

采用改进多目标粒子群算法的 海岛综合能源系统优化调度

戴红伟¹, 胡青怡¹, 孙靖², 王金龙¹, 杨玉¹

(1. 江苏海洋大学计算机工程学院, 222005, 江苏连云港;

2. 青岛科技大学数据科学学院, 266061, 山东青岛)

摘要: 为解决海岛多样化用能需求的有效供给问题, 弥补传统调度模型难以兼顾多负荷需求与可再生能源消纳的不足, 提出一种包含电、热、冷、水、氢 5 种负荷的海岛综合能源系统优化调度方法。以最小化综合经济成本、最大化可再生能源出力为优化目标, 考虑能量平衡、储能限制、转换效率等约束, 构建海岛综合能源系统优化调度模型。针对传统多目标粒子群算法的缺陷, 提出一种改进多目标粒子群算法(IMOPSO), 引入自适应惯性权重更新机制与飞行参数动态调整策略, 以增强算法的全局搜索能力与局部开发能力, 同时结合领导者择优选择机制与变异算子, 提高非支配解集的多样性和分布均匀性, 从而优化算法性能。标准测试函数对比实验表明: 所提出的 IMOPSO 算法的世代距离、逆世代距离指标均表现最好, 超体积指标在多个函数上取得最高值, 证明其在多样性、分布性和收敛性的显著优势。夏季和冬季两个典型日场景的验证表明, 与传统多目标粒子群算法和其他对比算法相比, 所提算法在综合经济成本指标上分别降低了 1.80%、4.37% 以上, 在能源出力指标上分别提高了 18.52%、1.60% 以上, 能满足海岛多类型负荷需求。

关键词: 海岛综合能源; 优化调度; 多目标优化; 改进粒子群算法; 可再生能源

中图分类号: TK01+9 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202606016 **文章编号:** 0253-987X(2026)06-0188-13

Optimal Scheduling of Island Integrated Energy System Using Improved Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm

DAI Hongwei¹, HU Qingyi¹, SUN Jing², WANG Jinlong¹, YANG Yu¹

(1. School of Computer Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu 222005, China;

2. School of Data Science, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract: To address the challenge of meeting diverse energy demands on islands while overcoming shortcomings of traditional scheduling models in balancing multi-load demands with renewable energy absorption, an optimal scheduling approach for an island integrated energy system (IIES) is proposed. The IIES incorporates 5 load types: electricity, heat energy, cold energy, water, and hydrogen. Subject to such constraints as energy balance, energy storage limits, and conversion efficiencies, an optimal scheduling model for IIES is established to minimize overall economic cost and maximize renewable energy output. To remedy deficiencies of the traditional multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm, an improved multi-objective

收稿日期: 2025-10-06。 作者简介: 戴红伟(1975—), 男, 教授; 孙靖(通信作者), 女, 教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62373171)。

网络出版时间: 2025-12-25

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20251224.1731.006>

particle swarm optimization (IMOPSO) algorithm is proposed. The improvements include introducing an adaptive inertia weight update mechanism and a dynamic adjustment strategy for flight parameters to enhance both global search and local exploitation capabilities of the algorithm. In addition, the diversity and uniform distribution of the non-dominated solution set are improved by integrating the merit-based selection mechanism of leaders and mutation operator, thereby boosting algorithmic performance. Comparative experiments using standard test functions show that the proposed IMOPSO algorithm achieves the best results on generational distance and inverted generational distance, and attains the highest hypervolume across multiple functions, demonstrating its significant advantages in diversity, distribution, and convergence. Validation for two typical daily scenarios—summer and winter—indicates that, compared with the traditional MOPSO algorithm and other comparative algorithms, the proposed IMOPSO reduces overall economic cost by more than 1.80% and 4.37%, while increasing energy output by over 18.52% and 1.60%, respectively, thereby meeting diverse energy demands on islands.

Keywords: island integrated energy; optimal scheduling; multi-objective optimization; improved particle swarm algorithm; renewable energy

随着海岛资源开发与利用的推进,海岛用能需求日益增长。传统的能源供应方式不仅面临传输成本高等问题,还因依赖化石能源而带来环境污染。综合能源系统(IES)是融合热、电、氢等多类型能源形式和多种能源转换技术,实现能源系统源、荷、储等环节的深度耦合与协调优化^[1]。借鉴 IES 综合用能模式,充分利用风能、太阳能、波浪能等可再生能源资源构建经济高效的海岛综合能源系统(IIES)^[2],是解决海岛能源短缺和环境污染问题的重要措施。

考虑到 IIES 可再生能源的不稳定性,如何使各发电单元出力互补并满足源-荷协调已引起广泛关注。文献[3]构建了包含氢储能系统和海水源热泵的 IIES 微网,实现了长期储能以及解决碳排放过高问题。文献[4]在海岛微网结构中引入一种不间断电源来缓解海岛离网系统供电压力问题,提高了海岛微网的经济性和环保性。文献[5]在海岛系统重引入“水热同传”模型来解决海岛淡水短缺问题,以经济成本最小为目标实现海岛的优化调度。文献[6]提出了一种集成波浪能、风能和氢电转换技术的混合离网系统,旨在为北极偏远地区满足能源需求。尽管上述研究在可再生能源利用、储能配置及系统优化方面取得了重要进展,但缺乏对海岛综合能源系统中多种能源全耦合建模与协同优化调度的系统性研究。文献[7]建立了含风、光、柴、储、波浪能、潮汐能以及可控负荷的海岛微网能量优化调度模型,用以提高可再生能源利用率并降低 IIES 运行成本。文献[8]考虑氢能多元利用,综合评估 P2G 电转气技术、氢燃料电池车和热惯性构建了电、热、冷、氢耦

合的综合港口能源系统(IPES),实现了低碳经济优化。文献[9]聚焦于整合电热能源系统、制氢、碳捕集封存技术以及阶梯碳定价机制,充分利用海上风电及氢能的灵活应用来满足系统的经济性和环保性。上述文献虽然在可再生能源利用、多能量互补及系统运行优化方面开展了有益探索,但可再生能源特性利用不足,风、光、波浪等间歇性能源未充分利用其时间和空间互补性,并且均未考虑到海岛居民电、热、冷、水、氢共同供给的负荷需求。

粒子群(PSO)算法是一种高效的群体智能优化算法,凭借其结构简单、收敛速度快等优势,吸引了诸多学者将其应用于 IES^[10-12]。然而,上述文献多采用单目标或将多目标加权和转为单目标求解,未能同时兼顾多种目标,因此多目标粒子群算法(MOPSO)受到越来越多的关注^[13]。虽然有不同学者通过采用线性微分递减权重并引入变异策略^[14]、引入学习因子与异步变化机制^[15]、采用动态非线性加权策略结合网格划分^[16]等方法提升 MOPSO 算法性能,但上述改进 MOPSO 算法多用于小规模优化问题,在面对问题规模大、约束条件多样的 IIES 复杂优化调度问题,仍易陷入局部最优解。

针对上述问题,本文从惯性权重更新、飞行参数更新、领导者选择等角度提出一种改进多目标粒子群算法(IMOPSO),以最小化综合经济成本和最大化可再生能源出力为目标,充分考虑海岛负荷的多样性和需求的平衡性,构建含电、热、冷、水、氢的海岛综合能源系统优化调度模型。为验证 IMOPSO 算法性能,本文进行改进了策略的消融实验,同时将

其与传统 MOPSO 算法^[17]、非支配排序遗传算法 2 (NSGA-II)^[18]、基于分解的多目标进化算法(MOEA/D)^[19]、多目标蜣螂优化算法(NSDBO)^[20]、多目标海洋捕食者优化算法(MOMPA)^[21]和多目标班翠鸟优化算法(MOPKO)^[22]在 WFG 系列测试函数^[23]上进行对比验证。并选择夏季典型日和冬季典型日进行实验仿真,结果表明本文提出的 IMOPSO 算法具有较强的搜索能力,收敛性进一步提升,求解出的调度方案能够保证最小化经济成本和最大化可再生能源出力,实现 IIES 能源供需平衡,满足海岛负荷需求。

1 海岛综合能源系统结构及设备建模

1.1 海岛综合能源系统

为充分利用各类可再生能源支撑 IIES 高效运行,本文构建的 IIES 如图 1 所示,由波浪能发电设备(WEG)、光伏发电设备(PV)、风力发电机(WT)、太阳能集热器(STC)、电解槽(EC)、氢燃料电池(HFC)、海水源热泵(WSHP)、海水淡化设备(SD)、吸收式制冷机(AR)、蓄电池(BES)、储氢罐(HES)、储热设备(TES)、储冷设备(CES)、储水设备(WES)组成。

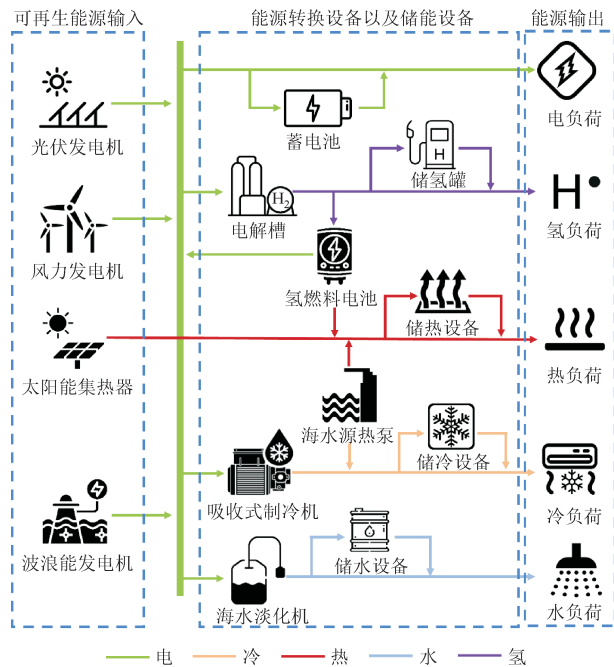


图 1 IIES 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of the IIES system

1.2 海岛综合能源系统设备建模

1.2.1 可再生能源出力设备

(1)波浪能发电设备^[24]。波浪能发电设备产生的电能可以用波高和波浪周期来描述,其输出功率

如下

$$P_{\text{WEG}}(t) = 0.5Th^2 \quad (1)$$

式中: $P_{\text{WEG}}(t)$ 为 t 时刻波浪能发电设备的输出电量, W/h; h 为波浪的高度, m; T 为波浪周期, s。

由于波浪与海风关系密切,因此当波浪数据不足时可以通过风的数据预测波浪数据,赵为光等^[24]提出了风与波浪预测模型如下

$$\begin{cases} h = av_t^b + c \\ T = d^e v_t + f \\ P_{\text{WEG}} = 0.5Th^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_t 为 t 时刻的风速, m/s; a, b, c, d, e, f 为波浪出力模型待定系数。

(2)光伏发电设备^[25]。光伏发电设备依靠太阳能电池板进行发电,主要受太阳能辐射和环境温度影响,该输出功率模型如下

$$P_{\text{PV}}(t) = \sigma_{\text{pvlos}} P_{\text{SEB}} \frac{R_t(1 + \omega(T_t - T_{\text{SEB}}))}{R_{\text{SEB}}} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{PV}}(t)$ 为 t 时刻 PV 的输出电量, W/h; σ_{pvlos} 为光伏的自损率; P_{SEB} 为标准测试条件下太阳能电池板最大输出功率; R_t 为 t 时刻的太阳辐射强度; R_{SEB} 为标准测试条件下太阳辐射强度; ω 为功率温度系数,一般取 $-0.5\% \sim -0.35\%$; T_t 为 t 时刻的环境温度; T_{SEB} 为标准测试条件下的温度 25°C 。

(3)风力发电机^[26]。风力发电机输出功率模型如下

$$P_{\text{WT}}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v_t < v_{\text{in}} \\ \frac{v_t - v_{\text{in}}}{v_{\text{r}} - v_{\text{in}}} P_{\text{wtr}}, & v_{\text{in}} \leq v_t < v_{\text{r}} \\ P_{\text{wtr}}, & v_{\text{r}} \leq v_t < v_{\text{out}} \\ 0, & v_t \geq v_{\text{out}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{WT}}(t)$ 为 t 时刻 WT 的输出电量; $v_{\text{in}}, v_{\text{out}}, v_{\text{r}}$ 分别为 WT 的切入、切出和额定风速, m/s; P_{wtr} 为 WT 的额定功率。

(4)太阳能集热器^[25]。太阳能集热器的集热量与太阳能集热面积和太阳辐射强度有关,该输出功率模型如下

$$Q_{\text{STC}}(t) = \frac{3.6A_{\text{STC}}R_t\eta_{\text{STC}}(1 - \sigma_{\text{stclos}})}{\varphi_{\text{stc}}} \quad (5)$$

式中: $Q_{\text{STC}}(t)$ 为 t 时刻 STC 的输出热量; A_{STC} 为太阳能集热面积; η_{STC} 为 STC 的平均每日集热效率; σ_{stclos} 为 STC 的自损率; φ_{stc} 为太阳能的影响率。

1.2.2 能源转换设备

(1)电解槽。电解槽利用电解反应将电能转化为氢气,具有无污染、转换效率高的优点。其功率输

出模型如下

$$V_{EC}(t) = \eta_{EC} P_{EC}(t) \quad (6)$$

式中: $V_{EC}(t)$ 为 t 时刻 EC 产生的氢气体积; η_{EC} 为 EC 的电转氢转换系数; $P_{EC}(t)$ 为 t 时刻 EC 消耗的电量。

(2) 氢燃料电池^[17]。氢燃料电池作为一种将化学能高效转化为电能的关键装置,在能源领域的重要性日益凸显。该装置通过分解氢气产生电能和热能,具体输出模型如下

$$P_{HFC}(t) = \frac{2FB_{HFC}V_{HFC}(t)}{M_h}(E_{\text{nernst}} - U_{HFC,act} - U_{HFC,ohm} - U_{HFC,con}) \quad (7)$$

$$Q_{HFC}(t) = \eta_{HFC} P_{HFC}(t) \quad (8)$$

式中: $P_{HFC}(t)$ 、 $Q_{HFC}(t)$ 分别为 t 时刻 HFC 输出的电量和热量; $V_{HFC}(t)$ 为 t 时刻 HFC 消耗的氢气; F 为法拉第常数; B_{HFC} 为标准堆栈数; M_h 为氢气的摩尔质量; E_{nernst} 为能斯特电压; $U_{HFC,act}$ 为激活电压; $U_{HFC,ohm}$ 为欧姆电压; $U_{HFC,con}$ 为集中电压; η_{HFC} 为 HFC 的电转热系数。

(3) 海水源热泵^[3]。海水源热泵通过吸收海水中的热能,借助冷热循环满足海岛夏季供冷、冬季供热的需求,其功率输出模型如下

$$c_{\text{cop,h}}(t) = a_1 \exp(b_1 T_h + c_1 T_s) + d_1 \frac{T_h}{T_s} + e_1 \quad (9)$$

$$c_{\text{cop,c}}(t) = f_1 \exp(g_1 T_c + h_1 T_s) + j_1 \frac{T_c}{T_s} + o \quad (10)$$

$$Q_{\text{WSHP}}(t) = c_{\text{cop,h}}(t) P_{\text{WSHP}}(t) \quad (11)$$

$$C_{\text{WSHP}}(t) = c_{\text{cop,c}}(t) P_{\text{WSHP}}(t) \quad (12)$$

式中: $c_{\text{cop,h}}(t)$ 、 $c_{\text{cop,c}}(t)$ 分别为 t 时刻 WSHP 的制热、制冷系数; $Q_{\text{WSHP}}(t)$ 、 $C_{\text{WSHP}}(t)$ 分别为 WSHP 在 t 时刻的输出热量和输出冷量; $P_{\text{WSHP}}(t)$ 为 WSHP 在 t 时刻消耗的电量; T_h 、 T_c 和 T_s 分别为供暖季出水均温、供冷季出水均温和水源温度; a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 e_1 、 f_1 、 g_1 、 h_1 、 j_1 、 o 为拟合系数。

(4) 海水淡化设备。海水淡化装置是解决水资源短缺问题的关键设备,主要通过电能将含盐量高的海水转化为可供使用的淡水。其功率输出模型如下

$$W_{SD}(t) = \eta_{SD} P_{SD}(t) \quad (13)$$

式中: $W_{SD}(t)$ 为 t 时刻 SD 的输出水量; η_{SD} 为 SD 的电转水系数; $P_{SD}(t)$ 为 t 时刻 SD 消耗的电量。

(5) 吸收式制冷机。吸收式制冷机是一种利用

热能驱动实现制冷的设备,其功率输出模型如下

$$C_{AR}(t) = \eta_{AR} Q_{AR}(t) \quad (14)$$

式中: $C_{AR}(t)$ 为 t 时刻 AR 的输出冷量; η_{AR} 为 AR 热转冷系数; $Q_{AR}(t)$ 为 AR 在 t 时刻消耗的热量。

1.2.3 存储设备^[27-28]

在海岛的日常调度中,可再生能源出力具有间歇性与波动性,比如发电高峰时电力过剩,低谷时供应不足。存储设备可在能源富裕时储存电能或相关资源,在能源短缺时释放,确保能源供应的持续性与稳定性。本文的存储设备包括电储能、热储能、冷储能、水储能和氢储能,存储模型^[29]如下

$$E_i(t) =$$

$$\begin{cases} (1 - \epsilon_i) E_i(t-1) + \rho_i P_{i,\text{dis}}(t), & P_{i,\text{dis}}(t) \geq 0 \\ (1 - \epsilon_i) E_i(t-1) + \frac{P_{i,\text{dis}}(t)}{\rho_i}, & P_{i,\text{dis}}(t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: i 表示电、热、冷、氢、水储能设备,分别为 BES、HES、CES、TES、WES; $E_i(t)$ 为 t 时刻设备 i 储存的能量或资源; ϵ_i 为设备 i 的自然损耗率; ρ_i 为设备 i 的储放效率; $P_{i,\text{dis}}(t)$ 为 t 时刻设备 i 的充放量。

2 IIES 多目标优化调度模型

2.1 目标函数

为保证 IIES 能够充分利用可再生能源并维持系统运行的经济性,提出以最大化可再生能源出力和最小化综合经济成本为目标函数。

目标函数 1: 可再生能源出力,表达式如下

$$F_1 = \sum_{t=1}^{24} \sum_k N_k(t) P_k(t) \quad (16)$$

式中: F_1 为可再生能源出力; $N_k(t)$ 和 $P_k(t)$ 分别表示在 t 时刻设备 k 对应的出力设备数量和出力, k 表示系统内所有设备。

目标函数 2: 经济成本,包括设备的装机成本、运维成本和弃能惩罚成本,表达式如下

$$F_2 = F_{\text{opt}} + F_{\text{cf}} + F_{\text{pur}} \quad (17)$$

$$F_{\text{opt}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_k N_k(t) C_k + \sum_{t=1}^{24} P_k(t) C_k \quad (18)$$

$$F_{\text{cf}} = \sum_k P_{k,\text{cf}} C_{k,\text{cf}} \quad (19)$$

$$F_{\text{pur}} = \sum_k C_{k,\text{pur}} \quad (20)$$

式中: F_2 为 IIES 的经济成本; F_{pur} 、 F_{opt} 和 F_{cf} 分别为装机成本、运维成本和弃能惩罚成本; $N_k(t)$ 和 C_k 分

别为 t 时刻设备 k 的工作台数和其运维成本; $P_k(t)$ 为 t 时刻设备 k 的出力; P_{cf} 和 $C_{k,cf}$ 分别为设备 k 的弃能量和其单位弃能惩罚成本; $C_{k,pur}$ 为每台设备的装机成本。

2.2 约束条件

2.2.1 可再生能源出力约束

可再生能源出力约束如下

$$\begin{cases} 0 \leq P_r(t) \leq P_{r,max}(t) \\ 0 \leq N_r(t) \leq N_{r,max}(t) \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_{r,max}(t)$ 和 $N_{r,max}(t)$ 分别表示系统中第 r 个可再生能源设备出力上限和安装数量上限。

2.2.2 能源转换设备约束

能源转换设备约束如下

$$P_{u,min}(t) \leq P_u(t) \leq P_{u,max}(t) \quad (22)$$

式中: u 表示系统中的第 u 台能源转换设备; $P_u(t)$ 为第 u 台设备的输出功率; $P_{u,min}(t)$ 和 $P_{u,max}(t)$ 分别表示第 u 台设备的出力上、下限。

2.2.3 储能设备约束

储能设备约束如下

$$\begin{cases} E_i^{min}(t) \leq E_i(t) \leq E_i^{max}(t) \\ P_{i,dis}^{min}(t) \leq P_{i,dis}(t) \leq P_{i,dis}^{max}(t) \\ E_i(0) = E_i^0 \end{cases} \quad (23)$$

式中: $E_i^{min}(t)$ 和 $E_i^{max}(t)$ 分别为储能容量的上、下限; $P_{i,dis}^{min}(t)$ 和 $P_{i,dis}^{max}(t)$ 分别为设备 i 充放量的上、下限; E_i^0 为设备 i 的初始状态。

2.2.4 功率平衡约束

功率平衡是海岛综合能源系统优化调度的核心约束,确保各类能源供应与各用能设备的需求在每个时刻匹配。合理维护功率平衡可以提高系统的稳定性,优化可再生能源消纳,降低运行成本,并提升整体能源利用效率。

(1)电功率平衡约束如下

$$P_{WEG}(t) + P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{HFC}(t) + P_{BES}(t) = P_{EC}(t) + P_{SD}(t) + P_{WSHP}(t) + P_{AR}(t) + L_e(t) \quad (24)$$

式中: $P_{BES}(t)$ 为 t 时刻储电设备的存放量; $L_e(t)$ 为 t 时刻海岛的用电负荷。

(2)热功率平衡约束如下

$$Q_{STC}(t) + Q_{HFC}(t) + Q_{WSHP}(t) + Q_{HES}(t) = Q_{AR}(t) + L_q(t) \quad (25)$$

式中: $Q_{HES}(t)$ 为 t 时刻储热设备的存放量; $L_q(t)$ 为 t 时刻海岛的用热负荷。

(3)冷功率平衡约束如下

$$C_{WSHP}(t) + C_{AR}(t) + C_{CES}(t) = L_c(t) \quad (26)$$

式中: $C_{CES}(t)$ 为 t 时刻储冷设备的存放量; $L_c(t)$ 为 t 时刻海岛的用冷负荷。

(4)水功率平衡约束如下

$$W_{SD}(t) + W_{WES}(t) = L_w(t) \quad (27)$$

式中: $W_{WES}(t)$ 为 t 时刻储水设备的存放量; $L_w(t)$ 为 t 时刻海岛的用水负荷。

(5)氢功率平衡约束如下

$$V_{EC}(t) + V_{HES}(t) = V_{HFC}(t) + L_v(t) \quad (28)$$

式中: $V_{HES}(t)$ 为 t 时刻储氢设备的存放量; $L_v(t)$ 为 t 时刻海岛的用氢负荷。

3 基于 IMOPSO 算法的优化调度

为改善传统 MOPSO 算法在收敛速度、全局搜索能力及种群多样性等方面的不足,本文从惯性权重更新策略、速度更新策略、领导者选择策略等几个方面对 MOPSO 算法进行改进。

3.1 自适应惯性权重更新策略

传统 MOPSO 算法使用固定的惯性权重(ω)会使算法陷入局部最优,本文引入一种考虑多样性驱动的自适应惯性权重更新机制,根据每代粒子群体的适应度差值动态调整惯性权重。在粒子群体适应度差异较大时,惯性权重较大,促进全局搜索;而在适应度差异较小时,惯性权重较小,促进局部搜索,从而加速算法的收敛并提高最终解的质量。具体算法如下

$$\omega = \begin{cases} \omega_{max} \left(1 - \frac{x_{it}}{x_{maxit}}\right), & c_{costdiff} \geq \sigma_\omega \\ \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \exp\left(-0.1 \frac{x_{it}}{x_{maxit}}\right), & c_{costdiff} < \sigma_\omega \end{cases} \quad (29)$$

式中: σ_ω 为 ω 控制阈值,本文取 0.3; x_{it} 和 x_{maxit} 分别为当前迭代次数和最大迭代次数; $c_{costdiff}$ 为适应度差值。

3.2 行参数动态更新策略

飞行参数 c_1 和 c_2 影响着算法中粒子如何通过个体最优解和全局最优解来调整其位置。本文根据粒子当前位置与个体最优解和全局最优解的距离,以及粒子的适应度与粒子群平均适应度的差异动态调整 c_1 和 c_2 。通过动态调整飞行参数,使粒子在优化过程中实现全局搜索能力和局部搜索能力的平

衡。粒子的初步更新公式如下

$$\begin{cases} c_1 = \alpha_1 \text{sigmoid}(d_{pi}) + \beta_1 \\ c_2 = \alpha_2 \text{sigmoid}(d_{gi}) + \beta_2 \end{cases} \quad (30)$$

式中: d_{pi} 和 d_{gi} 分别为粒子与个体最优解和全局最优解的欧几里得距离; α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 为控制参数。

当粒子的适应度较差,即当前适应度值 $c_{\text{cur_cost}}$ 大于群体平均适应度值 $c_{\text{avg_cost}}$ 时,为了增强全局搜索能力,更新 c_1 和 c_2 ,更新方法如下

$$c_{\text{avg_cost}} = \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} \|C(j)\| \quad (31)$$

$$\begin{cases} c'_1 = c_1 + \mu(c_{\text{cur_cost}} - c_{\text{avg_cost}}) \\ c'_2 = c_2 + \mu(c_{\text{cur_cost}} - c_{\text{avg_cost}}) \end{cases} \quad (32)$$

式中: N_p 为粒子数量; $C(j)$ 为第 j 个粒子的适应度值; $\|\cdot\|$ 表示欧几里得距离; μ 是控制调整幅度因子。

如果粒子的适应度较好,即 $c_{\text{cur_cost}}$ 小于群体平均适应度值 $c_{\text{avg_cost}}$,则减小 c_1 和 c_2 ,以增强局部搜索,表达式如下

$$\begin{cases} c'_1 = c_1 - \mu(c_{\text{avg_cost}} - c_{\text{cur_cost}}) \\ c'_2 = c_2 - \mu(c_{\text{avg_cost}} - c_{\text{cur_cost}}) \end{cases} \quad (33)$$

3.3 领导者选择策略

传统的领导者选择方法通常基于粒子之间的距离或目标函数值的比较,这可能导致解空间中的粒子过度集中,降低了算法的多样性和全局搜索能力。本文提出一种基于适应度差异性的领导者选择策略,同时结合网格划分,以保持搜索的多样性,引领粒子群向最优解靠拢,具体步骤如下。

步骤1 获取粒子群体的网格信息和已占据的网格单元。

步骤2 计算每个网格单元的选择概率

$$P_l = \exp(-\beta_g N_l) \quad (34)$$

式中: β_g 是一个控制选择倾向的超参数; N_l 是第 l 个网格单元中粒子的数量。

步骤3 根据概率应用轮盘赌方法选出一个网格单元。

步骤4 在选出的网格单元中,使用欧几里得距离计算网格中每个粒子与其他粒子之间的目标函数差异度

$$d_{ij,\text{diff}} = \|f_i - f_j\| \quad (35)$$

式中: f_i 和 f_j 分别是粒子 i 和粒子 j 的目标函数值。

步骤5 对于每个粒子,计算其与剩余粒子之间的目标函数差异度总和。

步骤6 选择差异度最大的粒子作为领导者。

3.4 变异策略

变异操作可提高粒子多样性,传统的固定变异率缺乏对迭代过程的动态适应,性能欠佳。基于此,本文采用如式下所示的自适应变异机制,方法如下

$$p_m = \left(1 - \frac{x_{it} - 1}{x_{\text{maxit}} - 1}\right)^{\frac{1}{\mu_m}} \quad (36)$$

式中: p_m 为当前变异概率; μ_m 是变异率的控制参数。该式表示 p_m 随迭代次数 x_{it} 的增加逐渐减小。

对每个需要变异的变量,根据变异幅度进行高斯变异生成新的粒子位置,具体方法如下

$$d_x = m_{\text{scale}}(V_{\text{varmax}}(j) - V_{\text{varmin}}(j)) \quad (37)$$

$$x_{\text{new}} = G(x, d_x) \quad (38)$$

式中: m_{scale} 是基于迭代次数的衰减因子,确保变异幅度不为0; x 是当前粒子的位置; d_x 是变异幅度; G 为高斯分布操作; V_{varmax} 、 V_{varmin} 分别为当前变量值的上、下限。

3.5 最优解选取

由于多目标算法得到的是一组非支配解集,需要一定的评价方法来选取解集中的最优解。本文采用模糊逻辑中的梯形满意度函数来进行最优解的选取,首先获取解集中的所有适应度值,计算每个解在其适应度值上的梯形满意度函数值 $S_{m,n}$,再计算每个解的总满意度 $S_{\text{total},m}$,总满意度最大的解即为最优解,具体算法如下

$$S_{m,n} = \begin{cases} 1, & h_{m,n} \leq h_{\min,n} \\ \frac{h_{\max,n} - h_{m,n}}{h_{\max,n} - h_{\min,n}}, & h_{\min,n} < h_{m,n} \leq h_{\max,n} \\ 0, & h_{m,n} > h_{\max,n} \end{cases} \quad (39)$$

$$S_{\text{total},m} = \frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{N_f} S_{m,n} \quad (40)$$

式中: $h_{m,n}$ 为解集中的第 m 个解的第 n 个适应度值; $h_{\min,n}$ 和 $h_{\max,n}$ 分别是解集中第 n 个适应度函数的最小值和最大值; N_f 为适应度值数量; $S_{m,n}$ 为解 m 在适应度值 n 上的满意度值。

3.6 IMOPSO 优化调度流程

基于上述改进策略,本文提出 IMOPSO 算法优化调度流程如图2所示,其主要步骤如下。

步骤1 对第1节构建的 IIES 的决策变量进行初始化,并生成初始粒子群。

步骤2 根据第2节定义的目标函数计算每个粒子的适应度值,并采用自适应惯性权重更新策略与动态飞行参数更新机制,平衡算法的全局与局部搜索能力。在每次迭代中,通过基于适应度差

异性的领导者选择策略确定全局最优引导方向,并结合动态变异策略维持种群多样性,从而避免陷入局部最优。当达到终止条件后,得到一组非支配解集。

步骤 3 最后利用梯形满意度函数对非支配解进行评价与筛选,选取满意度最高的解集作为综合能源系统的最优调度方案。

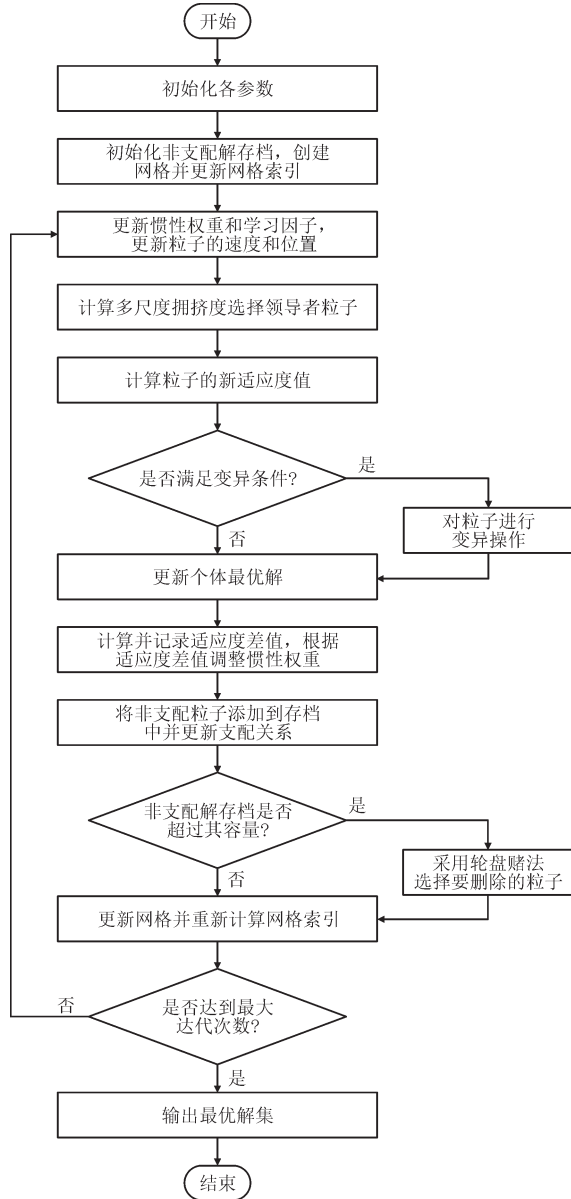


图 2 IMOPSO 算法流程

Fig. 2 Flowchart of IMOPSO algorithm

4 算法测试以及结果分析

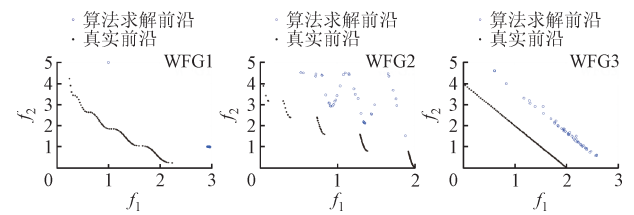
4.1 测试函数

为验证改进策略的有效性,本文选取双目标 WFG 系列测试函数进行性能测试^[23]。该函数具有较高的可

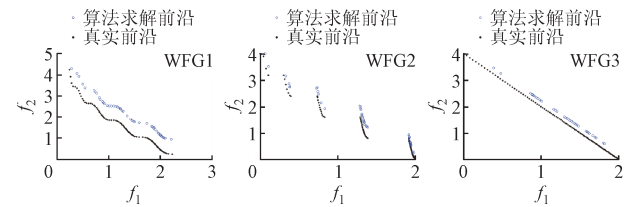
扩展性和复杂性,能够更全面评估算法在处理高维、多峰、多目标问题时的性能。在 WFG 系列测试函数中,决策变量的维度 N 由参数 K 和 L 确定($N = K + L$),通常取 $K = 4, L = 20$ 。因此,本文测试实验设定种群规模为 50,测试函数最大迭代次数为 200,决策变量维度为 24。

4.2 消融实验

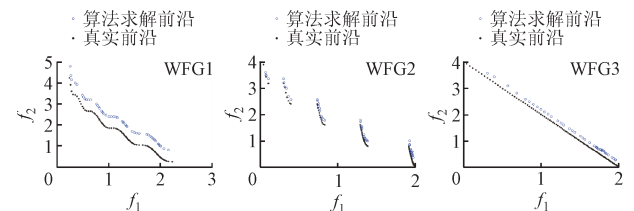
为验证本文提出改进策略的有效性,使用惯性权重更新策略、飞行参数动态更新策略、领导者选择策略和变异策略的算法分别记为 MOPSO-A、MOPSO-B、MOPSO-C 和 MOPSO-D,将其在系列测试函数 WFG1 ~ WFG3 上进行实验,并与传统 MOPSO 算法进行对比。结果如图 3 所示。



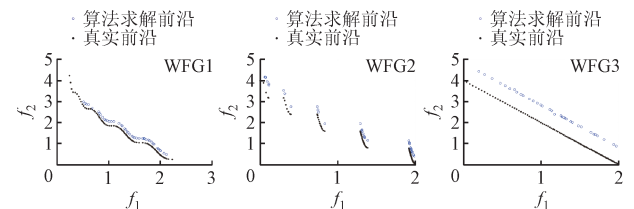
(a) MOPSO



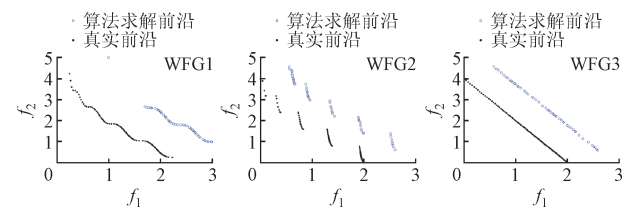
(b) MOPSO-A



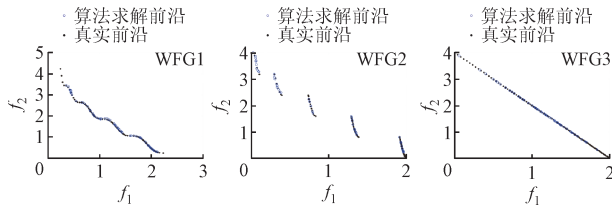
(c) MOPSO-B



(d) MOPSO-C



(e) MOPSO-D



(f) IMOPSO

图3 消融实验结果

Fig. 3 Ablation experiment results

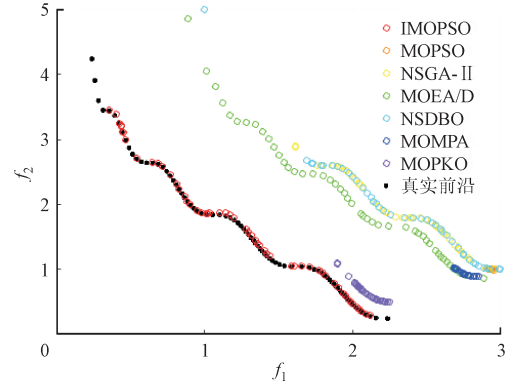
从图3可以看出,在收敛性能方面,传统 MOPSO 算法的前沿收敛程度明显弱于引入改进策略的 MOPSO-A、MOPSO-B、MOPSO-C、MOPSO-D 及 IMOPSO 算法;其中 MOPSO-B 和 MOPSO-C 在收敛性能上效果有所提升,表明所提策略的有效性。从解的分布性与均匀性来看,传统 MOPSO 的非支配解分布较为零散且存在明显空缺,而 MOPSO-A、MOPSO-B、MOPSO-C 不仅保持了良好的分布性,解的均匀性也显著优于传统算法;MOPSO-D 虽略逊色于前三者,但在收敛性能和分布性上都有一定提升。

4.3 算法对比

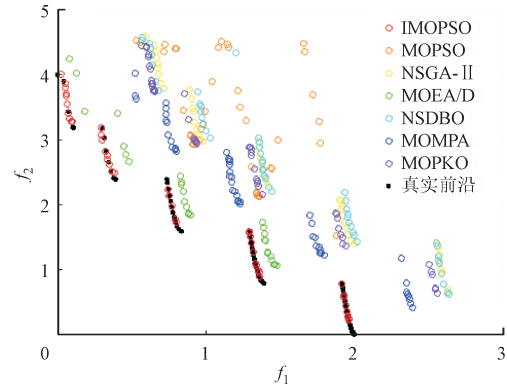
将本文所提 IMOPSO 算法与传统的 MOPSO、NSGA-II、MOEA/D、NSDBO、MOMPA 和 MOPKO 算法进行对比。并采用世代距离(GD)、逆世代距离(IGD)和超体积(HV)^[30]对算法性能进行对比评估。其中,GD表示算法求得的解集与真实前沿的接近程度,值越小算法的收敛性越好;IGD表示真实前沿的点到解集的平均距离,值越小算法的多样性越高;HV表示算法解集与参考点构成的超体积,值越大算法的覆盖范围越广,算法

的分布性越好。

在本文测试实验中,3种评价指标分别让算法独立运行20次,以平均值和标准差进行对比分析。图4为算法在WFG系列测试函数上的前沿图。表1为各种算法分别求解20次后的3种评价指标的平均值和标准差对比。



(a) WFG1 测试函数结果



(b) WFG2 测试函数结果

图4 WFG系列测试函数结果

Fig. 4 WFG test functions results

表1 本文所提算法与对比算法在2种测试函数上的评价指标对比

Table 1 Comparison table of evaluation indicators between the proposed algorithm and comparative algorithms on four test functions

函数	算法	世代距离		逆世代距离		超体积	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
WFG1	IMOPSO	0.000 02	0.000 11	0.001 08	0.000 15	0.724 61	0.002 09
	MOPSO	0.013 71	0.027 14	0.029 11	0.194 37	0.081 63	0.010 47
	NSGA-II	0.001 23	0.002 61	0.003 94	0.022 38	0.096 02	0.002 47
	MOEA/D	0.003 61	0.000 09	0.020 19	0.001 04	0.706 07	0.003 08
	MOPKO	0.001 08	0.018 26	0.001 98	0.018 26	0.176 08	0.186 26
	NSDBO	0.001 45	0.024 31	0.060 81	0.001 03	0.148 44	0.034 61
	MOMPA	0.003 11	0.012 83	0.003 31	0.095 19	0.075 41	0.171 39
	IMOPSO	0.000 04	0.000 02	0.009 80	0.003 74	0.639 96	0.000 26
WFG2	MOPSO	0.098 17	0.001 45	0.139 64	0.236 97	0.039 04	0.001 47
	NSGA-II	0.026 44	0.004 26	0.045 14	0.035 53	0.496 34	0.004 06
	MOEA/D	0.007 07	0.005 04	0.010 62	0.041 46	0.446 07	0.134 02
	MOPKO	0.008 71	0.000 94	0.011 65	0.009 06	0.584 23	0.026 26
	NSDBO	0.027 87	0.004 82	0.061 97	0.103 16	0.681 51	0.000 17
	MOMPA	0.008 13	0.000 84	0.026 48	0.007 76	0.669 23	0.076 13

注:世代距离、逆世代距离、超体积均为无量纲评价指标;黑体数据为最优值。

结合表 1,由图 4 可以看出,本文 IMOPSO 算法在 WFG1、WFG2 测试函数中求得的前沿结果与真实前沿收敛性均最佳,就世代距离和逆世代距离指标而言,IMOPSO 在各测试函数中均取得最小的平均值,说明本文算法在逼近真实 Pareto 前沿方面具有更好的精度和稳定性。这是因为 IMOPSO 算法在粒子更新迭代中考虑了多样性驱动来选择领导者粒子,从而引导粒子向最优解沿靠拢,保证了前沿解的多样性和收敛性。然而,在超体积结果上,虽然 MOEA/D、NSDBO 的分布性略高,但从图中可以看出这 2 个算法均未收敛到真实前沿。

综上,本文提出的 IMOPSO 算法性能在多样性、分布性、收敛性都优于对比算法,体现出改进措施

的有效性。

5 算例分析

5.1 算例参数

为验证 IMOPSO 求解 IIES 在降低经济成本、提升可再生能源出力量的有效性,将 IMOPSO 算法与传统 MOPSO、NSGA-II、MOEA/D、NSDBO、MOMPA 和 MOPKO 分别进行对比实验。算法最大迭代次数均为 100 次,粒子总数均为 100,帕累托最大存档解集数量为 100。系统内部参数以及可再生能源出力设备、能源转换设备和储能设备的装机参数^[24,26-27,31]如表 2、表 3 和表 4 所示。

表 2 系统内部参数
Table 2 System parameters setting

参数	数值	参数	数值
风机切入速度 $v_{in}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2	氢燃料电池电转热系数 η_{HFC}	0.9
风机切出速度 $v_{out}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	10	太阳能集热器集热效率 η_{STC}	0.5
风机额定速度 $v_r/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5	海水淡化设备电转水系数 η_{SD}	0.85
光伏自损率 σ_{PVlos}	0.1	吸收式制冷机热转冷系数 η_{AR}	0.85
太阳能集热器自损率 σ_{STClos}	0.22	海水源热泵供冷季出水均温 $T_c/^\circ\text{C}$	11.2
电解槽电专氢系数 η_{EC}	0.88	海水源热泵供热季出水均温 $T_h/^\circ\text{C}$	43.5

表 3 可再生能源设备参数
Table 3 Renewable energy equipment parameters

设备名称	安装台数上限	安装台数下限	安装成本/(元 $\cdot \text{kW}^{-1}$)	运维成本/(元 $\cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
光伏发电设备	10	1	12 500	0.043 5
风力发电机	12	1	13 225	0.029 6
波浪能发电设备	13	1	14 500	0.087 5
太阳能集热器	15	1	8 630	0.009 6

表 4 能源转换设备及储能设备参数
Table 5 Parameters of energy conversion equipment and energy storage equipment

设备名称	出力/kW	安装成本/(元 $\cdot \text{kW}^{-1}$)	运维成本/(元 $\cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
电解槽	0~150	8 250	0.012 5
海水淡化设备	80~160	6 140	0.009 2
海水源热泵	50~160	7 255	0.018 6
氢燃料电池	0~140	10 500	0.008 5
吸收式制冷机	50~150	1 030	0.002 6
蓄电池	250	8 650	0.024 5
储氢罐	250	8 500	0.019 5
储冷设备	200	6 260	0.018 6
储水设备	180	6 500	0.016 5
储热设备	180	7 200	0.009 2

5.2 海岛综合能源夏季典型日调度结果

图 5 展示了 IMOPSO 与其他 6 种对比算法在 IIES 夏季典型日的帕累托前沿。可以看出,在可再生能源输出与经济成本的平衡上,NSGA-II、MOEA/D 以及 MOPKO 多分布在高经济区,说明其在该任务中难以实现经济与可再生能源输出的良好平衡。从 IMOPSO 的解集分布可以看出,该解集在更低经济成本下可实现更高的可再生能源输出,体现出更好的优化效果。

根据本文给出的最优点选取方法,得到的多种算法在 IIES 夏季典型日的求解结果如表 5 所示。可见,IMOPSO 算法在系统经济成本和可再生能源出力方面表现出色,其系统经济成本为 1 688 732.84 元,可再生能源出力达 17 287 kW,相较于传统 MOPSO 及其他对比算法,能以更低成本实现更高的可再生能源利用,体现出显著的经济与能源效益优势。

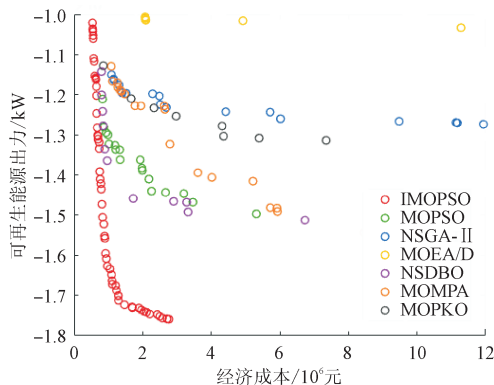


图 5 IIES 夏季典型日帕累托前沿

ig. 5 IIES Pareto front map of typical summer days

表 5 夏季典型日调度结果对比

Table 5 Comparison of scheduling result on typical summer days

算法	系统经济成本/元	可再生能源出力/kW
IMOPSO	1 688 732.84	17 287
MOPSO	2 255 073.61	14 404
NSGA-II	2 688 046.70	12 320
MOEAD	2 089 382.49	10 144
NSDBO	1 719 608.66	14 586
MOMPA	1 948 362.72	12 279
MOPKO	2 325 106.45	12 331

图 6 呈现了 IIES 在夏季典型日的电、热、冷、水和氢的优化调度结果,各子图从不同维度展示了能

源的生产、存储和消耗的动态过程,揭示了 IIES 内部复杂的能源交互关系。

在电平衡图 6(a)中,风机和光伏作为主要的可再生能源发电设备,其出力呈现明显的日间波动特性,在夏季典型日中,白天光照和风力条件较好时,发电功率较高,可以满足海岛电负荷需求,多余电能可用于海水淡化、电解槽制氢等其他环节,或存储于储电设备中。波浪发电功率相对较为平稳。电解槽和海水淡化设备在运行过程中消耗电能,其功率需求与系统的整体电力供应和氢负荷、水负荷需求相协调。

热平衡图 6(b)显示,太阳能集热器在白天日照充足时,能有效收集热量,为系统提供大量热能,其功率输出在日间处于较高水平。储热设备则在热量产生过剩时储存热能,协同氢燃料电池在太阳能集热器产热不足或热负荷需求较高时释放热量,满足海岛热负荷供应。吸收式制冷机在运行过程中消耗一定热量,其功率变化与系统热平衡和冷负荷需求相关联。

在冷平衡图 6(c)中,海水源热泵和吸收式制冷机是主要的制冷设备。海水源热泵夏季产冷,在不同时段为系统提供制冷能力,其功率输出受海水温度和海岛冷负荷需求的双重影响。储冷设备在冷量供应过剩时储存冷量,在冷负荷高峰时释放,起到调节冷量供需的作用。在夏季典型日,海岛冷负荷曲线波动较大,尤其是在午后时段达到峰值,各制冷设备和储冷设备通过动态调整运行功率,确保系统在不同时刻都能有效应对冷负荷需求,实现冷平衡。

水平衡图 6(d)显示,海水淡化设备是淡水的主要生产来源,其功率在 1 d 内保持相对稳定的较高水平,持续为系统提供淡水。储水设备用于调节淡水的供需平衡,在海水淡化产水量大于水负荷时储存淡水,在产水量不足或水负荷高峰时释放储存的淡水。水负荷曲线整体较为平稳,虽有小幅波动,但通过海水淡化设备和储水设备的协同运作,系统能够稳定地满足水需求,维持水平衡。

图 6(e)展示了氢平衡状态。电解槽在可再生能源发电过剩时,利用多余电力将水分解产生氢气,其产氢功率在白天光照和风力充足时段较高。储氢设备用于储存氢气,调节氢气的生产和消耗之间的时间差,平滑氢气的供应曲线。氢燃料电池则消耗氢气发电,在系统电力供应不足时发挥作用。氢负荷需求相对较为稳定,各设备通过动态调整运行状态,实现了氢气的生产、存储和消耗的平衡,保障了氢能源在系统中的稳定应用。

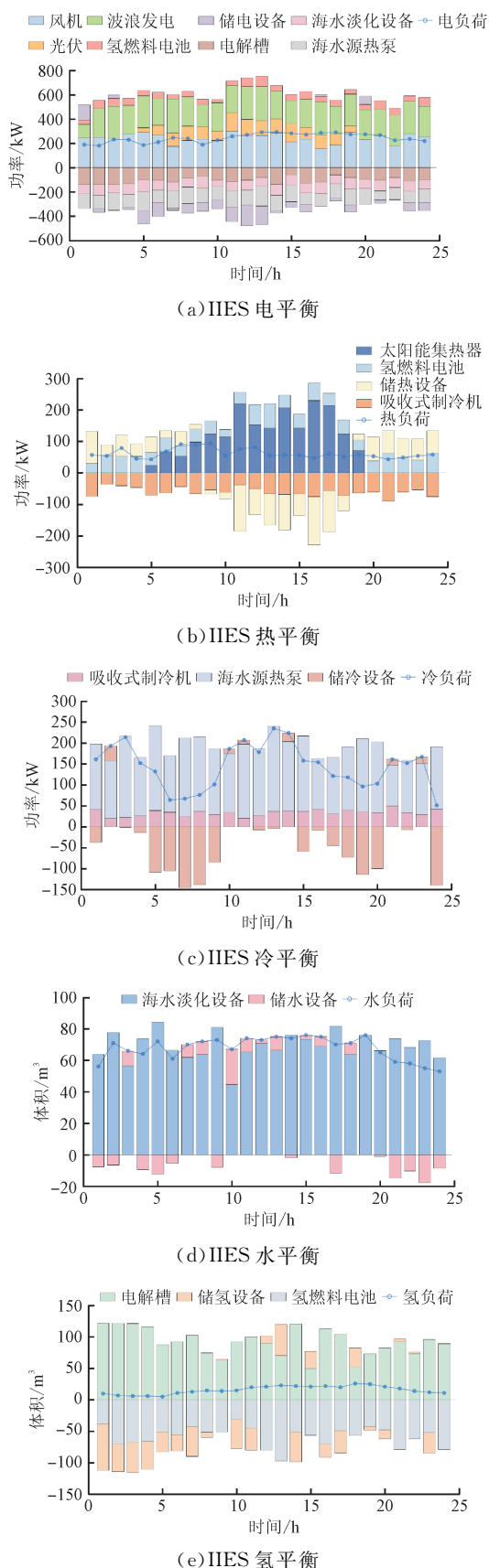


图6 夏季典型日优化调度结果

Fig. 6 Optimization scheduling results for typical summer days

5.3 海岛综合能源冬季典型日调度结果

根据本文给出的最优解选取方法,得到各种算法在 IIES 冬季典型日的求解结果如表 6 所示。在冬季典型日实验场景中,IMOPSO 得到的成本为 2 878 785.28 元,可再生能源出力达到 14 316 kW,相比其他算法在降低系统经济成本和提高可再生能源出力两方面均表现出色,相较于其他对比算法具备明显优势。

表6 冬季典型日调度结果对比

Table 6 Comparison of scheduling result on typical winter days

算法	系统经济成本/元	可再生能源出力/kW
IMOPSO	2 878 785.28	14 316
MOPSO	3 215 506.48	14 091
NSGA-II	3 079 364.59	13 800
MOEAD	3 101 790.32	9 749
NSDBO	3 081 960.12	10 164
MOMPA	3 236 450.71	9 263
MOPKO	3 010 421.24	8 513

6 结 论

为降低海岛综合能源系统运行经济成本,同时提高可再生能源出力,提出一种含电-热-冷-水-氢的海岛综合能源系统优化调度模型,采用改进 MOPSO 算法对模型进行求解,得出如下结论。

(1) 本文提出的海岛综合能源系统包含了光伏发电、风力发电、波浪能发电装置、太阳能集热器、海水源热泵和海水淡化机等,深度契合海岛地理优势,因地制宜构建了满足电-热-冷-水-氢多元负荷需求的一体化供能架构,有效平衡海岛能源供需要求。

(2) 提出了融合自适应惯性权重更新策略、飞行参数动态更新策略、领导者选择策略和变异策略的 IMOPSO 算法,实验结果表明该算法能够有效弥补传统 MOPSO 在局部搜索能力不足、容易陷入局部最优的缺点,提高了算法的搜索能力。

(3) 选用夏季典型日和冬季典型日两种应用场景,以最小化经济成本和最大化可再生处理为目标求解优化调度模型,计算结果表明,在两种应用场景中求解的调度方案均保证在可再生能源出力最大时有效降低系统运行成本。

在未来的研究中,将针对实际海岛能源系统应用中面临的可再生能源出力波动以及需求动态变化情景下模型鲁棒性不足等问题开展研究。基于此,

将进一步考虑将设备配置优化与调度策略协同纳入双层优化框架,通过上层配置规划与下层动态调度的联动机制,提高 IIES 在复杂环境下的适应性。

参考文献:

- [1] 牛明博, 庞涵语, 吕友军, 等. 计及碳捕集和储氢容量协同优化的综合能源系统低碳调度 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(9): 41-52.
NIU Mingbo, PANG Hanyu, LÜ Youjun, et al. Low-carbon scheduling of integrated energy systems considering synergistic optimization of carbon capture and hydrogen storage capacity [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(9): 41-52.
- [2] 李雪, 孙霆锴, 侯恺, 等. 地震灾害下海岛综合能源系统韧性评估方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5476-5492.
LI Xue, SUN Tingkai, HOU Kai, et al. Evaluating resilience of island integrated energy systems with earthquake [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5476-5492.
- [3] 邢晓敏, 杜钧淇, 李贻涛, 等. 海岛低碳综合能源微网优化方案设计 [J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 3-13.
XING Xiaomin, DU Junqi, LI Yitao, et al. Optimization scheme design of island low-carbon integrated energy microgrid [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 3-13.
- [4] ZHAO Guo, LUO Jiawen, SONG Ningfeng, et al. Multi-objective optimal dispatch of island microgrid considering a novel scheduling resource [J]. Electric Power Systems Research, 2025, 241: 111378.
- [5] LI Yang, BU Fanjin, LI Yuanzheng, et al. Optimal scheduling of island integrated energy systems considering multi-uncertainties and hydrothermal simultaneous transmission: a deep reinforcement learning approach [J]. Applied Energy, 2023, 333: 120540.
- [6] TAGHAVIFAR H, BORDIN C, CHEN Hao, et al. Off-grid shore-to-ship power system optimization with a hydrogen-in-loop buffering scheme driven by hydrokinetic wave-wind energy [J]. Renewable Energy, 2026, 256(Part H): 124609.
- [7] 牛耕, 季宇, 陈培坤, 等. 含海洋能发电的海岛微网能量优化调度方法 [J]. 电力建设, 2021, 42(6): 96-104.
NIU Geng, JI Yu, CHEN Peikun, et al. Optimal energy dispatching method for island microgrid with ocean power generation [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 96-104.
- [8] 郭焱, 周森, 韩冰. 考虑氢能利用的港口综合能源系统低碳经济优化调度 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(5): 91-100.
GUO Yi, ZHOU Miao, HAN Bing. Low-carbon economic optimal scheduling of integrated port energy system considering utilization of hydrogen energy [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(5): 91-100.
- [9] LI Xiangguang, DU Yida, TAN Zhongfu, et al. Optimal operation model of electrothermal integrated energy system including hydrogen production from offshore wind power participating in multi-level market [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 114: 250-266.
- [10] 李兴莘, 张靖, 何宇, 等. 基于改进粒子群算法的微电网多目标优化调度 [J]. 电力科学与工程, 2021, 37(3): 1-7.
LI Xingshen, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Multi-objective optimization dispatching of microgrid based on improved particle swarm algorithm [J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(3): 1-7.
- [11] 董敏, 刘可真, 赵庆丽, 等. 基于改进粒子群算法的综合能源系统多目标优化运行 [J]. 电气传动, 2024, 54(2): 41-48.
DONG Min, LIU Kezhen, ZHAO Qingli, et al. Multi-objective optimal operation of integrated energy system based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Drive, 2024, 54(2): 41-48.
- [12] WU Min, DU Pengcheng, JIANG Meihui, et al. An integrated energy system optimization strategy based on particle swarm optimization algorithm [J]. Energy Reports, 2022, 8, Supplement 8: 679-691.
- [13] 胡浩鹏, 葛佳蓓, 魏云冰. 基于改进多目标粒子群算法的电动汽车充电优化策略 [J]. 电气工程学报, 2025, 20(3): 261-270.
HU Haopeng, GE Jiabei, WEI Yunbing. Optimization strategy for electric vehicle charging based on improved multi-objective particle swarm optimization [J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(3): 261-270.
- [14] 邢毓华, 任甜甜. 改进 MOPSO 在微电网优化调度中的应用研究 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(6): 191-200.
XING Yuhua, REN Tiantian. Application research of improved MOPSO in microgrid optimal dispatch [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(6): 191-200.
- [15] WANG Jixuan, WEN Yujing, WU Kegui, et al. Optimization study of wind, solar, hydro and hydrogen storage based on improved multi-objective particle swarm optimization [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 93: 112298.

- [16] XU Xianfeng, WANG Ke, MA Wenhao, et al. Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on multi-strategy improvement for hybrid energy storage optimization configuration [J]. *Renewable Energy*, 2024, 223: 120086.
- [17] COELLO C A, LECHUGA M S. MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization [C]//*Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 1051-1056.
- [18] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [19] ZHANG Qingfu, LI Hui. MOEA/D: a multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2007, 11(6): 712-731.
- [20] 徐先峰, 鲁婉琪, 王俊哲, 等. 基于多目标蜣螂优化算法的泊位分配与能量调度联合优化方法 [J]. *交通信息与安全*, 2024, 42(5): 111-123.
- XU Xianfeng, LU Wanqi, WANG Junzhe, et al. A joint optimization method for berth allocation and energy scheduling based on non-dominated sorting dung beetle optimizer [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2024, 42(5): 111-123.
- [21] ZHONG Keyu, ZHOU Guo, DENG Wu, et al. MOMPA: multi-objective marine predator algorithm [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2021, 385: 114029.
- [22] YI Lingzhi, TAN Jingxuan, WANG Yahui, et al. Multi-objective pied kingfisher optimizer for optimal PV array reconfiguration under partial shading conditions [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 186: 112755.
- [23] HUBAND S, HINGSTON P, BARONE L, et al. A review of multiobjective test problems and a scalable test problem toolkit [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2006, 10(5): 477-506.
- [24] 赵为光, 凌泽昊, 杨莹, 等. 海岛微能源网系统多能互补优化 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(8): 54-61.
- ZHAO Weiguang, LING Zehao, YANG Ying, et al. Multi-energy complementarity and optimization for island micro-energy network system [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(8): 54-61.
- [25] 邵志芳, 赵强, 张玉琼. 独立型微电网源荷协调配置优化 [J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 3935-3946.
- SHAO Zhifang, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong. Source side and load side coordinated configuration optimization for stand-alone micro-grid [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(10): 3935-3946.
- [26] 黎嘉明, 郑雪阳, 艾小猛, 等. 独立海岛微网分布式电源容量优化设计 [J]. *电工技术学报*, 2016, 31(10): 176-184.
- LI Jiaming, ZHENG Xueyang, AI Xiaomeng, et al. Optimal design of capacity of distributed generation in island standalone microgrid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(10): 176-184.
- [27] 王润治, 王瑞琪, 刘继彦, 等. 基于 CNN-Bi-LSTM 功率预测的海岛综合能源系统优化调度 [J]. *全球能源互联网*, 2023, 6(1): 88-100.
- WANG Runzhi, WANG Ruiqi, LIU Jiyan, et al. Optimal dispatch of the island integrated energy system including power prediction based on CNN-Bi-LSTM [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2023, 6(1): 88-100.
- [28] HAN Fengwu, ZENG Jianfeng, LIN Junjie, et al. Multi-stage distributionally robust optimization for hybrid energy storage in regional integrated energy system considering robustness and nonanticipativity [J]. *Energy*, 2023, 277: 127729.
- [29] LI Bin, WANG Honglei, TAN Zhukui. Capacity optimization of hybrid energy storage system for flexible islanded microgrid based on real-time price-based demand response [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 136: 107581.
- [30] LI Miqing, YAO Xin. Quality evaluation of solution sets in multiobjective optimisation: a survey [J]. *ACM Computing Surveys*, 2019, 52(2): 26.
- [31] HAN Fengwu, ZENG Jianfeng, LIN Junjie, et al. A novel two-layer nested optimization method for a zero-carbon island integrated energy system, incorporating tidal current power generation [J]. *Renewable Energy*, 2023, 218: 119381.

(编辑 刘杨 陶晴)