

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.08.005

基于联盟区块链的电力碳权交易机制设计

Design of carbon emission permit trading mechanism in power industry
based on consortium blockchain

吉斌^{1,2}, 刘妍³, 朱丽叶^{1,2}, 昌力^{1,2}, 曹斌^{1,2}
JI Bin^{1,2}, LIU Yan³, ZHU Liye^{1,2}, CHANG Li^{1,2}, CAO Bin^{1,2}

(1.南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 南京 211106; 2.国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211106; 3.国网渭南供电公司, 陕西 渭南 714000)

(1.State Grid Electric Power Research Institute Company Limited, NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China; 2.NARI Technology Company Limited, Nanjing 211106, China; 3.State Grid Weinan Electric Power Supply Company, Weinan 714000, China)

摘要:碳排放权(以下简称碳权)交易是推动我国实践低碳、节能的市场手段和政策工具。为加强碳权市场的流通、引导市场主体主动响应以及控制温室气体的排放、积极应对国家战略,基于联盟区块链(以下简称联盟链)技术提出了“多对多”的碳权交易应用。通过分析联盟链的技术特征,设计了碳权交易应用的流程和系统架构;设计了碳权交易应用及其机制,并提出了基于联盟链的碳权交易执行逻辑;建立了碳权交易的数学模型,指出了交易的匹配方式;通过算例验证该碳权交易机制和模型的正确性和可行性。由此可以看出,该碳权交易机制相比于传统趸售市场方式有一定的市场效益优势,可以提高参与碳权市场的市场主体的收益,为碳权市场建设提供技术和交易机制的参考。

关键词:联盟链;碳权交易;分布式数据;交易机制;交易方式;效益分析;交易匹配;区块链技术

中图分类号:TP 311:F 426 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2020)08-0032-09

Abstract: Carbon emission permit (hereinafter referred to as carbon) trading is a market and policy tool to promote the practice of low-carbon emission and energy conservation in China. In order to stimulate the market circulation of carbon trading, guide market players to respond proactively, control greenhouse gas emissions, and actively respond to national strategies, a "many to many" carbon trading application was proposed based on consortium blockchain technology. Firstly, the application process and architecture of carbon trading system were designed according to the technical characteristics of consortium blockchain. Secondly, the application and mechanism of carbon trading were designed, and the execution logic of carbon trading based on consortium blockchain was proposed. Then, the mathematical model of carbon trading was proposed, and the trading matching method was pointed out. Finally, the carbon trading mechanism and model designed were verified by an example. Through the example, it can be seen that the carbon trading mechanism proposed has advantage in marketing compared with the traditional wholesale marketing, which can improve the interests of market players in the carbon trading and provide a reference for the construction of carbon market.

Keywords: consortium blockchain; carbon trading; distributed data; trading mechanism; transaction mode; benefit analysis; trade matching; blockchain technology

0 引言

随着国家环境保护战略的实施,传统发电产生的碳化物将进入更加精细、严格的付费管理阶段,市场化运营的碳排放权(以下简称碳权)交易将与电力市场化紧密结合^[1-2]。现阶段电力市场与碳权

交易尚未挂钩,但是随着电力市场发展,“谁用电,谁买单”的市场基本规则将延伸到碳权交易市场,即因未按发用电计划执行而导致的碳化物超额排放量,将由导致电力不平衡量产生的电力市场主体承担相应的环境责任。目前,碳权交易已受到众多学者的关注:文献[3]指出碳权市场可以作为政策工具,实现节能减排的目标;文献[4]介绍了自2011年以来,我国开展的7个碳权交易市场试点工作并组织开展了碳权交易,该文献指出可以通过碳价机

收稿日期:2020-06-08;修回日期:2020-07-17
基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGTYHT/16-JS-198)

制引导低碳转型,但文献缺少对碳权交易机制的阐述;文献[5-7]指出碳权交易市场与其他市场的耦合存在诸多优点,包括降低全球的碳排放量、提高市场流动性、提高碳权价格的稳定性,为碳权市场的健康发展提供支撑,但文章缺少具体的市场耦合整体方案。

目前,碳权交易缺乏合适的支撑技术,这是其尚未在我国推广的重要因素之一。区块链技术作为一种分布式共享数据库技术,能够构建公开、透明的交易环境,为交易数据提供溯源、防篡改的功能^[8-10],可实现碳权交易的精细化管理。区块链技术的应用场景研究是当前研究的热点,文献[11]基于区块链技术的特征,在考虑碳排放费用的情况下出清电力交易,为引导节能减排提供了区块链技术的应用参考。文献[12]结合区块链技术特征,展望其在能源互联网中的应用前景,可以为碳权交易提供参考。文献[13]将电能的发、输、配、用、储等环节分别与区块链技术相结合,进行交易场景和应用模式的研究。文献[14]在区块链技术基本原理和典型特征基础上,从不同维度总结、归纳了区块链的应用场景和模式,为碳权交易提供技术参考和探索方向。以上针对碳权交易和区块链技术的研究相对独立,结合区块链技术的碳权交易机制和交易应用设计尚需进一步研究。

本文从区块链技术基本特征和性质出发,研究耦合了电力交易的碳权交易“多对多”交易流程和交易机制设计。设计基于联盟区块链(以下简称联盟链)的碳权交易应用,从应用架构、链码部署、交易执行逻辑等方面进行阐述。结合区块链技术特征和碳权交易机制设计,构建了碳权交易的数学模型,描述了碳权交易的约束条件、交易匹配方法和效益评价模型。最后,通过具体算例分析,对比参与碳权交易的市场主体的收益与参与趸售碳权市场交易的收益。从结果可以看出,本文提出的交易机制收益高于趸售市场,同时市场主体的交易报价根据市场需求适当调整,有利于稳定自身收益。

1 区块链技术概述

1.1 区块链技术简介

2008年,区块链技术作为比特币底层技术被关注,因其具有去中心化、数据可追溯、防篡改、共识机制等技术特征,开始被各行业关注、研究及应用。目前,区块链技术的落地应用集中于金融、产品溯源、数据查证等领域,具有跨国转账费用低、效率高、数据安全及准确度高等优势^[15]。根据区块链技术特征,可以将其分为公有链、私有链和联盟链3种

类型。(1)公有链没有准入门槛,用户创建节点加入公有链网络即可匿名参与公有链的应用数据,各主体节点可以自由出入网络。(2)联盟链网络仅限于注册成员参与,链上数据增、删、改、查的权限由联盟管理节点制定,不同的主体拥有不同数据权限。(3)私有链仅在私有组织使用,区块链上的数据操作和查看权限按管理员设置的链码执行。其中,联盟链在权限管理、执行效率、业务设计等方面具有优势^[16],适用于多主体之间“多对多”的分布式交易场景。

1.2 联盟链特性分析

联盟链除了具备区块链的基本特征,还具有身份服务、策略服务、链码服务等特有功能。身份服务是为了实现联盟链权限管理、对接入系统的节点进行身份识别和权限分配、明确交易参与者和对象的身份信息;策略服务是通过策略驱动方式,提供系统配置策略和功能管理,主要是面向业务的访问控制和授权管理,使联盟链应用成为准入型区块链,包括系统节点加入与退出、身份注册与验证、隐私和保密等共识策略,保证联盟链的数据安全、可控、可管的分布式共享;链码服务又称为智能合约服务,是运行在验证节点上的分布式交易程序,自动执行特定业务数据的算法规则,链码规定执行的业务数据会自动更新账本的数据状态。一般来说,链码服务采用容器技术或虚拟机技术构造安全的运行环境,实现对应业务数据的隔离。

1.3 碳权交易分析

联盟链可以针对不同的业务主体设置不同的系统管理权限,通过策略服务开创不同应用的业务通道,同时具备更加完善的链码安装和部署技术,适合将不同业务权限的主体纳入区块链应用系统,进行业务和主体的多维度、分级、按需管理,适应当前业务数据的分布式存储、查看、操作需求。

碳权交易业务涉及发用电市场主体、监管机构以及金融机构等。不同业务主体需要不同的交易数据处理权限,不同交易业务通道能够隔离未参与交易的市场主体,联盟链在实现权限管理和数据隔离上具有天然优势。本文以联盟链技术框架和超级账本开源系统设计为基础,进行碳权交易机制和应用设计研究。

2 碳权交易工程应用设计

电能的生产和消耗伴随着碳氧化物的排放,肆意用电的行为将导致临时机组启停,产生不必要的碳排放。为维护电力交易合约的高效执行,现引入碳权证交易市场以稳定电力市场的交易执行。

区块链技术可以作为一种分布式溯源数据库实现交易数据的准确溯源,其智能合约的设置改变了传统、低效的“双边”交易^[17]。本文以联盟链为工程应用的基础,设计碳权主体间“双边”交易的交易流程、系统架构以及网络配置,为碳权交易的工程应用提供理论基础。

2.1 碳权交易流程

碳权交易应紧密结合电量交易,分为交易起止、电力交易和碳权交易3个部分,如图1所示。相比于电量交易,包含碳权交易的电力交易需要相关部门根据负荷预测数据核准电厂的发电容量;发电厂在核准发电容量的限制范围内申报交易电量,交易中心在规定时间内发布交易出清结果,中标电厂根据自身中标电量获得对应比例的碳排放权和本轮电力交易的碳排放证书;电力交易中心和电力调度中心提供电力交易实际执行数据,分别出清各发电厂和用户的用电偏差电量,同时根据偏差电量既定比例和规则出清各碳权偏差量。对于碳排权不足的市场主体,需要参加碳权交易市场进行缺额碳权交易。碳权交易按照既定规则匹配交易主体,出清交易匹配结果,执行交易结算,完成碳排放交易。

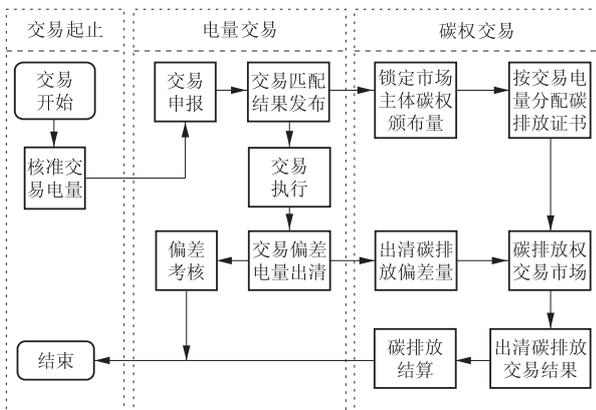


图1 电-碳联合交易流程

Fig. 1 Process of electricity - carbon joint transaction

2.2 碳权交易系统架构

结合我国国情和区块链技术的发展趋势,本文基于联盟链进行碳权证交易机制设计出的系统架构可分为3个组成部分:碳市场主体、节点管理组件、联盟链交易系统应用(如图2所示)。

2.2.1 系统架构

碳市场主体由发电主体、用电主体、监管主体和金融服务主体4个类型组成:发电主体、用电主体直接参与碳权证交易;环保部门和能源监管部门以监管主体的身份注册登记,作为碳证交易监管节点;金融主体作为碳证交易结算的价值转账服务节点,可以通过代币或法定货币进行转账,需要说明

的是联盟链本身不具备发布代币的属性,支付介质按金融规定执行,本文以法定货币作为支付介质。架构第2层的CA是各碳权证交易市场主体管理用户数据证书的身份管理系统,各类型市场主体至少需要1个管理员(Admin),负责各类型市场主体进入联盟链的身份审核和账户创建。执行碳权证交易时,用户(Client)将申报交易信息数据上传至联盟链碳交易系统,按照共识机制调用智能合约对交易数据进行处理,通过共识认证后的交易数据会写入各节点的状态数据库。

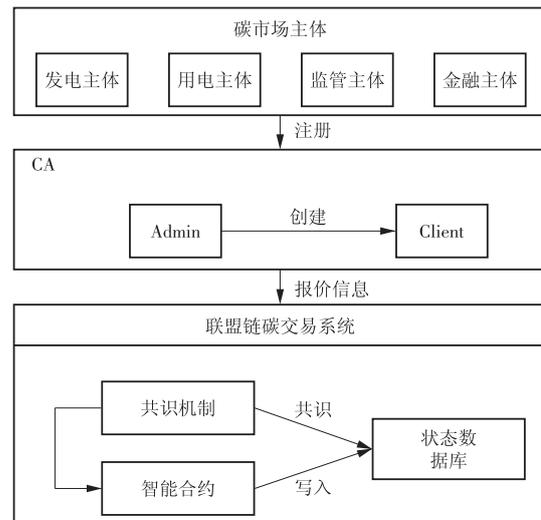


图2 联盟链碳权交易应用示意

Fig. 2 Schematic application of carbon rights trading in consortium blockchain

2.2.2 系统网络配置

基于联盟链的碳权交易系统包含各类型的市场主体,其作为联盟链组织机构在系统创建的同时,为各组织配置对应功能节点^[18]。利用联盟链开源项目,各组织配置排序节点(orderer节点)、客户端节点、对等节点(peer节点)和CA节点。其中,orderer节点不属于某一个实体组织,而是各组织共同维护的节点;peer节点负责背书和验证交易,并保持各组织之间的通信;客户端节点主要执行网络传输事务的申请,并将交易数据发送给orderer节点进行交易排序;CA节点是各组织中节点创建证书发放或权限修改的功能节点。

2.3 碳权交易应用设计

碳权交易应用包括交易主体和服务监管主体。其中,交易主体分为发电和用电主体。碳权交易市场向发用电市场主体开放,开展碳排放权交易。

在基于联盟链的碳权交易应用架构中(如图3所示),碳权交易依托联盟链技术平台,构建了分布式数据库和本地交易应用客户端,市场主体(发电厂和用户)本地自由申报碳权交易信息,平台通过

即时通信交互各主体的交易数据,按照交易匹配链码计算和迭代交易申报数据,出清交易匹配结果。能源监管机构通过查看链上交易数据,对主体的市场行为进行分析并对违规交易信息进行披露。金融机构为市场主体提供交易价值的结算和转移服务。

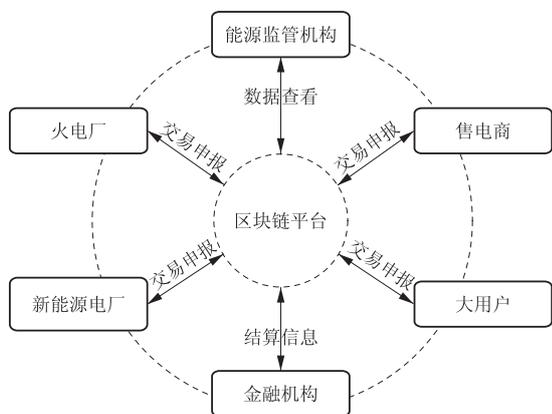


图3 碳权交易应用架构示意

Fig. 3 Schematic structure of carbon rights trading application

3 碳权交易机制与模型设计

碳权交易是电力交易的补充部分,但两者具有较大差异。碳权交易仅作为事后的虚拟商品进行金融交易,无需电力交易中的物理交割和输配电等物理模型。

3.1 碳权交易机制

3.1.1 碳排放交易原则

现阶段,我国碳权交易处于免费配额的初级阶段,对生产碳排放量进行核定并免费配置对应的碳权,对超排部分进行核查和考核,即当实际交易发用电量与交易出清电量出现偏差量时,回收对应碳权配额并执行碳权偏差考核,同时开放碳权交易市场以供相应市场主体参与碳权交易,否则由监管机构强制收取偏差电量的碳排放费用^[19]。

国外普遍采用包括监测、报告、核查过程的MRV机制,而国内的MRV机制缺乏透明度和可信度^[20]。在能源电力行业,碳排放限制主要是通过淘汰不合格机组和收取碳排放治理费用的方式进行碳排放量的控制。随着电力市场的不断推进,单纯按发电量收取碳排放费用已经不符合电力市场的精细化管理要求,需要根据“谁导致碳排放,谁买单”的市场要求,将电力用户纳入碳权管理的范畴,并推行精细化管理。

3.1.2 碳权交易的交易模式

本文中碳权交易是电力市场交易的配套市场,其主要目的为减少电力市场实际交易的偏差电量、

减少临时机组的开停次数、降低火电热备用容量、实现节能减排的效果。参照基于区块链技术的分布式电力交易机制^[21],碳权交易市场可对所有市场主体开放,按需申报碳权交易量和价格,并对自身申报的碳权交易价格和交易量负责,报价过低的买方需通过向监管机构缴纳碳权考核费用的方式承担交易不成功的碳权排放惩罚。同理,碳权交易的卖方需要承担因报价过高而匹配不到对应买方而造成的损失。

相比于电力交易,碳权交易无需物理交割,事后根据电力偏差量进行市场碳权交易,以市场引导电力交易主体积极参与电力合同履行和用电规划。碳权交易可以采用单边直接交易、双边直接交易以及多边交易的方式进行,如图4所示。联盟链可以支持“多对多”的直接交易模式,构建多节点竞价的市场环境^[22]。

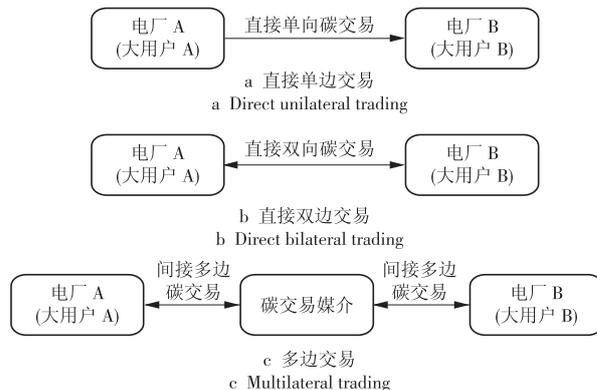


图4 碳权交易方式分类

Fig. 4 Classification of carbon rights trading methods

本文碳权交易采用“多边交易申报,多边交易匹配,多边交易出清”的交易申报和匹配机制。一个市场主体可以申报多个碳权交易价格,交易系统按照申报价格生成不同的交易匹配顺序,并按照交易匹配机制依次匹配申报的碳权交易量。“多对多”的碳权交易模式,允许一个碳权买(卖)方主体与多个卖(买)方市场主体按照不同的交易价格进行交易出清并结算。

3.2 碳权交易设计

3.2.1 联盟链交易规则设计

基于联盟链的碳权交易没有主持交易的中心机构,由市场主体共同参与碳权交易、数据维护和交易执行,要求市场主体严格按照既定市场规则执行碳权交易,要配套合适的共识机制和市场规则,保持碳权市场高效安全运行。

区块链技术的共识机制已有较多专家和学者进行了研究,针对碳权交易市场需要考虑参与主体的节点数量、碳权交易数据量、节点间通信效率、智

能合约数据处理复杂度等制约系统节点作为共识的因素,选择适当的共识机制进行系统交易共识。当前常用共识机制包括工作证明(PoW),股权证明(PoS),委任权益证明(DPoW),Ripple,小蚁等^[23]。由于联盟链无需挖矿和算力竞争,可以采用Ripple共识机制进行交易共识。

基于联盟链的碳权交易应用市场规则,以链码的形式嵌入区块链碳权交易应用系统,并部署在对应业务通道上,通过区块链通道隔离不同碳权交易业务数据和数据处理规则,来适应不同市场主体对碳权交易市场规则的需求。

3.2.2 碳权市场规则设计

创建碳权交易市场是为了降低发用电的碳排放量,对于维持或降低碳排放的发用电行为需要保证发电配额的碳排放权,相反则需要收回碳权并考核相应市场主体。我国碳权交易初期,需要溯源碳排放主体责任来引导碳权市场的推进。(1)发电不足导致的偏差电量,若是被用户响应而消除时,应收回发电厂交易匹配的碳排放偏差额度并补偿响应用户;当偏差电量由其他发电厂发电消除,收回发电不足电厂的偏差电量配额碳排放并强制征收偏差电量的碳排放配额费用,补偿偏差电量消除机组以避免其支付发电排放费用。(2)因用户多用电导致的电量需求增加,导致偏差电量,应强制收取用户多用的偏差电量碳排放配额,补偿消除偏差电量的发电厂或响应偏差电量的用户。(3)新能源发电厂发电不产生碳排放,低于交易合同电量时需收回发电配额碳排放权,多发电而导致的偏差电量不给予碳权配额。因电力交易市场中已有响应偏差考核机制限制,故碳权交易规则不做新能源发电申报免上限限制。

为降低市场主体因偏差电量而承担的过高碳权费用、防止多余碳权的贬值,开展碳权市场引导市场主体进行碳权交易势在必行。电能配套的碳排放权分别配额给发电和用电2个主体,对于偏差电量的碳排放是超额排放量,应由造成偏差电量的市场主体承担全部超额排放量。市场主体根据碳权交易机制,需要从碳权市场交易不平衡电量对应碳权,降低被监管机构考核的经济费用。

3.3 碳权交易流程

基于联盟链的碳权交易执行,按照业务通道部署的链码逻辑算法处理交易申报数信息,本文设计的碳权交易机制、链码执行逻辑和步骤如图5所示:(1)在规定时间内获取参与碳权交易的申报信息;(2)将获取的市场主体分为买方和卖方,分别按报价由低到高排序;(3)依次选择买方主体,筛选出卖

方报价低于自身的市场主体,再按照报价差由小到大依次匹配卖方,直至自身购买数量满足或匹配不到卖方时停止;(4)买方依次执行步骤3,直至买方全部匹配完成或无卖方用户可以匹配时停止碳权交易匹配。

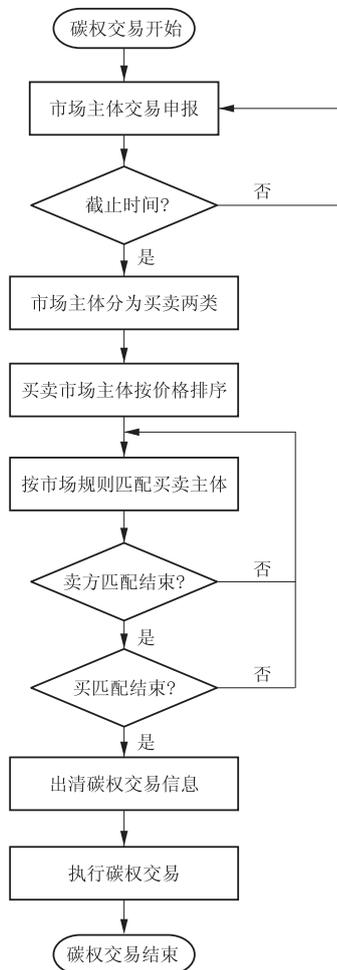


图5 基于联盟链的碳权交易应用链码执行流程
Fig. 5 Implementation process of carbon rights trading application chain code based on alliance blockchain

4 基于联盟链的碳交易模型

根据本文第2章节碳权交易应用的“电-碳交易流程”,考虑到系统设计包括系统设计和网络配置,并以第3章节的交易机制、市场规则以及交易流程为基础,开展基于联盟链的碳权交易模型量化研究,便于进行交易模型的验证。本文构建碳权均衡交易模型,规定购碳权买方报价需高于卖方报价,分别对卖、买方报价进行排序,买方按报价由高到低依次匹配卖方报价差值最低的报价主体,直至报价截止时间或达到有限轮的报价修改轮次,结束碳权交易匹配,出清交易匹配信息。买卖双方交易报价自由,但需要承担相应的交易不成功后果,即买方将按竞价价格向监管机构缴纳罚款,卖方按最低

价被监管机构回收碳排放权。

4.1 报价约束条件

开展市场交易双方的费用如下,

$$f_b = -f_s = -(P_{p,t} \cdot T_q), \quad (1)$$

式中: f_b, f_s 为碳权交易买卖双方交易费用; $P_{p,t}$ 为碳权交易量; T_q 为碳权交易价格。

碳权交易双方报价约束条件见式(2)~(5)。

交易总量平衡约束

$$\sum_{i=1}^n P_{s,i} = \sum_{j=1}^m P_{b,j}, \quad (2)$$

式中: $P_{s,i}$ 为第*i*个碳权出售主体交易量; $P_{b,j}$ 为第*j*个碳权购买主体交易量。

碳权交易量约束

$$P_{s,i} < P_{s,i,max}, \quad (3)$$

式中: $P_{s,i,max}$ 为自身碳权总量。

交易价格约束

$$T_{q,b} - T_{q,s} \geq 0, \quad (4)$$

式中: $T_{q,b}, T_{q,s}$ 为购、售碳权的价格。

交易匹配约束

$$T_{q,bi} - T_{q,sj} < T_{q,bn} - T_{q,sj}, \quad (5)$$

式中: $T_{q,bi}, T_{q,sj}$ 为交易列队中买卖第*i*和*j*个用户的申报价格; $T_{q,bn}$ 为买方其他用户报价, $n = 1, 2, \dots$ 。

为更好地指导用户进行碳权交易价格申报,根据实际交易电量与交易申报出清电量的比值(ε),给出交易指导价格,

$$\delta = \frac{Q_r}{Q_c} \times 100\%, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{\sum_{a=1}^x P_{s,a}}{\sum_{e=1}^y P_{b,e}} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: Q_r 为实际交易电量; Q_c 为交易申报出清电量;

δ 为碳权溢价系数; $\sum_{a=1}^x P_{s,a}$ 为碳权存量供给; $\sum_{e=1}^y P_{b,e}$ 为碳权存量需求。

$$T_z = (\alpha\delta + \beta\varepsilon) \cdot T_{q,p}, \quad (8)$$

式中: $T_{q,p}$ 为碳权配额价格; T_z 为实时碳权指导价格; α, β 为实时和存量对实时指导价格的调节因素。

4.2 交易价格设计与评价方法

根据碳权交易规则,碳权交易初期需要按照市场需求,即以市场指导价格为基准,按一定比例设定上下限,

$$(1 - \theta)T_z \leq T_{p,t} \leq (1 + \theta)T_z, \quad (9)$$

式中: θ 为碳权交易价格浮动率,按照金融市场的熔断机制, $\theta=20\%$; $T_{p,t}$ 为碳权交易实际市场交易价格。

交易价格设计与评价方法主要分为以下 2 种。

(1) 结算均衡电价

$$T_r = \frac{T_{s,i} + T_{b,j}}{2}, \quad (10)$$

式中: T_r 为出清碳权价格; $T_{s,i}, T_{b,j}$ 分别为出售和购买碳权价格。

(2) 效益评估方法

为研究本文碳权交易机制和模型的效益,从买方和卖方对参与碳权交易的市场主体效益进行分析。

买方相对收益率

$$S_b = \frac{f_{b,max} - f_r}{f_{b,max}} \times 100\%, \quad (11)$$

卖方相对收益率

$$S_s = \frac{f_r - f_{s,min}}{f_r} \times 100\%, \quad (12)$$

式中: f_i 为碳权交易市场主体的交易费用; $f_{b,max}$ 为碳权买方从趸售碳权市场购买碳权的费用; $f_{s,min}$ 为碳权卖方向趸售碳权市场销售碳权的费用。

5 碳权交易算例

本文采用程序模拟买卖市场主体以正态分布的形式进行碳权交易报价,根据各节点申报数据用时得到交易申报信息见表 1。

市场存量碳权和需求碳权分别为 954.0 t 和 1 078.0 t,碳权价格为 250.000 元/t^[24],调节因素 α, β 分别取 0.7, 0.3。由式(8)和(9)可得本轮碳权交易指导价格为 245.530 元/t,交易申报价格范围 196.424~294.636 元,即趸售市场的碳权回收价为 196.424 元/t,碳权购买价格为 294.636 元/t。

表 1 碳权交易市场主体交易申报信息

Tab. 1 Declaration information of carbon trading market players

卖方编号	$P_{s,i}/t$	$T_{q,s}/(\text{元} \cdot t^{-1})$	买方编号	$P_{b,j}/t$	$T_{q,b}/(\text{元} \cdot t^{-1})$
S3	27.0	251.210	B9	16.3	261.350
S4	19.8	275.350	B2	18.9	268.540
S1	3.3	232.020	B1	6.5	210.520
S5	30.4	278.570	B4	55.7	255.310
S6	15.6	262.540	B8	5.4	249.210
S2	62.4	268.560	B3	45.6	258.780
S7	101.2	197.570	B7	62.3	213.630
—	—	—	B5	12.1	231.580
—	—	—	B6	15.8	292.570

结合第 3, 4 章节的交易机制和模型,表 1 中的交易申报信息经处理得到碳权交易买卖双方排序和交易匹配信息(见表 2—3),开展市场主体间“多对多”的碳权交易,碳权交易的收益增加率见表 4。

表 2 碳权交易双方排序

Tab. 2 Sequence of both parties in carbon rights trading

卖方编号	$P_{s,i}/t$	$T_{q,s}/(\text{元}\cdot\text{t}^{-1})$	买方编号	$P_{b,j}/t$	$T_{q,b}/(\text{元}\cdot\text{t}^{-1})$
S7	101.2	197.570	B1	6.5	210.520
S1	3.3	232.020	B7	62.3	213.630
S3	27.0	251.210	B5	12.1	231.580
S6	15.6	262.540	B8	5.4	249.210
S2	62.4	268.530	B4	55.7	255.310
S4	19.8	275.350	B3	45.6	258.780
S5	30.4	278.570	B9	16.3	261.350
—	—	—	B2	18.9	268.540
—	—	—	B6	15.8	292.570

表 3 根据碳权交易模型和约束条件的碳权交易匹配信息

Tab. 3 Carbon trading matching information based on the carbon trading model and constraint conditions

买方编号	卖方编号	实际交易量/t	实际交易价格/ (元·t ⁻¹)
B1	S7	6.5	204.045
B7	S7	62.3	205.600
B5	S7	12.1	214.575
B8	S3	5.4	250.210
B4	S3	21.6	253.260
B4	S1	3.3	243.665
B4	S7	20.3	226.440
B4	其他机构	10.5	294.636
B3	其他机构	45.6	294.636

表 4 碳权交易市场主体收益增加率

Tab. 4 Increase rate of carbon trading market main bodies' income

买方编号	卖方编号	S_s	S_b
B1	S7	0.038 8	0.307 47
B7	S7	0.046 7	0.302 19
B5	S7	0.092 4	0.271 73
B8	S3	0.273 8	0.150 78
B4	S3	0.289 4	0.140 43
B4	S1	0.240 5	0.172 99
B4	S7	0.152 8	0.231 46
B4	其他机构	—	0
B3	其他机构	—	0
B9	其他机构	—	0
B2	S6	0.351 9	0.098 80
B2	S2	0.367 1	0.088 60
B6	S5	0.453 8	0.030 80
其他机构	S4	0	—
其他机构	S2	0	—
其他机构	S5	0	—

根据交易排序规则, 报价较低的买方与报价较低的卖方进行了交易匹配, 再通过均价电价的方式

出清实际交易执行碳权价格, 相对于当前常用的边际价格出清的方式, 本文提出的价格匹配和均衡价格机制可以在满足买卖双方对碳权交易价格需求的基础上, 使实际成交价格低于买方报价、同时高于卖方报价。在一定程度上, 区块链技术的分布式数据交互和交易数据计算与迭代, 可满足碳权市场个性化的碳权成本需求、避免边际统一出清价格的笼统价格测算、提高交易的精细化管理。

根据表 4, 得出各匹配交易的收益增量(如图 6 所示)。

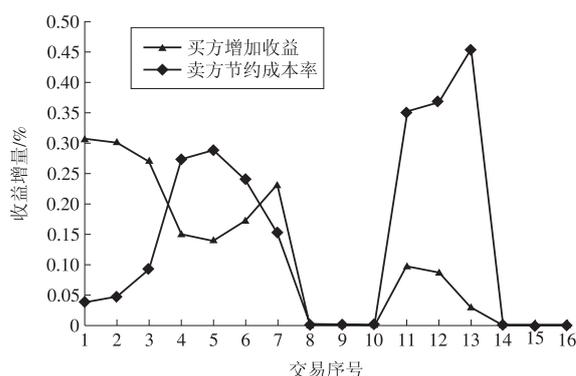


图 6 匹配交易执行收益增加率

Fig. 6 Increase rate of return on matched transactions

由图 6 可以看出, 买方收益增加率呈现“波浪形”下降的趋势, 由于买方报价升高时相应的实际出清结算交易价格随之升高, 买方的收益率呈现波动下降的趋势。若买方由于自身申报的购碳权价格无法与卖方匹配, 则需要通过趸售方式从其他机构购买碳权, 交易增加收益率为 0, 如交易 8—10。

同时, 卖方市场主体收益增加率呈现“M”型: 前半段由于卖方报价较低的市场主体, 与报价较低的买方匹配成交, 相对获得的碳权交易收益增加率较低, 随着卖方报价升高而收益增量率也随之增加; 但由于卖方的申报价格进一步升高, 缺少相应报价的买方与之匹配, 从而承担将碳权以趸售形式与其他机构交易, 降低了自身的收益, 如交易 14—16。

结合表 3 分别计算各市场主体参与碳权交易总共获得的收益, 如图 7—9 所示。

根据图 7—8 可以看出, 参与市场主体间碳权交易的市场用户获得的市场收益均高于没有参与的市场主体, 买方 B3 和 B9 按申报价格排序与卖方进行交易匹配时, 低于自身报价的卖方已全部匹配完成, 导致没有合适的卖方与之交易, 所以被迫从其他机构(趸售市场)购买相应碳权, 相对收益较低。卖方 S4 由于自身报价较高, 高于自身的买方与其他卖方匹配完成, 导致自身拥有碳权按趸售市场价格出售给其他机构, 从而自身相对交易收益率为 0。

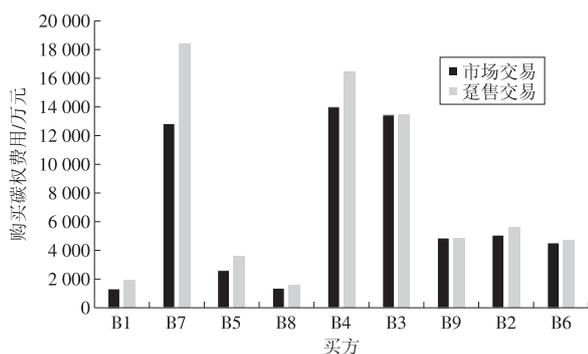


图 7 买方“多对多”与趸售方式的交易成本对比

Fig. 7 Transaction cost comparison between buyer's many-to-many and wholesale mode

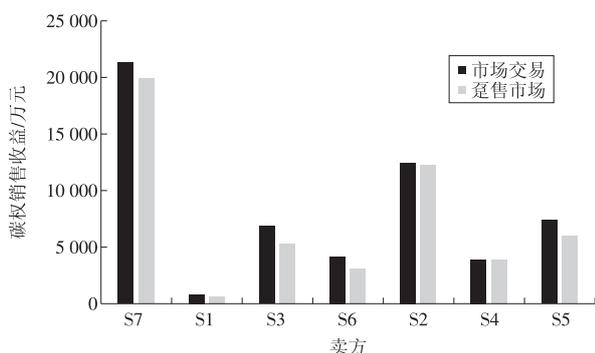


图 8 卖方“多对多”与趸售方式交易成本对比

Fig. 8 Transaction cost comparison between seller's many-to-many and wholesale mode

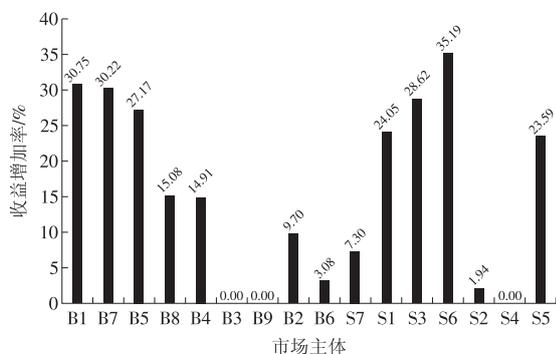


图 9 各市场主体相对获益的总增加率

Fig. 9 Total increase rate of relative benefits of market parties

综合图 7—9 可以看出,参与“多对多”碳权交易的市场主体均获得一定的收益增加,但是由于自身报价策略原因,导致部分卖方和买方报价不符合对方需求或不具有匹配竞争力而无法匹配到交易对象,而无法获得满意收益。

本文报价由程序随机生成,缺少卖方或买方报价相同的情况,规定当申报价格相同时,以交易申报时联盟链的排序节点的排序为交易先后依据。

联盟区块应用系统提供碳权市场主体交易简单计算和迭代的功能,主要是进行交易数据的存证,本文联盟链应用的数据存证系统如图 10 所示(图中 WAI 指参与趸售碳权交易市场的交易)。根

据区块链体(Block)数据存储特征,按照“倒树状”连接各笔交易,最终连接到 Merkle 树上,供碳权交易数据的查证和展示。

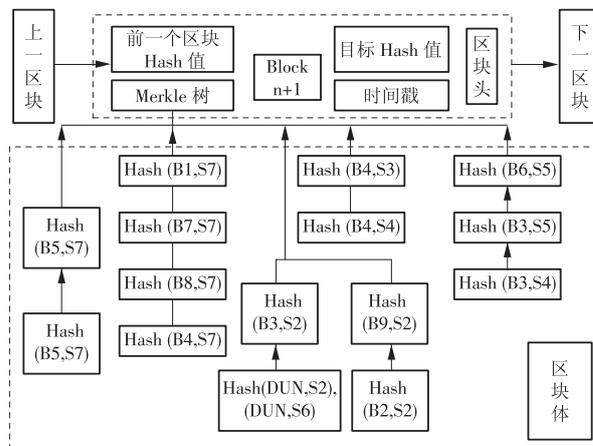


图 10 基于联盟链的碳权交易应用区块结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of carbon trading application block structure based on alliance chain

6 结论

本文基于联盟链技术提出了碳权交易应用和系统架构,并根据区块链技术的分布式技术特征设计了“多对多”的碳权交易匹配机制和模型,并通过算例验证了碳权交易模型的有效性,可以为参与分布式碳权交易的市场主体带来更高的市场收益。

但是碳权交易机制受政策影响较大,目前国内碳权交易的指导政策和市场建设均不明朗,未来碳权交易的不确定性因素依旧较多,与此同时,基于区块链技术的碳权交易应用效率仍需进一步研究,当前仅能为碳权交易数据提供链上数据的可追溯和防篡改的功能。

本文基于国内外学者的研究开展了碳权市场机制设计,为我国区块链技术的应用场景和碳权市场建设提供研究依据和建设参考。

参考文献:

[1]何建坤.我国应对全球气候变化的战略思考[J].科学与社会,2013,3(2):46-57.
HE Jiankun. Strategic thinking on China's response to global climate change [J]. Science and Society, 2013, 3 (2): 46-57.

[2]冯佐江,李红建,杨勇,等.1 000 MW 燃煤机组燃料智能管控系统整体解决方案及应用[J].华电技术,2020,42 (2):22-27.
FENG Zuojiang, LI Hongjian, YANG Yong, et al. Overall solution and application of fuel intelligent control system for 1 000 MW coal-fired units [J]. Huadian Technology, 2020, 42(2): 22-27.

- [3]齐天宇,杨远哲,张希良.国际跨区碳市场及其能源经济影响评估[J].中国人口·资源与环境,2014,24(3):19-24.
QI Tianyu, YANG Yuanzhe, ZHANG Xiliang. International trans regional carbon market and its energy economic impact assessment [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(3): 19-24.
- [4]何建坤.积极推进中国特色全国碳排放权交易市场建设[N].中国环境报,2019-09-27(3).
- [5]FLACHSLAND C, MARSCHINSKI R, EDENHOFER O. To link or not to link: Benefits and disadvantages of linking cap-and-trade systems [J]. Climate Policy, 2009, 9(4): 358-372.
- [6]RUSS P, CISCAR J C, SAVEYN B, et al. Economic assessment of post-2012 global climate policies: Analysis of greenhouse gas emission reduction scenarios with the POLES and GEM-E3 models [R]. EU Commission Joint Research Centre Report, 2009.
- [7]WILDE J, MICHAEL G, BREWER T. Linking emission trading systems: Prospects and issues for business [R]. London: Carbon Trust, 2009.
- [8]袁勇,王飞跃.区块链技术发展现状与展望[J].自动化学报,2016(4):481-494.
YUAN Yong, WANG Feiyue. Development status and prospect of blockchain technology [J]. Acta Automatica Sinica, 2016(4): 481-494.
- [9]栾昊,赵简.区块链在能源互联网应用的前景展[J].能源,2016(8):70-72.
LUAN Hao, ZHAO Jian. Prospects of blockchain application in energy internet[J]. Energy, 2016(8): 70-72.
- [10]陈启鑫,王克道,陈思捷,等.面向分布式主体的可交易能源系统:体系架构、机制设计与关键技术[J].电力系统自动化,2018,42(3):1-7,31.
CHEN Qixin, WANG Kedao, CHEN Sijie, et al. Tradable energy system for distributed agents: Architecture, mechanism design and key technologies [J]. Power System Automation, 2018, 42(3): 1-7, 31.
- [11]王辉,廖昆,陈波波,等.低碳形势下基于区块链技术的含微电网电力市场交易出清模型[J].现代电力,2019,36(1):14-21.
WANG Hui, LIAO Kun, CHEN Bobo, et al. Transaction clearing model of power market with microgrid based on blockchain technology in low carbon situation [J]. Modern Power, 2019, 36(1): 14-21.
- [12]曹寅.能源区块链与能源互联网[J].风能,2016(5):14-15.
CAO Yin. Energy blockchain and energy internet [J]. Wind Energy, 2016(5): 14-15.
- [13]王安平,范金刚,郭艳来.区块链在能源互联网中的应用[J].电力信息与通信技术,2016,14(9):1-6.
WANG Anping, Fan Jingang, GUO Yanlai. Application of blockchain in energy internet [J]. Power Information and Communication Technology, 2016, 14(9): 1-6.
- [14]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 technology in energy internet: Research framework and typical application [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4022.
- [15]吉斌.基于区块链技术的产消用户电力零售交易机制与模式研究[D].南宁:广西大学,2019.
- [16]Blockchain and distributed ledger technologies — Overview of and interactions between smart contracts in blockchain and distributed ledger technology systems: ISO/TR 23455:2019[S].
- [17]Block.one. EOS. IO Technical White Paper [EB/OL]. (2017-06-05) [2020-02-27]. <https://steemit.com/eos/@eosio/eos-io-technical-white-paper>.
- [18]YU Mengmeng, TAO Quan, DONG Hui, et al. Ultra-low noise graphene/copper/nylon fabric for electromagnetic interference shielding in ultra-low field magnetic resonance imaging[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2020, 317.
- [19]孙恒丽.基于区块链技术的碳交易价格发现机制研究[D].大连:东北财经大学,2018.
- [20]夏欢.全国性碳交易市场构建研究[D].武汉:武汉工程大学,2016.
- [21]吉斌,莫峻,谭建成.高比例光伏电能产消群电力需求响应机制设计[J].电网技术,2018,42(10):3315-3323.
JI bin, MO Jun, TAN Jiancheng. Design of power demand response mechanism for high proportion photovoltaic power generation and consumption group [J]. Power Grid Technology, 2018, 42(10): 3315-3323.
- [22]吉斌,谭建成.利用区块链技术的配电侧分布式微电能交易初探[J].现代电力,2019(1):29-36.
JI Bin, TAN Jiancheng. Preliminary research of distributed microenergy trading on power distribution side using blockchain technique [J]. Modern Electric Power, 2019(1): 29-36.
- [23]任仲文.区块链领导干部读本[M].北京:人民日报出版社,2018.
- [24]碳交易网.碳排放为什么应该是200~300元每吨?[EB/OL] (2017-05-26) [2020-02-27] <http://www.tanpaifang.com/tanguwen/2017/05/26/59500.html>.

(本文责编:陆华)

作者简介:

吉斌(1992—),男,安徽当涂人,电力市场系统研发工程师,工学硕士,从事电力市场机制、区块链技术应用以及电力系统研发工作(E-mail:1498206259@qq.com)。

刘妍(1990—),女,陕西西安人,工学硕士,从事电网调度工作(E-mail:474258442@qq.com)。