

基于区块链技术的智能配售电交易平台架构设计

韩冬¹, 张程正浩¹, 孙伟卿¹, 张巍¹, 杨文威², 肖敏²

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海市 200093; 2. 上海嘉柒网络科技有限公司, 上海市 200333)

摘要: 为提高用户侧分布式能源市场运行效率,降低交易安全风险,提出了基于区块链技术的智能配售电交易平台架构。首先设计了一种基于双向拍卖机制的配电网全电量竞争的市场交易机制,提高了点对点的撮合效率并兼顾对产消者市场行为的约束。然后采用基于以太坊平台的区块链技术,建立了面向实时交易请求与数据采集的层级化智能配售电交易平台体系架构,实现了能量流与信息流高度耦合下的数据安全交互。最后,算例与应用分析表明智能配售电交易平台具有高效性、可追溯性及实时性。

关键词: 分布式能源; 交易机制; 区块链; 以太坊; 智能合约

0 引言

未来能源产业在其发展与变革中,分布式能源将逐步参与市场竞争。传统集中化交易模式在处理分布式能源与电力用户直接交易时,受其中心化计算能力及涉及用户隐私安全等诸多问题的影响,通常无法处理规模庞大的交易、保证交易的公平透明,限制了交易主体参与市场的意愿。而以 P2P(peer-to-peer)交易为代表的分布式交易模式具有信息透明,交易规则简洁,决策效率高,运行成本低等特点,符合未来能源系统对交易平台的要求^[1]。

采用 P2P 交易模式的能源交易平台在国际上已有诸多案例。Piclo 是英国一个在线的可再生能源交易平台,该平台每半小时进行一次交易的匹配,并且用户拥有与发电商交易的选择权。与 Piclo 类似,Vandebrom 是荷兰一个在线的能源交易平台^[2]。但现有 P2P 能源交易平台大多存在数据篡改、历史追溯、主体信任等方面的问题^[3]。为有效解决上述问题,可在配电网电力交易中引入去中心化的区块链技术^[4]。区块链同时保证了数据的安全性与透明性^[5],为构建新型分布式能源交易体系提供了新的思路。

工业界、学术界已广泛关注于区块链技术在能源领域的应用研究。应用实践方面,2016 年 Exergy 平台应用于 Brooklyn Microgrid 试点项目,该项目实现了社区间居民的 P2P 光伏电力交易,用

户通过智能电表可实时获取发、用电量等相关数据,并通过区块链向他人购买或销售电力。学术研究方面,文献[6]分析了区块链技术在碳排放权认证、虚拟发电资源交易、多能源协同和信息物理系统安全 4 种典型场景的应用。文献[7]探究了适合大用户直购电交易的区块链技术,建立起整体的框架模型。文献[8]提出了一种基于区块链技术的综合需求侧响应资源交易框架。文献[9]提出了一种“多交易请求、多响应报价”的配电网去中心化多边交易模式,搭建了可实际运行的分布式电力交易平台。文献[10]设计出一种基于信用银行的能源区块链交易模式。文献[11]综合分析了微网运营商、大用户以及分布式聚合商的需求及收益,构建了基于区块链技术的微网竞争博弈模型。文献[12]从提高可再生能源利用率、最小化线路损耗的角度,设计了一种基于区块链技术的微网与微网间的能源交易模式。文献[6-12]从交易机制、区块链技术原理、智能合约等方面探讨了区块链在能源交易领域的应用。

本文提出了基于区块链技术的智能配售电交易平台架构,可有效解决分布式能源参与的用户侧市场竞争中存在的安全、效率及信任等方面的问题。首先设计了基于双向拍卖机制的配售电交易机制,针对区块链的算力瓶颈引入奖惩激励,提高 P2P 撮合效率、规范产消者市场行为。然后提出了含用户网络层、能源网络层、交易信息交互层、量测信息交互层、区块链技术支持层的层级化智能配售电交易平台架构,打破了物理-信息通信壁垒,构建了可实际操作的平台。并设计了模块化的智能合约,进一步提高交易平台的安全性。最后算例与仿真分析验证了交易机制的高效性,交易过程的可

收稿日期: 2018-12-25; 修回日期: 2019-02-17。

上网日期: 2019-03-05。

国家自然科学基金资助项目(51777126)。

追溯性,交易平台的实时性。

1 配售电交易机制

为适应分布式能源参与的用户侧市场交易,建立配电网分布式交易机制需要考虑庞大的交易主体数量,随机的产消者供给与需求,以及波动的实时电价等诸多特性。因此,本文设计了以 P2P 分散式直接交易模式为主,配以余量平衡与奖惩激励为辅助措施的市场化交易机制。该交易机制采用全电量实时竞争的形式^[13-14],面向的对象主要为拥有分布式发/用电设备的产消者与公共电网。

该交易机制每个交易周期分为密封报价、P2P 撮合、余量平衡、奖惩激励 4 个阶段,具体可概括为密封报价阶段产消者向交易平台密封申报下一交易周期的发/用电需求及期望电价,产消者的报量、报价信息不对其余产消者公开^[9]。P2P 撮合阶段交易平台采用基于双向拍卖的定价机制^[15-16],优先对绿能产消者进行撮合,其次对所有产消者进行撮合。发/用电设备实时运行时出现偏差的部分,被视为产消者与公共电网进行电量交易,余量平衡阶段进行事后偏差电量结算。奖惩激励阶段交易平台对产消者的市场行为做出相应奖惩,激励产消者根据市场情况进行合理竞价。

配售电交易机制具体实施过程如下。

步骤 1:包括生产者与消费者的产消者,根据各自发/用电设备的功率/负荷预测曲线向交易平台密封申报下一个交易周期的供给或需求电量及期望电价。

步骤 2:交易平台将绿能生产者按报价从低到高、绿能消费者按报价从高到低的顺序分别置入绿能生产者撮合队列、绿能消费者撮合队列。

步骤 3:交易平台对撮合队列中的绿能生产者与绿能消费者进行撮合。当绿能生产者最低报价低于或等于绿能消费者最高报价时,二者即发生交易,成交电价为二者报价的均价,成交电量为二者报量的最小值,若成交的绿能生产者或绿能消费者的交易需求全部得到满足则将其移出撮合队列。依次类推,直到撮合队列中绿能生产者最低报价高于绿能消费者最高报价^[17]。

步骤 4:交易平台将所有生产者按报价从低到高、消费者按报价从高到低的顺序分别置入生产者撮合队列、消费者撮合队列。

步骤 5:交易平台对撮合队列中的所有产消者进行撮合,撮合过程与步骤 3 类似。

步骤 6:智能电表读取上一交易周期产消者实际发/用电量并提交给交易平台。

步骤 7:交易平台对产消者上一交易周期中标量与实际发/用电量之间的偏差电量进行结算,具体规则以生产者为例。

若生产者中标量大于实际发电量,则公共电网需平衡不足的发电量,生产者按一定的价格向公共电网支付平衡费用。第 i 个交易周期第 j 个生产者的平衡费用 $B_{i,j}'$ 为:

$$B_{i,j}' = D_{i,j} A_i W' \quad (1)$$

式中: $D_{i,j}$ 为第 i 个交易周期第 j 个生产者中标量与实际发电量之间偏差电量的绝对值; A_i 为第 i 个交易周期市场平均电价; W' 为平衡系数。

A_i 的计算公式为:

$$A_i = \frac{\sum_{k=1}^t (Q_{i,k} G_{i,k})}{\sum_{k=1}^t Q_{i,k}} \quad (2)$$

式中: t 为第 i 个交易周期所有撮合成功交易的数量; $Q_{i,k}$ 为第 i 个交易周期第 k 笔交易的成交电量; $G_{i,k}$ 为第 i 个交易周期第 k 笔交易的成交电价。

若生产者中标量小于实际发电量,则公共电网需平衡多余的发电量并按一定价格向生产者支付平衡费用。第 i 个交易周期第 j 个生产者的平衡费用 $B_{i,j}''$ 为:

$$B_{i,j}'' = D_{i,j} A_i W'' \quad (3)$$

式中: W'' 为平衡系数。

步骤 8:交易平台根据产消者的报价行为对其进行相应的奖惩,具体规则以生产者为例。

$$R_{i,j}' = E_{i,j}' A_i M' \quad (4)$$

式中: $R_{i,j}'$ 为第 i 个交易周期第 j 个生产者的奖励费用; $E_{i,j}'$ 为第 i 个交易周期第 j 个生产者申报量与实际发电量之间的一致电量; M' 为奖励系数。

$$R_{i,j}'' = E_{i,j}'' A_i M'' \quad (5)$$

式中: $R_{i,j}''$ 为第 i 个交易周期第 j 个生产者的惩罚费用; $E_{i,j}''$ 为第 i 个交易周期第 j 个生产者申报量与实际发电量之间偏差电量的绝对值; M'' 为惩罚系数。

2 智能配售电交易平台架构设计

2.1 交易平台总体架构

考虑到分布式能源交易过程中的设备互联、信息互联^[18],为实现不同产消者、硬件设备与交易系统之间的高效交互,本文将交易平台总体架构划分为用户网络层、能源网络层、交易信息交互层、量测信息交互层和区块链技术支持层 5 个部分。交易平台总体架构如图 1 所示。

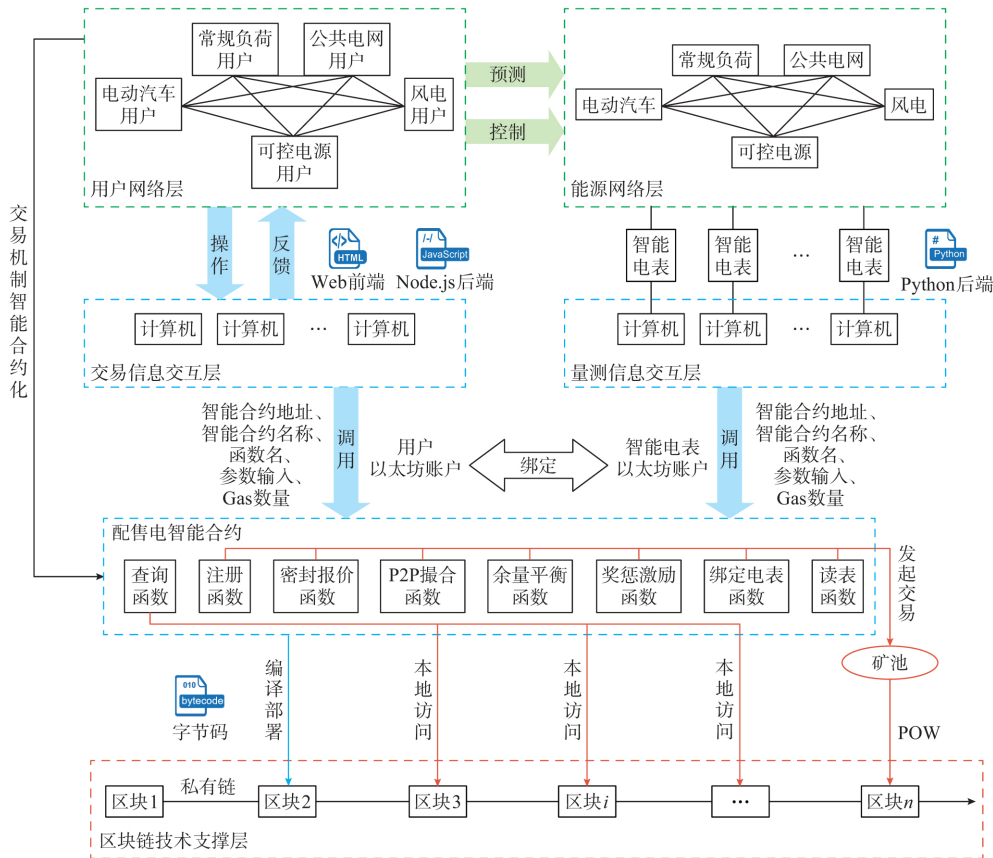


图 1 基于区块链技术的智能配用电交易平台总体架构

Fig.1 Overall framework of smart distribution trading platform based on blockchain technology

1) 用户网络层主体为拥有分布式发/用电设备的产消者与公共电网用户。分布式存储的区块链会在每个用户节点产生信息备份,以此形成用户交互的信息网络。

2) 能源网络层为实际分布式发/用电设备,如风机、光伏面板、电动汽车、可控电源等,各发/用电设备的功率由对应的用户控制。配电网根据交易平台提供的交易计划对能源网络层各发/用电设备进行能源统一调配,以此形成能源交换的物理网络。

3) 交易信息交互层依靠 Web 前端和 Node.js 后端技术创建可视化的操作页面^[19-20],实现了交易请求、交易结果在用户网络层与区块链技术支持层间的有效传递。

4) 量测信息交互层将智能电表的实时量测数据通过 Python 后端技术安全传送至区块链技术支持层^[21],完成量测数据的分布式存储,实现了物理信息到数字信息的转化、能量流与信息流的交互。

5) 区块链技术支持层是交易平台的核心部分,实现了以智能合约为表现形式的逻辑功能^[22],并通过前端与后端技术形成用户间的信任系统。

一般而言,创建与开发一种区块链交易平台,需

要重点解决三类关键技术问题。

1) 选择去中心化应用 (decentralized application, DApp) 平台。本文采用以太坊开发智能配用电交易平台^[23],其优点是便于智能合约彼此的交互,不需要担心共识协议等问题。以太坊使用工作量证明 (proof of work, POW) 共识算法生成区块^[24],创建区块的过程称为挖矿,矿工是挖区块的节点。以太币 (Ether) 是以太坊的原生数字货币,部署智能合约及发起交易均需支付一定数量的以太币,单位为 eth。Gas 是衡量区块链运算消耗的计量单位,Gas 价格为一单位 Gas 所需的以太币数量。为防止智能合约陷入循环攻击,以太坊为每笔交易设置了一定的 Gas 上限,约束每次交易的 Gas 消耗必须低于其上限。

以太坊存在外部账户与合约账户两种类型的账户^[25],两种账户皆可存储以太币,外部账户由私钥控制,可发起交易,无与之相关联的智能合约;合约账户由智能合约控制,不能发起交易,有与之相关联的智能合约。该平台使用合约账户进行资金支付的管理,用户从外部账户预存入合约账户一定数量的以太币作为进行能源交易的代币,智能合约为用户

创建钱包记录代币的数量,交易过程中智能合约结算出交易金额后即对交易双方的钱包进行转账。用户钱包中的一部分代币作为保证金,以保证用户基本的能源交易费用。

2)参与者接入区块链的类型。公有链、联盟链和私有链在分布式程度、运行效率、安全性等方面存在一定差异^[26]。本文采用权限内部可控、处理速度较快、成本较低、安全性较高的私有链来搭建区块链技术支撑层^[27],私有链中的以太坊与实际货币的汇率可由所有节点共同协商决定。

3)智能合约形成机制。本文智能合约的形成机制可表述为首先各用户节点、矿工节点、发/用电设备节点使用相同的创世区块文件创建一条私有链,相互之间连接节点形成局域信息通信网络,通过矿工挖矿,持续生成区块^[28]。然后使用 Solidity 语言将配电网交易机制智能合约化,最后使用 Remix 在线编译器将智能合约编译为字节码,通过 Geth 客户端部署到私有链上^[29]。

2.2 交易平台硬件设备与软件环境

交易平台硬件设备由能源网络层中的实际发/用电设备,交易信息交互层中的计算机,量测信息交互层中的智能电表与计算机构成。计算机均使用 Linux 系统,负责建立私有链、运行 Web 前端、Node.js 后端、Python 后端与 Geth 客户端等软件环境。三相四线费控式智能电表负责测量电量、功率等参数。

Web 前端通过 jQuery 框架将信息传输到 Node.js 后端,Node.js 后端进一步依据 JavaScript 对象简谱远程过程调用(Javascript object notation remote procedure call,JSON-RPC)协议通过应用程序编程接口(application programming interface,API)调用智能合约中的函数^[30-31]。Python 后端会定时通过 RS-485 转通用串行总线(USB)与智能电表进行串口通信,然后依据 DL/T 645—2007 协议将读取到的 16 进制报文转码转为 10 进制电量及智能电表编号(智能电表出厂时被赋予的唯一阿拉伯数字编号)并调用智能合约中的函数^[32]。Geth 是以太坊 Go ethereum 项目的客户端,使用 Go 语言开发,通过 Geth 客户端的一些基本命令,可以便捷地创建以太坊私有链、部署智能合约。

2.3 配电网智能合约

本文所设计的配电网智能合约主要包含密封报价函数、P2P 撮合函数、余量平衡函数、奖惩激励函数、注册函数、绑定电表函数和读表函数 7 个功能函数,查询函数 1 个辅助函数,用户信息存储在各自的结构体变量中,核心函数内部逻辑如图 2 所示。

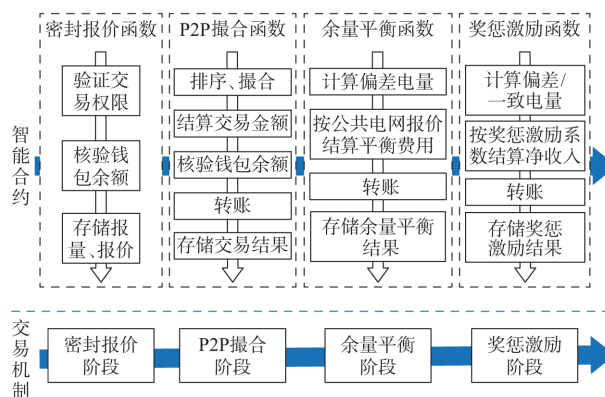


图 2 核心函数内部逻辑

Fig.2 Internal logic of major functions

1)注册函数。该函数将产消者输入的用户名、能源类型或能源偏好、智能合约按照注册先后顺序为其分配的身份标识号(ID)等信息存储到产消者结构体中。

2)密封报价函数。该函数首先验证产消者的交易权限,验证成功后核验生产者钱包余额不得低于保证金、消费者除去保证金的钱包余额不得低于报量与报价的乘积,核验通过后将报量、报价存储到产消者结构体中。

3)P2P 撮合函数。该函数对产消者进行排序、撮合,然后按成交电价结算交易金额并核验消费者除去保证金的钱包余额不得低于交易金额,核验通过后对双方的钱包进行转账,若核验失败则按消费者最大购买能力修正撮合结果、重新结算交易金额并对双方的钱包进行转账,最后存储交易结果。

4)余量平衡函数。该函数计算中标量与实际发/用电量之间的偏差电量,然后结算产消者与公共电网之间的平衡费用,对双方的钱包进行转账,最后存储余量平衡结果。

5)奖惩激励函数。该函数计算申报量与实际发/用电量之间的偏差/一致电量,然后结算产消者奖惩激励的净收入,对产消者的钱包进行转账,最后存储奖惩激励结果。

6)绑定电表函数。为保证量测数据的真实性与唯一性,该函数将产消者以太坊账户地址、智能电表编号存储到智能电表结构体中,将智能电表以太坊账户地址、智能电表编号存储到产消者结构体中。

7)读表函数。该函数由智能电表以太坊账户调用,首先验证输入的智能电表编号与智能电表结构体中存储的智能电表编号是否一致,验证通过后将输入的电量存储到与之对应的产消者结构体中。

8)查询函数。该函数返回当前调用者结构体中的信息,Web 前端对其进行筛选展示。

功能函数的调用方式为 sendTransaction 调用^[23],该方式会消耗外部账户的以太币创建一笔交易,交易进入矿池等待矿工挖矿,待交易通过 POW 共识算法验证被矿工挖出,交易执行成功,矿工得到该笔交易的奖励。查询函数的调用方式为 call 调用,该方式为本地访问,不会发起交易。调用智能合约时需声明智能合约地址、智能合约名、函数名、参数输入,对于 sendTransaction 调用还需声明意愿支付的 Gas 数量。

配售电智能合约通过以下措施进一步保障交易平台的信息安全。

1)函数封装。将一个或多个功能通过函数的形式封装起来,对外只提供一个简单的调用接口,调用者无法得知函数内部逻辑。

2)关键变量与函数声明为内部调用。将关键 storage 类型变量(存储于区块链中的变量)如结构体变量及重要函数如排序函数等声明为内部调用,这些变量与函数仅可被智能合约中的函数调用而不能被外部账户直接调用。

3)用户交易授权。为进一步筛选交易平台真实用户,用户需得到管理节点的交易授权才能调用智能合约中的函数,授权信息存储于用户结构体中。

4)使用 msg.sender 作为键映射变量。映射是一种键-值对应的存储结构,Solidity 语言中的特殊变量 msg.sender 代表当前调用者的以太坊地址,此变量在调用智能合约时自动被赋值,使用 msg.sender 映射可保证键值唯一对应。

3 算例与应用分析

3.1 场景设计及参数设置

应用场景包括 5 个用户,分别为风电用户(绿能生产者)、可控电源用户(生产者)、电动汽车用户(绿能消费者)、常规负荷用户(消费者)和公共电网用户。鉴于分布式能源生产使用设备的功率/负荷短期预测相对准确,仿真测试取 15 min 为一个交易周期^[9,33]。考虑交易过程的运算量集中于 P2P 撮合

阶段,市场组织时序的具体划分为:0~3 min 为密封报价阶段;3~10 min 为 P2P 撮合阶段;10~15 min 为余量平衡与奖惩激励阶段。产消者每 15 min 通过网页申报下一交易周期的供需电量及期望电价,全天采集 96 组数据,各产消者的报价策略如附录 A 图 A1—图 A4 所示。

仿真测试依据以太币与人民币某一天的汇率:1 eth=626.2 元进行结算。为兼顾各方用户利益,鼓励公共电网参与交易,维持系统能量平衡,仿真测试将 W' 和 W'' 分别设定为 1.1 和 0.9,为引导产消者理性竞价,将 M' 和 M'' 分别设定为 0.01 和 0.05。

3.2 仿真分析

P2P 撮合结果如附录 A 图 A5—图 A8 所示,为节约篇幅,仅展示 03:00 与 14:00 时的撮合细节。03:00 时(供大于求)的撮合结果按成交先后顺序依次如表 1 中交易 1,2,3 所示;14:00 时(供小于求)的撮合结果按成交先后顺序依次如表 1 中交易 4,5,6 所示。整体撮合情况如附录 A 图 A1—图 A8 中的申报量、中标量曲线所示。由于交易平台按照绿能优先的原则进行撮合,因此,风电与电动汽车的申报量、中标量曲线大致吻合。可控电源与常规负荷根据各时刻的报价策略、供需关系的不同,申报量与中标量曲线略有差异。

取常规负荷为参考样例,分析余量平衡的作用与成效。由于常规负荷功率预测与实际情况存在一定误差,且撮合优先级低,需平衡的偏差电量往往相对其他产消者多,因此更具有典型性。常规负荷中标量与实际用电量如图 3 所示。

取 14:00 和 18:30 为研究断面,14:00 时,常规负荷中标量小于实际用电量,公共电网平衡电量为 $0.85 \text{ kW} \cdot \text{h}$,此时市场平均电价计算为 $0.757 \times 10^{-3} \text{ eth}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,常规负荷向公共电网支付 $0.708 \times 10^{-3} \text{ eth}$ 。18:30 时,常规负荷中标量大于实际用电量,公共电网平衡电量为 $0.08 \text{ kW} \cdot \text{h}$,此时市场平均电价计算为 $0.723 \times 10^{-3} \text{ eth}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,公共电网向常规负荷支付 $0.052 \times 10^{-3} \text{ eth}$ 。

表 1 03:00 与 14:00 的撮合结果
Table 1 Clearing results at 03:00 and 14:00

交易序号	生产者	消费者	总供给电量/ (kW · h)	总需求电量/ (kW · h)	成交电量/ (kW · h)	成交电价/ ($10^{-3} \text{ eth} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)
1	风电用户	电动汽车用户	1.53	1.04	0.84	0.532
2	可控电源用户	电动汽车用户			0.10	0.484
3	可控电源用户	常规负荷用户			0.10	0.488
4	风电用户	电动汽车用户	0.55	1.27	0.25	0.743
5	风电用户	常规负荷用户			0.18	0.762
6	可控电源用户	常规负荷用户			0.12	0.779

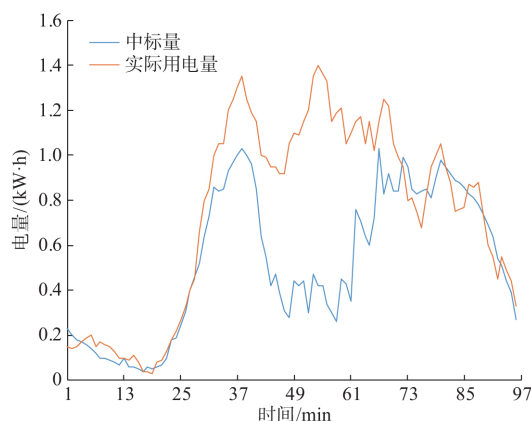


图3 常规负荷中标量/实际用电量
Fig.3 Clearing/actual quantity of conventional load

同样地,取常规负荷为参考样例,分析奖惩激励的实施效果。常规负荷申报量与实际用电量如图4所示。取14:00时为研究断面,常规负荷申报量与实际用电量之间的一致电量为 $1.02 \text{ kW} \cdot \text{h}$,偏差电量为 $0.13 \text{ kW} \cdot \text{h}$,奖励金额为 $0.008 \times 10^{-3} \text{ eth}$,惩罚金额为 $0.005 \times 10^{-3} \text{ eth}$,净收入为 $0.003 \times 10^{-3} \text{ eth}$ 。

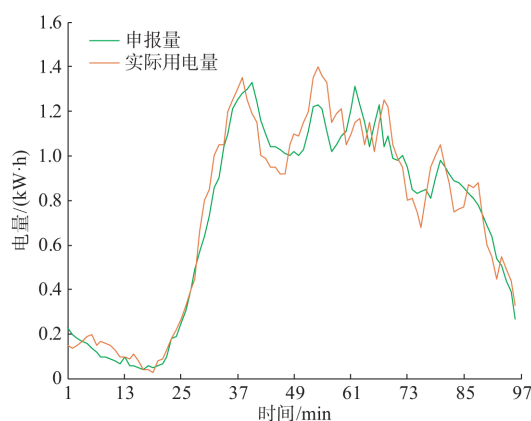


图4 常规负荷申报量/实际用电量
Fig.4 Bidding/actual quantity of conventional load

仿真过程中的交易记录通过网页查询得到,结果表明,产消者可在规定时间内完成密封报价,交易平台可按照交易机制及时结算交易金额、余量平衡费用、奖惩激励费用并完成资金支付,智能电表可定时上传实际发/用电量。

使用 Geth 客户端输入交易哈希可查询交易的区块链信息,附录A表A1为14:00时常规负荷密封报价的区块链交易信息,区块链全天运行情况如附录A表A2所示。数据表明,仿真测试平均每次交易执行成功的时间为9~10 s,交易执行成功的时间取决于该时刻的交易数量、矿工节点数量等因素。区块链在运行过程中可能会出现交易失败的情况,

失败后可根据具体情况由交易平台重新组织交易或进行事后追补结算,交易失败的原因主要有三点。

1)以太坊账户未解锁。用户访问智能合约之前首先需要解锁以太坊账户,若未进行解锁或解锁时间结束则用户无法进行交易。附录A表A2显示在08:00—12:00期间出现100次交易失败,原因在于产消者与公共电网以太坊账户的解锁时间于08:05结束,由于人员离开未能及时发现并恢复,09:30对所有账户重新进行解锁。各用户按计划在此期间分别需发起22,19,18,25和16次交易,因此该时段共出现100次交易失败的情况。

2)Gas消耗超限。若预估Gas消耗超过用户愿意支付的Gas数量或Gas上限,则该笔交易不能被执行。

3)外部账户以太币余额不足。若用户的外部账户以太币余额不足以支付交易的Gas消耗,则该笔交易无法被执行。附录A表A2显示16:00—20:00期间出现1次交易失败,原因在于常规负荷经过一段时间的交易后,外部账户以太币余额不足以支付其进行密封报价的Gas消耗。

4 结语

本文设计了基于双向拍卖机制的配售电交易机制,并结合区块链技术提出了包含用户网络层、能源网络层、交易信息交互层、量测信息交互层、区块链技术支撑层的层级化智能配售电交易平台架构。仿真结果表明该交易平台可以按照交易机制高效地制定合理的资源配置策略,实现偏差电量的集中平衡,并且可对产消者的市场行为做出有效奖惩,同时采用基于区块链技术搭建的交易平台能够保证交易的可追溯性与实时性。

本文是将区块链技术应用用于分布式能源交易领域的起步性研究,后续研究将与电网物理模型相结合,拓展安全校验、计划修正、市场评估等业务,进一步搭建功能完备、成熟可靠的电力交易平台。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] HAMARI J, SJÖKLINT M, UKKONEN A. The sharing economy: why people participate in collaborative consumption [J]. Journal of the Association for Information Science and Technology, 2016, 67(9): 2047-2059.
- [2] ZHANG Chenghua, WU Jianzhong, ZHOU Yue, et al. Peer-to-peer energy trading in a microgrid [EB/OL]. [2018-12-25]. <http://orca.cf.ac.uk/109995/>.
- [3] CHEN Sijie, LIU Chencheng. From demand response to

- transactive energy: state of the art[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 10-19.
- [4] 杨德昌,赵肖余,徐梓潇,等.区块链在能源互联网中应用现状分析和前景展望[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3664-3671. YANG Dechang, ZHAO Xiaoyu, XU Zixiao, et al. Developing status and prospect analysis of blockchain in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3664-3671.
- [5] SWAN M. Blockchain: blueprint for a new economy [M]. Sebastopol, USA: O'Reilly Media Inc, 2015.
- [6] 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):4011-4022. 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): 4011-4022.
- [7] 欧阳旭,朱向前,叶伦,等.区块链技术在用户直购电中的应用初探[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3737-3745. OUYANG Xu, ZHU Xiangqian, YE Lun, et al. Preliminary applications of blockchain technique in large consumers direct power trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3737-3745.
- [8] 武庚,曾博,李冉,等.区块链技术在综合需求侧响应资源交易中的应用模式研究[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3717-3728. WU Geng, ZENG Bo, LI Ran, et al. Research on the application of blockchain in the integrated demand response resource transaction [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3717-3728.
- [9] 平健,陈思捷,张宁,等.基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3682-3690. PING Jian, CHEN Sijie, ZHANG Ning, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3682-3690.
- [10] LI Zhetao, KANG Jiawen, YU Rong, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial Internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(8): 3690-3700.
- [11] 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.
- [12] THAKUR S, BRESLIN J G. Peer to peer energy trade among microgrids using blockchain based distributed coalition formation method[J]. Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy, 2018, 3(5): 1-17.
- [13] 周明,严宇,丁琪,等.国外典型电力市场交易结算机制及对中国的启示[J].电力系统自动化,2017,41(20):1-8. DOI: 10.7500/AEPS20170223001. ZHOU Ming, YAN Yu, DING Qi, et al. Transaction and settlement mechanism for foreign representative power markets and its enlightenment for Chinese power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20170223001.
- [14] 邹鹏,陈启鑫,夏清,等.国外电力现货市场建设的逻辑分析及对中国的启示与建议[J].电力系统自动化,2014,38(13):18-27. ZOU Peng, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Logical analysis of electricity spot market design in foreign countries and enlightenment and policy suggestions for China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 18-27.
- [15] 王先甲,殷红.一种激励相容的电力市场双边拍卖机制[J].电力系统自动化,2004,28(18):7-15. WANG Xianjia, YIN Hong. An incentive compatible double auction mechanism in electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 7-15.
- [16] 赵新刚,王晓永.基于双边拍卖的可再生能源配额制的绿色证书交易机制设计[J].可再生能源,2015,33(2):275-282. ZHAO Xingang, WANG Xiaoyong. The design of green certificate trading mechanism based on double auction under the renewable energy quota system [J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(2): 275-282.
- [17] 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.
- [18] 宁晓静,张毅,林湘宁,等.基于物理-信息-价值的能源区块链分析[J].电网技术,2018,42(7):2312-2323. NING Xiaojing, ZHANG Yi, LIN Xiangning, et al. Energy blockchain system based on integrated physical-cyber-value perspectives[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2312-2323.
- [19] 罗宏俊,冯瑞.基于 Web 技术进行移动应用开发和中间件的研究[J].计算机系统应用,2017,26(11):19-27. LUO Hongjun, FENG Rui. Research on mobile application development and middle controller based on Web technology [J]. Computer Systems & Applications, 2017, 26(11): 19-27.
- [20] TILKOV S, VINOSKI S. Node.js: using JavaScript to build high-performance network programs [J]. IEEE Internet Computing, 2010, 14(6): 80-83.
- [21] 齐鹏,李隐峰,宋玉伟.基于 Python 的 Web 数据采集技术[J].电子科技,2012,25(11):118-120. QI Peng, LI Yinfeng, SONG Yuwei. Research on Python-based Web scraping technology [J]. Electronic Science and Technology, 2012, 25(11): 118-120.
- [22] WATANABE H, FUJIMURA S, NAKADAIRA A, et al. Blockchain contract: securing a blockchain applied to smart contracts [C]// 2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics, January 7-11, 2016, Las Vegas, USA.
- [23] 曹迪迪,陈伟.基于智能合约的以太坊可信存证机制[EB/OL]. [2018-11-19]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/51.1307.TP.20181119.1051.002.html>. CAO Didi, CHEN Wei. Mechanism of trusted storage in

- Ethereum based on smart contract[EB/OL]. [2018-11-19]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/51.1307.TP.20181119.1051.002.html>.
- [24] 丁伟, 王国成, 许爱东, 等. 能源区块链的关键技术及信息安全问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1026-1034.
DING Wei, WANG Guocheng, XU Aidong, et al. Research on key technologies and information security issues of energy blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1026-1034.
- [25] CRUZ J P, KAJI Y, YANAI N. RBAC-SC: role-based access control using smart contract[J]. IEEE Access, 2018, 4(6): 12240-12251.
- [26] 陈志东, 董爱强, 孙赫, 等. 基于众筹业务的私有区块链研究[J]. 信息安全研究, 2017, 3(3): 227-236.
CHEN Zhidong, DONG Aiqiang, SUN He, et al. Research on private blockchain based on crowdfunding[J]. Journal of Information Security Research, 2017, 3(3): 227-236.
- [27] 李彬, 曹望璋, 张洁, 等. 基于异构区块链的多能系统交易体系及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 183-193. DOI: 10.7500/AEPS20170915012.
LI Bin, CAO Wangzhang, ZHANG Jie, et al. Transaction system and key technologies of multi-energy system based on heterogeneous blockchain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 183-193. DOI: 10.7500/AEPS20170915012.
- [28] 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.
- [29] HASAN H R, SALAH K. Proof of delivery of digital assets using blockchain and smart contract[J]. IEEE Access, 2018, 4(6): 65439-65448.
- [30] 李德贤, 陆歌皓, 姚绍文. JSON-RPC 协议分析、扩展及其应用[EB/OL]. [2018-12-25]. <http://www.doc88.com/p-9985014851171.html>.
LI Dexian, LU Gehao, YAO Shaowen. The analysis, extension and application of JSON-RPC protocol[EB/OL]. [2018-12-25]. <http://www.doc88.com/p-9985014851171.html>.
- [31] WANG Shangping, ZHANG Yinglong, ZHANG Yaling. A blockchain-based framework for data sharing with fine-grained access control in decentralized storage system[J]. IEEE Access, 2018, 4(6): 38437-38450.
- [32] 孟珏遐, 朱宁辉, 白晓民, 等. 基于 DL/T645—2007 协议的智能电表嵌入式通信软件研发[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 7-12.
MENG Junxia, ZHU Ninghui, BAI Xiaomin, et al. Research and development of embedded communication software for smart meters based on DL/T 645—2007 protocol[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 7-12.
- [33] 贺宜恒, 周明, 武昭原, 等. 国外典型电力平衡市场的运作模式及其对中国的启示[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3520-3528.
HE Yiheng, ZHOU Ming, WU Zhaoyuan, et al. Study on operation mechanism of foreign representative balancing markets and its enlightenment for China[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3520-3528.

韩冬(1984—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向: 电力系统优化运行。E-mail: han_dong@usst.edu.cn
张程正浩(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力市场、分布式能源、区块链。E-mail: 779347241@qq.com
孙伟卿(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 智能电网、微电网发电与并网。E-mail: sidswq@163.com

(编辑 杨松迎)

Framework Design of Smart Distribution Trading Platform Based on Blockchain Technology

HAN Dong¹, ZHANG Chengzhenghao¹, SUN Weiqing¹, ZHANG Wei¹, YANG Wenwei², XIAO Min²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for

Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Jiaqi Network Technology Co. Ltd., Shanghai 200333, China)

Abstract: In order to improve the operational efficiency of retail market and reduce the security risk in transaction processes, this paper presents a framework of smart distribution trading platform based on blockchain technology. An all-parameter competitive transaction mechanism in distribution network has been designed based on double auction mechanism to improve P2P(peer-to-peer) matchmaking efficiency and restrain prosumer's market behavior. This paper designs the hierarchical framework of smart distribution trading platform for real-time transaction request and data acquisition which enables data security interaction between highly coupled energy flow and information flow using Ethereum blockchain technology. Case studies show the operational efficiency, information traceability and transaction instantaneity of smart distribution trading platform.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777126).

Key words: distributed energy resource; transaction mechanism; blockchain; Ethereum; smart contract

附录 A

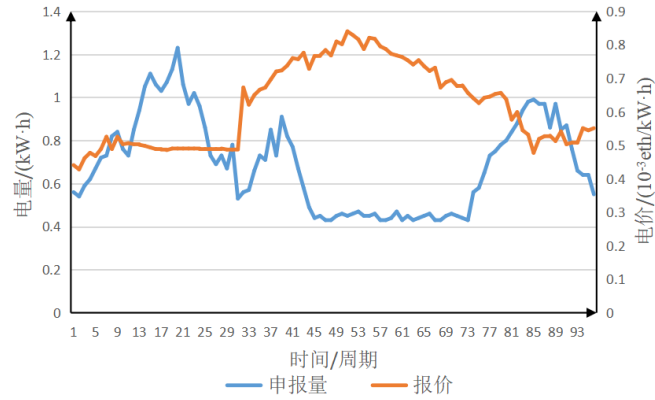


图 A1 风电申报量/报价
Fig.A1 Bidding quantity and price of wind power

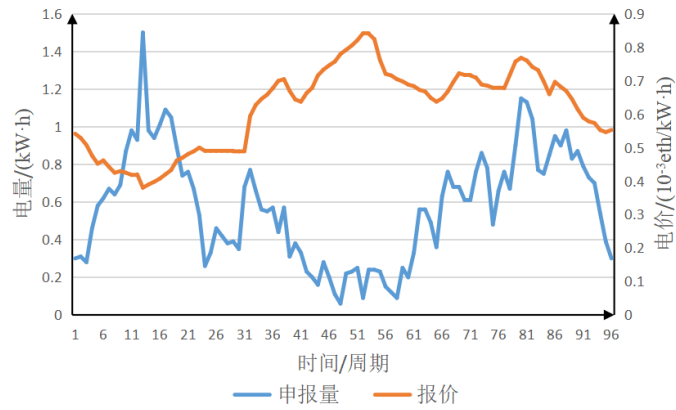


图 A2 可控电源申报量/报价
Fig.A2 Bidding quantity and price of controllable power source

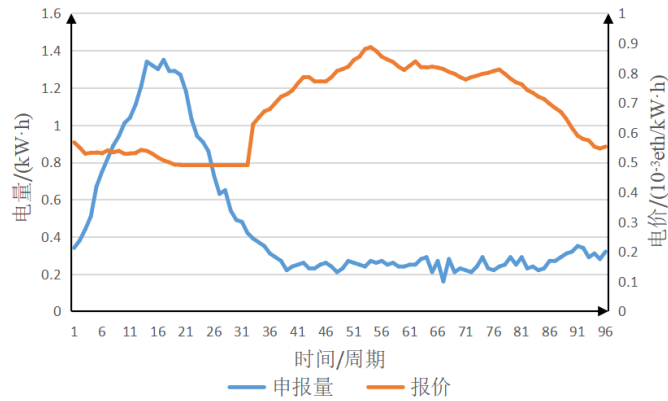


图 A3 电动汽车申报量/报价
Fig.A3 Bidding quantity and price of electric vehicle

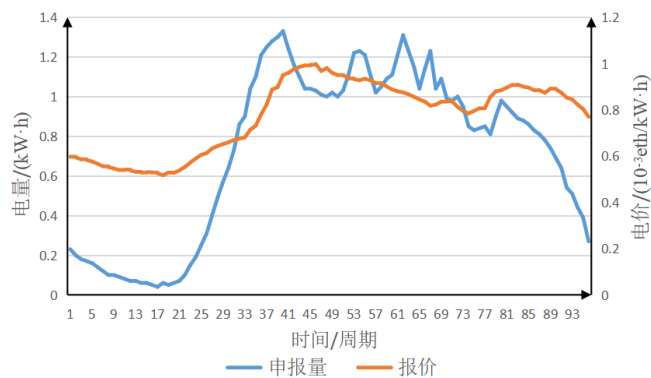


图 A4 常规负荷申报量/报价

Fig.A4 Bidding quantity and price of conventional load

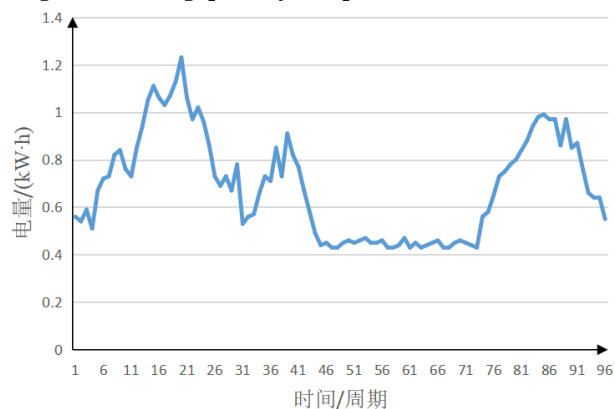


图 A5 风电中标量

Fig.A5 Clearing quantity of wind power

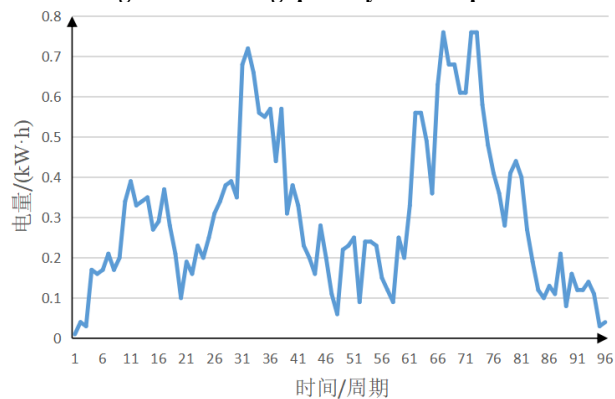


图 A6 可控电源中标量

Fig.A6 Clearing quantity of controllable power source

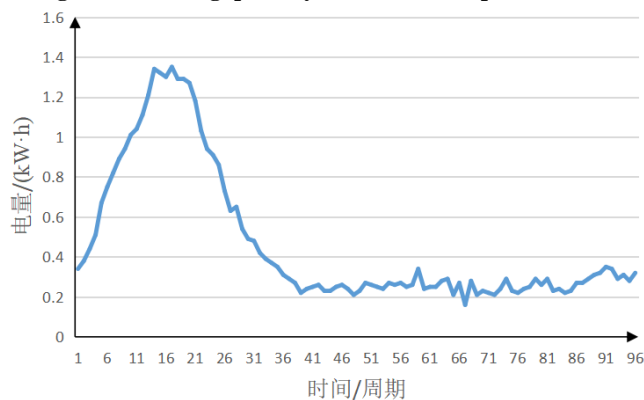


图 A7 电动汽车中标量

Fig.A7 Clearing quantity of electric vehicle

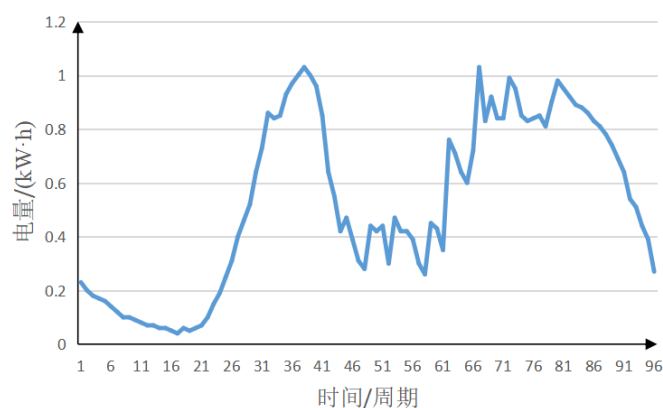


图 A8 常规负荷中标量
Fig.A8 Clearing quantity of conventional load

表 A1 14:00 时刻常规负荷密封报价信息
Table A1 Sealed-bid information of conventional load at 14:00

名称	内容	具体信息
Hash	该笔交易的哈希	0xb0d9691b2d4ddd61cd9a5e8f9827b8a5ae58cc9c06f1a5f0a3227faa533e569b
blockHash	交易所在区块的哈希	0xd77c0200a9f058df802f50cd45eb1b1c3e6179ed93045197fc9e9bcc950a2008
blockNumber	交易所在区块的序号	1678
from	交易发起者的地址	0xe1fefb8bbc16ba9d55e45f16bd153bcbc7b6e55d
gas	交易发起者愿意支付的 Gas 数量	10000000
gasPrice	区块链的 Gas 价格	4000000

表 A2 区块链系统运行信息
Table A2 Operational information of blockchain system

时间段	交易发起数量	交易执行成功数量	交易执行成功平均时间/s
00:00-04:00	246	246	9
04:00-08:00	296	296	9
08:00-12:00	378	278	10
12:00-16:00	368	368	9
16:00-20:00	312	311	10
20:00-24:00	234	234	9