第48卷第4期 中国科学技术大学学报 Vol.48,No.4
2018年4月 JOURNAL OF UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA Apr. 2018

文章编号:0253-2778(2018)04-0307-07

基于联盟区块链的分布式能源交易认证模型

佘 维[1,2],杨晓宇[1],胡 跃[2],刘 琦[1],刘 炜[1,2]

(1.郑州大学软件技术学院,河南郑州 450000;2.郑州大学互联网医疗与健康服务河南省协同创新中心,河南郑州 450000)

摘要:针对分布式能源在交易认证中的数据安全问题,提出一类基于联盟链的分布式能源交易认证模型,通过区块链权益证明、数据加密、时间戳和分布式共识的方法优化了传统能源的交易模式,以分布式共享账本的方式解决了交易数据过于中心化的问题,并运用数据分离的方法在一定程度上保护了交易各方的私有数据,提高了分布式能源交易数据安全性、信息透明度和自动化认证水平.仿真实验验证了模型的有效性.

关键词:能源互联网;联盟链;交易认证;数据安全性

中图分类号:TP391 **文献标识码**:A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2018.04.006

引用格式:佘维,杨晓宇,胡跃,等 基于联盟区块链的分布式能源交易认证模型[J].中国科学技术大学学报,2018,48(4):307-313.

SHE Wei, YANG Xiaoyu, HU Yue, et al. Transaction certification model of distributed energy based on consortium blockchain[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018,48(4):307-313.

Transaction certification model of distributed energy based on consortium blockchain

SHE Wei[1,2], YANG Xiaoyu[1], HU Yue[2], LIU Qi[1], LIU Wei[1,2]

(1.*School of Software Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou* 450001, *China*;
2. *Cooperative Innovation Center of Internet Healthcare, Zhengzhou University, Zhengzhou* 450000, *China*)

Abstract: Targeting data security issues of distributed energy in trade certification, A transaction certification model of distributed energy based on consortium blockchain was proposed. By means of proof of stake, data encryption, timestamp and distributed consensus, the mode of traditional energy transaction was optimized. The model solved the problem of high centralization of transaction data by the distributed shared account book, which protects the privacy of the users and improves the transparency of information and the level of autornatic certification. Simulation results verified the effectiveness of the model.

Key words: energy Internet; consortium blockchain; transaction certification; data security

收稿日期:2017-05-27;**修回日期**:2017-06-25

基金项目:国家自然科学基金(61602422),河南省科技攻关计划项目(162102310536),河南省基础与前沿技术研究项目基金(152300410047),河南省产学研合作项目(182107000053),河南省高等学校重点科研项目基金(15A520028),郑州大学研究生核心学位课程项目(YJSXWKC201540),赛尔网络下一代互联网技术创新项目(NGII20160705)资助.

作者简介:佘维,男,1977年生,博士/副教授.研究方向:复杂系统建模、Petri网理论、软件工程.E-mail:wshe@zzu.edu.cn

通讯作者:刘炜,博士/副教授.E-mail:wliu@zzu.edu.cn

0 引言

随着国家经济的快速发展，工业和居民用电需求高速增长，而能源资源短缺、环境污染与经济社会发展之间的矛盾也变得日益突出.以太阳能、风能为代表的分布式可再生能源的发展成为缓解上述矛盾的重要解决方案[1].随着分布式能源的大规模建设，分布式能源市场中各主体，如发电单元(generating unit，GU)、用电单元(power unit，PU)、调度中心(dispatch center，DC)等，进行能源交易和消纳的需求也逐渐凸显出来.文献[2]提出了一种基于能源路由器的能源交易模式，通过控制不同能源的自由交易实现了分布式能源的就地、就近消纳.文献[3]提出了一种负载调度优化和能源交易控制的方法，极大地降低了可再生能源的交易成本.文献[4]提出一种自备电厂与新能源企业间进行发电权转让的交易模式，有效提升了电网的调峰消纳能力.文献[5]提出一种基于多时间尺度的新能源协调优化调度方法，通过逐步降低能源预测误差，提高了对新能源的最大安全消纳容量.

上述文献对于能源交易和分布式能源消纳的研究和探索有很好的借鉴意义，但也存在一些共性问题：①目前的分布式能源交易系统大多采用中心式数据存储，集中存放所有交易细节[6]，造成能源交易的安全性、稳定性被扼于一处，一旦系统瘫痪或被攻陷，将造成不可挽回的损失；②在完全中心化的系统中，分布式能源市场中各主体的财务相关信息、行为相关信息等，在一定程度上处于直接或者间接的被任意调取和访问之下，隐私问题未被真正重视[7]；③用户间的能源交易，物理网络上能源流通，各单元的产能方案存在不匹配、不协调情况[8].能源传输、价值转换和资源变现分属于电网中心、通讯公司和银行机构，只有协同工作才能完成整个交易过程.

本文提出一类基于联盟链的分布式能源交易认证模型，通过区块链权益证明、数据加密、时间戳和分布式共识的方法优化了传统能源的交易模式，以分布式共享账本的方式解决了交易数据过于中心化的问题，并运用数据分离的方法在一定程度上保护了交易各方的私有数据.

1 区块链技术

区块链[9]是一种去中心化(decentralized)、无需信任(trustless)的新型数据架构，由网络中所有节点共同拥有、管理和监督，不接受单方面控制.区块链技术采用非对称密码学原理对数据进行加密，同时借助分布式系统各节点的工作量证明等共识算法形成的强大算力来抵御外部攻击、保证区块链数据不可篡改和不可伪造[10]，具有较高的安全性.该技术是新型加密数字货币(cryptocurrency)的技术核心[11]，已成为解决物联网中信息安全、数据存储、交互处理等核心问题的最新解决方案[12].区块链的数据结构如图1所示.

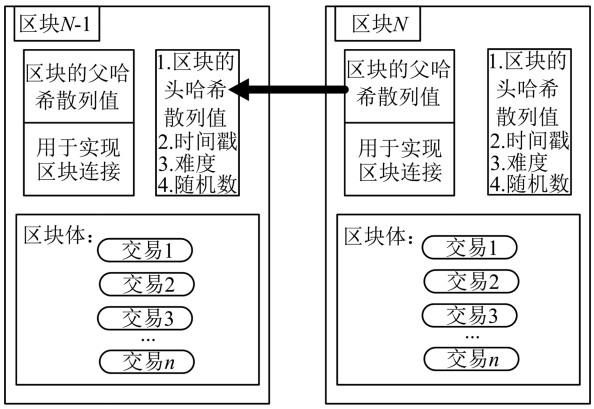

图1 区块链数据块连接示意图

Fig.1 The connection of data block in blockchain

1.1 区块链分类

区块链的应用模式主要有三种[10]：公有链(public blockchain)、联盟链(consortium blockchain)和私有链(private blockchain).其中，公有链是完全去中心化的区块链，分布式系统的任何节点均可参与链上数据的读写、验证和共识，并根据工作量证明或权益证明等共识机制获得相应的经济激励；联盟链是部分去中心化的区块链，适用于多个实体构成的组织或联盟，其共识过程受到预定义的一组节点控制；私有链则是完全中心化的区块链，适用于特定机构的内部数据管理与审计等.具体选用区块链哪种模式取决于开发者和应用场景的需求.

1.2 联盟链

公有链完全去中心化、去信任化等优点无疑是分布式节点通讯方式的巨大创新，但是公有链完全匿名化的方式并不适用于分布式能源交易，任何节点无须任何许可便可以随时加入或者脱离网络，这在某种程度上对于电网而言是无法监管的.联盟链可以通过对参与节点的公私钥控制以及对参与共识的记账节点的权限控制来实现监管.

对比公有链，联盟链有如下优势：①联盟链在短

期内具有可扩展的优势，具有一定程度的调控性；②联盟链是一类“受控”的密码学系统，所带来的低风险性更容易被使用者和监管部门接受；③联盟链只需要部分节点参与验证与记账，少量的联盟节点具有较高的可信度，从而简化了认证过程，使其比公有链有更快的交易速度；④在联盟链中，交易成本可根据实际交易频率以及交易数量进行自适应调整.

在联盟链中达成共识需要一定的权限许可，但是一些公有链的特征在联盟链中仍有体现：①联盟链中各数据账本仍然是分布式的，保留了强大的体系结构，防止了历史数据被单方面篡改；②联盟链仍然具有系统永久性，数据一旦写入区块便不可更改；③联盟链中的每个系统和总账仍然具有个体的独特性；④联盟链的时间戳以及特定的连接方式使得区块中被证实并写入的数据都可以被追溯，方便查询和监管.

2　分布式能源交易认证模型

本文在文献[13]的基础上提出一种基于联盟区块链的分布式能源交易认证模型(transaction certification model of distributed energy based on consortium blockchain，CB-TCMDE)，从而安全可靠地实现 GU 与 PU 间分布式能源的按需交易.本文根据“模型＋规则”的方式来表达 CB-TCMDE 认证模型，模型层面采用形式化表达介绍 CB-TCMDE 的 6 元组，并使用交易认证算法详细说明认证过程；规则层面分别从网络结构、合约状态和认证方式 3 个方面刻画 CB-TCMDE 的子特征.

2.1　交易认证模型

定义 2.1　分布式能源交易认证模型

CB-TCMDE 为一个 6 元组：

$$\text{CB-TCMDE}=(\text{GU},\text{PU},\text{DC},\text{ET},\text{CB},\rho)$$

其中，

(Ⅰ)$\text{GU}=\{\text{gu}_i \mid i\in N^+\}$为发电单元的有限集；

(Ⅱ)$\text{PU}=\{\text{pu}_j \mid j\in N^+\}$为用电单元有限集；

(Ⅲ)$\text{DC}=\{\text{dc}_k \mid k\in N^+\}$为调度中心有限集；

(Ⅳ)$\text{ET}\subset(\text{GU}\times\text{DC}\times\text{PU})$为发电单元经调度中心向用电单元提供能源的交易集；

(Ⅴ)$\text{CB}=\{\text{cb}_l \mid l\in N^+\}$为联盟区块链中的验证和记账节点的有限集；

(Ⅵ)ρ：DC→CB 为 DC 到 CB 的映射函数.

使用 CB-TCMDE 进行分布式能源交易认证的序列图如图 2 所示.

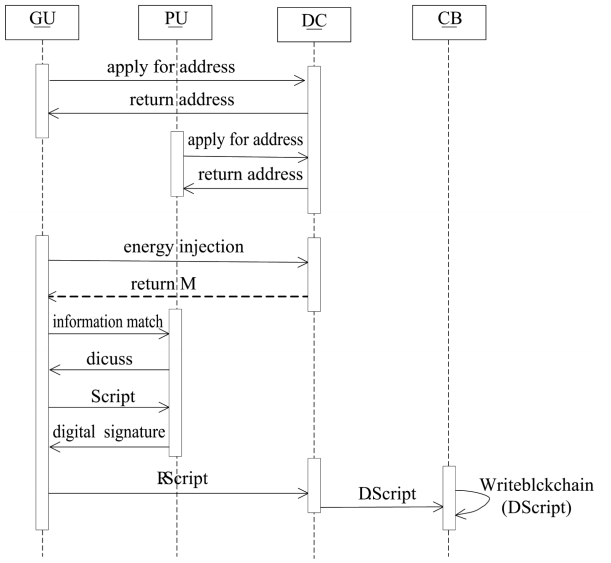

图 2　能源交易认证模型序列图

Fig.2　Sequence diagram of energy transaction certification model

图 2 采用的认证如下算法 2.1 所示.

算法 2.1　交易认证算法

步骤 1　gu_i及pu_j各向dc_k申请一组公钥和私钥并生成各自的交易地址.

步骤 2　gu_i向dc_k提交发电信息后，dc_k向gu_i反馈计划发电量 E，同时还包括一个与特定计划绑定的随机数 RndN，在随后的交易过程之中，该随机数被锁定.gu_i将 E 进行广播，并监听 PU 请求.

步骤 3　pu_j筛选广播信息，判断参数的合理性并利用联盟区块链的通讯协议与gu_i进行协商.gu_i与pu_j经由dc_k形成一条能源供给通路 et∈ET.

步骤 4　gu_i与pu_j达成共识后，gu_i将交易信息写进智能合约，并通过双方的私钥签名，dc_k完成交易的验证和广播，由 ρ(DC)获得一个联盟区块链的记账节点cb_q，并写入区块链.

算法 2.1 的形式化描述为

1 $\text{gu}_i\in\text{GU}$，$\text{pu}_j\in\text{PU}$，$\text{dc}_k\in\text{DC}$

2 dc_k send corresponding addresses to gu_i，pu_j

3 dc_k send E_i，RndN_z to gu_i

4 If gu_i agree with E_i，RndN_i

5　gu_i broadcasts Script(E_i，M_i，Addr_{gui}，RndN_z，Timestamp)

>GU 将调度计划以合约 Script 形式进行广播

6 Else

7　gu_icheck with dc_k

8　Go to step 3

9 End If

10 If pu_j matches Script

11 et=(gu_i, pu_j, dc_k, $RndN_z$)
12 etlocks $RndN_z$ >锁上随机数
13 End If
14 While disputes
15 Ifnegotiate
16 gu_i or pu_j revise Script
17 Else
18 release et, Script
19 End If
20 End While
21 pu_j signed RScript(E_i, M_i, $Addr_{gui}$, $Addr_{puj}$, $RndN_z$, Timestamp)
>PU, GU 生成预确认合约 RScript 并数字签名
22 dc_k broadcasts DScript (E, M, $Addr_{gui}$, $Addr_{puj}$, $Addr_{dck}$, $RndN_z$, Timestamp, Done)
>DC 生成最终确认合约 DScript 并广播
23 $cb_q \leftarrow \rho$(DC)
24 If majority of DC validated DScript
25 cb_q write to the block
26 cb_q release et, DScript
27 End If

2.2 网络结构

区块链系统采用对等式网络(peer-to-peer network, P2P 网络)以扁平式拓扑结构互相连通各分布节点,使其共同参与交易.

CB-TCMDE 中,一旦特定发电单元和特定的用电单元进行预交易,对应的发电单元 gu_i 用电单元 pu_j 以及对应的调度中心 dc_k 将形成一条交易通路 et(如图 3),且该交易通路仅用于本次调度.在形成交易通路的同时,还将生成一个随机数 RndN,该随机数伴随对应的发电单元、用电单元、调度中心的选取而产生,并与 3 者绑定,在进行电量调度形成交易通路的同时,随机数被锁定.交易过程中,RndN 将持续写入脚本合约,通过确认随机数的不变性来保证调度时交易参与者与参与时间的准确性.调度完成后进行交易验证时,交易开始与结束的随机数必须保持一致.

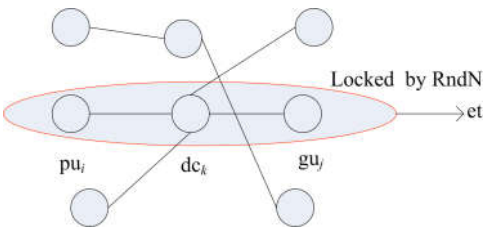

图 3 交易通路示意图

Fig.3 The figure of trading channel

2.3 合约状态

CB-TCMDE 中,采用脚本合约的方式来表述具体的交易过程.脚本合约中应该包含交易的电量 E,对应电量的价格 M,交易通路对应的随机数 RndN,交易的时间戳 Timestamp 以及交易参与者对脚本合约的认证数字签名.

CB-TCMDE 中包含 3 种脚本合约 Script、RScript 以及 DScript.对于一次能源调度而言,这 3 种脚本合约应是分步递进完成的.Script(E_i, M_i, $Addr_{gu_i}$, $RndN_i$, Timestamp)为最初的脚本,由发电单元生成,待对应的用电单元接收.RScript(E, M, $Addr_{gu_i}$, $Addr_{pu_j}$, $RndN_i$, Timestamp)是在发电用电单元商议修改电价之后生成的预确认合约,此合约带有用电单元和发电单元的数字签名,等待最终确认.DScript (E, M, $Addr_{gu_i}$, $Addr_{pu_j}$, $Addr_{dc_k}$, $RndN_i$, Timestamp, Done)为最终确认合约,是调度中心确认交易信息的最终合约,带有全部参与者的数字签名.DScript 最终将由认证节点写入区块链.

2.4 认证方式

CB-TCMDE 中,GU 向 PU 的能源供给可视为 Bitcoin 的“挖矿”过程,同样需要提供“工作量证明”.不同于公有链的全网所有节点共同参与,CB-TCMDE 基于联盟链,参与验证的节点选取为各调度中心 DC.参与记账的 DC 将全网一段时间内的所有交易信息打包,并由全网其他 DC 进行验证,确保交易信息准确无误后,方可将信息写入到主链当中.由于传统的 PoW(proof of work)认证机制需要解决大量的复杂数学问题,能量耗费巨大,并且解得的随机数除竞争记账权之外没有太多的实际用途,这将造成大量的能源浪费.显然 PoW 认证机制不适宜在能源系统中使用.

PoS(proof of stake, PoS)机制[14]使用权益证明来替代 PoW 中的基于求解随机数复杂的工作量证明.持有特定数量的“币”与最后一次交易持“币”时间的乘积被视为权益,乘积越大则权益越大,进而获得记账权,记账完毕之后自动清空相应币龄.

本文在 PoS 权益证明的基础上,提出一种能源交易权益证明(proof of stake on energy transaction, ET-PoS)算法.

算法 2.2 能源交易权益证明算法

步骤 1 对每个参与记账的节点 $dc_i \in$ DC,求取

其交易权益证明 Q_{dc_i}：

$$Q_{dc_i}=\sum_{1}^{n}v_i$$

式中，v_i 为 dc_i 节点某笔交易的权益衡量值，n 为交易总数.

步骤 2　对每个参与记账的节点 $dc_i \in DC$，求取交易权益累积值 S_{dc_i}：

$$S_{dc_i}=Q_{dc_i} * m$$

式中，m 为 dc_i 节点距离上次记账经过的时间.

步骤 3　由 DC 各个节点的 S_{dc_i} 构成交易权益累积值集合，DC 中币龄最长的节点 dc_j 被遴选为记账节点，将特定时间段内所有的交易打包记入区块链.

步骤 4　记账节点 dc_j 记账完毕后，根据智能合约清空该节点的 S_{dc_j} 与 Q_{dc_j}.

算法 2.2 的形式化描述为

1 $dc_i \in DC$,

2 $Q_{dc_i}=\sum_{1}^{n}v_i$

3 $S_{dc_i}=Q_{dc_i} * m$

4 $S_\lambda=\max\{S_1, S_2 \cdots S_n\}$　》权益最大的 DC 获得记账权

5 $cb_q \leftarrow S_\lambda \leftarrow \rho(DC)$

6 cb_q write to the block

7 delete S_λ, Q_λ

不同于公有链，CB-TCMDE 中 PU、GU 都不能参与竞争区块的记账权，区块的记账权在各个 DC 之间竞争产生，实现了交易和记账的分离.PU、GU 和 DC 形成能量交易通路，智能合约向发电单元 GU 所属的调度中心 DC 发送等量的权益衡量值 V_i，其产生过程由如图 4 所示.

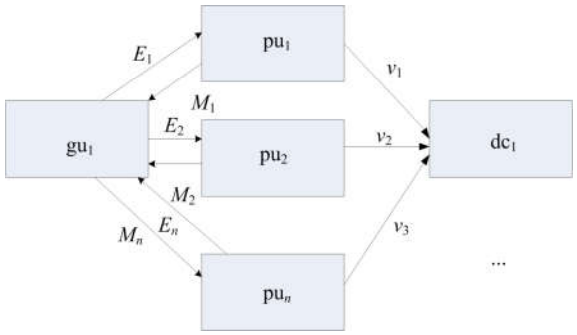

图 4　权益衡量值产生示意图

Fig.4　The generation of the measurements of stake

CB-TCMDE 从创区块开始，各区块按时间顺序排列，每个区块带有时间戳，且下一个区块总是包含上一个区块中独一无二的特征信息.CB-TCMDE 交易信息具有可追溯性，通过逆向线性遍历方式即可追溯到所有交易信息.各 DC 节点在本地都保存有分布式冗余账本，确保了数据安全性.

3　仿真实验与分析

3.1　仿真实验

为了验证 CB-TCMDE 模型的相关特点，本文使用 Matlab 构建调度仿真程序，并以一个分布式能源交易认证过程为例进行仿真实验和对比分析.

设发电单元 GU、用电单元 PU 及调度中心 DC 分别为：$GU=\{gu_1, gu_2, gu_3, gu_4, gu_5\}$；$PU=\{pu_1, pu_2, pu_3, pu_4, pu_5\}$；$DC=\{dc_1, dc_2, dc_3, dc_4, dc_5\}$.其中，GU 中的发电单元及发电量如表 1 所示.

表 1　各发电单元及其发量

Tab.1　Each generating unit and generation

发电单元	gu_1	gu_2	gu_3	gu_4	gu_5
发电量(千瓦时)	598	610	700	720	890

首先，GU 从相应 DC 节点获得了反馈以及相应随机数 $RndN_1 \sim RndN_5$，各节点发电量分别对应 $E_1 \sim E_5$.然后 GU 各节点将各自的信息写入合约，即 $Script(E_i, M_i, Addrgu_i, RndN_i)$，并广播.

以 PU 中的节点 pu_1 为例描述交易认证过程：①pu_1 在筛选所有交易信息广播后选择 gu_2 进行协商，则 pu_1 接受 gu_2 的广播合约 $Script(E_2, M_2, Addr_{gu_2}, RndN_2)$.此时，智能合约将随机数 $RndN_2$ 锁定，确定了交易对象的唯一性.②gu_2 生产新的合约 $newScript(E, M, Addr_{gu_2}, Addr_{pu_1}, RndN_2)$，与 pu_1 最终达成协议 $RScript(E', M', Addr_{gu_2}, Addr_{pu_1}, RndN_2)$并将该合约发送给 dc_2.③dc_2 获得预确认合约 $RScript(E', M', Addr_{gu_2}, Addr_{pu_1}, RndN_2)$后，认证 gu_2 和 pu_1 的身份信息、E'的真实性、M'的充足性以及 $RndN_1$ 的完整性之后，进行价值转移并产生最终合约 $DScript(E', M', Add_{gu_2}, Addr_{pu_1}, Addr_{dc_2}, RndN_2, Done)$.④$dc_2$ 将其在 $DC=\{dc_1, dc_2, dc_3, dc_4, dc_5\}$中广播，等待记入区块链.

PU 全部节点的交易结果如表 2 所示.为了方便计算，设所有的节点距上次记账间隔 n 皆为 1.则权益证明过程如表 3 所示.

表2 交易结果记录表

Tab.2 Trading result record

用电单元	pu_1	pu_2	pu_3	pu_4	pu_5
交易对象	gu_2	gu_3	gu_4	gu_5	gu_1
实际交易电量（千瓦时）	500	650	310	440	360
交易电价（元/千瓦时）	0.65	0.60	0.68	0.64	0.69
调度中心	dc_2	dc_3	dc_4	dc_5	dc_1

表3 权益证明过程记录表

Tab.3 The process of proof of stake record table

调度中心	dc_1	dc_2	dc_3	dc_4	dc_5
原始交易权益累积值	5 000	5 200	0	5 400	5 300
当前交易权益累积值	500	650	310	440	360
交易电价（元/千瓦时）	0.65	0.60	0.68	0.64	0.69
最终交易权益累积值	5 325	5 590	211	5 682	5 548

由表3可知，调度中心 dc_4 获得5 682的最高权益，所以 dc_4 竞得本时间段的记账权，dc_4 将对应交易记录打包，写入区块链，同时清空 dc_4 的所有交易权益累积和交易权益证明.

3.2 数据安全性分析

为了评价实验结果的数据安全性，本文采用一种定性的数据安全等级评价方法，如表4所示.安全等级从0到4递增，等级越高数据安全性越高.

表4 安全性等级说明表

Tab.4 Safety level description table

安全性等级	数据存储特征	说明
0	普通存储	存储数据没有防护能力
1	数据有鲁棒性	数据难以被篡改
2	鲁棒性＋分布式存储	数据难以被篡改，可恢复
3	鲁棒性＋分布式＋可追溯	数据不可篡改，可恢复，可验证真伪
4	鲁棒性＋分布式＋可追溯＋透明性	数据不可篡改，可恢复，可验证真伪，可用性好

由于CB-TCMDE以联盟区块链为基础，较传统的中心化管理方式更加安全：①当某个 dc_i 的共享账本损坏后，其他联盟节点之间的分布式共享账本将同步到该节点；②交易数据一旦写入区块，就无法修改，无法销毁，方便电量交易监管与数据追溯，因此CB-TCMDE的安全性等级可达3～4级.

3.3 计算负荷分析

CB-TCMDE采用ET-PoS权益证明，大大简化了以比特币为代表的公有链工作量证明的认证方式，取代了以消耗大量电力去计算数学难题的过程.不同于公有链全网节点参与验证的方式，CB-TCMDE仅在数量较少的调度中心之间产生记账权，简化了繁琐的验证过程，其与公有链方式认证的对比如表5所示.

表5 公有链与CB-TCMDE对比表

Tab.5 Public blockchain and CB-TCMDE comparison table

	公有链认证模型	CB-TCMDE
交易认证时间	10 min	≪10 min
计算量	PoW复杂运算	ET-PoS少量运算

3.4 信息透明性分析

区块链模型的初衷是为了解决非安全环境下的信任问题，将传统的能源交易验证方式放入陌生环境下，并以密码学的方式保障数据的安全性以及采用匿名化的方式是区块链的最大优势.CB-TCMDE对比传统的能源交易验证模型，全用户皆可追溯历史上的任何一笔交易，可以查询任一匿名用户的支付情况和历史余额，是对传统认证方式的巨大改进.同时对比公有链，CB-TCMDE以联盟链为基础，各DC可以对参与调度节点的公私钥在一定程度上进行掌控，改善公有链无法监管的特性，具体对比如表6所示.

表6 信息透明性对比表

Tab.6 Information transparency comparison table

	传统能源交易验证模型	公有链认证模型	CB-TCMDE
交易记录追溯权	仅第三方中心机构	全网节点	全网节点
全账户金额可查权	仅第三方中心机构	全网节点	全网节点
用户匿名性	非匿名	匿名	匿名
可监管程度	高	低	高

3.5 自动化认证水平分析

传统的能源交易认证需要根据能源传输、价值

转换和资源变现等多方需要，统筹电网中心、通讯公司和银行机构，自动化认证水平仍有提升的空间. CB-TCMDE 在区块链技术的基础上可以程序化执行能量输入、电量检测、能源存储、用户匹配、电价商议、信息核实、电力调度及交易记录等多方面功能，有良好的自动化水平.

4　结论

本文提出一种基于联盟区块链的分布式能源交易认证模型及相关的 TCA 交易认证算法，并且分别从网络结构、合约状态和认证方式 3 个方面刻画 CB-TCMDE 的子特征.通过在分布式能源交易中融入联盟区块链，提高了分布式能源交易数据安全性、信息透明度和自动化认证水平，同时降低了原认证过程的计算复杂度，缩短了认证时间，仿真实验验证了模型的有效性.

区块链技术发展的瓶颈在于共识算法，共识机制的确定是权衡节点通信能力、安全性、资源消耗率和认证效率等多方面的结果.研究探索一种更符合分布式能源特点的共识算法是区块链技术在能源互联网领域广泛应用的关键，也是本文继续研究的方向.

参考文献(References)

[1] 白建华，辛颂旭，刘俊，等.中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J].中国电机工程学报，2015，35(14)：3699-3705.
BAI J H，XIN S X，LIU J，et al.Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China [J]. Proceedings of the CSEE，2015，35(14)：3699-3705.

[2] 田兵，雷金勇，许爱东，等.基于能源路由器的能源互联网结构及能源交易模式[J].南方电网技术，2016，(8)：11-16.

[3] MINHAS D M，RASHAD M，HUSSAIN S，et al. Cost effective bidirectional power transactions for queuing energy requests in smart micro-grids[C]// 2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference. Lemesos，Cyprus：IEEE Press，2016：1-6.

[4] 华夏，罗凡，张建华，等.促进新能源消纳的自备电厂发电权交易模式可行性探讨[J].电力系统自动化，2016，40(12)：200-206.

[5] 刘纯，黄越辉，张楠，等.基于智能电网调度控制系统基础平台的新能源优化调度[J].电力系统自动化，2015，(1)：159-163.

[6] 陈启鑫，刘敦楠，林今，等.能源互联网的商业模式与市场机制(一)[J].电网技术，2015，(11)：3050-3056.

[7] ZHUMABEKULY AITZHAN N，SVETINOVIC D. Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures，blockchain and anonymous messaging streams [J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing，2016，99：1-1.

[8] 胡泊，王爽.区域分布式能源网优化运行与多边交易研究[J].南方能源建设，2015，(2)：9-14.

[9] NAKAMOTO S. Bitcoin：A peer-to-peer electronic cash system[EB/OL]. [2017-5-24] https://bitcoin.org/bitcoin.pdf，2009.

[10] 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.

[11] ANCEAUME E，LAJOIE-MAZENC T，LUDINARD R，et al. Safety analysis of Bitcoin improvement proposals[C]// 15th International Symposium on Network Computing and Applications. Cambridge，USA：IEEE Press，2016：318-325.

[12] SWAN M. Blockchain thinking：The brain as a decentralized autonomous corporation [J]. IEEE Technology and Society Magazine，2015，34(4)：41-52.

[13] MIHAYLOV M，JURADO S，AVELLANA N，et al. NRGcoin：Virtual currency for trading of renewable energy in smart grids [C]// 11th International Conference on the European Energy Market. Krakow，Poland：IEEE Press，2014：1-6.

[14] WATANABE H，FUJIMURA S，NAKADAIRA A，et al. Blockchain contract：Securing a blockchain applied to smart contracts [C]// International Conference on Consumer Electronics. Las Vegas：IEEE Press，2016：467-468.