

基于主从区块链技术的区域能源交易架构

杨 亭,雷 霆

(国网四川省电力公司绵阳供电公司,四川 绵阳 621000)

摘要:区域能源交易主要通过集中式的交易服务平台提供买卖合同,配合电网进行电力供应与输送,存在服务成本高、交易效率低、用户隐私缺乏安全保障等问题。通过分析区域能源交易主体的特点以及不同类型区块链的适用范围,提出了基于主从区块链技术的区域能源交易架构;建立了适用于区域能源交易的主从区块链模型;证明了该模型具有高度安全性,并对构建的架构平台进行详细设计;最后,通过仿真平台测试证明了该交易架构和模型的可行性和安全性,为区域能源交易的方式提供了一种新的思路。

关键词:主从区块链;区域能源交易;交易主体;智能合约

中图分类号:TP311.13 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2021)01-0089-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210118

Regional Energy Transaction Architecture Based on Master – slave Blockchain Technology

Yang Ting, Lei Ting

(State Grid Mianyang Electric Power Supply Company, Mianyang 621000, Sichan, China)

Abstract: Regional energy transactions mainly provide sales and purchase transaction contracts through a centralized transaction service platform, and cooperate with power grid for power supply and transmission, which has high service costs, low transaction efficiency and is lack of security guarantees for user privacy. The characteristics of regional energy transaction entities and the application scope of different types of blockchains are analyzed, a regional energy transaction architecture based on master – slave blockchain technology is proposed, and a master – slave blockchain model suitable for regional energy transactions is established. The proposed model has a high degree of security, and the construction of architecture platform is designed in detail. Finally, the feasibility and security of the transaction architecture and model are proved through the simulation platform test, which provides a new way of thinking for regional energy transactions.

Key words: master – slave blockchain; regional energy transaction; transaction subject; smart contract

0 引 言

随着能源结构和电力体制的改革步伐越来越快以及信息技术的快速进步,能源产业改革迫在眉睫^[1-3],而市场化的能源交易是产业改革的前哨,急需转变传统交易模式和交易方法来应对能源产业的变革。

现阶段的能源交易主要以交易方法和模式为主,能源企业通过第三方服务平台进行售电交易并管理交易过程^[4]。在目前的区域能源交易中存在交易主体少、平台维护成本高、交易效率低、安全性低等问题^[5-6]。因此,需要因地制宜、以多元化主体

的区域能源交易平台解决传统交易存在的效率低、安全性低等问题,扩大交易边界,提升区域能源交易效率。

目前区块链技术在能源交易中的研究已经取得了一定进展。在相关研究中,以分布式能源的点对点交易为主。文献[7-10]主要从区块链的去中心化的特点出发,提出了点对点交易的能源结算模式。文献[11]主要分析了区块链在电力交易中的应用,给出了区块链未来的发展趋势。文献[12-16]给出了区块链技术在传统电网调度中的应用,如通过用区块链技术对电网中出力不稳定的新能源进行优化调度,通过区块链的去中心化架构建立虚拟电厂更好地对电能资源进行配置。文献[17-20]给出

了区块链技术在分布式能源交易中的应用,如通过博弈论模型解决分布式能源问题、通过联盟链技术解决分布式能源交易中的信任问题等。

以上文献运用的区块链技术多数是在分布式交易中进行,并且运用单一类型的区块链技术,而随着市场上不同主体及各种能源类型的不断加入,单一的点对点交易模式已经无法满足现有多方交易的现实。因此,下面从区域能源交易的实际出发,建立主从区块链模型满足多方交易的需求,同时满足了交易安全性的问题;接着构建适合区域能源交易的基于主从区块链技术的区域能源交易架构解决多方交易的问题,并通过仿真测试证明了该交易架构和模型的可行性。

1 区块链在区域能源交易中的可行性分析

1.1 区域能源交易主体

在区域能源交易中,主要涉及到以下 4 类主体:1)源端主体,包含各类传统电厂、新能源发电厂以及部分拥有分布式能源点大用户;2)电网端主体,包含国家电网、南方电网等大的电网公司以及地方电网公司;3)能源聚合商主体,主要由民营售电公司和综合能源公司组成;4)用户端主体,主要由区域内的工业、商业大用户、一般用户和拥有微网系统的新能源用户组成。

1.2 主从区块链在区域能源交易中的可行性分析

目前区块链的类型主要有 3 种:公有链、联盟链和私有链。它们的主要区别在于节点的开放程度上。公有链完全开放用户节点,这就导致参与主体多的时候,运行处理速度较慢;由于挖矿机制耗能高,但完全开放程度使得其安全性最高,同时由于完全开放的用户节点,使得所有参与主体都有通过挖矿方式获取区块读写的权限。联盟链半开放用户节点,与公有链相比速度较快,能耗低,但安全性比公有链稍低;由于对用户节点进行了权限设定,仅有权限的节点可以获取区块读写的权限。私有链是不开放用户节点,与公有链、联盟链相比,运行处理数据速度快,反应及时,但安全性低;同时仅不开放节点拥有区块读写权限,其他节点则无法参与。区块链的主要类型和特点如表 1 所示。

表 1 区块链类型和特点

类型	开放程度	权限	安全性	速度
公有链	完全开放	任何区块	高	较慢
联盟链	半开放	部分区块	较高	较快
私有链	不开放	较少区块	低	快

公有链由于任何人都可通过挖矿方式获取权限,因此此类区块链不可逆且稳定性高,但维护成本较大,不适合大规模的区域能源多主体交易。联盟链半开放的特点适合区域电网中多主体需要权限控制的情况,不同主体互动时,交易的协调优化会涉及到利益的分配,因此联盟链由于其特点可支持多用户节点间的利益分配、资金转移、交易结算等应用。私有链的特点适用与某一特定类型的交易服务,把交易数据存储在区块里,可供其他节点检索提取数据。

根据对 3 种区块链特点的分析,考虑到区域能源交易主体的构成,选择联盟链 + 私有链的模式进行交易平台的构建,以联盟链为主链网络、私有链为从链网络的结构建立主从区块链模型。

2 基于主从区块链的区域能源交易架构

下面采用多链形式实现区域电网内各主体内部的可信及协同自治,确保各主体间信息公开、可信互联,进一步保障区域能源电网交易应用的可追溯性和安全高效性,深入研究区域电网多方交易场景与区块链技术的匹配性。

基于主从区块链技术的区域能源交易系统具有匿名性、安全性、公开性的特点,即可以实现匿名的交易双方互信、交易安全以及信息公开。图 1 所示的区域能源交易架构以区块链网络连接。该架构有能源端、电网端、能源聚合商和用户端 4 类主节点,节点之间通过区块链网络互相连接,形成多方点对点交易模式,多方协同,用能优化互补,进而提高区域能源交易的效率和效益。

分属 4 类主节点的从链网络具有如下功能:1)源端节点和能源聚合商节点下的从链网络包括风、火、光、储等分节点,分节点间能源优化互补,形成分节点间协同效果;2)电网节点下的从链网络以能源调度为基础,同时开展能效分析、综合监测和用能服务等增值业务;3)用户端节点下的从链网络包括工

业、商业、一般用户、电动汽车等分节点。

上述各主节点和其拥有的分链网络构成了交易公开、可信、安全的主从区块链交易架构。主链网络通过联盟链进行链上交易,信息公开互享,主节点下的从链网络通过私有链进行链上交易。同时可以赋予政府监管权限,即政府拥有对各主节点交易数据查看的权限,可以随时查看并溯源。主链网络上的各主节点拥有主链和从链网络的管理员权限,如对主链和从链区块的设置、发布交易需求、交易资产以及与交易网络中的其他节点(主、从节点)进行交互等功能。各主节点下的从链网络节点仅有在本从链网络中的相关权限和向主链上传从链内容的权限。

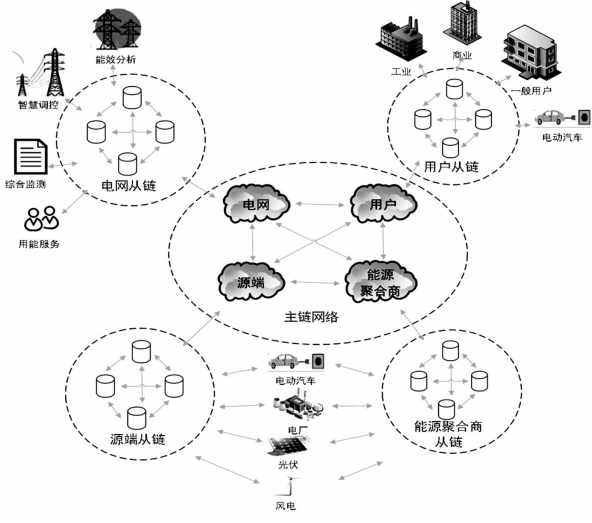


图 1 基于主从区块链的区域能源交易总体架构

3 主从区块链模型

3.1 模型建立

由前面分析可知区域电网下的交易涉及到多方交易,并不是传统意义上区块链点对点的单一交易模式,目前所研究的基于区块链的分布式能源交易模型并不适合所述的多方交易。因此,在研究联盟链的基础上,加入私有链,建立了采用多链形式的主从区块链模型。这样既能保证区块链的安全互信和去中心化,也能进行多方交易,提升区块链模型的高效和信任问题,同时也提高了区域能源交易的开放程度。

如图 2 所示的主从区块链模型由两部分组成:主链网络和从链网络。主链部分主要由源端、电网、用户、能源聚合商等主节点以及交易过程中形成的关键数据节点组成。主链节点主要记录着用户 ID、交易设置、交易需求、交易资产和节点间的交互功能

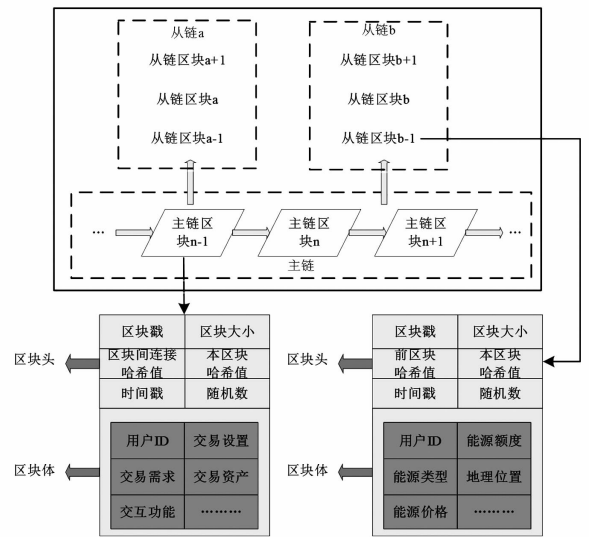


图 2 主从区块链模型

等关键信息。每个主链节点和关键数据节点构成了主链网络。

从链部分主要由功能节点和加密节点组成。功能节点是具有相应功能的从链节点,如电网端的能效分析、综合监测等节点,加密节点主要为主从网络的数据交换提供安全保障。从链节点主要记录用户 ID、能源额度、能源类型、地理位置、能源价格、加密数据等交易参数和加密参数。主链节点下的所有功能节点和加密节点构成了从链网络。

3.2 安全性分析

由于所采用的主从区块链模型与单一类型的区块链模型不同,单一类型的区块链模型所具有的不可篡改性质,主从区块链模型仍需具有。因此下面对所建模型进行安全性分析证明。

假定在主从区块链模型下,构建主链区块和从链区块的共识算法中,拜占庭容错节点不超过总节点一半,即

$$i < (j + 1) / 2 \tag{1}$$

式中: i 为拜占庭容错节点; j 为节点总个数。

由上述假设知,在区块形成过程中,区块总结点个数大于拜占庭节点数,则某一时刻由拜占庭节点构成的区块可能性 X 为

$$X = i / j \tag{2}$$

由式(1)可知,拜占庭节点产生无效区块的可能性小于 0.5,依据区块生效原则,若要使得区块生效,则该区块需要成为前驱区块并且高度增加。因此,无效区块转化为有效区块的概率以 0.5 为底的指数增加,随着数据的增加和链的增长,该概率趋向于 0。

由上述结论可知,任意时间内由拜占庭节点产生的无效区块转化为有效区块的概率趋向于 0,同时,由于所述的主从多链模型具有哈希链接方法,改变一个区块则需改变链接的所有区块,由于区块相互连接,需全网更改才会生效。因此可得如下结论:任意时间内,区块具有不变性。

综上所述,所采用的主从区块链模型,其任一区块在任意时间内具有不变性,即不可更改性,所以该模型具有安全性。

3.3 交易流程

产消者是生产者与消费者的一体化,在区域电网中,各方主体都是产消者。如电网公司不仅可以作为售电方,也可以在负荷过载的时候向源端电厂、能源聚合商以及用户(拥有电动汽车、微网等电源的用户)购电;水电厂不仅可以作为卖方,在枯水期也可以作为买方向电网公司、能源聚合商以及用户购电。因此,各主体间都有可能作为买卖双方并且存在互相交互的关系。基于主从区块链的区域能源交易流程如图 3 所示。

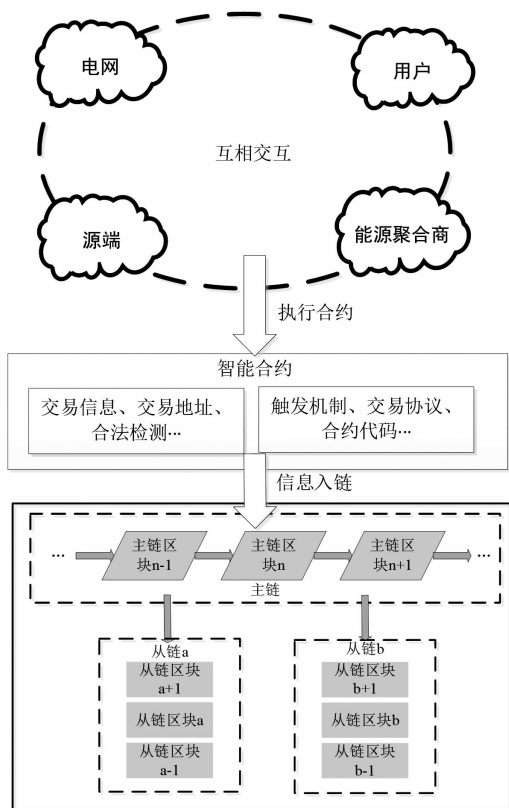


图 3 基于主从区块链的区域能源交易流程

当能源聚合商发出购电请求时,区域内产消者通过查看智能计量装置获取内部电量信息,若存在剩余电量会发出售电信息,此时能源聚合商会与此

产消者进行交互,发出交易请求触发智能合约程序,并投放到区块链网络中,交易方根据得出的清算价格进行交易,并执行合约内容。交易完成后信息广播到主链网络和从链网络中,最后详细交易信息写入各产消者对应的从链网络区块链中,同时关键信息记入各产消者对应的主链网络区块链中。

3.4 智能合约设计

使用 Solidity 语言设计和实现智能合约,对于适用多方交易的智能合约而言,应当满足市场交易的基本条件,即用户可自愿发布及参与交易、匹配交易对象并自动结算与储存交易信息。图 4 所示为区域能源交易下的智能合约设计流程图。

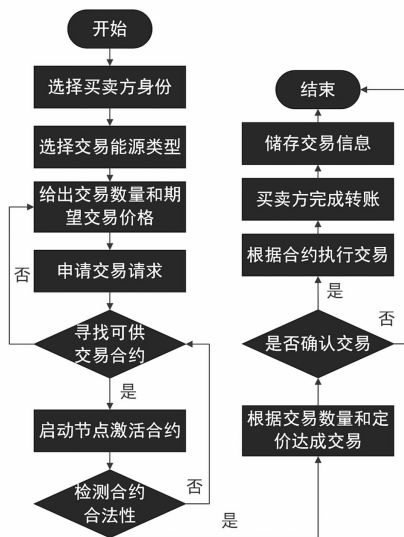


图 4 区域能源交易下的智能合约设计流程

1) 选择交易身份和申请交易。根据该区域电网内不同的交易主体选择买卖双方身份,确定本次交易的交易身份,然后选择所需交易的能源类型,给出交易数量和期望的交易价格,发出交易请求。

2) 寻找可供交易合约。通过确认交易身份、交易能源类型和期望交易价格,寻找满足上述条件的交易合约。在寻找可供交易合约时,会调用相关函数,根据交易主体提供的基本信息进行排序,综合分析各方能源类型、交易数量、交易价格等因素,完成匹配,确定可供交易合约。若不能完成匹配则返回交易价格和交易数量步骤,调整交易目标。

3) 检测合约合法性。在寻找到可供交易的合约后,启动区块节点激活合约并检查合约是否合法;若非法,返回寻找可供交易合约步骤。

4) 达成交易意向。根据交易合约内容,达成交易意向。

5) 确认意向和存储交易信息。在完成交易之前给交易各方一个犹豫阶段,是否确认交易,若确认交易,则完成转账;若放弃交易,则直接结束智能合约流程。最后,交易过程形成记录存储在从链网络区块链中,供用户调用查看。

4 仿真测试

为正确评估所设计的区域能源交易架构、主从区块链模型的高效性,以以太坊为智能合约发布平台对交易进行仿真分析,同时运用文献[16]的单一链模型与所采用的主从链模型进行对比分析。该平台包括源端、电网端、用户和能源聚合商 4 种类型的产消者,本次测试共有 10 名用户,电网交易供需情况如表 2 所示。

表 2 电网交易市场供需初始情况

买方	状态	发布量/ kWh	剩余量/ kWh	发布价/ 元
用户 1	发布	600	600	0.37
用户 2	发布	360	360	0.40
用户 3	发布	240	240	0.41
用户 4	发布	350	350	0.33

卖方	状态	发布量/ kWh	剩余量/ kWh	发布价/ 元
用户 5	发布	240	240	0.41
用户 6	发布	280	280	0.39
用户 7	发布	700	700	0.43
用户 8	发布	230	230	0.37
用户 9	发布	150	150	0.37
用户 10	结束	300	0	0.36

从上述交易信息可以看到,在整个过程中,依次完成了 6 笔交易,成交最终结果如表 3 所示。成交量和成交价格按交易顺序如图 5 所示。

随着买方进入市场,低价的能源相继售空,成交价逐渐升高。而成交量则根据买卖双方的需求决定,逐次出清。同时,在这样的供大于求的市场中,买方更拥有主动权,买方进入市场后,系统会对当前卖方所有报价由低到高排序,依次与买方进行撮合,例如用户 1,以 0.37 元的价格求购,发布量为 600 kWh,最终以 0.36 元成交 300 kWh,以 0.37 元的价格成交 300 kWh,即买方均以低于等于自身发布价的价格成交,当然,卖方成交价也不会低于自己的发布价,符合合约规则预期。同时,部分用户报价过于偏离,

表 3 平台交易结束后供需情况

买方	状态	发布量/ kWh	剩余量/ kWh	发布价/ 元
用户 1	结束	600	0	0.37
用户 2	结束	360	0	0.40
用户 3	结束	240	0	0.41
用户 4	结束	350	350	0.33

卖方	状态	发布量/ kWh	剩余量/ kWh	发布价/ 元
用户 5	结束	240	0	0.41
用户 6	结束	280	0	0.39
用户 7	结束	700	700	0.43
用户 8	结束	230	0	0.37
用户 9	结束	150	0	0.37
用户 10	结束	300	0	0.36

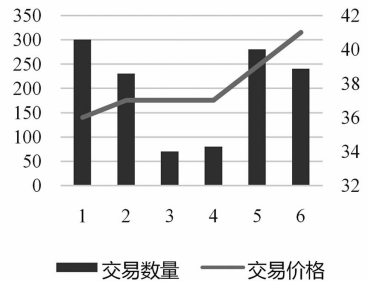


图 5 交易成交数量和成交价格

没能完全完成交易,例如用户 4 在进入市场后,市场上满足自身发布价的能源数量少于自身需求,故未能成交,其需求会继续保存在市场,等待条件满足后匹配交易。对于卖方用户 7 来说,由于报价高于当前市场所有报价,故未能达成交易。

在验证了模型的可行性后,对使用单一链模型和主从链模型进行对比分析。由图 6 可知,在进行的 6 次交易中,采用主从区块链模型时,每次的交易时间都比单一链模型使用的时间短。同时,采用单一链模型下的总交易时间为 0.28 ms,而所采用的主从区块链下总交易时间为 0.22 ms,交易效率提升了 21.43%。由此说明了采用主从区块链模型能有效提升区域能源交易的效率。

通过以上分析可知,整个交易过程按照设计的智能合约规则进行,根据市场供需关系,依次匹配,最终完成交易。由对比分析可知,主从链模型相比单一链模型能更快地完成交易,提高了区域交易的效率。在该区域能源交易平台中,每次交易详细信息计入各从链网络中的区块中,区块数据公开、安全,可供有权限用户随时调用,与单一链模型相比,使数据更安全且取用灵活。同时在保障各方利益的

前提下,提高了交易效率和流程。

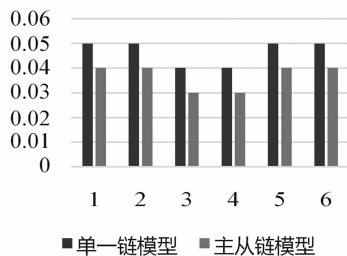


图6 两种模型交易时间对比

5 结 语

从区域电网多方交易的现实出发,克服了区块链 P2P 的单一交易模型,在联盟链的基础上,运用联盟链+私有链的主从多链模型实现多方交易,得到如下成果:

1)分析主从区块链在区域能源交易中的可行性,得到了主从区块链模型初步方案。

2)从区域能源交易主体出发,分析了主从区块链在区域电网中的运用方法,考虑了各方主体的需求和交互作用,建立了基于主从区块链的区域能源交易架构。

3)在交易架构的基础上,从交易流程、智能合约设计以及模型安全性分析3个方面,对主从区块链模型进行详细建模,得到了主从区块链模型。同时通过仿真测试证明了所提架构和模型的可行性。

由于平台计算性能的限制,所提的交易次数较少,不能很好地显示出主从链模型的显著优势,后面将优化平台性能进一步验证分析主从链模型的高效性。

参考文献

- [1] 周孝信,曾嵘,高峰,等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. 中国科学:信息科学,2017,47(2):149-170.
- [2] 李彬,曹望璋,祁兵,等. 区块链技术在电力辅助服务领域的应用综述[J]. 电网技术,2017,41(3):736-744.
- [3] 张俊,高文忠,张应晨,等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统:需求、概念、方法以及展望[J]. 自动化学报,2017,43(9):1544-1554.
- [4] 肖谦,陈政,朱宗耀,等. 适应分布式发电交易的分散式电力市场探讨[J]. 电力系统自动化,2020,44(1):208-218.
- [5] 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.

- [6] 王德文,柳智权. 基于智能合约的区域能源交易模型与实验测试[J]. 电网技术,2019,43(6):2010-2019.
- [7] 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.
- [8] 沈巍,王丹. 基于区块链的分布式能源市场化交易架构及应用机制[J]. 华北电力大学学报(社会科学版),2019,118(2):28-38.
- [9] 何涛. 适用于分布式能源交易场景的区块链关键算法与技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.
- [10] 胡可昕. 分布式能源发展现状及未来需求[C]. 2019 供热工程建设与高效运行研讨会论文集(下),2019.
- [11] 龚钢军,王慧娟,张桐,等. 基于区块链的电力现货交易市场研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6955-6966.
- [12] 胡伟,姚文慧. 基于区块链的能源电力供需网调度优化模型[J]. 系统管理学报,2019(6):1134-1142.
- [13] 龚钢军,张桐,魏沛芳,等. 基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度体系研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(5):1278-1290.
- [14] 余维,胡跃,杨晓宇,等. 基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度模型[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3729-3736.
- [15] 谢红玲,郑雅男,李燕青. 基于能源区块链网络的微电网经济调度模型[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2019,46(3):17-25.
- [16] 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.
- [17] 平健,严正,陈思捷,等. 基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(24):7137-7145.
- [18] 何涛. 适用于分布式能源交易场景的区块链关键算法与技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.
- [19] 韩冬,张程正浩,孙伟卿,等. 基于区块链技术的智能配售电交易平台架构设计[J]. 电力系统自动化,2019,43(7):89-99.
- [20] 陈冠廷,张利,刘宁宁,等. 基于区块链的面向居民用户需求响应交易机制[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):9-17.

作者简介:

杨 亭(1993),女,工程师,研究方向为区块链技术在电力系统中的应用;

雷 霆(1989),男,工程师,研究方向为区块链技术在电力系统中的应用。 (收稿日期:2020-10-09)