

# 碳中和背景下碳-电市场联合仿真建模分析

王荣根<sup>1</sup>, 赵萍<sup>1</sup>, 谢天佑<sup>1</sup>, 吴伟玲<sup>2</sup>, 孙歆<sup>3</sup>, 柳文轩<sup>4,5</sup>, 何秉昊<sup>4,5</sup>, 费祥<sup>4,5</sup>, 赵俊华<sup>4,5</sup>

- (1. 国网浙江省电力有限公司丽水供电公司, 浙江省丽水市 323050;
2. 国网浙江省电力有限公司综合服务中心, 浙江省杭州市 310063;
3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江省杭州市 310014;
4. 深圳市人工智能与机器人研究院, 广东省深圳市 518129;
5. 香港中文大学(深圳), 广东省深圳市 518172)

**摘要:** 本文通过碳市场出清模型, 电力市场出清模型, 可计算一般均衡模型 (CGE 模型) 分别构建了碳市场仿真模块, 电力市场仿真模块以及实体经济系统仿真模块。并使用人机混合仿真的方法对碳-电市场进行了联合仿真建模分析, 解决了碳-电市场联合仿真中降低电价与考虑碳排放成本矛盾而产生的宏观基础性问题以及决策时间尺度不匹配的微观技术性问题。基于该仿真框架, 可以研究考虑碳市场耦合影响的电力市场预测分析技术。以广东电力市场改革为背景, 本文设计了一个 3 节点电力现货市场的仿真实验进行案例分析, 验证了本文方法在电力市场竞争行为建模应用中的适应性。并且还设计了基于 CGE 模型的实验, 结果发现引入碳市场可以减少八大行业的碳排放总量; 碳价可以影响各个行业的碳排放量, 但对于碳排放总量没有明显影响。

**关键词:** 碳-电市场, 实体经济系统, 人机混合仿真, 多市场联合仿真, 可计算一般均衡模型

## Simulation Modeling Analysis of Carbon-Electricity Market in the Context of Carbon Neutrality

WANG Ronggen<sup>1</sup>, ZHAO Ping<sup>1</sup>, XIE Tianyou<sup>1</sup>, WU Weiling<sup>2</sup>, SUN Xin<sup>3</sup>, LIU Wenxuan<sup>4,5</sup>, HE Binghao<sup>4,5</sup>,  
FEI Xiang<sup>4,5</sup>, ZHAO Junhua<sup>4,5</sup>

(1. Lishui Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Lishui City, Zhejiang Province 323050; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Comprehensive Service Center, Hangzhou 310063, Zhejiang Province; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, Zhejiang Province; 4. Shenzhen Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Shenzhen 518129, Guangdong Province; 5. The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen, Shenzhen 518172, Guangdong Province)

**Abstract:** This paper studied carbon market clearing, electricity market clearing, and computable general equilibrium (CGE) models to simulate carbon, electricity, and macro-economy systems. A hybrid experimental learning method is applied to simulate the carbon-electricity market, which solves the macro-scale problems from the conflict between electricity market price reduction and carbon emission cost, and the micro-scale problems from the different decision time scales. Based on the simulation framework, we can study the electricity market forecasting analysis techniques. Based on the Guangdong trial spot market, a case study on a 3-bus electricity market is launched to test the proposed method's adaption in the bidding behavior modeling of the electricity market. Moreover, a CGE experiment finds out that the carbon market can reduce the emission amount of the eight industries. And the carbon price can affect each industry's emission amount, however, it has little effect on the total amount.

This work is supported by The Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. "Research on Carbon Trading System Based on Blockchain Technology" (Grant NO.5211LS21N002).

**Key words:** Carbon-electricity market, economic system, hybrid experimental learning, multi-market co-simulation, computable general equilibrium model

## 0 引言

现代工业在推动全球经济快速发展的同时,也带来了大量温室气体排放,由此引发的全球变暖等环境气候问题受到了各国的重视。作为温室气体排放的主要国家,中国针对全球变暖现象采取坚定立场,积极推进全国范围内碳减排。2020年9月22日,习近平主席在第七十五届联合国大会上提出国家“30·60”双碳战略,为我国能源转型和产业发展方向指明了道路。2021年1月,生态环境部提出各地需谋划好“十四五”应对气候变化目标任务,抓紧制定2030年前二氧化碳排放达峰行动方案,加快推进全国碳排放权交易市场(以下简称全国碳市场)建设和运行。

电力行业作为典型的能源密集型行业和重要的温室气体排放源,是各国碳市场的重点管控对象。根据 Carbon Monitor 官网数据,2020年我国电力行业的二氧化碳总排放占比约为45%。因此,推动电力行业的转型是实现碳中和目标的重中之重。2015年3月15日,我国中共中央发布文件9号《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》,提出建立相对独立的电力交易机构,形成公平规范的市场交易平台,从而推行了全国性的电力市场改革。

我国电力市场改革的目的之一是降低工商业电价,但在碳中和背景下企业还需要考虑到排碳的成本,两者之间存在一定的矛盾,故如何设计一个科学的框架对这两个市场进行联合分析是一个基础性的宏观层面问题。另一方面,电力市场决策的时间尺度最小只能精确到“日”,而碳市场却可进行实时决策,故两个市场的决策协同存在时间尺度不匹配的问题,这是一个技术性的微观层面问题。

目前国外已有诸多文献对多市场联合模型进行研究,考虑不同的市场机制对联合市场的约束作用,构建联合市场的出清模型。按照研究对象,可以将现有研究划分为电-绿证市场联合[1][2]、电-能量-辅助服务市场联合[3][4]、综合能源市场联合[5]等,多市场间相互独立又互为约束,联合多市场往往能给市场主体带来更优的经济效益。按照

研究方法,又可以将现有研究分为基于宏观经济理论的建模方法[6][7][8]、基于机器学习的智能方法[9][10]和基于实验仿真的数学建模方法[11]。

国内研究方面,文献[12]基于安全约束机组组合和安全约束经济调度,搭建了电力现货市场仿真平台,可模拟电力市场的报价出清流程。文献[13]将碳交易与综合能源系统规划相结合,提出一种计及碳交易成本的多能源站综合能源系统规划方法。文献[14]基于系统动力学理论,考虑发电投资系统中的政策性因素,提出电力市场发电投资的系统动力学模型并进行了计算机仿真。文献[15]依据电力系统暂态过程数据的时序特性,建立了一种基于双向长短期记忆(Bi-LSTM)网络的暂态稳定评估模型。文献[16]基于动态随机一般均衡模型,构建了政府等部门的经济行为模型,研究了碳排放政策对各部门的动态影响。文献[17]对电力现货市场出清过程进行了模拟仿真,细化研究了可再生能源机组对各市场个体的影响。文献[18]提出了考虑碳排放权交易市场影响的日前电力市场出清模型,克服了现有出清模型无法平衡不同目标的冲突且控制碳排放效果不明显的缺点。

在碳市场数据方面,欧盟与中国碳市场数据都是完备的。中国碳市场运行时间较短,数据量较少,而欧盟碳市场作为全球最成熟的碳市场,已经运行了10多年,有着充足的数据。故在研究时可以基于欧盟碳市场数据进行分析。如文献[19]提出了一种混合分解和集成预测模型,使用欧盟碳配额(EUA)期货结算价格数据进行实证分析。文献[20]同样使用了欧盟碳市场价格数据,提出了一种整合经验模态分解、遗传算法和人工神经网络的多尺度集合预测模型来预测碳价格。

已有的碳-电市场相关研究仍然存在一定的缺陷。首先,许多文献集中于基于宏观经济理论的研究,但该方法中包含过多的假设与简化。另一方面,有些研究由于数据不充足而无法进行数据建模。再者,国内的研究多只考虑单一市场,尚未有对碳-电联合市场的建模仿真与分析,无法为政府企业提供有效的科学理论指导。因此,研究碳-电联合市场,对填补我国当前研究空白至关重

要。

本文主要有以下贡献：一、提出了一个碳-电联合仿真的建模方法，并用混合仿真的方法实现联合仿真分析；二、用 CGE 模型对外部经济条件进行了建模，并输出得到了碳-电市场运行对实体经济的影响。

## 1 碳-电市场仿真模型

### 1.1 总体框架描述

本文设计的模型框架主要包含三个模块：碳市场仿真模块、电力市场仿真模块、以及实体经济系统仿真模块。三个仿真模块彼此交互，模块间的端口变量如图 1 所示。

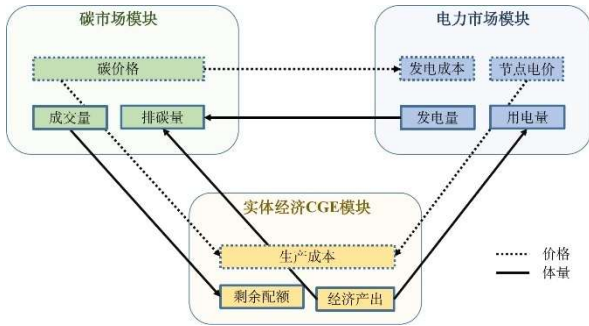


图 1 碳-电市场仿真模型框架

Fig.1 Carbon-Electricity Market Simulation Model Framework

基于该仿真框架，可以研究考虑碳市场耦合影响的电力市场预测分析技术。通过仿真模拟，可得包括出清价格、机组出力和碳排放情况的未来电力市场运行预测；通过设定不同的边界预测条件，反复仿真模拟，可得包括电价趋势、网络运行、减排情况的未来电力市场趋势预测。

### 1.2 碳市场出清模型

在碳市场中，系统需要满足供需平衡问题，其数学形式由如下等式描述

$$CA_{ERC} + CA_{CCER} = CA_{EEC} + CA_{FI} \quad (1)$$

其中，市场供给方主要由两个部分组成，分别为  $CA_{ERC}$  和  $CA_{CCER}$ 。  $CA_{ERC}$  为减排企业出售的多余配额；  $CA_{CCER}$  为核证自愿减排量，根据生态环境部于 2021 年最新起草的《碳排放权交易管理暂行条例（草案修改稿）》，重点排放单位可以购买由可再生能源、林业碳汇、甲烷利用等项目产生的经过核证并登记的温室气体削减排放量，用于抵销其一定比例的碳排放配额清缴。市场需求方

大体可以被归纳为超额排放企业购买的排放额度  $CA_{EEC}$ ，以及金融机构购买的排放额度  $CA_{FI}$ 。

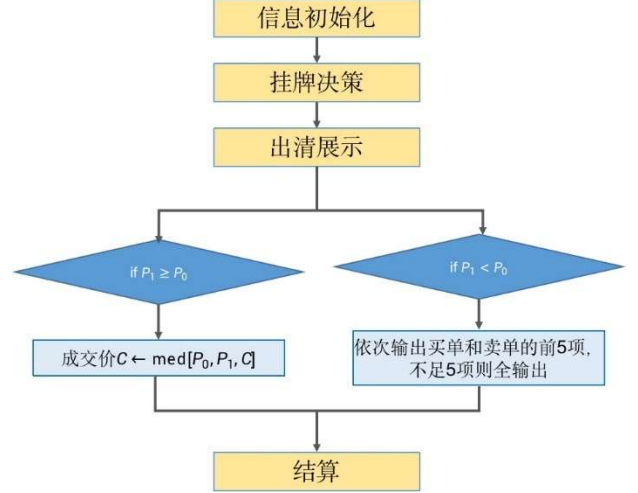


图 2 碳市场挂牌集中撮合出清模型流程图

Fig.2 Flow chart of carbon market listing centralized matching and clearing model

国内的碳市场目前采取挂牌交易与大宗交易。本文的仿真模型只考虑挂牌交易，并且简化为集中撮合交易。图 2 所示为碳市场挂牌集中撮合出清模型流程图。首先为信息初始化。假设有  $N$  个市场主体， $N$  的默认值为 2225，即电力行业控排主体数。考虑市场主体初始配额为

$$[CEA_1, CEA_2, \dots, CEA_N], CEA_i \in \mathbb{R}$$

市场主体账户资金为

$$[M_1, M_2, \dots, M_N], M_i \geq 0$$

开盘价  $S$  等于中长期预测碳价格，默认开盘价设为 48 元/吨。初始成交价  $C = S$ 。

接下来即为挂牌决策环节。市场主体  $i$  决定挂买单或卖单  $[p_i, q_i]$ ，  $p_i \in [0.9S, 1.1S]$  为单价，  $q_i \geq 0$  为买/卖的量，买/卖由哑变量  $d_i$  控制：买单需  $p_i q_i \leq M_i$ ，否则挂单无效；卖单需  $CEA_i > 0$  且  $q_i \leq CEA_i$ ，否则挂单无效。

之后即为出清/展示环节。记  $List_1$  和  $List_0$  榜首的  $p_i$  为  $P_1$  和  $P_0$ ，  $q_i$  为  $Q_1$  和  $Q_0$ 。若  $P_1 \geq P_0$ ，则比较  $Q_1$  和  $Q_0$ ：小值的挂单被删除，大值对应的  $Q$  值改为大值与小值的差值；若两个  $Q$  值相等，则两个挂单都被删除。成交价  $C \leftarrow \text{med}[P_0, P_1, C]$ ，  $\text{med}$  即取中位数。若  $P_1 < P_0$ ，则依次输出  $List_0$  和  $List_1$  的前 5 项，不足 5 项则全输出。最后即进行结算，输出市场出清价格、成交量及各主体的相关信息。

### 1.3 电力市场出清模型

电力市场出清的数学形式为求解目标为最小

化系统总成本，满足安全约束机组组合（SCUC）和安全约束经济调度（SCED）约束的最优潮流问题（OPF）。其市场出清价格为节点边际电价（LMP）。直流 OPF 的数学形式如下。

在一个包含  $M$  个机组、 $N$  个节点以及  $L$  条线路的系统中，OPF 的优化目标为最小化系统中机组的运行总成本  $F$ 。

$$\min_{P_g} F = \sum_{j=1}^M f_j(P_{gj}) \quad (2)$$

其中， $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gM})$  为机组的出力向量，是 OPF 的控制变量； $P_{gj}$  是第  $j$  个机组的出力； $f_j(P_{gj})$  是第  $j$  个机组以  $P_{gj}$  为出力时的成本。对于第  $j$  个机组， $P_{gj}$  需满足出力约束，即

$$P_{gj\min} \leq P_{gj} \leq P_{gj\max}, j = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

其中， $P_{gj\min}$  和  $P_{gj\max}$  分别代表第  $j$  个机组出力的下限和上限。记第  $j$  条线路上的输送功率为  $P_{lj}$ ，其中  $j = 1, 2, \dots, L$ 。 $P_{lj}$  需满足输电约束，即

$$P_{lj\min} \leq P_{lj} \leq P_{lj\max}, j = 1, 2, \dots, L \quad (4)$$

其中， $P_{lj\min}$  和  $P_{lj\max}$  分别代表第  $j$  条线路输电的下限和上限。记第  $j$  个节点上的电压为  $V_j$ ，其中  $j = 1, 2, \dots, N$ 。 $V_j$  需满足节点电压安全约束，即

$$V_{j\min} \leq V_j \leq V_{j\max}, j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中， $V_{j\min}$  和  $V_{j\max}$  分别代表第  $j$  个节点安全运行可承受电压的下限和上限。此外，系统安全运行时，在第  $j$  个节点上，还需要满足节点功率平衡和直流潮流约束

$$P_j^g - P_j^d - V_j \sum_{i=1}^N V_i B_{ij} (\theta_i - \theta_j) = 0, j = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

其中， $P_j^g$  和  $P_j^d$  为第  $j$  个节点上的出力和负荷功率， $\theta_j$  为第  $j$  个节点上的出力相角， $B_{ij}$  为由第  $i$  个节点向第  $j$  个节点输电线路的电纳近似值。LMP 为求解 OPF 后的影子价格（Shadow Price）。

#### 1.4 实体经济系统模型

根据图 3 所示的宏观经济模型框架，我们可以构建一个可计算一般均衡模型（CGE 模型）<sup>[21]</sup>。我们的模型由四个核心模块组成，分别为收支模块，投资模块，商品模块以及生产模块。

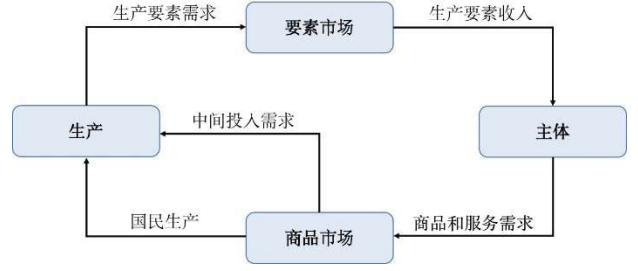


图 3 宏观经济模型框架

Fig.3 Macroeconomic Model Framework

对于收支模块，我们假设四个社会主体收支均衡，即居民收支平衡，企业收支平衡，政府收支平衡，国外收支平衡。居民收入  $HI$  等于居民支出  $HE$ ，即

$$HI = HE \quad (7)$$

企业收入  $FI$  等于企业支出  $FE$ ，即

$$FI = FE \quad (8)$$

政府收入  $GI$  等于政府支出  $GE$ ，即

$$GI = GE \quad (9)$$

国外收入  $ROWI$  等于  $ROWE$ ，即

$$ROWI = ROWE \quad (10)$$

对于投资模块，我们假设总投资  $TINV$  等于总储蓄  $TS$ ，即

$$TINV = TS \quad (11)$$

总投资又由总固定资本形成  $TFKF$  与总存货变动  $TIC$  组成，即

$$TINV = TFKF + TIC \quad (12)$$

对于商品模块，我们假设商品  $i$  的国内总需求  $TDD_i$  由居民对商品  $i$  的需求  $HD_i$ 、政府对商品  $i$  的需求  $GD_i$ 、固定资本形成对于商品  $i$  的需求  $FKFD_i$ 、存货变动对于商品  $i$  的需求  $ICD_i$ ，以及中间投入对于商品  $i$  的需求  $TIID_i$  构成，即

$$TDD_i = HD_i + GD_i + FKFD_i + ICD_i + TIID_i \quad (13)$$

并且满足商品  $i$  国内需求量由商品  $i$  的进口量  $IMP_i$  与商品  $i$  的国内供给量  $DSD_i$  构成，即

$$TDD_i = IMP_i + DSD_i \quad (14)$$

其中，我们假设进口品与国产品满足不完全替代关系，即采用了阿明顿假设。国产品一部分供给到国内，另一部分用于出口。即

$$TDS_i = EXP_i + DSD_i \quad (15)$$

其中， $TDS_i$  即为商品  $i$  的国内生产量， $EXP_i$  为商品  $i$  的出口量。

在生产模块中，对于一般行业，其总产出  $X_{nets}$  是关于要素  $VA_{nets}$  和合成中间投入品  $II_{nets}$  的

列昂锡夫生产函数。在利润最大化的情况下，可以求解出

$$VA_{nets} = \beta_{nets}^{VA} \times X_{nets} \quad (16)$$

$$II_{nets} = \beta_{nets}^{II} \times X_{nets} \quad (17)$$

对于 ETS 行业，其总产出 $X_{ets}$ 也是关于要素 $VA_{ets}$ 和合成中间投入品 $II_{ets}$ 的列昂锡夫生产函数。在利润最大化的情况下，可以求解出

$$VA_{ets} = \beta_{ets}^{VA} \times X_{ets} \quad (18)$$

$$II_{ets} = \beta_{ets}^{II} \times X_{ets} \quad (19)$$

## 2 人机混合仿真

根据文献[22][23]，通过使用人机混合仿真的方法，可以解决碳-电市场联合仿真中降低电价与考虑排碳成本矛盾而产生的宏观基础性问题以及碳-电市场决策时间尺度不匹配的微观技术性问题。

人机混合仿真框架如图4所示。人机混合仿真共有三个核心模块：混合仿真、机器学习生成模型和机器学习解释模型<sup>[24]</sup>。在构建混合仿真环境时，需要对物理和社会系统运行机制给出清晰的定义。混合仿真的参与者分为两类，分别是真实参与者和计算机代理。

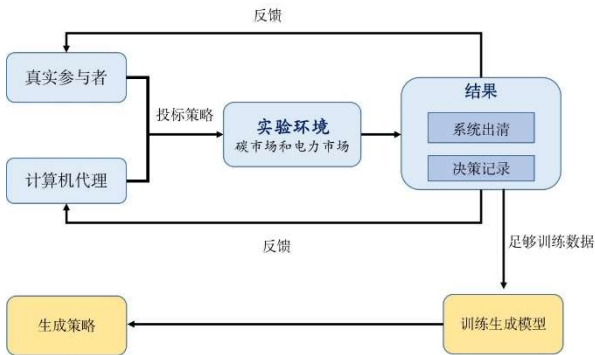


图4 人机混合仿真框架

Fig.4 Human-Machine Hybrid Simulation Framework

对于真实参与者，需充分了解实验规则，并要求在实验过程中能够秉持认真的态度以最大化任务目标的状态参与实验。计算机代理分为三类：基于历史数据的代理、基于解析模型的代理和基于实验数据由生成模型产生的代理。基于历史数据的代理是由现实环境中的数据通过机器学习算法生成。基于解析模型的代理以相应领域中的优化或控制问题为基础。这两类参与者与真实参与者以一定比例参与混合仿真。生成模型，由于是基于仿真数据所构建的模型，其产生的代理不会

参与第一轮实验。用于生成模型训练的数据来自多次实验的另两类代理和真实参与者。生成模型以机器学习算法为基础，捕捉混合仿真中各类型参与者的行为特征（决策数据），产生可复现其行为的生成模型。生成模型训练完成后，在下次混合仿真中替代一个（或部分）真实参与者。

当混合仿真环境中指定数量的真实参与者被生成模型替代后，行为建模到此完成，最终得到一个能产生混合仿真环境下决策数据的生成模型。这个生成模型本质上是一个逆概率密度函数，由于机器学习方法的“黑盒特性”，无法被明确的公式表现出来。由于某些研究追求行为模型的因果可解释性，可在生成模型后接一个因果估计器，由此可得基于因果关系的解析行为模型。如果混合仿真的目的是市场整体行为分析，则不需要微观交易行为模型的解析式，便可省去因果估计器。

## 3 数值分析

本章将通过两个实验详细展示本文所述方法的应用案例。首先为对基于3节点系统的6机组电力市场与6主体的碳市场的混合实验分析。然后为对可计算一般均衡模型的实验分析。

### 3.1 电力系统设置

该实验研究基于一个简化的广东电力市场。主要考虑的三个节点分别表示为节点1、节点2、节点3。每两个节点由一个支路相连，支路1-2的容量为600MW，支路1-3的容量为400MW，支路2-3的容量为500MW。一天的预期负荷如表1所示，其中在每个时间点，负荷预测误差均假定服从标准正态分布。系统中有6台发电机由人工或计算机代理控制，其所在节点、容量、固定成本和可变成本如表2所示。

表1 3个节点上的负荷

时间	节点1 /MW	节点2 /MW	节点3 /MW
1:00	259.15	1237.54	168.95
2:00	263.37	1050.65	188.30
3:00	277.96	975.04	262.72
4:00	338.02	900.23	375.70
5:00	383.45	743.05	562.95
6:00	450.58	592.61	743.24
7:00	480.10	442.86	1088.23
8:00	563.38	412.74	1230.08
9:00	788.24	337.83	1575.17
10:00	938.40	300.38	1313.34



11:00	1050.93	292.73	893.36
12:00	1162.91	285.88	675.70
13:00	1238.50	278.32	637.84
14:00	1200.06	282.23	675.23
15:00	1125.34	285.01	713.16
16:00	1088.27	293.48	840.84
17:00	975.85	297.09	1200.13
18:00	787.89	337.94	1463.36
19:00	637.58	488.33	1087.66
20:00	600.09	675.36	862.80
21:00	563.03	900.59	637.56
22:00	375.48	1013.04	337.78
23:00	337.54	1162.59	188.13
24:00	263.19	1215.13	180.30

表 2 6 个发电机组的参数设定

机组名	节点	最大出力 /MW	固定成本 /(元·h <sup>-1</sup> )	可变成本 /(元·(M W·h) <sup>-1</sup> )
1 号机组	2	360	1009	355
2 号机组	1	600	8250	301
3 号机组	3	1000	37970	256
4 号机组	3	390	1123	397
5 号机组	2	640	9540	299
6 号机组	1	1200	42906	216

### 3.2 市场规则

#### 3.2.1 广东电力现货市场规则

广东电力批发市场由长期交易市场和现货市场组成，现货市场又可分为日前市场和实时市场<sup>[25]</sup>。由于预期负载在混合实验的特定轮次中不会发生变化，故我们的实验模拟了日前市场而不失一般性。此外，混合试验中的竞价策略是按照广东现货市场规律给出的。广东日前市场的竞价策略由一个五阶段的价格-电力供应曲线定义：

$$S(p, q) = \sum_{i=1}^5 q_i X_{[p_i, p_u]} \quad (20)$$

其中， $p = \{p_i\}_{i=1}^5$  按升序排列， $p_i$  是五阶段价格中的第  $i$  个价格，并且  $p_1 \geq p_l$ ， $p_5 \leq p_u$ 。 $p_u$  和  $p_l$  分别为市场价格的上界和下界。 $q = \{q_i\}_{i=1}^5$  为五阶段电源并且满足  $\sum_{i=1}^5 q_i = q_{cap}$ 。 $q_{cap}$  为机组容量。 $X_{[p_i, p_u]}$  为策略运用在第  $i$  阶段时  $[p_i, p_u]$  上的指示函数。在广东， $p_u = 1000$  元/兆瓦， $p_l = 0$  元/兆瓦。

需要注意的是，五阶段竞价策略不能中途更

改，应全天有效。此外，在我们的实验中消除了长期交易量限制，以更真实地模拟这种情况。

#### 3.2.2 电力行业参与碳市场

在混合实验的实验场景中，要求发电机组参与广东碳市场。广东省实验发电机组的碳配额简表见表 3。

表 3 广东不同发电机组的碳配额

类型	容量	碳配额
燃煤机组	$\geq 1000MW$	0.8t/MWh
	600 – 1000MW	0.88t/MWh
燃气机组	$\leq 390MW$	0.44t/MWh

在简化的广东系统中，2、3、5、6 号发电机组为燃煤发电机组，1、4 号发电机组为燃气发电机组。中国煤炭和燃气发电机组的碳强度分别为 0.89t/MWh 和 0.39t/MWh，用于计算每兆瓦时电力的碳排放量。第  $i$  个机组的碳排放成本  $C_i$  由下式计算：

$$C_i = (\rho_i - A_i) \times p_{carbon} \times \sum_{t=1}^{24} Q_{i,t} \quad (21)$$

其中， $A_i$  和  $\rho_i$  为第  $i$  个机组的碳配额和碳强度，单位为 t/MWh。 $p_{carbon}$  为碳价，单位为 ¥/t。 $Q_t$  为第  $i$  个机组在时间  $t$  的发电量。此外，我们假设多余的碳配额可以在碳市场中自由交易，即当  $\rho_i - A_i < 0$  时，第  $i$  个发电机组将从碳市场获得经济回报。

#### 3.2.3 市场出清与代理收益

广东电力现货市场由安全约束经济调度 (SCED) 以区域边际价格 (LMP) 出清。我们采用内点法求解 SCED。

对于真实参与者与机器代理，每轮混合实验将模拟 24 小时内的日前市场。机组  $i$  的收益函数为  $R_i$  定义为：

$$R_i = \sum_{t=1}^{24} [(p_{it} - c_{vi})q_{it} - c_{fi}] - C_i \quad (22)$$

其中， $p_{it}$  为发电机组  $i$  在时间  $t$  的 LMP， $q_{it}$  是机组在时间  $t$  的输出， $c_{fi}$  和  $c_{vi}$  分别代表机组  $i$  的固定成本和可变成本。

由于净总收入与发电机组的容量有显著的关系，因此它与对混合实验参与者的实际激励有关。在简化的广东省案例中，平均利润（每兆瓦时的利润）用于评估人类参与者的表现。

### 3.3 联合仿真结果分析

基于以上设置与市场规则进行仿真实验，可以得到6个机组各自的机组出力与电价，如图5与图6所示。

图6表明，7:00-10:00和17:00-20:00出现了市场顶价现象。这是因为在这2个时间段，系统负荷过高，机组调度时，调到了机组顶价段的出力。这种情形在现实的电力市场中是完全可能的，机组作为市场参与者有动机将自己较高成本的出力置于顶价段以获取超额利润。

此外，我们还可以得到碳市场出清结果，如表4所示。

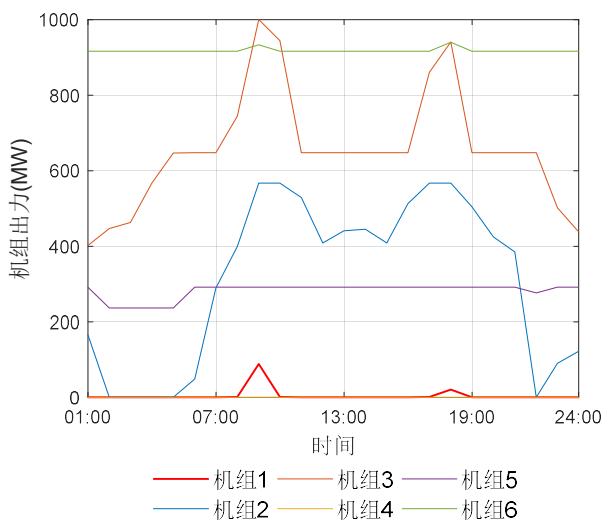


图5 机组出力仿真结果  
Fig.5 Unit output simulation results

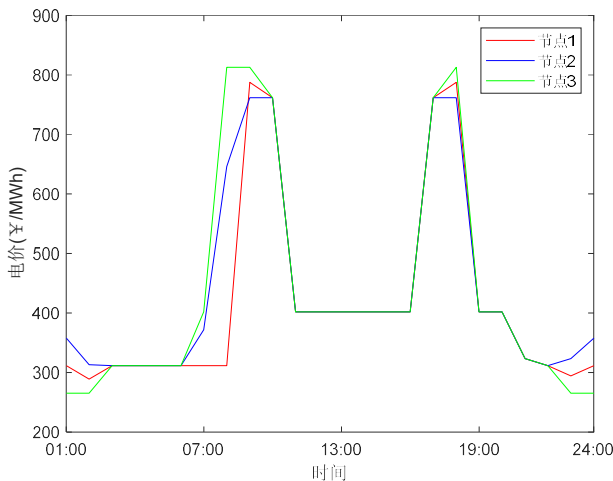


图6 电价仿真结果  
Fig.6 Electricity price simulation results

表4 碳市场出清仿真结果

订单号	买家机	卖家机组	成交价	成交量
-----	-----	------	-----	-----

组编号	编号	(元/吨)	(吨)
1	6	1	62
2	3	1	62

### 3.4 CGE 模型实验分析

在我们的实验中，CGE 模型的外生变量来自碳-电联合仿真的输出以及外部输入。前者包括电价（元/兆瓦时），碳价（元/吨），八大行业碳排放配额（吨），后者包括一次能源价格与基准年比值，劳动力供给与基准年比值，资本供给与基准年比值。CGE 模型的输出包括用电量（兆瓦时），八大行业实际碳排放（吨）以及 GDP、居民消费、行业产值等宏观数据。我们选取 2018 年为模型基准年，并基于 2018 年（最新）中国投入产出表、2019 能源统计年鉴数据确定模型参数。在基准年下，其输入的电价为 942.29 元/兆瓦时；碳价为 0 元/吨，即无碳市场引入；八大行业碳配额为无穷大，即不受碳市场限制；各比值均为 1。其输出结果如表 5 第二列所示。

考虑所有行业配额为基准年排放的 92%，即造纸业配额为 1.20 亿吨，石化业配额为 5.04 亿吨，化工业配额为 9.84 亿吨，建材业配额为 4.05 亿吨，钢铁业配额为 16.10 亿吨，有色业配额为 1.60 亿吨，发电业配额为 30.73 亿吨，航空业配额为 0.35 亿吨。若输入的碳价为 55 元/吨，则输出结果如表 5 第三列所示；若输入的碳价为 1000 元/吨，则输出结果如表 5 第四列所示。我们发现，碳价对碳排放总量无明显影响，但是其取值会影响八大行业各自的碳排放量。

表5 CGE 模型仿真结果

变量名	基准实验	碳价为 55 元	碳价为 1000 元
GDP (万亿元)	91.9	87.34	86.59
用电量 (亿兆瓦时)	68.45	63.17	62.24
碳排放总量 (亿吨)	74.91	72.14	72.14
造纸业排放 (亿吨)	1.30	1.17	1.17
石化业排放 (亿吨)	5.48	5.07	5.08
化工业排放 (亿吨)	10.70	9.60	9.66

吨)			
建材业排放 (亿	4.40	3.88	3.90
吨)			
钢铁业排放 (亿	17.50	15.60	15.66
吨)			
有色业排放 (亿	1.74	1.56	1.57
吨)			
发电业排放 (亿	33.40	31.68	31.50
吨)			
航空业排放 (亿	0.39	3.58	3.59
吨)			

## 4 结语

本文基于人机混合仿真的方法，对碳-电市场进行了联合仿真建模分析，并利用 CGE 模型对外部经济条件进行了建模，输出得到碳-电市场运行对实体经济的影响。在分析过程中对社会主体的行为不需要强的假设，从而避免了理论建模无法普遍适用的问题。并且通过混合仿真的方法，可以解决碳-电市场联合仿真中降低电价与考虑排碳成本矛盾而产生的宏观基础性问题以及决策时间尺度不匹配的微观技术性问题。基于该仿真框架，还可研究考虑碳市场耦合影响的电力市场预测分析技术等。

以广东电力市场改革为背景，本文设计了一个 3 节点电力现货市场的仿真实验进行案例分析，验证了本文方法在电力市场竞价行为建模应用中的适应性。并且还设计了基于 CGE 模型的实验，结果发现引入碳市场可以减少八大行业的碳排放总量；碳价可以影响各个行业的碳排放量，但对于碳排放总量没有明显影响。

## 参 考 文 献

- [1] X. Zhang et al., "Study on Electricity Market Trading System Adapting to Renewable Portfolio Standard," *Dianwang Jishu/Power Syst. Technol.*, vol. 43, no. 8, pp. 2682–2690, 2019.
- [2] Z. Xin-gang, R. Ling-zhi, Z. Yu-zhuo, and W. Guan, "Evolutionary game analysis on the behavior strategies of power producers in renewable portfolio standard," *Energy*, vol. 162, pp. 505–516, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.07.209.
- [3] Z. Huafeng, H. Yaping, N. Yongquan, and H. Xiqi, "Co-optimization

- Model of Energy and Reserve Auxiliary Service for Regional Interconnected Power Grid," *Power Syst. Technol.*, vol. 44, no. 3, 2020.
- [4] G. Zhang, E. Ela, S. Member, and Q. Wang, "Market Scheduling and Pricing for Primary and Secondary Frequency Reserve," vol. 34, no. 4, pp. 2914–2924, 2019.
- [5] Y. Wang, J. Qiu, Y. Tao, X. Zhang, and G. Wang, "Low-carbon oriented optimal energy dispatch in coupled natural gas and electricity systems," *Appl. Energy*, vol. 280, no. October, p. 115948, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115948.
- [6] LIN B Q, JIA Z J. Impacts of carbon price level in carbon emission trading market[J]. *Applied Energy*, 2019, 239(1): 157–170.
- [7] TANG L, SHI J R, BAO Q. Designing an emissions trading scheme for China with a dynamic computable general equilibrium model[J]. *Energy Policy*, 2016, 97(1): 507–520.
- [8] ZHANG L R, LI Y K, JIA Z J. Impact of carbon allowance allocation on power industry in China's carbon trading market: Computable general equilibrium based analysis[J]. *Applied Energy*, 2018, 229(1): 814–827.
- [9] KIMURA H. Reinforcement learning in multi-dimensional state-action space using random rectangular coarse coding and Gibbs sampling[C]// *SICE Annual Conference*, Takamatsu, Japan, 2007.
- [10] ABRELL J, KOSCH M, RAUSCH S. How effective is carbon pricing?—A machine learning approach to policy evaluation[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2022, 112(1): 102589.
- [11] GUO H Y, CHEN Q X, XIA Q, et al. Modeling Strategic Behaviors of Renewable Energy with Joint Consideration on Energy and Tradable Green Certificate Markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(3): 1898–1910.
- [12] 胡蔓,刘宁宁,杨明.电力现货市场仿真实验平台建设及应用[J].*山东电力高等专科学校学报*, 2021, 24(3):53-56+61.
- HU Man, LIU Ningning, YANG Ming. Construction and Application of Simulation Experiment Platform for Electricity Spot Market[J]. *Journal of Shandong College of Electric Power*, 2021, 24(3):53-56+61.
- [13] 白宏坤,尹硕,李虎军,杨萌,王甫月,刘皓明.计及碳交易成本的多能源站综合能源系统规划[J].*电力科学与技术学报*, 2019, 34(1):11-19.
- BAI Hongkun, YIN Shuo, LI Hujun, YANG Meng, WANG Fuyue, LIU Haoming. Multi-energy station integrated energy system planning considering carbon transaction costs[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(1):11-19.
- [14] 贺红波,杨洪明,竺琳,胡卫东.电力市场发电投资的系统动力学模型[J]. *电力科学与技术学报*, 2008, 23(1):70-75.
- HE Hongbo, YANG Hongming, ZHU Lin, HU Weidong. System Dynamics Model of Power Generation Investment in Electricity Market[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2008, 23(1):70-75.
- [15] ZHAO L T, MIAO J, QU S, et al. A multi-factor integrated model for carbon price forecasting: Market interaction promoting carbon emission reduction[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 796(1):149110.
- [16] 范志生.我国碳排放政策动态效应的 DSGE 模型分析[D].*重庆工商大学*,2021.
- [17] 刘雨梦.现货市场模拟仿真与评价体系研究[D].*华南理工大学*,2020.
- [18] 卢治霖,刘明波,尚楠,陈政,张妍,黄国日.考虑碳排放权交易市场影响的日前电力市场两阶段出清模型[J].*电力系统自动*



- 
- 化,2022,46(10):159-170.
- [19] 孙黎霞,白景涛,周照宇,赵晨昀.基于双向长短期记忆网络的电力系统暂态稳定评估[J].电力系统自动化, 2020, 44(13):64-72.
- SUN Lixia, BAI Jingtao, ZHOU Zhaoyu, ZHAO Chenyun. Transient Stability Evaluation of Power System Based on Bidirectional Long Short-Term Memory Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13):64-72.
- [20] ZHU B Z. A Novel Multiscale Ensemble Carbon Price Prediction Model Integrating Empirical Mode Decomposition, Genetic Algorithm and Artificial Neural Network[J]. Energies, 2012, 5(2): 355-370.
- [21] Lofgren H, Harris RL, Robinson S. A standard computable general equilibrium (CGE) model in GAMS. Intl Food Policy Res Inst; 2002.
- [22] Chao, Jiang & Xue, Yusheng & Huang, Jie & Wu, Qiuwei & Yang, Guangya. (2014). 通过实验经济学仿真来构建排放交易的多代理模型. Dianli Xitong Zidonghua. 38. 80-86.
- [23] 柳文轩,赵俊华,黄杰,文福拴,吕哲,薛禹胜.面向能源领域信息物理社会系统的行为仿真建模分析——以现货电力市场为例[J].电力系统自动化, 2020, 44(8):8-15.
- LIU Wenxuan, ZHAO Junhua, HUANG Jie, WEN Fushuan, LV Zhe, XUE Yusheng. Behavioral Simulation Modeling Analysis of Cyber-Physical Social Systems in the Energy Field——Taking the Spot Electricity Market as an Example[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8):8-15.
- [24] LIU W X, ZHAO J H, WANG D H. Data mining for energy systems: Review and prospect[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 2021, 11(4): e1406.
- [25] WANG X L, LIU W X, LIANG G Q, et al. Lessons learned from power industry reform and electricity spot market trial operation in Southern China[J]. Energy and Climate Change, 2021, 2(1): 100055.