

文章编号: 1006-2467(2024)09-1465-14

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.030

# 基于改进蜜獾算法的波能转换器阵列优化

杨 博, 刘炳强, 陈义军, 武少聪, 束洪春, 韩一鸣

(昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650500)

**摘要:** 针对波浪能转换器(WEC)阵列发电效率提升问题,提出一种基于改进蜜獾算法的三系 WEC 阵列优化方法。首先,为克服原始蜜獾算法(HBA)收敛速度慢、收敛精度低等缺陷,引入佳点集初始化、混沌机制和蜜獾种群变异 3 种策略对原始 HBA 进行改进。此外,为了验证改进蜜獾算法(IHBA)的先进性和有效性,开展 2 个浮标、10 个浮标和 20 个浮标 3 个不同规模的 WEC 阵列优化实验。2 浮标阵列仿真结果表明,WEC 阵列优化存在多组最优解,且 IHBA、HBA、遗传算法和粒子群优化算法都能以不同速度找到最优解。然而,随着 WEC 阵列规模的增大,3 种对比算法都会陷入局部最优解。相反地,IHBA 依然表现出较强寻优能力并能搜寻到全局最优解。最后,IHBA 所获 10 浮标和 20 浮标的阵列  $q$  因子分别高达 1.059 和 0.968,远优于其他 3 种算法。

**关键词:** 海洋可再生能源;波能转换器;阵列优化;改进蜜獾算法

**中图分类号:** TM612; TM919

**文献标志码:** A

## Array Optimization of Wave Energy Converters via Improved Honey Badger Algorithm

YANG Bo, LIU Bingqiang, CHEN Yijun, WU Shaocong, SHU Hongchun, HAN Yiming

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology,  
Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to enhance the generation efficiency of wave energy converter (WEC) arrays, an optimization method for three-tether WEC array based on an improved honey badger algorithm is proposed. First, to overcome the shortcomings of the primal honey badger algorithm (HBA), such as slow convergence speed and low convergence accuracy, three improvement strategies are introduced, i. e., good point set initialization, chaos mechanism, and honey badger population mutation. Then, three wave farms including 2-buoy, 10-buoy, and 20-buoy are tested to verify the advancement and effectiveness of the improved honey badger algorithm (IHBA). The simulation results of the 2-buoy array demonstrate that there are multiple groups of optimal solutions in WEC array optimization. Furthermore, IHBA, HBA, genetic algorithm, and particle swarm optimization can find these optimal solutions at different speeds. Nevertheless, with increasing size of the WEC array, three comparative algorithms fall into local optimal solutions. On the contrary, IHBA still exhibits a strong optimization ability and can seek global optimal solutions. Finally, the  $q$ -factor values obtained by IHBA in 10-buoy and 20-buoy arrays reach 1.059 and 0.968, respectively, which are dramatically larger than those of other algorithms.

收稿日期: 2023-02-01 修回日期: 2023-05-10 录用日期: 2023-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(61963020, 62263014, 52207109)资助项目

作者简介: 杨 博(1988—), 教授, 博士生导师, 从事基于人工智能的新能源系统优化与控制研究。

通信作者: 韩一鸣, 讲师; E-mail: 2451250809@qq.com.

**Keywords:** marine renewable energy; wave energy converter (WEC); array optimization; improved honey badger algorithm (IHBA)

随着工业的快速发展,煤、石油、天然气等资源逐渐枯竭,全球变暖、海平面上升等环境问题日益严重<sup>[1]</sup>.近年来,为了阻止环境退化和优化能源结构,太阳能、风能、海洋能等<sup>[2]</sup>可再生能源在世界范围内得到广泛开发和利用.其中,海洋可再生能源约占世界能源总量的 70% 以上,海洋能位置条件便利,发展潜力巨大,已成为国际技术储备的战略资源<sup>[3]</sup>.目前海洋可再生能源主要可分为潮汐能、海流能、海水温差能和波浪能等<sup>[4]</sup>.其中,波浪能因其能量分布广和能量密度高等特点,已成为世界各国关注的焦点.据统计,全世界波浪能蕴藏量约为 25 亿 kW,中国海域波浪能密度可达 15 kW/m,具有很大开发利用潜能<sup>[5]</sup>.

早在 20 世纪,就有不少国家开始探索和利用波浪能进行发电.其中,法国、英国、美国和日本等国家的波浪能发电技术较为领先.我国的中科院广州能源所、国家海洋技术中心、中国海洋大学等单位也在这方面开展了大量研究<sup>[6-8]</sup>.相比于海上风电和潮汐能发电等,波浪能的开发和利用技术还不够成熟,仍然有很大研究空间.目前,波浪能发电技术正朝着智能化、直驱式、阵列化等方向发展<sup>[9-10]</sup>.

波浪能发电系统是将海洋波浪的动能转化为电能的装置,整个装置由波浪能转换器(Wave Energy Converter, WEC)、功率输出(Power Take off, PTO)系统以及其他辅助系统组成<sup>[11]</sup>.其中,PTO 系统包括中间转换系统(水力透平、空气透平、液压马达、增速齿轮箱等)和发电机<sup>[12]</sup>.迄今为止,WEC 的类型主要包括振荡水柱式 WEC、点吸收式 WEC、截止式 WEC 等.完全浸没式 CETO WEC<sup>[13]</sup>也属于点吸收式,它能够通过浮标的上下运动吸收波浪能.这类 WEC 在高密度海况下具有较长使用寿命,同时,设备视觉冲击和对海洋生态的影响都比较小,是目前 WEC 阵列优化中的重要研究对象.

单个 WEC 无法同时捕获不同海面位置的波浪能量,发电效率较低,而且能量输出不稳定,难以满足用电需求,不利于大规模发电.将 WEC 以阵列的形式布置进行发电,可以改善单一 WEC 发电的弊端.然而,与光伏阵列、风电场不同,WEC 阵列中浮标之间存在比较复杂的水动力相互作用,这些相互作用对阵列的发电效率既是建设性的也是破坏性的<sup>[14-15]</sup>,主要与阵列中 WEC 的形状、位置和海况等

因素有关.此外,这些相互作用使 WEC 阵列优化构成一个非凸、多模态、连续和具有约束的问题,目前采用  $q$  因子作为 WEC 阵列排布好坏的评价指标<sup>[16]</sup>.因此,如何对 WEC 尺寸、位置等进行优化,充分利用 WEC 之间的相互作用已成为波浪能发电工程的研究热点.WEC 阵列的优化是一项极具挑战性的工作,Budal<sup>[17]</sup>于 20 世纪 70 年代首先开始 WEC 阵列优化研究工作,对点吸收式 WEC 之间的互相作用进行简化计算.之后有很多学者在此基础上对 WEC 水动力模型进行修正和完善,提出各种方法来实现 WEC 阵列布局的优化,主要包含机器学习方法、数学方法和元启发式算法.传统的数学方法如抛物线交集法和蒙特卡罗方法,在提升  $q$  因子上具有较好性能<sup>[18-19]</sup>.然而,在解决非线性问题上,元启发式算法具有强大能力,因此被广泛应用于 WEC 阵列布局优化中<sup>[16]</sup>.文献[20]中利用改进差分进化算法,对含有 3 个、5 个、8 个浮标的小规模 WEC 阵列进行优化排布,其中,8 浮标的阵列  $q$  因子提高到了 1.898.文献[21]中提出基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA)的二自由度浮标式 WEC 阵列的优化策略,对 2 个、3 个、5 个浮标组成的 WEC 阵列进行优化设计,显著提高 WEC 阵列捕获波浪能的效率.然而,上述研究工作波浪特性单一,且并未对大规模的 WEC 阵列进行研究.

Hashim 等<sup>[22]</sup>于 2021 年提出蜜獾优化算法(Honey Badger Algorithm, HBA).该算法主要受蜜獾觅食行为的启发,具有模型简单、易于实现、收敛速度快等特点.但 HBA 局部开发能力较弱,并且面对复杂问题时难以跳出局部最优.为了提高 HBA 的优化性能,研究人员主要从调整控制参数、更新搜索机制以及算法融合等多方面对 HBA 进行改进.文献[23]中引入逻辑映射和反向学习对蜜獾种群初始化进行了改进,提高了算法的随机性;文献[24]中在蜜獾捕食阶段引入交叉变异原则,提升了算法的收敛速度;文献[25]中在局部搜索阶段中引入维度学习策略,平衡了算法勘探与开发的能力.上述改进算法相比于原始 HBA 在性能上有一定提升,但仍存在一些不足,如部分改进算法的改进策略单一,仅对算法的某一阶段进行改进;改进策略并没有从根本上优化蜜獾的挖掘寻优机制,算法的寻优能力并未得到提升;改进算法的测试实验不够,并未对高纬

度及复杂问题进行分析讨论,未能充分体现算法的优越性。

由于 WEC 阵列优化问题的复杂性,上述算法并未能精确、快速地解决此棘手问题,难以获得较合适的 WEC 阵列布局。通过合理改进 HBA 的寻优机制平衡算法的局部探索和全局搜索能力,有望成为高效解决上述难题的技术之一。因此,本文提出改进蜜獾算法 (Improved Honey Badger Algorithm, IHBA),引入佳点集初始化、混沌机制和蜜獾种群变异 3 种策略对原始 HBA 进行改进。以 WEC 阵列  $q$  因子最大化为目标,利用 IHBA 对 2 个浮标、10 个浮标和 20 个浮标 3 个不同规模的 WEC 阵列进行优化设计。同时,将 HBA、GA 和粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO)<sup>[26]</sup> 作为对比算法进行测试,实验结果验证了 IHBA 在 WEC 阵列优化问题上的先进性和有效性。

## 1 波浪能发电装置阵列模型

### 1.1 三系波浪能发电装置

所研究的 WEC 为澳大利亚卡内基清洁能源公司开发的三系 WEC,作为单系 CETO WEC 的替代技术。如图 1 所示,球形浮标完全浸没在海面下,可以通过自身的波涌、摇摆和升沉吸收波浪能量<sup>[13]</sup>。3 条系绳平均地分布在浮标周围,每条系绳各自连接着 PTO 装置和旋转发电机,在海底产生的电能通过海底电缆传输到陆上。三系 WEC 的投资成本明显高于单系 CETO WEC 的成本,但在同一海况下,相同数量的三系 WEC 与单系 WEC 相比,前者因每个系绳都安装了独立的 PTO 装置和发电机,从而能够产生更多电能。

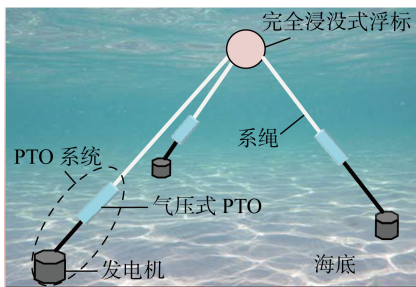


图 1 三系 WEC 示意图

Fig. 1 Schematic representation of three-tether WEC

### 1.2 三系 WEC 阵列数学模型

WEC 在海中受到的力主要包括波浪激励力、波浪辐射力和 PTO 装置在浮标上的控制力<sup>[27]</sup>。假设  $N$  为 WEC 阵列中浮标个数,PTO 装置可以等效为具有固定刚度系数  $K_{pto}$  和阻尼系数  $B_{pto}$  的弹簧阻尼

控制器<sup>[11]</sup>。当 WEC 所处的海况中海水不可压缩、无粘性和无旋流动时,阵列中第  $i$  个 WEC 的运动方程在时域中可描述为

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{F}_{exc,i}(t) + \mathbf{F}_{rad,i}(t) + \mathbf{F}_{pto,i}(t) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}_i$  为第  $i$  个浮标的质量矩阵;  $\ddot{\mathbf{x}}_i(t)$  为浮标在浪涌、摇摆和升沉中的加速度矢量;  $\mathbf{F}_{exc,i}(t)$ 、 $\mathbf{F}_{rad,i}(t)$ 、 $\mathbf{F}_{pto,i}(t)$  分别为波浪激励力、波浪辐射力和 PTO 控制力;  $t$  为时间。

其中,第  $i$  个浮标受到的波浪辐射力为

$$\mathbf{F}_{rad,i} = \sum_{j=1}^N (-\ddot{\mathbf{x}}_{\lambda_{i,j}} - \ddot{\mathbf{x}}_{\mu_{i,j}}) \quad (2)$$

式中:  $\lambda_{i,j}$  为第  $j$  个浮标对第  $i$  个浮标作用的附加阻尼系数;  $\mu_{i,j}$  为第  $j$  个浮标对第  $i$  个浮标作用的附加质量系数。

根据无功控制理论,PTO 控制力可近似为两个力的叠加,包括一个与速度成反比例的阻尼力和一个与位移成比例的弹簧力,因此:

$$\mathbf{F}_{pto,i} = -B_{pto,i} \dot{\mathbf{v}}_i - K_{pto,i} \hat{\mathbf{l}}_i \quad (3)$$

式中:  $B_{pto,i}$ 、 $K_{pto,i}$  分别为第  $i$  个 WEC 装置的阻尼系数和刚度系数;  $\dot{\mathbf{v}}_i$ 、 $\hat{\mathbf{l}}_i$  分别为浮标在系绳正方向上的速度和位移矢量。

在 WEC 阵列中,多个 WEC 共存且彼此相对靠近,浮标之间的水动力相互作用不可忽视。此外,波浪的辐射情况也依赖于 WEC 在阵列中的布局。由于浮标是球形的,可以忽略由波浪引起的横滚、纵倾运动,所以在 WEC 吸收波浪能的过程中只考虑平移运动,即浪涌、摇摆和起伏。当一个频率为  $\omega$ 、入射角为  $0$  rad、波高为  $H$  的规则海浪到达 WEC 场后,频域内含  $N$  个浮标的 WEC 场在波浪荷载作用下的运动可描述为<sup>[13]</sup>

$$[(\mathbf{M}_{\Sigma} + \mathbf{A}_{\Sigma}(\omega))\mathbf{j}\omega + \hat{\mathbf{B}}_{\Sigma}(\omega) - \frac{K_{pto,\Sigma}}{\omega}\mathbf{j} + \mathbf{B}_{pto,\Sigma}]\mathbf{x}_{\Sigma} = \hat{\mathbf{F}}_{exc,\Sigma} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{M}_{\Sigma}$  为  $N$  个浮标的广义质量矩阵;  $\mathbf{A}_{\Sigma}(\omega)$  为流体动力附加质量矩阵;  $\hat{\mathbf{B}}_{\Sigma}(\omega)$  为辐射阻尼矩阵;  $K_{pto,\Sigma}$ 、 $\mathbf{B}_{pto,\Sigma}$  分别为 PTO 装置的刚度系数矩阵和阻尼系数矩阵;  $\mathbf{x}_{\Sigma}$  为  $N$  个浮标的广义加速度矢量;  $\hat{\mathbf{F}}_{exc,\Sigma}$  为波浪激励力矩阵。

在确定波浪的频率  $\omega$ 、方向、入射角度、波高  $H$  和 WEC 的位置后,式(4)中的附加质量、辐射阻尼和波浪激励力等水动力系数可以通过半解析模型进行求解<sup>[28]</sup>。WEC 阵列中第  $i$  个浮标所吸收波浪能的功率为

$$P_i = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{2} B_{pto,i} \omega^2 H^2 |\hat{\mathbf{l}}_{i,j}|^2 \quad (5)$$

式中： $|\hat{l}_{i,j}|$  为浮标在系绳  $j$  正方向上的运动幅值。  
含有  $N$  个 WEC 的阵列所吸收的波浪能总功率可通过下式计算：

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

式中： $\mathbf{B}$  为 PTO 的阻尼系数。

根据式(6)计算出整个 WEC 阵列吸收的波浪能功率后,就可以估算出该阵列在特定海况下的年平均发电量,具体的计算方法可参考文献[21].

定义用阵列  $q$  因子来评估 WEC 阵列优劣：

$$q = \frac{P_{\Sigma}}{NP_0} \quad (7)$$

式中： $P_0$  为仅有单个 WEC 工作时,其吸收的波浪能功率。

同样地,为了反映阵列中每个 WEC 波浪能吸收情况,也可以用相互作用系数  $q_i$  反映每个浮标的波浪能转换,定义为

$$q_i = \frac{P_i}{P_0} \quad (8)$$

1.3 波浪特性

为了进一步降低计算成本,根据文献[29]中统计的悉尼海域波浪 50 个样本,文献[13]中提出悉尼海况的近似模型,如图 2 所示.该模型仅包括采样频率数为 1F、2F、3F、4F、5F 和 10F 的波浪特性,其中,1F 波的频率为 0.7 rad/s.

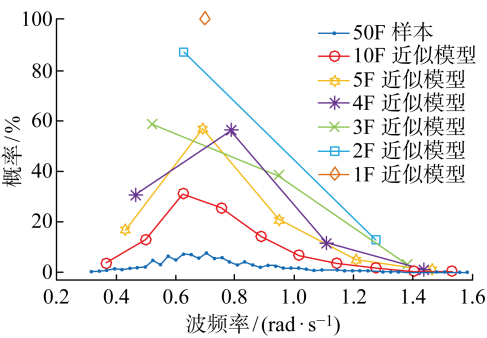


图 2 波浪特性近似模型  
Fig. 2 Approximate model of wave characteristics

与原始 50F 海况模型相比,该近似海况模型可以显著减少计算成本,同时测试结果与 50F 模型的相似率可以保证在 80% 以上.因此,采用该近似模型模拟 WEC 阵列的海洋环境。

2 改进蜜獾算法设计

2.1 蜜獾算法

蜜獾主要采用两种方式觅食,一种是根据猎物的信息强度自主挖掘的模式,按照心形线轨迹挖掘

蜂巢,简称挖掘模式;另一种是蜜獾通过导蜜鸟的指引到达蜂巢,简称采蜜模式.原始蜜獾算法的数学模型如下.

2.1.1 种群初始化 蜜獾种群的数量和位置根据下式进行初始化：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2D} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \cdots & x_{nD} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$x_m = l_m + r_1(u_m - l_m) \quad (10)$$

式中： $\mathbf{A}$  为整个蜜獾种群; $x_m$  为第  $m$  只蜜獾的位置,  $m = 1, 2, \cdots, n$ ;  $n$ 、 $D$  分别为蜜獾个体总数及维度;  $u_m$ 、 $l_m$  分别为搜索空间的上界和下界; $r_1$  为  $(0, 1)$  内的随机数。

2.1.2 嗅觉强度定义 蜜獾觅食速度主要取决于嗅觉强度  $I_m$  的大小,  $I_m$  越大,则蜜獾运动速度越快.嗅觉强度的定义如下：

$$I_m = r_2 \frac{S}{4\pi d_m^2} \quad (11)$$

$$S = (x_m - x_{m+1})^2 \quad (12)$$

$$d_m = x_{\text{prey}} - x_m \quad (13)$$

式中： $r_2$  为  $(0, 1)$  内的随机数; $S$  为猎物的集中强度; $d_m$  为猎物与第  $m$  只蜜獾的距离; $x_{\text{prey}}$  表示猎物的位置。

2.1.3 衰减因子更新 为了确保勘探到开发的平稳过渡,引入时变搜索衰减因子  $\alpha$ ,减少蜜獾觅食过程中随时间变化的随机性,定义如下：

$$\alpha = Ce^{\frac{-t}{t_{\max}}}, \quad C = 2 \quad (14)$$

式中： $t_{\max}$  为最大迭代次数; $C$  为参数。

2.1.4 蜜獾位置更新 包括以下两种模式。

(1) 挖掘模式。

在自主觅食挖掘过程中,蜜獾以心形线轨迹进行挖掘,可描述为

$$x_{\text{new}} = x_{\text{prey}} + F\beta I x_{\text{prey}} + Fr_3\alpha d_m |\cos(2\pi r_4)[1 - \cos(2\pi r_5)]| \quad (15)$$

式中： $x_{\text{new}}$  为蜜獾更新后位置; $\beta$  为蜜獾的捕猎能力,默认  $\beta = 6$ ;  $I$  为嗅觉强度; $r_3$ 、 $r_4$ 、 $r_5$  均为  $(0, 1)$  内 3 个不同的随机数.蜜獾的搜索方向由  $F$  决定：

$$F = \begin{cases} 1, & \text{如果 } r_6 \leq 0.5 \\ -1, & \text{否则} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $r_6$  为  $(0, 1)$  内的随机数。

(2) 采蜜模式。

蜜獾通过导蜜鸟找到蜂巢,这一行为可以利用下式模拟：

$$x_{\text{new}} = x_{\text{prey}} + Fr_7\alpha d_m \quad (17)$$

式中:  $r_7$  为  $(0, 1)$  内的随机数.

2.2 改进蜜獾算法

和其他启发式算法一样, HBA 在一些复杂问题上也会出现早熟、易陷入局部最优, 限制了算法精度, 具有较大改进空间. 引入佳点集初始策略<sup>[30]</sup>、混沌机制策略<sup>[23]</sup>、种群变异策略对 HBA 进行改进.

2.2.1 佳点集初始化策略 对于 GA、PSO 和 HAB 等群体优化算法而言, 初始化种群的质量好坏对算法收敛速度和全局优化效果有较大影响. 然而, 在原始 HBA 算法中, 种群的初始化都是随机产生的, 难以保证良好的种群多样性. 因此, 引入佳点集策略对蜜獾种群进行初始化, 相对于随机初始化种群, 佳点集策略产生的序列更加均匀, 种群覆盖全局范围更广, 有利于 HBA 的全局寻优. 佳点集的定义如下:

设  $G_D$  为  $D$  维欧氏空间单位立方体, 当  $\gamma \in G_D$  时, 产生佳点集合:

$$P_n(k) = \{(\{\gamma_1^{(n)}k\}, \{\gamma_2^{(n)}k\}, \dots, \{\gamma_D^{(n)}k\}), 1 \leq k \leq n\} \tag{18}$$

且集合  $P_n(k)$  各点之间的偏差满足:

$$\varphi(n) = C(\gamma, \epsilon)n^{-1+\epsilon} \tag{19}$$

式中:  $C(\gamma, \epsilon)$  为仅与  $\gamma$  和  $\epsilon$  有关的常数,  $\epsilon > 0$ ;  $\gamma$  为佳点.

2.2.2 混沌机制策略 混沌机制根据混沌理论生成伪随机值而不是随机值, 可以提高算法的全局探索能力. 由于采用佳点集策略对 HBA 进行初始化, 并不需要对  $r_1$  进行更新, 所以基于混沌机制更新原始 HBA 的两个随机值  $r_2, r_3$ , 如下:

$$r_2^{\text{new}} = r_2 + \delta_i r_2 \tag{20}$$

$$r_3^{\text{new}} = r_3 + \delta_i r_3 \tag{21}$$

$$\delta_{i+1} = 4\delta_i(1 - \delta_i) \tag{22}$$

式中:  $r_2^{\text{new}}, r_3^{\text{new}}$  为更新后的随机值;  $\delta_i$  为对应迭代次数的混沌值, 初始值  $\delta_1$  为  $(0, 1)$  之间的随机数.

2.2.3 变异策略 为解决 HBA 算法早熟、收敛精度等问题, 同时不改变原始算法的复杂度, 引入高斯变异策略, 对式(15)和式(17)的蜜獾位置迭代给予相应的高斯变异算子, 如下:

$$x_{\text{new}}(t+1) = x_{\text{new}}(t) \left[ 1 + \frac{|\alpha|}{2} N(0, 1) \right] \tag{23}$$

式中:  $x_{\text{new}}(t+1)$  为下一次迭代蜜獾的位置;  $N(0, 1)$  为标准高斯分布.

变异策略可以使 HBA 在搜索初期获得足够扰动以增加算法的全局搜索能力, 而在算法末期减少扰动以避免最优解的动荡, 加快收敛速度.

3 基于改进蜜獾算法的波能转化器阵列优化设计

3.1 目标函数

利用 IHBA 对含  $N$  个浮标的 WEC 阵列进行优化, 每个 WEC 装置包含横纵坐标 2 个分量. 因此, 需要优化的变量主要是浮标坐标位置, 主要目标是在预定海域内找到每个浮标的最佳位置, 最大限度地利用浮标之间相互作用提高 WEC 阵列的波浪能捕获, 即实现  $q$  因子最大化. 因此, 构建的目标函数如下:

$$\left. \begin{aligned} \max f &= q((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)) \\ q &= \frac{P_{\Sigma}}{NP_0} \\ P_{\Sigma} &= \frac{1}{4}(\hat{\mathbf{F}}_{\text{exc}, \Sigma}^T \hat{\mathbf{x}}_{\Sigma} + \hat{\mathbf{x}}_{\Sigma}^T \hat{\mathbf{F}}_{\text{exc}, \Sigma}) - \frac{1}{2} \hat{\mathbf{x}}_{\Sigma}^T \mathbf{B} \hat{\mathbf{x}}_{\Sigma} \end{aligned} \right\} \tag{24}$$

式中:  $(x_i, y_i)$  代表第  $i$  个浮标的位置坐标.

3.2 约束条件

考虑到实际工程中 WEC 的安装以及维修, 定义两个浮标之间的安全距离( $d_{\text{save}}$ )为 50 m, 同时各个浮标之间的坐标要保证在所定义的海域内, 故在整个 WEC 阵列优化过程中应满足以下约束条件:

$$\left. \begin{aligned} x_i &\in (0, x_U), \quad i = 1, 2, \dots, N \\ y_i &\in (0, y_U), \quad i = 1, 2, \dots, N \\ d_{\text{save}} &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq 50 \\ i, j &= 1, 2, \dots, N, i \neq j \end{aligned} \right\} \tag{25}$$

式中:  $x_U$  和  $y_U$  为所定义海域的长度和宽度.

3.3 基于 IHBA 的 WEC 阵列优化框架

在确定好目标函数以及约束条件后, 为保证起始蜜獾种群的多样性, 增强搜索空间的覆盖程度, 按式(9)、式(18)~(19)、式(25)在搜索空间内初始化蜜獾种群中的每个个体, 并根据式(24)计算个体适应度值. 接着根据式(11)~(17)、式(20)、式(23)进行迭代, 更新个体位置和适应度值. 此外, 在每次迭代中不满足约束条件的个体会更新为上一代的最优个体, 完成迭代后保留最优个体位置和适应度值.

4 算例分析

为验证所设计 IHBA 的有效性, 以 HBA、GA、以及 PSO 作为参照算法, 分别对 3 个规模(2 个浮标、10 个浮标和 20 个浮标)的三系 WEC 阵列进行优化, 各个算法的主要参数如表 1 所示. 表中:  $p_c$  为交叉概率;  $p_m$  为变异概率;  $W_i$  为惯性因子;  $C_1$  为加速度常数;  $C_2$  为加速度常数. 其中, 在 2 浮标小规模



阵列中,分别将 5F 波和 1F 波作为海浪条件进行实验,所有算法的种群大小和最大迭代次数分别为  $n=60$  和  $t_{\max}=400$ . 在中规模 10 浮标和大规模 20 浮标阵列中,考虑到计算成本,只进行波浪条件为 1F 时的 WEC 阵列优化实验,同时设置各算法的种群大小和最大迭代次数分别为  $n=40$  和  $t_{\max}=200$ , WEC 装置以及环境条件的参数如表 2 所示. 此外,当入射角为 0 rad、波高为 1.9 m、波的传播方向为从左至右时,计算出了单个 WEC 在 5F 波和 1F 波孤立工作下吸收的波浪能功率分别为 350.9 kW 和 554.7 kW. 所有仿真实验均在配置为 2.90 GHz Intel(R) Core(TM) i5-9400 CPU, 32.0 GB RAM, 64 位 Windows 10 的计算机上通过 MATLAB 2019b 环境运行.

表 1 不同算法的主要参数

Tab. 1 Main parameters of different algorithms

算法	参数	数值
IHBA	$C$	2
	$\beta$	6
HBA	$C$	2
	$\beta$	6
GA	$p_c$	0.5
	$p_m$	0.01
PSO	$W_i$	1.0
	$C_1$	1.494 45
	$C_2$	1.494 45

表 2 WEC 阵列优化实验主要参数

Tab. 2 Main parameters of optimization experiment for WEC array

参数	数值
浮标半径/m	5
浮标质量/t	376
浮标下潜深度/m	6
海水深度/m	50
海水密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1 020
重力加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	9.8
波高/m	1.9
入射角度/rad	0
$K_{\text{pto}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	387
$B_{\text{pto}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	161

4.1 小规模 2 浮标阵列优化

波浪特性为 5F 波、海域面积为  $100\text{ m}\times100\text{ m}$ , 以阵列  $q$  因子为目标函数时,各个算法得到的 2 浮标阵列  $q$  因子收敛曲线如图 3 所示. 不难看出,在变

量维度较低的情况下,所有算法都能以不同速度找到最优解,但 IHBA 能够以最快速度找到最优解. 同时,表 3 记录了各个算法最终优化结果,虽然各算法得到的最优 WEC 布局存在差异,但各算法之间的阵列吸收功率偏差仅在 0.2 W 以内,这也验证了 WEC 的阵列优化存在多组最优解. 表中:  $X$ 、 $Y$  分别为浮标的  $X$ 、 $Y$  坐标.

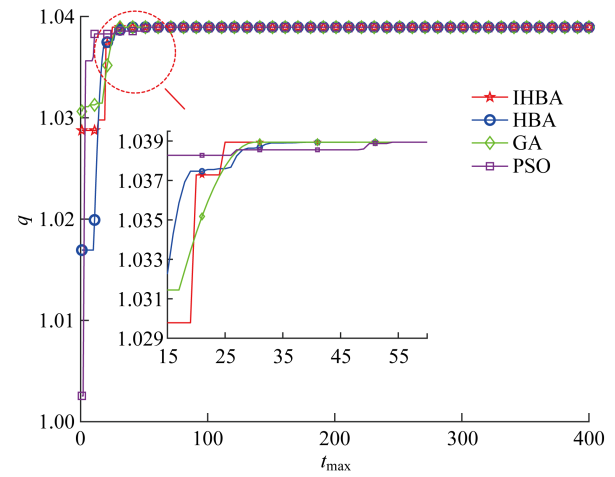


图 3 各算法优化 2 浮标阵列所得  $q$  因子收敛曲线

Fig. 3 Convergence curves of  $q$ -factor obtained by various algorithms for 2-buoy array

表 3 5F 波下各算法优化后的 2 浮标阵列实验结果

Tab. 3 Experimental results of 2-buoy array obtained by different algorithms with 5F wave source

算法	$i$	$X/\text{m}$	$Y/\text{m}$	$P_{\Sigma}/\text{W}$	$q$	仿真时间/h
IHBA	1	80	9	729 129.63	1.038 9	0.8
	2	80	100			
HBA	1	63	8	729 129.73	1.038 9	0.9
	2	63	96			
GA	1	100	100	729 129.56	1.038 9	0.9
	2	100	9			
PSO	1	96	98	729 129.65	1.038 9	0.7
	2	96	7			

在上述 4 组 2 浮标最优布局的基础上,将波浪特性由 5F 改为 1F,其他条件保持不变,对 1F 波下的 2 浮标阵列进行测试. 测试结果如表 4 所示,可以看出在波浪特性为 1F 时各算法优化 WEC 阵列的  $q$  因子仍然大于 1. 这充分验证了相比于同样数目下的孤立浮标, WEC 以阵列的形式布置能捕获更多波浪能. 最后,根据表 4 中每个浮标的坐标以及吸收波浪能的功率,图 4 给出 4 种算法的 2 浮标的 WEC 阵列最优布局,其中,颜色深浅代表每个 WEC 吸收波浪能的功率大小.

表 4 1F 波下各算法优化后的 2 浮标阵列实验结果

Tab. 4 Experimental results of 2-buoy array obtained by different algorithms with 1F wave source

算法	$i$	$X/\text{m}$	$Y/\text{m}$	$P_i/\text{W}$	$P_{\Sigma}/\text{W}$	$q_i$	$q$
IHBA	1	80	9	577 830.38	1 158 261.22	1.04	1.043
	2	80	100	577 830.38		1.04	
HBA	1	63	8	579 130.61	1 155 660.76	1.04	1.042
	2	63	96	579 130.61		1.04	
GA	1	100	100	577 830.39	1 155 660.78	1.04	1.042
	2	100	9	577 830.39		1.04	
PSO	1	96	98	577 830.41	1 155 660.82	1.04	1.042
	2	96	7	577 830.41		1.04	

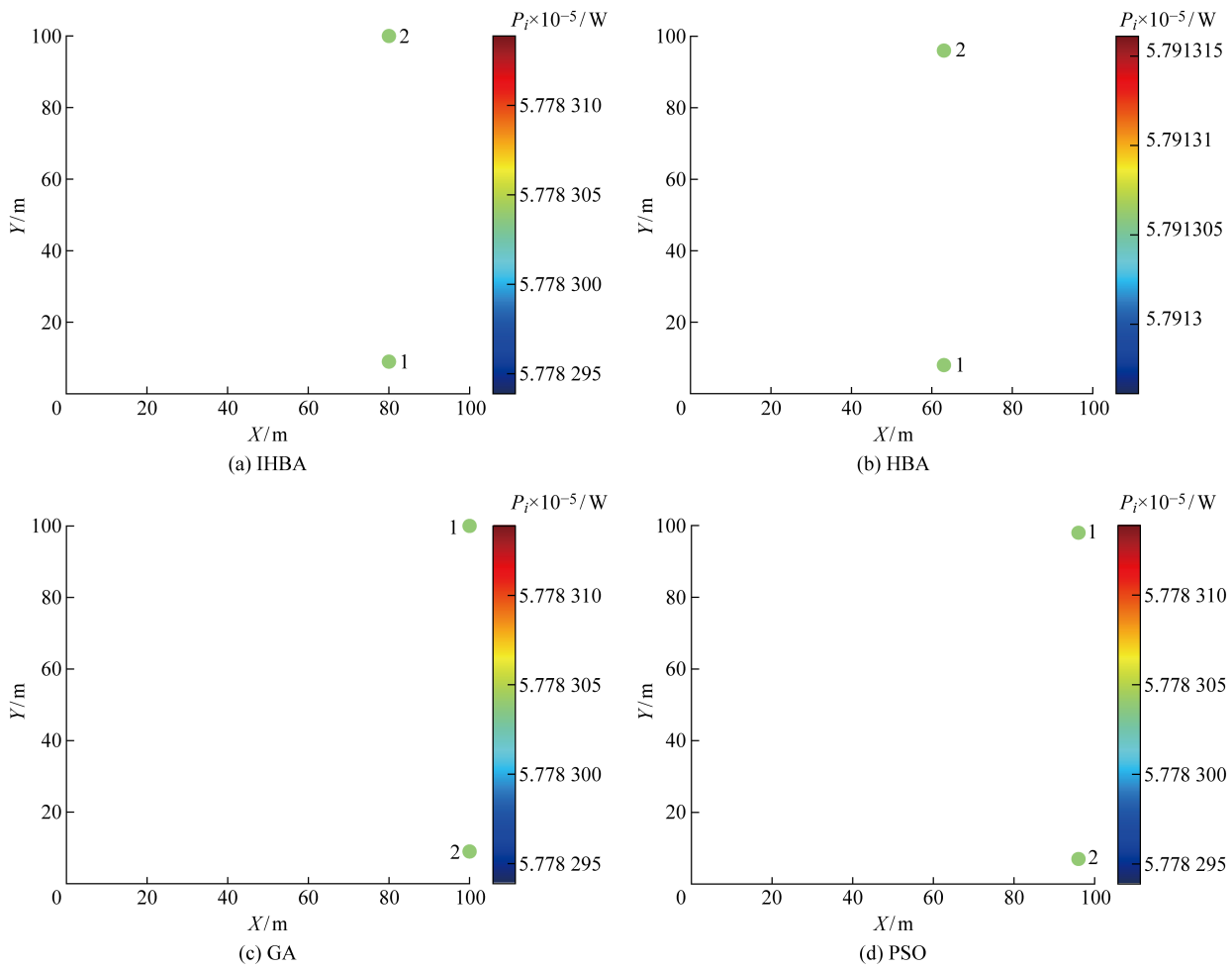


图 4 各算法优化后的 2 浮标阵列最优布局

Fig. 4 Optimal layouts of 2-buoy array obtained by different methods

4.2 中等规模 10 浮标阵列优化

当波浪特性为 1F, 海域面积为 1 000 m×1 000 m 时,4 种算法对 10 个浮标阵列优化过程中  $q$  因子收敛曲线图如图 5 所示. 其中,4 种算法在迭代 50 次后都能将阵列  $q$  因子提升到 1 以上. 同时,从 4 条收敛曲线可以看出,利用佳点集策略进行初始化后的 IHBA 初期适应度值高于其他算法. 3 种

对比算法在优化过程中陷入局部最优,原始 HBA 在阵列  $q$  因子的提升上相对 GA 和 PSO 的效果较好,但 IHBA 的寻优能力显著高于其他 3 种启发式算法,经 IHBA 优化后的阵列  $q$  因子比 HBA、GA、PSO 分别高出 4.54%、4.64%、5.58%. 各个算法优化后的 10 浮标最优位置以及每个浮标的波浪能捕获情况如表 5 所示. 虽然 IHBA 在

表 5 各算法优化后的 10 浮标阵列实验结果

Tab. 5 Experimental results of 10-buoy array obtained by different algorithms

算法	$i$	$X/\text{m}$	$Y/\text{m}$	$P_i/\text{W}$	$P_\Sigma/\text{W}$	$q_i$	$q$	仿真时间/h
IHBA	1	270	868	631 484.99	5 872 585.96	1.14	1.059	12.4
	2	446	0	637 681.44		1.15		
	3	204	1 000	551 537.86		0.99		
	4	554	180	527 544.82		0.95		
	5	356	988	599 759.59		1.08		
	6	0	495	599 362.43		1.08		
	7	597	441	607 682.81		1.10		
	8	764	226	563 751.04		1.02		
	9	311	721	592 374.13		1.07		
	10	901	656	561 406.85		1.01		
HBA	1	28	9	604 418.91	5 621 017.52	1.09	1.013	9.6
	2	960	425	548 656.17		0.99		
	3	733	718	541 396.73		0.98		
	4	891	411	494 697.98		0.89		
	5	896	605	551 891.85		0.99		
	6	795	591	546 891.48		0.99		
	7	536	979	532 181.53		0.96		
	8	343	276	557 627.43		1.01		
	9	281	43	620 209.47		1.12		
	10	475	871	623 045.98		1.12		
GA	1	585	194	538 991.19	5 617 454.26	0.97	1.012	8.7
	2	374	213	551 180.45		0.99		
	3	536	421	581 630.05		1.05		
	4	917	888	552 885.12		1.00		
	5	562	687	607 566.16		1.10		
	6	829	901	498 421.01		0.90		
	7	179	397	568 881.04		1.03		
	8	548	884	514 269.48		0.93		
	9	325	589	597 224.55		1.08		
	10	535	78	606 405.20		1.09		
PSO	1	639	246	528 240.22	5 564 101.63	0.95	1.003	9.3
	2	214	893	534 894.73		0.96		
	3	835	915	520 488.17		0.94		
	4	350	449	640 099.67		1.15		
	5	974	781	544 005.66		0.98		
	6	995	932	556 470.07		1.00		
	7	136	600	572 520.89		1.03		
	8	550	678	582 235.72		1.05		
	9	639	246	561 505.96		1.01		
	10	639	246	523 640.54		0.94		



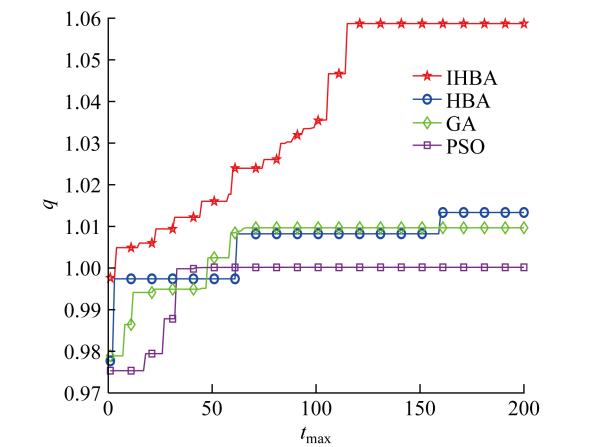


图 5 各算法优化 10 浮标阵列所得  $q$  因子收敛曲线  
Fig. 5 Convergence curves of  $q$ -factor obtained by different algorithms for 10-buoy array

运算速度上有一定局限性,但在 IHBA 优化后的 WEC 阵列中,相互作用系数  $q_i$  大于 1 的浮标个数多于其他 3 种算法所得,验证了 IHBA 可以在 WEC 阵列系统中有效且合理地利用浮标之间的相互作用,从而提升 WEC 阵列的波浪能捕获量.最后,根据表 5 中每个浮标的坐标以及吸收的波浪能功率,分别给出 4 种算法对 10 浮标阵列进行优化后的最优布局,如图 6 所示.

4.3 大规模 20 浮标阵列优化

相比较于 2 个浮标和 10 个浮标组成的阵列,20 个浮标阵列的优化工作更具挑战性,因为浮标之间相互作用变得更加复杂,搜索空间的复杂性要高很多.同样在波浪特性为 1F 和海域面积为  $1\,000\text{ m}\times 1\,000\text{ m}$  下,利用前述 4 种算法对 20 个浮标组成的阵列进行优化,各算法的阵列  $q$  因子收敛曲线图如

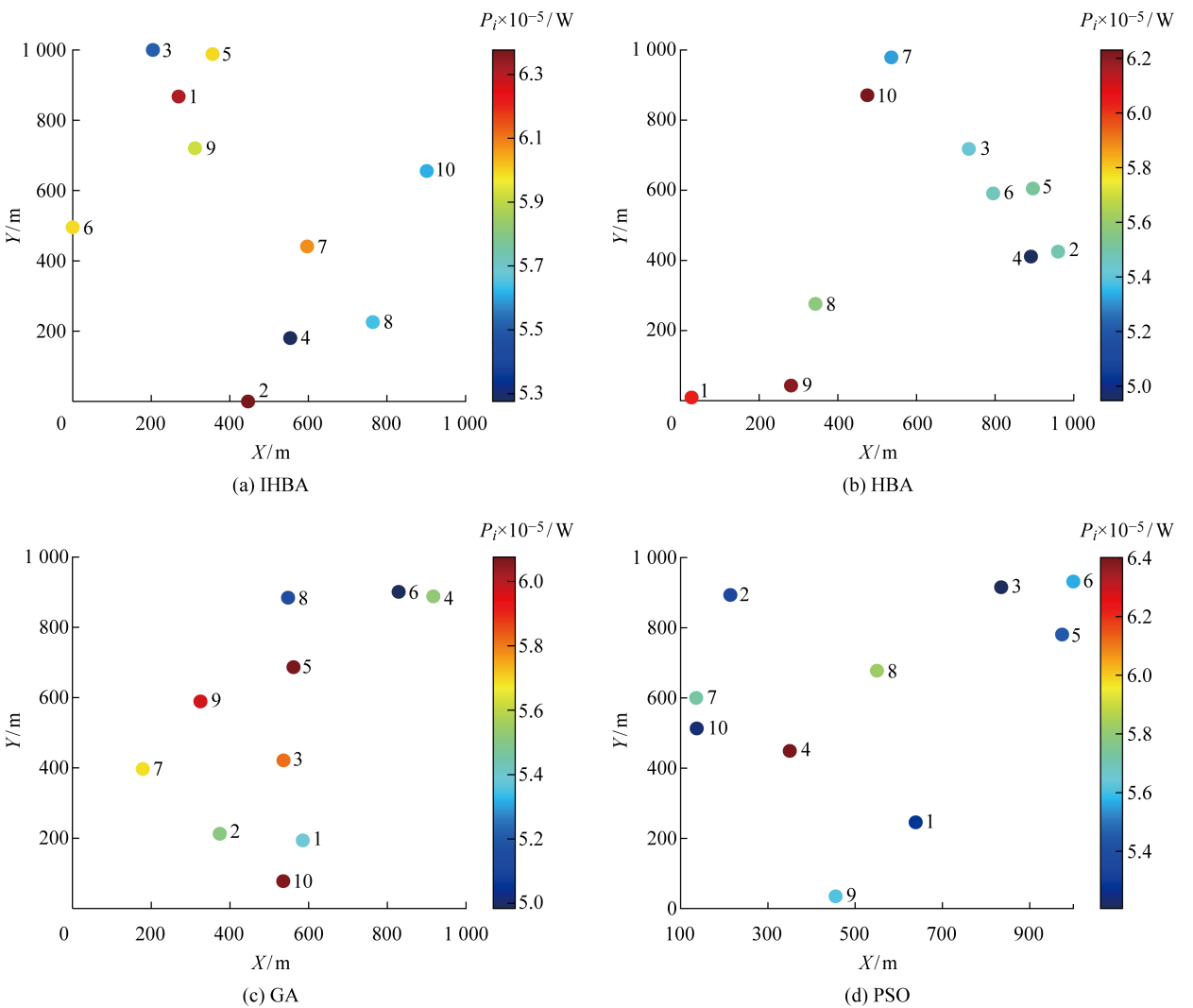


图 6 各算法优化后的 10 浮标阵列最优布局  
Fig. 6 Optimal layouts of 10-buoy array obtained by different methods

图 7 所示, 不难看出 4 种算法优化后的 20 浮标阵列  $q$  因子都能达到 0.9 以上. 同时, HBA、GA 和 PSO 在优化过程中仍然陷入局部最优, 经 IHBA 优化后的阵列  $q$  因子比 HBA, GA 和 PSO 所优化结果分别高 3.75%、4.42% 和 3.20%, 在 4 种方法中仍然处于最高水平, 再次验证所提方法的先进性和有效性.

此外, 表 6 记录了 4 种算法所得 20 个浮标阵列的最优布局以及各个浮标吸收波浪能的功率. 可以看出, 阵列规模越大, 浮标之间相互作用也更加复杂, 阵列  $q$  因子很难达到 1 以上, 但部分浮标的相互作用系数  $q_i$  仍大于 1. 同样地, 根据表 6 中统计的数据, 图 8 给出了经 4 种算法优化后的 20 个浮标阵列最优布局图.

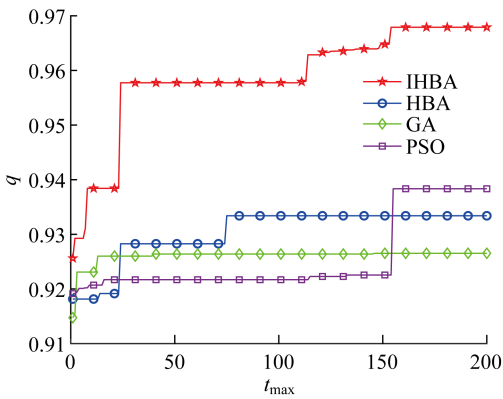


图 7 各算法优化 20 浮标阵列所得  $q$  因子收敛曲线  
Fig. 7 Convergence curves of  $q$ -factor obtained by different algorithms for 20-buoy array

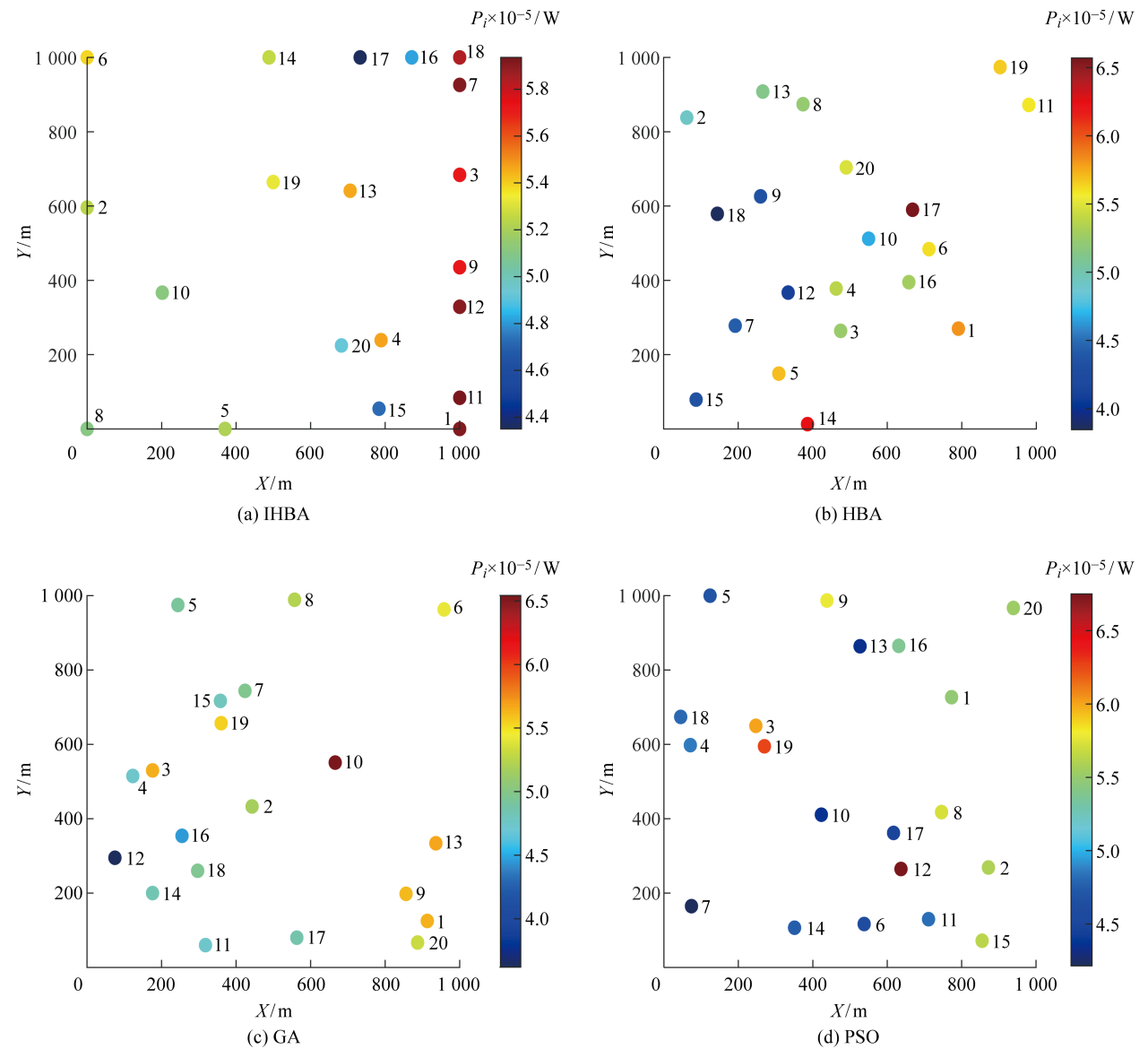


图 8 各算法优化后的 20 浮标阵列最优布局  
Fig. 8 Optimal layouts of 20-buoy array obtained by different methods

表 6 各算法优化后的 20 浮标阵列实验结果

Tab. 6 Experimental results of 20-buoy array obtained by different algorithms

算法	$i$	$X/\text{m}$	$Y/\text{m}$	$P_i/\text{W}$	$P_\Sigma/\text{W}$	$q_i$	$q$	仿真时间/h
IHBA	1	1 000	0	591 110.82	10 738 325.00	1.07	0.968	54.1
	2	0	596	524 057.30		0.94		
	3	1 000	684	573 027.06		1.03		
	4	789	239	547 482.54		0.99		
	5	370	0	521 690.68		0.94		
	6	0	1 000	538 709.52		0.97		
	7	1 000	926	591 389.99		1.07		
	8	0	0	510 818.74		0.92		
	9	1 000	435	573 353.35		1.03		
	10	202	367	512 201.32		0.92		
	11	1 000	84	593 577.50		1.07		
	12	1 000	329	590 693.31		1.06		
	13	706	641	546 299.80		0.98		
	14	488	1 000	525 822.68		0.95		
	15	783	54	472 738.51		0.85		
	16	871	1 000	481 751.56		0.87		
	17	733	1 000	435 016.35		0.78		
	18	1 000	1 000	584 101.53		1.05		
	19	500	665	532 419.62		0.96		
	20	683	225	492 062.82		0.89		
HBA	1	791	270	582 338.12	10 355 184.88	1.05	0.933	49.6
	2	62	838	491 802.84		0.89		
	3	475	264	524 579.76		0.95		
	4	463	378	537 116.11		0.97		
	5	309	149	570 464.26		1.03		
	6	712	484	560 692.94		1.01		
	7	192	278	442 950.43		0.80		
	8	374	874	522 163.90		0.94		
	9	260	626	433 132.58		0.78		
	10	550	512	466 631.51		0.84		
	11	980	872	558 221.04		1.01		
	12	334	367	409 162.36		0.74		
	13	266	908	513 161.69		0.93		
	14	386	13	624 845.25		1.13		
	15	87	79	433 217.24		0.78		
	16	658	395	528 528.35		0.95		
	17	668	590	657 046.30		1.18		
	18	144	579	384 638.95		0.69		
	19	903	974	566 241.90		1.02		
	20	490	704	548 249.36		0.99		

(续表)

算法	$i$	$X/\text{m}$	$Y/\text{m}$	$P_i/W$	$P_{\Sigma}/W$	$q_i$	$q$	仿真时间/h
GA	1	913	125	565 046.28	10 279 097.26	1.02	0.927	50.3
	2	443	433	517 847.92		0.93		
	3	176	530	565 416.01		1.02		
	4	123	515	474 950.50		0.86		
	5	244	975	492 480.09		0.89		
	6	958	963	542 268.04		0.98		
	7	424	744	497 753.30		0.90		
	8	557	989	523 494.33		0.94		
	9	856	198	562 620.74		1.01		
	10	666	551	654 296.42		1.18		
	11	318	60	473 974.58		0.85		
	12	75	295	361 879.30		0.65		
	13	936	334	567 600.97		1.02		
	14	176	200	483 356.03		0.87		
	15	358	717	480 141.54		0.87		
	16	255	354	445 856.42		0.80		
	17	563	80	486 944.24		0.88		
	18	297	260	496 358.63		0.89		
	19	360	657	555 715.81		1.00		
	20	887	67	531 096.10		0.96		
PSO	1	773	727	548 390.46	10 409 803.81	0.99	0.938	43.2
	2	872	269	559 205.11		1.01		
	3	247	650	601 563.98		1.08		
	4	71	598	486 223.31		0.88		
	5	124	1 000	468 398.17		0.84		
	6	538	117	460 536.45		0.83		
	7	74	165	421 477.41		0.76		
	8	746	418	572 473.27		1.03		
	9	438	987	578 293.49		1.04		
	10	423	411	435 740.08		0.79		
	11	711	130	482 171.24		0.87		
	12	637	265	675 019.20		1.22		
	13	527	864	434 627.63		0.78		
	14	351	107	475 762.78		0.86		
	15	855	72	563 972.43		1.02		
	16	631	865	537 830.23		0.97		
	17	617	362	448 451.98		0.81		
	18	45	674	480 077.98		0.87		
	19	270	595	626 770.78		1.13		
	20	939	967	552 817.84		1.00		

5 结 论

海洋中波浪的辐射和散射会严重影响 WEC 阵

列发电效率. 针对此问题, 提出一种多策略改进的蜜  
獾优化算法, 对不同规模 WEC 阵列进行布局优化  
和对比分析, 主要研究成果和创新点可概括如下:

(1) 对原始 HBA 进行改进,利用佳点集策略初始化种群,增加了种群多样性。同时,引入混沌机制生成伪随机数,提高算法的全局探索能力。此外,在蜜獾挖掘和采蜜阶段引入种群变异策略,进一步提升解的质量。

(2) 建立基于 IHBA 的三系 WEC 阵列优化模型,利用 IHBA 对 3 个不同规模大小的 WEC 阵列进行布局优化。为了验证其先进性和有效性,在相同条件下对比验证了所提方法与原始 HBA、GA 和 PSO 算法的优化效果。

(3) 仿真结果表明,在小规模 2 个浮标的阵列优化中,4 种算法中均能找到最优解,验证了 WEC 阵列优化问题含有多个最优解;在 10 浮标和 20 浮标 WEC 阵列优化中,HBA、GA 和 PSO 都陷入局部最优,而采用佳点集初始化的 IHBA 在初始适应度值上占有优势,在优化过程中也表现出强大的寻优能力。其中,经 IHBA 优化后的 10 浮标阵列  $q$  因子比 HBA、GA 和 PSO 所得分别高出 4.54%、4.64%和 5.58%。经 IHBA 优化的 20 浮标阵列  $q$  因子比 HBA、GA 和 PSO 所优化结果分别高出 3.75%、4.42%和 3.20%。

本文主要研究 WEC 阵列吸收波能功率最大化,IHBA 在 WEC 阵列优化上具有较好的优化效果,IHBA 能够充分挖掘 WEC 之间的积极作用,从而提高 WEC 阵列的发电效率,对工程实践中波浪能的开发和利用具有一定的参考价值。未来将在此基础上综合考虑 WEC 的投资成本以及其建设对海洋环境的影响,海况模拟也将进一步丰富。同时,也将开展海上风能与波浪能发电装置科学集成的研究。

## 参考文献:

- [1] CHEN Y J, YANG B, GUO Z X, *et al.* Dynamic reconfiguration for TEG systems under heterogeneous temperature distribution via adaptive coordinated seeker[J]. **Protection & Control of Modern Power Systems**, 2022, 7(1): 1-19.
- [2] YANG B, LIU B Q, ZHOU H Y, *et al.* A critical survey of technologies of large offshore wind farm integration: Summary, advances, and perspectives[J]. **Protection & Control of Modern Power Systems**, 2022, 7(1): 17.
- [3] YANG B, WU S C, ZHANG H, *et al.* Wave energy converter array layout optimization: A critical and comprehensive overview[J]. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 2022, 167: 112668.
- [4] SIM J, KIM C S. The value of renewable energy research and development investments with default consideration[J]. **Renewable Energy**, 2019, 143: 530-539.
- [5] FANG H W, WANG D. Design of permanent magnet synchronous generators for wave power generation[J]. **Transactions of Tianjin University**, 2016, 22(5): 396-402.
- [6] 吴明东,盛松伟,张亚群,等. 海洋波浪能浮标发展现状及前景[J]. **新能源进展**, 2021, 9(1): 42-47.  
WU Mingdong, SHENG Songwei, ZHANG Yaqun, *et al.* Development status and prospect of ocean wave energy buoy[J]. **Advances in New & Renewable Energy**, 2021, 9(1): 42-47.
- [7] 谭美秀,盛松伟,王振鹏,等. 冲击水轮机式小型波浪能转换系统研究[J]. **太阳能学报**, 2021, 42(9): 446-451.  
TAN Meixiu, SHENG Songwei, WANG Zhenpeng, *et al.* Research on small wave energy converter system of pelton turbine[J]. **Acta Energetica Sinica**, 2021, 42(9): 446-451.
- [8] 史宏达,曲娜,曹飞飞,等. 振荡浮子波能发电装置浮子运动性能的试验研究[J]. **中国海洋大学学报(自然科学版)**, 2017, 47(6): 124-130.  
SHI Hongda, QU Na, CAO Feifei, *et al.* Experimental study on movement performance of oscillating buoys WEC[J]. **Periodical of Ocean University of China**, 2017, 47(6): 124-130.
- [9] 黄磊,胡敏强,余海涛,等. 直驱式波浪发电用全超导初级励磁直线发电机的设计与分析[J]. **电工技术学报**, 2015, 30(2): 80-86.  
HUANG Lei, HU Minqiang, YU Haitao, *et al.* Design and analysis of a fully-superconducting primary-excitation linear generator for direct-driven wave energy generation[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2015, 30(2): 80-86.
- [10] O'SULLIVAN A C M, SHENG W N, LIGHTBODY G. An analysis of the potential benefits of centralised predictive control for optimal electrical power generation from wave energy arrays[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2018, 9(4): 1761-1771.
- [11] 陈佳,兰飞,郭昊霖,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 Haolin, *et al.* Review of wave energy power generation control technology research[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2023, 43(6): 124-136.
- [12] 刘华兵,彭爱武,赵凌志. 波浪发电系统功率控制方

- 法综述[J]. **电工电能新技术**, 2020, 39(5): 49-58.
- LIU Huabing, PENG Aiwu, ZHAO Lingzhi. Summary of power control methods for wave power generation system[J]. **Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy**, 2020, 39(5): 49-58.
- [13] WU J H, 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**. Denver, USA: ACM, 2016: 1045-1052.
- [14] SHARP C, DUPONT B. Wave energy converter array optimization: A genetic algorithm approach and minimum separation distance study[J]. **Ocean Engineering**, 2018, 163: 148-156.
- [15] BABARIT A. On the park effect in arrays of oscillating wave energy converters[J]. **Renewable Energy**, 2013, 58: 68-78.
- [16] NESHAT M, MIRJALILI S, SERGIENKO N Y, *et al.* Layout optimisation of offshore wave energy converters using a novel multi-swarm cooperative algorithm with backtracking strategy: A case study from coasts of Australia[J]. **Energy**, 2022, 239: 122463.
- [17] BUDAL K. Theory for absorption of wave power by a system of interacting bodies[J]. **Journal of Ship Research**, 1977, 21(4): 248-254.
- [18] CHILD B F M, VENUGOPAL V. Optimal configurations of wave energy device arrays[J]. **Ocean Engineering**, 2010, 37(16): 1402-1417.
- [19] 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.
- [20] 方红伟, 宋如楠, 冯郁竹, 等. 基于差分进化的波浪能转换装置阵列优化[J]. **电工技术学报**, 2019, 34(12): 2597-2605.
- FANG Hongwei, SONG Runan, FENG Yuzhu, *et al.* Array optimization of wave energy converters by differential evolution algorithm[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2019, 34(12): 2597-2605.
- [21] 马宏达, 邓义斌, 郭强波. 基于遗传算法的二自由度波浪能装置阵列优化[J]. **太阳能学报**, 2022, 43(6): 264-269.
- MA Hongda, DENG Yibin, GUO Qiangbo. Optimization of 2-dof wave energy converters array based on genetic algorithm[J]. **Acta Energiæ Solaris Sinica**, 2022, 43(6): 264-269.
- [22] HASHIM F A, HOUSSEIN E H, HUSSAIN K, *et al.* Honey badger algorithm: New metaheuristic algorithm for solving optimization problems[J]. **Mathematics & Computers in Simulation**, 2022, 192: 84-110.
- [23] HAN E F, GHADIMI N. Model identification of proton-exchange membrane fuel cells based on a hybrid convolutional neural network and extreme learning machine optimized by improved honey badger algorithm[J]. **Sustainable Energy Technologies & Assessments**, 2022, 52: 102005.
- [24] 董海, 林国栋. 基于改进 HBA 算法的生鲜闭环供应链网络鲁棒优化设计[J]. **计算机应用研究**, 2022, 39(10): 3020-3025.
- DONG Hai, LIN Guodong. Robust optimization design of fresh closed-loop supply chain network based on improved honey badger algorithm[J]. **Application Research of Computers**, 2022, 39(10): 3020-3025.
- [25] NASSEF A M, HOUSSEIN E H, HELMY B E D, *et al.* Modified honey badger algorithm based global MPPT for triple-junction solar photovoltaic system under partial shading condition and global optimization[J]. **Energy**, 2022, 254: 124363.
- [26] BABU T S, RAM J P, DRAGIČEVIĆ T, *et al.* Particle swarm optimization based solar PV array reconfiguration of the maximum power extraction under partial shading conditions[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2018, 9(1): 74-85.
- [27] SERGIENKO N Y, CAZZOLATO B S, DING B, *et al.* An optimal arrangement of mooring lines for the three-tether submerged point-absorbing wave energy converter[J]. **Renewable Energy**, 2016, 93: 27-37.
- [28] WU G X. Radiation and diffraction by a submerged sphere advancing in water waves of finite depth[J]. **Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences**, 1995, 448(1932): 29-54.
- [29] HEMER M A, GRIFFIN D A. The wave energy resource along Australia's Southern margin[J]. **Journal of Renewable & Sustainable Energy**, 2010, 2(4): 043108.
- [30] 张海南, 游晓明, 刘升. 动态进化与交互学习机制融合的蚁群算法[J]. **信息与控制**, 2020, 49(3): 297-305.
- ZHANG Hainan, YOU Xiaoming, LIU Sheng. Ant colony algorithm based on dynamic evolution and interactive learning mechanism[J]. **Information & Control**, 2020, 49(3): 297-305.