



基于“热-电-碳”三储综合能源系统参数设计及性能分析

卫宏强¹, 罗桂平¹, 张仕豪², 刘天浩³, 程晓博⁴, 曹斌⁵

(¹华驰动能(北京)科技有限公司, 北京 101111; ²华北理工大学建筑工程学院, ³华北理工大学冶金工程学院, 河北 唐山 063210; ⁴河钢集团矿业有限公司, 河北唐山 063700; ⁵中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘要: 本工作利用储热、蓄电和储碳装置的各自优势, 对耦合碳捕集燃煤热电联产系统进行了参数优化设计, 以 350 MW 燃煤热电联产机组为研究对象, 提出了一种基于“热-电-碳”三储综合能源系统的改进麻雀优化算法。基于一天 1440 min 数据点, 分别对碳捕集功率、储能容量以及充放策略进行研究。结果表明, 改进后的麻雀优化算法能够满足全域范围的参数协同优化需求, 采用储能装置可降低总成本 9.44%, 煤耗降低 3.37%, 热电调峰能力提升 10% 左右。通过“热-电-碳”储能装置的充放优化, 得到了三种容量参数的最佳比例, 即储碳容量为 143 m³, 储热容量为 146.14 MWh, 蓄电容量为 62.61 MWh, 该参数组合能够有效减少负荷波动, 使其维持在最经济负荷区间。此外, 分别对动力煤、蓄电池、储热罐以及储碳罐市场价格进行了敏感性分析, 结果显示, 动力煤价格对系统总成本影响最显著, 其次为储碳罐价格波动、储热罐单价波动最后为蓄电池单价波动。本研究有助于推动多储能系统参数协同优化的应用, 为综合能源系统参数设计及运行策略的研究提供参考。

关键词: 燃煤机组; 储能系统; 碳捕集系统; 麻雀搜索算法; 参数设计

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0917

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-503-13

Parameter design and performance analysis of the “thermal-electric-carbon” integrated energy system

WEI Hongqiang¹, LUO Guiping¹, ZHANG Shihao², LIU Tianhao³, CHENG Xiaobo⁴, CAO Bin⁵

(¹Huachi Kinetic Energy(Beijing) Technology Co. Ltd., Beijing 101111, China; ²College of Engineering and Architecture, North China University of Technology; ³School of Metallurgical Engineering, North China University of Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; ⁴Hegang Group Mining Co., Ltd., Tangshan 063700, Hebei, China; ⁵The 11th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: By leveraging the complementary functions of heat storage, electrical energy storage, and carbon storage devices, this study investigates the parameter optimization of a coupled carbon-capture coal-fired cogeneration system. A 350 MW coal-fired cogeneration unit is selected as the case study, and an improved sparrow optimization algorithm is proposed within the framework of a “heat-electricity-carbon” integrated energy storage system. Using high-resolution operational data comprising 1440 data points per day, the

收稿日期: 2025-10-15; 修改稿日期: 2025-11-25。

基金项目: 河南省科技攻关项目: 面向低碳能源系统的多元储能优化设计及动态运行调控 (242102240093)。

第一作者: 卫宏强 (1974—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为火力发电及飞轮储能, E-mail: 651492845@qq.com; 通信作者: 曹斌, 高级工程师, 研究方向为光电与人工智能技术, E-mail: bincao11@163.com。

引用本文: 卫宏强, 罗桂平, 张仕豪, 等. 基于“热-电-碳”三储综合能源系统参数设计及性能分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 503-515.

Citation: WEI Hongqiang, LUO Guiping, ZHANG Shihao, et al. Parameter design and performance analysis of the “thermal-electric-carbon” integrated energy system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 503-515.

coordinated optimization of carbon-capture power, energy storage capacities, and charging-discharging strategies is systematically analyzed. The results demonstrate that the improved sparrow optimization algorithm effectively satisfies collaborative parameter optimization requirements across the full operating range. The integration of energy storage devices reduces total system cost by 9.44%, decreases coal consumption by 3.37%, and enhances thermal power peak-regulation capacity by approximately 10%. Through optimized charging and discharging of the heat-electricity-carbon storage system, the optimal capacity configuration is determined as 143 m³ for carbon storage, 146.14 MW·h for heat storage, and 62.61 MW·h for electrical energy storage. This configuration effectively mitigates load fluctuations and maintains system operation within the most economical load range. Furthermore, sensitivity analyses of thermal coal prices, battery costs, heat storage tank prices, and carbon storage tank prices indicate that thermal coal price exerts the greatest influence on total system cost, followed by carbon storage tank price, heat storage tank price, and battery price. Overall, this study supports the practical application of coordinated parameter optimization for multi-energy storage systems and provides valuable guidance for the design and operational optimization of integrated energy systems.

Keywords: coal-fired power plant; energy storage system; carbon capture system; sparrow search algorithm; parameter design

为适应全球碳中和进程,中国作为负责任大国提出了“双碳”政策^[1]。在推动能源结构转型的中坚阶段,但目前煤电仍在我国电力结构中发挥主要作用^[2]。为此,探索燃煤低碳能源利用路线,是当前我国最为高效可行的方案之一。

碳捕集装置作为能耗单元,作为燃煤机组功能的负荷会增加其自身的碳排放,提升其灵活运行能力成为了控制碳排放的重要路径^[3]。应用于耦合碳捕集燃煤系统的储能设备,常见的类型有储热、蓄电和碳储。已有研究表明,相变储热和热化学储热在提高系统灵活性方面均取得了明显的成效^[4]。对于蓄电方面,液流电池、钠离子电池、飞轮储能等其他储能技术也在不断发展^[5]。在充分挖掘储能应用潜力方面,通过优化其灵活调度能力已受到了学者的广泛关注。例如,胡健等^[6]提出一种基于精英反向学习的双适应度粒子群优化算法。该算法优化的系统弃风弃光量降低77.4%,并显著提升经济效益,但仅仅考虑了优化调度,而没有考虑参数之间的匹配性设计。李昊等^[7]提出QT-CDDPG算法,其优化的系统降低运行成本,但考虑到碳捕集的背景。王君梅等^[8]以季节差异为基础和最优经济为目标构建模型,提出改进NSGA-II算法对能量调度进行优化。容量配置方面,智筠贻等^[9]提出了一种风

光储多能互补能源系统并开发改进型非支配遗传算法求解,得到最佳容量配置方案。运行优化方面,丁娅鑫等^[10]以最优成本为目标构建区域综合能源系统日前优化运行模型,并提出改进麻雀算法进行优化,提高系统的可靠性和经济性。综上所述,储能对降低碳排放和提升调节能力具有重要作用,如麻雀搜索算法等成熟的优化算法已在特定的实例中获得了学者认可。然而,多储能系统由于其结构过于复杂,现有优化算法很难在迭代速度等方面满足系统参数协同优化的需要,为此需针对综合系统的特点进行参数的协同优化。

本文聚焦碳捕集与综合能源系统协同优化的场景,旨在解决传统燃煤机组碳排放高,灵活性不足等问题。区别于单一储能研究,同时考虑了储热、蓄电和碳储的“三储”调节。针对传统麻雀搜索算法在本研究中的局限性,提出一种改进麻雀搜索算法,通过对步长、初始种群和生产者进行优化,并引入自适应权重和螺旋因子,解决传统麻雀算法易陷于最优等问题;并通过仿真验证其在多参数调节寻优和对多种储能协同运行确定优化参数组的应用潜力。

1 研究对象

本文以350 MW热电联产燃煤机组为研究对

象，构建燃煤系统、碳捕集系统、储热系统、蓄电系统的燃煤综合能源系统，其结构如图 1 所示。本工作通过对不同情景下的机组运行参数、热电负荷情况结合动力煤价格，建立燃煤成本与机组出力的动态关联模型。运用数学建模与参数分析，为后续章节的优化调度算法设计和耦合系统参数设计奠定数据基础，为多目标优化策略的提出提供了理论框架。

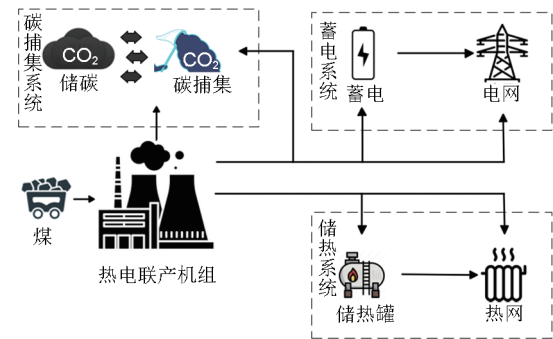


图 1 “热-电-碳”三储燃煤综合能源系统
Fig. 1 “Thermal-electric-carbon” three-storage coal-fired integrated energy system

通过调取燃煤热电联产系统供给用户的负荷数据，得到机组一天内热电负荷的具体数据，并将其分为 1440 个时间点得到负荷情况，如图 2 所示。其中电负荷的波动范围为 200~280 MW，热负荷范围为 130~165 MW。

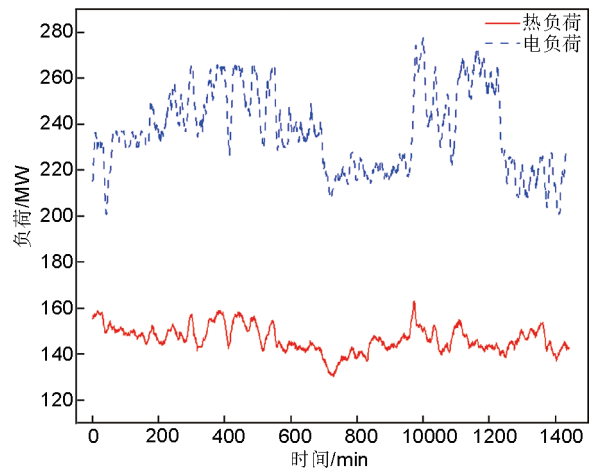


图 2 一天内热电负荷的数据点
Fig. 2 The data points of thermal and electrical load within a day

2 各体设备数学物理模型

2.1 热电联产机组不同功耗及参数

本研究的选择 350 MW 燃煤机组，热电机

组选用型号为 HG-1130/25.4-HM 的机组，其具体参数^[11]如表 1。

表 1 热电机型号及其参数
Table 1 Thermal power plant model and its parameters

锅炉型号	单位	HG-1130/25.4-HM
过热蒸汽流量	t/h	1130
过热器出口蒸汽压力	MPa(g)	25.4
过热器出口蒸汽温度	℃	571
锅炉型号	/	HG-1130/25.4-HM
再热蒸汽流量	t/h	963.01
再热器进口蒸汽压力	MPa(g)	4.092
再热器出口蒸汽温度	℃	569
再热器进口蒸汽温度	℃	310
主蒸汽焓值	kJ/kg	3400
给水焓值	kJ/kg	1225
再热器进口焓值	kJ/kg	3075
再热器出口焓值	kJ/kg	3610

2.2 热电联产机组煤耗特征指标

通过查阅相关机组数据，锅炉在 100%、75%、50% 和 30% 等 4 个典型负荷下的发电量、标准煤耗率、12 h 燃煤量^[12]数据如表 2 所示。

表 2 100%~30% 负荷下燃煤机组的相关参数
Table 2 Relevant parameters of the coal-fired power plant under 100%~30% load condition

参数	数值			
机组负荷/MW	350(100%)	262.5(75%)	175(50%)	105(30%)
发电量/MWh	4200	3150	2100	1500
12 h 燃煤量/t	1260	950	658	545
标准煤耗率	290	300	315	332.5
/(g/kWh)				

根据热电联产机组的相关负荷参数，可以得出在机组负荷降低时，煤耗率逐渐升高。因此可得到机组与标准煤耗率的特征曲线如图 3。

热电联产系统中的热电比是指热电联产系统中输出的热量与输出的电能的比值，用于衡量系统的热电平衡情况，热电比越高，供热占比越大，发电效率通常更高。其计算公式^[13]为：

热电比 = $\frac{Q_s}{P_p}$ (1)

式中， P_p 为机组的发电量，kWh； Q_s 为机组的供热量，kWh。

供电标准煤耗率是衡量火力发电厂能源利用效率的核心指标，反映每供应 1 kWh 电能所消耗的标准煤量，其计算与优化对电厂经济性、碳减排及政

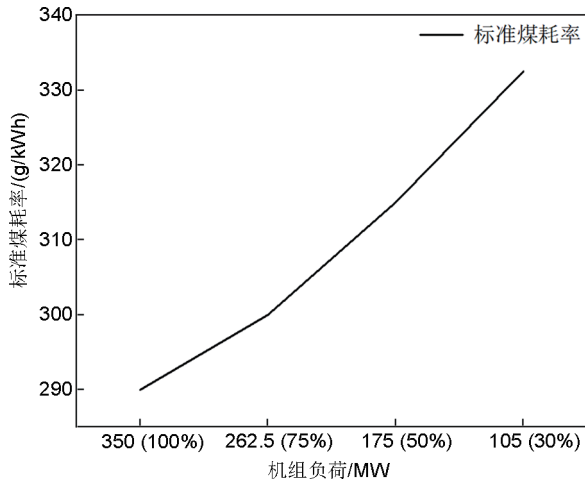


图3 标准煤耗率与机组负荷函数关系

Fig. 3 The functional relationship between standard coal consumption rate and unit load

策考核具有重要意义。其计算方式^[14]如下:

$$b_d = \frac{B_0}{W} \quad (2)$$

式中, b_d 为供电标准煤耗率, g/kWh; B_0 为标准煤耗量, g; W 为机组实际供电量, kWh。

供热标准煤耗率是衡量热电联产系统能源利用效率的关键指标, 其计算方式如下:

$$b_h = \frac{B_0}{H} \quad (3)$$

式中, b_h 为供热标准煤耗率, g/kWh; B_0 为标准煤耗量, g; H 为机组实际供电量, kWh。

2.3 碳捕集系统物理数学模型

碳捕集系统的基础能耗成本可分为固定成本与运行成本。其固定成本公式为^[15]:

$$C_{I-CC} = C_{T,B} + C_{MEA} + C_{I-CS} + C_{AE} \quad (4)$$

式中, C_{I-CC} 为碳捕集燃煤机组建设成本, 元; $C_{T,B}$ 为燃煤机组建设成本, 元; C_{MEA} 为碳捕集系统建设成本, 元; C_{I-CS} 为耦合系统建设成本, 元; C_{AE} 为其他辅助设备建设成本。

运行成本计算公式为:

$$C_{Y-CC} = C_P + C_{MEA} + C_{PR} + C_{OM} \quad (5)$$

式中, C_{Y-CC} 为碳捕集燃煤机组运行成本, 元; C_P 为燃煤成本, 元; C_{MEA} 为MEA投入成本, 元; C_{PR} 为调峰成本, 元; C_{OM} 为系统运维成本, 元。

在碳捕集联合循环的系统中, 通过燃烧产生的电量一部分用于输出电量, 另一部分用于碳捕集系统, 其燃烧标准煤产生的烟气量根据能量守恒定律其关系为:

$$E_{\text{碳}} = 3.3B_{\text{煤}} \quad (6)$$

$$P_{\text{碳}} = (E_{\text{碳}}/95000)/60000 \quad (7)$$

式中, $E_{\text{碳}}$ 为二氧化碳的捕集量, kg, 其中碳捕集效率为90%; $P_{\text{碳}}$ 为碳捕集电耗, MW; 碳捕集电耗为每捕集一吨二氧化碳耗电95 kWh。

本工作以醇胺吸附剂捕碳为例, 华润海丰电厂测试表明其捕集规模可达到2万吨t/年, 满足火电厂捕碳的速率要求。碳捕集能耗占系统总能耗的7.65%, 其中醇胺吸收剂的再生过程占碳捕集能耗的70%~80%^[16]。因此, 储碳对碳捕集能耗调节的功率占系统总能耗的5.36%~6.12%, 进而可通过储碳设备提高系统的灵活性, 其储存罐价格与其容量的关系^[17]如式(8):

$$C_c = 18500 \times V \quad (8)$$

式中, C_c 为储碳价格, V 为储碳罐容量。

2.4 储热系统

系统中设置储热罐可缩小热电供求在时间上的不匹配程度, 增强供热调节性能。配置储热罐后, 可使热电联产机组的调峰能力提升15.2%~24.2%^[18]。储热罐罐体的建造单价为20万元/MWh, 使用寿命为15年^[19]。

储热罐的初投资由储热介质体积与单位成本决定, 初投资公式见式(9)~(10)^[20]:

$$ICost_{TS} = V_{TS} \times Cost_{TS} \quad (9)$$

$$T_{TS} = c \times \rho \times V_{TS} \times \Delta t \quad (10)$$

式中, $ICost_{TS}$ 为储热装置的初投资, 万元; $Cost_{TS}$ 为单位体积储热装置的成本, 万元/m³; V_{TS} 为储热装置的体积, m³; T_{TS} 为装置的最大储热量, kJ; c 为比热容, kJ/(kg·°C); ρ 为密度, kg/m³; Δt 为储热过程中的温差, °C。

储热罐的能量利用率见式(11)^[21]:

$$\eta = \frac{P_p + Q_s}{B_b \times LHV + Q_{hst}} \quad (11)$$

式中, P_p 为机组的发电量, kW; Q_s 为机组的供热量, kW; B_b 为机组的燃煤消耗量, kg/s; LHV 为煤的低位发热量, kJ/kg; Q_{hst} 为机组中储热罐的放热量, kW。

2.5 蓄电系统

蓄电池的初投资主要取决于其容量与功率, 其初投资公式^[22]为:

$$C_{\text{电池}} = C_{\text{能量}} \times E + C_{\text{功率}} \times P \quad (12)$$

式中, $C_{\text{能量}}$ 为单位能量成本, 元/kWh; E 为电池容量, kWh; $C_{\text{功率}}$ 为单位功率成本, 元/kW; P 为电池功率, kW。

蓄电池储能项目价格为1800000元/MWh，其中电芯价格为800000元/MWh，按照15年折旧；储能系统其他设施共计1000000元/MWh，按照15年折旧。

储能的全生命周期成本即平准化储能成本(LCOS)，是评估储能技术经济性的核心指标。其计算公式为^[23]：

LCOS =

$$\frac{\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)P_c \sum_{t=1}^T \frac{n_c(t)}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{\text{运维}}}{(1+r)^t} + \left(\frac{C_E}{\eta} + \frac{C_P}{d}\right)}{\sum_{t=1}^T \frac{n_c(t)}{(1+r)^t}} \quad (13)$$

式中， η 为储能系统效率； P_c 为额定功率； T 为项目寿命； $n_c(t)$ 为第 t 年的循环次数； r 为折现率； $C_{\text{运维}}$ 为运维成本； C_E 为能量存储成本； C_P 为功率相关成本； d 为设备使用寿命。

3 综合能源系统优化调度

3.1 麻雀搜索算法介绍

麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)是一种新型的群体智能优化算法，该算法自2020年由薛建凯等^[24]研究并提出。算法的核心思想^[25]是通过模拟麻雀在觅食过程中食物发现者和跟随麻雀之间的相互作用，以及麻雀面对危险时监察者的反应机制，来进行全局搜索和局部开发，如图4所示。

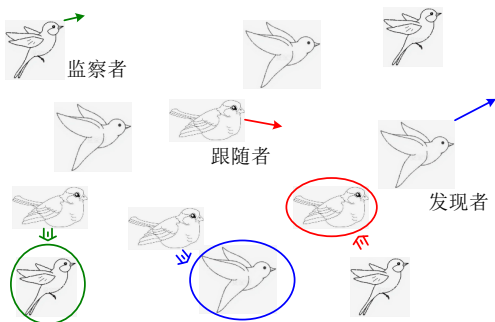


图4 麻雀搜索算法基本原理
Fig. 4 The basic principle of sparrow search algorithm

具体的算法步骤如下^[25]：

步骤一：初始化麻雀种群，计算每只麻雀的适应度，并对初始化麻雀种群按舒适度进行排序，找到发现者以及跟随者。

初始位置生成公式为：

$$X = lb + rand \times (ub - lb) \quad (14)$$

式中， lb 、 ub 分别代表种群的下界和上界。

步骤二：更新发现者位置。

麻雀算法中的安全值(ST)是一个预先设定的阈值，一般范围在[0.5, 1]之间，用于控制麻雀群体在觅食过程中对捕食者威胁的响应机制，当安全值小于预警值时，麻雀进行全局搜索觅食；否则，麻雀以正态分布进行随机游走。位置更新公式为：

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_{ij}^t \times \exp\left(\frac{-i}{a \times t_{\max}}\right), & R \leq ST \\ X_{ij}^t + Q, & R > ST \end{cases} \quad (15)$$

式中， x_{best} 是当前最好的位置， X_i 为麻雀随机生成位置。

步骤三：更新跟随者位置。

跟随者依据发现者的位置和状态更新位置，有时可能会因为饥饿而飞离种群，因而增加种群多样性。位置更新公式：

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} Q \times \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{ij}^t}{i^2}\right), & i > n/2 \\ X_{\text{best}}^t + |X_{ij}^t - X_{\text{best}}^{t+1}| \times A^* \times L, & i \leq n/2 \end{cases} \quad (16)$$

式中， Q 是一个[0, 1]范围的随机数， X_{worst}^t 是当局最坏的位置； $A^* = A^T(AA^T)^{-1}$ ，且 A 是长度为 d 的一维向量，其元素都是1或-1； L 为一个[0, 1]范围的随机数。

步骤四：监察者位置更新。

在麻雀觅食过程中，监察者麻雀会负责警戒，当有危险发生时，它们会远离危险飞到新的位置。

位置更新公式：

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta^* (X_{ij}^t - X_{\text{best}}^t), & f_i \neq f_g \\ X_{ij}^t + K \left(\frac{X_{ij}^t - X_{\text{worst}}^t}{|f_i - f_w| + \varepsilon} \right), & f_i = f_g \end{cases} \quad (17)$$

式中， β 为步长参数， K 为[-1, 1]的随机数， ε 为防止分母唯一的一个较小的数， f_g 和 f_w 分别是当前搜索范围内的最佳和最差适应度值。

步骤五：角色更新。

在每次迭代更新后，将所有麻雀个体的适应度重新计算，并从高到低排序，前10%~20%的麻雀个体更新成为发现者，其余为跟随者。当种群检测到危险时，种群中部分个体会转为监察者。发现者与跟随者的总体比例在迭代更新中保持固定。

步骤六：迭代与终止。

重复以上步骤一至步骤五，直到达到初始设置的最大迭代次数或满足条件时停止迭代，输出最优结果。

针对麻雀算法后期收敛速度慢、易陷入局部最优、初始种群质量不稳定等问题做出以下算法优化措施，如表3。

表3 麻雀搜索算法的策略改进

Table 3 Improvement strategy of the sparrow search algorithm

系数	变化方法	改进效果
检查者位置更新中的参数： 步长系数 β 、 $k^{[26]}$	$B = f_g - (f_g - f_w) \times \left(\frac{M-t}{M} \right)^{1.5}$ $K = (f_g - f_w) \times \exp \left[-20 \tan \left(\frac{t}{M} \right)^2 \right] \times 2rand - 1$	通过对步长的优化，有利于提高寻优精度和速度，平衡全局搜索能力与局部开发能力。
初始位置中的搜索因子 $r_1^{[27]}$	$r_1' = a \times \left[1 - \left(\left \frac{t}{Iter_{max}} \right \right)^\eta \right]^{\frac{1}{\eta}}$ 其中a是常量，t是迭代次数，$Iter_{max}$是最大迭代次数；η是调整因子，$\eta \geq 1$，则$a=1$	优化初始种群的生成，避免初始种群分布不均匀，个体质量参差不齐。
对生产者进行优化 ^[28]	$X_{i,j}^t \times \exp \left(\frac{-i}{a \times t_{max}} \right), R \leq ST \text{ 中的 } \exp \left(\frac{-i}{a \times t_{max}} \right) \text{ 改为}$ $\exp(1+Q \times L)$ 在发现者中加入ω，	增强算法计算能力，避免陷入局部最优并提高收敛速度。
引入自适应权重 $\omega^{[29]}$	$X_{i,j}^t \omega^* \exp \left(\frac{-i}{a \times t_{max}} \right)$ 其中，$\omega = \cos \left(\frac{\pi}{2} \times \sin \left(\sqrt{\frac{t}{Iter_{max}}} \right) \right)$	提升算法的全局搜索能力，避免陷入局部最优解。
在发现者代公式中引入螺旋因子 ^[30]	$X_{i,j}^t \times z \times \exp \left(\frac{-i}{a \times t_{max}} \right)$ $z = \left(b - \frac{t}{T} \right) \times \exp(1 \times p) \times \cos(2\pi p)$	提高算法的探索能力和算法精确性。

3.2 目标函数

在热电联产机组中，用煤耗来显现机组的能耗特性，将目标函数以系统成本最优为目标，可以表示机组的能量输出性能。

耦合系统目标函数以热电联产多系统成本最低为目标，目标函数表达式如下：

$$F = \min(C_{coal} + C_{C_{stor}} + C_{E_{stor}} + C_{H_{stor}}) \quad (18)$$

式中， F 为系统总成本， C_{coal} 为燃煤成本； $C_{C_{stor}}$ 为碳储成本； $C_{E_{stor}}$ 为电储成本； $C_{H_{stor}}$ 为热储成本。

$$C_{coal} = M_{coal} \times \Sigma \quad (19)$$

式中， Σ 为动力煤价格，元/吨； M_{coal} 为煤耗量。

$$C_{C_{stor}} = S_{C_{stor}} \times \omega \quad (20)$$

式中， ω 为储碳单价系数， $S_{C_{stor}}$ 为储碳容量。

$$C_{E_{stor}} = S_{E_{stor}} \times \lambda \quad (21)$$

式中， λ 为储电单价系数， $S_{E_{stor}}$ 为储电容量。

$$C_{H_{stor}} = S_{H_{stor}} \times \delta \quad (22)$$

式中， δ 为储热单价系数， $S_{H_{stor}}$ 为储热容量。

3.3 约束条件

(1) 热电联产燃煤机组出力上下限以及爬坡速率约束

热电联产燃煤机组的出力上下限及爬坡速率约束受其供给的热电负荷共同决定，需同时满足电热负荷平衡、设备安全及电网调度要求，其上下出力约束如下：

$$P_{min} \leq P_t \leq P_{max} \quad (23)$$

式中， P_t 为机组在 t 时刻的出力，MW； P_{min} ， P_{max} 为机组在 t 时刻的出力上下限。

$$P_{down} \leq P_t - P_{t-1} \leq P_{up} \quad (24)$$

式中， P_{down} 、 P_{up} 为机组在 t 时刻的最小、最大爬坡速率。

热电联产机组热电比根据《关于发展热电联产的规定》及《热电联产管理办法》，热电比需满足以下要求^[31]：

$$\text{热电比} = \frac{Q_s}{P_p} > 50\% \quad (25)$$

热电联产机组总热效率是衡量其能源转换效率和节能水平的核心指标约束，其约束如式(26)：

$$\eta_{\text{总}} \geq \eta_{\text{min}} \quad (26)$$

式中，在非供暖期 $\eta_{\text{min}} = 80\%$ ；在供暖期 $\eta_{\text{min}} = 85\%$ ^[32]。

动力煤价格波动依据动力煤价格走向趋势其约束如下：

$$570 \text{元/吨} \leq \text{动力煤价格} \leq 748 \text{元/吨} \quad (27)$$

(2) 碳捕集系统约束

碳捕集系统成本包括系统成本、运维成本以及材料成本总和，其碳捕集成本约束为：

$$C_{\text{min}} \leq C_{\text{C}} + C_{\text{Y-CC}} + C_{\text{I-CC}} \leq C_{\text{max}} \quad (28)$$

其所能捕集的二氧化碳最大量应在机组所产生的碳排放量内，即：

$$M_{\text{b}} \leq M_{\text{c}} \quad (29)$$

碳捕集储碳罐容量约束：

$$0 \leq V \leq 143 \text{m}^3 \quad (30)$$

(3) 蓄电系统约束

蓄电系统的充放电功率限制为：

$$0 \leq P_{\text{充}} \leq P_{\text{ch,max}} \quad (31)$$

$$0 \leq P_{\text{放}} \leq P_{\text{dis,max}} \quad (32)$$

式中， $P_{\text{充}}$ 为充电功率，MW； $P_{\text{放}}$ 为放电功率，MW； $P_{\text{ch,max}}$ 为最大充电功率，MW； $P_{\text{dis,max}}$ 为最大放电功率，MW。

蓄电池体积限制，蓄电池体积不得超过其电厂最大允许体积；蓄电池容量不得超过调峰最大值：

$$0 \leq E_{\text{电}} \leq 62.61 \text{ MWh} \quad (33)$$

$$0 \leq V_{\text{TS}} \leq V_{\text{TSmax}} \quad (34)$$

$$\text{LCOS} \leq \text{LCOS}_{\text{max}} \quad (35)$$

式中， LCOS_{max} 为储能系统中的 LCOS 价格，为 0.35~0.84 元/kWh。

根据一天内电负荷数值以及煤耗可知，1 MW*min 电负荷耗煤约 4.5167 kg。因此蓄电池储能消耗约束为：

$$0 \leq C_{\text{电}} \leq V_{\text{TSmax}} \times 4.5167 \quad (36)$$

(4) 储热系统约束

储热系统的充放功率限制为：

$$0 \leq Q_{\text{充}} \leq Q_{\text{ch,max}} \quad (37)$$

$$0 \leq Q_{\text{放}} \leq Q_{\text{dis,max}} \quad (38)$$

式中， $Q_{\text{充}}$ 为储热功率，MW； $Q_{\text{放}}$ 为放热功率，MW； $Q_{\text{ch,max}}$ 为最大储热功率，MW； $Q_{\text{dis,max}}$ 为最大放热功率，MW。

储热罐体积限制，储热罐体积不得超过其电厂最大允许体积；储热罐容量不得超过调峰最大值：

$$0 \leq E_{\text{热}} \leq 146.140 \text{ MWh} \quad (39)$$

$$0 \leq V_{\text{TS}} \leq V_{\text{TSmax}} \quad (40)$$

根据一天内热负荷数值以及煤耗可知，1 MW*min 热负荷耗煤约 2.002 kg。因此储热罐储能消耗约束为：

$$0 \leq C_{\text{热}} \leq V_{\text{TSmax}} \times 2.002 \quad (41)$$

3.4 系统优化策略

算法模型包括各个系统的特征模型以及 3.3 节的约束条件，利用麻雀优化算法以系统总成本最小为目标进行多参数优化，求解机组煤耗率最低的优化策略，算法流程如图 6。首先对燃煤机组能耗特性、碳捕集系统、电储能系统及蓄热系统等关键设备进行参数初始化设定，构建符合约束条件的初始麻雀种群。计算各个麻雀个体的目标函数值，依据适应度进行排序，前 20% 的个体作为发现者，其余为跟随者，同时选取种群规模 10%~20% 为警戒者。在迭代过程中依次更新三类个体的空间位置并重新评估适应度，当达到预设的最大迭代次数或适应度值满足收敛条件时终止计算，最终输出系统全局最优配置方案。

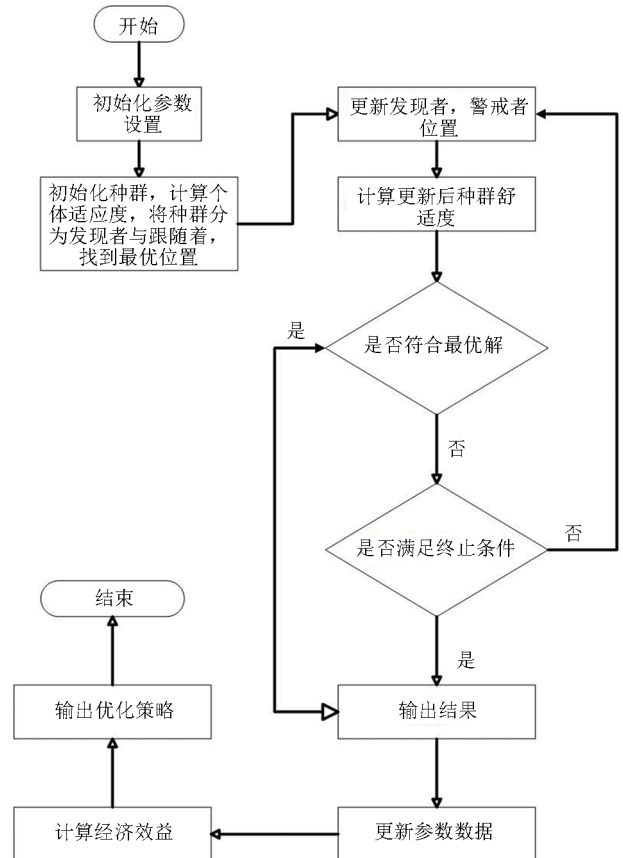


图6 计算流程

Fig. 6 Calculation process

4 结果与讨论

4.1 碳捕集功率的影响

在电厂耦合碳捕集系统后,碳捕集过程需消耗额外电能来捕集二氧化碳。因此捕集电耗随运行时间呈动态变化,并且会增加电厂的负荷,具体情形如图7所示。在电负荷高峰时段,捕集能耗占比增加,间接提高了燃煤成本。在不考虑储热蓄电时,只对比增加碳捕集后煤耗与电负荷之间的关系,进而确定了碳捕集前后的成本插值,其计算结果见图8。

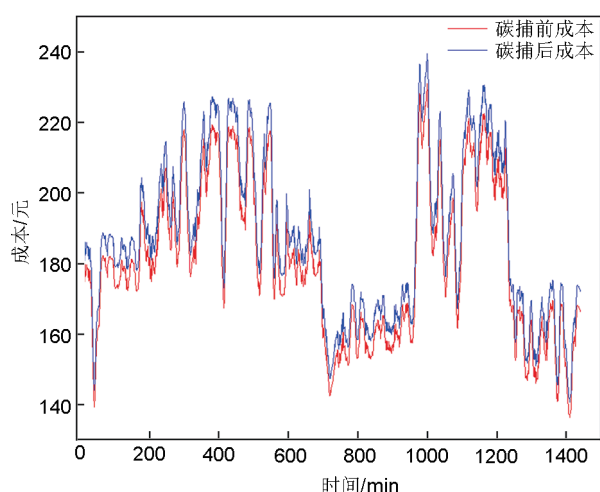


图7 碳捕集前后系统成本对比

Fig. 7 Comparison of system costs before and after carbon capture

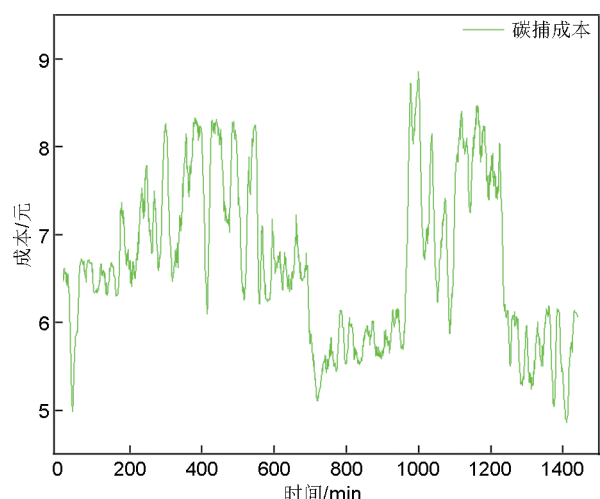


图8 碳捕集成本

Fig. 8 Cost of carbon capture

在引入碳捕集系统后,系统成本显著上升。这与理论分析相对应,碳捕集系统的运行能耗导致成

本差值随运行时间的变化而变化,但总成本差值增幅较小,表明在碳捕集带来的环境效益和系统调峰的协调能力要大于其成本的增加,并且在之后的优化中,平衡碳捕与储能的相关参数可进一步实现成本与效益的动态平衡。

4.2 容量的影响

储能容量是燃煤碳捕集耦合系统设计中的关键参数,直接影响系统调峰能力、经济性及运行稳定性。针对各个系统的容量,开展对单一储能系统的探究。对储电系统、蓄热系统、储碳系统一年的系统总成本对比如图9。通过对比可以发现,在热电联产机组中单一增加任意系统,整体系统成本并未明显变化。但根据仿真结果可知,在三者均耦合进热电联产机组中时,总成本和煤耗均有较高的下降。图10为储热-储电容量配置与系统成本的关系曲面图,可以发现,储热容量与储电容量的增加均会导致总成本上升,但增速受交互项影响呈现非对称性。经济最优配置点如图中的红点,在图中的蓝色区域成本波动较小,抗风险能力强;而红色区域频繁调峰导致运维成本激增,经济成本较高为高风险区域。

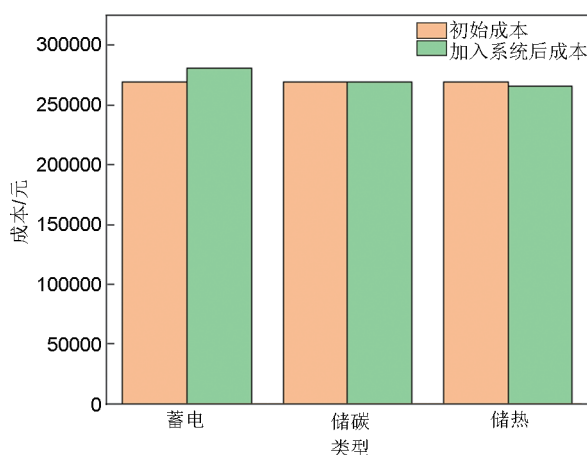


图9 各类储能系统总成本对比图(全天)

Fig. 9 Comparison chart of total costs for various energy storage systems (24 hours)

4.2.1 储电容量的影响

通过对比初始系统与加入储电系统后的成本变化,在对电负荷进行优化并加入储电系统后,通过削峰填谷,成本波动幅度明显降低,在电负荷峰值时段,储电系统释放电能以平抑电网需求,减少机组煤耗,从而降低机组煤耗,在负荷低谷时段电系统吸收多余电能,避免机组频繁启停,降低运行维

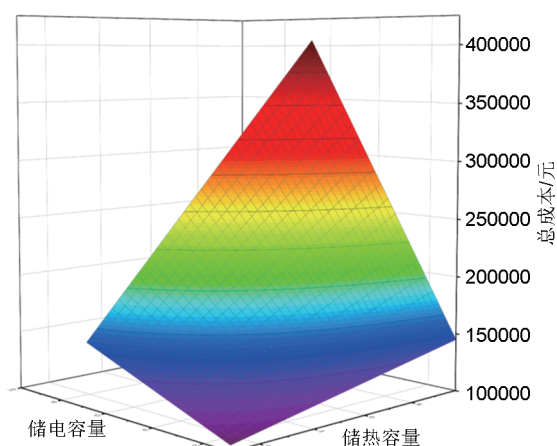


图 10 灵敏度三维曲面图

Fig. 10 Sensitivity three-dimensional surface plot

护成本。

在加入储能系统后，一天内总成本对比如图 11。通过对图中曲线积分处理，结果表明，储电容量配置为最大储电容量 62.61 MWh 时，系统的成本较初始电负荷成本有所增加，但加入蓄电之后在用电峰值以及低谷时段其较为稳定，因此依旧存在优化的空间。

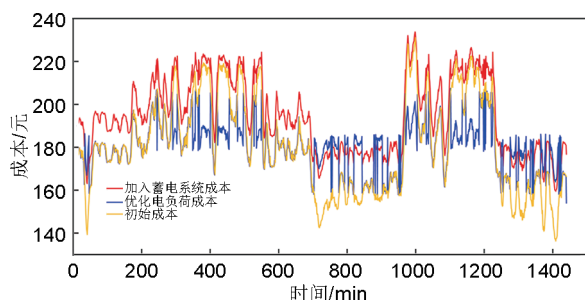


图 11 加入储电系统的成本变化图

Fig. 11 Cost change for adding the electric power storage system

4.2.2 储热容量的影响

储热容量的大小决定了热电联产机组的调峰能力以及经济性问题，合理的储热容量可通过优化热负荷分配降低运行成本。基于热负荷的峰谷调节策略可实现运行成本下降，在负荷高峰时段，储热系统释放热能来平抑负荷波动，从而缓解机组调节压力。通过储热装置与热力机组的协调运行，系统在负荷低谷时段进行热能储备，高峰时段精准释放，形成热能时空转移的优化调度模式。

在低谷时段，储存多余热能，降低热负荷输出。通过图 12 曲线积分得到，当储热容量最大为

146.41 MWh 时，其系统成本相较于不加入储热系统，明显增加，但当容量低于最大值时，调峰能力有所提升，经济成本有所降低。

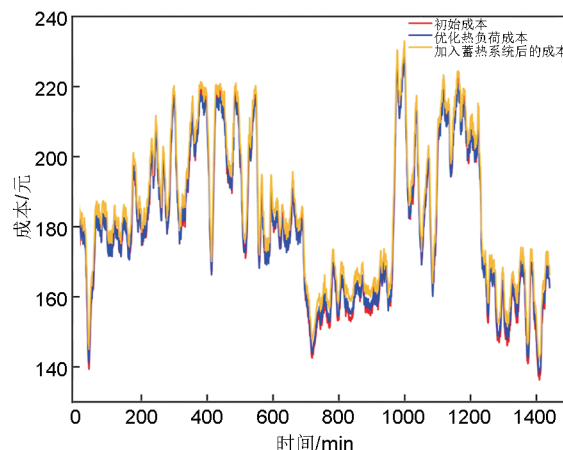


图 12 加入储热系统的成本变化图

Fig. 12 Cost change for adding the heat storage system

通过进一步积分一天内的系统成本发现，增加储能后，系统总成本降低 9.44%，单日总成本由 287402 元降至 260249.7 元，负荷煤耗减少 3.37%，单日负荷煤耗由 422130 kg 降至 407915 kg，热电负荷调峰能力提升 10%。

4.3 多储能协同运行系统的参数优化设计

在热电联产系统中增加单一储能虽然对于调峰和系统成本的降低有一定的效果，但是整体的效能并没有很突出。因此本节结合三个储能系统和热电联产机组进行多储能协同运行系统的参数优化设计。通过 4.2 节得到了碳储、蓄电、储热参数的范围如表 4，以及系统充放电的策略如图 13。

表 4 储能系统参数范围

Table 4 Parameter range of the energy storage system

储能系统	范围	用途
储碳	$0 \leq V \leq 143 \text{ m}^3$	用于存储/释放液态 CO_2 以平衡电网需求
蓄热	$0 \leq V \leq 146.14 \text{ MWh}$	在热负荷低谷储热、高峰放热
储电	$0 \leq V \leq 62.61 \text{ MWh}$	在电负荷低谷储电、高峰放电

根据图中结果可知，变化功率为负值时系统进行释能，在变化功率为正值时，储能系统进行储能。在热电联产机组中，当储能充放电时，虽然减少了当前的机组负荷，但由于储能系统的运行，需要承担这些功率对应的煤耗成本，因此需要考虑储

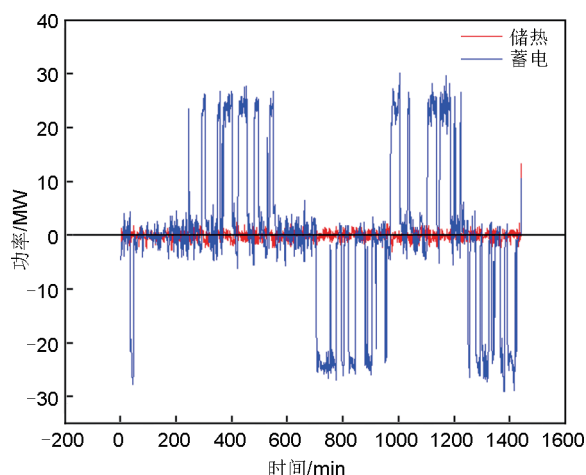


图13 储能系统充放策略

Fig. 13 Energy storage system charging and discharging strategy

能系统的成本损耗折算为煤耗成本。

蓄电池释放功率的附加成本为：

$$P_{\text{放/充}} = P_{\text{电}} \times 0.865844 \quad (42)$$

储热罐释放功率的附加成本为：

$$P_{\text{放/充}} = P_{\text{热}} \times 1.36136 \quad (43)$$

4.4 储热、蓄电和储碳的参数匹配原则

储热、蓄电与储碳系统的参数匹配是实现系统经济性、灵活性，以及调节储能运行策略的关键环节。三者需在容量配置、运行策略及成本效益间形成动态协同。在动力煤价格波动显著时优先扩大储热容量以降低燃煤成本；蓄电池容量需满足电负荷的调峰需求，同时兼顾爬坡速率约束，在电负荷剧烈波动时段，储电系统需优先调用，避免机组频繁启停导致的运维成本增加；储罐容量需匹配碳捕集速率与电网调峰需求，在电网调峰时，储电系统与碳捕集系统协同运行，降低捕集能耗对机组出力的依赖。

4.5 参数的敏感性分析

参数的敏感性分析旨在探究储碳成本、储热成本、蓄电成本及动力煤价格对系统总成本的影响程度，从而为优化储能容量配置和经济性评估提供依据。在本节通过单因素敏感性分析方法，分别调整各参数值，计算其对总成本的敏感度，并将储能系统的初始投资成本按照使用年限(15年)均分到决定其储能过程的积分上。

按照以上计算结果以及初始参数设定，所得数据如表5。

采用单因素调整法对每次调整一个参数，保持

表5 参数敏感性数据

Table 5 Parameter sensitivity data

参数	数值	波动范围
动力煤价格	570~748 元/吨	初选 638 元/吨
储碳罐单价	18500 元/m ³	±10%
储热罐单价	20 万元/MWh	±10%
蓄电池单价	180 万元/MWh	±10%

其他参数为基准值，计算总成本变化率：

$$\text{敏感度} = \frac{\Delta F/F_{\text{初始}}}{\Delta \theta/\theta_{\text{初始}}} \quad (44)$$

式中， θ 为调整参数， F 为总成本。

(1) 动力煤价格敏感性曲线

通过仿真模拟得到各参数对总成本的敏感性曲线如图14所示。动力煤价格波对曲线较为陡峭，其价格波动对经济性影响最为显著，动力煤价格每增加10%，总成本上升6.8%。

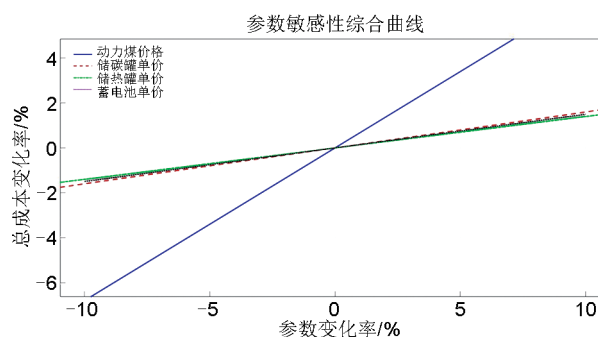


图14 敏感性参数分析曲线

Fig. 14 Sensitivity parameter analysis curve

(2) 蓄电池价格敏感性曲线

依据图14得到的总成本曲线发现，除动力煤价格影响较为明显外，储碳罐的价格、蓄电池的价格、储热罐的价格对系统的影响并不明显，因此需要进行单因素探究，将变化范围分为±5%、±10%、±15%、±20%进行分析，结果如图15。结果表明，总成本参数变化幅度程非线性关系，其中在成本变化±10%时，系统成本变化最大，敏感性最高，±5%变化时敏感性最低。

(3) 储热罐价格敏感性曲线

储热罐参数变化对总成本的敏感性分析，如图16所示。储热罐的敏感性低于蓄电池，但高于储碳罐，在热负荷波动大的场景中，适当提高储热容量，可显著降低运行成本；在热负荷稳定时，可缩减容量以控制初投资。

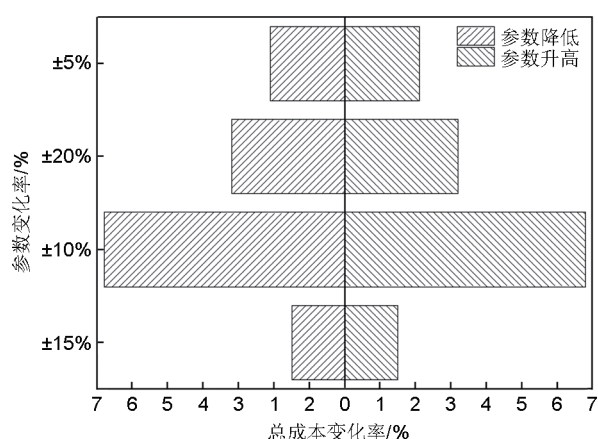


图15 蓄电池敏感性分析

Fig. 15 Battery sensitivity analysis

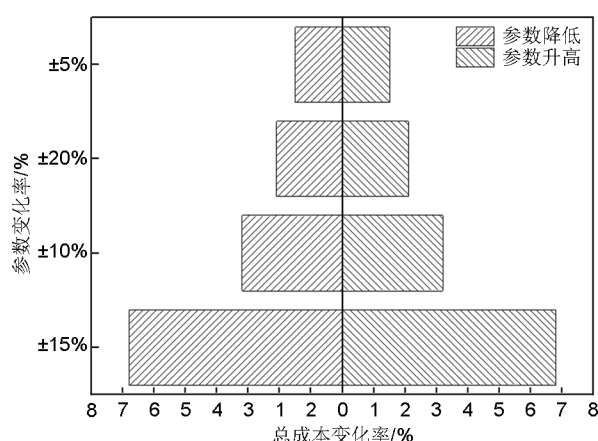


图17 储碳罐敏感性分析

Fig. 17 Carbon storage tank sensitivity analysis

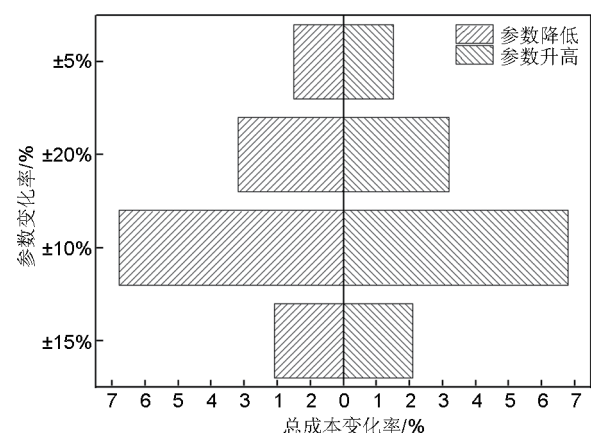


图16 储热罐敏感性分析

Fig. 16 Thermal storage tank sensitivity analysis

(4) 储碳罐价格敏感性曲线

储碳罐的敏感性分析如图17所示，储碳罐容量是总成本敏感参数，但敏感性低于蓄电池。储碳罐容量和成本的变化对总成本影响呈非线性关系，参数降低时，总成本也下降，表明储碳罐的初投资对总成本敏感，参数升高总成本增加较低，说明储碳罐容量提升的边际效益较低，受限于碳捕集效率或运行策略优化。

4.6 储能运行策略

在燃煤碳捕集耦合储能系统中，储能运行策略的设计在对储热系统、储电系统、储碳系统建模设立条件之后，进行多储能协同运行系统的参数优化设计。根据电网负荷曲线和动力煤价格波动曲线，机组在负荷低谷时优先进行储能操作，利用低电价时段储存电能、热能；在负荷高峰时段，释放储能，降低机组出力压力。依据敏感性分析结果，动力煤价格对系统总成本影响最为显著，因此优先调

节储储能系统以平衡负荷波动；储碳系统则根据碳捕集效率及碳市场政策动态调整，实现环境效益与经济性平衡。

根据仿真结果，系统总成本降低9.45%，储能系统通过削峰填谷显著平滑了负荷波动，尤其在电负荷峰值时段，储电系统释放48 MWh电能，降低机组出力需求约15%。通过上述策略，燃煤碳捕集耦合储能系统可在保障调峰能力的同时，实现经济性与低碳目标的双重优化。

5 结论

本工作以350 MW热电联产机组为研究对象，围绕碳捕集热电联产机组与储电、储热、储碳技术的协同优化展开研究，旨在通过参数设计与运行策略优化降低系统成本、提升调峰能力。依据热电负荷数据，通过优化算法进行多储能协同优化得出结论如下：

(1) 计算后的机组负荷以及加入储能之后可显著提升机组运行经济性，系统总成本降低9.44%，单日总成本由287402元降至260249.7元，单日负荷煤耗由422130 kg降至407915 kg，减少3.37%，热电负荷调峰能力提升10%。

(2) 借助麻雀算法进行多目标寻优策略，得到最优参数组合，储热容量为114.67 MWh，蓄电池容量为62.61 MWh，储碳容量为114.67 m³。最优参数能够有效减少负荷波动，降低机组因频繁调峰而导致的成本。

(3) 通过敏感性分析显示，动力煤价格对系统总成本影响最显著，其次为储碳罐价格波动、储热

罐单价波动最后为蓄电池单价波动。

参考文献

- [1] 代宇涵, 刘春, 周朋, 等. 双碳背景下电力系统储能技术的应用与研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(8): 2772-2774. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0695.
- DAI Y H, LIU C, ZHOU P, et al. Application and research progress of energy storage technology in power systems under the dual carbon background[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(8): 2772-2774. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0695.
- [2] 本刊编辑部. «2025年能源工作指导意见»发布 非化石能源消费占比目标提至20%左右[J]. 农村电工, 2025, 33(4): 1. DOI: 10.16642/j.cnki.ncdg.2025.04.002.
- [3] 朱桢, 徐斌. 岛域燃煤电厂碳捕集系统运行及经济性研究[J]. 环境工程学报, 2025, 19(8): 1934-1942. DOI: 10.12030/j.cjee.202409146.
- ZHU Y, XU B. Study on the operation and economics of carbon capture system in island Coal-Fired power plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025, 19(8): 1934-1942. DOI: 10.12030/j.cjee.202409146.
- [4] 闫亚龙, 张进华, 黄艳, 等. 火电机组深度调峰背景下储热技术应用现状及进展[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(S1): 495-506. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.25021001.
- YAN Y L, ZHANG J H, HUANG Y, et al. Current status and progress of heat storage technology application under background of deep peak shaving of thermal power units[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(S1): 495-506. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.25021001.
- [5] 施卫华. 电力储能发展现状及能效提升策略与探索[J]. 电工技术, 2025(9): 1-6, 11. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2025.09.001.
- SHI W H. Energy storage development status and energy efficiency improvement strategies and exploration[J]. Electric Engineering, 2025(9): 1-6, 11. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2025.09.001.
- [6] 胡健, 任育杰, 杜金魁, 等. 含相变储能的风/光/热电联产综合能源系统优化调度[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(3): 968-975. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0515.
- HU J, REN Y J, DU J K, et al. Optimal scheduling of an integrated wind/solar/gas cogeneration energy system with phase change energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(3): 968-975. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0515.
- [7] 李昊, 刘畅, 苗博, 等. 考虑冷热电互补及储能系统的多园区综合能源系统协调优化调度[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1482-1491. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0631.
- LI H, LIU C, MIAO B, et al. Coordinative optimal dispatch of multi-park integrated energy system considering complementary cooling, heating and power and energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1482-1491. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0631.
- [8] 王君梅, 吴晓南, 廖柏睿. 考虑环境惩罚的综合能源系统多季节优化研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3720-3729. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0340.
- WANG J M, WU X N, LIAO B R. Multi-season optimization of integrated energy systems considering environmental penalties[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(10): 3720-3729. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0340.
- [9] 智筠贻, 凌浩恕, 吴昊, 等. 风光储多能互补能源系统容量配置优化[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 3874-3888. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0377.
- ZHI J Y, LING H S, WU H, et al. Optimization of capacity configuration for multi-energy complementary systems using wind, solar, and energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 3874-3888. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0377.
- [10] 丁娅鑫, 熊军华. 基于改进麻雀算法的区域综合能源系统优化研究[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(10): 24-29, 34. DOI: 10.19557/j.cnki.1001-9944.2022.10.005.
- DING Y X, XIONG J H. Research on regional integrated energy system optimization based on improved sparrow algorithm[J]. Automation & Instrumentation, 2022, 37(10): 24-29, 34. DOI: 10.19557/j.cnki.1001-9944.2022.10.005.
- [11] 王建军. 内蒙古一自备电厂1#炉顶棚过热器泄漏失效分析[J]. 内蒙古石油化工, 2017, 43(2): 46-47. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7981.2017.02.019.
- WANG J J. Failure analysis of the leakage in the superheater roof of unit 1 in an Inner Mongolia self-powered power plant[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2017, 43(2): 46-47. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7981.2017.02.019.
- [12] 陈吉玲. 压缩空气储能系统与火电机组耦合方案及其特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- CHEN J L. Research on coupling scheme and characteristics of compressed air energy storage system and thermal power unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [13] 马文澍. 热电联产机组能耗特性分析及负荷优化分配研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- MA W S. The analysis of energy consumption characteristics and research on optimal load dispatch of cogeneration units[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2023.
- [14] SUN J, MA S C, HUO C, et al. An improved calculation method of coal consumption index for heating in CHP with a high back pressure turbine[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 661(1): 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/661/1/012017.
- [15] 胡东子. 压缩二氧化碳储能与碳捕集燃煤机组的耦合系统性能研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- HU D Z. Performance study of coupled system for compressed CO₂ energy storage and carbon capture coal-fired units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [16] 王金星, 俞卫新. 碳捕集系统与燃煤机组耦合技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- WANG J X, YU W X. Carbon capture system coupling technology for coal-fired units[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2023.
- [17] STANEK B, OCHMANN J, BARTELA Ł, et al. Isobaric tanks

- system for carbon dioxide energy storage - The performance analysis[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104826. DOI: 10.1016/j.est.2022.104826.
- [18] 杨利, 刘永林, 房伟, 等. 配置储热罐后热电联产机组运行优化[J]. *热力发电*, 2020, 49(4): 70-76. DOI:10.19666/j.rld.201909227.
- YANG L, LIU Y L, FANG W, et al. Operation optimization of cogeneration unit equipped with heat accumulator[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(4): 70-76. DOI:10.19666/j.rld.201909227.
- [19] 张婉滢, 金晶, 解小军, 等. 熔盐储热辅助低压缸零出力机组深度调峰的应用分析[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(1): 279-287. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1504.
- ZHANG W Y, JIN J, XIE X J, et al. Application analysis of deep peak shaving of low-pressure cylinder zero-output unit assisted by molten salt heat storage[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2025, 46(1): 279-287. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1504.
- [20] 石冰澜, 程远达, 尹富强, 等. 基于分布式蓄热的热电联产供热系统节能优化研究[J/OL]. *太原理工大学学报*, 1-11[2026-01-05]. <https://link.cnki.net/urlid/14.1220.N.20240510.1040.002>.
- [21] 王子杰. 热电联产机组运行能效及灵活性提升关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- [22] ZHANG Y, SUN L, MA F, et al. Collaborative optimization of the battery capacity and sailing speed considering multiple operation factors for a battery-powered ship[J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2022, 13(2): 40. DOI:10.3390/wevj13020040.
- [23] 向翩翩. 碳中和目标下中国合成氨脱碳路径及应用潜力和布局分析研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2023.
- XIANG P P. Study on the decarbonization pathway and potential application and layout analysis of ammonia industry in China under the carbon neutrality target[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023.
- [24] XUE J K, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34. DOI: 10.1080/21642583.2019.1708830.
- [25] 郭庆辉, 李媛, 杨东升. 一种改进麻雀搜索算法的收敛性分析及应用[J]. *控制与决策*, 2024, 39(8): 2502-2510. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1065.
- GUO Q H, LI Y, YANG D S. Convergence analysis and application of an improved sparrow search algorithm[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(8): 2502-2510. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1065.
- [26] 周明哲, 富海鹰, 赵炎炎, 等. 一种改进麻雀优化算法在岩体结构面分组中的应用[J]. *长江科学院院报*, 2025, 42(11): 133-140. DOI: 10.11988/ckyyb.20240931.
- ZHOU M Z, FU H Y, ZHAO Y Y, et al. Application of an improved sparrow search algorithm in grouping rock mass structural planes[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2025, 42(11): 133-140. DOI:10.11988/ckyyb.20240931.
- [27] FENG H, ZHOU H, CAO D H, et al. Data-driven hydraulic pressure prediction for typical excavators using a new deep learning SCSSA-LSTM method[J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 275: 127078. DOI:10.1016/j.eswa.2025.127078.
- [28] FENG J Q, CAI F, ZHAN X J, et al. Multi-timescale inconsistency evaluation and data-driven state of health prediction for circulating water-cooled series battery pack[J]. *Measurement*, 2025, 242: 115982. DOI:10.1016/j.measurement.2024.115982.
- [29] YANG X Y, ZHOU G F, REN Z J, et al. High-precision air conditioning load forecasting model based on improved sparrow search algorithm[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 92: 109809. DOI:10.1016/j.job.2024.109809.
- [30] 陈致远, 曾国辉, 赵晋斌. 基于改进麻雀算法的直流微电网分级均流稳压控制[J]. *电气工程学报*, 2025, 20(1): 317-327. DOI:10.11985/2025.01.031.
- CHEN Z Y, ZENG G H, ZHAO J B. Grading current sharing and voltage stabilizing control of DC microgrid based on improved sparrow search algorithm[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2025, 20(1): 317-327. DOI:10.11985/2025.01.031.
- [31] 国家能源局. 关于印发《关于发展热电联产的规定》的通知[EB/OL]. (2012-01-04)[2025-03-12].
- [32] 国家发展改革委, 能源局, 财政部, 住房城乡建设部, 环境保护部关于印发《热电联产管理办法》的通知[J]. *中华人民共和国国务院公报*, 2016(20): 67-72.