

基于改进霜冰优化算法的混合风-光-波一体化系统阵列优化

杨博¹, 张芮¹, 胡袁炜骥¹, 李鸿彪², 郜登科², 陆海³

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 昆明 650500; 2. 上海科梁信息科技股份有限公司, 上海 201103; 3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217)

摘要: 在国际社会提振气候环境治理的决心与我国“双碳”政策及海洋强国战略的多重驱动下, 可再生能源逐步替代化石燃料成为新型发电资源, 其中波浪能发电由于资源丰富、绿色环保等优点得到了广泛研究。相较于单一波浪能装置发电系统能源利用率低的缺点, 混合风-光-波一体化系统(hybrid wind-solar-wave system, HWSWS)可最大程度地实现多能互补。因此, 提升HWSWS的效率和产量具有深远意义。为充分发挥风、光、波的优势, 提出了一种基于改进霜冰优化算法(improved rime optimization algorithm, IRIME)的HWSWS阵列优化布局策略。通过整合Logistic混沌映射、黄金正弦策略和莱维飞行策略对原始的霜冰优化算法(rime optimization algorithm, RIME)进行改进。为了验证IRIME在优化HWSWS阵列方面的有效性, 分别在5个HWSWS和9个HWSWS的规模下对阵列进行优化。仿真结果表明, 经IRIME优化后的HWSWS的可实现最大功率输出, 相较于RIME、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)和天鹰优化算法(aquila optimizer, AO), 5个HWSWS规模的输出功率分别提高36.2 kW、83.3 kW、27.6 kW和38.0 kW, 9个HWSWS规模的输出功率分别提高45.5 kW、191.2 kW、168.5 kW和66.5 kW, 证明了IRIME的有效性与优越性。

关键词: 改进霜冰优化算法; 波浪能转换器; 漂浮式光伏; 漂浮式风电; 混合风-光-波一体化系统; SimuNPS软件

Array Layout Optimization of Hybrid Wind-Solar-Wave System Based on Improved Rime Optimization Algorithm

YANG Bo¹, ZHANG Rui¹, HU Yuanweiji¹, LI Hongbiao², GAO Dengke², LU Hai³

(1. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Shanghai KeLiang Information Technology Co., Ltd., Shanghai 201103, China; 3. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: With the growing determination of the international community to strengthen climate and environmental governance, and under the multiple drivers of China's 'Double Carbon' policy and marine power strategy, renewable energy is gradually replacing fossil fuels as a new type of power generation resource. Among these, wave energy generation has been extensively studied due to its abundant resources and environmental benefits. Compared to the low energy utilization efficiency of single wave energy generation systems, the hybrid wind-solar-wave system (HWSWS) can maximize multi-energy complementarity. Therefore, improving the efficiency and output of HWSWS is of profound significance. To fully leverage the advantages of wind, solar, and wave energy, this paper proposes an array layout optimization strategy of HWSWS based on the improved rime optimization algorithm (IRIME). By integrating logistic chaotic mapping, golden sine strategy, and Lévy flight strategy, the original rime optimization algorithm (RIME) is improved. To validate the effectiveness of IRIME in optimizing HWSWS arrays, this paper performs optimizations on arrays at the five HWSWS and nine HWSWS scales. The simulation results show that the HWSWS optimized by IRIME achieves the maximum power output. Compared to RIME, particle swarm optimization (PSO), grey wolf optimizer (GWO), and aquila optimizer (AO), the output power of the five HWSWS array increases by 36.2 kW, 83.3 kW, 27.6 kW, and 38.0 kW, respectively. Besides, the output power of the nine HWSWS array increases by 45.5 kW, 191.2 kW, 168.5 kW, and 66.5 kW, respectively, demonstrating the effectiveness and superiority of IRIME.

Key words: improved rime optimization algorithm; wave energy converter; floating photovoltaic; floating wind turbine; hybrid wind-solar-wave system; SimuNPS software

0 引言

由于全球能源短缺和生态环境逐渐恶化,能源转型对可持续发展具有重要意义^[1]。为加快能源转型进程,以风能、太阳能和波浪能为代表的可再生能源在全球范围内得到了深度的开发与研究^[2-4]。据统计,中国海域波浪能密度可达15 kW/m,具有很大的开发利用潜能^[5-6]。我国东部沿海地区海岸线长,风、光、波资源丰富,适合海上漂浮式光伏(floating photovoltaic, FPV)^[7]与海上漂浮式风电(floating wind turbine, FWT)技术的发展。FPV相较于陆地光伏发电系统具有光照利用效率高、发电量大等优点。此外,FWT得益于自身稳定的平均风速、较低的风向改变频率和高质量的风况等优势,已实现大规模的应用与发展^[8-10]。

现有的海上混合发电系统大多仅考虑将波浪能转换器(wave energy converter, WEC)与FPV或FWT结合。文献[11]针对混合风波发电系统考虑共享基础设施和运营成本对混合系统的经济性进行评估,以确定最具成本效益的设备匹配方案。文献[12]将FPV与WEC相结合,组成了混合海上光伏-波浪能系统,以最大功率输出为目标函数,采用启发式算法对系统阵列进行优化布局。文献[13]提出了混合浮动平台的概念,将FWT与WEC相结合,深入探讨了系统之间的协同作用。为最大限度提升混合风波系统、光波系统的输出功率,对WEC阵列合理布局至关重要。文献[14]采取序列二次规划求解器求解5个浮标的布局问题,但该方法无法处理非线性的约束。文献[15]采用传统分析方法进行研究,但随着WEC阵列规模的扩大,其计算量也随之显著增加。随着人工智能的快速发展,元启发式算法因其卓越的全局搜索能力和鲁棒性已在阵列优化领域中得到广泛应用。文献[16]首先采用统计模拟器预测WEC的性能,随后应用主动学习策略进行探索,最终用遗传算法获取WEC最优布局。

文献[17]采用改进的蜜獾算法对WEC阵列进行优化,结果表明经改进蜜獾算法优化后的阵列发电效率显著提升。文献[18]针对混合光波系统采用改进秃鹰优化算法对5个浮标和8个浮标规模的混合系统优化布局,最终改进秃鹰优化算法实现了最大功率输出并具有良好的收敛特性。

综上,虽然上述研究对风波系统、光波系统下WEC的阵列进行了规划,然而并未充分发挥风、光、波在时间与空间上的多能互补。为此,本文基于FPV、FWT和WEC现有结构和能源输出特点^[19]提出混合风-光-波一体化系统(hybrid wind-solar-wave system, HWSWS)。该系统通过FPV、FWT和WEC发电的多能互补提供稳定的能源输出^[20],由于其在同一浮式平台上共享基础设施、维护与管理资源,有效地提升了系统的经济性。此外,针对传统规划方法难以处理非线性约束、分析方法面临计算维度升级以及现有元启发式算法取得广泛应用但仍存在无法实现精准收敛的缺点,本文选用Logistic混沌映射、黄金正弦策略和莱维飞行变异机制对原始霜冰优化算法(rime optimization algorithm, RIME)进行了改进,并采用改进霜冰优化算法(improved rime optimization algorithm, IRIME)对HWSWS进行布局优化。以HWSWS整体的输出功率和效率参数 Q 因子作为评价指标,分别以5个HWSWS和9个HWSWS的中小规模阵列优化设计,并与RIME、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)和天鹰优化算法(aquila optimizer, AO)进行比较分析,证明了IRIME的优越性。

1 混合风-光-波一体化系统模型

HWSWS的结构如图1所示,其中WEC作为主要的供电系统,安置在海平面以下6 m处,而FWT和FPV作为辅助的供电系统,共同安放在浮式平台上,通过系泊点与WEC系统锚定^[21]。

1.1 FWT系统建模

1.1.1 FWT的荷载建模

作用在FWT的总荷载 $F_{FWT,i}$ 主要包括风荷载、波浪荷载和动力输出系统(power take-off, PTO)荷载,如式(1)所示^[22]。

$$F_{FWT,i} = F_{FWT,wind,i} + F_{FWT,wave,i} + F_{FWT,PTO,i} \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62263014); 云南省应用基础研究计划资助项目(202401AT070344); 云南省澜湄国家电力技术国际联合实验室资助项目(202203AP140001)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62263014); Yunnan Provincial Basic Research Program (202401AT070344); Yunnan Lancang-Mekong International Electric Power Technology Joint Laboratory Project (202203AP140001).



图 1 HWSWS 示意图

Fig. 1 Sketch map of HWSWS

式中 $F_{\text{FWT, wind}, i}$ 、 $F_{\text{FWT, wave}, i}$ 、 $F_{\text{FWT, PTO}, i}$ 分别为风、波浪和 PTO 系统对第 i 个 HWSWS 系统中 FWT 的荷载。

1.1.2 FWT 输出功率

本文选用 Vestas-V27-225kW 型号的 FWT，其输出功率如式(2)所示。

$$P(v) = \begin{cases} 0, v \leq v_{\text{in}} \\ P_{\text{e, FWT}} \cdot R(v), v_{\text{in}} \leq v < v_{\text{e}} \\ P_{\text{e, FWT}}, v_{\text{e}} \leq v < v_{\text{out}} \\ 0, v_{\text{out}} \leq v \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P(v)$ 为 FWT 的输出功率； v 为 FWT 的风速； v_{in} 、 v_{e} 和 v_{out} 分别为 FWT 的切入速度、额定速度和切出速度； $P_{\text{e, FWT}}$ 为 FWT 的额定功率； $R(v)$ 为 FWT 功率曲线的理想回归系数。

1.2 FPV 系统建模

1.2.1 FPV 的荷载建模

作用在 FPV 的荷载 $F_{\text{FPV}, i}$ 包括风荷载、波浪荷载和系泊系统负载，如式(3)所示^[23]。

$$F_{\text{FPV}, i} = F_{\text{FPV, wind}, i} + F_{\text{FPV, wave}, i} + F_{\text{FPV, m}, i} \quad (3)$$

式中 $F_{\text{FPV, wind}, i}$ 、 $F_{\text{FPV, wave}, i}$ 、 $F_{\text{FPV, m}, i}$ 分别为风、波浪和系泊系统对第 i 个 HWSWS 系统中 FPV 的荷载。

1.2.2 FPV 输出功率

FPV 系统的输出功率 $P_{\text{FPV}, \Sigma}$ 为^[24]：

$$P_{\text{FPV}, \Sigma} = \sum P_{\text{STC}} \cdot f\left(\frac{G_{\text{AC}}}{G_{\text{STC}}}\right) \cdot \left[1 + \alpha_p \cdot (T_c - T_{\text{STC}})\right] \quad (4)$$

式中： P_{STC} 为 FPV 的额定功率； G_{AC} 、 G_{STC} 分别为入射辐照量和标准测试条件下的辐照量； α_p 为温度系数； T_c 为 FPV 表面温度； T_{STC} 为标准测试条件下的温度，为 25℃； $f(\cdot)$ 为降额比例函数。

1.3 WEC 系统建模

本文所研究的 WEC 为三系 WEC，通过 3 条系绳将水下的球形浮标与 PTO 系统和发电机相连。球形浮标在波浪的作用下波涌、摇摆，产生的动能经

过 PTO 系统和发电机转化为电能。假设 WEC 所在的海域中海水呈现出不可压缩、无粘性和无旋转的特性，忽略 3 条系绳对 WEC 本身的影响时，阵列中第 i 个 WEC 的运动方程在频域中可表示为^[25]：

$$\left[\mathbf{M}_{\Sigma} + \mathbf{A}_{\Sigma}(\omega) \right] j\omega + \mathbf{B}_{\Sigma}(\omega) - \frac{\mathbf{K}_{\text{PTO}, \Sigma}}{\omega} j + \mathbf{B}_{\text{PTO}, \Sigma} \left\{ \hat{\mathbf{x}}_{\Sigma} = \hat{\mathbf{F}}_{\text{exc}, \Sigma} \right. \quad (5)$$

式中： $\hat{\mathbf{F}}_{\text{exc}, \Sigma}$ 为波浪激励力； $\mathbf{M}_{\Sigma}$ 为 WEC 的质量矩阵； ω 为波浪的频率； $\mathbf{A}_{\Sigma}(\omega)$ 和 $\mathbf{B}_{\Sigma}(\omega)$ 分别为流体动力附加质量矩阵和辐射阻尼矩阵； $\mathbf{K}_{\text{PTO}, \Sigma}$ 和 $\mathbf{B}_{\text{PTO}, \Sigma}$ 分别为 PTO 系统的刚度系数矩阵和阻尼系数矩阵； $\hat{\mathbf{x}}_{\Sigma}$ 为 WEC 的加速度矩阵。

由 i 个 HWSWS 系统中 WEC 浮标组成的阵列输出功率 $P_{\text{WEC}, \Sigma}$ 为^[26]：

$$P_{\text{WEC}, \Sigma} = \frac{1}{4} \cdot (\hat{\mathbf{F}}_{\text{exc}, \Sigma}^T \cdot \hat{\mathbf{x}}_{\Sigma}^T \cdot \hat{\mathbf{F}}_{\text{exc}, \Sigma}) - \frac{1}{2} \hat{\mathbf{x}}_{\Sigma}^T \cdot \mathbf{B}_{\text{PTO}, \Sigma} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{\Sigma} \quad (6)$$

式中 $\hat{\mathbf{x}}_{\Sigma}$ 为 WEC 的加速度复振幅矢量矩阵。

1.4 HWSWS 建模

1.4.1 HWSWS 的外部荷载

综合气动-液压-伺服-弹性分析法预测 HWSWS 受力和运动特性，准确模拟出 WEC 在规则波浪的海域中对混合系统的影响。其运动频域方程为：

$$-\omega^2 \cdot [\mathbf{M} + \mathbf{A}(\omega)] \cdot \mathbf{X}(\omega) + j \cdot \omega \cdot \mathbf{C}(\omega) \cdot \mathbf{X}(\omega) + \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}(\omega) = \mathbf{F}(\omega) \quad (7)$$

式中： $\mathbf{M}$ 为 HWSWS 的结构质量矩阵； $\mathbf{A}(\omega)$ 为频率 ω 下的附加质量矩阵； $\mathbf{X}(\omega)$ 为位移矢量； $\mathbf{C}(\omega)$ 、 $\mathbf{R}$ 分别为阻尼系数、恢复系数； $\mathbf{F}(\omega)$ 为频率 ω 下的总外力。

1.4.2 HWSWS 输出功率

HWSWS 的总功率输出 P_{Σ} 包含 WEC 功率输出 $P_{\text{WEC}, \Sigma}$ 、FPV 功率输出 $P_{\text{FPV}, \Sigma}$ 和 FWT 功率输出 $P_{\text{FWT}, \Sigma}$ 3 部分，其表达式为：

$$P_{\Sigma} = P_{\text{WEC}, \Sigma} + P_{\text{FWT}, \Sigma} + P_{\text{FPV}, \Sigma} \quad (8)$$

1.5 FWT 对 FPV 的遮蔽建模

光照情况直接影响着 FPV 乃至 HWSWS 整体的输出功率大小。为增强海上浮台的空间利用率，FPV 通常被安放在 FWT 的周围，而 FWT 塔架和扇叶产生的阴影将投射在 FPV 电池板上。FPV 的实际输出功率包含阴影区输出功率和非阴影区输出功

率, 参考文献[27]的建模方法, 本文将阴影区的输出功率设为正常输出功率的 20 %。特别说明的是, 在实际应用中, 阴影区输出功率受阴影遮挡程度、遮挡范围和组建特性等因素影响, 并不是固定为正常输出功率的 20 %。本文通过计算 24 h 内太阳在不同路径下单个 FPV 上的阴影面积估算 FWT 对 FPV 所造成的阴影而引起功率损失。

1.5.1 FWT 塔架阴影区域

为了计算方便, 本文将 FWT 塔架投射出的阴影区域近似为长、宽均匀的矩形。假设太阳总是在 FWT 的后面, 以塔架为中心建立坐标系, 如图 2(a)所示。

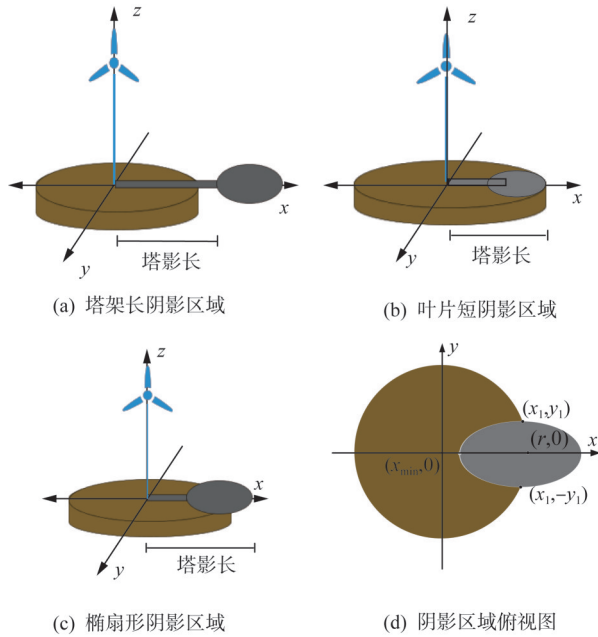


图 2 遮蔽损耗区域

Fig. 2 Shadow loss area

阴影在 x 、 y 轴的投影 L_x 、 L_y 为:

$$\begin{cases} L_x = H \cdot (\cos \alpha \cdot \sin d + \sin c \cdot \cot b \cdot \sin \alpha) \\ L_y = H \cdot (\cos \alpha \cdot \cos d + \cos c \cdot \cot b \cdot \sin \alpha) \end{cases} \quad (9)$$

式中: α 为 FWT 与 FPV 的夹角, $\alpha=90^\circ$; b 、 c 分别为太阳仰角和方位角; H 为 FWT 的高度。

因此, FWT 塔架所投射的阴影区域的面积 S_T 为:

$$S_T = L_x \cdot L_y \quad (10)$$

1.5.2 FWT 扇叶阴影区域

相较于塔架, FWT 的扇叶所投射出的阴影区域近似为椭圆, 如图 2(b)、(c)所示。其面积满足

以下约束:

$$\begin{cases} x_i^2 + y_i^2 = R_{FPV}^2 \\ \frac{(x_i - x_0)^2}{S_x^2} + \frac{y_i^2}{S_y^2} = 1 \\ x_0 = \frac{H}{\tan b} \end{cases} \quad (11)$$

式中: x_i 、 y_i 分别为 FPV 和 FWT 扇叶相交的位置; x_0 为阴影中心在 x 轴方向上的偏移距离; R_{FPV} 为 FPV 半径; S_x 、 S_y 为 FWT 扇叶的位置。

为了便于计算完整的扇叶面积, 假设 S_y 固定为扇叶的直径, S_x 随着太阳高度的变化而变化。

$$\begin{cases} S_x = \frac{R_{WT}}{\tan b} \\ S_y = R_{WT} \end{cases} \quad (12)$$

式中 R_{WT} 为 FWT 扇叶的直径。

当 FWT 的扇叶投射出的椭圆阴影全部落在 FPV 当中, 阴影的面积 S_b 为:

$$S_b = \frac{\pi \cdot S_x \cdot S_y}{4} \quad (13)$$

当只有部分阴影落在 FPV 时, 可采用曲线积分计算阴影面积, 其俯视图如图 2(d)所示。

综上, FWT 对 FPV 所造成的阴影面积 S_Σ 为:

$$S_\Sigma = S_{T,\Sigma} + S_{B,\Sigma} \quad (14)$$

式中 $S_{T,\Sigma}$ 和 $S_{B,\Sigma}$ 分别为 FWT 塔架和风力涡轮机叶片的阴影面积。

1.6 波浪特性

为降低计算成本, 本文选用文献[9]提出的海况的近似模型, 如图 3 所示, 该模型基于文献[7]中收集的实际海域波浪的 50 个样本, 提出了一种频域降阶模型, 仅包括收集频数为 1 F、2 F、3 F、4 F、5 F 和 10 F 的波浪特性。其中, 1 F 近似特性以最小的计算成本可实现较好的精准度, 在保证与 50 个样本模型 80 % 以上的近似率下, 计算成本降低了 98 %。因此, 本文选用该近似模型模拟 HWSWS 所处的海洋环境。

1.7 评价指标

由于单个 HWSWS 的输出功率有限, 需要多个 HWSWS 组成一个阵列的系统。而 HWSWS 受到来自阵列中相邻设备引发的波散射效应和辐射力的作用, 影响 WEC 的能量捕获效率, 导致阵列总发电量相较于单一 HWSWS 的发电量呈现非线性波动特性。因此需要对阵列中各 HWSWS 的位

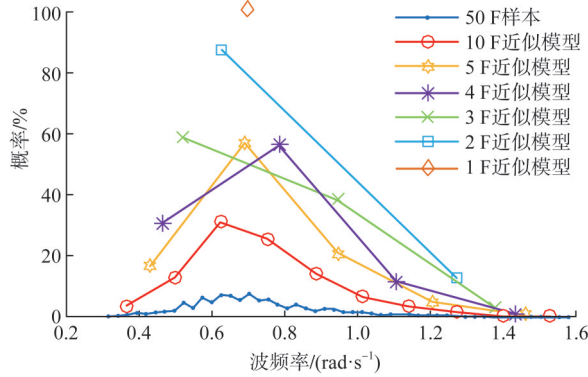


图3 波浪特性近似模型

Fig. 3 Approximate model of wave characteristics

置进行优化布局以提升系统功率输出效率。WEC之间的相互作用通常采用相互作用因子 Q 因子来衡量，即整个混合系统的输出功率与单个HWSWS独立运行所释放功率之比。当 $Q>1$ 时，表明波浪间的相互作用对阵列的能量捕获具有正向的相长干涉效应，系统的组建效果好。当 $Q<1$ 时，表明波浪间的相互作用产生负向的相消干涉效应，对能量捕获不利^[28]。

$$Q = \frac{P_{\Sigma}}{N \cdot P_0} \quad (15)$$

式中： P_0 为独立运行的单个HWSWS发出的功率； N 为HWSWS的数量。

2 霜冰优化算法

RIME通过模拟软霜粒在特定环境中的运动方式探索和优化问题的解空间。RIME的运动机制主要为以下4个阶段：群集和参数初始化阶段、软霜粒凝结阶段、硬霜冰穿刺阶段、正贪婪选择机制阶段^[29]。IRIME主要是在原始RIME的基础上引入了Logistic混沌映射、黄金正弦策略和莱维飞行策略，从而增强算法的收敛性和优化精度。改进措施如下。

2.1 引入Logistic混沌映射对初始化阶段改进

在传统RIME种群初始化阶段，霜粒位置是随机生成的，可能会导致算法陷入局部最优。Logistic混沌映射具有较强的遍历性，提高霜粒群体分布的均衡性，改善了群体的搜索能力，克服了陷入局部最优解、搜索精度降低等缺点^[30]。其数学表达式如式(16)所示。

$$x_{n+1} = \mu \cdot x_n \cdot (1 - x_n) \quad (16)$$

式中： x_n 为当前第 n 个个体的位置； $\mu \in [0, 4]$ ，为映射系统的混沌系数。

2.2 引入黄金正弦策略

传统的RIME容易陷入局部最优解，本文采用黄金正弦策略改进霜粒位置，利用正弦函数进行迭代寻优，提升算法的全局搜索能力^[31]。同时在位置更新过程中引入黄金分割系数减少解的空间，提升搜索最优解的效率，实现全局搜索和局部开发的平衡。第 m 个个体在第 t 次迭代中在 d 维解空间的位置为： $\mathbf{x}_m^t = (X_{m1}, X_{m2}, \dots, X_{md})$ ，个体 m 的最优位置为： $\mathbf{P}_m^t = (P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{md})$ 位置更新公式如式(17)所示。

$$x_n^{t+1} = x_n^t \cdot |\sin R_1| + R_2 \cdot \sin R_1 \cdot |x_1 \cdot P_n^t - x_2 \cdot x_n^t| \quad (17)$$

式中： x_n^t 为第 t 次迭代时第 n 个个体的位置； R_1 为决定 $t+1$ 次迭代中霜粒移动距离的随机数； R_2 为决定 $t+1$ 次迭代中霜粒移动方向的随机数； P_n^t 为第 t 次迭代第 n 个个体的最优个体位置； x_1 和 x_2 为黄金系数。

2.3 引入莱维飞行变异机制

莱维飞行的长期短距离游走可提升种群的多样性，结合偶尔的长距离跳跃可提升种群对附件区域的搜索精度，使得算法能够快速跳出局部最优解，进一步扩大算法的搜索范围，提高种群的寻优能力^[32]。改进公式设计如式(18)——(19)所示。

$$x_n^{t+1} = x_{n, \text{best}}(t) + \text{Levy}(d) \cdot [x_{\text{best}}(t) - x_n^t] \quad (18)$$

$$\text{Levy}(d) = 0.01 \frac{r_1 \cdot \sigma}{|r_2|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (19)$$

式中： $x_{n, \text{best}}(t)$ 为第 n 个个体在 t 次迭代的历史最优位置； $\text{Levy}(d)$ 为莱维飞行步长因子； d 为问题的维度； $x_{\text{best}}(t)$ 为当前种群在第 t 代的全局最优位置； r_1 、 r_2 均为(0, 1)区间的随机数； σ 为步长调整系数； β 为莱维分布参数。

3 基于改进霜冰优化算法的混合风-光-波一体化系统阵列优化设计

3.1 目标函数

本文采用IRIME对HWSWS系统进行优化，基于所提出的目标函数优化在规定海域范围每个HWSWS的位置。目标函数表达如下。

$$\begin{cases} \max F = Q(q_1, q_2, \dots, q_i) \\ Q = \frac{P_{\Sigma}}{N \cdot P_0} \\ P_{\Sigma} = P_{WEC, \Sigma} + P_{FWT, \Sigma} + P_{FPV, \Sigma} \end{cases} \quad (20)$$

式中: F 为目标函数; $Q(\cdot)$ 为所有 HWSWS 系统中 WEC 的 Q 因子的集合; q_i 为第 i 个 HWSWS 系统中 WEC 的 Q 因子值。

3.2 约束条件

为满足 FWT、FPV、WEC 之间的安全距离符合实际工程中设备安装的要求,合理布置 HWSWS 至关重要。根据文献[7],WEC 之间的安全距离至少 10 倍的浮标半径,本文采用的三系绳 WEC,其半径为 5 m,故 WEC 系统之间的安全距离至少为 50 m。FWT 之间的安全距离至少为扇叶直径的 1.5~2 倍,FPV 之间的安全距离至少为转子直径 (27 m),HWSWS 之间的安全距离至少为 60 m。为保证每个 HWSWS 均坐落在特定的海域,HWSWS 的优化符合以下约束。

$$\begin{cases} x_i \in (0, x_{\max}), i = 1, 2, \dots, N \\ y_i \in (0, y_{\max}), i = 1, 2, \dots, N \\ d_{\text{safe}} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq 60, i \neq j \end{cases} \quad (21)$$

式中: $x_{\max}$ 和 $y_{\max}$ 分别为该海域横、纵方向上的最大值; d_{safe} 为 HWSWS 之间的安全距离。

3.3 基于 IRIME 的 HWSWS 阵列优化框架

基于 IRIME 的 HWSWS 阵列优化总体框架如图 4 所示。

4 算例分析

为验证 IRIME 在优化 HWSWS 阵列布局的有效性,本文以 RIME、GWO、AO 和 PSO4 种算法为对比算法,分别对海域范围为 500 m×500 m 和 900 m×900 m 的两个不同规模的阵列 (5 个 HWSWS、9 个 HWSWS) 进行优化。海洋的条件统一模拟为:选用 1F 规则波作为模拟海浪条件,入射角为 0°,海浪的波动方向为从左至右,浪高为 2.0 m,波频为 0.7 rad/s,平均风速为 9 m/s。由于本文是对 HWSWS 系统进行离线优化,时间成本不作为重点衡量指标,考虑到实验的公平性,所有的算法均独立运行 10 次,种群规模大小均为 60,迭代次数均为 400 次。

4.1 消融实验

为验证 IRIME 各改进策略的合理性和有效性,

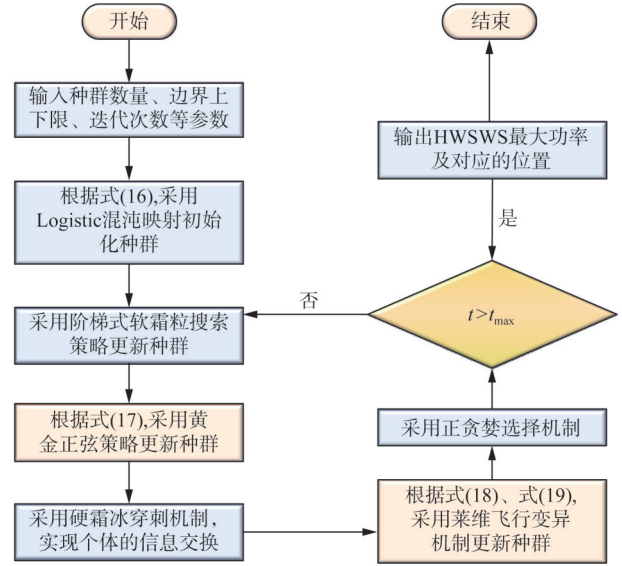


图4 IRIME 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of IRIME algorithm

本文设计消融实验,通过对比 IRIME、RIME 与单独去掉某个策略后的算法在 5 个 HWSWS 阵列和 9 个 HWSWS 阵列中优化效果,分析各改进策略对算法优化效果的贡献度,明确 RIME 的核心缺陷与改进策略的对应关系。消融实验设计如表 1 所示。

表 1 改进算法的消融实验设计

Tab. 1 Design of ablation experiments with improved algorithm

算法	Logistic 混沌映射	黄金正弦策略	莱维飞行变异机制
IRIME	√	√	√
RIME	—	—	—
LOG-LEVY-RIME	√	—	√
LOG-GS-RIME	√	√	—
GS-LEVY-RIME	—	√	√

注:“√”表示加入了对应的改进策略,“—”表示未加入对应的改进策略。

消融实验结果如图 5 所示,本消融实验将 RIME 作为对照组实验,分析图 5(a)和图 5(c)中可知 RIME 优化 Q 因子曲线收敛速度较慢,分别在第 388 次和第 385 次迭代后完成收敛。说明 RIME 收敛速度慢。从图 5(b)和图 5(d)中可以看出 RIME 的优化效果较差,且输出功率的集中性差,表明 RIME 搜索过程中难以跳出局部最优解,优化精度低。

在 GS-LEVY-RIME 中, Q 因子收敛曲线前期 (0—50 次迭代) 波动较大,证明 Logistic 混沌映射

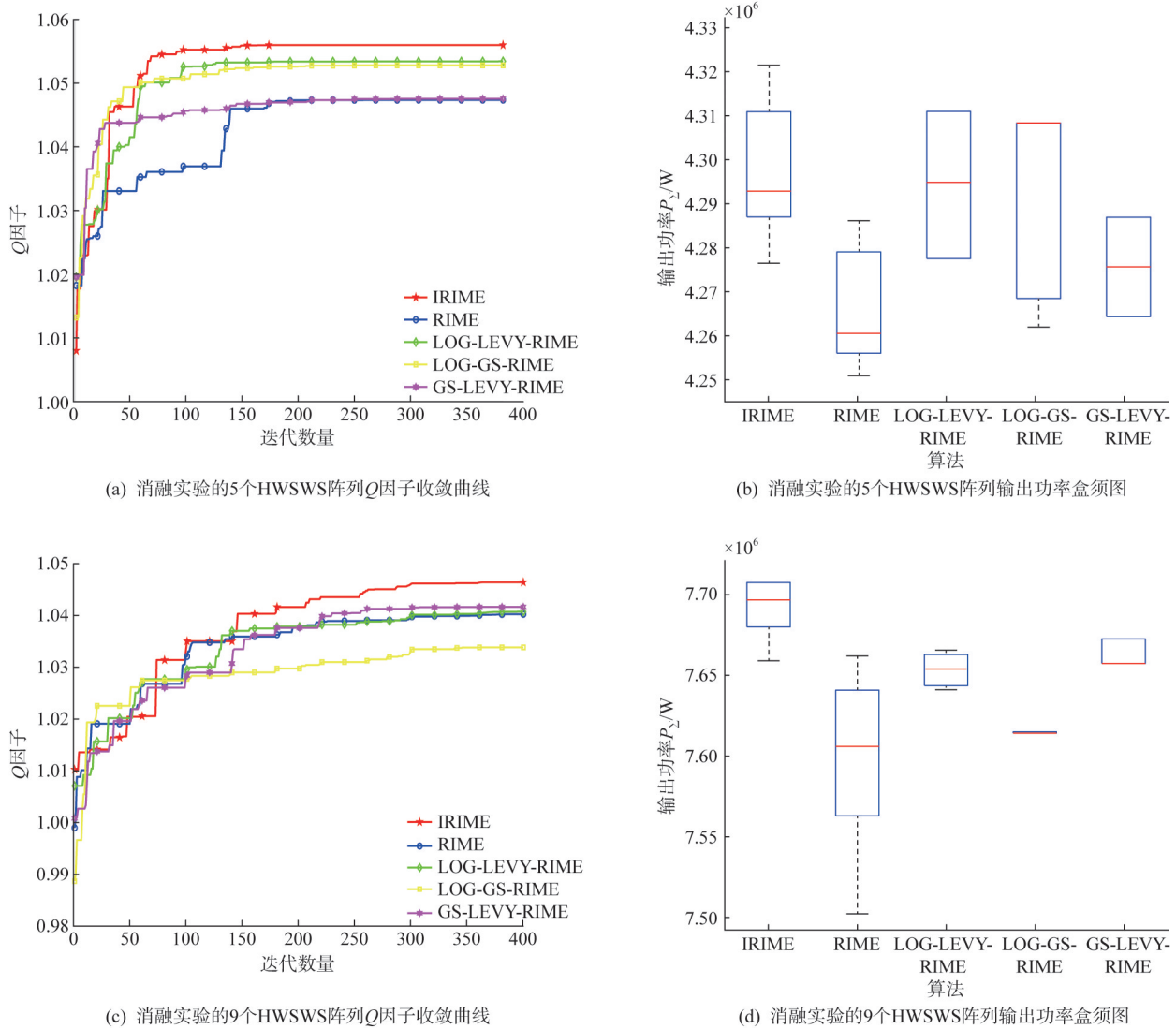


图5 改进算法消融实验结果

Fig. 5 Results of ablation experiments with improved algorithm

可有效均衡种群初始化的分布。在 LOG-LEVY-RIME 中, Q 因子收敛曲线后期提升缓慢, 盒须图中位数较高, 但输出功率集中性较差, 说明算法在局部最优解附近震荡, 未能收敛至更优解, 证明黄金正弦策略在加速收敛和提升局部开发能力方面的优越性。在 LOG-GS-RIME 中, Q 因子收敛曲线后期趋于停滞, 表明算法陷入局部最优。随着阵列规模的扩大, LOG-GS-RIME 的输出功率也更加集中, 但输出功率较低, 反映其全局搜索能力弱。IRIME 同时整合了 3 种改进策略, 相较于其他 3 种改进策略, 在 5 个阵列规模和 9 个阵列规模中的 Q 因子分别提升了 0.25 %、0.31 %、0.81 % 与 0.55 %、1.22 %、0.45 %。由此证明了 IRIME

的合理性与有效性。

4.2 小规模 5 个 HWSWS 阵列优化

如图 6 所示, 从 Q 因子输出曲线的最终结果可以看出, IRIME 的 Q 因子为 1.056 1, 比 RIME 的 Q 因子 1.047 4 提高了 0.83 %, 表明引入 Logistic 混沌映射、黄金正弦策略、莱维飞行变异机制对原始 RIME 的全局优化能力有所提升。相较于 PSO、GWO 和 AO, IRIME 的 Q 因子分别提升了 1.90 %、0.65 % 和 0.88 %。此外, 所有算法的 Q 因子均大于 1, 表明经阵列位置优化后, 系统的输出功率得到提升。通过图 7 的盒须图可以看出, PSO 优化后的 HWSWS 输出功率更集中, GWO 的输出功率更分散。

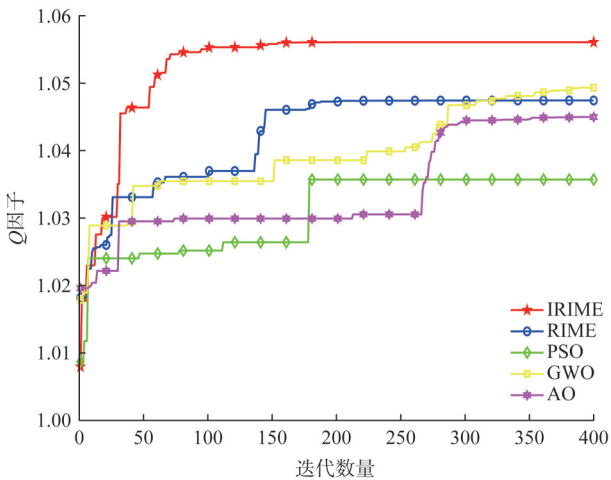


图 6 各算法优化 5 个 HWSWS 阵列 Q 因子收敛曲线

Fig. 6 Q -factor convergence curves of five HWSWS arrays optimized by various algorithms

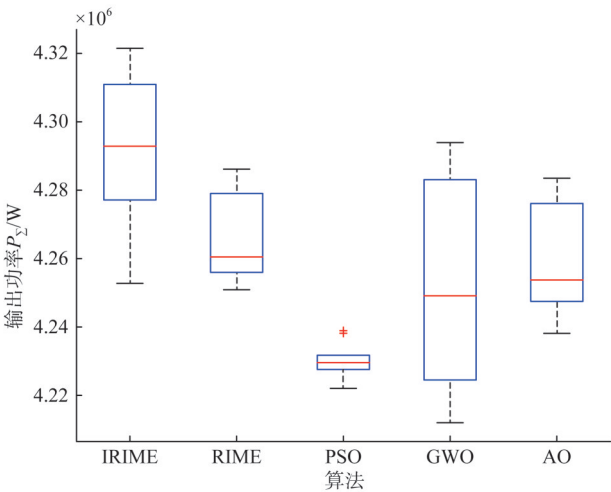


图 7 各算法优化 5 个 HWSWS 阵列所得盒须图

Fig. 7 Box-and-whisker chart of five HWSWS arrays optimized by various algorithms

表 2 给出了 5 种算法分别运行 10 次(每次迭代 400 次)结果中最优的结果, 分析表 2 可以得出: 经 IRIME 优化后的 HWSWS 阵列输出功率最高, 为 4.321 5 MW。其次依次是 GWO、RIME、AO、PSO。调用 MATLAB 的 Kruskal-Wallis 函数, 经过方差分析后, 检验值 p 值为 2.912×10^{-5} , 远远小于显著性水平 0.05, 具有显著的差异性。此外, 图 8 直观地描述出 HWSWS 最优输出功率和对应布局位置的关系, 展现出不同算法在 HWSWS 优化布局上的位置差异。

4.3 中等规模 9 个 HWSWS 阵列优化

表 3 为 5 种算法在 900 m×900 m 海域内对配置

表 2 各算法优化后的 5 个 HWSWS 阵列仿真结果

Tab. 2 Simulation results of five HWSWS arrays optimized by various algorithms

算法	编号	横向坐标 X/m	纵向坐标 Y/m	P/kW	P_{Σ}/MW	Q 因子
IRIME	1	126	180	884.71	4.321 5	1.056 1
	2	435	168	824.88		
	3	308	351	862.31		
	4	247	495	878.27		
	5	306	0	871.33		
RIME	1	355	181	822.57	4.285 3	1.047 4
	2	191	489	861.78		
	3	180	157	866.95		
	4	232	31	872.68		
	5	302	313	862.16		
PSO	1	213	407	763.48	4.238 2	1.035 7
	2	222	217	812.19		
	3	38	196	805.75		
	4	356	480	819.31		
	5	416	250	832.13		
GWO	1	24	139	953.57	4.293 9	1.049 3
	2	334	380	825.31		
	3	143	303	787.07		
	4	86	16	865.26		
	5	274	500	862.71		
AO	1	303	483	893.60	4.283 5	1.044 9
	2	425	319	818.72		
	3	429	18	865.34		
	4	241	359	872.19		
	5	492	151	826.26		

9 个 HWSWS 的阵列优化的结果。可以看出 IRIME 的 Q 因子值最高, 为 1.046 4, 相较于 RIME、PSO、GWO 和 AO 分别提高了 0.60 %、2.50 %、2.24 %和 0.87 %。9 个 HWSWS 阵列的 Q 因子提升幅度略高于 5 个 HWSWS 阵列的提升水平, 但 Q 因子数值下降, 表明随着 HWSWS 阵列规模的扩大对 HWSWS 阵列优化布局的难度与复杂度也随之增加。经 5 个算法优化后的 Q 因子均大于 1, 说明 9 个 HWSWS 阵列可通过优化布局发挥浮标间的积极作用。此外, IRIME 优化后的输出功率最高, 为 7.707 5 MW, 比 RIME、PSO、GWO 和 AO 分别提高了 45.5 kW、191.2 kW、168.5 kW 和 66.5 kW。Kruskal-Wallis 函数得出 9 个 HWSWS 阵列中

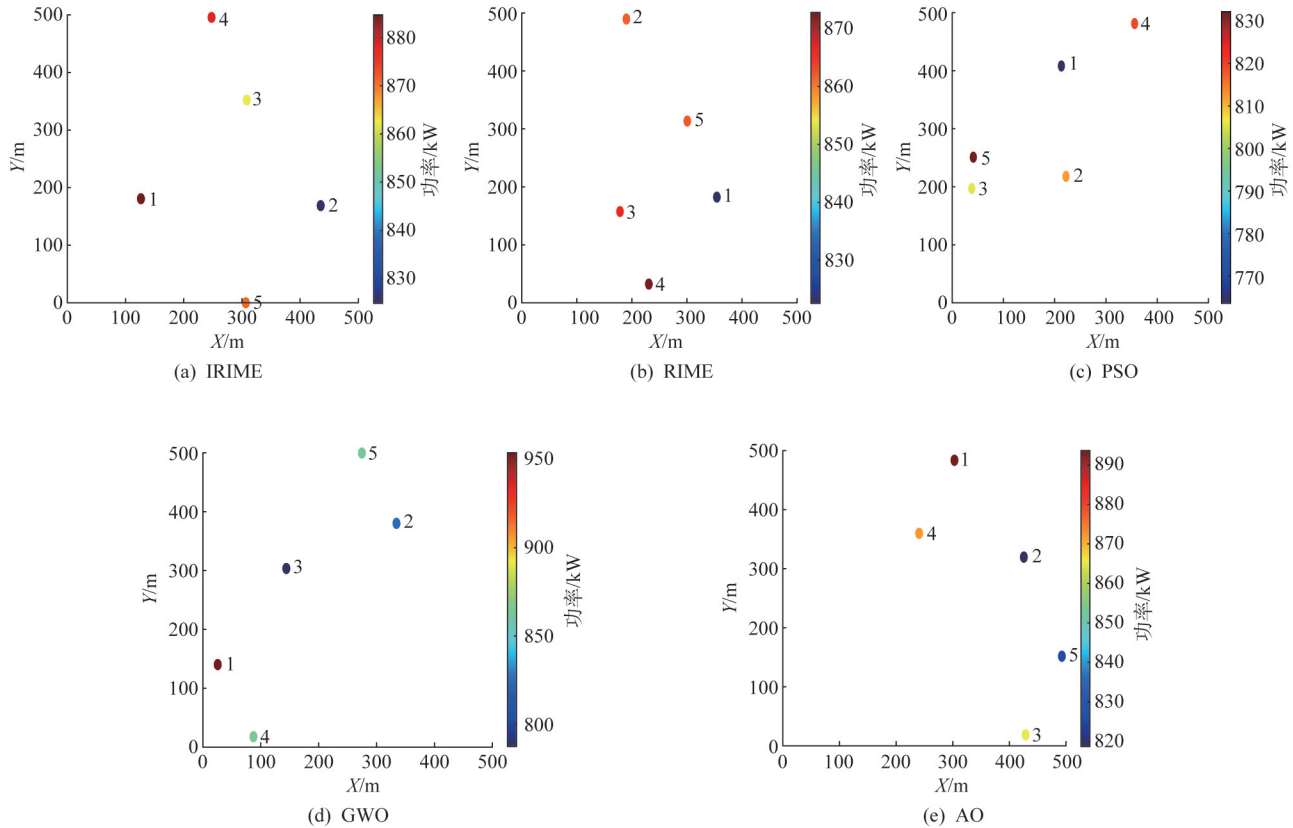


图 8 不同算法优化后的 5 个 HWSWS 阵列最优布局

Fig. 8 Best-layouts of five HWSWS array optimized by various algorithms

检验值 p 值为 3.446×10^{-8} , 证明了 IRIME 在提升功率输出方面显著的差异, 且随着阵列规模的扩大差异逐渐明显。

各算法优化 9 个 HWSWS 阵列 Q 因子收敛曲线如图 9 所示。IRIME 在进行 367 次迭代后收敛, PSO 的收敛效果最好, 仅经过 29 次迭代便收敛, 但其优化效果较差。5 种算法 10 次运行后得出的盒须图如图 10 所示, 其中 IRIME 的输出功率范围在 7.659 MW~7.707 MW 之间, 中位数为 7.696 MW。RIME 的功率输出最为分散, 其范围为 7.502 MW~7.671 MW, 中位数为 7.605 MW, 证明了 IRIME 的有效性。最后, 图 11 描述出在 5 种算法优化下 HWSWS 最优输出功率和对应布局位置。

5 结论

本文针对 HWSWS 阵列的优化布局展开研究, 相较于单独的 WEC 组成的阵列, 该系统有效地提升了阵列的功效。本文利用 IRIME 选择出 HWSWS 阵列的最优布局, 能最大程度地提升系统的功率输

出, 本文的主要成果总结如下。

1) 经 5 种算法优化后的 5 个 HWSWS 和 9 个 HWSWS 的效率参数 Q 因子均大于 1, IRIME 的 Q 因子分别达到了 1.056 1 和 1.046 4, 表明经阵列位置优化后 HWSWS 的输出功率得到提升, HWSWS 中的 WEC 功率输出效果优于单独 WEC 组成的阵列功率输出效果。

2) 引入 Logistic 混沌映射、黄金正弦策略和莱维飞行策略改进原始的 RIME, 全面提升 IRIME 的优化能力。利用 IRIME 对两个不同规模的阵列进行了布局优化。结果表明, 在两个不同规模中, IRIME 在搜寻最优解方面表现最佳。在 5 个 HWSWS 规模下, IRIME 优化后的 Q 因子比 RIME、PSO、GWO 和 AO 分别提升了 0.83 %、1.90 %、0.65 % 和 0.88 %。在 9 个 HWSWS 规模下, IRIME 优化后的 Q 因子比 RIME、PSO、GWO 和 AO 分别提升了 0.60 %、2.50 %、2.24 % 和 0.87 %。

未来的研究可能集中在以下 3 个方面。

表 3 各算法优化后的 9 个 HWSWS 阵列仿真结果

Tab. 3 Simulation results of nine HWSWS arrays optimized by various algorithms

算法	编号	横向坐标 X/m	纵向坐标 Y/m	P_i/kW	P_{Σ}/MW	Q 因子
RIME	1	710	39	875.62	7.662 0	1.040 2
	2	582	812	880.91		
	3	893	219	827.46		
	4	333	608	874.92		
	5	835	597	839.79		
	6	11	803	801.21		
	7	706	387	857.85		
	8	585	224	896.51		
	9	204	50	807.76		
PSO	1	888	809	819.32	7.516 3	1.020 5
	2	155	800	684.87		
	3	615	351	739.57		
	4	252	752	814.54		
	5	363	432	734.91		
	6	59	825	682.74		
	7	280	849	796.04		
	8	352	269	737.46		
	9	669	410	822.89		
GWO	1	361	497	847.14	7.539	1.023 5
	2	467	368	790.57		
	3	624	691	858.92		
	4	878	479	818.95		
	5	443	23	826.31		
	6	324	810	842.44		
	7	750	1	820.62		
	8	444	238	906.50		
	9	338	900	827.69		
AO	1	795	4	863.34	7.641	1.037 4
	2	783	860	842.80		
	3	560	197	860.83		
	4	736	385	806.40		
	5	774	682	844.90		
	6	849	138	822.50		
	7	477	596	895.28		
	8	777	782	867.67		
	9	475	410	837.11		

1) 本文仅考虑了中、小规模 HWSWS 阵列优化, 在未来的研究中可以扩大阵列的规模, 同时深入考虑浮式平台结构强度以及系泊系统成本的约束, 以探讨工程实践的可行性。

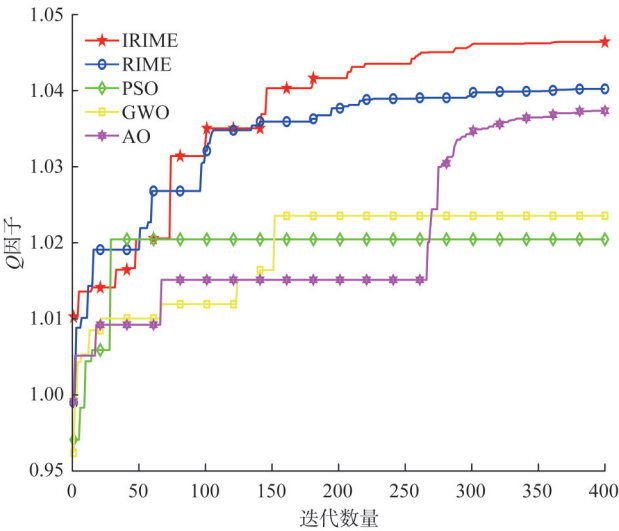


图 9 各算法优化 9 个 HWSWS 阵列 Q 因子收敛曲线

Fig. 9 Q -factor convergence curves of nine HWSWS arrays optimized by various algorithms

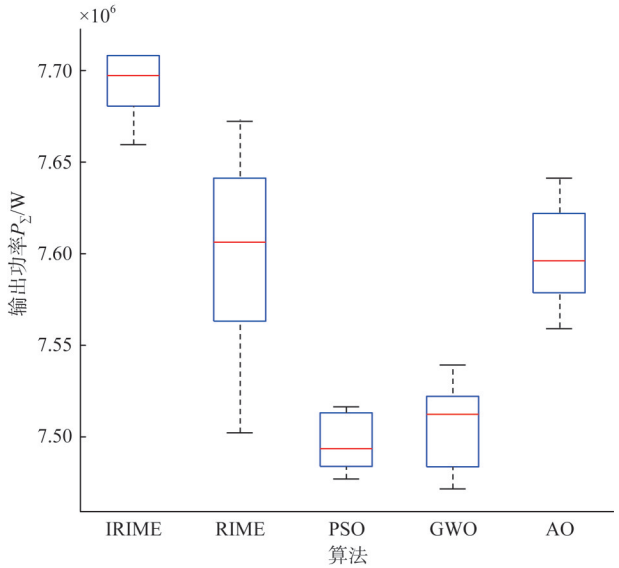


图 10 各算法优化 9 个 HWSWS 阵列所得盒须图

Fig. 10 Box-and-whisker chart of nine HWSWS arrays optimized by various algorithms

2) 本文未考虑 HWSWS 系统中 FWT、FPV 和 WEC 之间的强耦合关系。未来的研究工作将进一步考虑系统中的 3 个主要组成部分之间的物理关联性和协同作用, 同时考虑随机的海浪、风速、光照条件可能造成 HWSWS 输出功率的降低。因此, 未来的研究应针对更为真实、随机的海域条件。

3) 未来的研究可考虑将 HWSWS 与沿海城市的负荷相结合, 以增强 HWSWS 在现实环境的适用性。

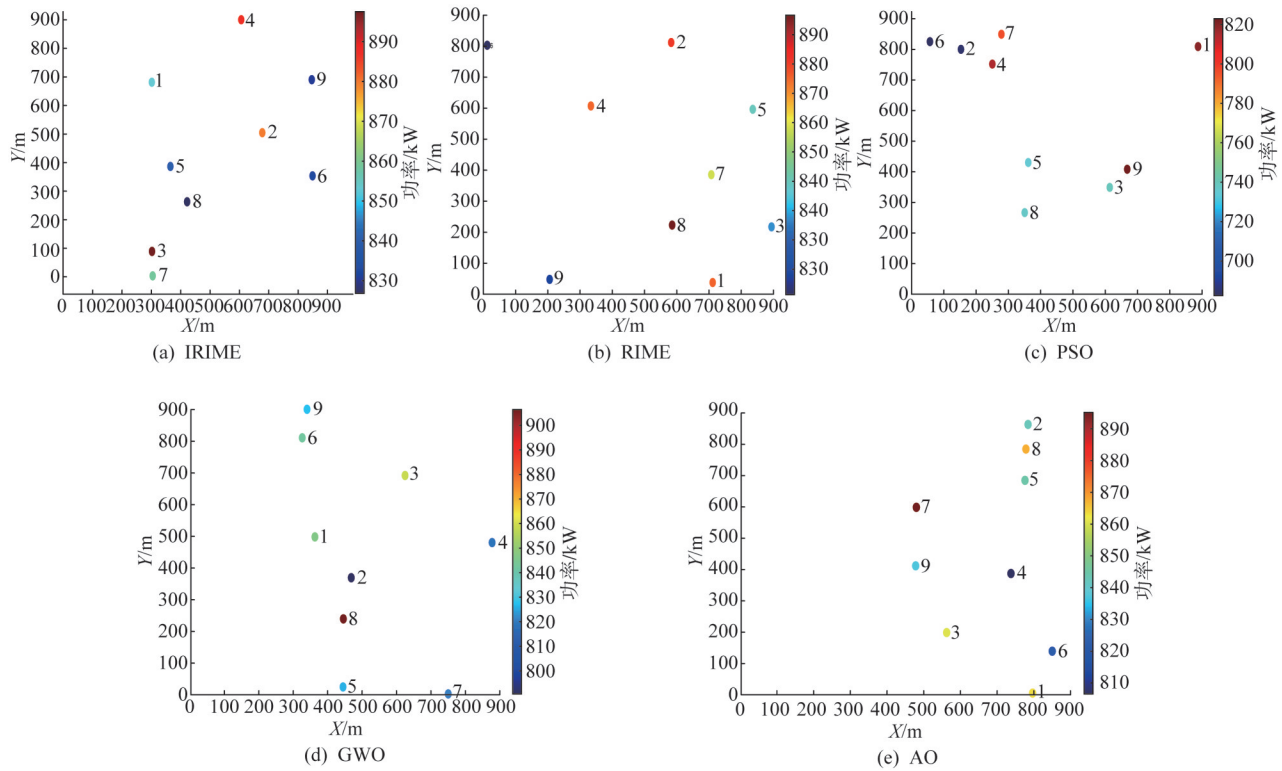


图 11 不同算法优化后的9个HWSWS阵列最优布局

Fig. 11 Best-layouts of nine HWSWS array optimized by various algorithms

参考文献

- [1] 张明华, 李佳禧, 刘玉玲, 等. 海上风电大直径单桩基础随机冰荷载计算方法研究[J/OL]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2024; 1-10. <https://doi.org/10.16112/j.cnki.53-1223/n.2025.02.551>.
ZHANG Minghua, LI Jiaxi, LIU Yuling, et al. The calculation method of random ice load for large-diameter monopile foundations of offshore wind power [J/OL]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2024; 1-10. <https://doi.org/10.16112/j.cnki.53-1223/n.2025.02.551>.
- [2] 林泽川, 黄宣睿, 肖曦, 等. 阵列式直驱波浪发电系统集中式模型预测控制方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(22): 191-198.
LIN Zechuan, HUANG Xuanrui, XIAO Xi, et al. Centralized model predictive control method for arrays of direct-drive wave energy converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(22): 191-198.
- [3] YANG B, DUAN J H, CHEN Y X, et al. A critical survey of power take-off systems based wave energy converters: summaries, advances, and perspectives [J]. Ocean Engineering, 2024(298): 117149.1-117149.35.
- [4] 寇凌峰, 季宇, 曲雪原, 等. 含海洋能发电的海岛微网源荷储容量优化配置研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 135-145.
KOU Lingfeng, JI Yu, QU Xueyuan, et al. Research on optimal capacity configuration of source, load and storage for island microgrid containing marine energy generation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5): 135-145.
- [5] 谭爱国, 何志恒, 王传启, 等. 远海岛群可再生能源消纳装置定容研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 1-10.
TAN Aiguo, HE Zhiheng, WANG Chuanqi, et al. Research on capacity configuration of renewable energy dissipation device for pelagic clustering islands [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 1-10.
- [6] 陈佳, 兰飞, 郭昊, 等. 波浪能发电控制技术研究综述[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 124-136.
CHEN Jia, LAN Fei, GUO Hao, et al. Review on wave energy power generation control technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6): 124-136.
- [7] WU J, SHEKH S, SERGIENKO N Y, et al. Fast and effective optimisation of arrays of submerged wave energy converters [C]// Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference 2016, Jul 20-24, 2016, Denver, USA. New York: ACM, 2016: 1045-1052.
- [8] 李韬, 赵海宇, 周泓宇, 等. 远海岛屿海上风电经柔性直流并网系统单极接地故障下的容错运行策略[J/OL]. 南方电网技术, 2024; 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.tk.20240711.1718.006.html>.
LI Tao, ZHAO Haiyu, ZHOU Hongyu, et al. Fault-tolerant operation strategy for remote island offshore wind power grid-connected system via MMC-HVDC under unipolar grounding faults [J/OL]. Southern Power System Technology, 2024; 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.tk.20240711.1718.006.html>.
- [9] OLIVEIRA S, ROSA P, TAVEIRA F. Assessment of the

- potential of combining wave and solar energy resources to power supply worldwide offshore oil and gas platforms [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020(223): 113299.1 – 113299.17.
- [10] 马向辉, 张梓铭, 吴有, 等. 2GW海上风电对称单极与对称双极柔直送出方案技术经济性对比[J]. *南方电网技术*, 2024, 18(2): 30 – 38.
- MA Xianghui, ZHANG Ziming, WU Mao, et al. Technical and economical comparisons of 2 GW offshore wind power transmission schemes by symmetrical monopole and symmetrical bipolar VSC-HVDC [J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(2): 30 – 38.
- [11] RÖNNKÖ J, KHOSRAVI A, SYRI S. Tech-no-economic assessment of a hybrid offshore wind – wave farm: case study in Norway[J]. *Energies*, 2023, 16(11): 4316.1– 4316.17.
- [12] YANG B, DUAN J H, LI M W, et al. Optimal placement of hybrid solar-wind-wave systems for maximum energy harvesting via chaotic artificial rabbits algorithm[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024(322): 119143.1– 119143.19.
- [13] YANG B, LI M W, QIN R S, et al. Extracted power optimization of hybrid wind-wave energy converters array layout via enhanced snake optimizer[J]. *Energy*, 2024(293): 130529.1– 130529.17.
- [14] FITZGERALD C, THOMAS G. A preliminary study on the optimal formation of an array of wave power devices[C]// The 7th European Wave and Tidal Energy Conference, September 12, 2007, Porto, Portugal. Southampton: International Marine Energy Journal 2007:11 – 14.
- [15] JUSTIN M, GARETH T. Optimisation of wave-power arrays without prescribed geometry over incident wave angle [J]. *International Marine Energy Journal*, 2021, 4(1): 1 – 10.
- [16] SARKAR D, CONTAL E, VAYATIS N, et al. Prediction and optimization of wave energy converter arrays using a machine learning approach [J]. *Renewable Energy*, 2016 (97): 504 – 517.
- [17] 杨博, 刘炳强, 陈义军, 等. 基于改进蜜獾算法的波能转换器阵列优化[J]. *上海交通大学学报*, 2024, 58(9): 1465 – 1478.
- YANG Bo, LIU Bingqiang, CHEN Yijun, et al. Array optimization of wave energy converters via improved honey badger algorithm[J]. *Journal of Shanghai JiaoTong University*, 2024, 58(9): 1465 – 1478.
- [18] 杨博, 段金航, 李密维, 等. 基于改进秃鹰优化算法的海上混合光伏波浪能转换器阵列优化[J]. *电网技术*, 2024, 48(6): 2480 – 2489.
- YANG Bo, DUAN Jinhang, LI Miwei, et al. Optimization of offshore hybrid photovoltaic-wave energy converter array based on improved bald eagle optimization algorithm [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(6): 2480 – 2489.
- [19] REIKARD G, ROBERTSON B, BIDLOT J R. Combining wave energy with wind and solar: short-term forecasting [J]. *Renewable Energy*, 2015(81): 442 – 456.
- [20] TALAAT M, FARAHAT M A, ELKHOLY M H. Renewable power integration: experimental and simulation study to investigate the ability of integrating wave, solar and wind energies[J]. *Energy*, 2019(170): 668 – 682.
- [21] LI M W, YANG B, DUAN J H, et al. Exponential slime mould algorithm based spatial arrays optimization of hybrid wind-wave-PV systems for power enhancement [J]. *Applied Energy*, 2024(373): 123905.1– 123905.18.
- [22] ZHOU B Z, HU J J, WANG Y, et al. Coupled dynamic and power generation characteristics of a hybrid system consisting of a semi-submersible wind turbine and an array of heaving wave energy converters [J]. *Renewable Energy*, 2023 (214): 23 – 38.
- [23] YANG B, DUAN J H, YAN Y F, et al. EMCO-based optimal layout design of hybrid wind-wave energy converters array [J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9 (5): 142 – 161.
- [24] JAHANGIR M, SHAHSAVARI A, RAD M. Feasibility study of a zero emission PV/Wind turbine/Wave energy converter hybrid system for stand-alone power supply: a case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020 (262): 121250.1– 121250.19.
- [25] GHAFARI H, GHASSEMI H, ABBASI A, et al. Novel concept of hybrid wavestar-floating offshore wind turbine system with rectilinear arrays of WECs [J]. *Ocean Engineering*, 2022(262): 112253.1– 112253.21.
- [26] YANG B, WU S C, ZHANG H, et al. Wave energy converter array layout optimization: a critical and comprehensive overview [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022(167): 112668.1– 112668.20.
- [27] ARA S R, PAUL S, RATHER Z H. Two-level planning approach to analyze techno-economic feasibility of hybrid offshore wind-solar PV power plants [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021 (47): 101509.1– 101509.14.
- [28] YANG B, ZHOU Y M, LIU B Q, et al. Optimal array layout design of wave energy converter via honey badger algorithm [J]. *Renewable Energy*, 2024(234): 121182.1– 121182.24.
- [29] SU H, ZHAO D, HEIDARI A, et al. RIME: A physics-based optimization[J]. *Neurocomputing*, 2023(532): 183 – 214.
- [30] 夏蕾, 张世林, 李文美, 等. 基于宽度学习的新型电力系统负荷多步预测方法[J]. *供用电*, 2024, 41(1): 100 – 108.
- XIA Lei, ZHANG Shilin, LI Wenmei, et al. A multi-step load forecasting method for novel modern power systems based on broad learning [J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(1): 100 – 108.
- [31] 张春霞. 基于改进麻雀搜索算法的建筑综合能源系统优化调度[J]. *山东电力技术*, 2025, 52(2): 23 – 31.
- ZHANG Chunxia. Optimal scheduling of building integrated energy system based on improved sparrow search algorithm[J]. *Shandong Electric Power*, 2025, 52(2): 23 – 31.
- [32] 朱晓春, 张金江, 毕水仙, 等. 考虑高渗透光伏与电动汽车的配电网无功优化[J]. *供用电*, 2024, 41(12): 110 – 120.
- ZHU Xiaochun, ZHANG Jinjiang, BI Shuixian, et al. Distribution grid reactive power optimization considering high penetration photovoltaics and electric vehicles [J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(12): 110 – 120.

收稿日期: 2025-01-17; 网络首发日期: 2025-05-21

作者简介:

杨博(1988), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为基于人工智能的新能源系统优化与控制, yangbo_ac@outlook.com;

张芮(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为波浪能发电系统阵列优化, 571606129@qq.com;

胡袁炜骥(2000), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为基于人工智能的电动汽车规划与调度, Yuanweiji_Hu@outlook.com。