

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2026.03.004

# 基于 APO-PSO 的风光火储联合发电系统 低碳优化调度

Low-carbon optimal scheduling of wind-solar-thermal-storage combined  
power generation systems based on APO-PSO

穆雨彤, 王巍\*

MU Yutong, WANG Wei\*

(东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040)

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**摘要:** 联合发电系统可以对分布式电源进行有效管理,降低温室气体排放。然而,现阶段多数研究依旧以经济性为核心目标,对节能减排及相关市场化机制的考虑较为有限,且未能根据最新政策变化对现有机制进行适配性建模,同时,可再生能源的随机性和波动性是亟待解决的问题。因此,提出一种考虑绿证-阶梯碳联合交易机制的“风-光-火-储”联合发电系统优化调度策略,机制设计与模型构建深度耦合:在市场化机制层面,将绿证划分为可交易与不可交易证书,并将其与绿证-阶梯碳联合交易框架深度耦合;在模型构建层面,引入随机机会约束规划刻画可再生能源出力不确定性,构建包含燃气轮机、光伏、风力与储能系统的联合调度模型;在求解层面,提出人工原生动植物优化器与粒子群算法融合的 APO-PSO 混合算法,以提升求解精度与收敛速度。结果表明,所提方法可显著提高可再生能源的利用率,减少碳排放,充分调动储能系统平抑功率波动,削峰填谷,提高电力系统运行的稳定性和经济性。

**关键词:** 绿色证书交易;阶梯型碳交易;碳排放;优化调度;随机机会约束规划方法;人工原生动植物优化器;风-光-火-储联合发电

中图分类号:TK 01:TM 61

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2026)03-0037-10

**Abstract:** Integrated power generation systems effectively manage distributed energy resources and reduce greenhouse gas emissions. However, current research predominantly prioritizes economic viability, with limited consideration given to energy conservation, emission reduction, and related market-oriented mechanisms, and lacks adaptive modeling of existing mechanisms in response to recent policy changes. Additionally, the stochasticity and volatility of renewable energy sources remain critical challenges to be addressed. Consequently, an optimal dispatch strategy for a wind-solar-thermal-storage combined power generation system considering a combined renewable energy certificate and stepped carbon trading mechanism was proposed, where mechanism design and model construction were deeply coupled. From the perspective of market-oriented mechanisms, renewable energy certificates were categorized into tradable and non-tradable types, followed by their deep integration into the trading framework. By leveraging stochastic chance-constrained programming to characterize renewable energy output uncertainty, a joint dispatch model comprising gas turbines, photovoltaics, wind power, and energy storage systems (ESS) was established. Furthermore, a hybrid artificial protozoa optimizer (APO) - particle swarm optimization (PSO) algorithm merging the APO and PSO was developed to enhance solution accuracy and convergence speed. The results demonstrated that the proposed method significantly enhanced renewable energy utilization and reduced carbon emissions. Moreover, the strategy fully mobilized the ESS to smooth power fluctuations, achieved peak shaving and valley filling, and exhibited improved stability and economic efficiency in power system operations.

**Keywords:** renewable energy certificate trading; stepped carbon trading; carbon emissions; optimal scheduling; stochastic chance-constrained programming; artificial protozoa optimizer; wind-solar-thermal-storage combined power generation

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(LC201407)  
Natural Science Foundation of Heilongjiang Province  
(LC201407)

## 0 引言

随着“双碳”目标的提出,大规模新能源开发利

用与常规化石能源发电低碳化成为我国未来新型电力系统发展的显著特征<sup>[1-4]</sup>。在这一背景下,多能源协同运行的重要性愈发凸显。联合发电系统可以将一定区域内的分布式电源聚集起来,实现对分布式电源的有效管理,提高系统运行的稳定性<sup>[5]</sup>。

可再生能源出力的不确定性仍是影响系统经济性与安全性的核心因素<sup>[6]</sup>,这种不确定性会通过功率波动传导至整个系统,增加运行风险的同时,间接制约低碳调度的稳定推进。为缓解不确定性对系统调度的影响,现有研究提出了多种不确定性优化方法。文献[7-8]采用鲁棒优化方法(Robust Optimization, RO),可提高方案的安全性,但往往造成调度结果过于保守。文献[9-10]采用区间优化方法(Interval Optimization, IO),难以准确刻画系统运行特性。文献[11]采用多时间尺度优化策略,可以利用不同时间尺度预测信息,但模型复杂度较高。相较而言,随机机会约束规划(Chance-Constrained Programming, CCP)能够在经济性与风险水平之间取得平衡<sup>[12]</sup>,同时支持复杂概率分布和时空相关性建模<sup>[13]</sup>,尤其适合可再生能源调度、储能优化等需权衡风险与收益的场景<sup>[14]</sup>。但这类方法主要聚焦于技术风险控制,尚未从市场化激励角度促进清洁能源的消纳。

与此同时,市场化低碳机制在电力系统调度中的重要性日益凸显。传统碳排放权交易(Carbon Emission Trading, CET)能够通过碳成本约束促使发电企业减少排放,但其线性碳价机制在高排放区间的约束能力有限<sup>[15]</sup>。为应对这一问题,阶梯型碳交易(Stepped Carbon Trading, SCT)机制通过分段碳价结构强化高排放阶段的约束强度,更有利于引导机组优化排放行为。此外,绿色证书交易(Renewable Energy Certificate Trading, RECT)通过对可再生能源发电上网量赋予额外收益,能够有效提升清洁能源的市场竞争力<sup>[16]</sup>,尤其是国家能源局最新发布的《可再生能源绿色电力证书核发和交易规则》明确提出“可交易绿证”与“不可交易绿证”的分类管理要求,使得现有调度模型亟须对绿证机制进行适配与更新。在多机制融合方面,已有研究从不同角度探索了低碳市场工具的协同效应。文献<sup>[17]</sup>构建了能源利用模型。文献[18-22]结合CET和RECT机制,研究其减排效果。文献[23]在构建IES低碳经济调度模型时,考虑了SCT机制。但总体来看,现有研究往往仅考虑单一或部分机制,尚未形成同时兼顾最新绿证政策与SCT机制的统一低碳调度框架,其市场化激励效应也未得到充分发挥。

本文提出一种同时考虑RECT-SCT和可再生能源发电不确定性的“风-光-火-储”联合发电系统优化调度方法。首先,利用随机机会约束规划方法将确定性约束转化为概率形式,以有效缓解可再生能源发电的不确定性对系统运行的影响。其次,依据最新市场化机制,将绿证明确划分为“可交易绿证”和“不可交易绿证”,并与SCT机制协同建模,构建考虑RECT-SCT的联合发电系统优化调度模型。此外,本文将人工原生动优化器(Artificial Protozoa Optimizer, APO)与粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)相结合,对传统PSO进行改进,以增强算法的全局搜索能力、收敛速度与求解稳定性。最后,通过算例分析验证文中所提方法经济性、低碳性和调度性能等方面的优势。

## 1 RECT-SCT机制下联合发电系统运行模式

### 1.1 基本运行模式

本文构建的联合发电系统由光伏发电机组、风力发电机组、燃气轮机和储能装置构成。各类发电机组均通过双向通信接口与系统控制中心相连,实现实时状态监测、调度指令下发以及与电网之间的能量交互,如图1所示。

此外,该系统同时参与基于碳排放配额的SCT机制和考虑绿证属性的RECT机制,以实现低碳化运行与可再生能源利用的提升。

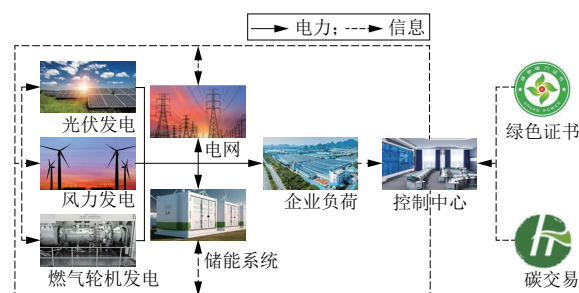


图1 系统基本运行模式

Fig. 1 Basic operating modes of system

### 1.2 RECT-SCT机制

#### 1.2.1 碳交易机制

碳交易是一种基于碳排放配额的市场化减排手段,通过设定排放总量并允许企业在市场中交易排放权,使碳排放成本显性化,从而激励企业自主减排。

该机制能够以较低的社会成本实现整体减排目标,目前已在电力、钢铁、水泥等高排放行业广泛应用,是全球应对气候变化的主流政策工具之一。

#### 1.2.2 SCT机制

SCT是碳交易的“进阶形态”,其核心思想是将



(6) 风力发电弃电的处罚成本

$$C_{\text{cut},w,k,t} = \delta_{\text{cut},w} (P_{w,\text{pre},k,t} - P_{w,k,t}), \quad (7)$$

式中:  $\delta_{\text{cut},w}$  为风力发电弃电的惩罚成本因素;  $P_{w,\text{pre},k,t}$  为  $t$  周期内第  $k$  个风电机组发电的预测功率。

(7) 储能装置的运行成本

$$C_{\text{ess},t} = \delta_{\text{ess}} (P_{\text{ess},\text{ch},t} + P_{\text{ess},\text{dis},t}), \quad (8)$$

式中:  $\delta_{\text{ess}}$  为储能系统的运行成本因素;  $P_{\text{ess},\text{ch},t}$  和  $P_{\text{ess},\text{dis},t}$  分别为储能系统在  $t$  周期的充放电功率。

(8) 向配电网购电成本

$$C_{\text{grid},t} = \delta_{\text{buy}} P_{\text{grid},\text{buy},t}, \quad (9)$$

式中:  $\delta_{\text{buy}}$  为系统向配电网购买的电力价格;  $P_{\text{grid},\text{buy},t}$  为系统向配电网购买的电量。

### 2.1.2 联合发电系统收益

(1) 联合发电系统总收益

$$F_S = F_{\text{CO}_2} + F_{\text{gre}} + F_{\text{grid}}, \quad (10)$$

式中:  $F_{\text{CO}_2}$  和  $F_{\text{gre}}$  分别为系统参与碳交易和 RECT 所获得的收益;  $F_{\text{grid}}$  为系统向配电网售电所获得的收益。

(2) SCT 收益

$$E_{\text{CO}_2,\text{act}} = \sum_{t=1}^{T_0} (P_{g,i,t} \alpha_g + P_{\text{grid},\text{buy},t} \alpha_{\text{grid}}), \quad (11)$$

$$E_{\text{CO}_2,\text{res}} = \theta_1 \sum_{t=1}^T E_{L,t}, \quad (12)$$

$$\Delta E = E_{\text{CO}_2,\text{res}} - E_{\text{CO}_2,\text{act}}, \quad (13)$$

$F_{\text{CO}_2} =$

$$\begin{cases} \gamma(\Delta E + 2T_0)r_3 - \gamma T_0 r_2 - \gamma T_0 r_1 & \Delta E \leq -2T_0 \\ \gamma(\Delta E + T_0)r_2 - \gamma T_0 r_1 & -2T_0 < \Delta E \leq -T_0 \\ \gamma \Delta E r_1 & -T_0 < \Delta E \leq 0 \\ \gamma \Delta E p_1 & 0 < \Delta E \leq T_0 \\ \gamma(\Delta E - T_0)p_2 + \gamma T_0 p_1 & T_0 < \Delta E \leq 2T_0 \\ \gamma(\Delta E - 2T_0)p_3 + \gamma T_0 p_2 + \gamma T_0 p_1 & 2T_0 < \Delta E \end{cases}, \quad (14)$$

式中:  $E_{\text{CO}_2,\text{act}}$  为系统实际碳排放总量;  $E_{\text{CO}_2,\text{res}}$  为碳排放配额;  $E_{L,t}$  为系统  $t$  周期的负荷;  $\Delta E$  为参与碳交易市场的碳排放额度;  $\gamma$  为市场单位碳交易价格;  $\alpha_g$  和  $\alpha_{\text{grid}}$  分别为单位燃气轮机发电和电网购电的碳排放系数;  $\theta_1$  为单位电力碳排放权的分配系数;  $T_0$  为阶梯的长度;  $r_1, r_2, r_3$  和  $p_1, p_2, p_3$  分别为惩罚系数和激励系数。

(3) REC 交易收益

$$F_{\text{gre}} = \delta_{\text{gre}} \left( \sum_{t=1}^T P_{\text{gre},\text{sell},t} - P_{\text{gre},\text{res}} \right), \quad (15)$$

$$P_{\text{gre},\text{res}} = \theta_2 \sum_{t=1}^T E_{L,t}, \quad (16)$$

式中:  $\delta_{\text{gre}}$  为 RECT 中绿证的单价;  $P_{\text{gre},\text{sell},t}$  为  $t$  周期系统调度计划中的可再生能源发电向电网出售的电量, 该部分电量根据国家能源局最新《可再生能源绿色

电力证书核发和交易规则》核发可交易绿证, 转化机制为 1 MW=1 张可交易 REC;  $P_{\text{gre},\text{res}}$  为系统  $t$  周期可再生能源消纳额度;  $\theta_2$  为单位再生能源额度的分配系数。

(4) 向配电网售电收益

$$F_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T \delta_{\text{sell}} P_{\text{grid},\text{sell},t}, \quad (17)$$

式中:  $\delta_{\text{sell}}$  为系统向配电网出售的电力价格;  $P_{\text{grid},\text{sell},t}$  为系统向配电网出售的电量。

## 2.2 约束条件

(1) 联合发电系统功率平衡约束

$$E_{L,t} = \sum_{i=1}^{N_g} P_{g,i,t} + \sum_{j=1}^{N_{pv}} P_{pv,j,t} + \sum_{k=1}^{N_w} P_{w,k,t} + P_{\text{ess},\text{dis},t} - P_{\text{ess},\text{ch},t} + P_{\text{grid},\text{buy},t} - P_{\text{grid},\text{sell},t} \circ \quad (18)$$

(2) 燃气轮机运行约束

$$P_{g,\text{min},i} \leq P_{g,i,t} \leq P_{g,\text{max},i}, \quad (19)$$

$$\Delta P_{g,\text{min},i} \leq P_{g,i,t} - P_{g,i,t-1} \leq \Delta P_{g,\text{max},i}, \quad (20)$$

式中:  $P_{g,\text{max},i}$  和  $P_{g,\text{min},i}$  分别为第  $i$  台燃气轮机输出的上、下限;  $\Delta P_{g,\text{max},i}$  和  $\Delta P_{g,\text{min},i}$  分别为第  $i$  个装置爬升力的上、下限。

(3) 储能装置运行约束

$$\begin{cases} P_{\text{ess},\text{dis},\text{min}} \leq S_{\text{dis},t} P_{\text{ess},\text{dis},t} \leq P_{\text{ess},\text{dis},\text{max}} \\ P_{\text{ess},\text{ch},\text{min}} \leq S_{\text{ch},t} P_{\text{ess},\text{ch},t} \leq P_{\text{ess},\text{ch},\text{max}} \\ 0 \leq S_{\text{dis},t} + S_{\text{ch},t} \leq 1 \\ E_{\text{ess},t} = E_{\text{ess},t-1} + S_{\text{ch},t} P_{\text{ess},\text{ch},t} \eta_{\text{ch}} + S_{\text{dis},t} P_{\text{ess},\text{dis},t} / \eta_{\text{dis}}, \quad (21) \\ E_{\text{ess},\text{min}} \leq E_{\text{ess},t} \leq E_{\text{ess},\text{max}} \\ \sum_{t=1}^T (S_{\text{ch},t} P_{\text{ess},\text{ch},t} + S_{\text{dis},t} P_{\text{ess},\text{dis},t}) = 0 \end{cases}$$

式中:  $P_{\text{ess},\text{ch},\text{max}}$  和  $P_{\text{ess},\text{dis},\text{max}}$  分别为储能装置的最大充放电功率;  $S_{\text{ch},t}$  和  $S_{\text{dis},t}$  分别为储能装置放电和充电状态的二进制变量;  $P_{\text{ess},\text{ch},\text{min}}$  和  $P_{\text{ess},\text{dis},\text{min}}$  分别为储能装置的最小充放电功率;  $E_{\text{ess},t}$  为储能装置在  $t$  周期内的能量值;  $\eta_{\text{ch}}$  和  $\eta_{\text{dis}}$  分别为储能装置充电时的充电效率和放电时的放电效率;  $E_{\text{ess},\text{max}}$  和  $E_{\text{ess},\text{min}}$  分别为储能装置在调度周期内的最大和最小能量值。为了在下一调度周期内持续储能设备的回收利用, 将调度周期内储能设备充放电功率的代数和设置为 0。

(4) 光伏发电约束

$$0 \leq P_{pv,j,t} \leq P_{pv,\text{pre},j,t} \circ \quad (22)$$

(5) 风力发电约束

$$0 \leq P_{w,k,t} \leq P_{w,\text{pre},k,t} \circ \quad (23)$$

(6) 与配电网交互功率约束

$$0 \leq P_{\text{grid},\text{buy},t} \leq P_{\text{grid},\text{max}}, \quad (24)$$

$$-P_{\text{grid},\text{min}} \leq P_{\text{grid},\text{sell},t} \leq 0, \quad (25)$$

式中:  $P_{\text{grid},\text{max}}$  和  $P_{\text{grid},\text{min}}$  分别为配电网交互功率上、下限值。

### 3 APO-PSO算法

#### 3.1 算法原理

本文提出的联合发电系统最优调度模型包含燃气轮机发电功率、储能充放电功率、电网交互功率、碳交易量及储能模式状态共144个决策变量。优化时间尺度为1 h,调度周期涵盖24 h。由于该模型具有高维度、强非线性以及多个运行约束,即便通过线性化可转化为混合整数规划模型,其求解过程仍因变量规模庞大、约束结构复杂而面临计算效率瓶颈。

在此类优化问题中,启发式智能算法模拟自然行为和群体智慧,可在高维搜索空间中展现更强的全局搜索能力和适应性。APO是一类基于单细胞生物觅食行为的新颖群智能算法<sup>[26]</sup>,其核心模拟原生动物的运动机制。

(1) 伪足延伸。细胞通过伪足的伸展感知周围的营养梯度,对应优化算法中的定向搜索过程

$$\mathbf{X}_{\text{new}} = \mathbf{X}_{\text{cur}} + \eta(t)[\alpha \mathbf{G}_{\text{best}} + \beta \mathbf{P}_{\text{best}} - \mathbf{X}_{\text{cur}}], \quad (26)$$

式中: $\eta(t)$ 为时变步长因子; $\mathbf{G}_{\text{best}}$ 和 $\mathbf{P}_{\text{best}}$ 分别为全局最优和个体最优位置; $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为全局最优导向权重和个体历史最优导向权重; $\mathbf{X}_{\text{new}}$ 为更新后的个体位置向量(即下一步搜索位置); $\mathbf{X}_{\text{cur}}$ 为当前个体位置向量(即算法迭代中当前解的位置)。

(2) 原生质回流。原生质在伪足间不断回流,使细胞能够根据化学信号动态调整方向,对应算法中的动态步长调节机制

$$\eta(t) = \eta_0 \left(1 - \frac{I}{I_{\text{max}}}\right), \quad (27)$$

式中: $\eta_0$ 为动态衰减步长因子; $I$ 为当前迭代次数; $I_{\text{max}}$ 为最大迭代次数。

(3) 分裂繁殖。当营养条件充足时,原生动物的繁殖新个体;在恶劣环境中则淘汰适应度较差个体,该机制对应于群体重组策略,即

$$\text{if } \text{mod}(t, T_{\text{reorg}}) = 0 \text{ then replace } N_{\text{worst}} = [r, N], \quad (28)$$

式中: $\text{mod}()$ 为取模运算函数; $T_{\text{reorg}}$ 为重组周期; $N_{\text{worst}}$ 为适应度最差的个体集合; $N$ 为种群总规模; $r$ 为淘汰比例。

为提高求解效率并避免单一算法易出现的早熟收敛问题,本文将APO与PSO融合,构建APO-PSO混合优化算法。该算法通过以下机制显著增强搜索性能。

(1) 伪足延伸搜索机制。模拟单细胞觅食,构造精英导向定向搜索:

$$\mathbf{X}_{\text{new}} = \mathbf{X}_{\text{cur}} + \eta \left(1 - \frac{I}{I_{\text{max}}}\right) [0.7 \mathbf{G}_{\text{best}} + 0.3 \mathbf{P}_{\text{best}} - \mathbf{X}_{\text{cur}}]. \quad (29)$$

搜索方向融合全局最优(70%)和个体最优(30%),动态衰减步长因子 $\eta$ 随迭代过程线性衰减,使搜索由前期的广域探索逐步转向后期的局部开发,从而实现精细化搜索并提升最终解的精度。

(2) 群体重组策略。为维持群体多样性,每隔固定周期对种群进行重组,即

$$\text{if } \text{mod}(t, 10) = 0 \text{ then replace } N_{\text{worst}} = [15\%, N]. \quad (30)$$

每10代淘汰适应度最差的15%个体,并注入随机新粒子,以降低搜索过程陷入局部最优的风险。

(3) 动态参数调整。引入自适应惯性权重以调节粒子搜索范围,即

$$\omega_i = \omega_{\text{max}} \left(1 - \frac{I}{I_{\text{max}}}\right)^{0.5}, \quad (31)$$

式中: $\omega_i$ 为第 $I$ 次迭代时的惯性权重; $\omega_{\text{max}}$ 为初始最大惯性权重。该机制可在迭代初期保持较大搜索步幅,在后期逐步收敛至较小惯性权重,实现探索能力与收敛速度间的平衡。

APO-PSO算法的整体求解流程如图3所示。

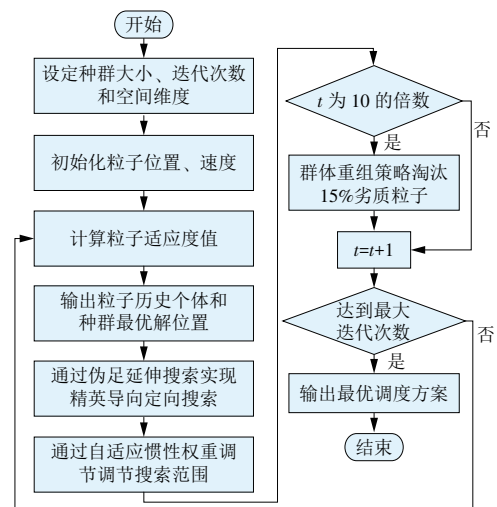


图3 模型求解流程

Fig. 3 Model solution flowchart

#### 3.2 参数设置

APO-PSO算法参数配置见表1。

### 4 算例分析

#### 4.1 基础数据

为验证所提模型的有效性和适用性,本文参照了东北某大型汽车生产制造园区的联合发电系统机组配置,包含1×100 kW燃气轮机组、1×400 kW光伏机组、1×150 kW风电机组和1×200 kW储能装置,园区采用固定工作时长制,因此园区工作日负荷不存在过大波动。

表 1 APO-PSO 算法参数

Table 1 Parameters of APO-PSO algorithm

| 参数               | 参数值  | 功能说明          |
|------------------|------|---------------|
| 种群规模 $N$         | 100  | 平衡计算效率与搜索能力   |
| 最大迭代次数 $I_{max}$ | 500  | 确保充分收敛        |
| 初始惯性权重 $\omega$  | 0.9  | 控制历史速度影响      |
| 个体学习因子 $c_1$     | 2.0  | 调节个体经验导向      |
| 群体学习因子 $c_2$     | 2.0  | 调节群体经验导向      |
| 伪足延伸比例           | 0.4  | 每代执行延伸操作的粒子比例 |
| 延伸强度系数           | 0.3  | 控制伪足搜索范围      |
| 重组比例 $N_{worst}$ | 0.15 | 淘汰劣质粒子比例      |
| 重组周期             | 10   | 维持种群多样性间隔     |

基于光伏发电运维和补贴政策等因素计算的发电成本为 0.15 元/(kW·h)。风力发电成本为 0.18 元/(kW·h)。储能系统装机容量为 200 kW·h, 初始容量为 50%, 容量上下限为 10%~90%, 最大放电功率为 70 kW。燃气轮机运行成本因素  $a=0.002$ ,  $b=0.165$ ,  $c=0.7^{[27]}$ 。储能装置的单位运维成本为 0.09 元/(kW·h)<sup>[28]</sup>。市场碳交易价格为 0.25 元/kg<sup>[29]</sup>, 单位电力碳排放权的分配系数为 0.45 kg/(kW·h), 阶梯长度为 100 kg, 惩罚系数与激励系数分别为  $r_1=p_1=1$ ,  $r_2=p_2=1.2$ ,  $r_3=p_3=1.44$ 。根据绿证订阅交易平台的历史交易数据, 绿证的价格为 0.03 元/(kW·h)。购电碳排放系数为 0.728 kg/(kW·h), 燃气轮机发电碳排放系数为 1.08 kg/(kW·h), 可再生能源废弃惩罚成本为 0.3 元/(kW·h)。电网分时电价见表 2。电网接触线最大功率为 350 kW。

表 2 电网分时电价

Table 2 Grid time-of-use electricity prices 元/(kW·h)

| 时段类型 | 时段                                      | 购电电价 | 售电电价 |
|------|---|------|------|
| 峰    | 10:00—15:00; 17:00—22:00                | 1.2  | 0.6  |
| 平    | 07:00—10:00; 15:00—17:00<br>22:00—24:00 | 0.8  | 0.4  |
| 谷    | 00:00—07:00                             | 0.5  | 0.3  |

将 24 h 作为调度周期, 调度间隔取 1 h, 系统的电负荷如图 4 所示。

由于可再生能源发电具有不确定性, 采用 Beta 分布分别生成 1 000 种可能的光伏和风电出力场景, Beta 分布能捕捉可再生能源出力的边界特性和不确定性分布, 随后采用 K-means 聚类方法从中聚类筛选出 5 个典型场景, 如图 5—6 所示, 并计算出相应场景发生概率, 见表 3。最终光伏与风电输入数据按典型场景与其概率加权计算。

为分析模型有效性, 本文根据 3 种典型机制进行组合设计 5 种对比情景, 见表 4。

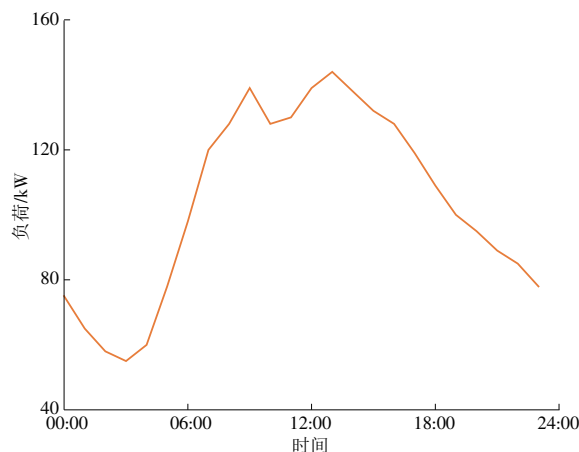


图 4 系统电负荷

Fig. 4 System electrical load

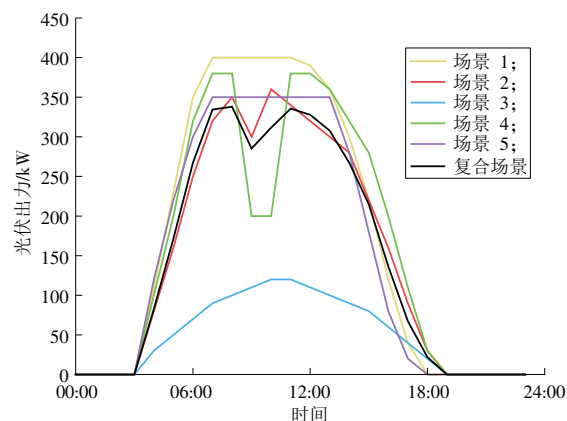


图 5 光伏发电出力典型场景生成结果

Fig. 5 Generation results of typical photovoltaic power output scenarios

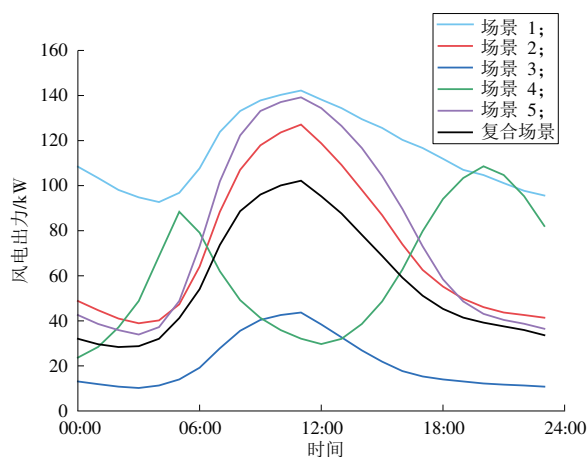


图 6 风力发电出力典型场景生成结果

Fig. 6 Generation results of typical wind power output scenarios

#### 4.2 算法对比分析

为了验证提出的 APO-PSO 算法的求解性能, 选取情景 5 作为基准情景, 分别采用 APO, PSO 与 GA 进行求解, 对比净收益、弃电率及碳排放量等指标, 结果见表 5, 收敛曲线如图 7 所示。

由表 5 可知, 与 APO, PSO, GA 相比, APO-PSO 算法的表现总体最优, 净收益指标分别提高了

53.06%, 34.11% 和 41.94%; 可再生能源发电弃电率指标分别降低 49.42%, 34.34% 和 42.19%; 系统碳排放量分别降低 48.00%, 32.82% 和 36.27%。

表 3 典型场景概率

| 场景 | 光伏发电场景概率 | 风力发电场景概率 |
|----|----------|----------|
| 1  | 22.3     | 15.2     |
| 2  | 34.7     | 31.6     |
| 3  | 17.6     | 23.5     |
| 4  | 15.3     | 12.4     |
| 5  | 10.1     | 17.3     |

表 4 典型情景设计

| 情景 | CET | SCT | RECT |
|----|-----|-----|------|
| 1  | ×   | ×   | ×    |
| 2  | √   | ×   | ×    |
| 3  | ×   | √   | ×    |
| 4  | √   | ×   | √    |
| 5  | ×   | √   | √    |

表 5 情景 5 下不同算法求解结果

Table 5 Solution results of different algorithms under scenario 5

| 求解方法    | 净收益/元  | 可再生能源发电弃电率/% | 碳排放量/kg |
|---------|--------|--------------|---------|
| APO-PSO | 693.57 | 1.74         | 280.48  |
| APO     | 453.14 | 3.44         | 539.29  |
| PSO     | 517.16 | 2.65         | 417.50  |
| GA      | 488.64 | 3.01         | 440.11  |

从图 7 可见, 4 种算法收敛曲线, PSO 收敛速度最快, 但 APO-PSO 能达到更优适应度值, 且全局搜索能力更强。综上, APO-PSO 在净收益、弃电率、碳排放与适应度 4 个指标上均优于其他 3 种算法。

### 4.3 基础运行情况分析

APO-PSO 算法 5 种情景运行结果见表 6。

以场景 1 和场景 5 为例进行比较, 其优化调度结果分别如图 8—9 所示。

对比图 8 和图 9, 在场景 5 中, 由于引入 RECT-SCT 联合机制, 系统调度更加合理, 在 22:00—24:00

与 00:00—07:00 的平谷时段, 系统优先从电网购电; 当光伏与风电出力不足时, 由燃气轮机和储能共同补偿需求; 储能系统在低电价时段充电、高电价时段放电, 提高经济性; 储能可在可再生能源高峰存储富余电量, 在低谷时释放, 减少弃电、提升可再生能源利用率; 燃气轮机主要在电价高峰或可再生能源不足时短时出力, 从而平衡收益与碳排放。

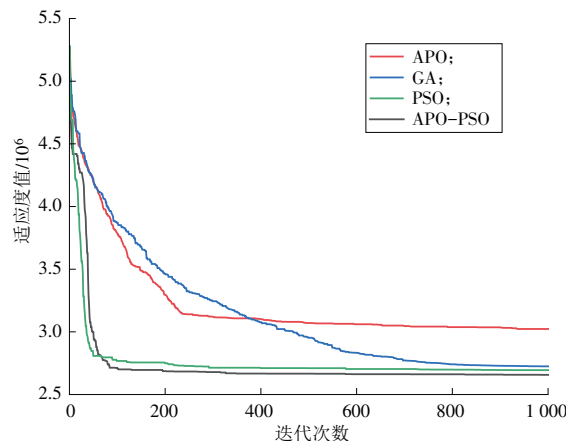


图 7 4 种算法收敛曲线

Fig. 7 Convergence curves of four algorithms

### 4.4 降碳效益分析

为比较文中所提模型的降碳能力, 给出 5 种情景碳排放情况, 见表 7。结果表明: 情景 2 (CET) 较情景 1 减排 9.06%, 情景 3 (SCT) 较情景 1 减排 20.15%, 可以证明 SCT 减排效果显著优于普通碳交易; 在情景 2 与 3 的基础上引入 RECT 后, 情景 4, 5 碳排放分别减少 16.64% 和 18.24%, 可见 RECT 可提升可再生能源利用率并带来间接减排效应; 情景 5 采用 SCT-RECT 联合机制, 较情景 4 进一步降低碳排放 18.41%, SCT-RECT 组合具有最强降碳能力。

### 4.5 经济效益分析

5 种情境下系统的 CET 收益、SCT 收益、RECT 收益和系统净收益见表 8。由表 8 分析可知, 情景 3 的净收益高于情景 2, SCT 机制相较 CET 能获得更高经济效益; 情景 4 和情景 5 相比于情景 2 和情景 3, 引入 RECT 机制进行联合后, 净收益进一步显著提升, 由此可见 RECT 所带来的附加收益有效提升系统整

表 6 5 种情景运行结果

Table 6 Operation results of five scenarios

| 情景 | 净收益/元  | 燃气轮机运行成本/元 | 可再生能源发电运维成本/元 | 可再生能源发电弃电罚金/元 | 储能系统运维成本/元 | 购电成本/元 | 售电收益/元   | CET 收益/元 | SCT 收益/元 | RECT 收益/元 | 可交易 REC 占比/% |
|----|--------|------------|---------------|---------------|------------|--------|----------|----------|----------|-----------|--------------|
| 1  | 254.88 | 99.55      | 768.97        | 3.95          | 21.54      | 147.17 | 1 296.06 |          |          |           |              |
| 2  | 465.02 | 72.95      | 768.97        | 3.24          | 31.08      | 151.29 | 1 314.40 | 178.15   |          |           |              |
| 3  | 545.13 | 66.55      | 768.97        | 3.12          | 36.09      | 166.72 | 1 334.17 |          | 252.41   |           |              |
| 4  | 581.61 | 57.12      | 768.97        | 2.68          | 35.34      | 170.29 | 1 339.52 | 191.97   |          | 84.52     | 59.40        |
| 5  | 693.57 | 34.11      | 768.97        | 1.93          | 33.30      | 183.63 | 1 363.50 |          | 262.41   | 89.60     | 62.97        |

体收益;最优方案为情景 5(SCT-RECT 联合机制),进一步证明联合机制具有更强的经济激励能力。

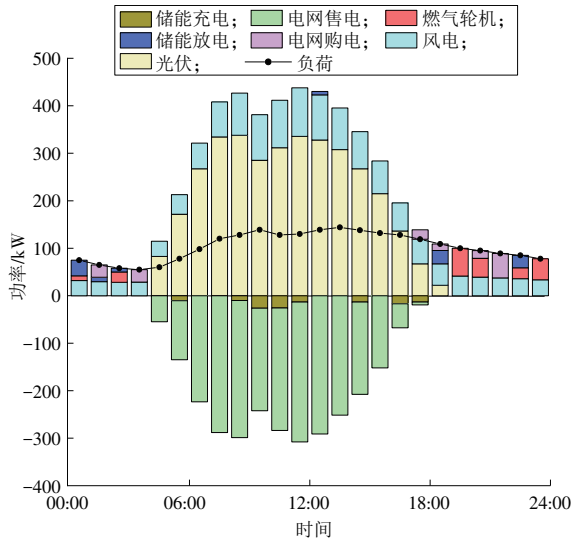


图 8 场景 1 优化调度结果

Fig. 8 Optimal scheduling results of scenario 1

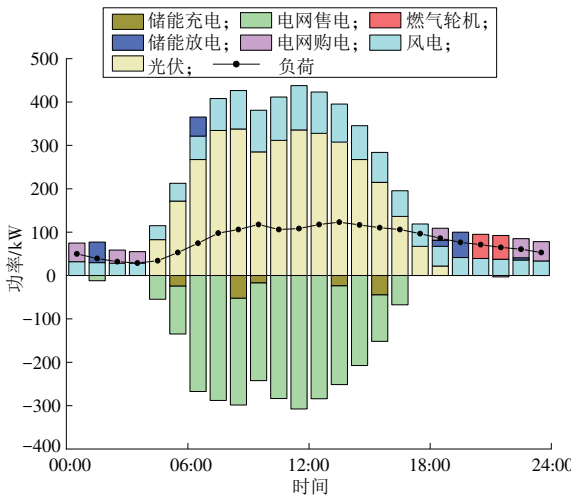


图 9 场景 5 优化调度结果

Fig. 9 Optimal scheduling results of scenario 5

表 7 5 种情景碳排放量

Table 7 Carbon emissions of five scenarios kg

| 情景 | 碳排放量   |
|----|--------|
| 1  | 422.50 |
| 2  | 387.40 |
| 3  | 331.64 |
| 4  | 332.12 |
| 5  | 280.48 |

表 8 经济效益

Table 8 Economic benefits 元

| 情景 | 碳交易收益  | SCT 收益 | RECT 收益 | 净收益    |
|----|--------|--------|---------|--------|
| 1  |        |        |         | 254.88 |
| 2  | 178.15 |        |         | 464.02 |
| 3  |        | 252.41 |         | 544.53 |
| 4  | 191.97 |        | 84.52   | 581.61 |
| 5  |        | 262.41 | 89.60   | 693.57 |

### 5 结论

本文围绕风电-光伏-燃气轮机-储能联合发电系统,构建考虑 SCT 与 RECT 的低碳最优调度模型,采用 APO-PSO 混合算法求解,结合政策要求与工程实际提炼核心结论如下。

(1)SCT 机制通过强化边际减排激励,构建了收益优化与碳减排的协同机制,相比传统 CET 机制,不仅大幅提升了系统经济性,还显著提高了可再生能源消纳水平,为新型电力系统低碳经济运行提供了可行的市场化调控路径。

(2)基于 Beta 分布与 K-means 聚类的场景处理方法,有效应对可再生能源发电的不确定性,所提调度模型在不同出力波动场景下均能保持较高的可再生能源消纳率,展现出良好的稳定性与环境适应性,为含高比例可再生能源的联合发电系统可靠运行提供了技术支持。

(3)构建“可交易绿证-不可交易绿证”分类嵌入的 RECT-SCT 联合机制,精准响应绿证管理政策要求。该机制充分适配绿证分类管理,其市场化激励设计符合未来低碳市场体系建设方向。

(4)APO-PSO 算法在求解性能上具有显著优势,在全局探索与局部开发之间取得了良好平衡,有效避免早熟收敛并维持种群多样性,其求解性能显著优于 GA 算法和 PSO 算法,为联合发电系统的复杂调度问题提供了高效求解方案。

### 参考文献:

[1]谭甲群,吕如轩,鞠洪晋,等.基于改进秃鹰搜索算法的风光火储综合能源系统优化调度策略研究[J].综合智慧能源,2025,47(8):68-76.

TAN Jiaqun, LYU Ruxuan, JU Hongjin, et al. Research on optimal scheduling strategy of wind-photovoltaic-thermal-storage integrated energy system based on IBES [J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(8): 68-76.

[2]叶青海.“双碳”目标下协同推进能源结构调整与新质生产力形成的策略研究[J].工业技术经济,2025,44(7):69-77.

YE Qinghai. Research on the strategy of collaborative promotion of energy structure adjustment and formation of new quality productivity under the "dual carbon" goal [J]. Journal of Industrial Technology and Economy, 2025, 44 (7): 69-77.

[3]王放放,杨鹏威,赵光金,等.新型电力系统下火电机组灵活性运行技术发展及挑战[J].发电技术,2024,45(2):189-198.

- WANG Fangfang, YANG Pengwei, ZHAO Guangjin, et al. Development and challenge of flexible operation technology of thermal power units under new power system [J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(2): 189-198.
- [4] 窦翔, 李卓群, 张哲, 等. 基于CNN-BiLSTM-RF-KDE的综合能源系统负荷预测[J]. *综合智慧能源*, 2025, 47(9): 60-70.
- DOU Xiang, LI Zhuoqun, ZHANG Zhe, et al. Load forecasting for integrated energy systems based on CNN-BiLSTM-RF-KDE [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2025, 47(9): 60-70.
- [5] 高放, 姚浩天, 高庆, 等. 考虑参数共享的深度强化学习双阶段分布式电源优化[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(19): 7493-7509.
- GAO Fang, YAO Haotian, GAO Qing, et al. Two-stage distributed generators optimization based on deep reinforcement learning with parameter sharing [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(19): 7493-7509.
- [6] 马彦宏, 吕清泉, 张珍珍, 等. 考虑储能系统SOC的双卡尔曼滤波风电功率波动平抑策略[J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(2): 61-68.
- MA Yanhong, LYU Qingquan, ZHANG Zhenzhen, et al. Wind power fluctuation mitigation strategy based on double Kalman filter considering the SOC of the energy storage system [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2023, 45(2): 61-68.
- [7] ZHOU B, LYU L, GAO H J, et al. Robust day-ahead trading strategy for multiple virtual power plants [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 2694-2703.
- [8] 周博, 吕林, 高红均, 等. 多虚拟电厂日前鲁棒交易策略研究[J]. *电网技术*, 2018, 42(8): 2694-2703.
- ZHOU Bo, LYU Lin, GAO Hongjun, et al. Robust day-ahead trading strategy for multiple virtual power plants [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 2694-2703.
- [9] WANG S X, YUAN S C. Interval optimization for integrated electrical and natural-gas systems with power to gas considering uncertainties [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 119: 105906.
- [10] ZENG L J, XU J Z, WU M, et al. Day-ahead interval optimization for CCHP system considering uncertainty of wind power and PV [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 138: 107895.
- [11] CHENG Z P, JIA D Q, LI Z W, et al. Multi-time scale dynamic robust optimal scheduling of CCHP microgrid based on rolling optimization [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 139: 107957.
- [12] 王溟, 王润铸, 谢开贵, 等. 新能源电力系统能量-网损-备用协同决策下的交流潮流嵌入式节点边际定价方法[J/OL]. *中国电机工程学报*, 1-16(2025-08-12) [2025-08-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.250736>.
- WANG Hao, WANG Runzhu, XIE Kaigui, et al. AC power flow embedded locational marginal pricing method under synergistic decision-making of energy, network loss and reserve in new energy power systems [J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 1-16(2025-08-12) [2025-08-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.250736>.
- [13] 高锋阳, 裴淑萍, 李龙, 等. 基于改进生成对抗网络的可控可解释性风光场景生成方法[J/OL]. *电力自动化设备*, 1-12(2025-08-15) [2025-08-20]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202508010>.
- GAO Fengyang, PEI Shuping, LI Long, et al. Controllable and interpretable wind-solar scenario generation method based on improved generative adversarial network [J/OL]. *Electric Power Automation Equipment*, 1-12(2025-08-15) [2025-08-20]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202508010>.
- [14] 傅国斌, 杨凯璇, 孙海斌, 等. 低惯量电力系统频率安全约束优化运行研究综述与展望[J]. *中国电力*, 2025, 58(9): 148-163.
- FU Guobin, YANG Kaixuan, SUN Haibin, et al. Frequency security constrained optimal operation of low-inertia power systems: review and prospects [J]. *Electric Power*, 2025, 58(9): 148-163.
- [15] 袁桂丽, 杨彪, 丁宁, 等. 考虑综合需求响应和阶梯型碳交易的综合能源系统协调优化调度[J]. *现代电力*, 2025, 42(4): 659-668.
- YUAN Guili, YANG Biao, DING Ning, et al. Coordinated and optimized dispatching of integrated energy system considering integrated demand response and ladder-type carbon trading [J]. *Modern Electric Power*, 2025, 42(4): 659-668.
- [16] 杨顺顺. 碳排放权和用能权交易双重试点市场政策效应评估[J]. *生态与农村环境学报*, 1-15(2025-07-08) [2025-08-20]. <https://www.ere.ac.cn/article/doi/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0321>.
- YANG Shunshun. Policy effect evaluation of dual pilot markets for carbon emission rights and energy use rights trading [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 1-15(2025-07-08) [2025-08-20]. <https://www.ere.ac.cn/article/doi/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0321>.
- [17] LUO Z, MA S L, LIU D W, et al. Non-cooperative game optimization of coal mine integrated energy system considering energy-carbon-green certificates coupling trading [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 520: 146072.
- [18] WANG B K, LI C H, BAN Y S, et al. A multi-market equilibrium model considering the carbon-green certificate mutual recognition trading mechanism under the electricity

- market[J]. *Energy*, 2025, 330: 136902.
- [19] PAN Y S, GUO X Y, YANG S B, et al. A two-stage optimal dispatch model for wind-storage-carbon capture power plants considering carbon emission and green certificate trading[J]. *Energy*, 2025, 332: 137192.
- [20] CHEN H P, WU H, LI H L, et al. Bi-level optimal scheduling of integrated energy systems considering incentive-based demand response and green certificate-carbon trading mechanisms [J]. *Energy Reports*, 2025, 13: 330-344.
- [21] WANG X Y, CHEN H, TONG X, et al. Optimal scheduling of a multi-energy complementary system simultaneously considering the trading of carbon emission and green certificate[J]. *Energy*, 2024, 310: 133212.
- [22] GAO J, SHAO Z G, CHEN F X, et al. Multi-energy trading strategies for integrated energy systems based on low-carbon and green certificate [J]. *Electric Power Systems Research*, 2025, 238: 111120.
- [23] JIANG H, LIU X Y, ZHOU H, et al. Multi-time-scale optimal scheduling strategy of electricity-heat-cold-gas integrated energy system considering ladder carbon trading [J]. *Energy Reports*, 2025, 13: 4000-4014.
- [24] 国家能源局. 可再生能源绿色电力证书核发和交易规则(国能发新能规[2024]67号)[A/OL]. 2024, [https://zfxgk.nea.gov.cn/2024-08/26/c\\_1310785819.htm](https://zfxgk.nea.gov.cn/2024-08/26/c_1310785819.htm).
- [25] JU L W, TAN Q L, ZHAO R, et al. Multi-objective electro-thermal coupling scheduling model for a hybrid energy system comprising wind power plant, conventional gas turbine, and regenerative electric boiler, considering uncertainty and demand response [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117774.
- [26] SHEHAB M. Artificial protozoa optimizer: A bio-inspired metaheuristic for complex engineering optimization [J]. *Results in Engineering*, 2025, 27: 106883.
- [27] ZHANG L, LIU D Y, CAI G W, et al. An optimal dispatch model for virtual power plant that incorporates carbon trading and green certificate trading [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 144: 108558.
- [28] 张高, 王旭, 蒋传文, 等. 采用双层优化调度的虚拟电厂经济性分析[J]. *电网技术*, 2016, 40(8): 2295-2301. ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Economic analysis of virtual power plants based on bi-level optimization dispatch [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(8): 2295-2301.
- [29] 蔡昌春, 何瑶瑶, 石庆伦, 等. 考虑绿证-碳交易与需求响应的含氢 IES 低碳优化调度[J]. *电力工程技术*, 2025(3): 43-52. CAI Changchun, HE Yaoyao, SHI Qinglun, et al. Low-carbon optimal dispatching of hydrogen-containing IES considering joint green certificate-carbon emission trading and demand response [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025(3): 43-52.

(本文责编:王庆霞)

收稿日期:2025-08-22;修回日期:2026-01-04  
上网日期:2026-03-25;附录网址:www.ienergy.cn

#### 作者简介:

穆雨彤(2001),女,硕士生,从事联合发电系统低碳优化调度方面的研究,15104660442@163.com;

王巍\*(1975),女,教授,博士,从事工业工程、机械工程等方面的研究,vickywong@nefu.edu.cn。

\*为通信作者。