

DOI: 10.19666/j.rlfed.202208163

# 基于碳排放特性及碳交易规则的热电联产 机组经济性分析

郭喜燕, 刘嘉康, 白雪, 杨志平, 王宁玲  
(华北电力大学电站能量传递转化与系统重点实验室, 北京 102206)

**[摘要]** 在调峰和碳交易的政策下, 热电联产机组面临更加复杂的背景。为了得到抽凝热电联产机组全工况碳排放特性、收益分布、以及碳交易经济性, 为机组参与碳交易应对碳市场波动提供参考, 利用 EBSILON 仿真软件结合 Python 程序得到机组全工况碳排放分布以及收益组成。结果表明: 机组度电碳排放量与负荷呈反比; 以电负荷 325 MW 和 150 MW 为例, 供电碳排放强度从 903.54 g/(kW·h) 上升到 1 015.28 g/(kW·h), 碳排放总量与负荷呈正比; 调峰收益占比最高可达 55%, 碳交易收益占比最高可达 8%; 调峰收益在低负荷占比大, 而碳交易收益在高、中负荷占比较大; 对比碳价从 40 元/t 变化到 90 元/t 和供电碳排放标准从原来的 0.9 倍变化到 1.3 倍, 得到供电碳排放标准改变对碳交易收益有更大影响; 供电碳排放标准的制定应当结合机组排放水平, 过高或者过低都会影响热电联产电厂参与碳交易的积极性。

**[关键词]** 碳交易; 热电联产; 全工况分析; 碳市场; 排放特性

**[引用本文格式]** 郭喜燕, 刘嘉康, 白雪, 等. 基于碳排放特性及碳交易规则的热电联产机组经济性分析[J]. 热力发电, 2023, 52(4): 14-23. GUO Xiyan, LIU Jiakang, BAI Xue, et al. Economic analysis of cogeneration units based on carbon emission characteristics and carbon trading rules[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 14-23.

## Economic analysis of cogeneration units based on carbon emission characteristics and carbon trading rules

GUO Xiyan, LIU Jiakang, BAI Xue, YANG Zhiping, WANG Ningling

(North China Electric Power University Key Laboratory of power station energy transfer and transformation system, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Under the policy of peak shaving and carbon trading, cogeneration units face a more complex background. In order to obtain the carbon emission characteristics, income distribution and carbon trading economy of the traditional extraction condensing cogeneration unit under all operating conditions, and provide a reference for the unit to deal with carbon market fluctuations when participating in carbon trading. Using EBSILON simulation software combined with python program, the carbon emission distribution and income composition of the unit under all operating conditions are obtained. The research results show that the carbon emission kilowatt hour is inversely proportional to the load. Taking 325 MW and 150 MW as examples, the carbon emission intensity of power supply increases from 903.54 g/(kW·h) to 1 015.28 g/(kW·h), and the total carbon emission is proportional to the load; The highest proportion of peak shaving income can reach 55%; The highest proportion of carbon trading income can reach 8%, and the peak shaving income accounts for a large proportion in the low load, while the carbon trading income accounts for a large proportion in the high load. Comparing the change of carbon price from 40 yuan/t to 90 yuan/t and the change of power supply carbon emission standard from 0.9 times to 1.3 times, it is found that the change of power supply carbon emission standard has a greater impact on the proportion of carbon trading income. The formulation of power supply carbon emission standard should be combined with the unit emission

收稿日期: 2022-08-04 网络首发日期: 2022-09-09

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (51821004)

Supported by: National Natural Science Foundation of China(51821004)

第一作者简介: 郭喜燕 (1975), 女, 副教授, 主要研究方向为能源高效利用与节能, gxy@ncepu.edu.cn。

通信作者简介: 刘嘉康 (1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为热电联产机组经济性、负荷优化调度, 3197984534@qq.com。

level. Too high or too low will affect the enthusiasm of cogeneration power plants to participate in carbon trading.

**Key words:** carbon trading; cogeneration; full condition analysis; carbon market; emission characteristics

“双碳”目标的实施和大量新能源并网，对电网和传统燃煤机组造成巨大冲击；火电行业作为碳排放大户面临严重的减排压力<sup>[1-3]</sup>；在此背景下，火电机组年利用小时数不断下降。光伏、风电等新能源受自然气候影响输出功率不断波动，燃煤火电机组为减缓新能源波动常常调峰运行，调峰是燃煤机组运行的新常态<sup>[4]</sup>。为早日达到“双碳”目标，碳交易于2021年7月在全国上市，碳排放量成为火电机组要考虑的又一重要指标。碳交易的进行，使得关于碳排放的政策不断完善。同时燃煤电厂面对更复杂的背景<sup>[5]</sup>。如何减少碳排放量参与碳交易<sup>[6]</sup>，成为燃煤电厂在调峰后面临的又一问题。热电联产机组在实际运行中承担发电供热双重任务，随着煤价上涨热电联产机组的盈利更加困难<sup>[7]</sup>。

学者们采用不同的方法对热电联产机组进行建模，来研究其调峰经济性<sup>[8-10]</sup>。文献[11]对燃气蒸汽联合循环机组的调峰经济性进行分析，得到联合循环机组全工况燃料成本产值率、最优运行热电比。文献[12]对热电联产机组的各种成本进行了细致的研究，为分析热电联产机组调峰运行提供参考。文献[13]研究表明，在不同负荷下，燃煤电厂的运行参数对机组碳排放强度影响不同。文献[14]针对燃煤电厂的碳排放计算方法进行研究，对比不同碳排放计算方法结果，得到碳平衡法对于计算机组碳排放准确性高，同时活动因子法也有较高的准确性。目前关于热电联产机组建模、负荷优化<sup>[15-16]</sup>、调峰经济性方面已经有充分的研究，关于碳排放计算也有相应的研究，但在关于热电联产机组碳市场经济性以及全工况机组碳排放特性的研究较少。

本文以某350 MW抽凝热电联产机组为研究对象，首先利用EBSILON仿真软件结合Python程序对机组全工况碳排放量和收益进行计算；然后分析机组具体碳排放特性、收益组成和碳交易经济性；最后在模型的基础上研究碳价波动和供电碳排放标准变化对碳交易收益的影响。相关结论可为热电联产电厂参与碳交易、应对碳市场波动提供参考依据和启示。

## 1 热电联产机组碳交易及调峰模型

### 1.1 热电联产碳交易计算模型

碳交易规则按照《2019—2020年全国碳排放权

交易配额总量设定与分配实施方案（发电行业）》条例进行<sup>[17-18]</sup>。机组全工况下碳排放量计算对于热电联产电厂参与碳交易有重要的意义<sup>[19]</sup>。目前国内CO<sub>2</sub>排放配额（简称配额）计算采用标杆法。根据最新《企业温室气体排放核算方法与报告指南发电设施（2021年修订版）征求意见稿》对碳排放边界进行划分，热电联产电厂碳排放核算边界如图1所示<sup>[20]</sup>。

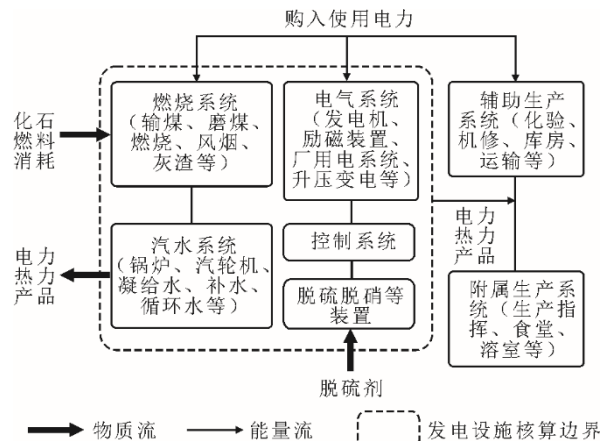


图1 发电企业碳排放核算边界

Fig.1 Carbon emission accounting boundary of power generation enterprises

机组碳排放与配额计算式为：

$$A = A_e + A_h \quad (1)$$

式中： $A$ 为机组CO<sub>2</sub>配额总量，t； $A_e$ 为机组供电CO<sub>2</sub>配额量，t； $A_h$ 为机组供热CO<sub>2</sub>配额量，t。

$$A_e = W_e \times F_e \times F_1 \times F_r \times F_{de} \times F_f \quad (2)$$

式中： $W_e$ 为机组供电量，MW·h； $F_e$ 为机组所对应的供电排放基准值（以CO<sub>2</sub>计），t/(MW·h)； $F_1$ 为机组冷却方式修正系数，凝汽器的冷却方式为水冷时机组冷却方式修正系数为1，凝汽器的冷却方式为空冷时机组冷却方式修正系数为1.05； $F_r$ 为机组供热量修正系数，燃煤机组供热量修正系数为1-0.22×供热比； $F_{de}$ 为地区供电配额修正系数，由各地生态环境主管部门根据本地实际情况设定小于1的系数； $F_f$ 为机组负荷（出力）系数修正系数。

供热CO<sub>2</sub>配额的计算方法如下：

$$A_h = Q_h \times B_h \times F_{dh} \quad (3)$$

式中： $Q_h$ 为机组供热量，GJ； $B_h$ 为机组所属类别的供热基准值（以CO<sub>2</sub>计），2019—2020年各类别机组碳排放基准值见表1，t/GJ； $F_{dh}$ 为地区供热配额

修正系数,由各地生态环境主管部门根据本地实际情况设定小于 1 的系数。

表 1 2019—2020 年各类别机组碳排放基准值

Tab.1 Carbon emission benchmark values of various types of units from 2019 to 2020

机组类别	供电基准值/(t·(MW·h) <sup>-1</sup> )	供热基准值/(t·GJ <sup>-1</sup> )
I	0.877	0.126
II	0.979	0.126
III	1.146	0.126

注: I 类为 300 MW 等级以上常规燃煤机组, II 类为 300 MW 等级以下常规燃煤机组, III 类燃煤矸石、水煤浆等非常规燃煤机组(含燃煤循环流化床机组)。机组实际判断时将额定功率在 400 MW 以上的判定为 I 类, 额定功率低于 400 MW 的判定为 II 类机组。

当机组碳排放量超过配额,需及时购入碳排放量,避免清算时排放超额带来处罚;反之可以售出多余配额来获利。碳价处在波动之中。图 2 为我国碳市场 2021 年下半年的碳价波动,反映了我国碳市场建立半年以来 CO<sub>2</sub> 的成交价格。由图 2 可见,碳价目前整体水平比较低但波动大。

机组碳排放量采用活动因子法进行计算:

$$A_a = \sum_{i=1}^n (A_{ADi} \times E_{EFi}) \quad i=1,2,3 \dots n \quad (4)$$

式中:  $A_a$  为化石燃料燃烧的排放量(以 CO<sub>2</sub> 计), t;  $A_{ADi}$  为第  $i$  种化石燃料的活动数据, GJ;  $E_{EFi}$  为第  $i$  种化石燃料的 CO<sub>2</sub> 排放因子, t/GJ。

$$C_{pv} = \begin{cases} C_{p1}(P_{01} - P)t & P_{02} \leq P \leq P_{01} \\ C_{p1}(P_{01} - P_{02})t + C_{p2}(P_{02} - P)t & P_{03} \leq P < P_{02} \\ C_{p1}(P_{01} - P_{02})t + C_{p1}(P_{02} - P_{03})t + C_{p3}(P_{03} - P)t & P > P_{03} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $C_{pv}$  为机组调峰补偿费用, 元;  $P$  为机组电负荷, MW;  $C_{p1}$ 、 $C_{p2}$ 、 $C_{p3}$  为机组第 1、2、3 档调峰补偿报价, 元/(kW·h);  $t$  为调峰小时数, h。

## 2 求解成本函数及求解流程

### 2.1 机组的经济函数

通过前文对碳排放、碳交易政策、调峰政策的分析建立机组的总收益函数:

$$C_z = C_{re} + C_{dian} + C_{pv} - C_{fuel} + C_{CO_2} \quad (7)$$

式中:  $C_z$  为机组总收益, 元;  $C_{re}$  为机组的供热收益热价与热量之积, 元;  $C_{dian}$  为机组的供电收益电价与电量之积, 元;  $C_{fuel}$  为机组的燃料成本为机组所消耗的燃料量与燃料价格之积, 元。

### 2.2 求解流程

EBSILON 作为能源领域使用较多的仿真软件, 有较高的准确性, 可以满足机组经济性计算的需求<sup>[21-22]</sup>。软件为编程留了接口, 利用 Python 等软

件实现与 EBSILON 数据交互, 为机组计算和分析提供便利。本文主要的求解大致分为 3 步:

1) 获得相应的机组参数和外界经济参数。机组的参数主要为热平衡图中机组阀门全开(VWO)工况下的设计参数。为机组变工况计算建立基础, 机组外界经济参数为供电价格、供热价格、CO<sub>2</sub> 价格、煤种参数等。

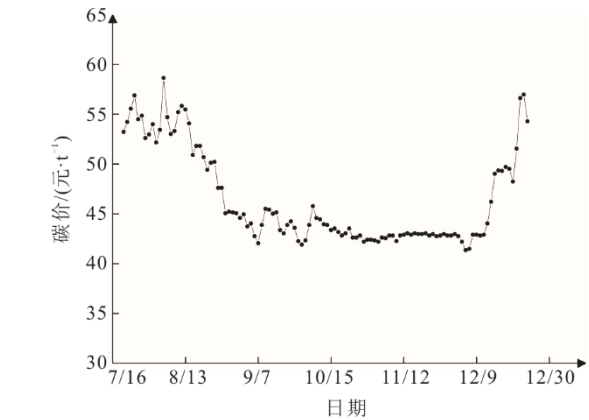


图 2 2021 年 7 月—12 月我国碳市场行情统计  
Fig.2 Statistics of China's carbon market from July to December 2021

### 1.2 热电联产机组调峰模型

关于热电联产机组调峰的研究比较充分, 故关于调峰原理和调峰补偿机制不再赘述。

具体调峰收益计算模型为:

2) 利用 EBSILON 仿真软件建立机组模型并进行变工况计算, 同时结合步骤 1 中获得的参数利用 Python 建立机组的经济性函数和循环函数并与 EBSILON 建立连接。

3) 求解计算, 在满足机组电热特性范围内利用循环函数取点, 每取一个点将点对应的电热负荷输入 EBSILON 中求解机组此时的能耗, 并将能耗反馈回 Python 程序进行经济性计算, 得到机组的各种收益和碳排放量等参数, 计算完成后程序将数据导出。具体求解流程如图 3 所示。

本文的求解方法相比过去的求解方法有以下

优势：之前的求解停留在几个特殊点或某条线上的点，没有对机组电热特性范围内所有点进行计算；

而本文方法实现机组全工况计算，为研究机组能耗和经济性计算提供便捷。

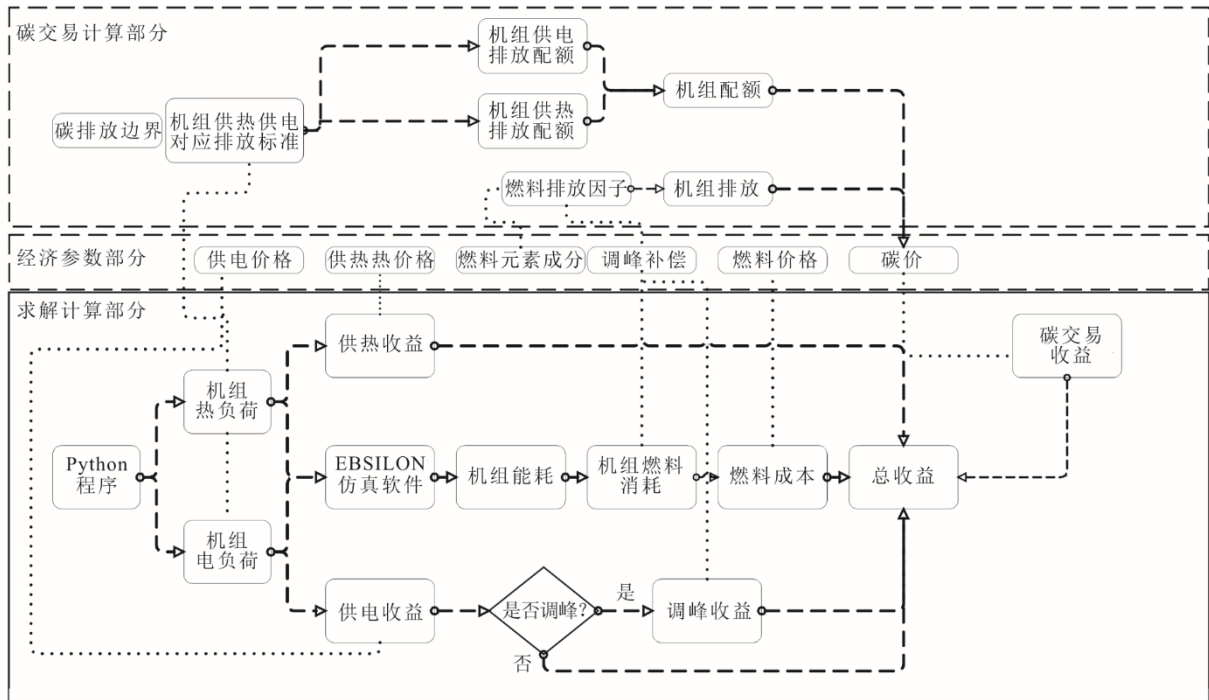


图 3 计算流程  
Fig.3 Calculation process

### 3 案例分析

#### 3.1 机组状况

以某 350 MW 抽凝热电联产机组为例。该机组为超临界一次再热机组，采用 CJK350-24.2/0.4/566/566 型凝汽式汽轮机。机组抽汽位置为中低压缸连接管道。机组额定抽汽量为 380 t/h，最大抽汽

量为 550 t/h。采暖压力 0.4 MPa，回水温度 70 °C。其纯凝工况参数见表 2，营支情况见表 3，燃料成分分析见表 4，调峰补偿见表 5。

求解假设：1) 假定煤中碳和硫元素都完全氧化；2) 暂时不考虑厂用电带来的排放量；3) 锅炉效率稳定；4) 燃料成本在总成本中占很大比重，为简化求解成本方面只考虑燃料成本。

表 2 机组纯凝工况的参数  
Tab.2 Parameters of unit under pure condensation condition

机组负荷/MW	锅炉效率/%	管道效率/%	汽轮机热耗/(kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	发电煤耗率/(g·(kW·h) <sup>-1</sup> )	厂用电率/%	供电煤耗率/(g·(kW·h) <sup>-1</sup> )
350.0	93.82	99	8 036.4	295.23	4.3	308.49
297.5	93.71	99	8 079.3	297.15	4.5	311.16
210.0	93.54	99	8 225.6	303.08	5.0	319.04
175.0	93.20	99	8 424.5	311.55	5.2	328.64
140.0	93.23	99	8 672.9	320.63	5.5	339.29

表 3 机组营支情况  
Tab.3 Unit operation and support

燃料价格/(元·t <sup>-1</sup> )	供热价格/(元·GJ <sup>-1</sup> )	上网电价/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	碳价/(元·t <sup>-1</sup> )
450	19	0.286	50

表 4 机组燃料成分分析  
Tab.4 Fuel composition analysis of unit

元素分析 w/%					Q <sub>net,ar</sub> /(kJ·kg <sup>-1</sup> )
C <sub>ar</sub>	H <sub>ar</sub>	O <sub>ar</sub>	N <sub>ar</sub>	S <sub>tar</sub>	
42.68	2.72	10.35	0.84	0.80	16 020

表 5 调峰补偿  
Tab.5 Peak shaving compensation

负荷率区间/%	报价档位	报价范围/(元·(MW·h) <sup>-1</sup> )
100~70	第 1 档	0
70~50	第 2 档	0~300
50~40	第 3 档	300~400
40~0	第 4 档	400~500

建立机组模型,如图 4 所示,机组的电热特性如图 5 所示。图 5 中,AB 线为锅炉最大蒸发量负荷线,CD 线为锅炉最低稳燃负荷线,BC 线为低压缸最低冷却流量线 155 t/h。机组纯凝工况最低电负荷为 140 MW。

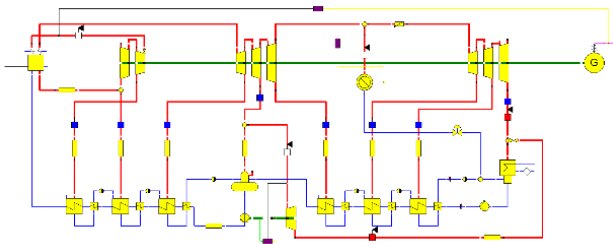


图 4 机组建模  
Fig.4 Unit modeling diagram

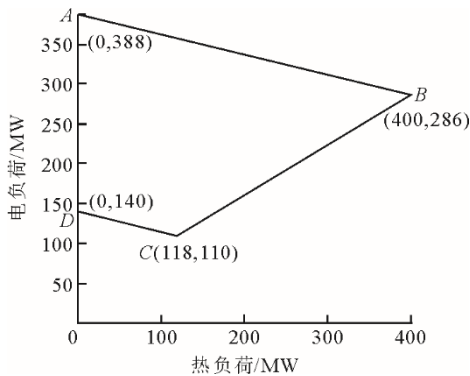


图 5 热电联产机组电热特性  
Fig.5 Electrothermal characteristics of cogeneration unit

以热平衡图上机组工况为例,对模型仿真所得主蒸汽流量与热平衡图上的主蒸汽流量进行校核,结果见表 6。由表 6 可见,主蒸汽流量最大误差为 5%,模型可以满足机组经济性计算的需求。

表 6 模型准确性校验  
Tab.6 Model accuracy verification

负荷/MW	设计主蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	仿真主蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	误差/%
350.0	1 045.210	1 054.630	0.90
297.5	866.775	885.339	2.10
262.5	754.932	776.204	2.80
175.0	494.027	515.059	4.20
140.0	401.254	418.244	4.23

### 3.2 机组全工况碳排放量分布以及配额分布

#### 3.2.1 机组排放分布

对机组全工况碳排放量计算得到机组碳排放分布,如图 6 所示。为分析机组供热和供电碳排放特性,采用热量法对机组碳排放量进行分摊。从图 6 中选取部分点进行对比分析,结果见表 7。

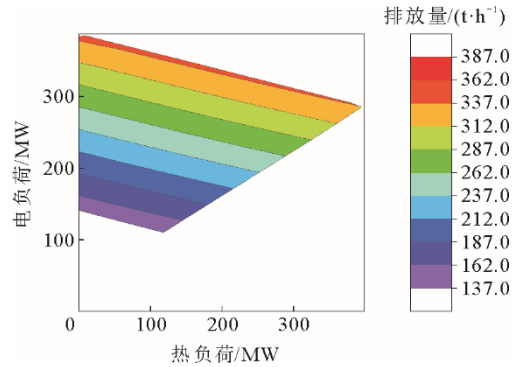


图 6 机组碳排放特性  
Fig.6 Unit carbon emission characteristics

表 7 机组排放特性计算

Tab.7 Calculation of unit emission characteristics

机组热负荷/ MW	机组电负荷/ MW	机组总碳 排放量/(t·h <sup>-1</sup> )	度电碳排放量/ (g·(kW·h) <sup>-1</sup> )
0	150	152.25	1 015.28
0	200	193.56	967.83
0	300	273.74	912.49
0	325	293.65	903.54
100	200	213.32	878.94
200	200	232.30	786.34
300	200	259.85	699.46

由表 7 可知,纯凝工况下,电负荷上升,度电碳排放量下降。这是因为,高负荷区域机组效率高,故机组度电碳排放量低。从排放总量来看,机组负荷越低排放总量越低,此时机组效率低,不利于燃料高效利用。从减少碳排放量角度,调峰运行有利于减少碳排放总量。

由表 7 还可看出,热负荷越高机组供电碳排放强度越低,这是由于热量法将损失归于供热所致<sup>[23-25]</sup>。热、电负荷变化相同的幅度时,电负荷波动对机组碳排放量有更大影响,故供电碳排放强度对机组排放总量影响更大。

#### 3.2.2 机组配额分布

按照配额计算方法对机组碳排放配额进行计算,得到机组配额分布如图 7 所示。由图 7 可见,机组在高负荷配额多,在低负荷区域配额少。供热有助于机组获得更多的排放配额。对比图 6、图 7

得到，机组在高负荷区域剩余配额较多，在低负荷区域碳排放量超过排放配额，因此机组在低负荷时应当及时购入碳排放量。

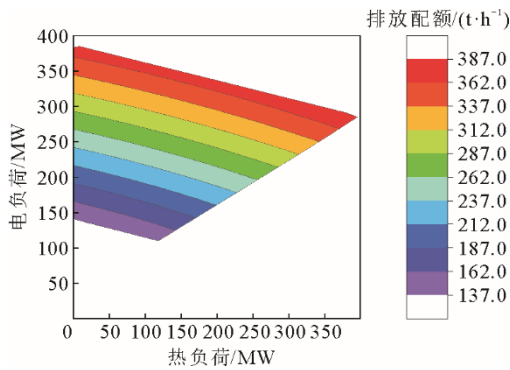


图 7 机组配额分布  
Fig.7 Unit quota distribution

### 3.3 机组全工况收益分布以及各种收益的占比

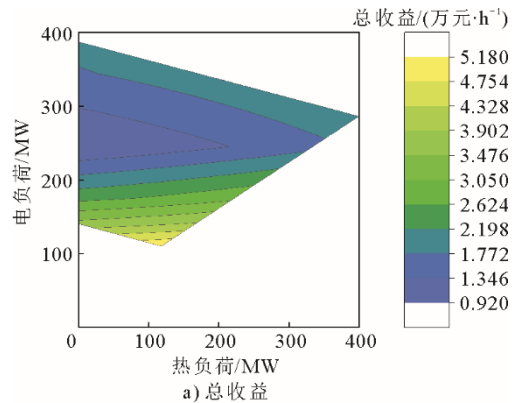
对热电联产机组全工况的收益进行计算，得到结果如图 8 所示。由图 8 可知：供电收益最高占比可达 97%，供热收益最高可达 24%，调峰收益最高可达 55%，碳交易收益最高可达 8%；上网电价对机组收益产生主要影响，供热收益随着热负荷的上升占比均匀增大，碳交易收益对机组总收益影响较小；在中、高负荷区域，碳交易收益和供电收益对总收益产生主要影响；在低负荷区域，收益主要来源为调峰；目前机组在中、高负荷区域收益最差，在调峰区域收益最好，并且负荷越低收益越高，最高与最低收益相差近 5 倍，可知调峰为热电联产电厂营利的最佳方式。

### 3.4 碳价和排放标准波动对机组收益的影响

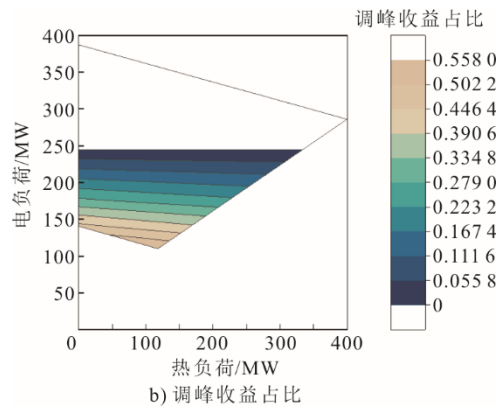
电力能源企业首先纳入碳交易市场，因此调研 2021 年下半年国内用能需求和碳市场平均成交价格趋势，结果如图 9 所示。由图 9 可见，碳价与全国用能需求同步变化。7—8 月是夏季用能高峰，碳价高；过 8 月后用能需求降低，碳价随之下降；11—12 月进入冬季供热季，用能需求上涨，碳价变高。整体而言，由于碳交易市场刚起步，碳价水平比较低。

碳市场的波动分为碳价波动和供电碳排放标准（又称排放标杆）波动。碳价波动是碳市场最常见的波动，碳价受用能需求等因素影响不断波动。随着碳交易发展，机组进行节能减碳改造后排放水平整体下降，此时供电碳排放标准便需要下调，来维持碳市场的活力。因此，本文对案例机组在碳价波动背景下进行研究。碳价从 50 元/t 变化为 40、

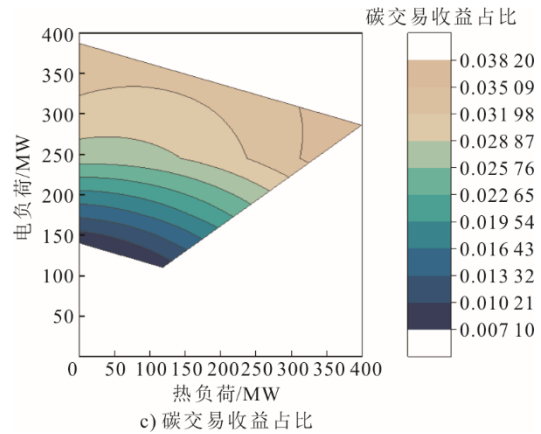
70、90 元/t，碳交易收益见表 8，碳交易收益在机组总收益中的占比分布如图 10 所示。



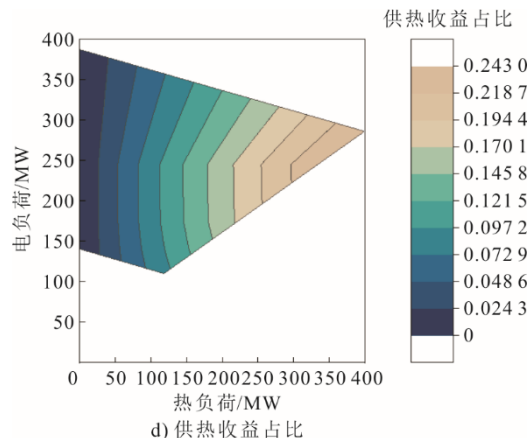
a) 总收益



b) 调峰收益占比



c) 碳交易收益占比



d) 供热收益占比

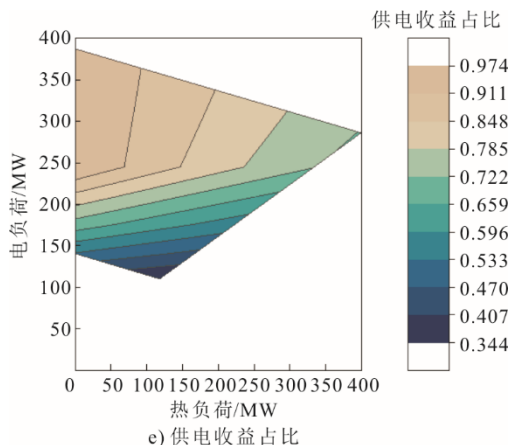


图 8 机组总收益和调峰收益、碳交易收益、供热收益、供电收益占比  
**Fig.8 Proportion of total unit income, peak shaving income, carbon trading income, heating income and power supply income**

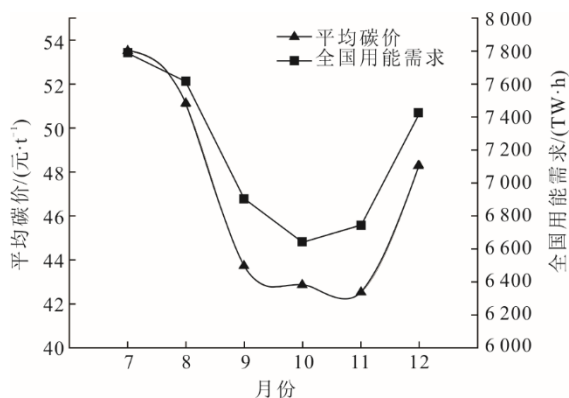


图 9 平均碳交易价格与全国用能需求对照  
**Fig.9 Comparison between average carbon trading price and national energy demand**

表 8 碳价波动后机组碳交易收益  
**Tab.8 Income statement of unit carbon trading after carbon price fluctuation**

项目	碳价/(元·t <sup>-1</sup> )		
	40	70	90
最高碳交易收益对应电热负荷 (电 286 MW, 热 399 MW)	3 425.833 元/h	6 851.766 元/h	8 564.78 元/h
最低碳交易收益对应电热负荷 (电 135 MW, 热 22 MW)	451.942 8 元/h	903.88 元/h	1 129.857 元/h
电 200 MW、热 100 MW 碳交易收益/(元·h <sup>-1</sup> )	1 295.125	2 590.25	3 237.813

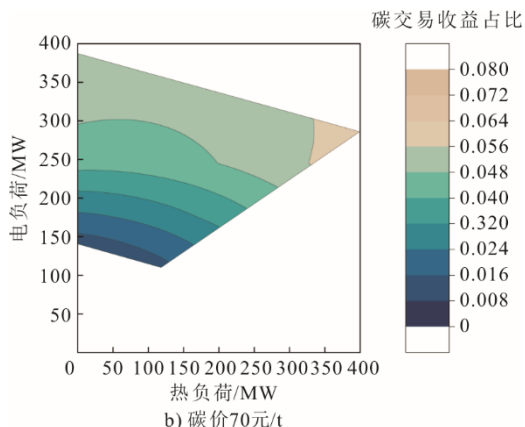
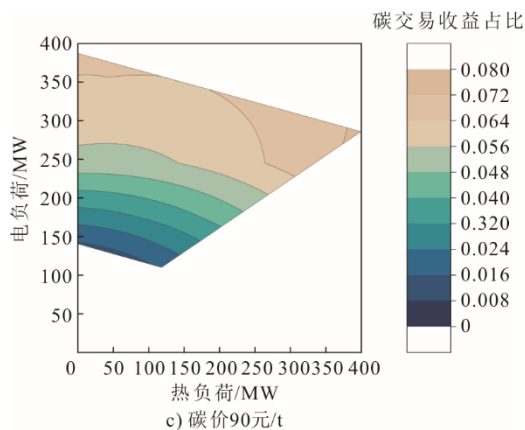
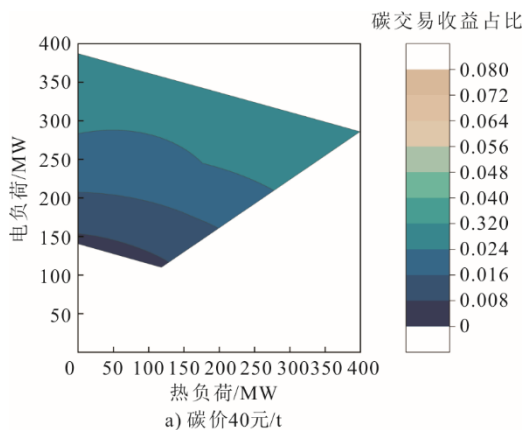


图 10 碳价变化时碳交易收益占比  
**Fig.10 Proportion of carbon trading income when carbon price changes**

供电碳排放标准为机组发出每 MW·h 电分配的 CO<sub>2</sub> 排放量。案例机组的供电排放标准为政策文件中的 0.979 t/(MW·h)，当标准变为原来的 0.9、1.2、1.3 倍后，碳交易收益见表 9，碳排放收益在总收益中的占比情况如图 11 所示。

对比图 10 和图 11 可知：碳价上涨，碳交易收益占比缓慢上升，最大值在热负荷最高处；等高线左高右低，表明随着热负荷上升碳交易收益占比提高，

供热有利于热电联产机组碳交易；碳价从 40、70、90 元/t 变化的过程中，碳交易收益占比从 3% 到 7%。图 11 中等高线从左高右低渐渐变为左低右高，碳

交易收益最高在电负荷最高处。政策向供电倾斜，供电碳排放标准提高，此时供电有利于机组碳交易收益。

表 9 标准波动后机组碳交易收益  
Tab.9 Income statement of unit carbon trading after standard fluctuation

项目	波动后排放标准与原供电碳排放标准的倍数		
	0.9	1.2	1.3
最高碳交易收益对应电热负荷	2 560.52 元/h (电 286 MW, 热 399 MW)	7 618.16 元/h (电 387 MW, 热 0 MW)	11 406.85 元/h (电 387 MW, 热 0 MW)
最低碳交易收益对应电热负荷	-603.30 元/h (电 141 MW, 热 0 MW)	1 627.36 元/h (电 110 MW, 热 118 MW)	2 489.67 元/h (电 110 MW, 热 118 MW)
电 200 MW、热 100 MW 碳交易收益/(元·h <sup>-1</sup> )	127.97	3 356.54	5 094.19

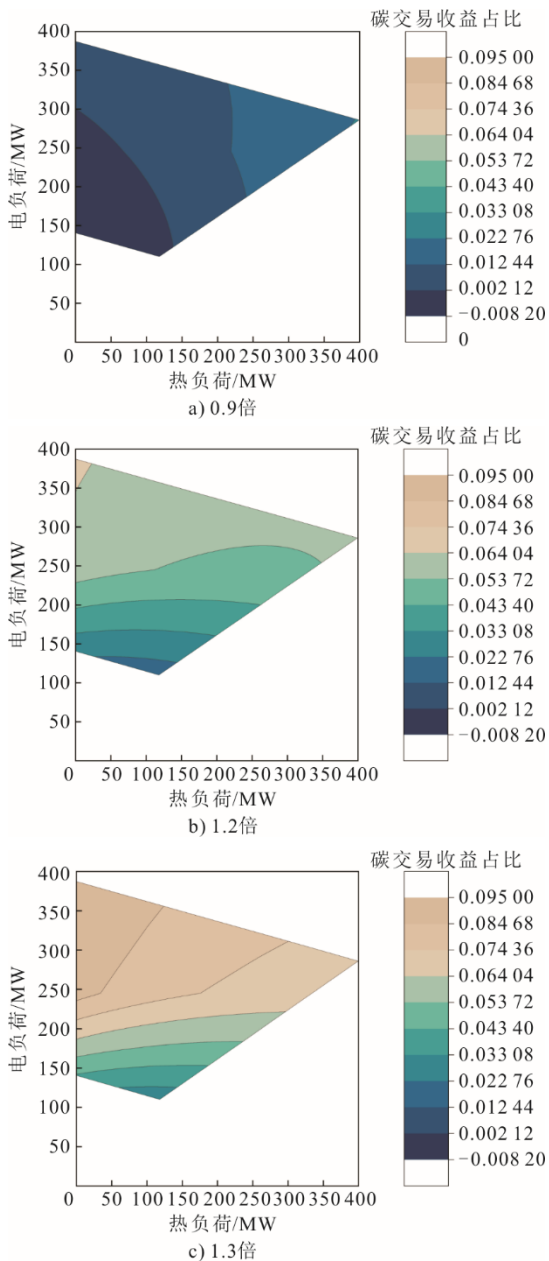


图 11 碳排放标准变化时碳交易收益占比  
Fig.11 Proportion of carbon trading income when carbon emission standards change

对比表 8 和表 9 可知，碳价波动对机组碳交易收益最大点没有影响，而碳排放标准变化对机组碳交易收益最优点产生影响。同时对排放标准变化为原来的 1.3 倍和碳价变为 70 元/t (原碳价的 1.4 倍)，前者对机组碳交易收益影响更大。不同供电碳排放标准最大碳交易收益点位置不同，应当适当调整供电碳排放标准，提高热电联产电厂参与碳交易的积性。

### 4 结 论

本文以抽凝热电联产机组为研究对象，围绕其碳排放特性、碳交易和机组收益展开探讨，这是对现有热电联产机组全工况收益分布和碳经济研究的补充，研究结果可为热电联产电厂参与碳交易低碳运行提供参考依据。本文研究主要得出以下几个方面结论：

1) 抽凝热电联产机组的度电碳排放量与负荷呈反比；机组碳排放总量与负荷呈正比。调峰运行有利于减少机组碳排放总量，不利于能源高效利用，机组调峰运行更应当关注机组碳排放量，及时购入碳排放量。

2) 对比各种收益在机组总收益中的占比可知：调峰收益对机组低负荷营利起主要作用；碳交易收益对机组高中负荷营利发挥重要作用。当前电价和热价稳定的背景下，机组只靠供电供热收益在煤价上涨时将面临亏损，调峰和碳交易是机组重要的收益来源。目前碳价整体水平低，在文中背景下机组营利应当优先考虑调峰，同时避免碳排放超额处罚。

3) 对比碳价波动与社会用能需求，发现碳价与社会用能需求同步变化。表明目前能源体系中高碳排放的能源占比大；当清洁能源成为主体时碳价随能需波动缓慢。故还应继续提高新能源所占比重来

减少碳排放。

4) 对比碳价格从 40 元/t 变化到 90 元/t 和供电碳排放标准从原标准的 0.9 变化到 1.3 倍可知, 后者对碳交易收益影响更大。想要提高机组碳交易收益, 在排放标准上调时机组应优先供电, 排放标准下调机组优先供热。排放标准的调整应当结合当前所有同类型同容量机组的排放水平, 排放标准过低或过高都会影响热电联产电厂参与碳交易的积极性, 不利于碳交易的正常发展。

### 【参考文献】

- [1] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.  
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning under the dual carbon goals[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [2] 马双忱, 杨鹏威, 王放放, 等. “双碳”目标下传统火电面临的挑战与对策[J]. 华电技术, 2021, 43(12): 36-45.  
MA Shuangchen, YANG Pengwei, WANG Fangfang, et al. Challenges and countermeasures of traditional thermal power under the goals of carbon neutrality and carbon peaking[J]. Huadian Technology, 2021, 43(12): 36-45.
- [3] 王新平, 苏畅, 文虎, 等. 双碳战略下中国能源工业转型路径研究[J]. 技术与创新管理, 2022, 43(2): 141-150.  
WANG Xinping, SU Chang, WEN Hu, et al. Research on China's energy industry transformation path under double carbon strategy[J]. Technology and Innovation Management, 2022, 43(2): 141-150.
- [4] 张绪辉, 杨兴森, 辛刚, 等. 燃煤火电机组深度调峰运行试验研究[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(4): 144-150.  
ZHANG Xuhui, YANG Xingsen, XIN Gang, et al. Experimental study on deep peak regulation operation of coal-fired thermal power unit[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(4): 144-150.
- [5] 翟威锋, 陈春艳, 郭智源. “双碳”目标下火电企业开展能源管理体系建设研究[J]. 能源与节能, 2021(12): 30-31.  
ZHAI Weifeng, CHEN Chunyan, GUO Zhiyuan. Study on construction of energy management system by thermal power enterprises under “Carbon Peak and Neutrality” goals[J]. Energy and Energy Conservation, 2021(12): 30-31.
- [6] 吕靖焯, 曹铭, 张金锁, 等. 基于小波多分辨率的中国碳排放权市场价格波动性研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(7): 1699-1708.  
LYU Jingye, CAO Ming, ZHANG Jinsuo, et al. Research on volatility of China's carbon market based on wavelet multiresolution[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2021, 41(7): 1699-1708.
- [7] 宋浩, 陈晓利, 高继录, 等. 多供热机组多模式深度调峰协同运行技术路线研究[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(6): 448-450.  
SONG Hao, CHEN Xiaoli, GAO Jilu, et al. Study on the technical route of multi-mode deep peak-shaving cooperative operation of multi-heating units[J]. Turbine Technology, 2021, 63(6): 448-450.
- [8] 刘庆新. 供热机组全工况热力性能诊断研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1.  
LIU Qingxin. Research on diagnosis of thermal performance of heating units in all working conditions[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
- [9] 刘晓乐. 多机组联合抽汽供热时热负荷分配优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 1.  
LIU Xiaole. Study on optimization of heat load distribution in multi CHP units combined extraction heating[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 1.
- [10] 张福祥. 热电联产机组能量梯级利用及灵活调峰运行[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 1.  
ZHANG Fuxiang. Energy cascade utilization and flexibility enhancement of the combined heat and power unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 1.
- [11] 杨承, 刘换新, 王平, 等. 燃气-蒸汽联合循环抽凝式热电联供机组调峰经济性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 592-601.  
YANG Cheng, LIU Huanxin, WANG Ping, et al. Economic analysis on peak-regulation of GTCC cogeneration unit with extraction heating[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 592-601.
- [12] 何晓燕. 热电联产机组调峰经济性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1.  
HE Xiaoyan. Research on peak regulation economy of cogeneration unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
- [13] 高建强, 宋铜铜, 张乔波, 等. 燃煤电厂碳排放对可控运行参数变化的敏感性分析[J]. 动力工程学报, 2020, 40(7): 517-522.  
GAO Jianqiang, SONG Tongtong, ZHANG Qiaobo, et al. Sensitivity analysis of carbon emission from coal-fired power plant to variation of controllable operating parameters[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(7): 517-522.
- [14] 谭超. 燃煤电厂碳排放监测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 1.  
TAN Chao. Study on monitoring methods of carbon emission in coal fired power plants[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 1.
- [15] 曹英华. 济南北郊热电厂热机组与热水锅炉供热优化运行调度[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 1.  
CAO Yinghua. Optimal operation regulation between cogeneration unit and hotwater boiler in jinan beijiao thermal power plant[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 1.
- [16] 周诗齐. 火电厂机组能耗特性分析及负荷优化分配[D]. 南京: 东南大学, 2018: 1.  
ZHOU Shiqi. The analysis of energy consumption characteristics and optimal load dispatch in thermal power unit[D]. Nanjing: Southeastern University, 2018: 1.
- [17] 王科, 陈沫. 中国碳交易市场回顾与展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2018, 20(2): 24-31.  
WANG Ke, CHEN Mo. Review and prospect of China's carbon trading market[J]. Journal Of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2018, 20(2): 24-31.
- [18] 刘楠峰, 范莉莉, 李树良, 等. 碳交易制度对企业碳减排绩效影响[J]. 系统工程, 2022, 40(3): 13-23.  
LIU Nanfeng, FAN Lili, LI Shuliang, et al. The influence

- of the carbon trading system on the enterprise' carbon emission reduction performance[J]. *Systems Engineering*, 2022, 40(3): 13-23.
- [19] 赵婧. 燃煤电厂碳排放实时监控及信息管理系统设计[J]. *电子技术与软件工程*, 2019(8): 153.  
ZHAO Jing. Design of real-time monitoring and information management system for carbon emissions in coal-fired power plants[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2019(8): 153.
- [20] 刘高军. 碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放分析与建议 [J/OL]. *洁净煤技术*: 1-8[2022-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211209.0713.012.html>.  
LIU Gaojun. Analysis and suggestion of carbon emission in thermal power plants under the background of carbon peak and carbon neutrality[J/OL]. *Clean Coal Technology*: 1-8[2022-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211209.0713.012.html>.
- [21] 宫卫平, 管洪军, 李宏伟, 等. 基于 EBSILON 仿真软件的联机供热负荷分配优化[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2021, 51(4): 77-83.  
GONG Weiping, GUAN Hongjun, LI Hongwei, et al. Optimization of heating load distribution of combined unit based on EBSILON simulation software[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2021, 51(4): 77-83.
- [22] 朱良君, 张海珍, 王世朋, 等. 基于 EBSILON 的燃气-蒸汽联合循环系统高冷负荷下供能特性分析[J]. *热力发电*, 2021, 50(2): 35-42.  
ZHU Liangjun, ZHANG Haizhen, WANG Shipeng, et al. Energy supply characteristics of gas-steam combined cycle system at high cooling load based on EBSILON[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(2): 35-42.
- [23] 石志云, 陈海平, 王忠平, 等. 热电联产机组热电成本分摊理论综述[J]. *节能*, 2012, 31(8): 12-16.  
SHI Zhiyun, CHEN Haiping, WANG Zhongping, et al. Summary of thermoelectric cost-sharing theory of cogeneration units[J]. *Energy Conservation*, 2012, 31(8): 12-16.
- [24] 李慧君, 李飞宇, 蒋长辉. 基于外部键系数的热电成本分摊比方法研究[J]. *电力科学与工程*, 2019, 35(7): 68-73.  
LI Huijun, LI Feiyu, JIANG Changhui. Study of heat-power cost apportionment method on the basis of coefficient of external bonds[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2019, 35(7): 68-73.
- [25] 陈海平, 于鑫玮, 鲁光武. 基于质量单元的热电联产机组热电分摊算法[J]. *热力发电*, 2014, 43(2): 16-19.  
CHEN Haiping, YU Xinwei, LU Guangwu. Mass unit based thermoelectric allocation algorithm for cogeneration units[J]. *Thermal Power Generation*, 2014, 43(2): 16-19.

(责任编辑 刘永强)