

# 基于区块链技术的电力行业碳减排奖惩及碳交易匹配模型

杜晓丽<sup>1</sup>, 梁开荣<sup>1</sup>, 李登峰<sup>2</sup>

(1. 福州大学经济与管理学院, 福建省福州市 350116; 2. 电子科技大学经济与管理学院, 四川省成都市 611731)

**摘要:** 电力行业作为中国优先纳入碳交易体系的行业, 已成为实现碳减排的重要主体。区块链作为一种新兴的分布式账本技术能够有效解决碳交易体系中的数据安全、运行效率等问题。基于区块链技术, 文中在构建电力行业碳交易体系整体框架的基础上, 构建了碳配额成本决策模型、碳减排奖惩模型和碳交易匹配模型, 并引入减排努力值指标, 作为上述3个模型子系统的流程推进与联系桥梁, 以实现安全、高效的碳交易。通过算例分析验证了该碳交易体系的有效性, 并给出仿真设计, 说明采用区块链组织碳交易体系能够节约成本、提高效率、增加效益。

**关键词:** 区块链技术; 电力行业; 碳配额; 奖惩机制; 碳交易匹配

## 0 引言

电力行业因其高投入、高消耗、高排放已成为全球能源领域最大的碳排放源, 是节能、减排的主力军。同时, 也是中国推行节能减排战略的重要改革对象<sup>[1]</sup>。因此, 对电力行业碳交易体系进行研究具有重要的意义。

为有效提升电力行业碳交易体系的运行效率, 现有的研究主要从碳资产管理、碳配额、碳定价、碳政策等方面寻求解决途径或方法。文献[2]从灾害防御的角度, 提出了碳交易风险防控框架, 以优化碳交易体系。文献[3-4]建立了发电机组的初始碳配额模型, 并对模型进行了公理化处理。文献[5]基于玻尔兹曼分布理论, 提出了一种电力系统碳排放权的初始分配模式和分配方案。文献[6]以欧洲发电行业为研究对象, 运用需求-价格模型来模拟微观供求关系对碳市场价格的影响。文献[7]研究认为, 合理的碳税政策可以保证微网和常规机组协同运行的积极性和稳定性。

以上文献对于建立电力行业碳交易体系均具有一定的借鉴意义, 但也存在一定的问题: ①未考虑碳排放交易数据的安全性问题; ②依赖于中心化管理, 信息传输效率低; ③促进企业参与碳交易的激励效果不明显; ④买卖双方碳交易匹配时信息不对称, 导致整体的效益不高。

随着新兴技术的发展, 除考虑碳交易市场自身发展之外, 还可吸纳其他技术予以支持。区块链作为一种新兴的分布式账本技术, 其去中心化、公开透明, 全节点参与数据记录等特点<sup>[8]</sup>, 有望成为解决上述碳交易市场问题的新突破口。

自区块链概念提出以来, 学术界对其在金融<sup>[9]</sup>、供应链<sup>[10]</sup>、能源<sup>[11-14]</sup>、医疗<sup>[15]</sup>等领域的应用展开了积极探索, 并有学者将其应用于碳交易体系中。文献[16]提出在时尚服装制造业中以区块链作为底层技术, 将碳排放交易计划和一套新的“碳排放环节”系统相结合, 向公众公开碳排放情况, 并将此作为其产品特色。文献[17]提出运用区块链技术, 建立一个碳排放权认证和计量的智能化系统平台的设想。文献[18]从隐私保护和系统安全的角度, 构建了一个分散式碳排放交易的体系结构模型。文献[19]提出了一种将买卖双方信誉考虑进去的基于区块链的碳排放交易机制模型。以上研究均运用区块链来建立一个新的碳交易体系。文献[20]运用一个既定的设计流程, 以澳大利亚碳交易市场作为研究对象, 研究将区块链应用于已有碳交易体系的问题。

上文分析可知, 国内外对于电力行业碳交易体系的优化和在碳交易中引入区块链技术已有了一定的研究。但现有的相关研究更多关注于理论方法, 较少涉及实际的业务场景需求。虽然文献[20]在考虑减排基金政策的情况下, 对区块链技术应用于澳大利亚碳交易市场进行了研究, 但并未对所建体系在其他政策下的碳交易市场的可行性或适应性进行分析。

本文基于区块链技术的优良性质, 设计了电力

收稿日期: 2020-02-12; 修回日期: 2020-05-18。

上网日期:

国家自然科学基金重点项目(71231003); 国家自然科学基金面上项目(71572040)。

行业碳交易体系的整体框架,同时构建了碳配额成本决策模型、减排奖惩模型和碳交易匹配模型,以实现安全、高效、激励效果显著的电力行业碳交易体系。

## 1 电力行业碳交易体系构建及其关键技术

电力行业碳交易体系中的参与主体主要包括电网企业、发电企业、电力建设企业、电力设计企业以及其他辅助性企业等。各企业间均独立运行,同时接受政府监督与管理。此外,这些企业均需符合一定的准入和资质条件才能接入碳交易体系。针对上

述特点,本章采用联盟链形式,构建电力行业碳交易体系。下面对其中的一些关键技术进行简单介绍。

### 1.1 节点分类

通过分析实际的业务需求与功能,将电力行业碳交易所涉及的各参与主体一一映射到区块链节点中,主要分为3类主体:交易主体、审核认证机构和平台共建与运营主体。各参与主体作为区块链节点的功能、作用与权限的说明可见表1,其中需要说明的是,平台共建与运营主体中的碳交易主管部门主要指实际中的碳交易政策制定和实施者,与审核认证机构中的政府相关部门不同。

表1 区块链节点分类与权限汇总表  
Table 1 Summary table of classification and jurisdiction of blockchain nodes

节点类型	涉及主体	功能与作用	权限
用户节点	电力行业各碳排放企业,作为交易主体	发送交易消息、接收交易信息、记录本节点与其他节点间的交易事项,维护本地账本等	记录查看本节点交易数据、享受平台服务
协调节点	政府相关部门或经政府审批具有碳交易审核认证的机构或部门,作为审核认证机构	对系统中交易信息进行合规性审查、验证交易、维护系统安全	保存全部或部分交易数据、对所负责验证的节点数据拥有访问权限
超级节点	碳交易主管部门、信誉较好和规模较大的电力企业、区块链科技公司等形成的协会或其他组织形式等,作为平台共建与运营主体	负责制定碳交易政策、仲裁交易纠纷、对新进节点做合规性审查、协调系统与其他监管系统的对接等	系统最高数据访问权限、对全部数据拥有访问权限、修改删除交易信息

### 1.2 碳交易流程与规则

基于区块链的电力行业碳交易体系中,用户节点在经历注册上链、碳配额分配、碳减排奖惩、碳交易发布、碳交易匹配等流程,以及在遵循该体系的退出机制、系统维护、通证抽象、链下链上的监管与协调等规则的基础上,方可顺利参与碳交易。

碳配额分配、碳减排奖惩与碳交易匹配是整个电力行业碳交易体系的核心。碳配额是开展碳交易的基础,碳减排奖惩是碳交易体系正常运作的关键因素,碳交易匹配是碳交易体系构建的目的。三者相互作用、互相促进,且层层递进,以实现碳减排为最终目标。因此,上述3个环节将在下文进行详细的流程说明与数值分析。同时,鉴于三者间的紧密联系,通过引入减排努力值,将其作为贯穿整个碳交易体系的企业减排标识,也作为碳配额成本决策、碳减排奖惩、碳交易匹配3个子系统间的流程推进与联系桥梁。

### 1.3 碳配额成本决策系统

碳配额分配是形成碳交易的基础条件,不同的配额分配方法意味着不同的减排成本和收益<sup>[5]</sup>。本文引入减排努力值进行碳配额成本决策。减排努力值的计算过程如下。

设有  $n$  个 ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 节点  $x_i$  (即碳排放企业),  $m$  个 ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 指标  $Y_j$ ,  $x_{ij}^{(k)}$  为节点  $x_i$  在第  $k$  个周期指标  $Y_j$  的值,  $\omega_j^{(k)}$  为指标  $Y_j$  的权重,  $C_i^{(k)}$

为节点企业  $x_i$  在第  $k$  个周期的减排努力值。在此只给出计算过程,具体的指标选取不再讨论。

1) 考虑节点企业指标差异程度的减排努力值

采用极值处理法,按照效益型和成本型指标,分别对指标值  $x_{ij}^{(k)}$  进行无量纲化,无量纲化值分别为:

$$\tilde{x}_{ij}^{(k)} = \frac{x_{ij}^{(k)} - x_{\min,j}^{(k)}}{x_{\max,j}^{(k)} - x_{\min,j}^{(k)}} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$$\tilde{x}_{ij}^{(k)} = \frac{x_{\max,j}^{(k)} - x_{ij}^{(k)}}{x_{\max,j}^{(k)} - x_{\min,j}^{(k)}} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中:  $x_{\max,j}^{(k)} = \max \{x_{1j}^{(k)}, x_{2j}^{(k)}, \dots, x_{nj}^{(k)}\}$  和  $x_{\min,j}^{(k)} = \min \{x_{1j}^{(k)}, x_{2j}^{(k)}, \dots, x_{nj}^{(k)}\}$  分别表示第  $k$  个周期所有节点中指标  $Y_j$  的最大值与最小值。

无量纲化后的数据,可表示为矩阵  $A^{(k)} = (\tilde{x}_{ij}^{(k)})_{nm}$ 。

指标  $y_j$  的信息熵  $F_j^{(k)}$  表示为:

$$F_j^{(k)} = - \frac{\sum_{i=1}^n P_{ij}^{(k)} \ln P_{ij}^{(k)}}{\ln n} \quad (3)$$

式中:  $P_{ij}^{(k)} = \tilde{x}_{ij}^{(k)} / \sum_{i=1}^n \tilde{x}_{ij}^{(k)}$  表示节点  $x_i$  的第  $j$  个指标占所有节点该指标之和的比重。

计算各指标权重如下:

$$\omega_j^k = \frac{1 - F_j^{(k)}}{\sum_{j=1}^m F_j^{(k)}} \quad (4)$$

节点  $x_i$  的减排努力值为:

$$\tilde{C}_i^{(k)} = \sum_{j=1}^m \omega_j^{(k)} \tilde{x}_{ij}^{(k)} \quad (5)$$

2) 考虑节点指标变化程度的减排努力值

首先,根据式(1)和式(2),对节点  $x_i$  在周期  $k$  与  $k-1$  的指标值  $Y_j$  进行无量纲化处理;然后,用无量纲化后的指标值间的差值表示节点指标变化程度。即

$$\tilde{\delta}_{ij}^{(k)} = \tilde{x}_{ij}^{(k)} - \tilde{x}_{ij}^{(k-1)} \quad (6)$$

式中:  $\tilde{\delta}_{ij}^{(k)}$  为节点  $x_i$  在周期  $k$  与  $k-1$  的指标  $Y_j$  的差值,  $\tilde{x}_{ij}^{(k-1)}$  为第  $k-1$  个周期节点企业指标的无量纲化数据。

因此,指标变化程度的减排努力值为:

$$\Delta C_{ij}^{(k)} = \sum_{j=1}^m \omega_j^{(k)} \tilde{\delta}_{ij}^{(k)} \quad (7)$$

各节点在第  $k$  个周期的综合减排努力值为:

$$C_i^{(k)} = \theta_1 \tilde{C}_i^{(k)} + \theta_2 \Delta C_{ij}^{(k)} \quad (8)$$

式中:  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为指标差异程度系数和指标变化程度系数,且  $0 \leq \theta_1 \leq 1, 0 \leq \theta_2 \leq 1, \theta_1 + \theta_2 = 1$ 。当碳排放企业减排效果不稳定时,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  的取值满足  $\theta_1 < \theta_2$ ;当碳排放企业的减排效果逐步提升或较稳定时,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  的取值满足  $\theta_1 > \theta_2$ 。实际中,先对碳排放企业的减排稳定程度进行等级划分,然后根据企业所处等级进行  $\theta_1$  和  $\theta_2$  取值。此处,碳排放企业的减排稳定程度等级划分不再具体讨论。

减排努力值是反映减排指标的差异程度(现状)和增长程度(潜力与趋势)的综合指标,其物理意义在于全面评估企业减排能力和潜力。

根据电力行业特点,并考虑到数据获取难易程度、指标代表性,选取指标及指标类型情况如下。

1) 成本型指标:碳排放量  $Y_1$  和每单位发电量碳排放量  $Y_2$ 。

2) 效益性指标:企业利润  $Y_3$ 。

由于上述指标均为碳排放企业的内部数据,故针对其上链前的可信性问题,需经审核认证机构验证通过后方可上链。此外,考虑到实际业务需求,审核认证机构可借助物联网技术、数据采集技术等进行现场审核与抽样审核机制,确保上链前数据的真实性,为实现区块链技术和所有传统的可信信息系统数据的关联性和一致性奠定基础。

依据节点企业的碳减排情况,决定该企业支付

的碳配额成本,可达到激发企业减排的目的。减排努力值仅作为判别的基础模型,具体的判别条件在此不作详细讨论。

实际应用中,电力行业均采用基准线法进行碳配额分配<sup>[21]</sup>,在所建体系中,仍采用该方法进行碳配额计算。减排努力值在所建体系中以智能合约的形式进行碳配额成本的自动决策。同时,减排努力值也适用于对其他行业企业减排能力进行评估。基于区块链技术的碳配额分配系统具体流程见图1中绿色虚线框图部分。

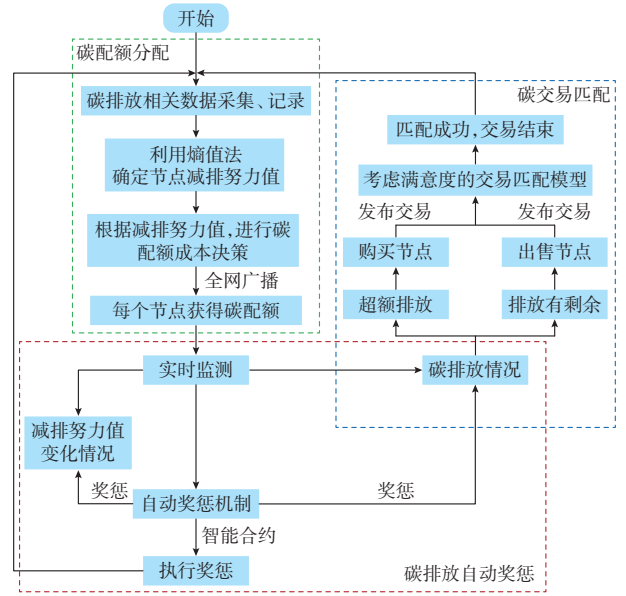


图1 基于区块链技术的碳交易系统流程图  
Fig. 1 Flow chart of carbon trading system based on blockchain technology

#### 1.4 减排自动奖惩系统

为避免使用同一数值标准进行奖惩的不公平性及按照当前周期减排情况进行奖惩的不合理性,本节提出采用修正减排努力值进行减排奖惩判别,具体过程如下。

设第  $k$  个周期的减排努力值除了可以确定第  $k+1$  个周期的碳配额成本外,还可用于对第  $k$  个周期的碳排放情况进行奖惩。考虑节点碳排放履约情况,对减排努力值进行修正,得到修正减排努力值为:

$$\bar{C}_i^{(k)} = \frac{S_i^{(k)}}{S_{\text{act},i}^{(k)}} C_i^{(k)} \quad (9)$$

式中:  $\bar{C}_i^{(k)}$  为考虑超额排放和配额有剩余情况的修正减排努力值,  $S_i^{(k)}$  和  $S_{\text{act},i}^{(k)}$  分别为第  $k$  个周期节点  $x_i$  的碳配额量和实际碳排放量。当  $S_{\text{act},i}^{(k)} < S_i^{(k)}$  时,节点配额有剩余;当  $S_{\text{act},i}^{(k)} > S_i^{(k)}$  时,节点超额排放;当  $S_{\text{act},i}^{(k)} = S_i^{(k)}$  时,修正减排努力值就是减排努力值。可



知,减排奖惩取决于企业当前周期的减排履约情况。当  $\bar{C}_i^{(k)} > C_i^{(k)}$  时,则进行奖励,反之则要受到惩罚。基于区块链技术的碳排放自动奖惩系统流程见图1中红色虚线框图部分。

在此说明,碳减排奖惩以通证的形式进行发放,实现对企业减排努力的激励反馈,调动企业的减排积极性。可依据修正减排努力值所在数值范围,制定对应的通证奖惩量化标准。具体的奖惩细节不在此详细说明。

### 1.5 碳交易匹配系统

碳交易阶段,节点企业均将交易信息发布到区块链上。设  $y_i (i' = 1, 2, \dots, n_1)$  为出售节点,  $z_j (j' = 1, 2, \dots, n_2)$  为购买节点,且  $n_1 + n_2 \leq n$ 。以双方满意度最大为目标进行交易匹配,满意度用区间  $[0, 1]$  中的数值表示,其中最满意为1,最不满意为0。在交易匹配时,交易双方除考虑对方的减排努力值外,还可能考虑价格、交易量等参数。

设在交易阶段出售节点  $y_{i'}$  考虑的交易参数为  $w_r (r = 1, 2, \dots, s)$ , 其中,  $s$  为出售节点进行交易时考虑的参数总个数。当参数  $w_r$  为效益型参数时,出售节点  $y_{i'}$  给出的期望值为  $p_{h,r,i'}$ 、可接受该参数的最低值为  $p_{l,r,i'}$ , 购买节点  $z_{j'}$  实际中该参数的取值为  $p_{z,j'}$ 。针对参数  $w_r$ , 出售节点  $y_{i'}$  对  $z_{j'}$  的满意度表示为:

$$d_{r,i',j'} = \begin{cases} 1 & p_{z,j'} \geq p_{h,r,i'} \\ \frac{p_{z,j'} - p_{l,r,i'}}{p_{h,r,i'} - p_{l,r,i'}} & p_{l,r,i'} \leq p_{z,j'} < p_{h,r,i'} \end{cases} \quad (10)$$

当参数  $w_r$  为成本型参数时,出售节点  $y_{i'}$  给出的期望值为  $p_{l,r,i'}$ 、可接受该参数的最高值为  $p_{h,r,i'}$ , 购买节点  $z_{j'}$  实际中该参数的取值为  $p_{z,j'}$ 。针对参数  $w_r$ , 出售节点  $y_{i'}$  对  $z_{j'}$  的满意度表示为:

$$d_{r,i',j'} = \begin{cases} 1 & p_{z,j'} \leq p_{l,r,i'} \\ \frac{p_{h,r,i'} - p_{z,j'}}{p_{h,r,i'} - p_{l,r,i'}} & p_{l,r,i'} < p_{z,j'} \leq p_{h,r,i'} \end{cases} \quad (11)$$

$y_{i'}$  对  $z_{j'}$  的整体满意度为:

$$d_{i'j'} = \sum_{r=1}^s \beta_{i',r} d_{r,i',j'} \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (12)$$

式中:  $\beta_{i',r}$  为出售节点  $y_{i'}$  在交易阶段对参数  $w_r (r = 1, 2, \dots, s)$  的重视程度,即权重,  $\sum_{r=1}^s \beta_{i',r} = 1, 0 \leq \beta_{i',r} \leq 1$ 。

同理,可得购买节点  $z_{j'}$  对出售节点  $y_{i'}$  的满意度  $e_{i'j'}$ 。以交易节点双方满意度最大为目标的交易匹配模型为:

$$\max \left\{ \sum_{j'=1}^{n_2} \sum_{i'=1}^{n_1} (d_{i'j'} + e_{i'j'}) f_{i'j'} \right\} \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i'=1}^{n_1} f_{i'j'} \leq 1 & j' = 1, 2, \dots, n_2 \\ \sum_{j'=1}^{n_2} f_{i'j'} \leq 1 & i' = 1, 2, \dots, n_1 \\ f_{i'j'} = 0, 1 & i' = 1, 2, \dots, n_1; j' = 1, 2, \dots, n_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $f_{i'j'}$  表示  $y_{i'}$  与  $z_{j'}$  是否进行交易,  $f_{i'j'} = 1$  表示两者进行交易匹配,否则  $f_{i'j'} = 0$ 。

显然,上述模型通过适当变形,可写成为0-1指派问题。匈牙利算法作为一种在多项式时间内求解任务分配问题的组合优化算法,具有计算时间复杂度低的优点,故从节约时间方面考虑,采用匈牙利算法对模型进行求解。基于区块链技术的碳交易匹配系统具体流程,见图1蓝色虚线框图部分。

### 1.6 基于区块链技术的碳交易体系整体框架

根据前面对上述3个子系统的分析研究,可构建基于区块链技术的电力行业碳交易体系整体框架,如图1所示。

整体交易流程如下:①采集、记录节点企业的碳排放数据;②利用系统内置减排努力值模型,计算节点减排努力值;③依据减排努力值,进行初始碳配额分配成本决策,并全网广播;④实时监测企业碳排放履约情况和减排努力值变化情况;⑤依据减排努力值变化情况,即修正减排努力值进行自动奖惩;⑥各节点进入碳交易阶段。此时,碳交易买卖双方均将自己的交易信息发布到区块链上,以双方满意度最大为目标进行交易匹配;⑦对减排奖惩、交易执行及其他相关数据进行采集、记录。

本文基于区块链构建的新型碳交易体系,在碳配额、减排奖惩和碳交易匹配阶段,均考虑了对于企业的减排激励,从而推动碳排放总量控制目标的达成。在碳配额阶段,当前周期获得碳配额的成本由上一周期的碳减排情况决定,由此可调动企业的减排积极性。借助智能合约实现智能奖惩,企业碳排放履约情况直接反映到减排奖惩上,企业面临实时奖惩压力,进一步促进其自觉淘汰落后产能,实现企业转型升级,控制碳排放,或主动参与碳交易。在碳交易阶段,交易达成难易程度与企业历史减排情况相关,从而激发、调动企业节能减排动力。上述过程对企业减排可形成持续激励作用,最终实现控制碳排放总量的目标。

所建碳交易系统也适用于其他工业企业,但不

同行业企业的碳配额核算方法不同。为了应对该问题,满足不同行业企业的上链需求,需在企业申请上链时,由相关审核机构确定该企业所属碳配额类型,以便更好地接入区块链系统。因此,对于碳配额类型划分和碳配额计量模型确定是实现的前提。碳配额基准计算模型的划分除考虑行业不同外,还需考虑企业类型、减排政策、工艺流程等。

## 2 算例分析

### 2.1 算例情境设置

设有5个碳排放企业,各企业在第 $k-1$ 个周期和第 $k$ 个周期的指标数据见附录A表A1。选取 $\theta_1=0.6$ 和 $\theta_2=0.4$ 进行算例分析。

5个企业在经历提交申请、资质审核、获得数字证书与公私钥之后,成为链上用户节点。减排努力值的3个数据指标在相关审核认证机构审核通过后,均记录在区块链上,并以merkle树的形式进行保存,防止数据被篡改。

### 2.2 计算结果与分析

将减排努力值的计算模型作为智能合约内嵌于系统中。以减排履约周期结束作为触发条件,实现减排努力值的计算。计算结果见表2。

1)以减排努力值的平均值作为基准,可得节点1与节点5需支付一定成本,节点2、节点3、节点4可免费获得碳配额。

2)计算各企业的修正减排努力值,并与修正前的减排努力值进行对比分析,表2中分别用“ $\uparrow$ ”与“ $\downarrow$ ”表示企业的减排奖励与惩罚。

表2 第 $k$ 个周期节点企业减排努力值  
Table 2 Emission reduction effort values of node enterprises in the  $k$ th cycle

企业	减排努力值	修正努力值
1	19	20 $\uparrow$
2	20	22 $\uparrow$
3	22	14 $\downarrow$
4	25	22 $\downarrow$
5	14	14

3)企业在履约期结束可进行碳交易。想要参与碳交易的企业将交易需求与要求发布到区块链上,由系统内置碳交易匹配模型进行交易匹配,提高交易效率。

假设节点企业碳交易仅考虑减排努力值与价格2个参数,交易双方针对2个参数的权重均为0.6和0.4。交易节点本身的实际参数值和对交易方的参数要求见附录B表B1和表B2。

利用式(10)、式(11)和式(12),计算交易双方

的满意度。然后,根据式(13)和式(14),得出碳交易匹配模型。具体计算过程见附录C。

运用匈牙利算法求解得出,企业1与企业4进行交易匹配,企业2与企业3进行交易匹配,企业5未交易匹配成功。

### 2.3 仿真设计

为进一步阐述所建碳交易体系的有效性,本文给出具体仿真设计,并对其主要环节说明如下。

1)仿真平台的选取。首先,Hyperledger Fabric具有权限管理功能,这能较好地满足电力企业加入碳交易体系前的官方授权认证。初始碳配额数据信息有官方确权的需求。其次,在每一减排周期,碳配额总量数据以及企业碳配额数据均会发生变动,而Hyperledger Fabric支持动态管理,可对碳配额数据进行动态更新。最后,Hyperledger Fabric采用了逻辑上多通道方式,可实现数据分区,能够解决碳交易体系中企业对某些数据进行隐私保护的诉求,即只有那些需要了解数据的人员,才能看到事务数和数据本身。比如,若企业的利润、每单位营业收入碳排放量等数据不需要参与碳交易的企业知悉时,则可利用多通道方式,实现数据分区。基于上述Hyperledger Fabric与本文所建体系的契合性分析,本文选择Hyperledger Fabric作为仿真平台。

2)仿真数据结构选取。为保证数据的防篡改性,本文的区块链数据结构采用类似于比特币系统的以区块为单元的链式结构,即区块由区块头和区块体组成,并由哈希值链接成链。

3)仿真实实现的主要步骤:①环境准备。结合所建立的电力行业碳交易体系中各主体功能作用,用搭建的Hyperledger Fabric网络的客户端模拟用户节点,用于发起碳交易请求;Fabric网络中的共识网络模拟协调节点。当用户节点发生碳交易时,执行挖矿操作并将碳交易信息打包成区块,维护碳交易体系中区块有序生成区块链。②生成公私钥和证书。Fabric网络中的证书服务模拟证书发放权威机构。企业想要加入碳交易体系,必须到证书发放权威机构进行注册且得到签名和公私钥。③生成创世区块。每个节点都把创世区块作为区块链的首区块,即把创世区块设置为merkle树的根节点,进行数据存储,从而保证碳交易相关数据的安全、可信。④安装和运行智能合约。所需智能合约主要包括碳配额成本决策智能合约、减排奖惩智能合约、碳交易匹配智能合约等。

4)仿真运作的主要过程:①在进行碳配额分配时,触发碳配额成本决策智能合约,根据系统设定的成本支付准则,计算出每个用户节点需支付的成本,并自动执行。成本支付完成之后,企业才能获得碳

配额。相比于政府组织碳交易体系,企业全部采用付费或免费形式获得碳配额的情况,可实现依据企业减排情况决定碳配额成本支付与否以及支付金额大小的目的,有效激励企业减排;②在减排履约周期结束时,触发减排奖惩智能合约,并自动执行奖惩。避免了在政府组织碳交易体系中,减排奖惩不及时落实、企业逃避减排监管等问题,可充分发挥减排奖惩的激励作用。③企业进入碳交易阶段时,触发交易匹配智能合约,自动进行交易匹配、交易结算操作。相比于政府组织碳交易体系,不再需要碳交易相关部门的人工审核与匹配,可提高碳交易效率,节约碳交易成本。④上述各流程执行完成的信息分散存储在众多记账节点中,且各个节点存储的碳交易数据相同,并可追溯。这可以避免作恶节点篡改账本数据,即账本记录的交易数据具有公开可信性。同时,与传统中心化的碳交易体系需要独立安全的设备保存数据的情况相比,减少了数据存储的开销,且数据可追溯,当出现交易纠纷时,超级节点可根据区块链存储的记录解决纷争。

### 3 结语

针对现行碳交易体系运行存在的一系列问题,本文基于区块链技术的去中心化、智能合约、共识机制、协同自治等特性,构建了碳配额、减排奖惩和碳交易匹配3个系统模块,以优化整个电力行业的碳交易体系,实现自动执行碳配额成本决策、智能奖惩和自动交易匹配并记录。通过分析,有下面3点发现:①在碳配额分配系统中,借助区块链的信息实时更新特性和智能合约的自动执行功能,引入企业减排努力值指标,并采用熵值法和变权理论,对企业减排努力值进行动态评估。实时更新企业减排指标和减排努力值,将其作为下一周期碳配额分配依据,实现了碳配额的自动化、智能化、透明化;②在减排奖惩系统中,将修正减排努力值作为奖惩线,借助区块链智能合约进行奖惩执行,实现了减排奖惩的动态管理和及时落实;③在碳交易匹配系统中,考虑交易双方满意度,建立碳交易匹配模型,运用匈牙利算法进行求解,并将其编译到区块链中,提高了碳交易效率与市场活跃度。

本文基于区块链技术构建了电力行业碳交易体系,并结合计算模型,分析其运作流程。但其中各主体间的利益协调、碳配额指标选取、减排奖惩基准设定等还需进一步细化、深入研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

### 参考文献

- [1] 戴攀,邹家勇,田杰,等.中国电力行业碳减排综合优化[J].电力系统自动化,2013,37(14):1-6.  
DAI Pan, ZOU Jiayong, TIAN Jie, et al. Integrated optimization of CO<sub>2</sub> emission mitigation in China power sector [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 1-6.
- [2] 黄杰,薛禹胜,蒋超,等.碳市场风险的分析与控制:(一)框架设计[J].电力系统自动化,2018,42(12):11-18.  
HUANG Jie, XUE Yusheng, JIANG Chao, et al. Carbon market risk analysis and control: Part I framework design [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 11-18.
- [3] 梅天华,边巧燕,谢俊,等.考虑碳排放权的低碳电力调度及收益分摊[J].电力系统自动化,2016,40(22):49-55.  
MEI Tianhua, BIAN Qiaoyan, XIE Jun, et al. Low-carbon power dispatching and benefit allocation considering carbon emission allowance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 49-55.
- [4] 梅天华,汤优敏,甘德强.考虑历史排放赤字的电力初始碳排放权公理化公平分配方法[J].电力系统自动化,2016,40(3):52-58.  
MEI Tianhua, TANG Youmin, GAN Deqiang. Axiomatic equity allocation method of initial emission allowances in power systems considering historical emission deficits [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 52-58.
- [5] WANG Tan, WANG Xu, GONG Yu, et al. Initial allocation of carbon emission permits in power systems [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(2): 239-247.
- [6] 蒋超,薛禹胜,黄杰,等.碳市场风险的分析与控制:(二)沙盘推演[J].电力系统自动化,2018,42(14):1-7.  
JIANG Chao, XUE Yusheng, HUANG Jie, et al. Carbon market risk analysis and control: Part II sand-table simulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 1-7.
- [7] 徐意婷,艾芊.考虑碳税策略的微网与常规机组协同运行[J].电力系统自动化,2016,40(14):25-32.  
XU Yiting, AI Qian. Coordinated operation of microgrid and conventional generators considering carbon tax strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 25-32.
- [8] 袁勇,王飞跃.区块链技术发展现状与展望[J].自动化学报,2016,42(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.
- [9] 王明生,曹鹤阳,李佩瑶.基于区块链的去中心化信贷系统及应用[J].通信学报,2019,40(8):169-177.  
WANG Mingsheng, CAO Heyang, LI Peiyao. Decentralized credit system based on blockchain and its application [J]. Journal on Communications, 2019, 40(8): 169-177.
- [10] 张鹏,罗新星.一种基于区块链数字代币的有限溯源方法[J].系统工程理论与实践,2019,39(6):1469-1478.  
ZHANG Peng, LUO Xinxing. A limited traceability method based on blockchain digital tokens [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2019, 39(6): 1469-1478.
- [11] 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.  
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.
- [12] 王蓓蓓,李雅超,赵盛楠,等.基于区块链的分布式能源交易关键技术[J].电力系统自动化,2019,43(14):53-64.  
WANG Beibei, LI Yachao, ZHAO Chengnan, et al. Key technologies on blockchain based distributed energy transaction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 53-64.
- [13] 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.  
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.
- [14] 王德文,王莉鑫.基于实用拜占庭容错算法的多能源交互主体共识机制[J].电力系统自动化,2019,43(9):41-49.  
WANG Dewen, WANG Lixin. Consensus mechanism of multi-energy interactive subject based on practical Byzantine fault tolerance algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 41-49.
- [15] 张超,李强,陈子豪,等. Medical Chain: 联盟式医疗区块链系统[J]. 自动化学报, 2019, 45(8): 1495-1510.  
ZHANG Chao, LI Qiang, CHEN Zihao, et al. Medical Chain: alliance medical blockchain system [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(8): 1495-1510.
- [16] FU Bailu, ZHAN Shu, LIU Xiaogang. Blockchain enhanced emission trading framework in fashion apparel manufacturing industry [J]. Sustainability, 2018, 10(4): 1105.
- [17] 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.
- [18] KAWASMI E A, ARNAUTOVIC E, SVETINOVIC D. Bitcoin-based decentralized carbon emissions trading infrastructure model [J]. Systems Engineering, 2015, 18(2): 115-130.
- [19] KHAQQI K N, SIKORSKI J J, HADINOTO K A. Incorporating seller/buyer reputation-based system in blockchain-enabled emission trading application [J]. Applied Energy, 2018, 209: 8-19.
- [20] HARTMANN S, THOMAS S. Applying blockchain to the Australian carbon market [J]. Economic Papers, 2020, 39(2): 133-151.
- [21] 许小虎,邹毅.碳交易机制对电力行业影响分析[J].生态经济, 2016, 32(3): 92-96.  
XU Xiaohu, ZOU Yi. Analysis of impact of Carbon trading on power industry [J]. Ecological Economy, 2016, 32(3): 92-96.

杜晓丽(1990—),女,博士研究生,主要研究方向:管理决策与能源经济。E-mail: sjzduxiao@sina.com

梁开荣(1990—),女,博士研究生,主要研究方向:管理决策与能源经济、供应链管理。E-mail: liangkr2017@163.com

李登峰(1965—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:经济管理决策与对策。E-mail: lidengfeng@uestc.edu.cn

(编辑 蔡静雯)

## Reward and Penalty Model of Carbon Emission Reduction and Carbon Trading Matching Model for Power Industry Based on Blockchain Technology

DU Xiaoli<sup>1</sup>, LIANG Kairong<sup>1</sup>, LI Dengfeng<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** As the priority industry embedded in the carbon trading system in China, the power industry has become an important subject to achieve carbon emission reduction. As a new distributed ledger technology, the blockchain technology can effectively solve the problems of data security and operation efficiency in the carbon trading system. Based on the blockchain technology, this paper builds the whole framework of the carbon trading system in the power industry. Based on the framework, this paper builds the carbon quota cost decision-making model, reward and penalty model of carbon emission reduction and carbon trading matching model, to realize safe and efficient carbon trading. And the emission reduction effort index is introduced as the process promoter and the link bridge of the above three models. Finally, the effectiveness of the carbon trading system is verified by an example. The simulation design is also given, which shows that the carbon trading system based on blockchain can reduce costs, improve efficiency, and increase benefits.

This work is supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 71231003) and General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 71572040).

**Key words:** blockchain technology; power industry; carbon quota; reward and penalty mechanism; carbon trading matching



## 附录 A

表 A1 节点企业的原始数据  
Table A1 Raw data of the node enterprise

企业	第 $k-1$ 个周期			第 $k$ 个周期		
	指标 $Y_1$	指标 $Y_2$	指标 $Y_3$	指标 $Y_1$	指标 $Y_2$	指标 $Y_3$
1	11.39	183	2.88	10.38	175.0	2.75
2	12.05	192	3.22	11.12	186.0	3.12
3	9.27	147	2.39	13.17	155.1	2.53
4	16.91	60	8.59	16.48	61.4	8.72
5	19.53	70	8.97	17.46	65.7	8.40

## 附录 B

表 B1 出售节点交易参数值及对购买节点交易参数要求  
Table B1 Transaction parameter values of sale nodes and its transaction parameter requirements for the purchase nodes

出售节点企业	自身减排努力值	交易中对购买节点减排努力值要求	发布的交易价格	交易中对购买节点交易价格要求
1	19	25~17	1.39	1.42~1.36
2	20	30~18	1.37	1.43~1.37
5	14	27~15	1.41	1.45~1.39

注：“25~17”表示减排努力值的期望值为 25,最低要求为 17;“1.42~1.36”表示交易价格期望值为 1.42,能接受最低交易价格为 1.36,其他数据含义以此类推。

表 B2 购买节点交易参数值及对出售节点交易参数要求  
Table B2 Transaction parameter values of purchase nodes and its transaction parameter requirements for the sale nodes

购买节点企业	自身减排努力值	交易中对出售节点减排努力值要求	发布的交易价格	交易中对出售节点减排努力值要求
3	22	25~15	1.38	1.36~1.40
4	25	25~18	1.34	1.34~1.42

注:表中“25~15”表示减排努力值期望值为 25,最低要求为 15;“1.36~1.40”表示交易价格期望值为 1.36,能接受最高交易价格为 1.40,其他数据含义以此类推。

## 附录 C

利用式(10)、式(11)和式(12),计算购买节点 3 对出售节点 1 的满意度。出售节点的减排努力值对购买节点而言为效益型参数,出售价格对购买节点而言为成本型参数,计算过程如下:

$$e_{31} = \frac{19 - 15}{25 - 15} \times 0.6 + \frac{1.40 - 1.39}{1.40 - 1.36} \times 0.4 = 0.34$$

同理,可得购买节点的满意度矩阵为:

$$E = \begin{bmatrix} 0.34 & 0.236 \\ 0.6 & 0.421 \end{bmatrix}$$

由于购买节点对企业 5 的满意度均为负值,即完全不符合购买节点对交易方的参数要求,故将其剔除。

利用式(10)、式(11)和式(12),计算出出售节点 1 对购买节点 3 的满意度。购买节点的减排努力值和购买价格对出售节点而言均为效益型参数,计算过程如下:

$$d_{13} = \frac{22 - 17}{25 - 17} \times 0.6 + \frac{1.38 - 1.36}{1.42 - 1.36} \times 0.4 = 0.508$$



同理,可得出售节点的满意度矩阵为:

$$D = \begin{bmatrix} 0.508 & 0.467 \\ 0.267 & 0.15 \end{bmatrix}$$

以双方满意度最大化为目标,根据式(13),(14),可得碳交易匹配模型如下:

$$\begin{aligned} & \max \{ f_{13}(0.508 + 0.34) + f_{14}(0.467 + 0.236) + f_{23}(0.267 + 0.6) + f_{24}(0.15 + 0.421) \} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i'=1}^{n_1} f_{i'j'} \leq 1 & i' = 1, 2 \\ \sum_{j'=1}^{n_2} f_{ij'} \leq 1 & j' = 1, 2 \\ f_{ij'} = 0, 1 & i' = 1, 2; j' = 1, 2 \end{cases} \end{aligned}$$

运用匈牙利算法求解得,  $f_{14} = f_{23} = 1, f_{13} = f_{24} = 0$ , 即企业1与企业4进行交易匹配, 企业2与企业3进行交易匹配, 企业5未交易匹配成功。