

# 考虑碳排放的热电解耦机组多目标负荷优化

郭喜燕, 刘嘉康, 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“双碳”目标下,热电联产机组为实现低碳灵活运行进行热电解耦改造。以某 350 MW 热电联产电厂的热电解耦改造为例,建立加装电锅炉机组模型、抽汽供热机组模型、低压缸切除机组模型,研究了改造前后机组的碳排放特性以及不同解耦方式组合后机组边界,选取了其中两种方案,分别进行以碳排放最低的单目标热电负荷优化和考虑碳排放以及收益的多目标热电负荷优化。研究表明:低压缸切除机组的供热、供电碳排放强度相比抽汽供热机组更低;抽汽供热机组耦合低压缸切除机组与加装电锅炉机组在热负荷为 400 ~ 800 MW 时有相近的电热特性;依据外界热负荷需求选择不同解耦方式有利于机组灵活运行;双机运行时 1 台机组承担主要热电负荷有助于减少机组碳排放;在文中背景下调峰收益高、碳交易收益低;机组碳排放量与机组总收益呈正比;热电解耦使机组收益随碳排放量增加更稳定。

**关键词:**热电解耦; 碳排放; 运行优化; 负荷优化

中图分类号:TM621 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.06.008

[引用本文格式] 郭喜燕, 刘嘉康, 杨志平, 等. 考虑碳排放的热电解耦机组多目标负荷优化 [J]. 热能动力工程, 2023, 38(6):68-79. GUO Xi-yan, LIU Jia-kang, YANG Zhi-ping, et al. Multi-objective load optimization of thermoelectric decoupling units considering carbon emissions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(6):68-79.

## Multi-objective Load Optimization of Thermoelectric Decoupling Units Considering Carbon Emissions

GUO Xi-yan, LIU Jia-kang, YANG Zhi-ping, WANG Ning-ling

(Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206)

**Abstract:** Under the "dual carbon" goal, cogeneration units undergo thermoelectric decoupling transformation to achieve low-carbon and flexible operation. Taking the thermoelectric decoupling transformation of a 350 MW cogeneration power plant as an example, a model of an additional electric boiler unit, a model of an extraction and heating unit and a model of a low-pressure cylinder cutting unit are established. The carbon emission changes and corresponding carbon emission characteristics of the unit before and after the transformation and the boundary of the unit after combining different decoupling methods are calculated, and two of these schemes are selected to conduct single objective thermoelectric load optimization with the lowest carbon emissions and multi-objective thermoelectric load optimization considering carbon emissions and benefits, respectively. Research shows that the carbon emission intensity of the heating and power supply of the low-pressure cylinder cutting unit is lower than that of the steam extraction heating unit; the coupling of the low-pressure cylinder cutting unit and the steam extraction heating unit has similar electric heating characteristics with installed electric boiler unit when the heat load is be-

收稿日期:2022-08-04; 修订日期:2022-10-13

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB0606202)

Fund-supported Project: National Key R & D Program (2020YFB0606202)

作者简介:郭喜燕(1975-),女,华北电力大学副教授。

通讯作者:杨志平(1968-),男,华北电力大学正高级工程师。

tween 400 MW and 800 MW; selecting different decoupling methods based on external heat load demand is beneficial for the flexible operation of the unit; when two units are running, one unit bears the main thermal and electrical loads, which helps to reduce the carbon emissions of the unit; under the background of this paper, the peak shaving benefit is high, carbon trading benefit is low; unit carbon emissions are directly proportional to the total unit revenue; thermoelectric decoupling makes the unit's revenue more stable with carbon emissions.

**Key words:** thermoelectric decoupling, carbon emission, optimal operation, load optimization

## 引言

为提升热电联产机组灵活性,电厂进行热电解耦改造。改造方式主要有加装电锅炉、高低旁路改造<sup>[1]</sup>、加装吸收式热泵<sup>[2]</sup>、加装储热罐<sup>[3]</sup>、高背压改造<sup>[4]</sup>、低压缸零出力改造光轴和切缸、加装凝背机<sup>[5-6]</sup>、低负荷燃烧、磨煤机改造、风粉优化和烟气旁路等<sup>[7-10]</sup>。

申融容等人<sup>[11]</sup>对6种电源侧热电解耦技术进行调研,对其投资成本、调峰能力、供热能力进行了对比,为解耦方式的选择提供参考。曹丽华等人<sup>[12]</sup>针对3种热电解耦技术,研究其风电消纳和煤耗,研究表明,高低旁路联合供热相比电锅炉、储热罐在风电消纳方面更优。高耀峯<sup>[13]</sup>对目前现有热电解耦系统解耦机理进行分析,并建立相应的多能互补控制系统。朱旭东等人<sup>[14]</sup>利用Aspen Plus对高低旁路供热和低压缸空载两种热电解耦方式进行建模,研究汽轮机进汽量和进汽比对解耦机组的影响。关于碳排放、碳交易相关的研究有:王振浩等人<sup>[15]</sup>对储热、电锅炉、风电场从电网角度建立了含碳交易成本的调度模型,并采用Cplex求解模型;高建强等人<sup>[16]</sup>针对电厂可控运行参数对机组碳排放强度的影响进行建模分析,研究表明,不同负荷对机组碳排放强度产生影响不同;陈旭等人<sup>[17]</sup>研究了3种碳排放计算方法和4种脱硫计算方法,结果表明,各种计算方法均有其优劣,碳平衡法相比于其他方法精确性更高。关于机组负荷优化的研究有:王珊等人<sup>[18]</sup>采用粒子群算法对热电联产电厂的热电负荷进行优化;吴涛等人<sup>[19]</sup>在拟合机组煤耗曲面基础上,利用遗传算法求解深度调峰背景下热电联产机组的负荷优化;宫卫平等<sup>[20]</sup>人基于EBSILON软件拟合得到

机组总煤耗与负荷的关系,为确定机组最佳负荷提供支持;张璇等人<sup>[21]</sup>基于EBSILON软件建立双抽机组模型,利用增强解释机拟合机组热耗,在此基础上对机组的典型日负荷进行优化<sup>[21]</sup>。

综上所述,关于机组热电解耦的研究主要集中在机组经济性,对热电解耦改造后机组的碳排放特性缺乏研究;对“碳”经济性的研究较少,对于机组热电负荷优化,优化目标为传统经济指标缺少与“碳”相关的负荷优化。因此,对热电解耦改造后机组的碳排放特性和经济性进行研究,并在此基础上进行热电负荷优化,具有重要意义。

本文选择加装电锅炉和低压缸切除两种常见热电解耦改造,利用EBSILON仿真软件建立机组模型,结合python程序采用排放因子法对传统抽汽机组、低压缸切除机组和加装电锅炉机组的碳排放量进行计算,得到对应机组全工况碳排放分布。采用热量法对机组的碳排放进行分摊,对比得到机组解耦前后供热、供电碳排放强度变化。针对双机运行时,传统抽汽供热机组、加装电锅炉机组和低压缸切除机组3种机组两两组合后的供热系统进行研究,得到对应供热边界、特性以及供热方案。最后,采用差分进化算法,以碳排放最低为目标对双机运行时热电负荷分配进行优化求解;采用多目标优化算法综合考虑机组收益以及碳排放,对双机运行时热电负荷进行优化求解,得到单目标和多目标对应的负荷分配原则。

## 1 系统介绍

### 1.1 电锅炉实现热电解耦

电锅炉供热原理如图1所示,电锅炉将一部分电能转化为热能加入热网补充供热,实现热电解耦。电锅炉的运行效率高,对原系统影响小,能按照需求

灵活选择容量。但电锅炉将电能转化为热能,能量高位低用。

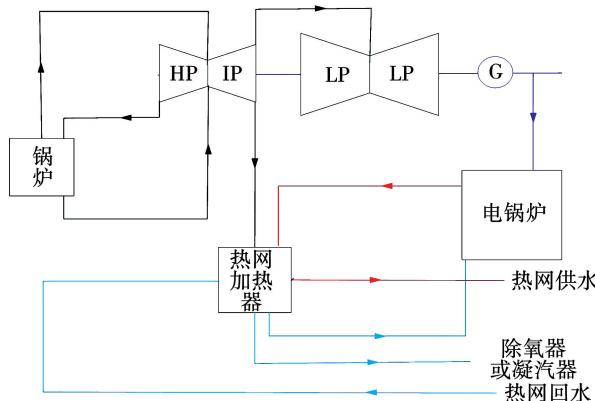


图 1 电锅炉实现热电解耦原理

Fig. 1 Principle of thermoelectric decoupling for electric boiler

加装电锅炉后机组的电热特性变化如图 2 所示。机组的下边界向下延伸。热负荷为  $Q$  时机组的调峰宽度由  $E_{\max} - E_{\min}$  变为  $E_{\max} - E_1$ , 在相同热负荷下拓宽  $E_{\min} - E_1$ , 延伸区域电能转化为热能, 补充机组供热能力。

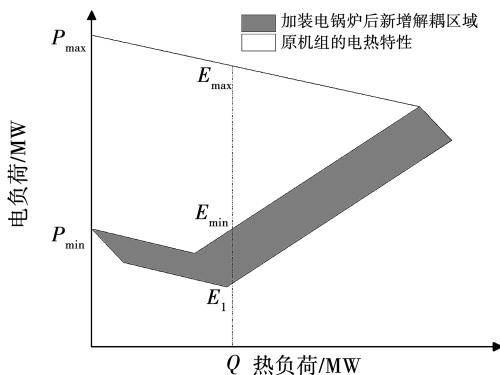


图 2 增设电锅炉后机组的电热特性变化

Fig. 2 Electric heating characteristic change of the unit after adding electric boiler

## 1.2 低压缸切除实现热电解耦

切除低压缸实现热电解耦原理如图 3 所示。蒸汽在中压缸做完功后,大部分蒸汽进入热网加热器进行供热,保留一部分蒸汽冷却低压缸。机组最低电负荷不再受低压缸最小冷却流量限制,受锅炉侧最低稳燃负荷限制。机组电热特性如图 4 所示。

原机组运行在 ABCD 区域内,当机组热负荷为  $Q$  时最大电负荷为  $E_{\max}$ , 最小电负荷为  $E_{\min}$ 。机组可以调节的范围为  $E_{\max} - E_{\min}$ 。低压缸切除后机组变为背压机组,机组的供热能力与电负荷呈现线性关系,机组运行特性变为 EF 直线。

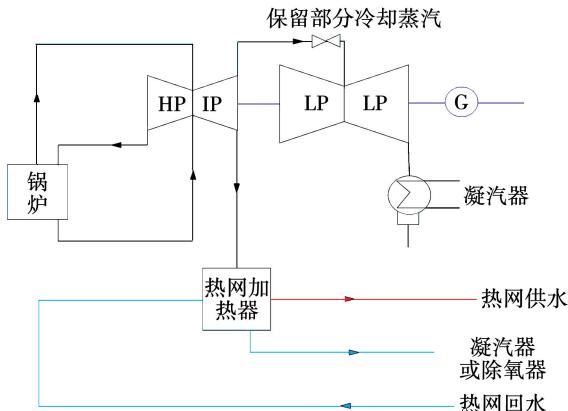


图 3 低压缸切除实现热电解耦原理

Fig. 3 Principle of thermoelectric decoupling realized by LP cylinder cutting

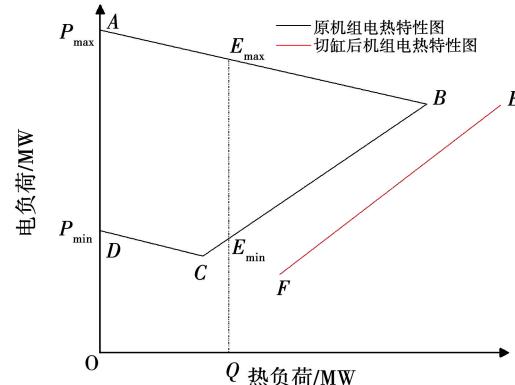


图 4 切缸后机组电热特性图

Fig. 4 Electric heating characteristic drawing of the unit after cylinder cutting

## 2 碳排放特性计算及热电负荷优化

### 2.1 机组碳排放特性及经济性计算

机组碳排放量计算采用碳排放因子法。碳排放因子法根据燃料特性及机组燃料消耗量求得机组碳排放量。机组的碳排放量以及碳排放配额计算公式为<sup>[22]</sup>:

$$A_a = \sum_{i=1}^n (AD_i \times EF_i)$$

$$i = 1, 2, 3 \dots n \quad (1)$$

式中: $A_a$ —化石燃料燃烧的排放量,t; $AD_i$ —第*i*种化石燃料的活动数据,GJ; $EF_i$ —第*i*种化石燃料的二氧化碳排放因子,t/GJ。

$$A = A_e + A_h \quad (2)$$

式中: $A$ —碳排放配额,t; $A_e$ —机组供电碳排放配额,t; $A_h$ —机组供热碳排放配额,t。

### 2.1.1 机组碳排放配额计算及碳交易

排放配额由机组类型、发电量和供热负荷决定。机组排放低于配额电厂可以售出配额获利;机组排放超出配额,电厂应当及时购入配额避免排放超额的处罚。热电联产电厂应当关注机组在全工况的排放及时购入或售出排放配额,进而通过碳交易获利。

$$C_{CO_2} = \sum_{i=1}^l C(A_a - A) \quad (3)$$

式中: $C_{CO_2}$ —碳交易收益,元; $C$ —碳价,元/t; $l$ —发电厂机组数量,台。

### 2.1.2 机组调峰经济性及总收益计算

热电联产机组的调峰目前已经有较多研究,机组调峰经济性计算模型为<sup>[23]</sup>:

$$C_{pv} = \begin{cases} tC_{p1}(P_{01}-P), P_{02} \leq P \leq P_{01} \\ tC_{p1}(P_{01}-P)+tC_{p2}(P_{02}-P), P_{03} \leq P \leq P_{02} \\ tC_{p1}(P_{02}-P_{01})+tC_{p2}(P_{02}-P_{03})+tC_{p3}(P_{02}-P), P_{03} \geq P \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C_{pv}$ —机组调峰补偿费用,元; $P$ —机组电负荷,MW; $P_{01}$ 、 $P_{02}$ 、 $P_{03}$ —机组三档调峰补偿边界,MW; $C_{p1}$ 、 $C_{p2}$ 、 $C_{p3}$ —机组一档、二档、三档调峰补偿报价,元/(kW·h); $t$ —调峰时间,h。

结合碳交易模型、调峰模型和机组的供热供电收益模型得到机组总收益函数:

$$C_z = C_{re} + C_{dian} + C_{pv} - C_{fuel} + C_{CO_2} \quad (5)$$

式中: $C_z$ —机组总收益,元; $C_{re}$ —机组供热收益,元; $C_{dian}$ —机组供电收益,元; $C_{fuel}$ —机组燃料成本,元。

### 2.1.3 案例机组参数及 EBSILON 模型

350 MW 超临界一次中间再热间接空冷抽汽凝汽式汽轮发电机组,机组型号 CJK350-24.2/0.4/566/566,单炉膛平衡通风、II型布置、全钢架悬吊结构直流煤粉锅炉。机组额定抽汽量 380 t/h,最大抽

汽量 550 t/h。1 台电锅炉,容量 40 MW,转换效率 99%,0~100% 全负荷调节。切缸后机组低压缸保持 20 t/h 的冷却蒸汽流量<sup>[24]</sup>。供热压力 0.4 MPa。利用 EBSILON 仿真软件建立抽汽机组模型、加装电锅炉机组模型和低压缸切除机组模型,分别对应图 5、图 6、图 7,对抽汽供热机组模型校核,最大误差为 5%,满足经济性计算要求。如表 1 所示。

求解假设和边界参数:(1) 假设煤中碳硫完全转化不考虑漏风漏粉,锅炉效率维持稳定。不考虑厂用电带来的影响。(2) 计算收益为 1 h 内收益,2021 年我国碳价在 40~60 元,取中间价格将碳价定为 50 元/t<sup>[25]</sup>。(3) 案例机组所使用煤炭含碳量为 42.68%、含硫量为 0.8%、收到基 160 20 kJ/kg、煤价为 450 元/t,电价为 0.286 元/(kW·h),供热价格 19 元/GJ。(4) 调峰补偿分为 4 个区间段,机组负荷大于 70% 没有补偿,负荷在 70%~50% 对应补偿价格为 300 元/(MW·h),负荷在 50%~40% 对应补偿价格为 400 元/(MW·h),负荷在 40% 以下对应补偿价格为 500 元/(MW·h)。

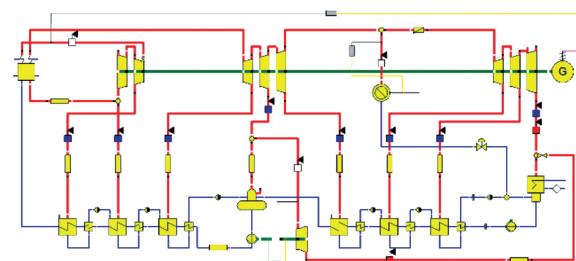


图 5 抽汽供热建模图

Fig. 5 Steam extraction heating modeling diagram

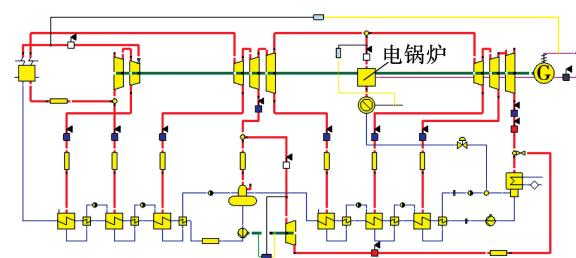


图 6 加装电锅炉机组建模图

Fig. 6 Modeling diagram of installed electric boiler unit

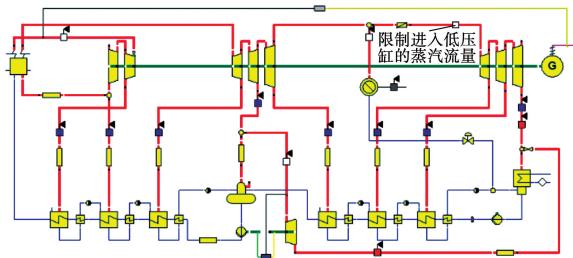


图 7 切除低压缸机组建模图

Fig. 7 Modeling diagram of LP cylinder cutting unit

表 1 模型校核

Tab. 1 Model verification

负荷/ MW	机组设计热耗/ kJ/(kW·h) <sup>-1</sup>	仿真热耗/ kJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	误差
350	8 036.4	8 091.3	0.006 831
297.5	8 079.3	8 186.9	0.013 317
262.5	8 225.6	8 270.8	0.005 495
175	8 424.5	8 766.5	0.040 595
140	8 672.9	9 085.4	0.047 561

## 2.2 基于差分进化的机组负荷优化算法模型

### 2.2.1 差分进化算法及改进初始种群

差分进化算法在遗传算法的基础上发展而来,通过模拟自然界中基因变异、杂交、选择来寻找问题的最优解。差分进化算法在约束内随机生成初始种群,当约束多时求解变差。为此建立缩放函数对初始的种群进行修正,使其满足总负荷需求,提高算法的效率。

### 2.2.2 求解的目标函数

$$\max C_z = C_{re} + C_{dian} + C_{pv} - C_{fuel} + C_{CO_2} \quad (6)$$

$$\min A_a = \sum_i^n (AD_i \times EF), i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

### 2.2.3 求解的约束

供热约束:

$$\begin{cases} Q_z \leq \sum_j^i Q_j, & j = 1, 2, 3, \dots, i \\ Q_{\min} \leq Q_j \leq Q_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $Q_z$ —总热负荷, MW;  $Q_j$ — $j$  号机组提供的热负荷, MW;  $Q_{\max}$ — $j$  号机组提供最大供热功率, MW;  $Q_{\min}$ — $j$  号机组提供最小供热功率, MW。

供电约束:

$$\begin{cases} P_z \leq \sum_j^i P_j, & j = 1, 2, 3, \dots, i \\ P_{\min} \leq P_j \leq P_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_z$ —总电负荷, MW;  $P_j$ — $j$  号机组提供的电负荷, MW;  $P_{\min}$ — $j$  号机组功率的下限, MW;  $P_{\max}$ — $j$  号机组功率的上限, MW。

机组特性约束:

$$F_i(Q) \leq P \leq F_j(Q) \quad (10)$$

式中:  $Q$ —机组的供热负荷, MW;  $F_i, F_j$ —机组的特性函数, 是机组热负荷为  $Q$  时对应的机组边界;  $i, j$ —机组在不同区域的边界函数标号。

### 2.2.4 求解的优化流程

优化方法为差分进化算法, 根据外界的热电负荷需求, 进化算法随机生成机组供热供电的组合, 对这些组合进行筛选, 保留满足机组电热特性的组合。将这些组合传入 EBSILON 仿真软中, 通过软件计算机组能耗, 将计算结果返回程序中, 程序对传回数据进行二次计算, 保留收益高、碳排放低的组合, 而后进行变异重组, 将重组后的供热供电组合重复进行上面的流程, 直到满足迭代次数。求解流程如图 8 所示。

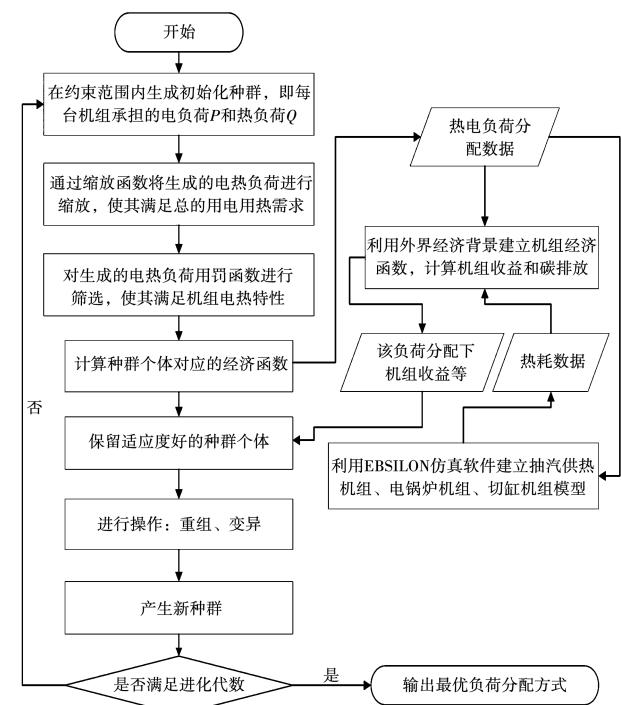


图 8 机组求解流程图

Fig. 8 Unit solution flow chart

### 3 结果分析

#### 3.1 机组的碳排放特性

低压缸切除后机组的碳排放量和增设电锅炉后机组碳排放量及原机组的碳排放量分布如图9所示。

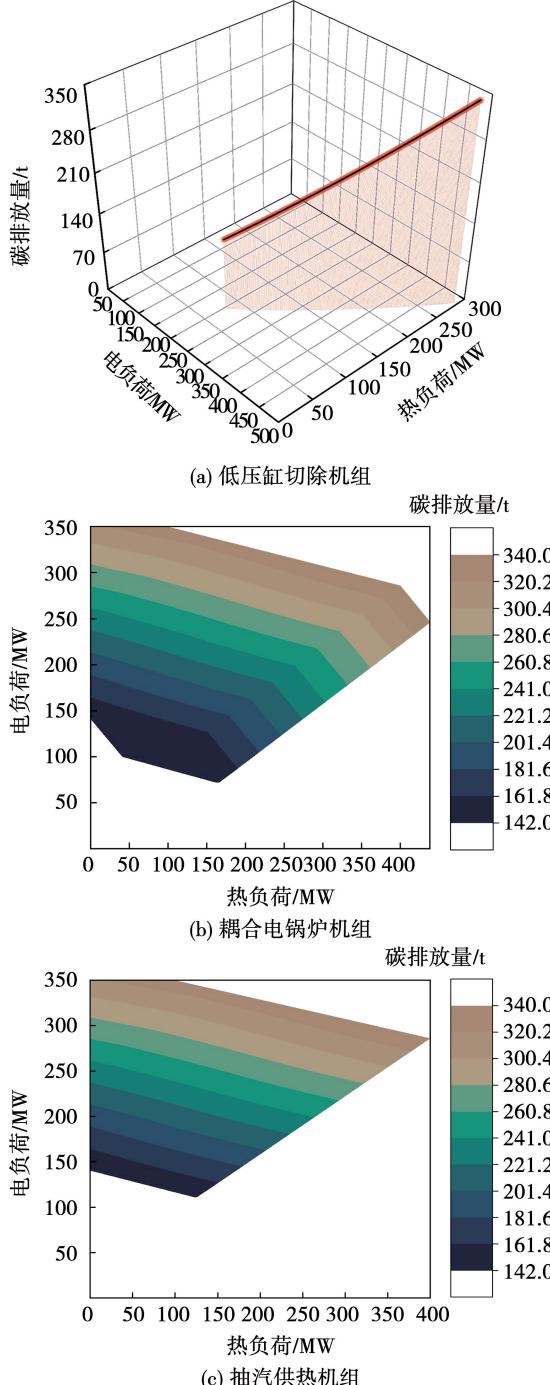


图9 3种供热机组CO<sub>2</sub>排放量分布

Fig.9 Carbon dioxide emission distribution of three types of heating units

高机组排放总量越高,高负荷区域机组效率高,单位电量对应碳排放少。由图9可知,加装电锅炉对机组碳排放量上界没有影响,解耦前机组碳排放边界为(141 t,333 t),加装电锅炉后边界变为(128 t,333 t)。低压缸切除后机组排放边界为(128 t,346 t)。加装电锅炉把一部分电能转化为热能,实现热电解耦。低压缸切除从汽机侧直接引出蒸汽供热,循环中蒸汽做功改变,机组碳排放边界改变。

#### 3.2 基于热量法的热电碳排放分摊

热电分摊作为衡量机组供热供电经济性的方法,目前已经有较多的研究,分摊方法有:基于热力学第一定律的热量法、基于热力学第二定律的方法、外部系数法、实际焓降法等。其中,热量法由于简单直观有较广应用。为进一步分析机组解耦前后碳排放量变化,本文将热量法应用于机组碳排放,来衡量解耦前后机组供热供电碳排放量的变化。热量法进行分摊的基本原理:

$$a = Q_r/Q_z \quad (11)$$

式中: $a$ —热电分摊比; $Q_r$ —供热热耗量,kJ/h; $Q_z$ —总热耗量,kJ/h。

选取部分热电负荷求解得到表2。

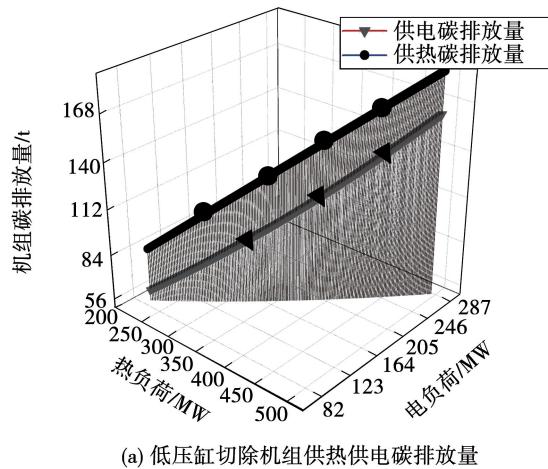
表2 部分负荷下,机组供电供热碳排放强度计算结果

Tab.2 Calculation results of carbon emission intensity of the heating and power supply of unit at partial load

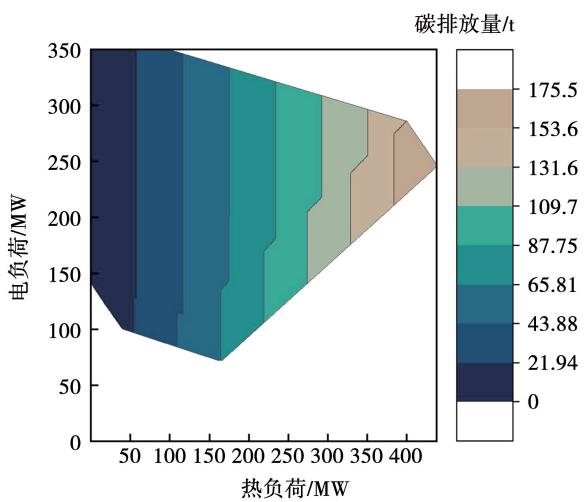
机组类别	热负荷/MW	电负荷/MW	单位电量CO <sub>2</sub> 排放量/t·MW <sup>-1</sup>	单位热量CO <sub>2</sub> 排放量/t·MW <sup>-1</sup>
抽汽	100	300	0.840 6	0.375 056
供热	200	300	0.778 1	0.375 094
机组	270	210	0.702 77	0.375 112
加电	270	310	0.734 873	0.375 182
锅炉	80	100	1.127 099	0.400 987
机组	180	100	0.924 05	0.400 679
	300	160	0.765 95	0.399 934
	300	260	0.718 569	0.375 071
切缸	239	100	0.619 712	0.376 017
机组	387	200	0.571 628	0.375 097
	479	270	0.566 53	0.375 198

由表2可知,单位热量CO<sub>2</sub>排放量稳定,单位电量CO<sub>2</sub>排放量波动大。因为抽汽供热是将热量直接利用,能量损失小,而蒸气发电热量中间转化能量损失大,并且受机组效率影响,供电CO<sub>2</sub>波动大。通过图10可得,供热CO<sub>2</sub>变化随机组热负荷上升线性变化,供电CO<sub>2</sub>随供热的变化为斜线。低压缸

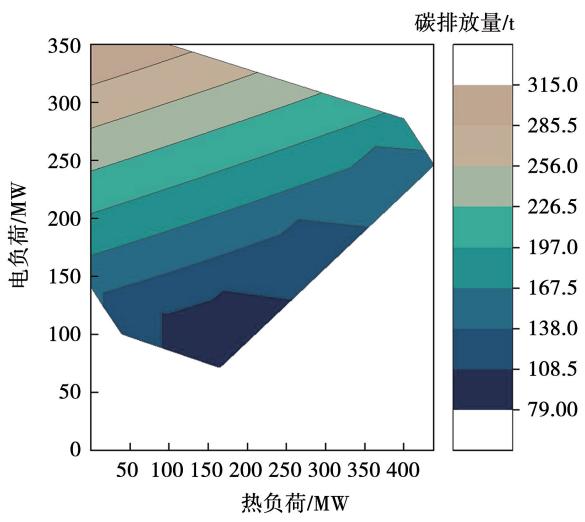
切除后机组供电  $\text{CO}_2$  排放量降低, 并且随着热负荷和电负荷的升高, 单位电量和单位热量的碳排放量进一步降低, 因为切缸后机组变为背压机组, 排汽大部分用于供热, 少部分用于冷却低压缸, 冷源损失少, 机组经济性高。综上所述, 供热有助于降低机组碳排放, 低压缸切除改造有利于机组低碳运行。



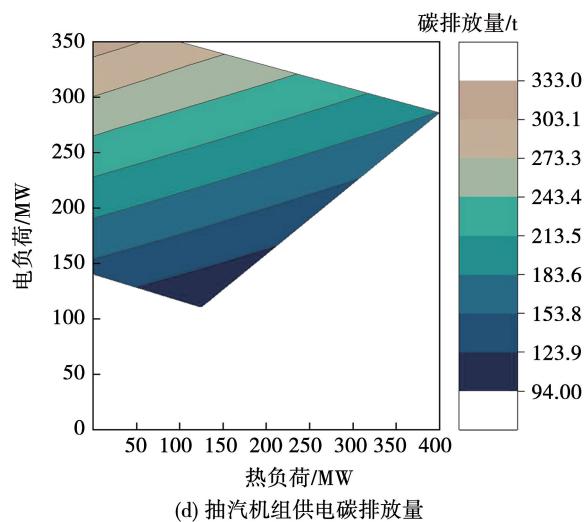
(a) 低压缸切除机组供热供电碳排放量



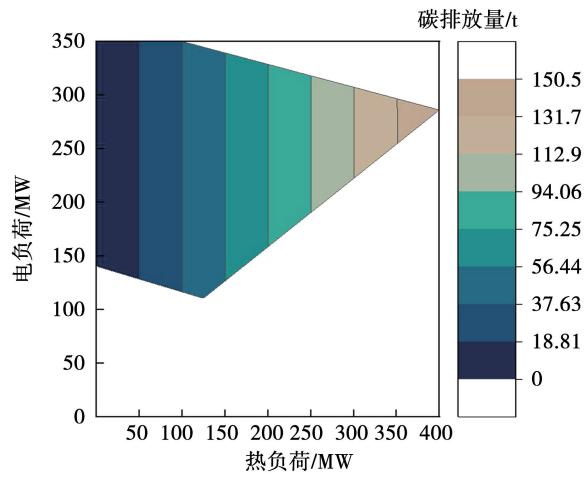
(b) 电锅炉机组供热碳排放量



(c) 电锅炉机组供电碳排放量



(d) 抽汽机组供电碳排放量



(e) 抽汽机组供热碳排放量

图 10 基于热量法的机组供热供电碳排放分布

Fig. 10 Carbon emission distribution of heating and power supply of unit based on heat method

### 3.3 供热组合方案

#### 3.3.1 5 种解耦供热方案对比

表 3 为 5 种供热方案电热特性对比。在表 3 中, 各种方案上、下边界为机组的上、下边界之和。方案 1 为 1 台机组背压运行, 中压缸排汽需要用于供热, 否则会造成能量损失, 导致机组最低供热负荷上升。方案 2 为两台抽汽机组均可纯凝运行, 1 台机组耦合电锅炉后将电能转化为热能, 机组达到更低的电负荷和更高热负荷, 限制机组供热能力提高的原因为电锅炉容量。方案 3 为抽汽机组耦合电锅炉和切缸机组, 限制机组供热下边界的原因是低压缸切除机组的最低供热限制, 影响机组供热上边界的原因因为电锅炉容量和低压缸切除机组的供热能力。方案 4 为两台低压缸切除机组耦合电锅炉, 限

制机组供热下边界的原因,背压机组的最低供热负荷,限制上边界的原因为电锅炉容量。方案5中限制机组供热能力的是低压缸切除机组的电热特

性。低压缸切除为一种成本较低的热电解耦改造方式,加装电锅炉可以保留原机组运行区域并添加新的运行区域,同时没有背压运行最低热负荷的约束。

表3 5种供热方案电热特性对比

Tab. 3 Comparison of electrothermal characteristics of five heating schemes

解耦方案	解耦组合方式	解耦成本	最低电负荷/MW	最高电负荷/MW	最低热负荷/MW	最高热负荷/MW
1	抽+切	最低	201	656	222	890
2	抽+抽+电	低	182	742	0	839
3	抽+切+电	高	161	656	222	929
4	切+切+电	最高	140	570	444	1019
5	切+切	中	180	570	444	980

### 3.3.2 6种供热方案的热电边界及调峰能力

通过进化算法对上述供热方案电热边界进行计算得到图11。

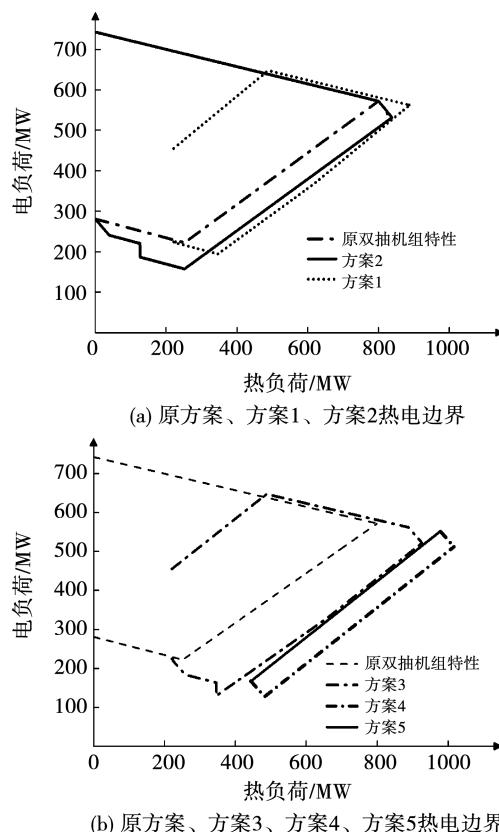


图11 5种供热方案电热特性边界图

Fig. 11 Boundary diagram of electrothermal characteristics of five heating schemes

由图11可知,原机组上边界与加装电锅炉后机组的上边界重合。方案1在热负荷400~800 MW

与方案2有相近的电热特性,但方案2在热负荷0~200 MW可以运行,方案1在这个区间受最低供热负荷限制无法运行。同时,方案1在高电负荷区域无法满足需求。方案5机组失去调峰灵活性,此时如果加入电锅炉或者储热罐可以新增一部分灵活运行区间,宽度为解耦部件的容量。对比方案2和方案3的下边界,耦合电锅炉机组最低热电负荷呈现波动变化,第1段,电锅炉供热,另1台机组不供热;第2段,电锅炉达到最大供热能力,另1机组加入供热;第3段,1台机组达到供热工况下最低电负荷保持不动,电锅炉机组承担多余供热量;第4段,两台机组均达到供热工况下的最低电热负荷后,机组下边界开始上升。

部分方案调峰宽度随热负荷的变化趋势如图12所示。方案5机组失去调峰灵活性,调峰宽度为零。由图12可知,原方案供热调峰宽度集中在热负荷0~220 MW后迅速下降。结合图11可得双抽汽供热调节范围主要集中于高电负荷低热负荷区域,与供热初期和末期情况一致,在供热初期和末期双抽机组供热可保证调峰宽度。抽汽机组耦合低压缸切除机组,机组失去承担高电负荷的能力,但机组的调峰能力增强。同时,机组在热负荷为220~650 MW具有较宽的调节宽度。该方案在中、高热负荷下保持较高的调峰宽度,同时机组向下调节能力增强。两台机组进行低压缸切除机组适合于承担高热负荷,当热负荷上升对应电负荷上升,在“以热定电”背景下不利于电网稳定。

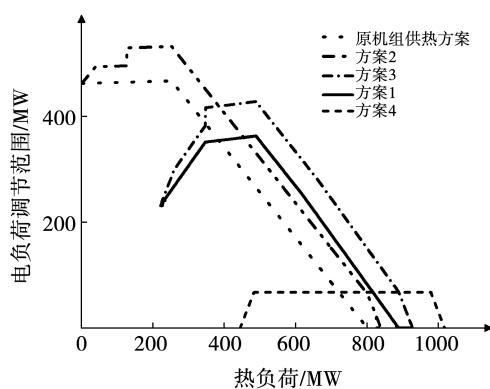


图 12 部分方案对应机组调峰宽度特性图

Fig. 12 Peak load regulation width characteristics of units corresponding to some schemes

对比上述几种供热方案,每种都有其优劣,没有完美的热电解耦方案。但可以通过机组间的互相耦合寻找合适的运行方案,在运行中根据当地热负荷需求改变解耦方案的投运有助于机组灵活运行。例如:在供热初期、末期双抽汽供热,在供热中期抽汽供热耦合 1 台切缸机组,在高峰期双切缸运行。如需要提升深度调峰能力可以适当选择电锅炉保证机组安全,同时增强向下调节能力。

### 3.4 考虑碳排放特性及经济性的热电负荷优化

#### 3.4.1 考虑碳排放最低的单目标优化

在上述几种方案中,方案 4 和 5 调节宽度窄,机组背压运行调节范围小。本文针对原机组供热方案和解耦方案 1,2 进行了以碳排放最低为目标的单目标优化。取点位置如图 13 所示,选取调峰边界线 490 MW 这条线,采用均匀取点分别考虑热负荷为 300,500 和 700 MW 点进行优化求解。

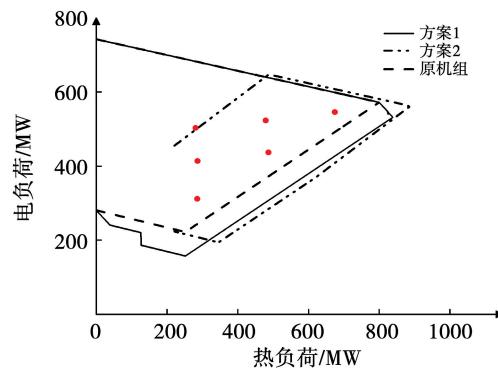


图 13 优化点在区间的分布图

Fig. 13 Distribution of optimization points in the interval

表 4 热电负荷优化结果  
Tab. 4 Results of thermoelectric load optimization

热负荷/ MW	电负荷/ MW	方案 1			方案 2			原机组		
		抽汽供热 机组/MW	加装电锅炉 机组/MW	碳排放量/ t	抽汽供热 机组/MW	低压缸切除 机组/MW	碳排放量/ t	抽汽供热 机组/MW	抽汽供热 机组/MW	碳排放量/ t
300	300	电 122	电 178	356.5	电 162	电 138	354.2	电 122	电 178	356.5
		热 70	热 230		热 0	热 300		热 70	热 230	
300	400	电 140	电 260	436.1	电 310	电 90	433.5	电 140	电 260	436.1
		热 0	热 300		热 78	热 222		热 0	热 300	
300	490	电 255	电 235	509.16	电 367	电 123	510.46	电 255	电 235	509.16
		热 0	热 300		热 23	热 277		热 0	热 300	
500	400	电 116	电 283	472.4	电 134	电 266	470.12	电 116	电 283	472.4
		热 103	热 396		热 28	热 472		热 103	热 396	
500	490	电 205	电 285	545.9	电 205	电 285	543.03	电 205	电 285	545.9
		热 100	热 400		热 5	热 495		热 100	热 400	
700	490	电 243	电 247	589.21	电 205	电 285	580.3	—	—	—
		热 360	热 340		热 205	热 495		—	—	

以碳排放量最低为目标进行热电负荷优化,得到结果如表 4 所示。由表 4 可知,原供热方案与方案 1 对比,优化结果一致。所选点电锅炉没有投运。

加装电锅炉只有在解耦区域才会投运。电锅炉是高位能低用,在非解耦区域运行不利于降低碳排放。

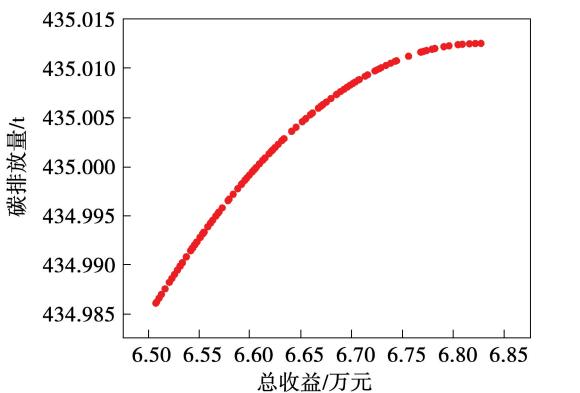
对比方案 2 和方案 1 的优化结果,热负荷在

300 和 500 MW 时,方案 2 的碳排放量低于方案 1,热负荷为 700 MW 时方案 2 碳排放量比方案 1 减少 9 t 左右。切缸机组耦合抽汽供热机组碳排放量更少,与前文关于单台机组碳排放的研究一致。

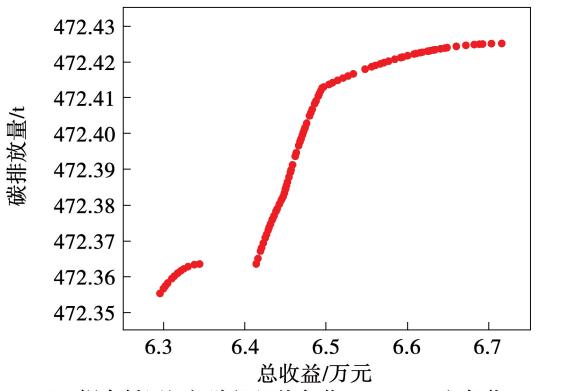
分配方案为单台机组承担大部分热负荷,不足部分由另一台机组进行补齐。这种分配方式有助于机组实现低碳运行。

### 3.4.2 考虑低碳和经济性的多目标优化

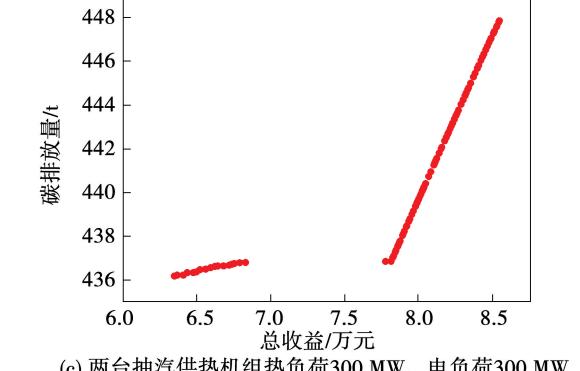
以机组碳排放量最低和总收益最高进行多目标优化,求解设置为:采用 RI 编码,种群规模 100,进化代数为 300 代,变异和交叉概率采用默认值。求解结果分为 3 种:无解、唯一解、多个解。选取部分有多个解的热电负荷组合,如图 14 所示。



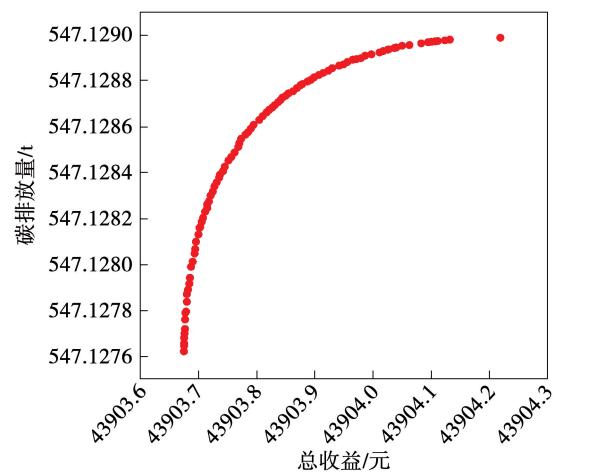
(a) 耦合低压缸切除机组热负荷300 MW、电负荷300 MW



(b) 耦合低压缸切除机组热负荷300 MW、电负荷400 MW



(c) 两台抽汽供热机组热负荷300 MW、电负荷300 MW



(d) 两台抽汽供热机组热负荷300 MW、电负荷400 MW

图 14 多目标优化求解图

Fig. 14 Multi-objective optimization solution diagram

通过图 14 可得,热电负荷需求相同,机组碳排放量与机组收益呈正相关。以图 14 中的 a 图为例,碳排放量相差 0.1 t 机组收益变化约 3 500 元。通过文献[26]得机组不同收益在不同负荷区间占比不同。在文中背景下调峰收益占比高于碳交易收益,调峰运行时机组效率低、碳排放量高,同时机组承担电负荷,在经过调峰补偿边界时机组收益会突然上升或者下降,故在图 14 中机组收益出现跃升,而碳排放量连续变化。

热电解耦改造没有改变机组碳排放量随收益的变化趋势。

## 4 结 论

(1) 电锅炉在提升机组低热负荷区的灵活性效果明显,但低碳性较差。低压缸切除后机组变为背压机,机组失去调峰灵活性,但供热、供电碳排放均下降,低碳性好。该改造有利于降低碳排放。

(2) 根据外界需求灵活选择解耦方式,有助于保证机组的调峰宽度、降低热电解耦成本。

(3) 单目标优化结果表明,单台机组承担主要热负荷,另一台机组承担剩余负荷有助于机组低碳运行。

(4) 多目标优化结果表明,文中背景下,碳排放量与机组收益呈正比。热电解耦没有改变机组碳排放与收益的关系。

## 参考文献:

- [1] 薛朝囡, 杨荣祖, 王 汀, 等. 汽轮机高低旁路联合供热在超临界 350 MW 机组上的应用 [J]. 热力发电, 2018, 47(5): 101–105.  
XUE Chao-nan, YANG Rong-zu, WANG Ting , et al. Application of turbine HP-LP bypass system combining with heating in supercritical 350 MW unit [ J ]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5):101 – 105.
- [2] 鲁敬妮, 屠 珊, 王红娟, 等. 吸收式热泵回收机组余热经济性分析 [J]. 热力发电, 2017, 46(2): 136–140.  
LU Jing-ni, TU Shan, WANG Hong-juan, et al. Economical efficiency of waste heat recovery from a 12 MW steam turbine by absorption heat pump[ J ]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 136 – 140.
- [3] 金国强, 高耀岗, 张丽霞. 储热罐改造对供热机组热电解耦及调峰能力的影响研究 [J]. 汽轮机技术, 2021, 63 (2): 133 – 136, 14.  
JIN Guo-qiang, GAO Yao-kui, ZHANG Li-xia. Research on the effect of heat storage tank reconstruction on decoupling and peaking capacity of CHP units [ J ]. Turbine Technology, 2021, 63 (2) : 133 – 136, 14.
- [4] 姚纪伟, 邵 峰, 谭 锐. 高背压供热机组全厂负荷优化调度的试验研究 [J]. 汽轮机技术, 2019, 61(5): 371 – 374.  
YAO Ji-wei, SHAO Feng, TAN Rui. Experimental research on load optimal scheduling of high back pressure heating steam turbine units[ J ]. Turbine Technology, 2019, 61(5):371 – 374.
- [5] 李宏卫, 王智刚. 新型凝背机配套热网凝汽器的分析和应用 [J]. 汽轮机技术, 2021, 63(3): 183 – 184, 200.  
LI Hong-wei, WANG Zhi-gang. The analysis and application of heat net condenser for the new type of condensing back-pressure turbine[ J ]. Turbine Technology, 2021, 63(3);183 – 184, 200.
- [6] 安 宁, 叶 鹏, 关多娇, 等. 热电机组电热解耦应用研究综述 [J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2019, 15(4): 354 – 359, 372.  
AN Ning, YE Peng, GUAN Duo-jiao, et al. Summary of application research on electrothermal decoupling of thermal power units [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering ( Natural Science ), 2019, 15(4):354 – 359,372.
- [7] 刘建浩, 李战国, 马乐乐, 等. 贫煤锅炉灵活性调峰优化调整研究 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(1):124 – 131.  
LIU Jian-hao, LI Zhan-guo, MA Le-le, et al. Study on optimal adjustment of flexibility peak load regulation of lean coal boiler[ J ]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(1): 124 – 131.
- [8] 洪 军, 刘志刚, 周 科, 等. 660 MW 机组超临界锅炉灵活性调峰技术试验研究 [J]. 锅炉技术, 2021, 52(2):55 – 59.  
HONG Jun, LIU Zhi-gang, ZHOU Ke, et al. Experimental study on the technology of enhancing the flexibility of a 660 MW supercritical boiler[ J ]. Boiler Technology, 2021,52(2):55 – 59.
- [9] 陆 陆, 牟文彪, 杨 敏, 等. 基于磨煤机电源配置的火电机组低负荷煤量平衡控制研究 [J]. 能源工程, 2021(3):20 – 24.  
LU Lu, MOU Wen-biao, YANG Min, et al. Research on coal quantity control of thermal power unit based on coal distribution balance of pulverizer power supply [ J ]. Energy Engineering, 2021(3):20 – 24.
- [10] 纪连举, 包伟伟, 袁建丽, 等. 低压缸切缸技术改造若干问题探讨 [J]. 汽轮机技术, 2021, 63(3):235 – 237,240.  
JI Lian-ju, BAO Wei-wei, YUAN Jian-li, et al. Discussion on some problems to be paid attention to in the reformation of low pressure cylinder cutting[ J ]. Turbine Technology, 2021, 63(3) : 235 – 237 ,240.
- [11] 申融容, 玄婉玥, 张 健, 等. 面向电源侧灵活性提升的热电解耦技术综述 [J]. 中国能源, 2021, 43(5) :51 – 59.  
SHEN Rong-rong, XUAN Wan-yue, ZHANG Jian, et al. Overview of thermoelectric decoupling technology for improving power side flexibility[ J ]. Energy of China,2021,43(5) :51 – 59.
- [12] CAO Li-hua, WANG Zhan-zhou, PAN Tong-yang, et al. Analysis on wind power accommodation ability and coal consumption of heat-power decoupling technologies for CHP units [ J ]. Energy, 2021,231:120833.1 – 120833.12.
- [13] 高耀岗. 火电机组灵活运行控制关键技术研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2019.  
GAO Yao-kui. Research on key technologies of flexible operation control of thermal power units[ D ]. Beijing: North China Electric Power University,2019.
- [14] 朱旭东, 马红和, 韩 洋. 300 MW 亚临界机组的热电解耦模式对比 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(7):141 – 148.  
ZHU Xu-dong, MA Hong-he, HAN Yang. Comparison and economic evaluation of thermo-electric decoupling modes of 300 MW subcritical unit [ J ]. Clean Coal Technology, 2022, 28 ( 7 ) : 141 – 148.
- [15] 王振浩, 许京剑, 田春光, 等. 计及碳交易成本的含风电电力系统热电联合调度 [J]. 太阳能学报, 2020, 41 ( 12 ) : 245 – 253.  
WANG Zhen-hao, XU Jing-jian, TIAN Chun-guang, et al. Combined heat and power scheduling strategy considering carbon trading cost in wind power system[ J ]. Acta Energiae Solaris Sinica,2020,41(12):245 – 253.
- [16] 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 – 522,555.

- GAO Jian-qiang, SONG Tong-tong, ZHANG Qiao-bo, 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, 555.
- [17] 陈旭, 杜涛, 李刚, 等. 吸附工艺在碳捕集中的应用现状 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1): 155–163.
- CHEN Xu, DU Tao, LI Gang, et al. Application of adsorption technology on carbon capture [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 155–163.
- [18] 王珊, 刘明, 严俊杰. 采用粒子群算法的热电厂热电负荷分配优化 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(9): 159–166.
- WANG Shan, LIU Ming, YAN Jun-jie. Optimizing heat-power load distribution of thermal power plants based on particle swarm algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9): 159–166.
- [19] 吴涛, 赖菲, 刘震, 等. 热电联产机组在深度调峰模式下的负荷智能分配 [J]. 热力发电, 2021, 50(9): 119–127.
- WU Tao, LAI Fei, LIU Zhen, et al. Intelligent load distribution of cogeneration units in deep peak regulation mode [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(9): 119–127.
- [20] 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 Wei-ping, GUAN Hong-jun, LI Hong-wei, 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.
- [21] 张璇, 钟文琪, 石岩, 等. 双抽热电机组–抽背热电机组双机联合运行特性及优化研究 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1–14. [2022–07–01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220225.1516.008.html>.
- ZHANG Xuan, ZHONG Wen-qi, SHI Yan, et al. Research on combined operation characteristics and optimization of CC-CB co-generation units [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1–14. [2022–07–01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220225.1516.008.html>.
- [22] 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 [2022–07–01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211209.0713.012.html>.
- LIU Gao-jun. 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 [2022–07–01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211209.0713.012.html>.
- [23] 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.
- HE Xiao-yan. Research on peak regulation economy of cogeneration unit [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [24] 陈永辉, 包伟伟, 张敏, 等. 超临界350 MW 机组低压缸切缸技术冷却蒸汽热力分析 [J]. 热力发电, 2019, 48(5): 133–138.
- CHEN Yong-hui, BAO Wei-wei, ZHANG Min, et al. Thermodynamic analysis of LP cylinder cooling steam of a supercritical 350 MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(5): 133–138.
- [25] 周杰俣, 崔莹, 等. 2021年中国碳市场年报 [R]. 北京:中央财经大学绿色金融国际研究院, 2022: 1–22.
- ZHOU Jie-yu, CUI Ying, et al. Annual report of china's carbon market in 2021 [R]. Beijing: International Institute of Green Finance, CUFE, 2022: 1–22.
- [26] 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 Xi-yan, LIU Jia-kang, 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.

(姜雪梅 编辑)