[文章编号] 1003－4684(2026)01-0050-07

基于联盟区块链的可再生能源消纳凭证交易方案

张 炎，周先军，王 茹

（湖北工业大学电气与电子工程学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 可再生能源超额消纳凭证交易激发了用户对绿色电力的需求潜力，促进了绿色电力行业的发展。然而，传统中心化的交易模式在处理海量、高频的凭证交易时，暴露出公平性、效率和安全性等方面的不足。因此，依据凭证交易机制提出一种弱中心化的多方交叉交易方案。首先，以凭证交易的利益最大化为目标函数，构建多方交易的合作博弈模型；其次，根据交易主体的供需量及报价匹配交易对象，计算合作博弈总利润，并利用 Shapley 值法和核仁法求解总利润的分配向量，比较两个分配向量的合理性，得到凭证交易机制的最优参考价格。通过构建基于联盟链的弱中心化多主体凭证交易平台，设计智能合约并优化共识机制以实现高效可靠的交易流程。最后，在 Hyperledger Fabric 1.0 上进行算例测试，实验结果验证了本方案的可行性与有效性。

[关键词] 凭证交易；联盟链；合作博弈；核仁法

[中图分类号] TM73 [文献标识码] A

随着中国可再生能源消纳责任权重制(renewable portfolio standards，RPS)的正式施行，2021 年 1 月北京电力交易中心发布首份《可再生能源电力超额消纳量交易规则(试行)的通知》(以下简称《通知》)。RPS 赋予了超额消纳量经济价值，使超额完成消纳责任的市场主体与未完成消纳责任的市场主体之间产生了相互交易的契机。《通知》规定，市场主体实际消纳可再生能源总量超出最低消纳责任权重的部分即为超额消纳量[1]，每 1 MW·h 超额消纳量生成一个可再生能源电力超额消纳凭证(excess consumption certificate，ECC)作为超额消纳量交易的标的物和消纳责任权重的核算依据，具有唯一编码，不足 1 MW·h 部分的消纳量不再生成可再生能源电力 ECC[2]。ECC 作为一种新兴的可再生能源交易衍生产品，其交易市场越大，越有利于激发用户需求响应潜力，促进可再生能源的消纳。然而，现有的中心化交易模式存在交易效率低，安全性差和公平性不足的问题。

区块链技术以计算机代码实现在多主体间构建信任关系，具有去中心化、公开透明、可追溯和防篡改等特性[3]。当前，国内外针对区块链技术与能源领域结合的研究已有众多学术成果。文献[4]从供需匹配的稳定性和可再生能源的优先级角度出发，设计了一种基于区块链的 VPP 交易机制，解决了 VPP 调度困难、交易效率低的问题。文献[5]提出了一种基于联盟区块链的分布式可再生能源交易认证机制，在交易网络中设置证书授权节点，通过控制交易参与者的公钥和私钥为节点提供访问权限，从而完成身份认证，解决了电力机构对用户监管的难题。文献[6]提出了一种基于区块链智能合约技术的去中心化分布式能源交易机制，该机制包括审计、竞价、清算和结算等功能，可实现产消者之间的 P2P 能源交易。文献[7]构建了一个基于区块链的超额消纳凭证交易平台，解决了交易的准确追踪、验证和数据账本的安全性问题。

上述研究仅针对交易效率和交易数据安全性问题，忽略了能源交易方式的公平性问题。文献[8]基于合作博弈理论提出了一种双边 Shapley 的输电成本分配方法，解决了输电扩容规划中的成本分摊问题。文献[9]提出了一种采用合作博弈理论和 Shapley 值的方法来分析使用虚拟发电厂(VPP)对电厂和需求双方都有利的可行性问题。文献[10]提出了基于合作博弈理论的风、光、水、氢多主体能源系统增量效益分配策略，采用 Shapley 值法和 Aumann-Shapley 值法将增量效益公平合理地分摊给各合作主体，优化能源调度模型。上述文献考虑了

[收稿日期] 2023－04－23

[基金项目] 国家自然科学基金(61901165，61601177)；湖北省自然科学基金项目(2019CFB530)

[第一作者] 张 炎(1995－)，男，湖北黄冈人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为能源区块链。

[通信作者] 周先军(1971－)，男，湖北武汉人，湖北工业大学副教授，研究方向为无线网络、移动通信。

合作博弈联盟交易成本的整体合理性,但缺少对用户个体合理性因素的考虑。

针对上述问题,本文在合作博弈的基础上,进一步探究了 ECC 交易中联盟成员利润分配的个体合理性;并结合区块链技术实现了一种弱中心化的多方交叉 ECC 交易方案,解决了现有中心化交易模式存在的交易公平性、交易效率和交易数据安全性等问题。

1　ECC 交易主体合作博弈模型

1.1　模型的构建

在本文提出的 ECC 交易策略的合作博弈模型中,联盟合作利润分配被定义为一个 n 人决策问题 $W[N, V]$。其中,N 表示全体联盟成员的集合,即 $N=\{1,2,\cdots,n\}$;V 为特征函数即联盟成员通过协调合作所能获得的最大利润值,联盟利润的分配向量为 $x=\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$。设 Z 为 n 个市场主体组成的联盟,联盟的合作博弈利润 $V(Z)$ 为联盟中所有交易利润的总和,交易利润为双方的成交量与双方的报价差之积。由于用户的交易需求量是固定的,买家与卖家的报价差越大,合作博弈利润就越大,联盟成员分得的利润就越多,交易双方达成交易的意愿也就越强烈。此外,本文采取多方交叉交易模式,使买家和卖家能够同时与多个交易对象展开交易。交易量大的一方可以按报价差从大到小的顺序与多人进行交易,组建合作博弈联盟。在交易量大的一方完成交易后,联盟内未完成交易量的用户将按照同样的原则继续组织交易,直至所有买家的报价小于或等于所有卖家的报价。需要说明的是,交易中任意一方在完成其所需交易量后将不再继续参与交易,因此与其他合作对象的交易利润为零。

1.2　模型求解

当前,主要采用 Shapley 值法和核仁法选取合作博弈的解,即分配向量,为各个联盟成员合理分配利润。

1.2.1　基于 Shapley 值法的利润分配　Shapley 值法是一种解决 n 人合作中利益分配问题的数学方法,它按照成员对联盟的边际贡献率将利益进行分配[11]。任一成员加入联盟后,从 $V(Z)$ 中分得的利润可以表示为:

$$x_i=\sum_{Z\in N,i\in Z}\frac{(Z-1)!\ (n-Z)!}{n!}[V(Z)-V(Z-\{i\})] \tag{1}$$

式中:$Z-\{i\}$ 表示不包含成员 i 的联盟。

然而,博弈者在联盟中所得到的分配应当取决于其在联盟中的贡献,而非其加入后带来的联盟效用值的边际变化量。用 Shapley 值作为分配的方法,并不能得到完全合理的分配方案。依据本文第 3 节中的实验算例可知,基于 Shapley 值法的利润分配结果不能保持联盟的稳定。

1.2.2　基于核仁法的利润分配　核仁法的基本思想是在分配属于核仁的条件下,最不理想的联盟也要优于任何其他分配向量的最不理想的联盟[12]。每个博弈有且仅有一个核仁。因此,通过核仁法求出的博弈解必定唯一且可行。核仁法将超出值看作联盟对分配向量的满意程度,定义 $e(Z,x)$ 是联盟 Z 关于分配向量 $\boldsymbol{x}$ 的超出值,可用公式表示为:

$$\begin{aligned} e(Z,\boldsymbol{x})&=V(Z)-\sum_{i\in Z}x_i\\ V(Z)&=\sum_{\Delta PC\in\Delta PZ}\Delta P_C\cdot Q_C \end{aligned} \tag{2}$$

式中:$\sum_{i\in Z}x_i$ 为实际分配给联盟成员利润的总和;V(Z)为联盟 Z 的全体成员的总利润;ΔP_C 为 ECC 买卖双方的报价差;ΔP_Z 为联盟 Z 内所有成员报价差的集合;Q_C 为交易的成交量。

根据核仁法的基本思想,为使分配的满意度最大即超出值最小,应尽可能使 $e(Z,x)$ 的最大值最小。因此,基于核仁法的利润分配可定义如下:

$$e(Z,\boldsymbol{x})=\min_{x\in X}\{\max_{Z\in N}e(Z,\boldsymbol{x})\} \tag{3}$$

式中:X 表示交易博弈问题中的所有分配向量 $\boldsymbol{x}$ 的集合。

根据上述定义将博弈问题转化为式(4)所示的线性规划问题,对分配向量 $\boldsymbol{x}$ 进行求解。

$$\begin{cases}\min\varepsilon\\ \text{s.t. }\varepsilon\geqslant V(Z)-\sum_{i\in N}x_i\\ \sum_{i\in Z}x_i=V(Z)\end{cases} \tag{4}$$

式中:ε 为任意小实数,表示成员对联盟的不满意度;N 为 2^n 种不同的联盟构成模式的集合。

由于核仁法保证了多人合作博弈中的任一参与者在对其最不利的分配方案中仍能获得利益最大的结果,从而在确保合作联盟顺利运行的基础上实现个体理性与集体理性的帕累托最优原则。因此,本文运用核仁法公平、合理地分摊 ECC 交易联盟中的利润。

1.2.3　计价函数　根据各联盟成员在合作博弈交易中的不同身份,将分配向量 $\boldsymbol{x}$ 分为 x_{S_i} 和 x_{R_j}。其中,x_{S_i} 为联盟内第 i 个卖方分配到的利润;x_{R_j} 为联盟内第 j 个买方分配到的利润。ECC 最终交易价格 $P_{S_iR_j}$ 的计算公式如下:

$$\begin{aligned} x_{S_i}&=\sum_{\Delta PS_iR_j}(P_{S_iR_j}-P_{S_i})\cdot Q_{S_iR_j}\\ x_{R_j}&=\sum_{\Delta PS_iR_j}(P_{R_j}-P_{S_iR_j})\cdot Q_{S_iR_j}\end{aligned} \tag{5}$$

式中：P_{S_i} 为售卖商 i 的售卖报价；P_{R_j} 为购买商 j 的购买报价；$Q_{S_iR_j}$ 为两者的成交量。

经过以上准备，算法 1 被提出，具体如表 1 所示。

表 1 最优超出值求解算法

算法 1	最优超出值求解算法
输入：	所有分配向量 $\boldsymbol{x}$ 的集合 X，2^n 种不同的联盟模式构成的集合 N
输出：	最优超出值对应的分配向量 $\boldsymbol{x}$
1	计算 $V(Z)=\sum_{\Delta PC\in\Delta PZ}\Delta P_C\cdot Q_C$
2	计算 $e(Z,x)=V(Z)-\sum_{i\in Z}x_i$
3	查找 $\min_{x\in X}\{\max_{Z\in N}e(Z,x)\}$
4	end

2 基于区块链的 ECC 交易方案实现

2.1 区块链平台选择

区块链技术具有去中心化、可追溯和不可篡改等特性，按照参与准入机制级别的不同，可把区块链分为公有链、联盟链和私有链三类。其中，公有链完全去中心化，任何人都可以参与区块链的维护和数据读取，但其能耗高且不可控；私有链仅对单独的个人或实体开放，不适合 ECC 交易场景；联盟链的去中心化程度介于公有链和私有链之间，适用于特定行业或群体。联盟链与 ECC 交易方案之间具有诸多契合点，具体如表 2 所示。

表 2 联盟链与分布式能源交易方案的契合点

联盟链特性	与 ECC 交易方案的契合点
准入机制	保证了节点的合法性、安全性
高效的共识机制	可减少区块验证时间，提升交易效率
无需高昂的激励机制	减少用户交易成本
弱中心化	避免传统中心化存在的单点故障风险

此外，联盟链中的数据读取权限是分级别的。联盟链节点分为全节点和轻节点两类：全节点保存了历史完整的交易信息，对区块链具有读写权限且全程参与共识过程；而轻节点只保存与自身相关的交易信息，不参与共识过程，只具有读取权限。轻节点需要通过相关协议（如简单支付验证协议（simple payment verification，SPV）[13]）向全节点发送读取请求，来确认与自身相关的交易是否成功写入区块链。该措施不仅提高了交易数据的安全性而且减小了用户的存储压力。Hyperledger Fabric 作为当前应用最为广泛的联盟链平台，可运行多功能的智能合约且技术较为成熟，能有效降低方案实现的开发难度。为此，本文选取 Fabric 联盟链作为方案的实现平台。

2.2 方案架构

本文基于 Fabric 1.0 联盟链平台设置 ECC 售卖节点（certificate selling node，CSN）、ECC 购买节点（certificate purchase node，CPN）、交易中心（trading center，TC）和监管节点（supervision node，SN）四类不同的主体，其整体架构如图 1 所示。

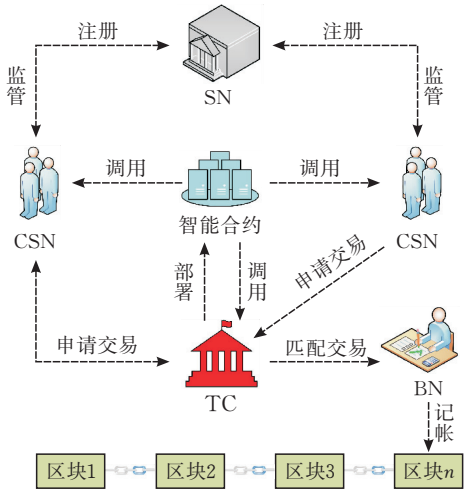

图 1 方案架构

CSN：由超额完成年度可再生能源最低消纳量的市场主体充当。

CPN：由未完成年度可再生能源最低消纳量的市场主体充当，可根据自身实际需求向 CSN 购买对应类型和总量的 ECC。

TC：省内交易时，由各省电力交易中心充当；省外交易时，由北京、广州电力交易中心充当。其主要工作是为承担消纳责任的市场主体提供消纳量的计算和分摊等辅助任务。

SN：由国家能源交易监管部门充当，其主要负责管理用户注册信息和消纳责任权重账户的设立；同时实时监管交易数据和各参与主体是否存在非法交易行为（如：扰乱市场秩序、交易数据不真实等）。

需要说明的是，CSN 和 CPN 为轻节点，而 BN、TC 和 SN 为全节点。全节点通过共识机制选出每一轮的记账节点（billing node，BN），BN 打包交易，创建新区块，其他全节点验证新区块的合法性。

2.3 智能合约

智能合约本质上是一种用计算机语言替代法律语言记录条款，并在区块链数据库上运行的计算机程序，可以在满足其源代码设定条件下自行执行[14]。本节将按照交易周期内的时间顺序对相关的 ECC 智能交易合约做详细介绍，各交易主体的执行逻辑如图 2 所示。

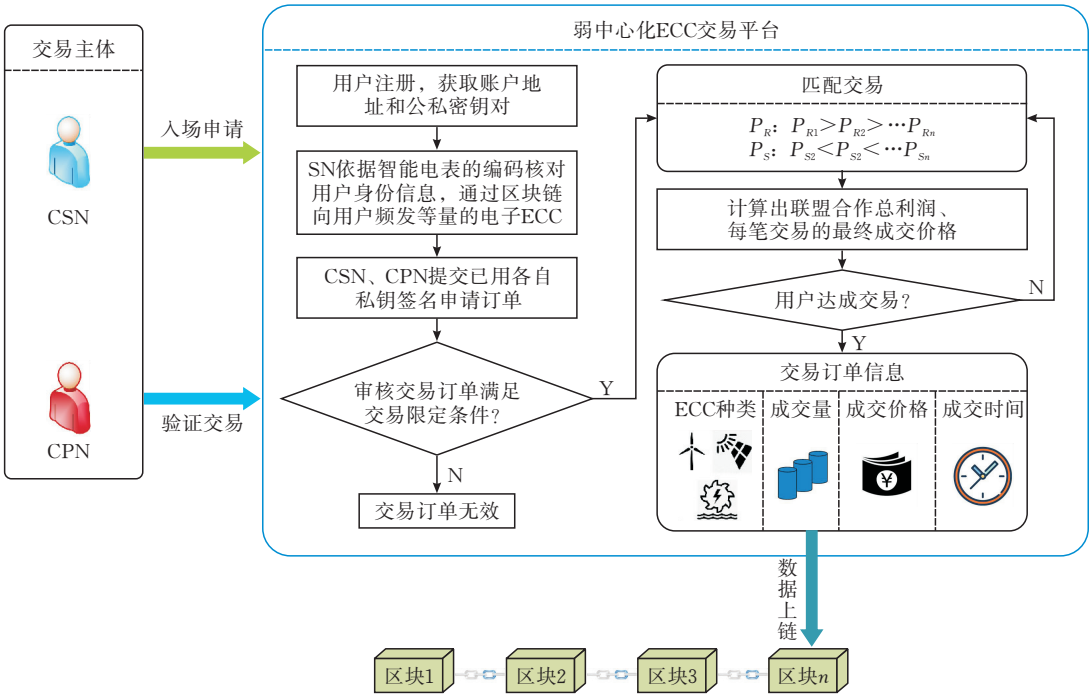

图 2　基于 ECC 交易的合约执行逻辑流程

2.3.1　用户注册　所有市场参与主体在加入联盟链进行交易之前，必须先向 SN 申请注册备案以获得入网许可，具体流程如下：

1）根据安全参数，SN 生成自己的主私钥（master private key，MPK）。

2）CPN 和 CSN 向 SN 提出入网申请，获取在交易网络中相应的属性集（attribute set，AS），包括身份标识、用户类型（轻节点或全节点）、用户权限以及用户的钱包地址等信息。

3）SN 根据各单元属性集，利用自己的 MPK 为各单元颁发私钥（private key，PK），并通过安全信道发送给各个用户。

2.3.2　ECC 的核发与验证　首先，智能电表预先设置市场主体的最低消纳量数值，并实时记录市场主体的可再生能源消纳量。当市场主体实际消纳量超过最低消纳量后，电表开始记录超额消纳量数值。其次，当市场开展 ECC 交易时，智能电表通过数据通信的方式向 SN 反馈用户一个周期内的实际消纳量和超额消纳量数值。SN 依据智能电表的编码核对用户身份信息，通过区块链向用户颁发等量的电子 ECC，并用其私钥签名。ECC 信息包含电量类型、消纳时间、消纳主体的私钥签名、SN 的私钥签名等信息。最后，用户的电子 ECC 数据更新并记录上链。需要说明的是：智能电表能检测出表箱开启、接线的变动、表计软件的更新等事件，一旦发生上述事件，智能电表将向 SN 报警，SN 可根据智能电表的编号快速查找到对应的用户身份，该用户将被禁止交易，并处罚款。参与交易的市场主体可通过调用 ECC 验证合约来验证售卖方的电子 ECC 是否真实有效，主要检查电子 ECC 是否有 SN 的私钥签名。

2.3.3　申报交易　为避免 ECC 成为金融炒作的工具，《通知》规定了 ECC 交易限定条件：1）市场主体在自身消纳责任权重和所在省级行政区消纳责任权重均完成的前提下，方可向外省市场主体出售 ECC，由此可将 ECC 交易分为省内交易和省外交易两种。2）ECC 只允许交易一次且成交后不能再次出售。

在进行交易时，CSN 和 CPN 各自创建交易订单并用 PK 签名后发送给 TC，订单信息包含 ECC 售价或购价、交易量、ECC 的类型和编码等信息。首先，TC 调用交易分类合约，将本轮交易周期内的所有交易申请订单按不同类型进行分类。然后，全网节点核查各交易对象是否满足省外交易条件或参与交易的 ECC 是否为二次交易。不满足交易限定条件的订单均为无效订单。

2.3.4　交易匹配　用户调用报价排序合约将买方价格从高到低排序形成集合 $P_R=\{P_{R1}, P_{R2}, \cdots, P_{Rn}\}$，而卖方价格从低到高排序形成集合 $P_S=\{P_{S1}, P_{S2}, \cdots, P_{Sm}\}$。依据用户不同的报价情况，交易匹配合约将分类处理，具体情况如下：

1）$P_S<P_R$，表示当前所有买方报价高于所有卖方报价，合作博弈总利润大，用户合作意愿强烈，合作博弈联盟关系稳固，ECC 交易可完全执行，直到任意一方集合为空。

2）$P_S>P_R$，表示当前所有买方报价低于所有

卖方报价，交易无法执行，继续等待新的报价出现。

3）$P_{Sm} \geqslant P_{R1} \geqslant P_{S1} \geqslant P_{Rn}$，表示买方报价与卖方售价集合有部分重合。设重合元素为 P_{Rx}，则 $1 \leqslant x \leqslant n$，集合 $P_R = \{P_{R1}, \cdots, P_{Rx}\}$可参与合作博弈交易，直到 P_R 集合进行到 $P_{Rx} = P_{Sm}$ 处，停止匹配交易，等待新的报价出现。

因此，为保障合作博弈联盟交易的有效进行，双方报价应满足 $P_{Sm} < P_{Rn}$。

2.3.5 交易结算 合作博弈的联盟成员匹配成功后，用户调用计价合约，计算出联盟合作总利润和联盟内每笔交易的最终成交价格 P_F。本文设置了一个交易确认合约，对交易的确认或拒绝非常有利，如表 3 所示。CSN 和 CPN 依据合约给出的 P_F 考虑是否达成交易。若同意达成交易，则调用交易确认合约达成交易，交易双方用自己的私钥对订单签名；若一方拒绝达成交易，则撤单，等待下一次交易匹配。用户达成交易后，订单信息通过 P2P 网络发送至全网验证，由预先选定的少数全节点执行共识过程，BN 打包交易形成新区块并向全网广播。验证通过后，新区块上链，完成转账，交易结束。

需要说明的是，上述 ECC 验证合约、交易分类合约、报价排序合约、交易匹配合约、计价合约和交易确认合约均由 TC 写入，除交易匹配合约和计价合约需要收取部分费用外，其余四个智能合约均可重复调用且调用费率为零。

表 3 交易合约确认

算法 2	交易确认算法
输入	P_R，P_S 和 P_F
输出	CPN 和 CSN 的私钥签名
1	if $P_R < P_F < P_S$ then
2	Result ←Accept
3	else
4	Result ←Reject
5	end if

2.4 共识过程

共识机制主要解决分布式网络中如何选取记账节点和同步数据两个问题，使互不信任的节点之间达成共识，保障数据的正确性和一致性。因此，共识机制的优劣直接影响着区块链系统的去中心化程度、交易效率和安全性。本文采取联盟链作为方案实现平台，其共识过程如下：

1）记账节点的选取 由于联盟链为许可链，故共识过程只能由特定业务环境中的部分获准成员执行。因此，本文方案中的 BN 均由政府背书的可信市场主体充当（如：电网企业、大型配售电公司和电力交易中心等），避免了传统中心化系统存在的单点故障风险。同时将挖矿难度设定为一个适当的固定值，避免挖矿计算量过大的问题，再由少数预选全节点争夺记账权；最先找到随机数（Nonce）的全节点为 BN，由其打包交易池中的交易形成新区块。

2）新区块的验证 BN 通过 P2P 网络将新区块发送给其他全节点验证新区块的合法性。若未通过验证，则 BN 将进一步分析验证结果，将非法交易剔除后重新向其他全节点发送新区块数据以供验证。全节点验证通过后，新区块上链，全网同步区块链数据信息，BN 获得出块奖励。

3 算例分析

实验基于一组实例，对用户参与合作博弈前后的 ECC 交易价格进行比较，并对基于 Shapley 值法和核仁法的合作博弈交易价格的整体合理性和个体合理性进行对比分析。此外，还与现有两个交易模型的交易效率进行比较分析。

3.1 实验环境设置

为了分析本文 ECC 交易模型的相关特点，在 Ubuntu 16.04 环境下，基于超级账本（Hyper- ledger Fabric 1.0）技术建立了仿真平台，硬件参数如下：16 GB 内存，i5-6500 CPU 和 GeForce CT730 显卡。

3.2 ECC 交易价格分析

本文通过一个实例对 ECC 交易价格进行分析验证，并根据全国绿证交易平台数据[15]，以光伏绿证的平均交易价格（49～65 元/张）为参考设置 ECC 的交易价格，具体数据如表 4 所示。

表 4 用户订单信息

用户	交易申报量/个	报价/元
S_1	200	56
S_2	100	58
S_3	150	57.5
S_4	200	59
S_5	120	59.5
R_1	100	65
R_2	150	62
R_3	80	64
R_4	230	63.5
R_5	200	61.5

根据 ECC 交易的合作博弈策略，对上述订单进行价格排序，并依次匹配交易对象。

其中，Q_S、P_S 分别为 CSN 的售卖量（个）和售价（元/个）；Q_R、P_R 分别为 CPN 的购买量和购买价。由表 4 可知，此时单一的 ECC 售卖节点或单一的购买节点均无法独立匹配交易。于是，双边交易的参与者将同时与多个合作对象进行合作博弈。由于售卖节点 S_1 的售卖量比购买节点 R_1 大，故而他需要与 R_1、R_3 和 R_4 同时展开交易，则合作博弈联盟 $U = \{S_1、R_1、R_3、R_4\}$。对合作博弈联盟的总利润进行

求解。

$$V(U)=(P_{R1}-P_{S1})\cdot Q_{R1}+(P_{R3}-P_{S1})\cdot Q_{R3}+(P_{R4}-P_{S1})\cdot(Q_{S1}-Q_{R1}-Q_{R3})=1690(\text{元}) \tag{6}$$

本文分别采用上节中所述的核仁法和 Shapley 值法，计算联盟 U 的利润分配向量，此处需借助数学工具 Matlab 进行求解。结果见表 5。

表 5　联盟 U 的利润分配

用户	核仁法分配的利润/元	Shapely 值法分配的利润/元	ECC 交易量/个
S_1	1419.68	1421.24	200
R_1	125.50	126.52	100
R_3	124.82	125.8	80
R_4	20.00	16.44	20

再根据公式(5)求出联盟中各笔 ECC 交易的最终成交价，并与各联盟成员未参与合作博弈之前的交易价格相比较，结果见表 6。

表 6　ECC 交易价格对比　　元

用户	报价	博弈后的价格-核仁法	博弈后的价格-Shapely 值法
R_1	65.00	63.67	63.73
R_3	64.00	62.5	62.4
R_4	63.50	62.4	62.7

由表 6 可见，按 Shapley 值法和核仁法得到的分配结果都是 R_1，R_3 和 R_4 参与合作博弈后的交易价格低于各自单独交易时的价格(报价)，满足了联盟整体合理性。然而通过 Shapley 值法获得的分配结果将使 R_4 的合作交易价格高于 R_3(62.7 > 62.4)，破坏了交易的顺序，R_4 不再有合作的意愿，他将和 R_3 竞争与 S_1 交易的优先权，联盟利益结构将被打乱，合作联盟 U 也将不能保持稳定。因此，采用 Shapley 值法得到的分配结果不满足个体理性条件。基于核仁法获得的利润分配结果没有使联盟成员的合作交易价格发生倒序，合作博弈联盟关系稳固，分配结果满足个体合理性，显著优于 Shapley 值法。

综上，本文采取弱中心化的多方交叉交易方案，依据双方的报价差和交易量匹配最优交易对象，实现联盟的利益最大化。再利用核仁法分配联盟利益，能够在保障合作博弈顺利进行的同时，使联盟成员均获得最优交易价格，大幅提升双方的交易意愿。此外，本文交易方案无需因买卖双方交易量的不同而多次磋商，大大缩短了交易的谈判时间，提升了交易效率。在本文所给实例中还可继续组成合作博弈联盟 $U_1=\{R_4,S_3,S_2\}$、$U_2=\{S_2,R_2,\cdots\}$，直至联盟无法获得利润($P_R \leqslant P_S$)。

3.3　ECC 交易效率对比

根据全国电力市场的运营情况和参与 ECC 交易的市场主体数量可知，当前每日(7.5 h)的 ECC 交易量大约为 10 万笔，其平均交易速度为 3.7 笔/s[9]。ECC 交易效率受限于系统的交易延迟时间，考虑本文联盟链的节点规模远小于公链，设定一个共识节点完成交易验证所需的时间为 3 s。实验在 10 个共识节点的区块链规模下，通过设置不同的交易并发量，来观察本文交易模型的延迟时间和吞吐量的变化情况，其结果如图 3 所示。

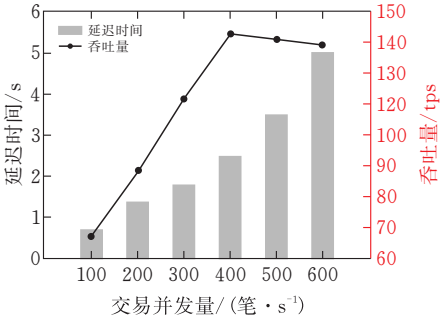

图 3　交易时延和吞吐量

实验结果表明，本文交易模型的交易延迟时间会随着交易并发量的增大而延长。另一方面，随着交易并发量继续增大，系统的交易吞吐量也逐渐提升，当交易并发量达到 400 笔/s 以上时，交易吞吐量缓慢降低，此时吞吐量达到当前系统吞吐量的上限。由于区块链系统的交易吞吐量受限于硬件的读写速度，测试环境下，系统吞吐量上限为 145 TPS。依据上述实验结果可知，本文交易模型在交易延迟和交易吞吐量方面相较于比特币和以太坊交易模型有较大提升，这是由于本文交易模型的共识过程仅由少数获准全节点执行，极大地简化了共识过程，缩短了每一轮共识验证的时间。另一方面，在本文交易模型中，智能合约自动执行分布式电力交易的分类排序、订单匹配和资金结算等程序，使得交易完成所花费的时间进一步减少，交易效率也远高于现有中心化交易模型。当前，随着可再生能源超额消纳量交易市场的不断扩大，ECC 交易量也会逐渐增多，故本文方案具有更强的适用性。

4　结束语

基于我国可再生能源消纳责任权重制政策，本文采用 Fabric 联盟链技术设计了一种弱中心化的 ECC 合作博弈交易方案，能够为解决当前中心化 ECC 交易系统中存在的交易公平性不足、交易效率不高和交易数据安全性差等问题提供参考。实验结果表明，该方案的 ECC 交易价格满足整体合理性和个体合理性，平衡了买卖双方的利益，提高了系统交易效率，保障了交易数据的安全性。因此，本文方案更符合 ECC 交易的场景。

本文的开发环境为 Fabric1.0，其作为一种通用

的区块链架构，内部支持的智能合约安全性不高。同时，黑客可利用大数据分析技术对网络流量 IP、交易地址和交易行为进行聚类分析，从而窥探用户隐私。后续的研究工作将结合代理重加密、同态加密等密码学技术保护 ECC 交易用户的隐私信息。

[参 考 文 献]

[1] 张显，谢开，张圣楠，等.基于区块链的可再生能源超额消纳量交易体系[J].中国电力，2020，53(09)：60-70.

[2] 关于发布北京电力交易中心可再生能源电力超额消纳量交易规则(试行)的通知[EB/OL]. [2021-01-27].http：// www.bjpx.com.cn/html/main/col132/2021-01/27/20210127102546650681802_1.html.

[3] 何蒲，于戈，张岩峰，等.区块链技术与应用前瞻综述[J].计算机科学，2017，44(04)：1-7.

[4] HUANG D.Consortium blockchain-based decentralized energy trading mechanism for virtual power plant[C]. 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)，2020：3084-3089.

[5] CHE Z，WANG Y，MA Y，et al.，A distributed energy trading authentication mechanism based on a consortium blockchain[J]. Energies，2019，12(15)：1-21.

[6] HAN D，ZHANG C，PING J，et al. Smart contract architecture for decentralized energy trading and management based on blockchains[J]. Energy，2020，199(15)：1-14.

[7] 张圣楠，张显，薛文昊，等.基于区块链的可再生能源消纳凭证交易系统性能优化[J].电力需求侧管理，2021，23(02)：10-15.

[8] SHANDILYA S，SZYMANSKI Z，SHANDILYA S K，et al. Modeling and comparative analysis of multi-agent cost allocation strategies using cooperative game theory for the modern electricity market[J]. Energies，2022，15(07)：1-14.

[9] WANG Y，GAO W，QIAN F，et al. Evaluation of economic benefits of virtual power plant between demand and plant sides based on cooperative game theory[J]. Energy Conversion and Management，2021，238(07)：1-13.

[10] 段佳南，谢俊，冯丽娜，等.基于合作博弈论的风-光-水-氢多主体能源系统增益分配策略[J].电网技术，2022，46(05)：1703-1712.

[11] 郑晨昕，江岳文.基于改进 Shapley 值的风电波动成本分摊策略[J].电网技术，2021，45(11)：4387-4394.

[12] 陈星莺，郁清云，谢俊，等.基于合作博弈论的电能替代效益分摊方法[J].电力自动化设备，2019，39(03)：30-35.

[13] 龙洋洋，陈玉玲，辛阳，等.基于联盟区块链的安全能源交易方案[J].计算机应用，2020，40(06)：1668-1673.

[14] 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.

[15] 张显，冯景丽，常新，等.基于区块链技术的绿色电力交易系统设计及应用[J].电力系统自动化，2022，46(09)：1-10.

A Renewable Energy Consumption Certificate Trading Scheme Based on Consortium Blockchain

ZHANG Yan，ZHOU Xianjun，WANG Ru

(*School of Electrical and Electronic Engineering*，*Hubei Univ. of Ttech.*，*Wuhan* 430000，*China*)

Abstract：Trading in excess consumption certificates for renewable energy fuels consumer demand for green electricity and advances the growth of the green power industry. But the current centralized trading architecture has demonstrated its weaknesses in terms of fairness，efficiency，and security when it comes to conducting large-scale，high-frequency excess-consumption certificate trading. In order to achieve this，it is proposed to use a multi-agent cross-trading system to trade certificates on a blockchain. Firstly，a multi-agent cooperative trading game model is built with the goal of maximizing certificate trading's profits. The trading partners are matched and the cooperative game's overall profit is calculated based on the supply/demand and the quotations of the trading entities. The distribution vectors of the overall profit are solved using the Shapley value and Nucleolus，and the optimal trading price of the certificate trading scheme is determined by comparing the rationality of the two distribution vectors. Secondly，a multi-agent certificate trading platform is developed based on the consortium chain and the trading rules are written to smart contracts，enabling efficient and dependable certificate trading. Finally，the extension experiments are executed in Hyperledger Fabric 1.0，and the experimental results verify the feasibility and effectiveness of the scheme.

Keywords：certificate trading；consortium chain；cooperative game；nucleolus

[责任编校：赵 瞳]