

# 基于区块链技术的电力碳排放权分配模型

宋杰<sup>1,2</sup>, 甘海庆<sup>3</sup>, 徐晨波<sup>1,2</sup>, 任禹丞<sup>3</sup>, 杨楠<sup>4</sup>

(1. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 211106;  
3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000; 4. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 电力生产过程中产生的二氧化碳加剧了温室效应, 为实现减排, 对电力碳排放量设置了限制。为解决此背景下对于电力碳排放权分配公平度不足的问题, 构建基于区块链技术的电力碳排放权分配模型。首先将电力公司各碳排放单位划分成一个个区块, 组成区块链, 每个区块中包含排放单位的 11 个指标信息。计算 11 个指标的权重, 并结合碳排放权总量, 得到区块分权初始合约方案, 明确每一个区块能够分到的碳排放权。最后, 从公平度角度设置区块链智能合约优化目标函数, 利用区块链中的智能合约寻优算法求得目标函数最优解, 得到最优电力碳排放权分配方案。测试结果表明: 应用所研究模型得到的分配方案公平度更高, 对于电力碳排放权的分配更为合理, 证明了该模型的有效性。

**关键词:** 区块链技术; 电力碳排放权; 指标权重; 公平度; 分配模型

中图分类号: TP183

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)10-0134-04

## Carbon emission rights allocation model for electric power based on blockchain technology

SONG Jie<sup>1,2</sup>, GAN Haiqing<sup>3</sup>, XU Chenbo<sup>1,2</sup>, REN Yucheng<sup>3</sup>, YANG Nan<sup>4</sup>

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China; 2. NARI Nanjing Control System Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing Power Supply Branch, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** The carbon dioxide generated during the power production process exacerbates the greenhouse effect, and in order to achieve emission reduction, limits are set on the carbon emissions of electricity. In order to solve the problem of insufficient fairness in the allocation of power carbon emission rights in this context, a power carbon emission rights allocation model based on blockchain technology is constructed. In this study, firstly, the carbon emission units of the power company are divided into blocks to form a blockchain, with each block containing 11 indicator information of the emission units. It calculates the weights of 11 indicators and combine them with the total amount of carbon emission rights to obtain the initial contract plan for block decentralization, specifying the carbon emission rights that each block can receive. Finally, it sets the optimization objective function of blockchain smart contracts from the perspective of fairness, uses the smart contract optimization algorithm in blockchain to obtain the optimal solution of the objective function, and obtains the optimal allocation plan for electricity carbon emissions rights. The test results show that the allocation scheme obtained by the proposed model has higher fairness and is more reasonable for the allocation of power carbon emission rights, which proves the effectiveness of the proposed model.

**Keywords:** blockchain technology; electricity carbon emission rights; indicator weight; fair degree; allocation model

## 0 引言

目前的电力生产仍以火电为主,即以煤炭等可燃物作为燃料来产生电能<sup>[1]</sup>。这种生产方式的优势在于生产量大且效率高,但是与此同时,也产生了大量的二氧化碳等气体,给环境带来了较大的污染,并加剧了温室效应。面对这种情况,在节能减排的趋势下,对电力行业的碳排放提出了更高的要求,其中碳排放权的分配便是关键问题之一<sup>[2]</sup>。碳排放权,顾名思义,就是指在法律规定下向环境中排放二氧化碳多少的权利。碳排放权分配则是指将二氧化碳排放

权利分配给电力生产中各排放单位的过程。碳排放权的合理分配无论是对内还是对外都有着巨大的积极作用,对内能够实现发电公司收益的最大化、降低碳排放成本,对外能有效降低碳排放量、减少对环境的污染<sup>[3]</sup>。

目前,关于碳排放权的分配研究有很多,很多专家和学者都将其作为研究的重点课题。例如黄壁荣等针对这一问题展开研究,在前一阶段利用 CRITIC-TOPSIS 法确定了碳排放权的初始分配方案,在下一阶段将前一部分确定的初始分配方案作为初始解,将碳排放效率最大化设置为目标函数,利用数据包络分析模型对初始分配方案进行优化,得到优化后的电力分配方案<sup>[4]</sup>。刘海英等在其研究中介绍了两种碳排放权的分配方法(历史法和零和 DEA 方法)的实施原理和过程,然后从公平与效率两个角度对

\* 基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(5100-202118566A-0-5-SF)

收稿日期:2023-12-11

比这两种方法的分配特点和效果,为这两种方法的应用提供了重要参考<sup>[5]</sup>。

本文结合前人研究经验,提出一种基于区块链技术的电力碳排放权分配模型。期待通过本次研究,为碳排放权的自主分配和管理方面的研究提供一定的助力,进而实现在实际应用中碳排放权分配效果的提升。

## 1 电力碳排放权分配模型设计

碳排放权分配是指将二氧化碳排放权利分配给电力生产中各排放单位的过程<sup>[6]</sup>。本文在设计电力碳排放权分配模型时,引入区块链技术。区块链技术是一种新的分布式基础架构与计算范式,在电力交易中发挥了重要作用<sup>[7]</sup>。在本研究中,将电力公司各碳排放单位分别视为一个区块,每个区块中都包含了各个排放单位的基础信息。再利用区块链技术中的智能合约机制,根据各碳排放单位描述信息,自动生成预设数据资源和事件,由此得到预设分配方案。最后,通过 P2P 网络将分配方案传播给参与合同的各个区块,并自动运行区块链智能合约,实现电力碳排放权的分配。本文所设计的分配模型的具体框架结构如图 1 所示。由图 1 可知,基于区块链技术的分配模型可以划分为三部分,即各排放单位区块构建、区块分权初始合约方案、区块分权优化,下面将针对这三个方面进行具体论述。

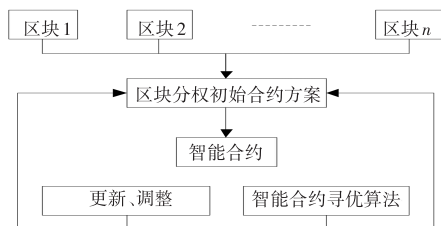


图1 区块链技术的碳排放权分配模型框架结构

### 1.1 基于碳排放信息描述的单位区块构建

碳排放权的合理分配需要依据各个排放单位的基本情况来实现<sup>[8]</sup>,从这一角度考虑,在进行碳排放权分配前,首先应获取碳排放中各单位的基本情况信息<sup>[9]</sup>。在本次研究中,得到的碳排放单位基本信息具体见表 1。

表 1 碳排放单位的基本信息表

指标	指标属性
历史累计发电碳排放量	正向指标
GDP 值	正向指标
人口数量	正向指标
工业总产值	正向指标
煤炭消耗占比	正向指标
单位 GDP 能源消耗量	正向指标
全要素碳排放效率	负向指标
能源结构	负向指标
碳排放强度	正向指标
政策倾斜度	负向指标
低碳技术水平	负向指标

采集表 1 中各指标对应的数据并按照区块组成结构

将表 1 中各个碳排放单位的基本信息封装到各个区块当中,由此串联成一串区块链,如图 2 所示。在图 2 中,每一个区块都代表一个碳排放单位,在后期碳排放权分配时,就以区块来表示。

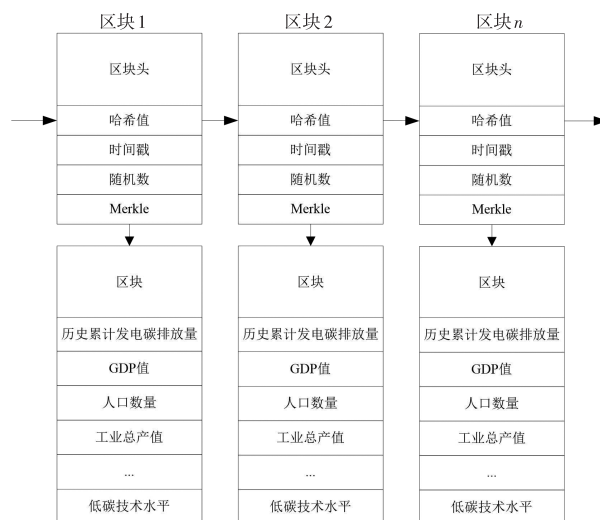


图2 区块链结构示意图

### 1.2 区块分权初始合约方案

由于允许排放的二氧化碳数量是固定的,因此碳排放权是有范围限制的<sup>[10]</sup>。基于前述得到的各个区块的碳排放信息,评价各区块实力,设计初始分权合约方案。具体过程如下:

**步骤 1** 假设在区块链智能合约中共有  $n$  个区块参与碳排放权的分配,每个区块由表 1 中 11 个指标描述,记为  $A^i = \{a_1^i, a_2^i, \dots, a_{12}^i\}, i = 1, 2, \dots, n$ 。

**步骤 2** 构建指标矩阵  $A = (a_j^i)_{n \times 12}$ , 即

$$A = (a_j^i)_{n \times 12} = \begin{pmatrix} a_1^1 & \dots & a_{12}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1^n & \dots & a_{12}^n \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中,  $a_j^i$  代表第  $i$  个区块第  $j$  个指标数值。

**步骤 3** 对  $A$  中的  $a_j^i$  进行无量纲化处理。

正向指标计算公式为

$$b_j^i = \frac{a_j^i - \min a_j}{\max a_j - \min a_j} \quad (2)$$

负向指标计算公式为

$$b_j^i = \frac{\max a_j - a_j^i}{\max a_j - \min a_j} \quad (3)$$

式中,  $b_j^i$  代表第  $i$  个区块第  $j$  个无量纲化指标数据;  $\max a_j$ 、 $\min a_j$  分别代表第  $j$  个指标数据最大值、最小值<sup>[11]</sup>。

**步骤 4** 计算指标间的变异程度。

$$c_j^i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_j^i - \bar{b}_j)^2}{n - 1}} \quad (4)$$

其中,

$$\bar{b}_j = \frac{\sum_{i=1}^n b_j^i}{n} \quad (5)$$

式中,  $c_j^i$  代表第  $i$  个区块第  $j$  个指标的变异程度;  $\bar{b}_j$  代表第  $j$  个指标的平均值。

**步骤 5** 计算指标之间的相关系数,即

$$d_{jk}^i = \frac{\sum_{k=1}^n (b_j^i - \bar{b}_j)(b_k^i - \bar{b}_k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (b_j^i - \bar{b}_j)^2 (b_k^i - \bar{b}_k)^2}} \quad (6)$$

式中,  $d_{jk}^i$  代表第  $i$  个区块第  $j$  个指标与第  $k$  个指标之间的相关系数;  $b_k^i$  代表第  $i$  个区块第  $k$  个指标的无量纲化数值;  $\bar{b}_k$  代表第  $k$  个指标的平均值<sup>[12]</sup>。

**步骤 6** 计算指标冲突性,即

$$B_j^i = \sum_{k=1}^{11} (1 - d_{jk}^i) \quad (7)$$

式中,  $B_j^i$  代表第  $i$  个区块第  $j$  个指标的冲突性。

**步骤 7** 计算第  $i$  个区块第  $j$  个指标包含的信息量  $D_j^i$ 。

$$D_j^i = c_j^i B_j^i \quad (8)$$

**步骤 8** 计算第  $i$  个区块第  $j$  个指标的权重  $w_j^i$ 。即

$$w_j^i = \frac{D_j^i}{\sum_{j=1}^{11} D_j^i} \quad (9)$$

**步骤 9** 计算每个区块能够分到的初始碳排放权。即

$$q^i = Q \sum_{j=1}^{11} w_j^i \quad (10)$$

式中,  $Q$  代表碳排放权总量;  $q^i$  代表第  $i$  个区块能够分到的碳排放权<sup>[13]</sup>。

### 1.3 区块分权优化研究

在完成各个区块的初始分权后,还需要根据所要达到的目标,进行碳排放权分配优化<sup>[14-15]</sup>。本研究中所要达到的目标为公平程度。由此建立区块链智能合约优化目标函数,即

$$\min G = \sum_{j=1}^{11} [1 - \sum_{i=1}^n a_j^i (q^i - \hat{q}^i)] \quad (11)$$

式中,  $G$  代表各区块实际排放能力与所分配到的碳排放权大小的差值;  $n$  代表区块链智能合约中包含的区块数量;  $\hat{q}^i$  代表重新分配后第  $i$  个区块能够分到的碳排放权。此处将  $G$  取最小值,该值越小,则说明电力碳排放权分配方案的公平程度越高<sup>[16]</sup>。

针对目标函数设置如下所示的约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n q^i = Q \\ \sum_{i=1}^n \hat{q}^i = Q \\ a_j^i > 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$a_j^i > 0 \quad (13)$$

根据设置的约束条件来优化目标函数,利用区块链中的智

能合约寻优算法求取最优解。求取过程如下:

- 1) 设置智能合约寻优算法的初始参数;
- 2) 将区块分到的初始碳排放权作为初始解,构建初始种群,记为  $q = \{q^1, q^2, \dots, q^n\}$ ;
- 3) 对种群中每一个  $q^1, q^2, \dots, q^n$  进行二进制编码;
- 4) 利用公式(11)计算每个解的目标函数值,记为  $G = \{G^1, G^2, \dots, G^n\}$ ;
- 5) 找出  $G = \{G^1, G^2, \dots, G^n\}$  中最小的目标函数值  $G^{\min}$ ;
- 6) 将  $G^{\min}$  与设置的局部最优解  $G^{\text{pest}}$  和全局最优解  $G^{\text{best}}$  进行对比。当  $G^{\max}$  更大时,利用  $G^{\min}$  取代  $G^{\text{pest}}$  和  $G^{\text{best}}$ ; 否则,保持不变;
- 7) 对可行解进行更新;
- 8) 是否满足结束条件? 若满足,输出目标函数最小值对应的解,得到区块分权优化方案;否则回到步骤(4)。

经过研究,从公平性角度完成了对初始碳排放权分配结果优化。

## 2 分配模型应用测试

### 2.1 研究区概况

以某区域作为研究区,该研究区内共有 4 个碳排放单位,因此将其划分为 4 个区块,每个区块的位置及其范围如图 3 所示。

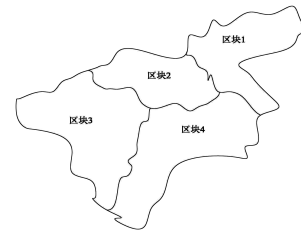


图 3 研究区区块示意图

### 2.2 区块指标权重

根据前述 1.2 章节的研究内容,计算每个区块中各描述指标的权重,得到的计算结果见表 2。

表 2 区块指标权重表

指标	区块 1	区块 2	区块 3	区块 4
历史累计发电碳排放量	0.654 2	0.534 5	1.248 2	0.547 8
GDP 值	0.234 8	0.215 6	0.286 5	2.248 5
人口数量	4.876 4	0.784 2	0.589 4	0.485 6
工业总产值	0.215 2	0.226 2	0.018 6	3.042 8
煤炭消耗占比	1.486 3	3.708 4	0.014 8	2.845 5
单位 GDP 能源消耗量	0.378 5	2.784 8	0.634 7	4.498 2
全要素碳排放效率	2.485 4	2.848 5	2.445 2	2.041 8
能源结构	2.785 1	4.485 2	0.227 5	0.296 3
碳排放强度	0.864 5	2.785 2	4.324 4	3.024 8
政策倾斜度	0.315 4	3.024 9	2.248 5	2.845 2
低碳技术水平	0.486 6	0.247 8	0.878 5	0.484 5

### 2.3 碳排放权初始分配方案

假设碳排放权总量为 10 000 t,利用前述式(10)计算

每个区块能够分到的碳排放权,结果如图4所示。

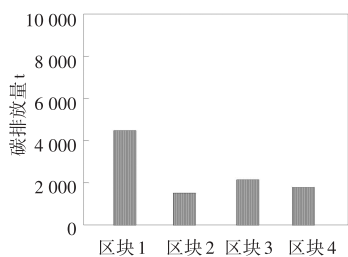


图4 碳排放权初始分配方案

## 2.4 最终碳排放权分配方案

根据1.3章节的研究内容,针对公平度这一目标函数,利用区块链中的智能合约寻优算法求取最优解,得到最终的碳排放权分配方案。与此同时,为实现对比,利用数据包络分析模型、历史法、零和DEA方法再次对同一个研究区内区块进行碳排放权分配,将由此得到的方案结果作为对比分配方案,以便后续对本文所研究模型提出的方案进行分析。结果见表3。

表3 最终碳排放权分配方案

分配方法	区块1/t	区块2/t	区块3/t	区块4/t
本文方法	2 415.62	3 121.58	2 825.23	1 637.57
数据包络分析模型	2 225.66	1 807.25	3 632.48	2 334.61
历史法	3 502.12	2 478.55	2 365.98	1 653.35
零和DEA方法	1 472.74	1 587.58	5 248.63	1 691.05

## 2.5 分配效果对比

基于上述表3得到的碳排放权分配方案,计算各模型应用下的分配公平度,并将结果进行对比分析,结果如图5所示。从图5中可以看出,与数据包络分析模型、历史法、零和DEA方法应用下得到的分配方案相比,所研究方法得到的分配方案公平度更高,由此说明基于区块链技术的方法分配更为合理,证明了本文方法的有效性。

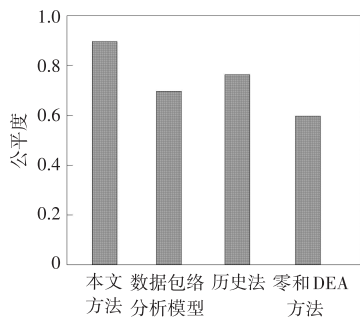


图5 分配公平度对比图

## 3 结束语

电力能源的需求量一直是排在前列的,大部分的生产、生活活动都需要依靠电力来实现。为此,电力公司一直在加大电力生产。然而,随着电力生产的加大,产生的碳排放量也越来越大,对环境造成污染和影响也越来越大。面对这种情况,为实现节能减排,合理分配电力碳排

放权是十分必要的。为此,研究一种基于区块链技术的电力碳排放权分配模型。该模型先求出了初始分配方案,然后利用区块链中的智能合约寻优算法对初始解进行优化。最后对所研究方法进行了应用测试并与数据包络分析模型、历史法、零和DEA方法的分配结果进行应用对比,通过分配方案公平度的分析,得出所研究模型的分配效果要更好,证明了模型的有效性。然而,本研究仍有一些方面不够完善,例如本研究在设置优化目标函数时只考虑了一个优化角度,存在一定的局限性,未来还需要针对这一问题展开进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 王泽楠,滕云,闫佳佳,等. 考虑供能成本与碳排放权收益协同的新型乡村能源系统规划[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7074-7088.
- [2] 冯昌森,谢方锐,文福拴,等. 基于智能合约的绿证和碳联合交易市场的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 1-11.
- [3] 胡伟,夏雪. 计及能源区块链电力碳排放权的跨链交易模型[J]. 系统管理学报, 2023, 32(1): 64-72.
- [4] 黄壁荣,王子龙,严俊,等. “双碳”目标下省级电力部门碳排放权两阶段分配模型[J]. 统计与决策, 2023, 39(7): 168-173.
- [5] 刘海英,王钰. 基于历史法和零和DEA方法的用能权与碳排放权初始分配研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(9): 209-220.
- [6] 张冶,陈洪禹,关艳,等. 区块链技术下考虑碳排放权的电力现货交易模型[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 114-121.
- [7] 吉斌,昌力,陈振寰,等. 基于区块链技术的电力碳排放权交易市场机制设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 1-10.
- [8] 郑荣,高志豪,魏明珠,等. 基于联盟区块链的政府数据协同治理平台框架研究——以全国碳排放权交易市场为例[J]. 情报学报, 2022, 41(10): 1071-1084.
- [9] 程明曦,王冰,王敏,等. 基于区块链技术的可控负荷入网优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 109-115, 132.
- [10] 陈涛,刘洋,李文峰,等. 基于区块链技术的微网自适应定价策略及经济调度方法[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 17-28.
- [11] 王劲松,杨唯正,赵泽宁,等. 基于有向无环图的区块链技术综述[J]. 计算机工程, 2022, 48(6): 11-23.
- [12] 唐学用,姚俊荣,刘文霞,等. 基于区块链技术的电动汽车和分布式能源并网协调策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(11): 46-54.
- [13] 付晓琳,王鸿,王致杰. 基于区块链的微电网智能交易与协同调度策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9): 100-110.
- [14] 杨喆,王涛. 区块链信息化建模的浅入分析[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(11): 184-186.
- [15] 孟明,商聪,马思源,等. 基于区块链的综合能源系统低碳优化调度研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 67-80.
- [16] 邸剑,臧齐齐,王桂兰,等. 基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 99-107.

作者简介:宋杰(1981—),男,硕士,高级工程师,研究方向:电力系统自动化、需求响应、负荷管理、综合能源服务。