

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416956

基于 EGJO 的流域水风光一体化优化调度*

张建英 荣娜 田珺玲

(贵州大学电气工程学院 贵阳 550025)

摘要: 为发展双碳背景下的新型电力系统调度模型与方法,构建了一个考虑阶梯碳交易的含流域水风光一体化(WHWP)的多能互补调度模型。为提高含 WHWP 的多能互补调度模型这类高维度非凸优化问题的求解效率和适应性,本文提出了一种基于 Logistic 混沌映射、准反射学习策略、高斯随机游走策略、最优个体局部搜索结合差分变异扰动策略的金豺优化算法(EGJO)。首先,利用 Logistic 混沌映射生成初始化种群,增强了算法的空间多样性;其次,通过在金豺算法搜索、包围并攻击阶段分别引入准反射学习策略和高斯随机游走策略更新豺狼对位置,强化算法全局寻优能力以及收敛速度;最后,合并更新位置后引入最优个体局部搜索结合差分变异扰动策略,提高求解精度。算例分析在扩展 IEEE3 机 9 节点和一个某省域简化电力系统展开。结果表明,考虑阶梯碳交易的含 WHWP 的多能互补调度模型的综合运行成本分别减少 8.55%、10.78%,碳排放量分别减少 178.26 t 和 17 841.68 t;与主流的 7 种优化算法相比,EGJO 求解成本最少分别降低 1.108 万元、1401 万元,标准差分别降低了 1.598 和 0.004;充分验证了本文所提模型与方法的有效性和优越性。

关键词: 流域水风光一体化;改进金豺算法;Logistic 混沌映射;准反射学习策略;高斯随机游走策略;差分变异扰动策略
中图分类号: TM61;TM73;TN9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Research on integrated optimal scheduling of watershed-type hydro-wind-photovoltaic based on EGJO

Zhang Jianying Rong Na Tian Junling

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to develop a new type of power system scheduling model and method under the dual-carbon background, a multi-energy complementary scheduling model with Watershed-type integration of hydro-wind-photovoltaic (WHWP) is constructed by considering stepped carbon trading. In order to improve the solution efficiency and adaptability of such high-dimensional non-convex optimization problems of the WHWP-containing multi-energy complementary scheduling model, this paper proposes an enhanced golden jackal optimization algorithm (EGJO) based on Logistic chaotic mapping, quasi-reflective learning strategy, Gaussian random wandering strategy, and Optimal Individual local search mechanism combined with differential variational perturbation strategy. First, the initialized population is generated using Logistic chaos mapping, which enhances the spatial diversity of the algorithm. Second, by introducing quasi-reflective learning strategy and Gaussian random wandering strategy to update the jackal pair positions in the search, encircle-and-attack phases of the golden jackal algorithm, respectively, the algorithm's global optimization capability as well as convergence speed are strengthened. Finally, the optimal Individual local search mechanism combined with the differential variational perturbation strategy is introduced after merging the updated positions to improve the solution accuracy. The analysis of the algorithm is carried out in the extended IEEE3 machine 9 node and a simplified power system in a provincial area. The results show that the comprehensive operating costs of the WHWP-containing multi-energy complementary dispatch model considering stepwise carbon trading are reduced by 8.55% and 10.78%, and the carbon emissions are reduced by 178.26 t and 17 841.68 t, respectively; compared with the mainstream seven optimization algorithms, the cost of the EGJO solution is reduced by at least 11 080 yuan and 14.01 million yuan, and the standard deviation of the cost is reduced by 1.598 and 0.004, respectively; fully verifying the effectiveness and superiority of the model and method proposed in this paper. 1.598 and 0.004, respectively; fully verified the effectiveness and superiority of the model and method proposed in this paper.

Keywords: WHWP; EGJO; Logistic chaotic mapping; quasi-reflective learning strategy; Gaussian random wandering strategy; differential variational perturbation strategy

0 引言

随着“双碳”目标的提出^[1],水、风、光等清洁能源迅速

发展,风、光的随机性、间歇性等给电网稳定运行带来挑战,利用水电在调峰性能的优势以及通过现有的流域型水电基地开发水风光等多能源互补系统,有利于提高新能源

收稿日期:2024-09-22

*基金项目:贵州省科技支撑计划项目([2023]329)、贵州省优秀青年人才项目资助(黔科合平台[2021]5645)、贵州省科技支撑计划项目([2023]290)资助

渗透率^[2]。

针对多能互补系统研究,李铁等^[3]研究了风光水火储互补系统联合调度,提出了一种计及火电调峰主动性约束的协调优化调度策略。曹韵等^[4]构建一种含梯级水风光蓄一体化的水火风光蓄联合调度模型,并且提出了一种改进的飞蛾搜索算法。众多学者以流域水风光多能互补为研究对象^[5-6],说明了多能互补、集总调度运行的优越性以及风光互补发电能力对系统灵活裕度的影响。谭晶等^[7]研究了水光蓄互补系统,以系统总成本最小为目标函数,但未考虑碳交易成本以及新能源运行成本等因素。罗经馨等研究考虑水光互补特性,提出水光互补系统的优化调度模型以及方法^[8]。Wang 等^[9]提出了水风光储系统在不同时间尺度的互补运行策略。Guo 等^[10]从安全运行角度,构建了梯级水风光互补系统精细化发电模型。目前,考虑水风光互补出力以及阶梯碳交易的领域较多,但在流域水电基地研究水风光一体出力研究较少,且鲜少研究考虑梯级水风光一体出力系统接入电网对其经济性和环保性的影响。本文提出了一种考虑阶梯碳交易的含(watershed-type integration of hydro-wind-photovoltaic, WHWP)的多能互补经济调度模型,针对 WHWP 对电网的影响进行研究分析。

另一方面,多能互补调度模型求解方法研究,采用智能优化算法对多能互补调度模型进行求解,相较于传统方法其求解效率提高^[11-12]。华昊辰等^[13]利用自适应形状估计多目标精华算法求解区域能源互联网系统,相较于传统的 NSGA-II 算法不但保证了优化效果,还提高了 5.8% 的求解时间。多目标原子轨道搜索算法、基于衍生搜索政治优化算法应用于含风电微电网经济调度问题,验证了改进算法的显著效果^[14-15]。马苗洁等^[16]提出了一种多目标的改进黏菌算法,其求解效率、精度相较于传统算法均有所提高。周辉等^[17]提出了一种基于融合反向学习和柯西变异的改进秃鹰算法,且有效应用在微电网优化调度问题中。由此,可以发现智能优化算法在求解优化调度模型具有较为明显优势。金豺优化算法(golden jackal optimization algorithm, GJO)是一种新型智能优化算法,该算法在未知、复杂的搜索空间仍旧具有良好的搜索性能,在解决实际有约束和无约束上都表现出较为优越的性能^[18],但其全局搜索能力较差、容易陷入局部最优。因此,可以通过多策略改进提高金豺全局搜索能力及求解精度。

综上,本文构建一种考虑阶梯碳交易的含 WHWP 的多能互补调度模型。并提出了一种基于 Logistic 混沌映射、准反射学习策略、高斯随机游走策略以及最优个体局部搜索结合差分变异扰动策略的金豺优化算法(enhanced gold jackal optimization algorithm, EGJO)。通过 IEEE3 机 9 节点经典算例以及某省简化实际系统验证了本文所提模型和算法的适应性、有效性。

1 流域水风光一体化优化调度模型

1.1 目标函数

为了探讨 WHWP 互补系统对电网的经济性影响,以总综合运行成本最小为目标函数,如式(1)所示。

$$\min F = f_G + f_L + f_C + f_E \quad (1)$$

式中: F 为总综合运行成本; f_G 表示火电成本; f_L 表示新能源机组运行成本; f_C 表示弃光弃风成本; f_E 表示阶梯碳交易成本。

1) 火电运行成本

$$f_G = \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{t=1}^T (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) \quad (2)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为火电机组 i 的成本系数; $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段的有功出力; N_G 表示火电机组总数; T 表示调度周期。

2) 新能源机组运维成本

$$f_L = \sum_{t=1}^T (C_h P_{h,t} + C_w P_{w,t} + C_p P_{p,t}) \quad (3)$$

式中: $P_{h,t}$ 、 $P_{w,t}$ 、 $P_{p,t}$ 分别为水电、风电、光伏机组 t 时段内的实际出力; C_h 、 C_w 、 C_p 分别为水、风、光的运维成本系数。

3) 弃光弃风成本

$$f_C = \sum_{t=1}^T C_{wp} \times [(P'_{w,t} - P_{w,t}) + (P'_{p,t} - P_{p,t})] \quad (4)$$

式中: C_{wp} 为弃光弃风成本系数; $P'_{w,t}$ 、 $P'_{p,t}$ 分别表示 t 时段内风电、光伏预测出力。

4) 阶梯碳交易成本

$$E_S = E_P - E_Q \quad (5)$$

$$f_E = \begin{cases} vE_S, E_S < L \\ vL + (1+k)v(E_S - L), L \leq E_S \leq 2L \\ (2+k)vL + (1+2k)v(E_S - 2L), 2L \leq E_S \leq 3L \\ (3+3k)vL + (1+3k)v(E_S - 3L), 3L \leq E_S \leq 4L \\ (4+6k)vL + (1+4k)v(E_S - 4L), 4L \leq E_S \leq 5L \\ (5+10k)vL + (1+5k)v(E_S - 5L), 5L \leq E_S \end{cases} \quad (6)$$

式中: v 表示单位碳交易价格; E_P 表示总碳排放量; E_Q 表示系统碳排放权配额; L 表示碳排放权区间划分长度; k 表示碳交易价格增长幅度。

1.2 约束条件

1) 总功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t} + P_{WHWP,t} = P_{L,t} \quad (7)$$

式中: $P_{L,t}$ 为典型日负荷; $P_{WHWP,t}$ 为 t 时段内流域水风光一体化系统及网点处的出力。

$$P_{WHWP,t} = P_{w,t} + P_{p,t} + P_{h,t} \quad (8)$$

2) 流域水风光一体化出力约束

$$P_{WHWP,t} \leq P_{WHWP,N} \quad (9)$$

式中: $P_{WHWP,N}$ 为一体化系统所有机组额定出力之和。

水电机组出力约束为:

$$\begin{cases} P_{i,h,\min} \leq P_{i,h,t} \leq P_{i,h,\max} \\ Q_{i,h,\min} \leq Q_{i,h,t} \leq Q_{i,h,\max} \\ V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{i,h,\max}$ 、 $P_{i,h,\min}$ 表示水电机组 i 出力的上下限; $Q_{i,h,\max}$ 、 $Q_{i,h,\min}$ 表示水电站 i 的流量上下限; $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$ 表示水电站 i 的水库容量上下限。

水库库容约束为:

$$\begin{cases} V_{i,t} = V_{i,t-1} + (I_{i,t} - Q_{i,h,t})\Delta t & i = 0 \\ V_{i,t} = V_{i,t-1} + (I_{i,t} + Q_{i,h,t-1} - Q_{i,h,t})\Delta t & i > 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $V_{i,t}$ 表示 t 时段水库库容; $I_{i,t}$ 表示 t 时段内水库 i 的自然流入量, Δt 表示水库发电时间。

风电、光伏机组出力约束为:

$$\begin{cases} P_{p,t,\min} \leq P_{p,t} \leq P_{p,t,\max} \\ P_{w,t,\min} \leq P_{w,t} \leq P_{w,t,\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{p,t,\min}$ 、 $P_{p,t,\max}$ 为光伏 t 时段的出力上下限; $P_{w,t,\min}$ 、 $P_{w,t,\max}$ 为 t 时刻风电的出力上下限。

3) 火电机组出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (13)$$

$$0 \leq \delta_{i,t+} \leq \delta_{i,\max+} \quad (14)$$

$$0 \leq \delta_{i,t-} \leq \delta_{i,\max-}$$

式中: $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 表示 t 时段机组 i 出力的上下限; $\delta_{i,t+}$ 、 $\delta_{i,t-}$ 表示机组 i 在 t 时段增加(减少)的爬坡容量; $\delta_{i,\max+}$ 、 $\delta_{i,\max-}$ 表示机组 i 在 t 时段可增加(减少)的爬坡容量的上下限。

4) 功率传输约束

$$P_{L,\min} \leq \sum_{i=1}^{N_G} G_{L-i} P_{i,t} - \sum_{j=1}^{N_L} G_{L-j} P_{j,t} \leq P_{L,\max} \quad (15)$$

式中: G_{L-i} 、 G_{L-j} 为节点 i 、 j 与线路 L 的功率转移分布因子; $P_{L,\max}$ 、 $P_{L,\min}$ 为线路 L 传输功率的上下限。

5) 通道容量约束

$$\sum_{i=1}^{R_h} P_{i,h,t} + \sum_{i=1}^{R_w} P_{i,w,t} + \sum_{i=1}^{R_p} P_{i,p,t} \leq N_L \quad (16)$$

式中: N_L 为第 L 条输电通道容量; R_h 、 R_w 、 R_p 分别表示接入第 L 条输电通道的水、风、光伏电站的数量。

2 求解方法

2.1 金豺优化算法

金豺优化算法是一种基于群体智能搜索的元启发式算法,该算法主要包括 3 个阶段:1)搜索;2)包围;3)攻击。

1) 空间位置初始化

$$X_0 = l_b + rand(u_b - l_b) \quad (17)$$

式中: l_b 和 u_b 是决策变量的上限和下限。

初始化种群 P :

$$P = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \cdots & X_{1,d} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \cdots & X_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n,1} & X_{n,2} & \cdots & X_{n,d} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: $X_{i,j}$ 表示第 i 个猎物的第 j 个维度。

F_{GJO} 是保存每个猎物适应的矩阵:

$$F_{GJO} = \begin{bmatrix} f(X_{1,1}; X_{1,2}; \cdots; X_{1,d}) \\ f(X_{2,1}; X_{2,2}; \cdots; X_{2,d}) \\ \vdots \\ f(X_{n,1}; X_{n,2}; \cdots; X_{n,d}) \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: f 是目标函数。

2) 猎物搜索阶段

$$X_1(s) = X_M(s) - E \times |X_M(s) - r_1 \times P(s)| \quad (20)$$

$$X_2(s) = X_{FM}(s) - E \times |X_{FM}(s) - r_1 \times P(s)| \quad (21)$$

式中: s 表示当前迭代次数; $P(s)$ 表示猎物的位置向量; $X_M(s)$ 和 $X_{FM}(s)$ 表示雄雌豺狼的位置。 $X_1(s)$ 和 $X_2(s)$ 表示雄雌豺狼与猎物相对应的位置。“ r_1 ”表示 Levy 运动。并计算为:

$$r_1 = 0.05 \times L(y) \quad (22)$$

$L(y)$ 是莱维飞行函数,使用进行计算:

$$L(y) = 0.01 \times (\mu \times \sigma) / (|h^{(1/\beta)}|)$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) \times \beta \times (2^{\frac{\beta-1}{2}})} \right)^{1/\beta} \quad (23)$$

式中: u, h 是 $(0, 1)$ 内的随机值; β 是设置为 1.5 的默认常数。

E 表示猎物的躲藏系数:

$$E = E_1 \times E_0 \quad (24)$$

E_1 表示猎物能量的减少; E_0 表示其能量的初始状态。

$$E_0 = 2 \times r - 1 \quad (25)$$

式中: r 是介于 $0 \sim 1$ 的任意数字。

$$E_1 = c_1 \times (1 - (s/S_{\max})) \quad (26)$$

式中: S_{\max} 表示迭代次数; c_1 是等于 1.5 的常数值。

最后,通过式(27)取式(20)与(21)平均值来更新搜索阶段豺狼对的位置。

$$X(s+1) = \frac{X_1(s) + X_2(s)}{2} \quad (27)$$

3) 包围并攻击阶段

$$X_1(s) = X_M(s) - E \times |r_1 \times X_M(s) - P(s)| \quad (28)$$

$$X_2(s) = X_{FM}(s) - E \times |r_1 \times X_{FM}(s) - P(s)| \quad (29)$$

与猎物搜索阶段相同,通过式(27)取式(28)与(29)的平均值更新豺狼对位置。

2.2 改进金豺优化算法

1) Logistic 混沌映射

本文在 GJO 搜索空间初始化阶段添加 Logistic 混沌映射,利用映射函数的混沌序列代替随机数生成的初始种群,避免初始化种群分布过紧或分散而导致算法陷入局部

最优问题。

$$X(s+1) = \lambda \times X(s) \times (1 - X(s)) \quad (30)$$

式中： λ 为混沌系数。

2) 准反射学习策略

准反射学习策略 (quasi-reflexive-based learning Strategies, QRBL) 是基于反向学习策略 (opposition-based learning, OBL) 和准反向学习 (quasi-opposition-based learning, QOBL) 的一种变体, 在搜索猎物阶段增加准反射解和准反向解干扰, 可以有效扩大搜索范围, 择出的最优解, 提高金豺算法跳出局部最优的能力。三者区别如图 1 所示。

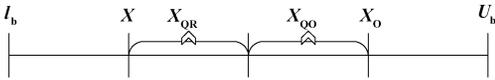


图 1 OBL、QOBL、QRBL 对比图

Fig. 1 Comparison of OBL, QOBL and QRBL

(1) OBL: 生成当前迭代次数可行解的反向解, 对比选择最优解, 避免陷入局部最优。

$$X_0(s) = l_b + u_b - X(s) \quad (31)$$

(2) QOBL: 基于 OBL 的反向解求解准反向解, 利用准反向解可以有效跳出局部最优。

$$X_{QO}(s) = rand\left(\frac{l_b + u_b}{2}, X_0(s)\right) \quad (32)$$

(3) QRBL: 根据 QOBL 的准反向解获取准反射解, 利用准反射解求解其结果跳出局部最优的效果更佳^[19]。

$$X_{QR}(s) = rand\left(\frac{l_b + u_b}{2}, X(s)\right) \quad (33)$$

3) 高斯随机游走策略

在算法围捕猎物阶段添加高斯随机游走策略, 其具有较强的开发能力, 利用 $\log(s)/s$ 控制步长以平衡算法的搜索能力和开发能力。

$$X(s+1) = Gaussian(X(s), \sigma) \quad (34)$$

$$\sigma = \frac{\log(s)}{s} (X(s) - X(s)_{best}) \quad (35)$$

式中： σ 表示步长, $X(s)_{best}$ 表示第 s 代的最优个体。

4) 最优个体局部搜索结合差分变异扰动策略

为进一步求得高质量全局最优解, 以当前最优个体为中心点, 设置搜索因子为半径搜索周围所有个体, 可以使算法快速跳出局部最优值。得到的最优个体值作为差分变异扰动策略的其中一个随机解, 可以进一步提高算法跳出局部最优的能力以及求解精度。

$$X'(s) = X(s) + \omega_s \times rand(1, d) \quad (36)$$

$$X(s+1) = X'(s) + F_R \times (X_{r1} - X_{r2}) \quad (37)$$

式中： ω_s 为局部搜索半径, d 为 X_s 的维度; F_R 是差分变异扰动因子; X_{r1} 、 X_{r2} 为随机选取的其他解。

2.3 求解流程

本文所提出的 EGJO 的求解流程如图 2 所示。

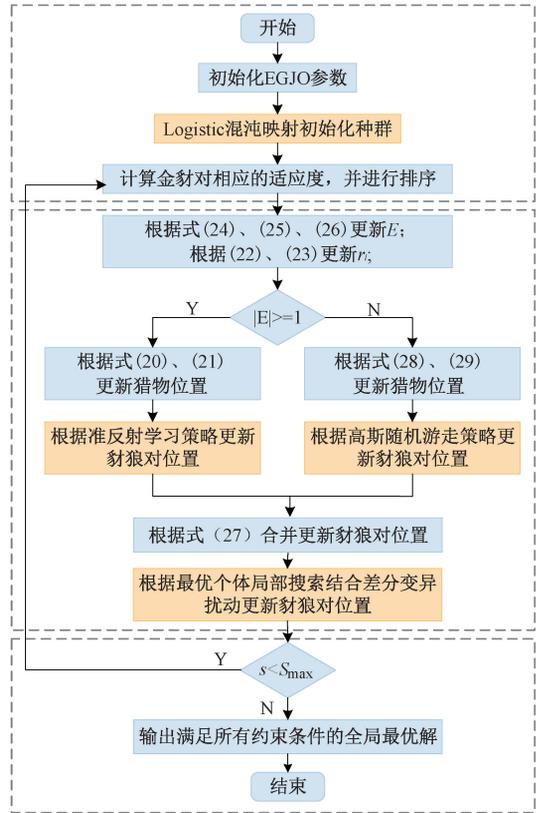


图 2 EGJO 流程图

Fig. 2 EGJO flow chart

步骤 1) 初始化 EGJO 相关参数, 设置火电机组出力、水电发电流量、风电机组出力、光伏机组出力为决策变量, 以综合运行成本最小为适应度函数求解;

步骤 2) 计算雌雄豺狼对适应度值即目标函数值并排序;

步骤 3) 更新 E 、 r_1 。判断 E 大于 1, 进入猎物搜索阶段, 根据准反射学习策略更新豺狼位置即决策变量值; 反之, 进入包围并攻击猎物阶段, 则豺狼根据高斯随机游走策略更新位置即决策变量值;

步骤 4) 根据式 (27) 合并更新豺狼对位置即决策变量值, 引入最优个体局部搜索结合差分变异扰动策略更新雌雄豺狼位置即决策变量值;

步骤 5) 迭代结束根据最优的决策变量值输出全局最优可行解, 否则返回步骤 2)。

2.4 算法基准测试

为测试 EGJO 算法的性能, 本文将 EGJO 与 GJO、斑马优化算法 (zebra optimization algorithm, ZOA)、粒子群算法 (particle swarm optimization algorithm, PSO)、差分进化优化算法 (differential evolutionary optimization algorithm, DE)、教与学算法 (teaching and learning optimization algorithms, TLBO)、灰狼算法 (gray wolf optimization algorithm, GWO)、改进的飞蛾搜索算法

(greedy strategy, adaptive crossover operator and adaptive t-distribution variation based moth search algorithm, GCTMSA)共 7 种算法对比分析。种群规模固定为 30,最

大迭代次数为 200,各算法独立运行 30 次,其他算法的相关参数设置^[4,18]。测试集为 CEC2022,设置维度为 10,测试函数详如表 1 所示。

表 1 CEC2022 测试函数
Table 1 CEC2022 test function

类别	编号	函数名称	函数值
单峰函数	1	Shifted and full Rotated Zakharov Function	300
	2	Shifted and full Rotated Rosenbrock's Function	400
多峰函数	3	Shifted and full Rotated Expanded Schaffer's f6 Function	600
	4	Shifted and full Rotated Non-Continuous Rastrigin's Function	800
	5	Shifted and full Rotated Levy Function	900
混合函数	6	Hybrid Function 1 (N= 3)	1 800
	7	Hybrid Function 2 (N=6)	2 000
	8	Hybrid Function 3 (N= 5)	2 200
组合函数	9	Composition Function 1 (N= 5)	2 300
	10	Composition Function 2 (N= 4)	2 400
	11	Composition Function 3 (N= 5)	2 600
	12	Composition Function 4 (N=6)	2 700

搜索范围: $[-100, 100]^D$

各算法独立运行 30 次的平均收敛曲线如图 3 所示;可以发现,在 EGJO 算法在 F1、F2、F4、F5、F6、F8、F10、F11、

F12 共 9 个基准测试函数中均取得最小的最优解且收敛速度最快。

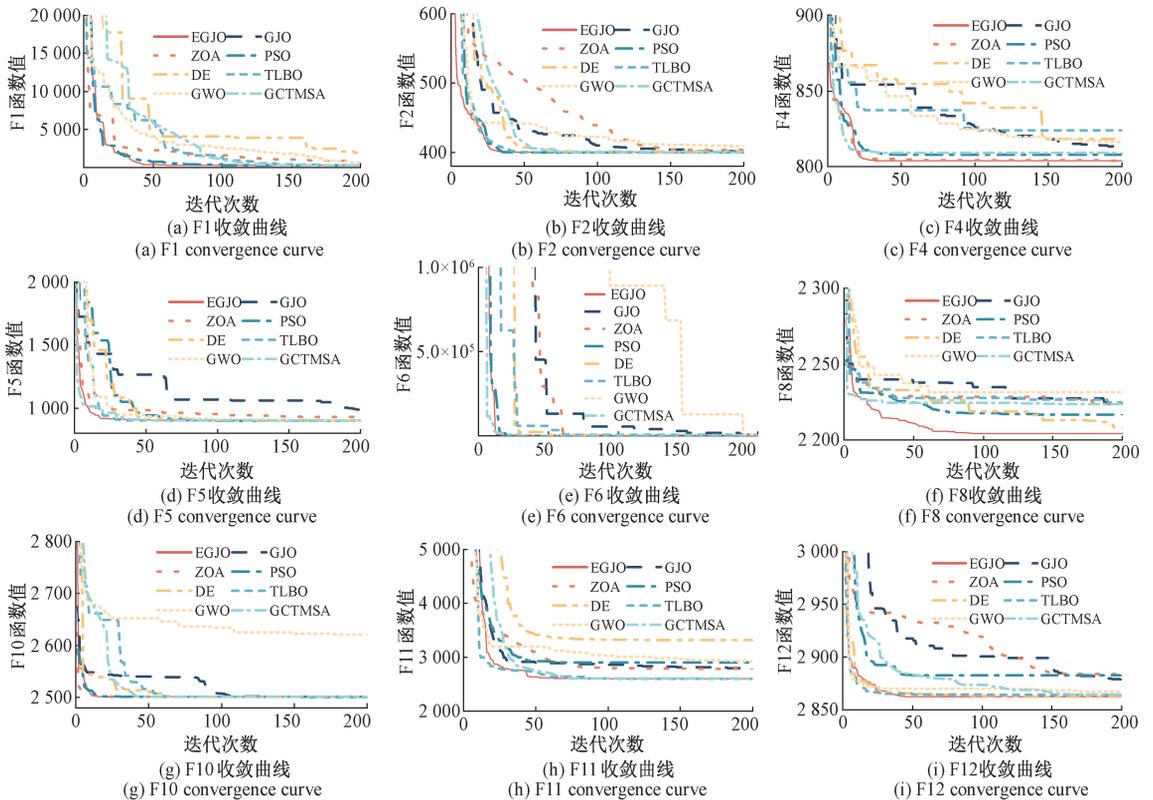


图 3 不同算法平均收敛曲线

Fig. 3 Average convergence curves of different algorithms

单峰函数 F1 可以测试算法的局部开发能力, F2~F5 多峰函数测试算法的全局搜索能力, 混合函数 F6~F8 与组合函数 F9~F12 验证了算法综合性能。

综合上述实验结果表明了 EGJO 算法的收敛性、空间搜索能力的优越性。

3 算例分析

3.1 算例 1

本文以改进的 IEEE3 机 9 节点为测试案例 1, 在节点 1 接入一个流域水风光一体化发电系统, 包括 4 个梯级水电站、1 个风电机组、1 个光伏发电机组, 水电装机容量为 266 MW, 单位碳交易成本取 40 元/t, 碳排放配额为 0.8 t/MW, 弃光弃风系数取 500 元/MW, 风、光预测出力及典型负荷

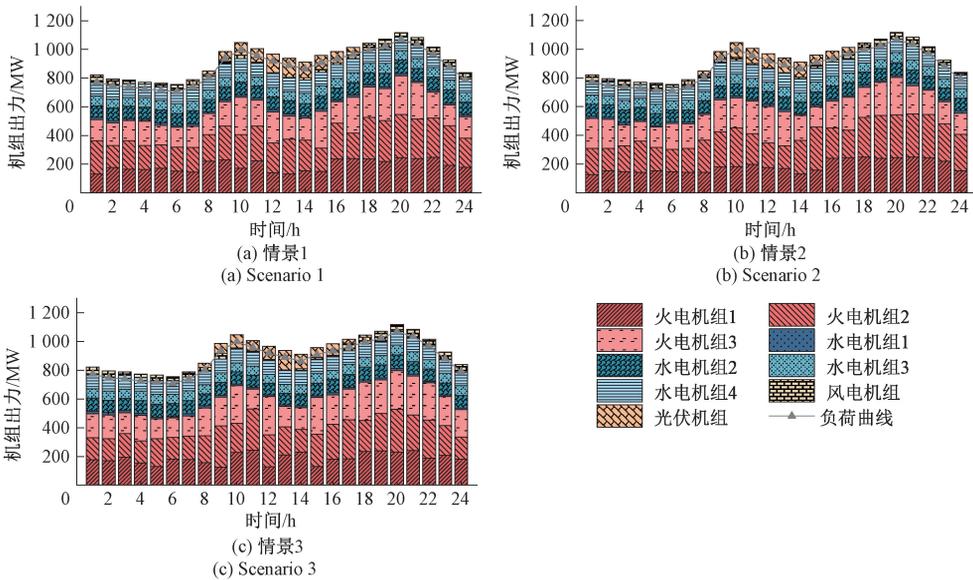


图 4 各发电机组出力

Fig. 4 Output of each generating unit

表 2 各场景下结果参数对比

场景	综合成本/ 万元	碳排放量/ 吨	碳交易成本/ 万元	弃能成本/ 万元
1	73.64	13 477.83	7.93	27.85
2	83.50	13 550.04	8.43	32.89
3	76.36	13 371.78	8.34	26.70

(2)碳排放量及碳交易成本方面:与情景 1、2 相比, 情景 3 分别降低了 106.05 t、178.26 t 的碳排放总量。情景 1 与 3 对比可以看出, 考虑阶梯碳交易可以有效减少碳排放量, 更具环保性。情景 2 与 3 对比结果可知, WHWP 系统的碳排放量及碳交易成本均优于分布式发电。

(3)弃能成本方面:3 种情景下的弃风弃光成本分别为 27.85 万元、32.89 万元、26.70 万元, 情景 1、2 的弃风弃光

为验证本文所提调度模型与 EGJO 算法的有效性, 本文设置了 3 种场景并求解。情景 1:考虑 WHWP 接入系统、传统碳交易成本;情景 2:考虑流域水、风、光分布式发电接入系统以及阶梯碳交易成本;情景 3:考虑 WHWP 接入系统、阶梯碳交易成本。

1) 系统优化调度结果分析

(1)综合运行成本方面:由图 4 可知, 不同场景均满足功率平衡约束;由表 2 得情景 2 下的综合运行成本最高, 与情景 1、3 相比, 综合成本分别高了 9.86 万元、7.14 万元, 可见考虑 WHWP 的经济效益较好;对比情景 1、3 可以看出考虑阶梯碳交易比传统碳交易综合运行成本略高, 由于阶梯碳交易价格随着碳排放量增加而增加, 后续研究将会研究碳交易价格与碳排放量的平衡点, 在促进碳排放量减少的同时保证经济性。

成本为情景 3 的 1.04 倍、1.23 倍, 说明本文所提优化调度模型可以有效促进风光消纳。

通过以上 3 种场景下的对比分析可知, 考虑阶梯碳交易成本有利于降低电力系统总碳排放量, 且一定程度上促进了风光新能源消纳。考虑 WHWP 发电有利于提高电力系统的经济性和环保性。因此, 考虑阶梯碳交易的含 WHWP 的多能互补调度模型, 有利于促进电力系统低碳经济运行。并且 EGJO 在 3 种场景下均取得可行解, 表明本文所提算法的适应性。

2) 不同算法求解结果对比分析

本文借助 EGJO 与 7 种优化算法对算例 1 中情景 3 进行求解。选取评价指标及求解结果如表 3 所示。

(1) 定量分析

由表 3 求解结果可知, EGJO 搜索的评价指标均为最优。其搜索到的最小值、最大值、平均值均是最优, 可见

表 3 各算法求解结果对比

Table 3 Comparison of the solution results of each algorithm

算法	最小值/ ($\times 10^5$)	最大值/ ($\times 10^5$)	平均值/ ($\times 10^5$)	标准差	迭代收敛 时间/s
EGJO	7.235 6	8.299 5	7.799 1	0.313 69	37.67
GJO	21.602 6	114.223 3	57.471 7	25.715 19	63.62
ZOA	17.558 9	97.058 5	53.910 9	20.142 07	68.58
PSO	24.754 1	57.384 8	45.584 9	5.266 57	10.40
DE	14.270 0	36.742 7	27.115 4	6.338 64	39.37
TLBO	8.551 9	16.476 4	9.928 0	1.911 18	39.25
GWO	7.346 4	20.434 5	8.227 5	2.318 02	41.62
GCTMSA	10.065 5	32.881 6	11.440 9	4.102 18	59.98

EGJO算法在算例1的寻优能力优于其他算法。其标准差最小为0.3136,可见EGJO的求解稳定性最好。

(2)定性分析

由图5可以看出,EGJO算法的箱体图端线最短、箱体最扁,且中位线和均值均小于其他算法,进一步验证了EGJO求解结果的稳定性,且求解结果更优越。

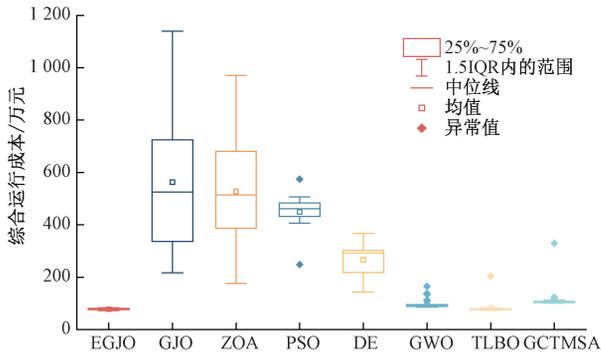


图5 综合运行成本求解30次的值分布

Fig. 5 Distribution of values for 30 times of integrated operating cost solving

由图6的收敛曲线可知,EGJO在600次以下收敛且获得的全局目标值最小,其他算法收敛次数均大于600次才收敛,说明了EGJO的收敛性能较好。

综合上述结果,算例1中EGJO的收敛性、全局搜索能力及稳定性均优于其他算法。

3.2 算例2

本文选取西南地区某省简化系统实例进行案例分析,进一步说明所提模型及方法的有效性。某省简化系统接线如图7所示。

其中包括BPJ流域的SNP、GZ、MMY1、DJ共4个梯级水电为基础构建的4个流域水风光一体化电站,16个火电机组,火电机组的总装机容量24260MW,水电机组总装机容量为2663.5MW,梯级水电站相关参数如表4所示。负荷、风电、光伏出力相关数据^[4,20],其余参数设置同算例1。

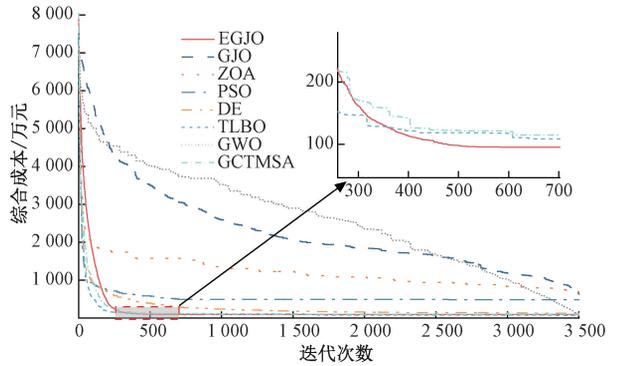


图6 不同算法的求解结果收敛曲线

Fig. 6 Convergence curves of the solution results of different algorithms

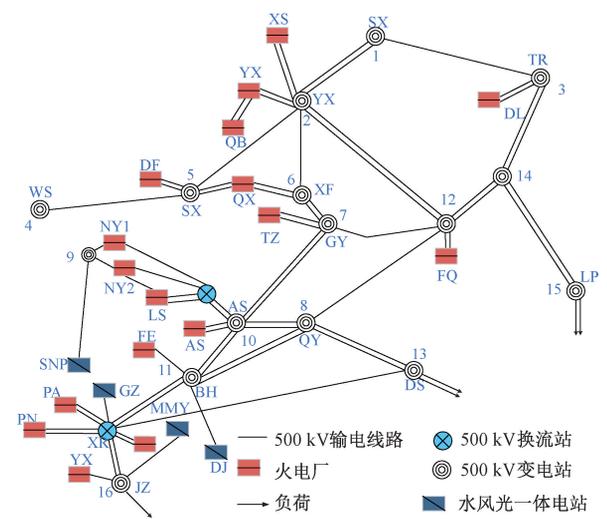


图7 某省域简化电气接线图

Fig. 7 Simplified electrical wiring diagram for a provincial area

表4 梯级水电站参数

Table 4 Parameters of terraced hydropower stations

电站	正常水位/m	死水位/m	装机容量/MW
SNP	885	865	185.5
MMY	745	691	1040
GZ	585	580	558
DJ	490	483	880

1)系统优化调度结果分析

由图8可知,不同场景下机组出力均满足功率平衡约束;通过表5的求解结果可知,首先综合运行成本方面,情景2的成本最高,比情景1、情景3分别高了12.12%、12.09%,充分说明了WHWP系统的经济性和可行性。

其次,碳排放总量方面,情景1、2比情景3分别高了2517.8t、17841.68t,说明了考虑阶梯碳交易的含WHWP的多能互补调度模型有效减少碳排放量,对环境友好,利于可持续发展。

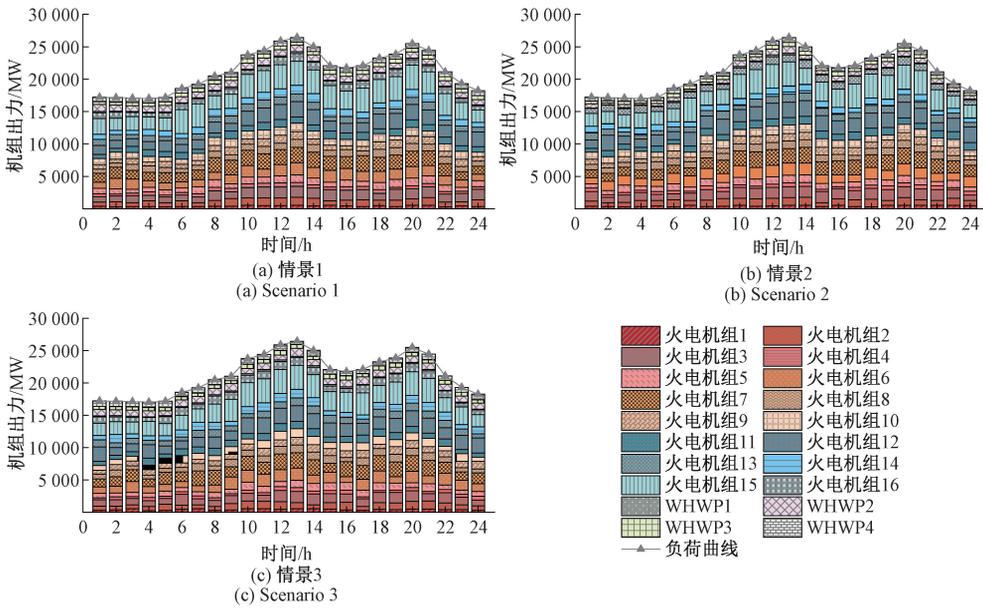


图 8 各发电机组出力

Fig. 8 Output of each generating unit

表 5 各场景下结果参数比对

Table 5 Comparison of resultant parameters in each scenario

场景	综合成本/ 万元	碳排放量/ 吨	碳交易成本/ 万元	弃能成本/ 万元
1	15 752.35	464 776.77	402.69	392.28
2	17 661.65	480 100.65	429.56	430.41
3	15 757.14	462 258.97	412.31	388.72

最后,在弃能方面,情景 3 的弃能成本最低,比情景 1、2 分别低了 3.56 万元、41.69 万元,可以说明本文所提调度模型可以有效减少弃能。

综上,通过算例 2 验证了本文所提的考虑阶梯碳交易的含 WHWP 的多能互补调度模型可以减少碳排放总量、以及促进风光消纳。

2) 不同算法求解结果对比分析

利用 EGJO 与 7 种优化算法对算例 2 中情景 3 进行求解。其求解结果如表 6 所示。

(1) 定量分析

由表 6 的求解结果可知,EGJO 求解的各项指标均为最优,可见 EGJO 算法具有更强的开发和搜索能力,GJO、ZOA、PSO、DE、TLBO、GWO、GCTMSA 求解 30 次的标准差分别为 EGJO 的 12.91、10.48、5.28、1.06、1.23、1.26、8.98 倍。可知,即使在复杂系统中,EGJO 相较于其他算法其稳定性更好。

(2) 定性分析

由图 9 可知,在算例 2 中 EGJO 算法中位线和均值均小于其他算法,箱体位于最下方,且求解 30 次无异常值,验证了 EGJO 在简化实际系统中求解的稳定性及有效性。

表 6 各算法求解结果对比

Table 6 Comparison of solution results of each algorithm

算法	最小值/ ($\times 10^8$)	最大值/ ($\times 10^8$)	平均值/ ($\times 10^8$)	标准差	迭代收敛 时间/s
EGJO	1.530 5	1.722 8	1.612 4	0.062 45	64.11
GJO	4.449 2	7.772 0	5.996 0	0.806 23	140.85
ZOA	3.451 8	5.961 4	4.565 9	0.654 37	144.85
PSO	2.204 5	3.762 7	2.717 3	0.330 00	59.99
DE	2.004 5	2.318 9	2.176 2	0.066 33	74.18
TLBO	1.745 2	2.051 8	1.832 1	0.076 81	69.07
GWO	1.670 6	2.017 1	1.720 2	0.078 74	117.98
GCTMSA	2.105 9	4.461 9	3.032 3	0.560 98	258.57

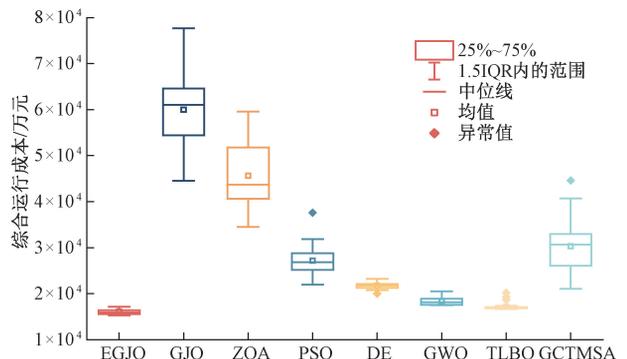


图 9 综合运行成本求解 30 次的值分布

Fig. 9 Distribution of values for 30 times of solving the integrated operating cost

由图 10 的收敛曲线可以看出,EGJO 的收敛性以及求解结果均为最优。

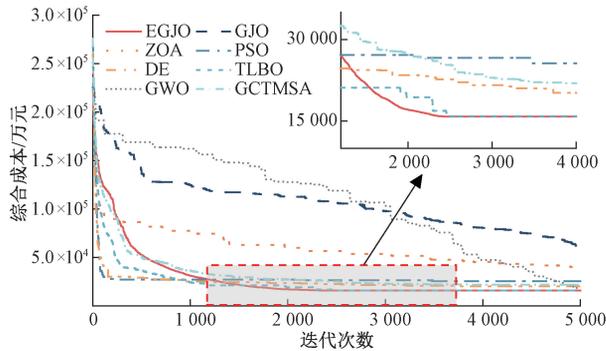


图 10 不同算法的求解结果收敛曲线

Fig. 10 Convergence curves of the solution results of different algorithms

4 结 论

本文从模型、求解方法两个方面展开了研究,构建了一种考虑阶梯碳交易的含 WHWP 的多能互补调度模型,并且提出了一种基于 Logistic 混沌映射、准反射学习策略、高斯随机游走策略、最优个体局部搜索结合差分变异扰动策略的 EGJO 算法。以修改的 IEEE3 机 9 节点系统和某省简化实际系统为例,与 7 种主流优化算法对比分析。结论如下:

本文提出的一种考虑阶梯碳交易的含 WHWP 的多能互补调度模型可以有效降低碳排放总量,且有效促进风光消纳。与分布式发电相比,在两个算例中综合运行成本分别降低了 8.55% 和 10.78%,碳排放总量分别减少了 178.26 t 和 17 841.68 t。

本文所提的 EGJO 算法,相较于 GJO、ZOA、PSO、DE、GWO、TLBO 和 GCTMSA 算法,在两个算例中所得综合运行成本相较于其他算法求解最小的减少了 1.108 万元和 1 401 万元,标准差分别降低了 1.598 0 和 0.003 8。说明 EGJO 在求解考虑阶梯碳交易的含 WHWP 多能互补优化调度问题中,其具有更高的求解效率、以及更强的稳定性和搜索能力。

参考文献

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. [2020-09-22]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.html.
XI J P. Speech at the General Debate of the 75th United Nations General Assembly[EB/OL]. [2020-09-22]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.html.
- [2] 申建建,王月,程春田,等.水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J].中国电机工程学报,2022,42(11):3871-3885.

SHEN J J, WANG Y, CHENG CH T, et al. Research status and prospect of generation scheduling for hydropower-wind-solar energy complementary system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3871-3885.

- [3] 李铁,李正文,杨俊友,等.计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度[J].电网技术,2020,44(10):3622-3630.
LI T, LI ZH W, YANG J Y, et al. Coordination and optimal scheduling of multi-energy complementary system considering peak regulation initiative [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3622-3630.
- [4] 曹韵,韩松,荣娜,等.基于 GCTMSA 的梯级水火风光蓄储联合调度[J].电力系统保护与控制,2023,51(3):108-116.
CAO Y, HAN S, RONG N, et al. Dispatch of a cascade hydro-thermal-wind-photovoltaic-storage complementary system based on GCTMSA [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 108-116.
- [5] ZHAO M, WANG Y, WANG X, et al. Flexibility evaluation of wind-PV-hydro multi-energy complementary base considering the compensation ability of cascade hydropower stations [J]. Applied Energy, 2022, 315: 119024.
- [6] LU L, YUAN W, SU C, et al. Optimization model for the short-term joint operation of a grid-connected wind-photovoltaic-hydro hybrid energy system with cascade hydropower plants [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 236: 114-055.
- [7] 谭晶,何川,陈保瑞,等.考虑水光蓄互补和直流外送的电力系统分布鲁棒优化调度方法[J].中国电机工程学报,2024,44(15):5947-5960.
TAN J, HE CH, CHEN B R, et al. A distributionally robust optimal scheduling method for power systems considering water-photovoltaic storage complementarity and DC outflow [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2024, 44(15): 5947-5960.
- [8] 罗经馨,陈庆超,黄秋立.考虑调峰主动性的梯级水光互补与火电耦合系统经济调度[J].电网与清洁能源,2021,37(5):106-114,122.
LUO J X, CHEN Q CH, HUANG Q L. Economic scheduling of a coupled system of graded water-photovoltaic and thermal power considering peaking initiative [J]. Grid and Clean Energy, 2021, 37(5): 106-114, 122.
- [9] WANG Z, FANG G, WEN X, et al. Coordinated operation of conventional hydropower plants as hybrid pumped storage hydropower with wind and photovoltaic plants [J]. Energy Conversion and

- Management, 2023, 277:116-654.
- [10] GUO Y, MING B, HUANG Q, et al. Risk-averse day-ahead generation scheduling of hydro-wind-photovoltaic complementary systems considering the steady requirement of power delivery [J]. Applied Energy, 2022, 309: 118-467.
- [11] 张歆萌,陈仕军,曾宏,等. 基于源荷匹配的异质能源互补发电调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3314-3320.
ZHANG X SH, CHEN SH J, ZENG H, et al. Heterogeneous energy complementary power generation dispatching based on output-load matching [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3314-3320.
- [12] 张良,郑丽冬,冷祥彪,等. 基于灰狼算法的风-光-抽水蓄能联合系统多目标优化策略研究[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(10):1554-1566.
ZHANG L, ZHENG L R, LENG X B, et al. Research on multi-objective optimization strategy of wind-photovoltaic-pumped storage joint system based on gray wolf algorithm [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(10):1554-1566.
- [13] 华昊辰,史珺博,陈星莺,等. 基于自适应形状估计多目标进化算法的低碳经济能量路由策略[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14 [2024-04-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240402.1054.012.html>.
HUA H CH, SHI J B, CHEN X Y, et al. Low-carbon economic energy routing strategy via adaptive geometry estimation based multi-objective evolutionary algorithm [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-14 [2024-04-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240402.1054.012.html>.
- [14] 程先龙,王川,张杰,等. 基于多目标原子轨道搜索算法的风电场集群最优经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6):77-87.
CHENG X L, WANG CH, ZHANG J, et al. Optimal economic dispatch of wind farm clusters based on multi-objective atomic orbital search [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6):77-87.
- [15] 陈旭,鲁启. 基于衍生搜索政治优化算法解决含可再生能源的多区域经济调度问题[J]. 电网技术, 2024, 48(4):1583-1597.
CHEN X, LU Q. Derivative search-based political optimization algorithm for multi-area economic dispatch considering renewable energy [J]. Power System Technology, 2024, 48(4):1583-1597.
- [16] 马苗洁,孟昭亮,张乐,等. 基于多目标优化的 ISMA-CNN-BiLSTM 短期负荷预测[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(12):116-122.
MA M J, MENG ZH L, ZHANG L, et al. ISMA-CNN-Bi LSTM short-term load forecasting based on multi-objective optimization [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(12):116-122.
- [17] 周辉,张玉,肖烈禧,等. 基于改进秃鹰算法的微电网群经济优化调度研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 328-335.
ZHOU H, ZHANG Y, XIAO L X, et al. Study on economic optimal scheduling of microgrid cluster based on improved vulture algorithm [J]. Journal of Solar Energy, 2024, 45(2):328-335.
- [18] NITISH C, MUHAMMAD A M. Golden jackal optimization: A novel nature-inspired optimizer for engineering applications [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 198:116-924.
- [19] FAN Q, CHEN Z, XIA Z, et al. A novel quasi-reflected Harris Hawks optimization algorithm for global optimization problems [J]. Soft computing, 2020, 24(19): 14825-14843.
- [20] HUANG Q, HAN S, RONG N, et al. Stochastic economic dispatch of Hydro thermal-wind-photovoltaic power system considering mixed coal-blending combustion [J]. IEEE Access, 2020, 8: 218542-218553.

作者简介

张建英, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化运行与控制。

E-mail: 2475209690@qq.com

荣娜(通信作者), 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统优化运行。

E-mail: nrong@gzu.edu.cn