基于区块链的产消用户端对端电能交易方法

胡 钰[1],李华强[1],李山山[1],刘凯奇[1],陈 缨[2]
(1. 四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065;2. 国网四川综合能源服务有限公司,四川 成都 610021)

摘要:为了提升产消用户的经济效益,提出了一种基于区块链技术的产消用户端对端电能交易方法。首先,基于以太坊平台的特性,设计了端对端电能交易平台的总体架构;然后,对交易机制进行了细化设计,包括交易竞价及匹配策略、安全校验模型和信誉值评估模型,并基于Shapley值法建立了能源服务商(ESP)的服务费收取模型,明确ESP的合理收益;最后,基于端对端电能交易智能合约的制定原则,设计了一系列功能合约及辅助合约,实现用户在线上报需求、订单自动匹配、费用实时结算与其他个性化功能。基于IDE-Remix平台对智能合约进行部署与仿真,结果验证了所提端对端电能交易方法的可行性和有效性。

关键词:区块链;端对端电能交易;产消用户;智能合约;Shapley值法
中图分类号:TM 761 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202112005

0 引言

随着新能源技术的发展与应用,当前电力系统中的供需界限逐渐模糊[1],传统的终端电能消费者可通过配置分布式发电设备向产消者转变[2]。2017年10月,国家能源局发布了《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》[3],允许分布式电能生产者与电力消费者进行直接交易,由此明确了产消者可作为用户侧售电主体参与电力交易的地位。分布式电能交易具有市场多元性、广泛竞争性等特征,若仍延续传统的集中交易模式将存在以下问题:①产消者之间的交易通常单笔订单规模较小,但交易主体数量众多,海量化的交易信息导致集中式交易中心的运行效率较低;②中心化的数据库存在数据安全风险,交易信息隐私性较低。在此背景下,端对端电能交易以其独有优势成为新的研究热点,而针对具体交易技术与流程等内容提出兼顾高效性、安全性和公平性的解决方法更是成为其核心所在。

区块链被认为是当前最具变革力的技术之一[4],其具有的去中心化、高可靠性、匿名性[5]等特点恰好与产消用户之间的电力交易诉求相契合。同时,区块链技术保证了产消用户可以在不知道对方真实身份的情况下快速建立信任,免除了传统交易模式中由第三方机构提供信任背书的环节[6],大幅降低了交易中的信任成本,为在产消用户间开展结算方便、公开公正、信任成本低的端对端电能交易提供了可行的途径。

近年来,区块链技术在电力系统中的应用研究已有初步成果。文献[7-8]研究了区块链技术与能源交易领域的契合度和应用可行性;文献[9-10]提出了弱中心化的电力交易方法,并对区块链网络的交易速度进行建模分析,研究了交易速度与区块大小、节点个数、共识机制间的关系,但未设计与交易方法配套的智能合约,在实际区块链平台中部署运行具有一定的难度;文献[11]设计了一种基于信用的记账权竞争算法,使用户信用值直接与经济收益相关联,以此激励用户保持良好的发用电行为;文献[12]设计了基于区块链激励的光伏交易系统的智能合约,并在交易匹配与结算过程中引入交易意愿度与信用指标来遏制各节点的自利行为;文献[13]提出使用双链结构开展微电网间的电能交易,并在设计的智能合约中考虑电能传输损耗的影响,引入了电气传输距离指标;文献[14]提出了一种基于双向拍卖机制的分布式电能竞价方法,并设计了相关的智能合约。但文献[11-14]仅着重于对交易竞价及匹配机制、共识认证算法等方面的研究,未考虑安全约束等问题,产消用户通过智能合约匹配的订单可能受限于潮流约束而无法进行实际交割。因此,如何将交易机制与实际的物理网络相结合仍有待研究。

基于上述问题,本文首先提出了基于区块链的产消用户端对端电能交易平台的总体架构,并在交易机制中考虑网络潮流约束,建立了基于功率传输分布因子(PTDF)的安全校验及阻塞管理模型,以保证交易匹配结果可在网络中进行实际交割。在区块链共识机制方面,本文所提端对端电能交易方法不再通过传统的用户节点争夺记账权来进行新区块的验证,而是由能源服务商ESP(Energy Service Provider)充当平台管理员的角色,在权威证明PoA(Proof of Authority)机制下与信任节点共同进行区块的有效性验证,并基于Shapley值理论向各用户收取一定的服务费。与已有共识模式相比,该机制的创新性在于避免了大量算力的消耗,提升了交易效率,并可根

收稿日期:2021-04-22;**修回日期:**2021-10-15
基金项目:四川省科技计划资助项目(2021YFSY0019)
Project supported by Sichuan Science and Technology Program(2021YFSY0019)

据ESP在交易中所做边际贡献明确其合理收益。然后基于该交易机制设计了基于以太坊平台的端对端电能交易智能合约，产消用户在该平台上进行注册后，即可根据自身的发用电情况调取相关智能合约参与交易。最后对智能合约进行了仿真测试，仿真结果验证了所提方法可以实现产消用户的端对端电能交易，并能实现ESP与用户的合理获利。

1 端对端电能交易模型及机制

1.1 总体架构

端对端电能交易平台是建立在以太坊上，供一定区域内的产消用户开展电能交易的开放平台。以太坊作为交易平台载体，具有开放、安全、高效等特点，可依托智能合约开发去中心化应用[15]。交易平台的管理员为ESP，其作为平台维护者，负责交易订单的安全校验与阻塞管理，同时还作为“矿工”，与信任节点共同验证产生的所有交易信息，生成新区块并将其添加到区块链上。交易平台的总体架构如图1所示。端对端电能交易的运作流程如图2所示。

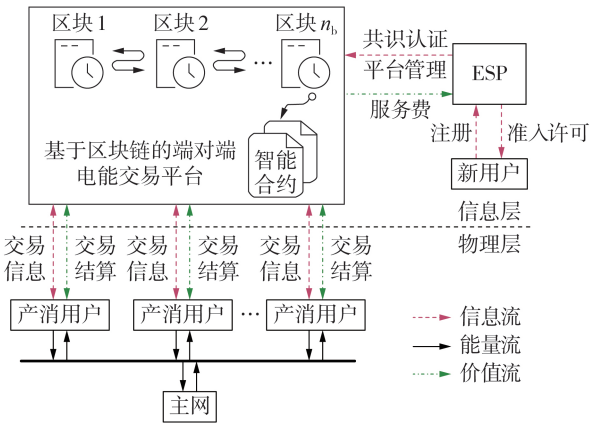

图1 端对端电能交易平台的总体架构

Fig.1 Overall architecture of peer-to-peer power trading platform

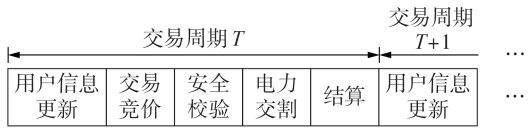

图2 端对端电能交易的运作流程

Fig.2 Operation process of peer-to-peer power trading

可将每个交易周期分为以下5个具体阶段。

1）用户信息更新阶段。在每个交易周期开始时，ESP将进行用户信息更新，包括上一轮交易结束后各用户的信誉值等。若有新的用户加入，则在该阶段将该用户的外部账户地址加入交易合约中，从而授权该用户参与端对端电能交易。

2）交易竞价阶段。产消用户可在该阶段根据自身的发用电情况上报交易订单，参与端对端电能交易。平台对收集的所有交易信息进行匹配，生成临时交易订单。

3）安全校验阶段。ESP结合实际电力网络的参数信息，对临时交易订单进行安全校验，对未能通过安全校验的临时交易订单进行阻塞管理，并将该结果视为最终的电力交易合约。

4）电力交割阶段。各产消用户根据电力交易合约进行实际的电力交割。在该过程中，智能合约将时刻与各产消用户的智能电表数据产生信息交互，自动记录用户的实际电力交割数据。

5）结算阶段。根据产消用户的实际电力交割情况，评估各用户的信誉值并对违约用户收取一定的违约金。ESP将按照服务费收取机制计算在本轮交易中产生的服务费并对所有用户进行资金结算与代币转移。

下文将从交易竞价及匹配策略、安全校验、信誉值评估与服务费收取机制等方面对交易机制进行详细阐述。

1.2 交易竞价及匹配策略

针对产消用户的交易竞价阶段，首先设定如下市场运营参数：$p_{\text{buy.w}}$、$p_{\text{sell.w}}$分别为产消用户直接向电网购电、售电的价格。假设产消用户均采取理性报价，则各产消用户的报价均应在区间$[p_{\text{sell.w}}, p_{\text{buy.w}}]$内。将价格区间$[p_{\text{sell.w}}, p_{\text{buy.w}}]$进行$m$等分，则产消用户在订单上报时可以有$m+1$个意愿价格，如式(1)所示。

$$\begin{cases} B(r)=p_{\text{sell.w}}+r\dfrac{p_{\text{buy.w}}-p_{\text{sell.w}}}{m} \\ S(r)=p_{\text{buy.w}}-r\dfrac{p_{\text{buy.w}}-p_{\text{sell.w}}}{m} \end{cases} \tag{1}$$

式中：r为产消用户选择的竞价等级，$r\in\{0, 1, \cdots, m\}$；$B(r)$、$S(r)$分别为购电、售电用户的报价。

可以看出：售电用户选取的r值越大，则其报价$S(r)$越低，表明该用户具有更强的售电需求；购电用户选取的r值越大，则其报价$B(r)$越高，表明该用户具有更强的购电需求。因此，竞价等级r可以反映用户电能交易的意愿强烈程度。

产消用户上报的订单信息可表示为：

$$\begin{cases} B_{\text{order}}=\left\{B_i^t(r), H_{\text{buy.}i}^{t-1}, T_{\text{buy.}i}^t, W_{\text{buy.}i}^t\right\} \\ S_{\text{order}}=\left\{S_j^t(r), H_{\text{sell.}j}^{t-1}, T_{\text{sell.}j}^t, W_{\text{sell.}j}^t\right\} \end{cases} \tag{2}$$

式中：B_{order}、S_{order}分别为购电、售电用户上报的订单信息；$B_i^t(r)$、$S_j^t(r)$分别为第t轮交易购电用户i、售电用户j的报价；$H_{\text{buy.}i}^{t-1}$、$H_{\text{sell.}j}^{t-1}$分别为购电用户i、售电用户j在第$t-1$轮交易结束时的信誉值；$T_{\text{buy.}i}^t$、$T_{\text{sell.}j}^t$分别为第t轮交易购电用户i、售电用户j的订单上报时间；$W_{\text{buy.}i}^t$、$W_{\text{sell.}j}^t$分别为第t轮交易购电用户i、售电用户j上报的交易电量。

订单匹配策略包括以下3个阶段。

1）供需匹配阶段：各用户上报的订单按照“意愿价格、信誉值、上报时间”的优先级形成供需匹配队列，并依次将位于队列最前方的买卖订单进行匹配，直至购电订单报价低于售电订单报价为止。成交价格采用买卖双方的平均报价，即：

$$G_{ij}^{t}=(B_{i}^{t}(r)+S_{j}^{t}(r))/2 \tag{3}$$

式中：G_{ij}^{t}为第t轮交易购电用户i与售电用户j匹配形成临时交易订单的成交价格。

在匹配过程中，当出现购电、售电用户双方的待匹配电量不相等时，将按照二者上报电量的较小值作为匹配电量。此时必然有一方的电量交易需求被完全满足，因此将该用户退出匹配队列，而另一方将按照上一轮匹配中的电量差值作为其新的待匹配电量，参与下一轮匹配。

2）电价协调阶段：ESP声明供需匹配阶段的平均成交价格，以此作为指导价格。未能匹配成功的用户可在该阶段修改报价并再次参与订单匹配，其中售电用户的报价需低于指导价格，购电用户的报价需高于指导价格。

3）电量协调阶段：将上一阶段仍未成功匹配的电量直接与配电网售电商进行交易。

交易匹配时段结束后，智能合约将匹配得到的临时交易电量矩阵和成交价格矩阵作为合约输出，并记录于区块链中，以便在后续安全校验及交易结算中调取使用。

1.3　安全校验

通过交易竞价阶段形成的临时交易订单不一定符合实际的物理网络约束，因此需要进行安全校验。本文基于PTDF建立了端对端电能交易的安全校验模型。定义PTDF为节点对之间的传输功率变化时引起的支路潮流变化量，常用作衡量线路阻塞情况的指标[16]。由于PTDF只与网络拓扑结构以及线路参数有关，在进行端对端电能交易时，网络的PTDF通常不会改变，可认为其是一常数矩阵。因此，可预先计算网络的PTDF矩阵并将其储存于智能合约中，从而大幅减少了安全校验时的计算量，提高了校验效率，同时也降低了对区块链网络服务器运行性能的要求，体现出与智能合约相契合的特性。安全校验的具体步骤如下。

首先根据临时交易订单得到临时交易电量矩阵$\boldsymbol{T}_{\text{temp}}$，如式（4）所示。

$$\boldsymbol{T}_{\text{temp}}=\begin{bmatrix} 0 & Q_{12} & \cdots & Q_{1n} \\ Q_{21} & 0 & \cdots & Q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{n1} & Q_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：n为产消用户的数量；Q_{ij}为产消用户i向产消用户j出售的电量，且有$Q_{ij}=-Q_{ji}$。

由临时交易电量矩阵可计算得到支路潮流功率向量$\boldsymbol{P}_{\text{branch}}$，如式（5）所示。

$$\boldsymbol{P}_{\text{branch}}=\boldsymbol{Y}_{\text{branch}}\boldsymbol{A}(\boldsymbol{A}^{\text{T}}\boldsymbol{Y}_{\text{branch}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{q}_{\text{inj}}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{q}_{\text{inj}} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{H}$为PTDF矩阵；$\boldsymbol{Y}_{\text{branch}}$为对角矩阵，对角元素为各支路阻抗的倒数；$\boldsymbol{A}$为去除参考节点列的节点关联矩阵；$\boldsymbol{q}_{\text{inj}}$为$\boldsymbol{T}_{\text{temp}}$所对应的去除参考节点后的其余节点注入功率向量。

对于不满足安全校验的临时订单，ESP将以最小化交易调整量的平方和为目标[9]建立优化模型求得经过阻塞管理后的交易电量矩阵$\boldsymbol{T}_{\text{con}}$，约束条件包括支路潮流功率约束以及产消用户的交易电量约束，即：

$$\begin{cases} \min \displaystyle\sum_{i=1}^{n}\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n}(r_i+r_j)\,(Q_{ij}-Q_{ij}^{\text{con}})^2 \\ \text{s.t.}\ \begin{cases} -\boldsymbol{P}_{\text{Lmax}}\leqslant \boldsymbol{Y}_{\text{branch}}\boldsymbol{A}(\boldsymbol{A}^{\text{T}}\boldsymbol{Y}_{\text{branch}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{q}_{\text{inj}}^{\text{con}}\leqslant \boldsymbol{P}_{\text{Lmax}} \\ \left|\displaystyle\sum_{j=1}^{n}Q_{ij}^{\text{con}}\right|\leqslant\left|\displaystyle\sum_{j=1}^{n}Q_{ij}\right| \quad i=1,2,\cdots,n \end{cases} \end{cases} \tag{6}$$

式中：r_i、r_j分别为购电用户i、售电用户j的竞价等级；Q_{ij}^{con}为阻塞管理优化后产消用户i向产消用户j出售的电量；$\boldsymbol{P}_{\text{Lmax}}$为支路潮流功率裕度向量；$\boldsymbol{q}_{\text{inj}}^{\text{con}}$为$\boldsymbol{T}_{\text{con}}$所对应的去除参考节点后的其余节点注入功率向量。

阻塞管理优化会使交易订单数据发生变化，因此需将优化后的电量交易矩阵$\boldsymbol{T}_{\text{con}}$更新至区块链平台，并将其视为最终的电力交易合约，在电力交割与结算阶段按照该电力交易合约执行。

1.4　信誉值评估模型

分布式发电具有一定的不确定性，在电力交割阶段可能会出现产消用户未完全按照合约内容进行发用电的情况，因此需对违约用户进行一定的惩罚。若交易双方中的一方因为另一方违背合约而共同产生偏差电量，则只对违约方进行惩罚，扣除其信誉值并收取违约金。信誉值评估机制的具体说明如下。

1）新用户在注册成功并加入交易平台时，由ESP将其初始信誉值设置为100，并在每轮交易开始时将其余用户的信誉值更新为上一轮交易时段信誉值评估后所得数值。

2）若用户的实际发用电量与合约规定电量的偏差在一定的范围内，则不扣除用户的信誉值；否则，扣除用户的信誉值。信誉值的计算公式为：

$$H_i^t=\begin{cases} 100 & 0\leqslant D_i^t/C_i^t\leqslant\mu_{\text{pdtv}} \\ 100\left(1-\alpha_{\text{rvc}}D_i^t/C_i^t\right) & \mu_{\text{pdtv}}<D_i^t/C_i^t<1/\alpha_{\text{rvc}} \\ 0 & 1/\alpha_{\text{rvc}}\leqslant D_i^t/C_i^t\leqslant 1 \end{cases} \tag{7}$$

式中：H_i^t为第t轮交易用户i的信誉值；C_i^t为第t轮交易用户i按照合约应当成交的电量；D_i^t为第t轮交易用户i的偏差电量；μ_{pdtv}为偏差阈值，$0<\mu_{\text{pdtv}}<1$；α_{rvc}

为信誉因子，$1 \leqslant \alpha_{\mathrm{rvc}} < 1/\mu_{\mathrm{pdtv}}$。

信誉值曲线如附录A图A1所示。若用户在本轮交易被扣除信誉值，则还将被收取一笔违约金，违约金的计算公式为：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{LD},i}^{t} = G_{\mathrm{LD},i}^{t} D_{i}^{t} \\ G_{\mathrm{LD},i}^{t} = (1 - H_{i}^{t}/100) G_{ij}^{t} \end{cases} \tag{8}$$

式中：$P_{\mathrm{LD},i}^{t}$为第t轮交易中对用户i扣除的违约金；$G_{\mathrm{LD},i}^{t}$为第t轮交易中用户i的惩罚电价。

由式(8)可知：只有当用户在本轮交易中未被扣除信誉值，即$H_{i}^{t}=100$时，才不会承担违约金；而存在违规行为被扣除信誉值的用户均会承担一定的违约金损失（该损失为惩罚电价与用户发用电偏差量的乘积）。

另外，用户的信誉值被扣除还将使得其在下一轮交易中的收益率有所降低：根据1.2节中“意愿价格、信誉值、上报时间”的交易匹配优先级，当下一轮交易匹配中出现相同报价时，信誉值较低的用户的匹配优先级较低。此时购电用户匹配到的售电订单报价更高，售电用户匹配到的购电订单报价更低。因此，违约用户在下一轮交易中的收益率将不如具有相同报价且信誉值较高的用户。

因此，利用信誉值对用户的交易行为进行评估，可监督用户严格按照合约内容完成交易，对用户违规行为可以起到一定的约束作用。

1.5 基于Shapley值法的服务费收取机制

在基于区块链的端对端电能交易中，ESP负责交易平台的运营维护，同时还负责交易订单的安全校验。因此，在每轮交易的结算阶段，ESP应向所有用户收取服务费以作为自身的运营收益。

当用户通过端对端电能交易购电时，与直接向电网购电相比可以节省一笔用能成本；当用户通过端对端电能交易售电时，与直接向电网售电相比可以获得更高的收益。因此，可将此差值定义为产消用户在扣除服务费前的初始相对收益，见式(9)。

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{\mathrm{B.rel},i}^{t} = p_{\mathrm{buy.w}} q_{\mathrm{B.p},i}^{t} - \varphi_{\mathrm{B.p},i}^{t} \\ \Delta\varphi_{\mathrm{S.rel},j}^{t} = \varphi_{\mathrm{S.p},j}^{t} - p_{\mathrm{sell.w}} q_{\mathrm{S.p},j}^{t} \end{cases} \tag{9}$$

式中：$\Delta\varphi_{\mathrm{B.rel},i}^{t}$、$\Delta\varphi_{\mathrm{S.rel},j}^{t}$分别为第$t$轮交易购电用户$i$、售电用户$j$的初始相对收益；$\varphi_{\mathrm{B.p},i}^{t}$为第$t$轮交易购电用户$i$的支出，其值为用户在本轮交易中各笔订单的支出之和；$\varphi_{\mathrm{S.p},j}^{t}$为第$t$轮交易售电用户$j$的收入，其值为用户在本轮交易中各笔订单的收入之和；$q_{\mathrm{B.p},i}^{t}$、$q_{\mathrm{S.p},j}^{t}$分别为第t轮交易购电用户i的购电量、售电用户j的售电量。

ESP将基于Shapley值理论，以一定的比例在每位用户的初始相对收益中抽取服务费。Shapley值法是一种从数学角度解决多方合作联盟收益分摊问题的方法，该方法可使成员分配的收益等于自身对联盟收益的边际贡献[17]，从而使收益分配更为合理。

假设n个产消用户与ESP构成的全体成员联盟为$I=\{1, 2, \cdots, n, \mathrm{ESP}\}$，根据Shapley值法，ESP收取的总服务费为：

$$\begin{cases} Y_{\mathrm{ESP}}^{t} = \sum_{S \subset S_{\mathrm{ESP}}} W(S)(V_{S}^{t} - V_{S \backslash \mathrm{ESP}}^{t}) \\ W(S) = \dfrac{(|I| - |S|)!(|S| - 1)!}{|I|!} \end{cases} \tag{10}$$

式中：Y_{ESP}^{t}为第t轮交易ESP的Shapley值，即第t轮交易中ESP应收取的总服务费；S为I中一部分成员组成的子联盟；S_{ESP}为包含ESP的所有子联盟构成的集合；$W(S)$为加权因子；$|I|$、$|S|$分别为I中成员数量、S中成员数量；V_{S}^{t}为第t轮交易中子联盟S的合作收益；$V_{S \backslash \mathrm{ESP}}^{t}$为第$t$轮交易中子联盟$S$除去成员ESP后的剩余收益，本文中$V_{S \backslash \mathrm{ESP}}^{t}=0$。

各子联盟合作收益的计算方法如下。

首先定义全体成员联盟I的合作收益V_{I}^{t}为各用户初始相对收益之和，即：

$$V_{I}^{t} = \sum_{i=1}^{n} \Delta\varphi_{\mathrm{rel},i}^{t} \tag{11}$$

式中：$\Delta\varphi_{\mathrm{rel},i}^{t}$为第$t$轮交易中产消用户$i$的初始相对收益。

由式(9)和式(11)可知，联盟的合作收益仅取决于用户间进行交易的电量（以下称为用户群体成交电量）。用户群体成交电量越多，则联盟合作收益越高，而用户直接与电网交易的电量所产生的相对收益为0。因此可将式(11)改写为：

$$V_{I}^{t} = (p_{\mathrm{buy.w}} - p_{\mathrm{sell.w}}) q_{\mathrm{Prosum},I}^{t} \tag{12}$$

式中：$q_{\mathrm{Prosum},I}^{t}$为第$t$轮交易全体成员联盟$I$的用户群体成交电量。

因此，可得子联盟S的合作收益V_{S}^{t}为：

$$V_{S}^{t} = V_{I}^{t} q_{\mathrm{Prosum},S}^{t} / q_{\mathrm{Prosum},I}^{t} \tag{13}$$

式中：$q_{\mathrm{Prosum},S}^{t}$为第$t$轮交易子联盟$S$的用户群体成交电量。

在计算得到ESP的Shapley值后，服务费收取比例ρ_{ESP}^{t}可根据式(14)确定。

$$\rho_{\mathrm{ESP}}^{t} = Y_{\mathrm{ESP}}^{t} / V_{I}^{t} \tag{14}$$

则可得各用户的最终结算金额为：

$$\begin{cases} \varphi_{\mathrm{B.final},i}^{t} = \varphi_{\mathrm{B.p},i}^{t} + \rho_{\mathrm{ESP}}^{t} \Delta\varphi_{\mathrm{rel},i}^{t} \\ \varphi_{\mathrm{S.final},j}^{t} = \varphi_{\mathrm{S.p},j}^{t} - \rho_{\mathrm{ESP}}^{t} \Delta\varphi_{\mathrm{rel},j}^{t} \end{cases} \tag{15}$$

式中：$\varphi_{\mathrm{B.final},i}^{t}$、$\varphi_{\mathrm{S.final},j}^{t}$分别为第$t$轮交易购电用户$i$、售电用户$j$的最终结算金额。

2 私有链搭建及智能合约设计

2.1 私有链搭建

在区块链类型选择上，由于私有链相较于公有链具备响应速度快、成本低、隐私性高等优点[18]，本

文选择私有链作为端对端电能交易平台的底层技术，并将其搭建在以太坊节点客户端上。私有链的搭建流程如图3所示。

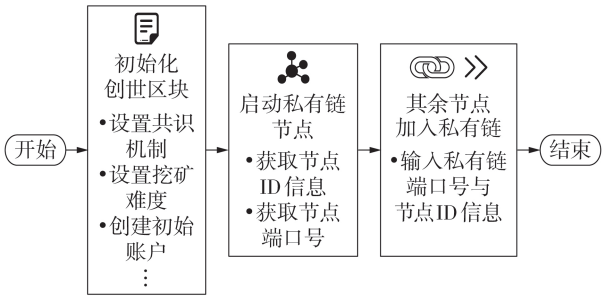

图3　私有链的搭建流程

Fig.3　Building process of private chain

在进行创世区块文件的初始化时，本文选择将节点共识机制设置为PoA。在该共识机制下，ESP将信誉良好且有意参与共识认证的用户节点添加为信任节点，共同记账并相互监督。共同记账模式将大幅增强系统的公平性与安全性：因为即使存在恶意记账节点，其最多只能攻击X（$X=X_d/2+1$，X_d为记账节点个数）个连续区块中的1个，期间还可以由其他记账节点投票踢出该恶意节点。

同时，由于可以在创世区块预设PoA机制中新区块的生成时间，在进行共识认证时并不需要消耗大量的算力资源，而是按照预设时间稳定出块，因此与传统的工作量证明机制相比，PoA机制具有认证效率高、交易时延短、运行成本低等优点。

2.2　智能合约设计

智能合约作为以太坊的核心功能，是端对端电能交易模式在区块链平台上得以实现的最关键技术。智能合约实质上是一段图灵完备、不可篡改的代码程序[19]，该程序在编写完成后，事先以数字化的形式写入区块链中，实现交易发起、匹配、信誉值评估、结算等一系列功能。

本文设计的端对端电能交易智能合约遵从如下原则：①任何注册成功的产消用户均可调用相关合约并参与拍卖；②智能合约应自动进行交易的匹配与结算，且数据公开、可追溯；③除了公开辅助合约可供全部节点随意调用外，一些特定的功能性合约只能在规定时段由拥有权限的节点调用，以保证交易平台的安全有序运行。

本文基于第1节所述端对端电能交易机制，设计了如附录A图A2所示的智能合约运作流程，并使用Solidity语言编写5个主要的功能合约以及一系列辅助合约。产消用户或ESP可在该交易平台上调用相关智能合约进行交易操作。

1）用户信息更新合约（_Begin）。在本轮交易时段开始时，ESP将调用该合约进行用户信息的更新，检查各用户在上一轮交易中是否已完成交易清算。若用户存在欠费问题，则ESP将关闭其交易接口，该用户无法在本轮交易中调取相关合约开展交易，直至欠费清缴为止；若有新用户注册成功，则ESP会将该用户的账户地址添加至合约，通过关键字mapping与用户编号建立映射，并将其初始信誉值设置为100，以便用户开展后续交易。

2）交易订单发布合约（_Order）。在交易竞价阶段开始时，交易平台上的注册用户可调用_Order合约发布购电／售电订单。用户在调用合约时需向合约地址缴纳一笔保证金，以供交易结算时使用。定义购电／售电订单信息为结构体类型，需包含用户编号P_{ID}、报价p_{price}和交易电量W_{amount}，若$W_{amount}>0$，则表示该订单为购电订单；否则表示该订单为售电订单。智能合约还会根据用户编号自动读取该用户在上一轮交易结束时的信誉值，并且利用Solidity内置变量n_{now}获取当前订单的时间戳，以供订单匹配合约使用。

3）交易订单匹配合约（_Measure）。该合约包含3个功能函数，分别为供需匹配、电价协调、电量协调函数，各函数的具体功能参照1.2节中的匹配策略所述。由此得到本轮交易的临时交易电量矩阵$\boldsymbol{T}_{temp}$。在ESP进行安全校验后，该临时交易电量矩阵还将被更新替换为交易合约矩阵$\boldsymbol{T}_{con}$。

4）信誉值评估合约（_Creditvalue）。在实际电力交割阶段结束后，ESP通过调用该合约更新各用户的偏差电量数据，并结合$\boldsymbol{T}_{con}$进行用户信誉值评估，对违约用户扣除其信誉值并设置违约金P_{PD_price}。

5）交易结算合约（_Settlement）。在交易结算阶段，ESP调用该合约计算在本轮交易中产生的服务费，得到各用户与ESP最终的收入或支出金额，并返还全部用户的保证金。若用户被设置违约金，则应先在保证金中扣除违约金，之后再将剩余金额退回到用户账户。

除此之外，该交易平台还部署了一系列的公开辅助合约，例如供用户查询账户余额的合约（Con_Balance）、查询账户交易记录的合约（Con_Bill）等。该类公开辅助合约可供交易平台上的节点在任意时段调用，从而满足用户一系列的个性化需求。

3　算例分析

3.1　算例设置

本文利用IDE-Remix平台及以太坊资产管理钱包Metamask对2.2节所述智能合约进行部署与测试，并在合约中添加8个虚拟账户模拟ESP与7位用户的地址，智能合约部署界面和部署详情分别见附录A图A3和图A4。

为了验证参与端对端电能交易的产消用户的

经济效益，采用6节点系统进行交易模拟，6节点系统的网络拓扑如附录A图A5所示，图中A—G为网络中拥有分布式发电设备的产消用户，W为配电网售电商。设产消用户直接向电网售电的价格$p_{sell.w}$=0.4元/(kW·h)，产消用户直接向售电商购电的价格$p_{buy.w}$=1.2元/(kW·h)。设将价格区间[$p_{sell.w}$,$p_{buy.w}$]分为21等份，各产消用户调用_Order合约上报的交易信息见附录A表A1，若交易电量不小于0，则为购电订单；否则，为售电订单。

3.2 交易流程分析

交易上报时间截止后，ESP调用_Measure合约进行订单匹配，匹配结果如表1所示，其中产消用户E未能成功匹配的部分电量视为从配电网售电商处购买。

表1 交易匹配结果

Table 1 Matching results of trading

购电方	售电方	交易电量/(kW·h)	交易电价/[元·(kW·h)$^{-1}$]
G	A	12	0.78
F	A	18	0.74
F	D	14	0.86
C	D	2	0.86
C	B	13	0.86
E	B	7	0.75
E	W	11	1.20

ESP对匹配的临时交易订单进行安全校验，安全校验结果如表2所示。由表可知，线路2-5的实际传输功率超过了传输容量裕度，需进行阻塞管理以消除潮流越限。根据式(6)进行阻塞管理优化后的结果如图4所示。图中，交易订单G-A对应表1中购电方为G、售电方为A的订单；其他依此类推。

表2 安全校验结果

Table 2 Safety verification results

线路	支路阻抗/Ω	实际传输功率/kW	传输容量裕度/kW
1-2	0.10	41.000	50
2-3	0.20	25.142	28
3-4	0.10	−16.000	28
2-5	0.15	35.857	28
3-6	0.15	26.142	28
5-6	0.20	17.857	28

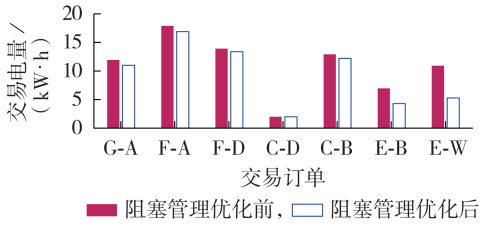

图4 阻塞管理优化结果

Fig.4 Optimal results of congestion management

由图4可知，阻塞管理优化后大部分交易订单的交易电量均有所削减，其中E-B和E-W这2个交易订单的电量削减比例较大，分别为38.2%、51.7%。削减比例较大的原因在于：①产消用户E处于阻塞线路2-5的末端节点处，对线路阻塞的贡献更大，理应削减更多的交易电量；②产消用户E上报的订单选取了较低的竞价等级，其交易订单权重更低，使得交易电量削减比例更大。

对阻塞管理优化后的交易订单重新进行安全校验可得：原越限线路2-5的实际传输功率降为27.99 kW，且其余线路的实际传输功率均未超过传输容量裕度。因此，阻塞管理优化后的交易订单符合安全校验要求，能够作为最终的电力交易合约进行实际交割。

在本文算例中，以太币汇率以2021年3月10日为基准设定为：1 Ether=1 000 Finney=11 400元。设用户B在电力交割阶段的实际发电量为12.06 kW·h，进入结算阶段时，ESP更新偏差电量信息，并且基于Shapley值法计算得到本轮交易中产生的服务费为17.24元，由此得到的各产消用户与ESP的交易结算结果如表3所示。

完成交易结算后，智能合约将自动进行用户账户的代币余额增减(ESP对用户A的代币转账确认信息和历史记录分别见附录A图A6和图A7)，并将本轮交易信息储存于对应阶段生成的区块体内，以供后续查阅与追溯。

3.3 端对端电能交易结果分析

产消用户参与端对端电能交易前、后的收支金额如图5所示。图中，收支金额小于0表示该用户的

表3 市场主体的交易结算结果

Table 3 Settlement results of market entities in trading

参与主体	实际电能交割/(kW·h)	偏差电量/(kW·h)	信誉值	违约金/元	服务费/元	最终结算金额/元	代币余额变化量/Finney
A	28.07	0	100	0	−3.87	17.34	1.52092
B	12.06	4.54	73	−1.00	−2.04	7.04	0.61795
C	−11.47	2.81	100	0	−1.51	−11.38	−0.99783
D	15.46	0	100	0	−2.76	10.54	0.92430
E	−7.91	1.73	100	0	−0.45	−8.77	−0.76959
F	−30.46	0	100	0	−4.81	−28.97	−2.54107
G	−11.07	0	100	0	−1.80	−10.43	−0.91533
ESP	—	—	—	1.00	17.24	18.24	1.60000

购电支出；收支金额大于0则表示售电收入。

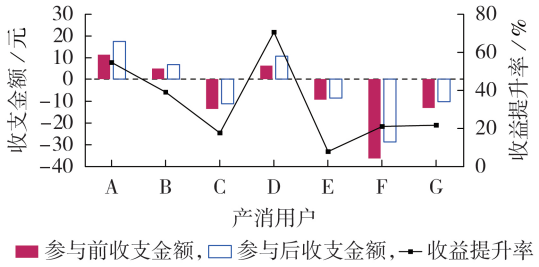

图5　产消用户参与端对端电能交易前、后的收支金额

Fig.5　Payment amount of proconsumers before and after participation in peer-to-peer power trading

由图5可以看出，在参与端对端电能交易后，购电用户可以节省一笔购电支出，售电用户也可获得更高的售电收入。同时，为了体现不同交易行为对用户自身收益情况的影响，分析图5中各用户的收益提升率可得如下结论。

1）用户B、D选择了相同的售电意愿价格，但最终用户B的收益提升率比用户D更低，这主要是因为：①用户D的交易上报时间更短，在交易匹配队列中位于用户B之前，能够与报价更高的购电用户进行匹配；②用户B存在违约行为，产生了一定的违约金，使得其收益提升率更低。

2）用户A在所有售电用户中的售电报价最低，但最终的收益提升率却较高，这主要是因为：虽然用户A的售电报价最低，但是按照“交易价格优先”的原则其将位于匹配队列的最前面，从而与购电报价最高的用户进行匹配，获得了不太低的成交电价；同时用户A给出的最低售电价格具有最高的竞价等级，在阻塞管理优化时，用户A的订单因具有更高的交易权重，故其削减量更小，这间接提升了用户A的售电收入。

因此在端对端电能交易机制下，意愿价格低并不意味着用户最终的收益提升率低，收益提升率还与交易匹配对象的意愿结果、自身信誉值等有关。这就要求产消用户应提升交易竞价的积极性，同时保持良好的发用电行为，避免发生违约情况，以争取获得更高的收益。

4　结论

本文提出了基于区块链的产消用户端对端电能交易机制，并根据交易平台的运作流程设计了与之配套的一系列智能合约，最后将该智能合约部署在以太坊平台上对所提方法进行验证，算例仿真结果表明：

1）本文所提交易模型与机制能适用于产消用户间的电能交易，用户在交易平台上开展端对端电能交易能够降低自身的用能成本，提升经济效益；

2）在本文设计的交易机制中，ESP基于Shapley值法向用户收取服务费，从而实现运营成本的回收并获得额外的利润，使得ESP基于自身的边际贡献确定服务费用，明确了ESP的合理收益。

本文工作聚焦于基于区块链开展灵活高效的端对端电能交易并设计相关智能合约，在后续研究中可结合清洁能源的消纳补贴、过网费等政策完善端对端电能交易机制，并将其推广至其他能源交易领域。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

参考文献：

[1] 张宁，王毅，康重庆，等．能源互联网中的区块链技术：研究框架与典型应用初探[J]．中国电机工程学报，2016，36（15）：4011-4023.
ZHANG Ning，WANG Yi，KANG Chongqing，et al. Blockchain technique in the energy internet：preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE，2016，36（15）：4011-4023.

[2] 孙宏斌，郭庆来，潘昭光，等．能源互联网：驱动力、评述与展望[J]．电网技术，2015，39（11）：3005-3013.
SUN Hongbin，GUO Qinglai，PAN Zhaoguang，et al. Energy Internet：driving force，review and outlook[J]. Power System Technology，2015，39（11）：3005-3013.

[3] 国家发展改革委，国家能源局．关于开展分布式发电市场化交易试点的通知[EB/OL]．[2021-03-10]．http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm.

[4] 徐嘉辉，马立新．区块链技术在分布式能源交易中的应用[J]．电力自动化设备，2020，40（8）：17-22，30.
XU Jiahui，MA Lixin. Application of blockchain technology in distributed energy transaction[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40（8）：17-22，30.

[5] 马天男，彭丽霖，杜英，等．区块链技术下局域多微电网市场竞争博弈模型及求解算法[J]．电力自动化设备，2018，38（5）：191-203.
MA Tiannan，PENG Lilin，DU Ying，et al. Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment，2018，38（5）：191-203.

[6] 裴凤雀，崔锦瑞，董晨景，等．区块链在分布式电力交易中的研究领域及现状分析[J]．中国电机工程学报，2021，41（5）：1752-1771.
PEI Fengque，CUI Jinrui，DONG Chenjing，et al. The research field and current state-of-art of blockchain in distributed power trading[J]. Proceedings of the CSEE，2021，41（5）：1752-1771.

[7] 蔡金棋，李淑贤，樊冰，等．能源互联网中基于区块链的能源交易[J]．电力建设，2017，38（9）：24-31.
CAI Jinqi，LI Shuxian，FAN Bing，et al. Blockchain based energy trading in energy Internet[J]. Electric Power Construction，2017，38（9）：24-31.

[8] 李刚，孟欢，周国亮，等．基于区块链技术的微网能量管理探析与方案设计[J]．电力建设，2018，39（2）：43-49.
LI Gang，MENG Huan，ZHOU Guoliang，et al. Energy management analysis and scheme design of microgrid based on blockchain[J]. Electric Power Construction，2018，39（2）：43-49.

[9] 邰雪，孙宏斌，郭庆来．能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]．电网技术，2016，40（12）：3630-3638.

TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy Internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638.

[10] 邰雪,孙宏斌,郭庆来. 能源互联网区块链应用的交易效率分析[J]. 电网技术,2017,41(10):3400-3406.
TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Transaction efficiency analysis of blockchain applied to energy Internet[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3400-3406.

[11] 秦金磊,孙文强,朱有产,等. 微电网中基于区块链的电能交易方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(11):130-138.
QIN Jinlei, SUN Wenqiang, ZHU Youchan, et al. Energy transaction method of microgrid based on blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 130-138.

[12] 祁兵,夏琰,李彬,等. 基于区块链激励机制的光伏交易机制设计[J]. 电力系统自动化,2019,43(9):132-139,153.
QI Bing, XIA Yan, LI Bin, et al. Photovoltaic trading mechanism design based on blockchain-based incentive mechanism [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 132-139, 153.

[13] 秦金磊,孙文强,李整,等. 基于区块链和改进型拍卖算法的微电网电能交易方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):2-10.
QIN Jinlei, SUN Wenqiang, LI Zheng, et al. Energy transaction method of microgrid based on blockchain and improved auction algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 2-10.

[14] 徐健,温蜜,张凯,等. 基于区块链的分布式电能竞价交易平台设计[J]. 智慧电力,2019,47(10):56-62,84.
XU Jian, WEN Mi, ZHANG Kai, et al. Bidding transaction platform for distributed electrical energy based on blockchain[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 56-62, 84.

[15] HUANG Y X, WANG B, WANG Y G. Research and application of smart contract based on ethereum blockchain[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1748: 042016.

[16] 王洪涛,邹斌,张亮. 基于节点传输贡献量的省间联络线潮流近似计算[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):135-141.
WANG Hongtao, ZOU Bin, ZHANG Liang. Approximate calculation of inter-provincial tie-line power flow based on node transmission contribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 135-141.

[17] 陈星莺,郁清云,谢俊,等. 基于利用Aumann-Shapley值分摊网损和排放减少量的DLMP计算研究[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):17-23.
CHEN Xingying, YU Qingyun, XIE Jun, et al. DLMP calculation based on power loss and emission reduction allocation using Aumann-Shapley method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 17-23.

[18] 王胜寒,郭创新,冯斌,等. 区块链技术在电力系统中的应用:前景与思路[J]. 电力系统自动化,2020,44(11):10-24.
WANG Shenghan, GUO Chuangxin, FENG Bin, et al. Application of blockchain technology in power systems: prospects and ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 10-24.

[19] 杨明通,周步祥,董申,等. 区块链支持下的微网电力市场设计及调度优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):155-161.
YANG Mingtong, ZHOU Buxiang, DONG Shen, et al. Design and dispatch optimization of microgrid electricity market supported by blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 155-161.

作者简介:

胡 钰

胡 钰(1998—),男,四川宜宾人,硕士研究生,主要研究方向为分布式电能资源交易(**E-mail**:huyu1129@126.com);

李华强(1965—),男,四川成都人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电压稳定与控制、电力市场与技术经济等(**E-mail**:lihuaqiang@scu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Peer-to-peer power trading method for proconsumers based on blockchain

HU Yu[1], LI Huaqiang[1], LI Shanshan[1], LIU Kaiqi[1], CHEN Ying[2]

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. State Grid Sichuan Comprehensive Energy Service Co., Ltd., Chengdu 610021, China)

Abstract: In order to improve the economic benefits of proconsumers, a P2P(Peer-to-Peer) power trading method for proconsumers based on blockchain technology is proposed. Firstly, based on the characteristics of Ethereum platform, the overall architecture of P2P power trading platform is designed. Then, the trading mechanism is designed in detail, including bidding and matching strategies, security verification model and reputation value evaluation model. The service fee collection model of ESP(Energy Service Provider) is established based on Shapley value method, so as to clarify the reasonable income of ESP. Finally, based on the principle of making smart contracts of P2P power trading, a series of functional contracts and auxiliary contracts are designed to realize online order reporting, automatic order matching, real-time fee settlement and other personalized functions for proconsumers. The IDE-Remix platform is used to deploy and simulate the smart contracts, and the results verify the feasibility and effectiveness of the proposed P2P power trading method.

Key words: blockchain; peer-to-peer power trading; proconsumers; smart contracts; Shapley value method

附录 A

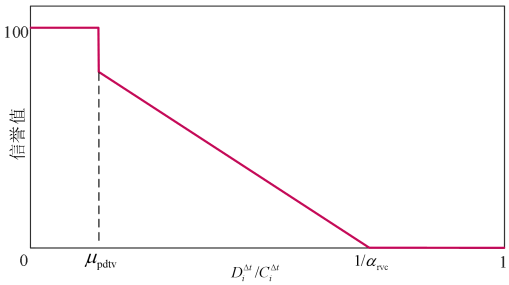

图 A1 信誉值曲线

Fig.A1 Credit value curve

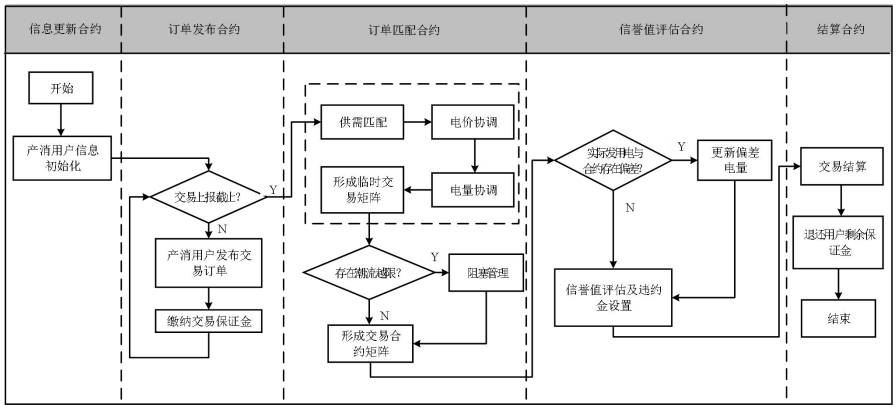

图 A2 智能合约运作流程

Fig.A2 Operation process of smart contracts

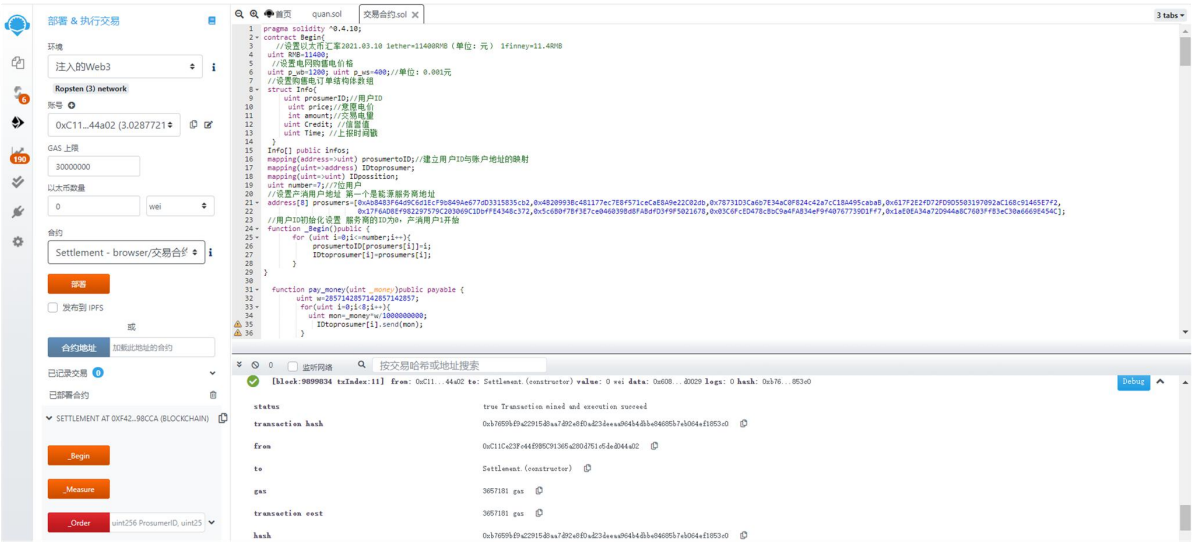

图 A3 智能合约部署界面

Fig.A3 Deployment interface of smart contracts

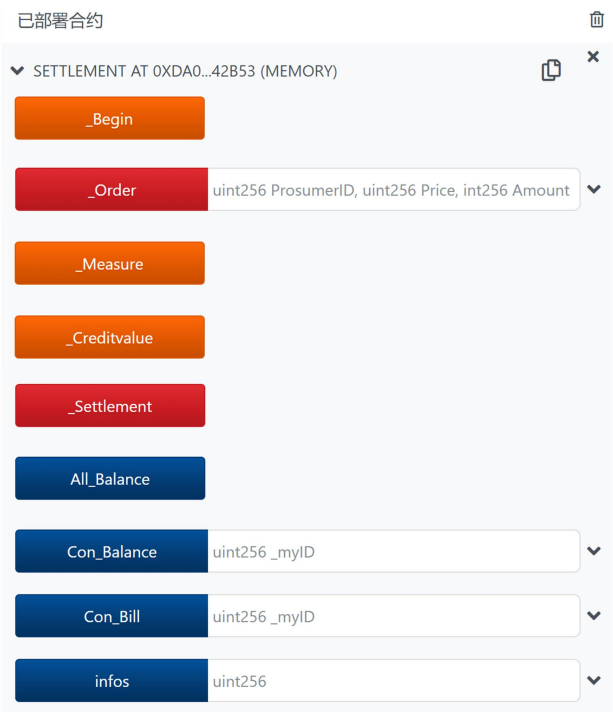

图 A4 智能合约部署详情

Fig.A4 Deployment details of smart contracts

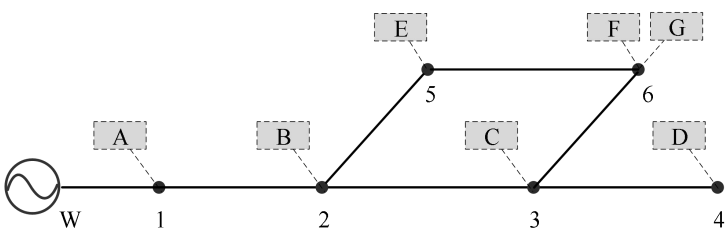

图 A5 6 节点网络拓扑图

Fig.A5 Diagram of six-node distribution network

表 A1 产消用户的报价信息

Table A1 Bidding prices of proconsumers

产消用户	初始信誉值	交易电量/(kW·h)	上报时间/s	意愿价格/[元·(kW·h)$^{-1}$]
A	100	30	4.0	0.60
B	100	20	30.0	0.84
C	80	-15	5.0	0.88
D	100	16	22.0	0.84
E	100	-18	33.0	0.64
F	100	-32	14.0	0.88
G	100	-12	19.0	0.96

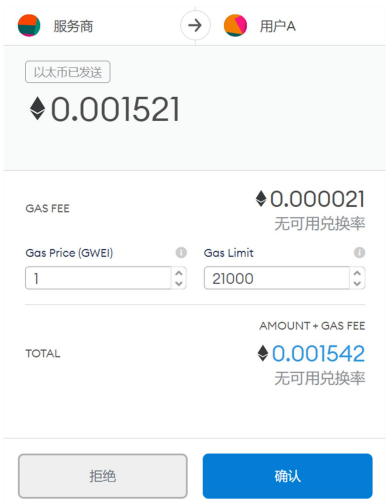

图 A6 代币转账确认信息

Fig.A6 Token transfer confirmation information

图 A7 代币转账历史记录

Fig.A7 Token transfer record