

基于混合粒子群算法的波浪能发电集群优化方法

朱永强, 朱显浩

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 对波浪能发电集群的优化控制有助于波浪能的有效利用,为此文章提出了基于混合粒子群算法的波浪能发电集群优化方法。以直驱式发电装置为研究对象,探讨其构成发电集群短期尺度下稳定状态的数学模型,由简至繁依次考虑波浪动态压力、装置间辐射影响和遮挡效应,以便更准确地模拟一定密集度的波浪能发电装置部署下的实际效果。以集群功率最大化为优化目标,根据装置运动和海域能量约束,提出混合粒子群算法求解集群的最优参数,在传统算法基础上设定自适应惯性权重并加入交叉和变异操作,以应对复杂集群方程解空间的多峰性问题。算例结果验证了所述集群优化方法的有效性,求解质量良好;同时表明波浪能发电集群规模越大,装置之间的辐射影响越复杂,遮挡效应越明显。

关键词: 波浪能发电集群; 辐射影响; 遮挡效应; 集群优化; 混合粒子群算法

中图分类号: TK7; TM612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)02-0259-08

0 引言

海洋是地球上最大的能源宝库,据统计,全球每年波浪能总储量为 16 000~18 500 TW·h^[1]。波浪能利用装置种类繁多^[2,3]。据国际可再生能源署预测,到 2030 年全球海洋能源装置的装机容量有望达到 10 GW,是目前总装机容量的 20 倍^[4]。

波浪能发电尚未实现商业化的关键因素在于单位发电成本较高。因此,研究人员逐渐关注多装置与集群管理策略,意在通过大规模利用波浪能实现更高的能量收集效率。文献[5]在单体装置稳定运行条件下提出一种多单元协同控制策略,根据网络关系实现动态分配输出。文献[6]对几种波浪集群拓扑结构进行对比,分析建设环境、系统容量、离岸距离等因素对系统经济性和技术性的影响。文献[7]采用差分进化算法对集群进行优化排布。文献[8]研究了波浪的传输特性,对发电场内各装置进行优化布局,以改善功率波动性。文献[9,10]分析了集群布局、间隔距离对系统发电效率的影响,并提供了控制方案。目前,尽管波浪能发电集群的经济性已经得到了验证^[11],但集群控制和优化方面的研究仍相对有限。大多数研究仅专注于单个设备,未充分考虑集群内部装置间的相互作用与影响。

本文重点关注短期时间尺度下的波浪能发电装置及其构成集群的数学模型,探讨稳态环境

下的装置发电效率、运行状态和功率波动,优化集群的控制参数,以提高系统的整体效率。因此,分别考虑波浪对装置产生的动态压力、装置间辐射力对浮子影响、装置间遮挡效应造成的波浪能量损失,建立更加贴合实际效果的集群输出功率模型。在此基础上,提出一种基于混合粒子群的波浪能发电集群优化方法,用于应对集群优化模型存在局部极值的问题。混合粒子群算法摒弃了传统粒子群仅依靠跟踪极值来更新粒子位置的策略,通过粒子间交叉以及自身变异,更有效地搜索最优参数,保证求解质量。

1 波浪能发电装置建模

直驱式波浪能发电装置主要包括阿基米德浮子和永磁直线同步电机。浮子在波浪压力和气压力的作用下往复运动,通过机械传动机构驱动永磁直线同步电机,实现波浪能发电。浮子的受力可分为波浪激励力、阻尼力和弹力 3 种。根据线性规则波理论,系统经线性化后,直线电机产生的反电磁力可以表示为浮子纵向速度与位移的线性组合^[12]。依据牛顿第二定律,浮子运动方程可写为

$$(m_f+m_{add})\ddot{z}+(\beta_b+\beta_e)\dot{z}+(k_s+k_e)z=F_{wave} \quad (1)$$

式中: m_f 为浮子质量,kg; m_{add} 为附加水体质量,kg; z 为浮子纵向位移,m; β_b 为制动器阻尼系数,N/m; β_e 为发电机反电磁力阻尼系数,N/m; k_s 为浮

收稿日期: 2023-06-11。

作者简介: 朱永强(1975-),男,博士,副教授,研究方向为新能源发电与并网、综合能源系统。E-mail:zyq@ncepu.edu.cn

子总弹力系数, $N \cdot s/m$; k_e 为反电磁力弹性系数, $N \cdot s/m$; F_{wave} 为波浪施加在装置上的激励力, N 。

2 波浪能发电集群建模

为了探讨波浪对装置的作用及装置间的相互影响, 本文依次考虑波浪动态压力、装置间辐射影响和遮挡效应。波浪动态压力是影响波浪能发电装置机械特性和功率输出的主要因素之一。装置间辐射影响和装置间遮挡效应是指在一定规模的波浪集群中, 由于装置的密集分布, 会对彼此的捕获效率和功率输出产生影响。

2.1 波浪动态压力作用

波浪的振幅远小于水深, 非线性效应对波浪形态的影响较小, 因此可以将非线性波浪问题简化为线性波浪问题^[3]。将波浪简化为 Airy 波, Airy 波为一类解析解, 可用数学公式精确描述其形态和行为。此时非线性的自由面动力学条件可以线性化, 在二维平面内, Airy 波的速度势函数为

$$\varphi = \frac{Ag}{\sigma} \frac{\cosh k(D+h)}{\cosh kh} \sin(\sigma t - kx) \quad (2)$$

式中: φ 为水体速度势函数, m^2/s ; A 为波振幅, 即波峰或波谷到平均水平面的垂直高度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; σ 为波浪的圆周频率, 即 2π 时间内振动的次数, rad/s ; D 为装置所处水深, m ; k 为波数, 即 2π 距离内波的数目, rad/m ; h 为平均水面到海床的垂直距离, m ; t 为时间, s ; x 为波浪阵列的横向坐标, m 。

根据动力学条件, 可以得出 Airy 波动态压力:

$$F_h = S_f P_h = S_f \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \rho g A S_f \frac{\cosh k(D+h)}{\cosh kh} \cos(\sigma t - kx) = F_w \cos(\sigma t - kx) \quad (3)$$

式中: F_h 为波浪动态压力, N ; P_h 为波浪动态流场压强, Pa ; ρ 为水体密度, kg/m^3 ; S_f 为浮子的上方面积, m^2 ; F_w 为波浪动态压力幅值, N 。

由波的色散关系, 可以得出波数 k 和圆周频率 σ 的关系:

$$\sigma^2 = gk \frac{\sinh kh}{\cosh kh} = gk \tanh kh \quad (4)$$

浮子在垂直方向运动的角速度与波浪的角速度相同。若浮子开始位于平衡位置, 则可忽略其运动的暂态分量。设浮子运动的二阶常系数非齐次微分方程稳定解为

$$\begin{cases} z = Z_w \sin(\sigma t - kx - \varphi_w) \\ \dot{z} = V_w \cos(\sigma t - kx - \varphi_w) = \sigma Z_w \cos(\sigma t - kx - \varphi_w) \end{cases} \quad (5)$$

式中: Z_w 为浮子纵向位移的幅值, m ; φ_w 为波浪力超前浮子运动速度的相位, rad ; V_w 为浮子纵向运动速度幅值, m/s 。

考虑波浪动态压力作用时, 满足 $F_{wave} = F_w \cdot \cos(\sigma t - kx)$ 。求解式(1)得:

$$Z_w = \frac{\rho g A S_f \cosh k(D+h)}{\{(\beta_b + \beta_c)^2 gk \tanh kh + [(m_r + m_{add}) gk \tanh kh - k_s - k_e]^2\}^{0.5} \cosh kh} = \frac{F_w}{\{(\beta_b + \beta_c)^2 gk \tanh kh + [(m_r + m_{add}) gk \tanh kh - k_s - k_e]^2\}^{0.5}} \quad (6)$$

$$\varphi_w = \arccos \frac{(\beta_b + R_g)(gk \tanh kh)^{0.5}}{\{(\beta_b + \beta_c)^2 gk \tanh kh + [(m_r + m_{add}) gk \tanh kh - k_s - k_e]^2\}^{0.5}} \quad (7)$$

在发电装置参数一定的情况下, 浮子纵向位移的幅值与波浪动态压力幅值成正比; 浮子纵向速度和波浪力的相角差只与装置参数有关, 与波浪动态压力幅值无关。图 1(a), (b) 分别描述了该模型下波浪与发电装置的空间与时间变量。

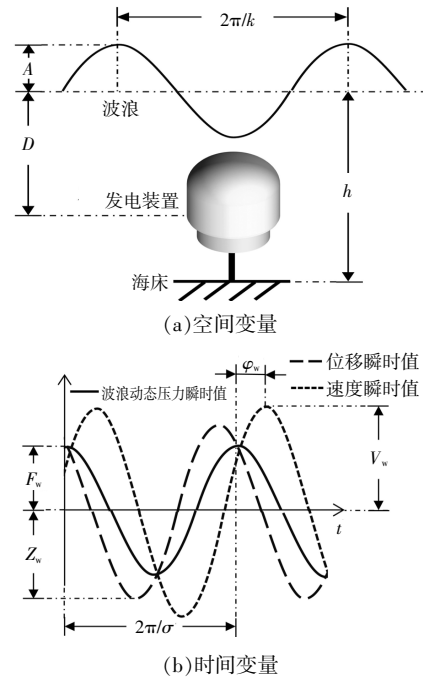


图 1 波浪与发电装置的空间与时间变量
Fig.1 Spatial and temporal variables for waves and generators

波浪能发电装置输出的有功功率 P 可以表示为

$$P = -F_w \dot{z} = \frac{1}{2} Z_w^2 \sigma (\beta_c^2 \sigma^2 + k_e^2)^{\frac{1}{2}} [\sin(2\sigma t - 2kx - 2\varphi_w + \varphi) + \sin\varphi] \quad (8)$$

式中: $\varphi = \arctan(\beta_c \sigma / k_e)$ 。

功率非周期分量和周期分量幅值可用反电磁力阻尼控制系数和弹性控制系数表示:

$$P_{ave} = \frac{F_w^2 \sigma (\beta_e^2 \sigma^2 + k_e^2)^{\frac{1}{2}} \sin \varphi}{2(\beta_b + \beta_e)^2 \sigma^2 + 2[(m_r + m_{add}) \sigma^2 - k_s - k_e]^2} \quad (9)$$

$$P_{per.am} = \frac{F_w^2 \sigma (\beta_e^2 \sigma^2 + k_e^2)^{\frac{1}{2}}}{2(\beta_b + \beta_e)^2 \sigma^2 + 2[(m_r + m_{add}) \sigma^2 - k_s - k_e]^2} \quad (10)$$

式中: P_{ave} 为功率非周期分量的幅值, W; $P_{per.am}$ 为功率周期分量的幅值, W。

波浪能发电装置输出功率的波动频率是波浪与浮子共振频率的两倍; 非周期分量的幅值小于周期分量的幅值, 在一个波浪周期内直线电机须要工作在发电机和电动机两种模式下。

2.2 考虑装置间辐射影响

浮子的运动会带动海域内水体形成辐射波, 集群内的辐射波会导致任意两个浮子间产生相互影响, 其传递效应表现为浮子所受辐射力。图 2 为 4 台装置组成集群的空间示意图, 描述了以装置 IV 为研究对象的集群空间变量。

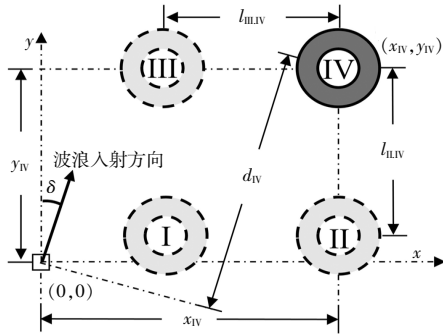


图 2 波浪能发电集群空间示意图

Fig.2 Spatial schematic of the wave power cluster

同样距离条件下, 浮子运动位移幅值越大, 辐射力越强; 同时, 辐射波在水中传播时能量会被水体吸收, 所以能量会随着距离增加而不断减少。第 j 个浮子在第 i 个浮子位置产生的辐射波振幅为

$$A_{ij} = Z_j e^{-s l_{ij}} = Z_j e^{-s \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \quad (11)$$

式中: A_{ij} 为第 j 个浮子在第 i 个浮子的位置产生的辐射波振幅, m; Z_j 为第 j 个浮子的运动位移幅值, m; l_{ij} 为第 i 个浮子和第 j 个浮子中心的距离, m; s 为水体的能量吸收系数, m^{-1} ; x_i, x_j, y_i, y_j 分别为第 i 台和第 j 台装置的横向和纵向坐标, m。

在 N 台发电装置组成的集群内, 第 i 个浮子所受辐射力为其他浮子对该装置产生的辐射力之和:

$$F_{rad,i} = \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{r,j} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{F_w A_{ij} \sin(\sigma t - \vartheta_{ij})}{A} \quad (12)$$

式中: $\vartheta_{ij} = kx_j + kl_j + \varphi_{wj}$; $F_{rad,i}$ 为第 i 个浮子的辐射合力, N; $F_{r,j}$ 为第 j 个浮子对第 i 个浮子产生的辐射力, N。

将辐射力和波浪动态压力结合起来考虑, 定义辐射力影响因子 $I_{rad,i}$ 表征集群内辐射力对浮子运动的影响。

$$I_{rad,i} = \frac{1}{A^2} \sum_{k=1, k \neq i}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N [A_{ik} A_{ij} \cos(\vartheta_{ik} - \vartheta_{ij})] + \frac{2 \sin k x_i}{A} \sum_{j=1, j \neq i}^N (A_{ij} \cos \vartheta_{ij}) - \frac{2 \cos k x_i}{A} \sum_{j=1, j \neq i}^N (A_{ij} \sin \vartheta_{ij}) \quad (13)$$

$I_{rad,i} > 0$ 时, 意味着在受到其他装置辐射影响后, 第 i 台发电装置所受合力超过了单机运行时的波浪动态压力, 此情形下集群内辐射波对每台装置的发电产生积极作用; 反之, 辐射影响对装置发电产生阻碍。

在考虑装置间辐射影响的基础上, 第 i 个装置浮子纵向运动位移幅值 Z_i 及平均输出功率 $P_{ave,i}$ 为

$$Z_i = [(-B_i + Z_w \cos k x_i)^2 + (C_i - Z_w \sin k x_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$P_{ave,i} = \frac{1}{2} Z_i^2 \sigma (\beta_e^2 \sigma^2 + k_e^2)^{\frac{1}{2}} \sin \varphi \quad (15)$$

式中: $B_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ij} \sin(kl_j + kx_j + \varphi_{wj})$; $C_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ij} \cos(kl_j +$

$kx_j + \varphi_{wj}$); $G_{ij} = \frac{Z_j e^{-s l_{ij}}}{A Z_w}$ 。

2.3 考虑装置间遮挡效应

波浪能指波浪在运动过程中具有的机械能, 包括波浪的势能和动能。在浮子相应的面积域内波浪输入的能量为

$$E_{in} = E_p + E_k = \frac{1}{8} \rho g H^2 S_t \quad (16)$$

式中: E_{in} 为与浮子相适应的面积域内波浪输入的能量, J; E_p, E_k 分别为波浪的势能和动能, J; H 为波高, 数值为波振幅 A 的两倍, m。

波浪的总能量和波高的平方成正比, 与波浪的传播速度、波长、周期等无关。根据麦考密克的波浪理论, 当浮子与波浪发生共振时, 第 i 台装置浮子吸收的能量为^[14]

$$E_{t,i} = \frac{1}{2} [(m_r + m_{add}) \sigma^2 + \rho g S_t] Z_i^2 \quad (17)$$

式中: $E_{t,i}$ 为第 i 个浮子吸收的能量, J。

装置间的遮挡效应:沿波浪传播方向,位于较前位置的装置会影响较后位置装置的波浪能量吸收和发电效率。波浪从特定方向涌来时,各装置会受到所有较前位置装置的阻挡,因此须修正各装置的能量捕获情况。

$$E_{in,i}=(1-\sum_{j=1}^N \xi_{ij})E_{in}=L_i E_{in} \quad (18)$$

式中: ξ_{ij} 为第*j*台装置对第*i*台装置的阻挡系数; $E_{in,i}$ 为修正后第*i*台装置吸收的能量; L_i 为流损因子,表征第*i*台装置受到遮挡效应的影响程度。

在工程应用中,可使用实验或数值模拟的方式来获取阻挡系数。在实际海域或者水槽中放置波浪能发电装置并记录波浪传播情况,测量波浪的高度或能量传输等参数,或者使用流体力学等方法,通过模拟波浪在装置附近的传播过程,获得装置对波浪的阻挡系数估计值。本文提供一种较为理想化的计算方法,如下所示:

$$\xi_{ij}=\begin{cases} 0, & d_i \leq d_j \\ \frac{E_{i,i}}{E_{in,i}} e^{-s d_j} \cos^2 \theta_{ij}, & d_i > d_j \end{cases} \quad (19)$$

$$d_i=(x_i^2+x_j^2)^{\frac{1}{2}} \cos(\arctan \frac{y_i}{x_i}-\frac{\pi}{2}+\delta) \quad (20)$$

式中: θ_{ij} 为波浪入射方向与第*i*台装置及第*j*台装置连线形成的夹角,rad; d_i 为第*i*台装置的迎波距离,m; δ 为波浪入射角度,rad。

式(20)是一种简化模型,实际情况中可能存在更多的影响因素和复杂性,具体的阻挡系数和能量捕获计算须要结合实际情况进行更精细的分析。在考虑装置间的遮挡效应情况下,浮子运动幅值为

$$Z_i=\frac{\rho g(1-\sum_{j=1}^N \xi_{ij})^{\frac{1}{2}} A S \cosh k(D+h)}{\{(\beta_n+\beta_e)^2 g k \tanh k h + [(m_r+m_{add}) g k \tanh k h - k_s - k_c]^2\}^{0.5} \cosh k h} \quad (21)$$

3 波浪集群控制参数优化方法

3.1 目标函数与约束条件

在充分考虑各装置之间相互影响的同时,为了确保整个集群在最佳工况下运行,尽可能使波浪能转化为电能,将集群控制参数的优化目标函数设为发电集群总功率的最大化:

$$\max P_{total}=\sum_{j=1}^N P_{ave,i} \quad (22)$$

在波浪能发电集群的优化问题中,设置约束条件是为了确保设计和操作的可行性,并满足系

统的可靠性、安全性和可持续性要求。在实际应用中,这些约束的上下限由多个因素决定,包括发电设备的技术特性、海域环境、系统运行限制及实践经验等。本文添加如下约束条件:①运动幅度限制,限制浮子的最大运动幅度,以确保装置在运行过程中不会超出安全范围;②运动速度限制,限制浮子的最大运动速度,以防止过快的运动对装置结构和系统造成损坏;③装置发电功率约束,每种波浪能发电设备都有其额定功率、效率范围以及允许的最大最小功率输出限制;④波浪资源约束,确保波浪能发电集群的总发电功率不超过可用的波浪能量总量。装置运动的幅度和速度限制一般由设备的技术特性决定,发电功率约束涉及到设备技术特性、系统运行限制等,波浪资源约束与海域环境息息相关。

$$\begin{cases} Z_{min} \leq Z_i \leq Z_{max} \\ V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \\ P_{ave,min} \leq Z_i \leq P_{ave,max} \\ 0 \leq E_{r,i} \leq E_{in,i} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $Z_{min}, Z_{max}, V_{min}, V_{max}, P_{ave,min}, P_{ave,max}$ 分别为各个变量的下限和上限。

3.2 基于混合粒子群的集群控制参数求解

发电集群内部具备多个物理过程,包括波浪能发电装置的动力学模型、波浪传播模型以及发电装置之间的相互干扰等,这构成了集群的非线性和多模态特性。因此模型的解空间呈现多峰性,存在多个局部极值。传统粒子群算法通过追随个体极值和群体极值实现寻优,随迭代次数增加,各粒子趋同,使得算法难以从局部最优解附近跳出^[15]。混合粒子群算法在动态惯性权重的基础上,引入了遗传算法中的交叉和变异机制,更有效地搜索最优解,进而最大限度地保证求解质量。

当环境及设计参数确定时,波浪能发电集群内每台装置的控制参数为2维参数,整个集群构成一个2*N*维优化系统。每次迭代粒子通过个体极值和群体极值更新自身的速度和位置,计算式为

$$U^j(k+1)=w(k)U^j(k)+c_1 r[B_{ind}^j(k)-W^j(k)]+c_2 r[B_p(k)-W^j(k)] \quad (24)$$

$$W^j(k+1)=W^j(k)+U^j(k+1) \quad (25)$$

式中: W^j 为第*j*个寻优粒子的位置,是由集群内

各装置控制参数组成的 $2N$ 维向量; w 为惯性权重; k 为当前迭代次数; U^j 为第 j 个寻优粒子的速度; c_1, c_2 分别为种群最优位置和个体最优位置的学习因子; r 为分布于 $[0, 1]$ 内的随机数; B_{ind}^j 为第 j 个粒子的最优适应度位置; B_p 为整个种群的最优适应度位置。

自适应惯性权重用于平衡粒子局部和全局搜索能力。迭代初期较大的惯性权重可使粒子倾向于全局搜索,避免陷入局部最优解,在迭代后期较小的惯性权重可使种群集中,提高收敛性能,为结果的质量提供保证。

$$w(k) = w_s - (w_s - w_e) / (k / T_{max})^2 \quad (26)$$

式中: w_s, w_e 分别为初始惯性权重和结束惯性权重; T_{max} 为最大迭代次数。

图 3 为基于混合粒子群算法的波浪能发电集群优化流程。在交叉操作中,两个或多个粒子的

信息被交换和融合,以生成新的个体。常见的交叉操作包括单点交叉、多点交叉、均匀交叉等,式(27)描述了第 j 个粒子和第 m 个粒子间的单点交叉操作。当粒子向种群最优粒子靠拢出现严重聚集时,将粒子中符合变异条件的粒子按照式(28)进行变异,增加种群的多样性,避免陷入局部最优解。在迭代初期,采用较大的交叉变异率,以提高全局寻优能力,随着迭代次数的增加,交叉变异率逐渐减小,以提高收敛精度。

$$\begin{cases} W^j(k+1) = W_{1-N}^j(k) + W_{N+1-2N}^m(k) \\ W^m(k+1) = W_{N+1-2N}^j(k) + W_{1-N}^m(k) \end{cases} \quad (27)$$

$$W^j(k+1) = a[rW_{max} + (1-r)W_{min}] + bW^j(k) \quad (28)$$

$$v = (v_{max} - v_{min})(k / T_{max})^2 + (v_{min} - v_{max})(2k / T_{max}) + v_{max} \quad (29)$$

式中: W_{1-N}^j 为 $2N$ 维向量,其前 N 个元素与第 j 个粒子位置前 N 个元素相同,后 N 个元素为 0, $W_{N+1-2N}^m, W_{N+1-2N}^j, W_{1-N}^m$ 同理; a, b 用于调节粒子的变异程度,且 $a+b=1$; G_{max}, G_{min} 分别为发电装置控制参数上、下限组成的向量; v 为粒子交叉变异率; v_{min}, v_{max} 为粒子交叉变异率的下限与上限。

4 波浪能发电集群算例分析与结果

4.1 波浪能发电集群计算模型与参数

搭建从波浪输入到功率转化的完整波浪能发电集群模型,计算不同模型下不同规模的集群功率输出情况。发电装置以及波浪条件参数见表 1。设置 3 种场景:①Model 1:考虑波浪动态压力;②Model 2:考虑波浪动态压力和装置间辐射影响;③Model 3:考虑波浪动态压力、装置间辐射影响和遮挡效应。

表 1 发电装置及波浪环境条件参数

Table 1 Power generation device and wave condition parameters

参数	数值	参数	数值
质量 m_i /kg	100.00	运动幅度上限 Z_{min} /m	1.85
附加水体质量 m_{add} /kg	32.00	运动幅度下限 Z_{min} /m	0.50
制动器阻尼系数 β_0 /N·s·m ⁻¹	403.00	运动速度上限 V_{max} /m·s ⁻¹	3.00
总弹力系数 k_s /N·m ⁻¹	992.00	运动速度下限 V_{min} /m·s ⁻¹	0.50
水体密度 ρ /kg·m ⁻³	998.20	平均功率上限 $P_{ave,max}$ /W	900.00
重力加速度 g /m·s ⁻²	9.80	平均功率下限 $P_{ave,min}$ /W	300.00
装置所处水深 D /m	0.80	波浪入射角 δ /($^\circ$)	90.00
受力面积 S_f /m ²	0.32	波数 k /rad·m ⁻¹	1.20
相邻装置间隔 l /m	2.15	波高 H /m	1.18

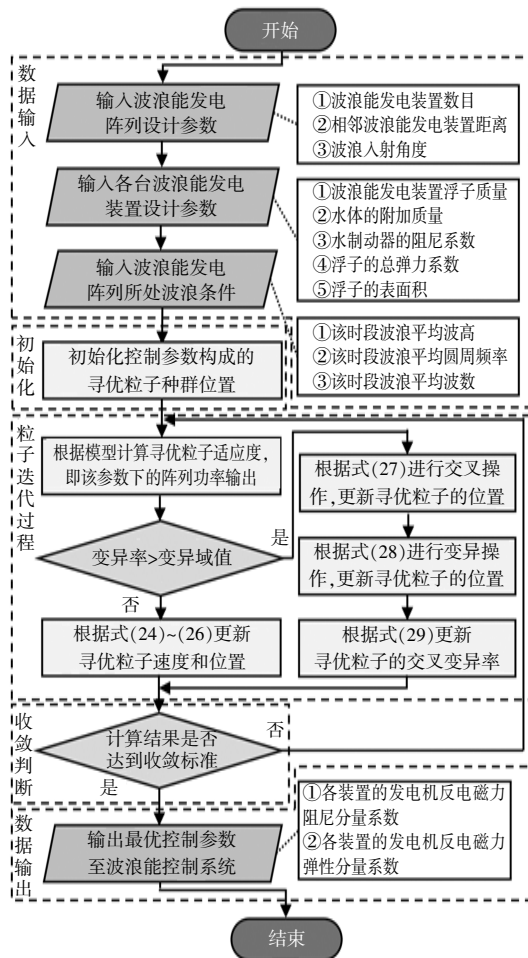


图 3 基于混合粒子群算法的波浪能发电集群优化流程
Fig.3 Hybrid particle swarm algorithm-based optimization process for wave power clusters

4.2 控制参数对单体装置的影响

波浪环境参数一定时, 发电机阻尼分量参数和弹性分量参数决定了单体装置的输出功率。图 4 描述了不同参数下的功率非周期分量 and 周期分量幅值。实线代表阻尼分量参数一定时不同弹性分量参数取值对功率影响, 虚线代表弹性分量参数一定时不同阻尼分量参数取值对功率影响, 两个箭头方向表示两个参数的递增方向。当曲线斜率小于零时, 说明沿右下方向选取参数时可以提升平均功率的同时减小功率波动性。由图 4 可见, 设计空间内存在输出功率非周期分量的极大值点, 该点对应参数下可获得最大输出功率 $P_{ave,max}$ 。

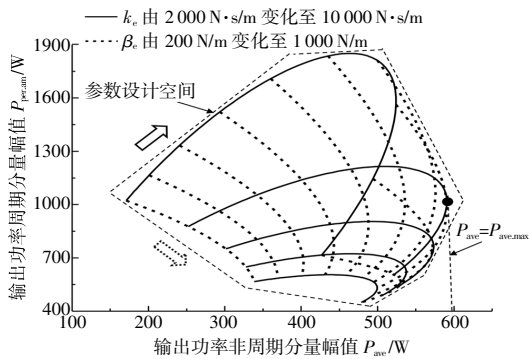


图 4 不同控制参数下的波浪能发电装置功率输出情况
Fig.4 Power output of wave generation device with different control parameters

4.3 波浪能发电集群优化计算结果

图 5 为 $N=4$ 时基于混合粒子群算法的集群优化过程。实线代表寻优粒子种群中历史最优值, 虚线代表寻优粒子种群中的历史最差值, 阴影表示两者之差。当种群中最优和最差的粒子适应度小于设定好的阈值, 即图 5 中虚线和实线接近重合的时候, 表示计算达成收敛。

为了对比改进前后算法的求解质量, 以 $N=4$ 为求解场景, 运用不同算法求解该布局下的模型。

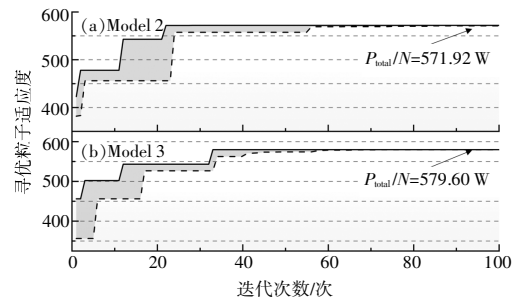


图 5 $N=4$ 下混合粒子群的优化过程
Fig.5 Cluster optimization process when $N=4$

运用不同算法对同一模型各进行 20 次求解, 当求解结果距离最优解大于 1% 时, 认为其陷入次优解。图 6 展示了不同算法的求解质量对比情况, 包括达到收敛时的平均迭代次数及陷入次优解次数。综合考虑自适应惯性权重和交叉变异的混合粒子群算法收敛性比传统算法更好, 与其余两种算法相比可以最大限度地避免陷入次优解。

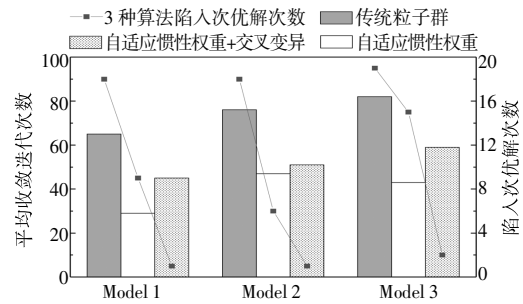


图 6 3 种算法的求解质量对比

Fig.6 Comparison of the solution quality of the three algorithms

表 2 为集群的详细计算结果。对比 Model 1 和 Model 2 可知, 在一定集群规模下, 各台波浪能发电装置所受的辐射影响相同, 其本质是由于各台装置所受波浪动态压力仅存在相位差别, 导致装置之间的辐射影响也仅存在相位差别, 并不会造成装置功率输出情况的不同。 $N=2$ 时, 辐射影响因子小于 0, 每台装置发电功率有所减小, 此时辐

表 2 不同计算模型下波浪能发电集群优化计算结果

Table 2 Calculation results of wave power cluster optimization under different models

计算模型	表征参数	$N=1$	$N=2$	$N=3$ (正三角形排布)	$N=4$ (正方形排布)
Model 1 (考虑波浪动态压力)	输出功率 P	$P_i=599.44\text{ W}$	$P_i=P_{ii}=599.44\text{ W}$	$P_i=P_{ii}=P_{iii}=599.44\text{ W}$	$P_i=P_{ii}=P_{iii}=P_{iiii}=599.44\text{ W}$
Model 2 (考虑波浪动态压力和装置间辐射影响)	辐射因子 I_{rad}		-0.18	-0.32	-0.36
	输出功率 P		$P_i=P_{ii}=558.93\text{ W}$	$P_i=P_{ii}=P_{iii}=537.52\text{ W}$	$P_i=P_{ii}=P_{iii}=P_{iiii}=571.92\text{ W}$
Model 3 (考虑波浪动态压力、装置间辐射影响和装置间遮挡效应)	流损因子 L		$L_i=0.97$ $L_{ii}=0.89$	$L_i=0.95$ $L_{ii}=L_{iii}=0.92$	$L_i=L_{ii}=0.97$ $L_{iii}=L_{iiii}=0.88$
	输出功率 P		$P_i=587.21\text{ W}$ $P_{ii}=530.55\text{ W}$	$P_i=569.10\text{ W}$ $P_{ii}=P_{iii}=555.75\text{ W}$	$P_i=P_{ii}=583.96\text{ W}$ $P_{iii}=P_{iiii}=575.25\text{ W}$

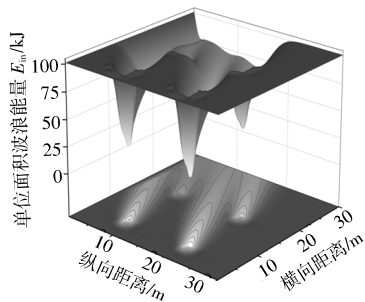
射影响起到了抑制发电的作用。当集群规模增加到 3 时,辐射影响因子持续减小,其绝对值小于 $N=2$ 时辐射影响因子的 2 倍,表明由于装置的运动幅值减小,导致辐射影响对装置的抑制作用减弱。当集群规模增加到 4 时,由于增加的装置 IV 距离装置 I 的距离为其他装置距离装置 I 的距离的 $\sqrt{2}$ 倍,其对发电装置 I 的运动辐射影响较小,所以辐射影响因子减小放缓。

在 Model 3 下,由于遮挡作用,迎波距离较大的发电装置会受到迎波距离小的装置影响。当 $N=2$ 时,装置 II 的运动幅值减小,其对装置 I 的辐射影响也减小,使装置 I 的发电状况优于 Model 2 下的发电状况;当 $N=3$ 时,由于装置呈正三角形排布,装置 I 对装置 II,III 的遮挡效应较 $N=2$ 规模下有所减弱;当 $N=4$ 时,装置 I,II 都会对装置 III,IV 形成遮挡,所以装置间的辐射影响减弱,发电效率提升。

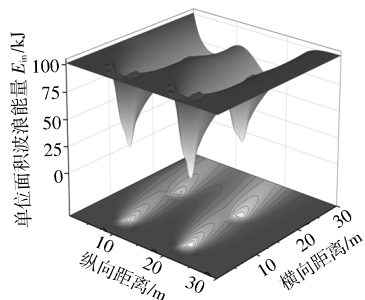
随着集群规模的扩大,装置间的辐射影响愈加复杂,同时遮挡效应也愈加显著,实施合理的集群控制与规划设计对于集群发电性能至关重要。

4.4 集群设计参数对发电的影响

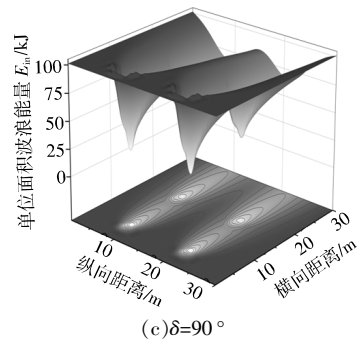
不同的波浪入射角度会影响装置之间的遮挡情况。图 7 展示了 $N=4$ 时不同波浪入射角度下的单位波浪能量分布情况。当入射角度由 50° 增加到 90° 时,装置 I 和装置 II 对迎波距离较大的装



(a) $\delta=50^\circ$



(b) $\delta=70^\circ$



(c) $\delta=90^\circ$

图 7 $N=4$ 时不同波浪入射角度下的波浪能量分布情况
Fig.7 Energy distribution at different wave incidence angles for $N=4$

置 III 和装置 IV 的遮挡效应更加显著,进一步导致装置 III 和装置 IV 接收到的波浪能量减小,影响装置运动和集群发电。

5 结论

本文针对多个直驱式波浪能发电装置构成集群的优化问题,建立短期时间尺度下的稳态集群发电模型,并提出了一种基于混合粒子群算法的集群优化方法用于求解最优参数,以实现效率最大化。本研究所得结论如下。

①针对波浪能发电集群的模型,本研究由简至繁依次考虑波浪动态压力、装置间辐射影响、装置间遮挡效应,可以更准确地模拟在一定密集度下部署波浪能发电装置的实际效果,从而更好地评估和设计波浪能发电装置的使用效率。

②为了应对波浪能发电装置集群模型的多峰性问题,在传统粒子群算法基础上,考虑动态变化惯性权重的同时,引入交叉和变异操作,使收敛速度较传统粒子群更快,同时可以最大限度地避免陷入次优解,具备良好的求解质量。

③在波浪动态压力模型中,集群内各装置的运动和功率输出一致。在考虑装置间辐射影响时,发电功率的抑制和激励作用与装置距离、波数、波高等因素有关。进一步考虑遮挡效应时,迎波距离较短的装置会抑制迎波距离较长的装置对波浪能量的吸收,进而降低后者发电效率,同时削弱后者对前者的辐射影响。辐射影响和遮挡效应会随着集群规模增大而复杂化,因此对波浪能发电集群的优化设计有着重要意义。

参考文献:

- [1] Reguero B G, Losada I J, Méndez F J. A global wave power resource and its seasonal, interannual and long-term

- variability[J].Applied Energy, 2015, 148:366–380.
- [2] 邓义斌, 马宏达, 黄燕玲, 等.一种二自由度浮子式波浪能转换装置的设计与仿真计算 [J]. 可再生资源, 2021, 39(11):1556–1562.
- [3] Lopez I, Andreu J, Ceballos S, et al. Review of wave energy technologies and the necessary power–equipment [J].Renew Sustain Energy Rev, 2013, 27:413–34.
- [4] International Renewable Energy Agency. Fostering a blue economy: offshore renewable energy [EB/OL].<https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Fostering-a-blue-economy-offshore-renewable-energy>, 2021–02–15.
- [5] Hong L, Bo Z, Li Q, et al.Advection–Based Coordinated Control for Wave–Energy Converter Array [J].Energies, 2019, 12(18):3567.
- [6] 段春明, 朱永强.波浪能、潮流能发电场电力系统研究 [J].分布式能源, 2017, 2(6):31–37.
- [7] 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.
- [8] 顾丽玲, 秦川, 鞠平, 等.直驱式波浪能发电场的布局优化研究[J].可再生资源, 2017, 35(3):467–474.
- [9] De Andr S A D, Guanche R, Meneses L, et al. Factors that influence array layout on wave energy farms [J]. Ocean Engineering, 2014, 82:32–41.
- [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] Zhong Q, Yeung R W.An efficient convex formulation for model–predictive control on wave–energy converters [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2018, 140(3):031901.
- [12] 康庆, 肖曦, 聂赞相, 等.直驱型海浪发电系统输出功率优化控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3):24–29.
- [13] 陈圣涛, 钟兢军, 孙鹏. 基于线性波理论的波浪数值模拟[A].第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下)[C].北京:海洋出版社, 2015.
- [14] 游亚戈, 李伟, 刘伟民, 等.海洋能发电技术的发展现状与前景[J].电力系统自动化, 2010, 34(14):1–12.
- [15] 陈晓华, 吴杰康, 陈盛语, 等.基于改进粒子群算法的微电网经济运行优化方法 [J]. 黑龙江电力, 2023, 45(1):23–29.

Wave energy converter cluster optimization method based on hybrid particle swarm algorithm

Zhu Yongqiang, Zhu Xianhao

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The optimal control of wave energy converter clusters helps to make full use of wave resources, for which a wave power cluster optimization method based on a hybrid particle swarm algorithm is proposed. Direct–driven wave power generators are taken as the research object to explore the mathematical model for the short–term scale of the steady state of power generation clusters. Wave dynamic pressure, radiation influence among devices and shading effect among devices are considered in order to simulate more accurately the actual effect of deploying a certain density of wave energy devices. With wave cluster power maximization as the optimization objective, a hybrid particle swarm algorithm is proposed to solve the optimal parameters of the power generation cluster taking into account the motion of the power generation devices and the energy constraints of the sea area. Crossover and mutation operations are added to the traditional algorithm to cope with the problem of multi–peakability in the solution space of the complex equations. The results of the algorithms verify the effectiveness of the cluster optimization method with good solution quality. They also show that the larger the size of the wave power generation cluster, the more complex the radiative influence between the devices and the more obvious the shading effect.

Keywords: wave energy converter cluster; radiation effects; shading phenomena; cluster optimization; hybrid particle swarm algorithm