}$  的值相应就越小, 即收益反馈比例程度越大, 则消费者的满意程度越高; 对于第 6 种情况,  $\gamma_{id}$  不变, 调整  $\varphi_{id}$  和  $\psi_{id}$ ,  $\psi_{id}$  的值越大,  $\varphi_{id}$  的值相应就越小, 即能源交易数量反馈比例程度越大, 则消费者的满意程度越高。

#### 4.2.2 基于 MP 的用户反馈值

在 MP 清算机制下, 分别对表 5 不同情况进行实验, 计算用户反馈值, 结果如图 6、图 7 所示。

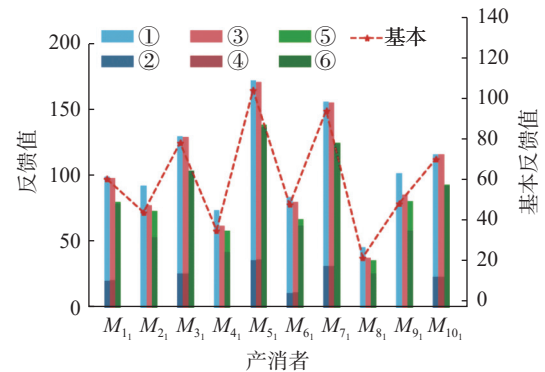


图 6 基于 MP 的产消者反馈值  
Fig. 6 MP-based feedback values for prosumer

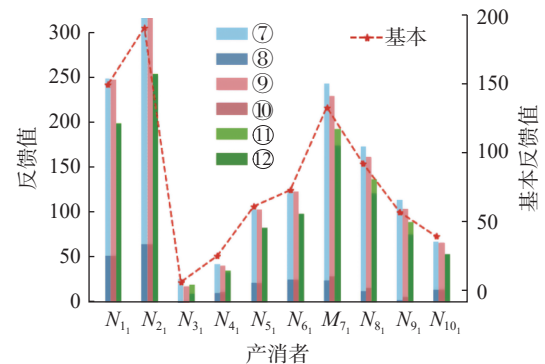


图 7 基于 MP 的消费者反馈值  
Fig. 7 MP-based feedback values for consumer

对于图 6, 与图 4 同理, 不同情况的参数选择影响着产消者的满意度反馈, 对比图 4, 基于 MP 的  $M_{11}$ 、 $M_{31}$ 、 $M_{51}$ 、 $M_{101}$  反馈值发生变化,  $M_{11}$ 、 $M_{51}$ 、 $M_{101}$  反馈值都有不同程度的降低, 而  $M_{31}$  反



馈值略有升高,这是因为 $M_{31}$ 的成交价格略有升高, $M_{11}$ 、 $M_{51}$ 、 $M_{101}$ 的成交价格略有降低。

对于图7,与图5同理,不同情况的参数选择影响消费者的反馈值,对比图5,基于MP的 $N_{21}$ 、 $N_{41}$ 、 $N_{101}$ 反馈值发生变化, $N_{21}$ 、 $N_{41}$ 反馈值都有不同程度的升高,而 $N_{101}$ 反馈值略有降低,这是因为 $N_{101}$ 的成交价格略有升高, $N_{21}$ 、 $N_{41}$ 的成交价格略有降低。

#### 4.2.3 基于AP+MP的用户反馈值

在AP+MP清算机制下,分别对表5不同情况进行实验,计算用户满意度反馈,结果如图8、图9所示。

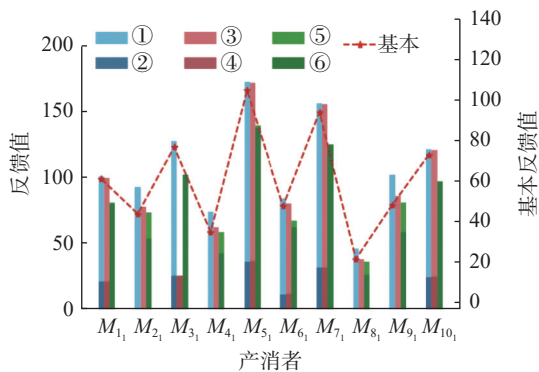


图8 基于AP+MP的产消者反馈值

Fig. 8 AP+MP-based feedback values for prosumer

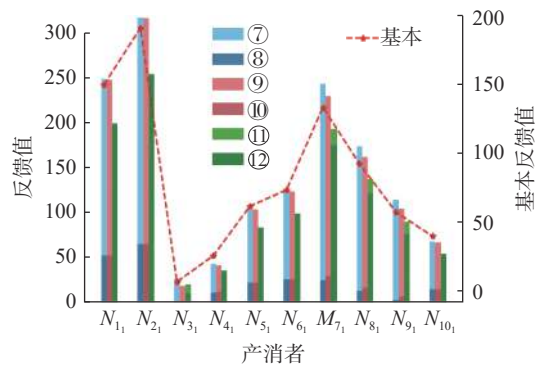


图9 基于AP+MP的消费者反馈值

Fig. 9 AP+MP-based feedback values for consumer

对于图8,与图4同理,不同情况的参数选择影响着产消者的满意度反馈,对比图4、图6,基于AP+MP的 $M_{11}$ 、 $M_{31}$ 、 $M_{51}$ 、 $M_{101}$ 反馈值发生变化,均在基于AP与基于MP之间,这是因为 $M_{11}$ 、 $M_{31}$ 、 $M_{51}$ 、 $M_{101}$ 的成交价格AP与MP之间。

对于图9,与图5同理,不同情况的参数选择影响着消费者的满意度反馈,对比图5、图7,基于AP+MP的 $N_{21}$ 、 $N_{41}$ 、 $N_{101}$ 反馈值发生变化,均在基于AP与基于MP之间,这是因为 $N_{21}$ 、 $N_{41}$ 、 $N_{101}$ 的成交价格AP与MP之间。

#### 4.3 不同清算机制的用户收益

为了进一步说明交易方式以及出清机制对用户收益的影响,对比其他方法,如表6所示。中心化交易未在区块链中运行,P2PET<sub>1</sub>、P2PET<sub>2</sub>、P2PET<sub>3</sub>、P2PET<sub>4</sub>分别表示点对点能源交易的方法1、方法2、方法3、方法4。其中,P2PET<sub>1</sub>基于AP进行结算功能;P2PET<sub>2</sub>基于MP进行结算功能;P2PET<sub>3</sub>基于AP+MP进行结算功能。

表6 不同方法的能源交易

Table 6 Different methods of energy trading

方法	匹配订单	清算机制	反馈机制	智能合约
中心化交易	直接交易	指定价格	无	无
P2PET <sub>1</sub>	PC-DA	AP	有	有
P2PET <sub>2</sub>	PC-DA	MP	有	有
P2PET <sub>3</sub>	PC-DA	AP+MP	有	有

由图10可知,相较于中心化交易模式,P2PET<sub>1</sub>、P2PET<sub>2</sub>和P2PET<sub>3</sub>的用户收益较高,表明与中心化交易成交价格相比,P2P交易的成交价格对能源市场是正反馈。另外,P2PET<sub>3</sub>的收益高于P2PET<sub>1</sub>和P2PET<sub>2</sub>,P2PET<sub>1</sub>和P2PET<sub>2</sub>收益相同,表明基于AP+MP的出清机制提高了用户的收益,并进一步说明了基于AP、MP与AP+MP的成交价格对能源市场是正反馈。同时,在P2P能源交易中,产消者将多余能源出售给其他用户,体现了可再生能源的就地消纳和高效利用。

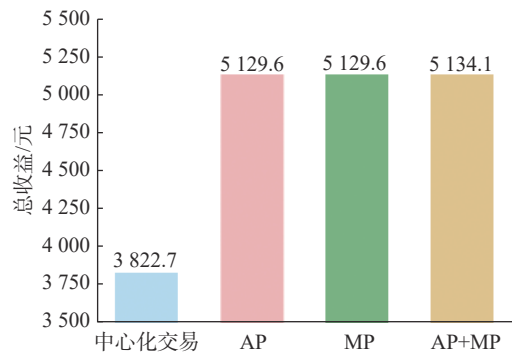


图10 不同方法的用户总收益

Fig. 10 Total user benefits of different approaches

## 5 结束语

P2P能源交易作为一种新兴交易模式,为产消者出售多余能源提供了可能。本文提出并构建了基于智能合约的P2P能源交易模型,采用多种出清方式进行结算,并设计了一种用户满意度反馈方法。算例仿真结果表明:不同出清机制下用户的满意程度与收益不同,并且基于智能合约的

P2P 能源交易收益大于与微电网直接交易所产生的收益,能够使得产消者的多余产能及可再生能源得到进一步利用。然而,本文未完全考虑到价格博弈的影响,后续研究工作将给予重点关注。

## 参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016–2030)[R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2016.  
National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC. The strategy of energy production and consumption revolution (2016—2030) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC, 2016.
- [2] YANG Xia, SONG Yonghua, WANG Guanghui, et al. A comprehensive review on the development of sustainable energy strategy and implementation in China[J]. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2010, 1(2): 57–65.
- [3] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555–581.  
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 555–581.
- [4] JIANG Cuiyuan, RU Chen. Application of blockchain technology in supply chain finance[C]//2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering. Piscataway: IEEE, 2020: 1342–1345.
- [5] WANG Renlan. Application of blockchain technology in supply chain finance in beibu gulf region[C]// International Wireless Communications and Mobile Computing. Piscataway: IEEE, 2021: 1860–1864.
- [6] MA Zhaofeng, WANG Lingyun, WANG Xiaochang, et al. Blockchain-enabled decentralized trust management and secure usage control of IoT big data[J]. *IEEE internet of things journal*, 2020, 7(5): 4000–4015.
- [7] 李萌, 刘文奇, 米允龙. 基于区块链的公共数据电子证据系统及关联性分析 [J]. 智能系统学报, 2019, 14(6): 1127–1137.  
LI Meng, LIU Wenqi, MI Yunlong. An electronic evidence system based on blockchain and correlation analysis[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2019, 14(6): 1127–1137.
- [8] 颜拥, 陈星莺, 文福拴, 等. 从能源互联网到能源区块链: 基本概念与研究框架 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 1–14.  
YAN Yong, CHEN Xingying, WEN Fushuan, et al. From energy Internet to energy blockchain: basic concept and research framework[J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(2): 1–14.
- [9] 周洪益, 钱苇航, 柏晶晶, 等. 能源区块链的典型应用场景分析及项目实践 [J]. 电力建设, 2020, 41(2): 11–20.  
ZHOU Hongyi, QIAN Weihang, BAI Jingjing, et al. Typical application scenarios and project review of energy blockchain[J]. *Electric power construction*, 2020, 41(2): 11–20.
- [10] 雷杰宇, 高仕斌, 韦晓广等. 基于股权分配的能源市场 P2P 能量共享交易模型 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8548–8562. LEI Jieyu, GAO Shibin, WEI Xiaoguang, et al. A shareholding-based energy sharing transaction model for energy market among peer-to-peer prosumers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(23): 8548–8562.
- [11] EHJAZ M, IQBAL M, ZAIDI S S H, et al. A novel scheme for P2P energy trading considering energy congestion in microgrid[J]. *IEEE access*, 2021, 9: 147649–147664.
- [12] 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.
- [13] 梁贺君, 韩景侔. 基于区块链的云计算资源去中心化交易共识机制研究 [J]. 计算机科学, 2019, 46(S2): 548–552.  
LIANG Hejun, HAN Jingti. Research on decentralized transaction consensus mechanism of cloud computing resources based on block chain[J]. *Computer science*, 2019, 46(S2): 548–552.
- [14] 李刚, 赵琳颖, 关雪, 等. 基于博弈策略的能源区块链安全交易机制 [J]. 电力建设, 2021, 42(12): 127–135.  
LI Gang, ZHAO Linying, GUAN Xue, et al. Security transaction mechanism of energy blockchain applying game strategy[J]. *Electric power construction*, 2021, 42(12): 127–135.
- [15] ZHOU Kaile, CHONG Jie, LU Xinhui, et al. Credit-based peer-to-peer electricity trading in energy blockchain environment[J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2022, 13(1): 678–687.
- [16] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望 [J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481–494.  
YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: The state of the art and future trends[J]. *Acta automatica sinica*, 2016, 42(4): 481–494.

- [17] 曾诗钦, 霍如, 黄韬, 等. 区块链技术研究综述: 原理、进展与应用 [J]. 通信学报, 2020, 41(1): 134–151.  
ZENG Shiqin, HUO Ru, HUANG Tao, et al. Survey of blockchain: principle, progress and application[J]. Journal on communications, 2020, 41(1): 134–151.
- [18] 陈子杰, 沈翔宇, 陈思捷, 等. 基于区块链的分布式能源交易物理-信息仿真平台 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 87–96.  
CHEN Zijie, SHEN Xiangyu, CHEN Sijie, et al. Blockchain-based cyber-physical simulation platform for distributed energy trading[J]. Automation of electric power systems, 2022, 46(10): 87–96.
- [19] CHE Liang, ZHANG Xiaping, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal interconnection planning of community microgrids with renewable energy sources[J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2017, 8(3): 1054–1063.
- [20] RAHBAR K, CHAI C C, ZHANG Rui. Energy cooperation optimization in microgrids with renewable energy integration[J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2018, 9(2): 1482–1493.
- [21] 林诗意, 张磊, 刘德胜. 基于区块链智能合约的应用研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2021, 38(9): 2570–2581.  
LIN Shiyi, ZHANG Lei, LIU Desheng. Survey of application research based on blockchain-smart-contract[J]. Application research of computers, 2021, 38(9): 2570–2581.
- [22] 范吉立, 李晓华, 聂铁铮, 等. 区块链系统中智能合约技术综述 [J]. 计算机科学, 2019, 46(11): 1–10.  
FAN Jili, LI Xiaohua, NIE Tiezheng, et al. Survey on smart contract based on blockchain system[J]. *Computer science*, 2019, 46(11): 1–10.
- [23] KAJAAN N A M, SALAM Z, RADZI R Z R M. Review of market clearing method for blockchain-based P2P energy trading in microgrid[C]//2021 IEEE Conference on Energy Conversion. Piscataway: IEEE, 2021: 202–207.
- [24] OKWUIBE G C, ZADE M, TZSCHEUTSCHLER P, et al. A blockchain-based double-sided auction peer-to-peer electricity market framework[C]//2020 IEEE Electric Power and Energy Conference. Piscataway: IEEE, 2021: 1–8.
- [25] WAN Ziqian, XUAN Lin, XIANG Rui, et al. Study on the electricity transaction of DG prosumer under different settlement modes[C]//2021 China International Conference on Electricity Distribution. Piscataway: IEEE, 2021: 1006–1009.

### 作者简介:



李刚, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力人工智能、能源区块链、故障预测与健康管理。主持国家自然科学基金项目、河北省自然科学基金项目、河北省重点研发计划等 10 余项, 授权发明专利 11 项, 发表学术论文 50 余篇, 出版专著 2 部。



关雪, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电网与大数据、能源区块链。



杨会峰, 教授级高级工程师, 主要研究方向为网络和数据安全、大数据分析、能源互联网。