

控制与决策

Control and Decision

基于IMPA的含氢综合能源系统经济优化调度

徐志凡, 李媛, 郑新宇, 屈玥含

引用本文:

徐志凡, 李媛, 郑新宇, 等. 基于IMPA的含氢综合能源系统经济优化调度[J]. *控制与决策*, 2025, 40(11): 3437-3444.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0309>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[双重驱动的果蝇优化算法及其在PID控制器中的应用](#)

Double drive fruit fly optimization algorithm and its application in PID controller
控制与决策. 2021, 36(9): 2225–2233 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0046>

[面向全局搜索的自适应领导者樽海鞘群算法](#)

Global search-oriented adaptive leader salp swarm algorithm
控制与决策. 2021, 36(9): 2152–2160 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0090>

[基于改进蚁群算法的水面无人艇路径规划](#)

Path planning for unmanned surface vehicle based on improved ant colony algorithm
控制与决策. 2021, 36(4): 847–856 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0839>

[融合能量周期性递减与牛顿局部增强的改进HHO算法](#)

[Improved harris hawks optimization coupling energy cycle decline mechanism and Newton local enhancement strategy](#)
控制与决策. 2021, 36(3): 629–636 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0810>

[基于深度强化学习与迭代贪婪的流水车间调度优化](#)

Scheduling optimization for flow-shop based on deep reinforcement learning and iterative greedy method
控制与决策. 2021, 36(11): 2609–2617 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0608>

基于 IMPA 的含氢综合能源系统经济优化调度

徐志凡, 李媛[†], 郑新宇, 屈玥含

(沈阳工业大学 理学院, 沈阳 110870)

摘要: 针对传统优化算法在综合能源系统经济优化调度问题中较难寻出可行解或最优解的问题, 提出一种多策略改进的海洋捕食者算法. 采用 Sobol 序列初始化种群、模式搜索法更新位置信息以及动态反向学习策略扩大搜索范围, 进一步提升算法的收敛速度和寻优精度. 基于系统功率平衡、能源设备出力限制及储能装置约束条件, 以经济成本最小为目标建立考虑氢燃料发电机和热电联产等设备多能耦合的含氢综合能源系统优化调度模型. 结合河北某地区的实际数据开展算例仿真分析, 结果表明, 所提出的算法相较于其余 4 种群智能优化算法, 在不同场景下均具有更好的优化调度能力, 能够有效协调源-荷-储多元耦合关系, 降低系统运行的综合成本.

关键词: 综合能源系统; 优化调度; 改进海洋捕食者算法; Sobol 序列; 模式搜索; 动态反向学习

中图分类号: TK01; TP18 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0309

引用格式: 徐志凡, 李媛, 郑新宇, 等. 基于 IMPA 的含氢综合能源系统经济优化调度 [J]. 控制与决策, 2025, 40(11): 3437-3444.

Economic optimization dispatch of integrated energy system containing hydrogen based on IMPA

XU Zhi-fan, LI Yuan[†], ZHENG Xin-yu, QU Yue-han

(School of Science, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: To address the issue that traditional optimization algorithms struggle to find feasible or optimal solutions in the economic optimization scheduling of integrated energy systems, a multi-strategy improved marine predators algorithm is proposed. The Sobol sequence is adopted for population initialization, the pattern search is employed to update position information, and the dynamic opposition-based learning strategy is utilized to expand the search space to further improve the convergence speed and optimization accuracy of the algorithm. By considering system power balance, energy equipment output limitations, and energy storage device constraints, an optimization scheduling model for hydrogen-involved integrated energy systems is established. This model takes into account the coupling of multiple energy forms, including hydrogen fuel generators and cogeneration equipment, with the objective of minimizing overall costs. Case studies based on real-world data from Hebei province demonstrate that the proposed algorithm outperforms four other intelligent optimization algorithms across various scenarios. It effectively coordinates the multi-energy coupling relationships among generation, load, and storage, thereby reducing the overall system operation cost.

Keywords: integrated energy systems; optimal scheduling; improved marine predators algorithm; Sobol sequence; pattern search; dynamic opposition-based learning

0 引言

随着全球能源需求的显著增加和环境污染的严重, 构建可持续发展的能源系统并提升能源利用效率已成为能源领域的重要研究对象^[1]. 综合能源系统 (IES) 作为一种能够实现多能耦合与多能协调的先进能源利用形式, 通过协调能源供需实现新能源与多能负荷的协调运行, 降低了对传统化石燃料的依赖, 推动传统能源结构向“双碳”目标转型^[2-3].

目前, 中外学者针对综合能源系统进行了大量研究. 文献 [4] 提出了一种考虑热网传输特性和需求响应的电热综合能源系统调度模型, 有效提高了系统风电消纳水平; 文献 [5] 构建了一种考虑能源路由器的电热气综合能源系统, 增强了系统的能源供应可靠性和调度灵活性; 文献 [6] 基于多能互补的思想, 构建了含燃气轮机的典型电气综合能源系统, 能够显著提高系统运行的综合效益; 文献 [7] 提出了一

收稿日期: 2025-03-26; 录用日期: 2025-07-07.

基金项目: 辽宁省兴辽英才计划项目 (XLYC2008005); 国家自然科学基金项目 (52407248).

[†]通信作者. E-mail: syliyuan@sut.edu.cn.

种集成风能和不确定性建模的含热电联产 (CHP) 和储能设备的电热气综合能源系统模型, 结果表明其有助于优化能源系统的运营. 以上研究主要集中于电、气、冷、热等传统能源的部分耦合和存储, 对多能互补的能源系统种类考虑不够完善, 并且缺乏对氢能利用与存储技术的整合.

IES 中涉及多种能源设备, 需要通过合理的能源调度规划实现不同能源形式之间的最优协同和互补. 目前, 求解 IES 优化运行方法主要分为传统数学规划方法和智能优化算法. 传统数学规划方法通常基于经典的数学优化理论, 通过建立精确的数学模型求解问题, 具备最优解等理论基础. 但是, 传统数学规划方法在面对复杂 IES 优化问题时, 往往存在处理能力不足、计算效率低等局限性, 很难在短时间内给出适宜的优化调度方案. 相比之下, 智能优化算法通过借鉴自然生物的行为特征进行启发式搜索, 具有探索能力强、迭代速度快等优点, 在解决综合能源系统经济优化调度上展现出显著优势. 文献 [8] 提出了一种基于 Q 学习的多种群螻蛄优化算法, 求解混合综合能源系统的调度规划显示更优; 文献 [9] 采用粒子群算法对家庭电热综合能源系统进行优化调度, 存在收敛能力不足等问题; 文献 [10] 将遗传算法与白鲸优化算法相结合, 对考虑需求响应的系统模型进行优化调度; 文献 [11] 采用结合莱维飞行的鸡群算法对模型进行调度规划, 实现参与者、能源和环境的共赢.

以上文献从不同角度对智能优化算法进行改进, 但在提升种群质量、探索局部空间等方面仍存在不足. 因此, 探索具有更高寻优性能的智能优化算法, 已经成为综合能源系统优化调度领域中的重要研究方向. 海洋捕食者算法 (MPA)^[12] 是一种由 Faramarzi 等提出的新型仿生优化算法, 具有迭代速度快、寻优性能强等特点, 现已成功地应用于图像分割^[13]、无人机航迹规划^[14] 等一系列优化问题上. 然而, 该算法在面对复杂的 IES 优化调度问题时, 仍有一定概率陷入局部空间, 找到非最优调度结果, 需要进一步改进以提升算法的优越性.

综上, 为提升 IES 的经济性和灵活性, 更好地求解 IES 调度规划问题, 提升海洋捕食者算法的寻优性能, 本文提出一种基于多策略改进海洋捕食者算法的含氢 IES 经济优化调度策略. 首先, 以经济成本最小为目标, 构建出一种考虑氢能利用与存储的电-气-冷-热-氢多能耦合 IES 优化调度模型. 其次, 提出一种多策略改进的海洋捕食者算法 (IMPA). 为在搜索空间内均匀分布解, 采用 Sobol 序列对种群进行

初始化, 提升初始解的质量; 为勘探局位置空间, 融合模式搜索法更新顶级捕食者位置, 提高种群探索的精度; 同时, 为提升算法的抗停滞能力, 采用动态反向学习策略遍历更广泛的搜索范围, 提升算法的全局收敛精度. 最后, 将改进算法应用于含氢 IES 经济优化调度中, 通过算例分析验证本文提出的改进算法在综合能源系统中能够有效协调能源供给、负荷需求和储能单元之间复杂的多元耦合关系, 在保证系统安全约束的前提下提升总体经济效益, 为综合能源系统的优化调度提供新的解决方案.

1 含氢综合能源系统模型

1.1 系统架构

本文具体含氢综合能源系统架构如图 1 所示.

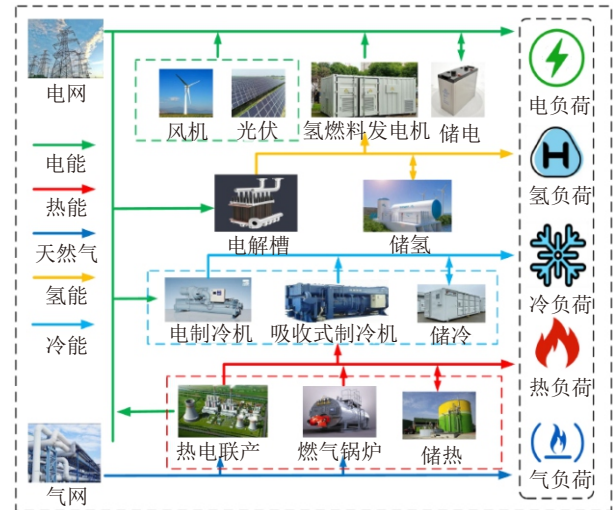


图1 含氢综合能源系统架构

外部电网、风力发电 (WT)、光伏发电 (PV)、热电联产和氢燃料电池 (HFG) 满足电负荷需求; 热电联产和燃气锅炉 (GB) 满足热负荷需求; 电制冷机 (EC) 和吸收式制冷机 (AC) 满足冷负荷需求; 外部气网满足气负荷需求. 储能系统包括储氢 (HES)、储电 (ES)、储冷 (CS) 和储热 (HS). 在 WT 和 PV 存在剩余或电价低谷时段, 系统利用储能设备将购入电能与可再生能源电能转化为热、冷、氢多种形式的储能介质, 在负荷无法被满足时进行补充.

1.2 能源设备模型

1.2.1 电解槽

电解槽通过电化学反应分解水分子将电能转化为氢气, 其数学模型为

$$m_{P_2H}(t) = S_{P_2H} P_{EL}(t), \quad (1)$$

$$S_{P_2H} = \eta_{P_2H} M_{H_2} / L_{LHV}. \quad (2)$$

其中: $m_{P_2H}(t)$ 为 t 时段电解槽的产氢量, $P_{EL}(t)$ 为 t 时段电解槽的电功率, S_{P_2H} 为每千瓦电功率通过电

解槽所产生氢气的质量, $\eta_{P_{2H}}$ 为电解槽的氢气生产效率, L_{LHV} 为氢气的低热值, M_{H_2} 为氢气的摩尔质量。

1.2.2 氢燃料发电机

氢燃料发电机能够将氢气的化学能转化为电能, 以满足电力负荷需求, 其数学模型为

$$P_{HFG}(t) = S_{HFC} m_{HFG}(t), \quad (3)$$

$$S_{HFC} = \eta_{HFG} L_{LHV} / \rho_0. \quad (4)$$

其中: $P_{HFG}(t)$ 为 t 时段氢燃料发电机的输出功率, $m_{HFG}(t)$ 为 t 时段氢燃料发电机的氢气输入质量, S_{HFC} 为每千克氢通过氢燃料发电机所产生的电功率, ρ_0 为标准状态下氢气的密度, η_{HFG} 为氢燃料发电机的氢气电能转化效率。

1.2.3 电制冷机

电制冷机的制冷功率如下:

$$P_{EC-c}(t) = P_{EC-e}(t) \text{COP}_{EC}. \quad (5)$$

其中: $P_{EC-c}(t)$, $P_{EC-e}(t)$ 为 t 时段电制冷机的制冷功率和电功率; COP_{EC} 为电制冷机性能系数。

1.2.4 吸收式制冷机

吸收式制冷机通过吸收能源系统中的废热和余热制冷, 其数学模型为

$$P_{AC-c}(t) = P_{AC-h}(t) \text{COP}_{AC}. \quad (6)$$

其中: $P_{AC-c}(t)$, $P_{AC-h}(t)$ 为 t 时段吸收式制冷机的制冷功率和热功率; COP_{AC} 为吸收式制冷机性能系数。

1.2.5 热电联产

热电联产是综合能源系统中的重要设备, 能够充分利用燃料能源, 以达到高效生产热能和电能的目的, 其数学模型为

$$P_{CHP-e}(t) = \eta_{CHP-e} \delta_g V_{CHP}(t), \quad (7)$$

$$P_{CHP-h}(t) = \eta_{CHP-h} \delta_g V_{CHP}(t). \quad (8)$$

其中: $P_{CHP-e}(t)$ 为 t 时段 CHP 输出的电功率, η_{CHP-e} 为 CHP 的电能转换效率, δ_g 为天然气的热值, $V_{CHP}(t)$ 为 t 时段 CHP 的天然气的用量, $P_{CHP-h}(t)$ 为 t 时段 CHP 输出的热功率, η_{CHP-h} 为 CHP 的热能转换效率。

1.2.6 燃气锅炉

燃气锅炉通过燃烧气体燃料以供应热能, 其数学模型为

$$P_{GB-h}(t) = \eta_{GB} \delta_g V_{GB}(t). \quad (9)$$

其中: $P_{GB-h}(t)$ 为 t 时段燃气锅炉输出的热功率, η_{GB} 为燃气锅炉的热能转换效率, $V_{GB}(t)$ 为 t 时段燃气锅炉的天然气的用量。

1.2.7 储能设备

储能设备是综合能源系统中的关键元件, 能够

有效解决能源供应的间歇性和不稳定性问题, 提升能源系统的可靠性和灵活性. 本文含氢综合能源系统中存在储电、储冷、储热和储氢, 共 4 种储能设备, 统一进行如下建模:

$$S_{ks}(t) = (1 - \gamma_{ks}) S_{ks}(t-1) + \left(\eta_{ks}^{cha} P_{ks}^{cha}(t) - \frac{P_{ks}^{dis}(t)}{\eta_{ks}^{dis}} \right) \Delta t, \quad ks \in \{ES, HS, CS\}; \quad (10)$$

$$S_{ks}(t) = (1 - \gamma_{ks}) S_{ks}(t-1) + \left(\eta_{ks}^{cha} m_{ks}^{cha}(t) - \frac{m_{ks}^{dis}(t)}{\eta_{ks}^{dis}} \right) \Delta t, \quad ks \in \{HES\}. \quad (11)$$

其中: $S_{ks}(t)$ 为 t 时段第 ks 类储能设备的容量; γ_{ks} 为第 ks 类储能设备的能量损失系数; η_{ks}^{cha} , η_{ks}^{dis} 为第 ks 类储能设备的充能和放能效率; $P_{ks}^{cha}(t)$, $P_{ks}^{dis}(t)$ 为 t 时段第 ks 类储能设备的充能和放能功率; $m_{ks}^{cha}(t)$, $m_{ks}^{dis}(t)$ 为 t 时段第 ks 类储能设备的充能质量和放能质量; Δt 为单位时段。

1.3 目标函数

本文以经济性为目标函数, 综合考虑电能交易成本、购气成本、能源设备运行维护成本和弃风、弃光惩罚成本, 实现对综合能源系统的优化调度。

系统总成本如下:

$$\min f = \sum_{t=1}^{24} (C_{elec}(t) + C_{gas}(t) + C_{om}(t) + C_{cwp}(t)). \quad (12)$$

其中: $C_{elec}(t)$ 为 t 时段电能交易成本, $C_{gas}(t)$ 为 t 时段购买天然气成本, $C_{om}(t)$ 为 t 时段能源设备运行维护成本, $C_{cwp}(t)$ 为 t 时段弃风、弃光的惩罚成本。

1.3.1 电能交易成本

$$C_{elec}(t) = \lambda_{buy,e}(t) P_{buy,e}(t) - \lambda_{sell,e}(t) P_{sell,e}(t). \quad (13)$$

其中: $\lambda_{buy,e}(t)$ 为 t 时段购买电能价格, $\lambda_{sell,e}(t)$ 为 t 时段售卖电能价格, $P_{buy,e}(t)$ 为 t 时段系统购买电能功率, $P_{sell,e}(t)$ 为 t 时段系统售卖电能功率。

1.3.2 购气成本

$$C_{gas}(t) = \lambda_g V_g(t). \quad (14)$$

其中: λ_g 为 t 时段购买天然气价格, $V_g(t)$ 为 t 时段购买天然气的量。

1.3.3 能源设备运行维护成本

$$kp \in \{PV, WT, HFG, EL, EC, AC, CHP, GB, ES, HS, HES, CS\}, C_{om}(t) = \lambda^{kp} p_k(t). \quad (15)$$

其中: λ^{kp} 为第 kp 类能源设备的单位运行维护费用系数, $p_k(t)$ 为 t 时段第 kp 类能源设备的运行功率。

1.3.4 弃风、弃光惩罚成本

$$C_{\text{cwp}}(t) = \lambda_w p_{\text{cw}}(t) + \lambda_p p_{\text{cp}}(t). \quad (16)$$

其中: λ_w, λ_p 为弃风、弃光惩罚系数; $p_{\text{cw}}(t), p_{\text{cp}}(t)$ 为 t 时段弃风、弃光功率.

1.4 约束条件

1.4.1 系统功率平衡约束

$$\begin{aligned} P_{\text{buy},e}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{ES}}^{\text{cha}}(t) + P_{\text{CHP}-e}(t) = \\ P_{\text{EL}}(t) + P_{\text{sell},e}(t) + P_{\text{HFG}}(t) + \\ P_{\text{ES}}^{\text{dis}}(t) + P_{\text{EC}-e}(t) + P_{\text{ELoad}}(t), \end{aligned} \quad (17)$$

$$P_{\text{EC}-c}(t) + P_{\text{AC}-c}(t) + P_{\text{cha}}^{\text{CS}}(t) = P_{\text{dis}}^{\text{CS}}(t) + P_{\text{CLoad}}(t), \quad (18)$$

$$m_{\text{P}_2\text{H}}(t) + m_{\text{cha}}^{\text{HES}}(t) = m_{\text{dis}}^{\text{HS}}(t) + m_{\text{HFG}}(t) + m_{\text{HELload}}(t), \quad (19)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{CHP}-h}(t) + P_{\text{GB}-h}(t) + P_{\text{cha}}^{\text{HS}}(t) = \\ P_{\text{dis}}^{\text{HS}}(t) + P_{\text{AC}-h}(t) + P_{\text{HLoad}}(t), \end{aligned} \quad (20)$$

$$V_g(t) = V_{\text{CHP}}(t) + V_{\text{GB}}(t) + V_{\text{GLoad}}(t). \quad (21)$$

其中: $P_{\text{PV}}(t)$ 为 t 时段光伏发电功率, $P_{\text{WT}}(t)$ 为 t 时段风机发电功率, $P_{\text{ELoad}}(t)$ 为 t 时段 IES 的电负荷功率, $P_{\text{CLoad}}(t)$ 为 t 时段 IES 的冷负荷功率, $P_{\text{HLoad}}(t)$ 为 t 时段 IES 的热负荷功率, $V_{\text{GLoad}}(t)$ 为 t 时段 IES 的天然气的负荷量, $m_{\text{HELload}}(t)$ 为 t 时段 IES 的氢气负荷量.

1.4.2 能量转换设备运行约束

$$\begin{aligned} p_{\text{keq}}^{\min} \leq p_{\text{keq}}(t) \leq p_{\text{keq}}^{\max}, \\ \text{keq} \in \{\text{PV}, \text{WT}, \text{HFG}, \text{EL}, \text{EC}, \text{AC}, \text{CHP}, \text{GB}\}. \end{aligned} \quad (22)$$

其中: $p_{\text{keq}}(t)$ 为 t 时段第 keq 类能源设备的运行功率, p_{keq}^{\min} 为第 keq 类能源设备的最低功率, p_{keq}^{\max} 为第 keq 类能源设备的最高功率.

1.4.3 储能设备运行约束

$$S_{\text{ks}}^{\min} \leq S_{\text{ks}}(t) \leq S_{\text{ks}}^{\max}, \text{ks} \in \{\text{ES}, \text{HS}, \text{CS}, \text{HES}\}; \quad (23)$$

$$0 \leq P_{\text{ks}}^{\text{cha}}(t) \leq B_{\text{ks}}^{\text{cha}}(t) P_{\text{ks}}^{\max}, \text{ks} \in \{\text{ES}, \text{HS}, \text{CS}\}; \quad (24)$$

$$0 \leq P_{\text{ks}}^{\text{dis}}(t) \leq B_{\text{ks}}^{\text{dis}}(t) P_{\text{ks}}^{\max}, \text{ks} \in \{\text{ES}, \text{HS}, \text{CS}\}; \quad (25)$$

$$0 \leq P_{\text{ks}}^{\text{cha}}(t) \leq B_{\text{ks}}^{\text{cha}}(t) m_{\text{ks}}^{\max}, \text{ks} \in \{\text{HES}\}; \quad (26)$$

$$0 \leq P_{\text{ks}}^{\text{dis}}(t) \leq B_{\text{ks}}^{\text{dis}}(t) m_{\text{ks}}^{\max}, \text{ks} \in \{\text{HES}\}; \quad (27)$$

$$B_{\text{ks}}^{\text{cha}}(t) + B_{\text{ks}}^{\text{dis}}(t) = 1, \text{ks} \in \{\text{ES}, \text{HS}, \text{CS}, \text{HES}\}. \quad (28)$$

其中: S_{ks}^{\min} 为第 ks 类储能设备的最小容量; S_{ks}^{\max} 为第 ks 类储能设备的最大容量; m_{ks}^{\max} 为 t 时段第 ks 类储能设备出力的最大质量; P_{ks}^{\max} 为 t 时段第 ks 类储能设备

出力的最大功率; $B_{\text{ks}}^{\text{cha}}(t), B_{\text{ks}}^{\text{dis}}(t)$ 为 t 时段第 ks 类储能设备充能和放能的辅助二元变量.

2 改进海洋捕食者算法

2.1 Sobol 序列

海洋捕食者算法通过随机初始化种群, 可能导致种群质量低且分布不均, 影响算法的寻优能力和收敛速度. 本文采用 Sobol 序列^[15] 进行种群初始化, 能够在搜索空间内均匀分布点, 从而提高初始种群个体的生成质量, 增强算法搜索能力.

Sobol 序列的生成涉及利用有限域 F_2 内的线性递归关系, 其中 $F_2 = \{0, 1\}$. 假设非负整数 g 的二进制为 $g = g_1 2^0 + g_2 2^1 + \dots + g_w 2^{w-1}$, Sobol 序列第 j 维度中的第 g 个元素表示为 X_g^j , 可以根据以下表达式产生:

$$X_g^j = g_1 \nu_1^j \oplus g_2 \nu_2^j \oplus \dots \oplus g_w \nu_w^j. \quad (29)$$

其中: \oplus 为异或运算; ν_i^j 为第 j 维中的第 i 个方向数, 其为一个二进制分数, 通过下面列出的 q 项递归关系式计算得出:

$$\begin{aligned} \nu_i^{(j)} = \\ a_1 \nu_{i-1}^{(j)} \oplus a_2 \nu_{i-2}^{(j)} \oplus \dots \oplus a_q \nu_{i-q}^{(j)} \oplus \nu_{i-q}^{(j)} \oplus \left(\frac{\nu_{i-q}^{(j)}}{2^q} \right), \end{aligned} \quad (30)$$

这里 a_i 为有限域 F_2 第 q 个本原多项式系数.

采用 Sobol 序列初始化种群如下所示:

$$\text{Pre } y_{\text{init}} = X_l + S_i(X_u - X_l), \quad (31)$$

其中 S_i 为 Sobol 序列的随机值.

2.2 模式搜索法

模式搜索法^[16] 是一种用于求解优化问题的无梯度优化方法, 由探索与模式两种移动过程组成. 探索移动的目标是寻找函数值的减小方向, 它依次调整每一个维度分量并选择对目标函数最优的方向. 然后应用模式移动用于加速接近目标函数的最优值, 模式移动的步长由最后一次探索移动决定. 探索搜索和模式移动在优化过程中不断交替进行, 直到满足终止条件.

模式搜索法算法步骤如下:

step 1: 设加速系数 $\gamma > 0$, 收缩系数 $\beta > 0$, 设定精度 $\varepsilon > 0$, 初始点为 x^0 , 初始步长为 $\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_d)^T > 0, k = 1, j = 1$, 令 $y_1 = x_0$.

step 2: 以 y 为出发点, 依次沿单位矢量 $e_j = (1, 2, \dots, d)$ 所指的轴向进行逐步探索移动, 按如下公式更新 y^{j+1} :

$$y^{j+1} = \min(f(y^j + \delta e_j), f(y^j - \delta e_j), f(y^j)). \quad (32)$$

step 3: 若 $j < n + 1$, 则令 $j = j + 1$, 转 step 2; 反之转 step 4.

step 4: 若 $f(y^j) < f(x^k)$, 则令 $x^{k+1} = y^{d+1}$, 进行模式移动 $y^1 = x^{k+1} + \gamma(x^{k+1} - x^k)$, $k = k + 1$, 转 step 2; 反之转 step 5.

step 5: 若 $\delta < \varepsilon$, 则停止迭代并输出 x^k ; 反之 $y^1 = x^k$, $\delta = \beta\delta$, $k = k + 1$, 转 step 2.

本文中 ε 取值 10^{-6} , γ 取值 2, β 取值 0.5, δ 取值 0.5, 最大搜索步数取值 20. 由于 MPA 在各搜索阶段均依赖顶级捕食者位置, 仅对顶级捕食者应用模式搜索法勘探局部位置空间, 进而引导种群个体围绕顶级捕食者探索开发更优位置. 为提高计算效率, 每隔 20 次迭代后, 执行一次应用操作.

2.3 动态反向学习

在 MPA 寻优过程中, 种群个体容易因为质量不佳导致陷入局部最优空间, 降低算法的搜索能力, 因此, 引入动态反向学习策略^[17]. 该策略令每一个可行解都伴随一个反向解生成, 这些反向解能够覆盖当前解未能有效探索的区域, 并且每个反向解都有 50% 的概率更接近最优解, 从而达到提高种群多样性的效果.

定义种群中的一个可行解 X 为

$$X = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_d), \quad 1 < j < d. \quad (33)$$

定义增加随机性的反向解 \hat{X} 为

$$\hat{X} = (\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_j, \dots, \hat{x}_d), \quad 1 < j < d, \quad (34)$$

$$\hat{x}_j = lb_j + ub_j - rand \times x_j, \quad 1 < j < d, \quad (35)$$

其中 lb_j 、 ub_j 为 x_j 的上界和下界.

在海洋记忆与精英矩阵更新前, 结合动态反向学习策略生成猎物矩阵和精英矩阵的反向解, 并采用贪婪策略保留适应度更优的个体, 进一步优化种群个体质量.

2.4 IMPA 执行步骤及算法测试

综上所述, IMPA 的流程如图 2 所示.

将 IMPA 与原始算法 MPA、粒子群算法 (PSO)^[18]、蜣螂优化算法 (DBO)^[19]、沙猫群优化算法 (SCSO)^[20] 进行对比, 通过单模态高维测试函数 f_1 和 f_2 、多模态高维测试函数 f_3 和 f_4 、固定维度测试函数 f_5 和 f_6 初步验证 IMPA 在局部空间和高维空间的有效性和稳定性. 各算法设置种群数量 n 为 30, 最大迭代次数 MaxIter 为 200.

测试函数如表 1 所示, 收敛曲线如图 3 所示. 从图 3 中可以看出, 在 $f_2 \sim f_6$ 上, IMPA 的初始适应度值最低, 说明 Sobol 序列能够有效提高初始种群个体的质量. 在 f_2 迭代后期、 f_5 迭代前期可以看出,

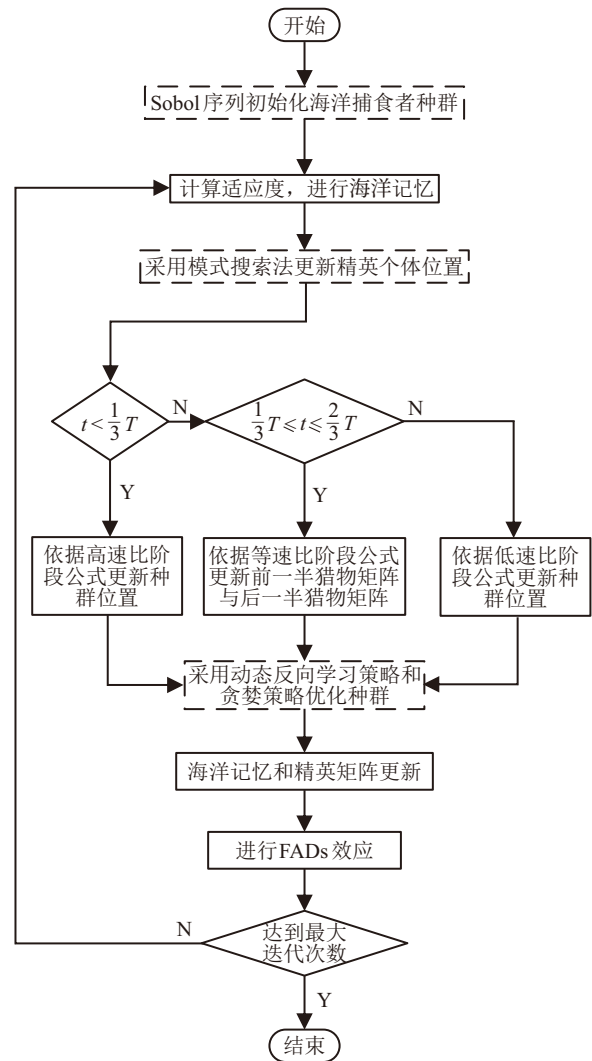


图2 IMPA 算法流程

IMPA 相较于 MPA 适应度逐步降低, 说明模式搜索法能够引导种群探索开发全局更优位置. 在 $f_1 \sim f_6$ 上, IMPA 相较于其余对比算法同样更优, 说明动态反向学习策略能够有效协同其他改进策略探索最优值, 增强算法的抗早熟能力.

表1 测试函数

| 函数 | 函数名 | 维度 | 范围 | 最优值 |
|-------|-----------|-----|---------------|--------|
| f_1 | Sphere | 100 | [-100,100] | 0 |
| f_2 | Step | 100 | [-100, 100] | 0 |
| f_3 | Rastrigin | 100 | [-5.12, 5.12] | 0 |
| f_4 | Ackley | 100 | [-32, 32] | 0 |
| f_5 | Kowalik | 4 | [-5, 5] | 0.0003 |
| f_6 | Shekel | 4 | [0, 10] | -10 |

综上所述, 相较于 MPA、PSO、DBO 和 SCSO, IMPA 在求解不同测试函数时均具备更快的收敛速度以及更高的收敛精度, 说明 IMPA 融合 3 种改进策略能够在不同方面协同优化搜索过程, 提升算法寻优性能.

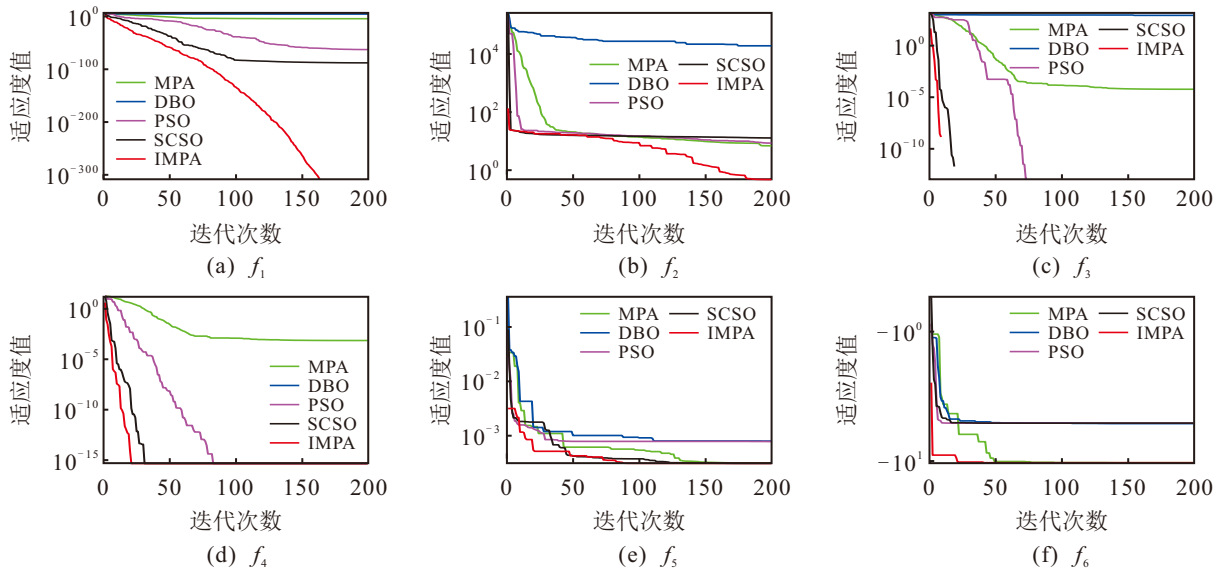


图3 函数收敛

3 算例分析

3.1 算例参数

本文以含氢综合能源系统为研究对象,其结构如图1所示,选取河北某地示范项目实际运行数据^[21]为基础进行算例分析,电气能源交易价格如表2所示,能源设备的出力参数与运维成本如表3所示,储能设备参数如表4所示,IES 新能源输出功率及负荷预测曲线如图4所示。

表2 能源交易价格

| 类型 | 时段 | 价格 |
|----|---------------------------------------|--------------------|
| 购电 | 23:00~06:00 | 0.4 元/kWh |
| | 07:00~09:00, 14:00~17:00, 21:00~22:00 | 0.8 元/kWh |
| | 10:00~13:00, 18:00~20:00 | 1.2 元/kWh |
| 售电 | 全段 | 0.35 元/kWh |
| 购气 | 全段 | 2.7 m ³ |

表3 能源设备出力参数与运维成本

| 设备 | P_{min} | P_{max} | 运维成本(元/kW) |
|-----|-----------|-----------|------------|
| HFG | 0 kW | 600 kW | 0.012 |
| EL | 0 kW | 2000 kW | 0.015 |
| EC | 0 kW | 600 kW | 0.009 |
| AC | 0 kW | 800 kW | 0.008 |
| CHP | 0 kW | 800 kW | 0.016 |
| GB | 0 kW | 600 kW | 0.004 |
| ES | 0 kW | 100 kW | 0.005 |
| HS | 0 kW | 50 kW | 0.002 |
| CS | 0 kW | 100 kW | 0.001 |
| HES | 0 kg | 20 kg | 0.001 |

表4 储能设备参数

| 设备 | 容量 | 充电效率 | 放电效率 | 能量损失系数 |
|-----|---------|------|------|--------|
| ES | 500 kWh | 0.9 | 0.95 | 0.1 |
| HS | 600 kWh | 0.95 | 0.9 | 0.02 |
| CS | 600 kWh | 0.9 | 0.9 | 0.05 |
| HES | 200 kg | 0.95 | 0.95 | 0.02 |

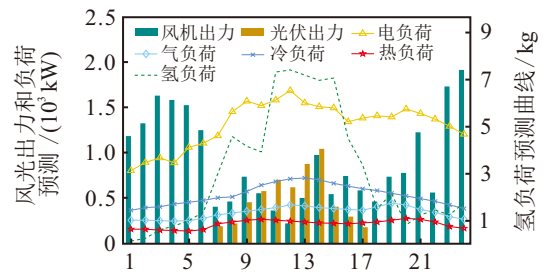


图4 新能源输出和负荷预测

3.2 优化结果分析

为了验证本文提出的 IMPA 的可行性和泛化能力,以及考虑氢能利用和储能设备对 IES 系统的经济影响,设计以下 3 种场景进行对比分析: 1) IES 系统中不含电、热、冷、氢 4 种储能设备; 2) IES 系统中同时含电、热、冷、氢 4 种储能设备; 3) IES 系统中不含氢燃料发电机和储氢设备. 分别采用 IMPA、MPA、PSO、DBO 以及 SCSO 对本文提出的 IES 模型 3 种场景进行优化调度求解. 设置 n 为 50, MaxIter 为 600, 多场景优化结果如表 5 所示。

实验结果表明,在多场景优化调度测试中, IMPA 展现出显著的性能优势. 在场景 1、场景 2 和场景 3 中, IMPA 在总成本分别获得 13 544.33 元、12 045.98 元以及 13 086.3 元的最优总成本解, 较原始 MPA 分别降低 10.96%、12.83% 和 8.94%, 同时优于其余对比算法, 充分验证了改进算法在综合能源系统优化调度中的高效性和鲁棒性。

此外, 场景 2 相较于场景 1 具有更低的运行总成本, 说明综合能源系统中储能设备能够有效促进多种设备协同运行, 实现电、热、冷、氢多种能源合理储存优化, 同时提高了系统运行的稳定性. 场景 3 相较于场景 2 未考虑氢能转换设备和储氢设备, 导

表5 多场景优化结果对比

| 场景 | 算法 | 电力成本/元 | 购气成本/元 | 运维成本/元 | 弃风光成本/元 | 总成本/元 |
|----|------|----------|---------|---------|---------|-----------------|
| 1 | MPA | 5773.37 | 8445.84 | 991.79 | 0 | 15211 |
| | DBO | 7622.07 | 7932.31 | 1058.13 | 0.2 | 16612.71 |
| | PSO | 9590.06 | 6496.53 | 801.46 | 0 | 16888.05 |
| | SCSO | 11018.39 | 6371 | 820.63 | 0.13 | 18210.15 |
| | IMPA | 3183.23 | 9426.1 | 935 | 0 | 13544.33 |
| 2 | MPA | 5489.02 | 7252.15 | 1078.4 | 0 | 13819.57 |
| | DBO | 9346.75 | 6868.24 | 918.28 | 2.1 | 17135.37 |
| | PSO | 4727.33 | 8290.07 | 1046.41 | 0 | 14063.81 |
| | SCSO | 11090.57 | 7699.14 | 1068.06 | 0 | 19857.77 |
| | IMPA | 2464.65 | 8624.19 | 957.14 | 0 | 12045.98 |
| 3 | MPA | 5411.11 | 8113.99 | 845.56 | 0.37 | 14371.03 |
| | DBO | 18838.08 | 6580.83 | 953.21 | 0 | 26372.12 |
| | PSO | 5678.29 | 8747.28 | 853.88 | 0 | 15279.45 |
| | SCSO | 16463.57 | 6126.51 | 566.62 | 193.2 | 23349.9 |
| | IMPA | 2599.21 | 9541.08 | 946.01 | 0 | 13086.3 |

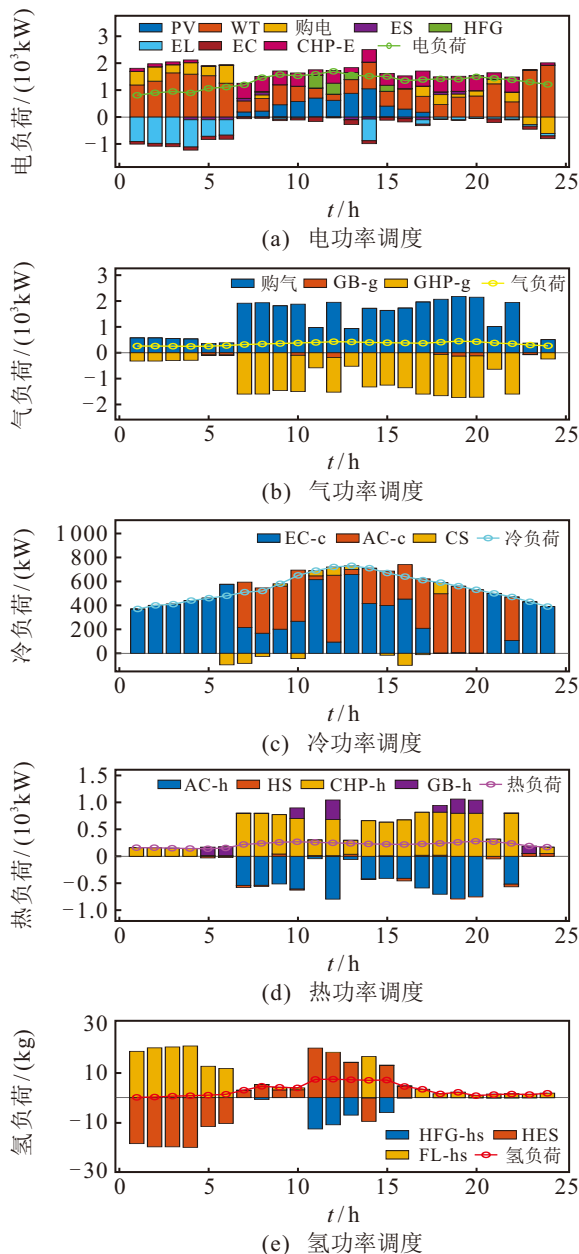


图5 场景2 能源调度结果

致运行总成本增加了 8.64%, 说明综合能源系统中考虑氢能利用环节有助于优化能源的存储和调度, 进而降低系统的整体运行成本。

在本文提出的场景 2 下, 使用 IMPA 得到电、气、冷、热、氢能源调度结果如图 5 所示。由图 5 可知:

1) 在 23 : 00 ~ 06 : 00 电价低谷时段, IES 充分利用电价优势和可再生能源实施储能调度, 同时通过电解槽等能源转换装置将购入电能和可再生能源转化为热、冷、氢多种形式的储能介质, 以应对后续时段需求波动。此阶段热负荷需求主要由热电联产设备运行提供, 冷负荷需求由电制冷设备运行提供。

2) 在 07 : 00 ~ 09 : 00、15 : 00 ~ 17 : 00、21 : 00 ~ 22 : 00 平段电价时段, 此时电力购买价格适中, 系统通过热电联产等多种设备进行灵活供能, 储能装置自适应采取充放能策略, 既维持了系统供能稳定性, 又通过设备组合优化实现综合成本最小化, 体现了多能互补综合能源系统的经济调度优势。

3) 在 10 : 00 ~ 13 : 00、18 : 00 ~ 20 : 00 尖峰电价时段, 此时电力购买价格最高, 系统采取储能释放和多元供能策略, 通过氢燃料发电机等设备转换能源, 并调控储能装置协同释放存储能量, 共同满足多种负荷需求。同时系统主要使用吸收式制冷机实现余热资源利用, 既有效消纳热电联产余热, 又降低高电价时段电制冷设备的运行成本。

4 结论

本文构建了包含热电联产、氢燃料发电机等能量转化设备以及储能装置的含氢综合能源系统模型, 综合考虑了氢能利用和电、气、冷、热、氢 5 种负荷, 并提出了一种改进海洋捕食者算法 (IMPA), 用于该系统模型的优化调度中。针对原始 MPA 存在跳出局部最优能力不足等问题, 采用 Sobol 序列、模式搜索法和反向学习策略, 以提升算法的收敛速度和寻优精度。结果表明, 与原始 MPA 相比, IMPA 在总成本上分别降低了 10.96%、12.83% 和 8.94%。同时, 相较于其他对比算法, IMPA 收敛精度更高, 能够有效优化多能流耦合约束下的调度方案, 提升系统灵活性并降低综合成本, 为综合能源系统的优化调度提供了高效可行的解决方案。在后续研究工作中, 将进一步考虑需求响应机制的含氢综合能源系统优化调度。

参考文献 (References)

[1] 胡荷娟, 孙晓燕, 曾博, 等. 考虑源-荷不确定性的矿山综合能源系统多时间尺度区间优化调度[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 827-835.
(Hu H J, Sun X Y, Zeng B, et al. Multi-time-scale

- interval optimal dispatch of coal mine integrated energy system considering source-load uncertainty[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(3): 827-835.)
- [2] 王俐英, 林嘉琳, 宋美琴, 等. 考虑需求响应激励机制的园区综合能源系统博弈优化调度[J]. *控制与决策*, 2023, 38(11): 3192-3200.
(Wang L Y, Lin J L, Song M Q, et al. Optimal dispatch of park integrated energy system considering demand response incentive mechanism[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(11): 3192-3200.)
- [3] Li S R, Zhang L H, Nie L, et al. Trading strategy and benefit optimization of load aggregators in integrated energy systems considering integrated demand response: A hierarchical Stackelberg game[J]. *Energy*, 2022, 249: 123678.
- [4] Qiu S, Chen J, Mao C, et al. Day-ahead optimal scheduling of power-gas-heating integrated energy system considering energy routing[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 1113-1122.
- [5] Wu M, Du P, Jiang M, et al. An integrated energy system optimization strategy based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 679-691.
- [6] Tan Z, Ren Y, Li H, et al. Data mining based integrated electric-gas energy system multi-objective optimization[J]. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineers*, 2022, 119(6): 2607.
- [7] Hou R, Deng G, Wu M, et al. Optimum exploitation of an integrated energy system considering renewable sources and power-heat system and energy storage[J]. *Energy*, 2023, 282: 128382.
- [8] Tu N W, Fan Z H, Pang X F, et al. A multi-objective scheduling method for hybrid integrated energy systems via Q -learning-based multi-population dung beetle optimizers[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2024, 117: 109223.
- [9] 王云龙, 韩璐, 罗树林, 等. 计及热舒适度提升的家庭电热综合能源系统调度优化[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(2): 165-174.
(Wang Y L, Han L, Luo S L, et al. Scheduling optimization of home electric heating integrated energy system with thermal comfort improvement[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2025, 46(2): 165-174.)
- [10] Sun H B, Cui Q, Wen J Y, et al. Optimization and scheduling scheme of park-integrated energy system based on multi-objective beluga whale algorithm[J]. *Energy Reports*, 2024, 11: 6186-6198.
- [11] Gao J W, Gao F J, Ma Z Y, et al. Multi-objective optimization of smart community integrated energy considering the utility of decision makers based on the Lévy flight improved chicken swarm algorithm[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 72: 103075.
- [12] Faramarzi A, Heidarinejad M, Mirjalili S, et al. Marine predators algorithm: A nature-inspired metaheuristic[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 152: 113377.
- [13] Houssein E H, Hussain K, Abualigah L, et al. An improved opposition-based marine predators algorithm for global optimization and multilevel thresholding image segmentation[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2021, 152: 107348.
- [14] 柴旭朝, 周游, 闫李, 等. 基于集成约束无人机两步制航迹规划方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(4): 1194-1202.
(Chai X Z, Zhou Y, Yan L, et al. UAV two-step path planning method based on integrated constraint strategy[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(4): 1194-1202.)
- [15] Bratley P, Fox B L. Algorithm 659: Implementing Sobol's quasirandom sequence generator[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 1988, 14(1): 88-100.
- [16] 吴建辉, 王博华, 张小刚, 等. 基于模式搜索法的云模型粒子群算法[J]. *控制与决策*, 2017, 32(11): 2076-2080.
(Wu J H, Wang B H, Zhang X G, et al. Cloud model particle swarm optimization algorithm based on pattern search method[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(11): 2076-2080.)
- [17] Rahnamayan S, Tizhoosh H R, Salama M M A. Opposition-based differential evolution[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008, 12(1): 64-79.
- [18] Wang D S, Tan D P, Liu L. Particle swarm optimization algorithm: An overview[J]. *Soft Computing*, 2018, 22(2): 387-408.
- [19] Xue J, Shen B. Dung beetle optimizer: A new metaheuristic algorithm for global optimization[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2023, 79(7): 7305-7336.
- [20] Seyyedabbasi A, Kiani F. Sand cat swarm optimization: A nature-inspired algorithm to solve global optimization problems[J]. *Engineering with Computers*, 2023, 39(4): 2627-2651.
- [21] Zhao Y Y, Wei Y F, Tang Y F, et al. Multi-objective robust dynamic pricing and operation strategy optimization for integrated energy system based on stackelberg game[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 83: 826-841.

作者简介

徐志凡 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为智能优化算法、综合能源系统, E-mail: xuzhifan126@126.com;

李媛 (1974-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为控制理论、优化算法, E-mail: syliyuan@sut.edu.cn;

郑新宇 (1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为智能优化算法、综合能源系统, E-mail: kuyu0214@163.com;

屈玥含 (2000-), 女, 硕士生, 主要研究方向为智能优化算法、电价预测, E-mail: 1095157591@qq.com.