

基于改进狮群算法的最大功率跟踪控制研究

潘海鹏, 吴小峰, 雷美珍

(浙江理工大学信息科学与工程学院, 浙江 杭州 310000)

✉ pan@zstu.edu.cn; 897794076@qq.com; leimeizhen_lmz@163.com



摘要:针对直驱式波浪发电系统在实际海域中输出功率低的问题,设计了基于改进狮群算法的最大功率跟踪控制方案。该算法引入 Tent 混沌映射、差分进化算法的变异机制和灰狼优化算法的捕猎机制对基础狮群算法(Lion Swarm Optimization, LSO)进行改进。仿真结果表明,在规则海浪的情况下,改进狮群算法的能量捕获率比基础狮群算法的能量捕获率高约 17.46%,比遗传算法的能量捕获率高约 5.99%。在非规则海浪的情况下,改进狮群算法的能量捕获率比基础狮群算法的能量捕获率提升了约 23.16%,比遗传算法的能量捕获率提升了约 18.15%。仿真结果证明该算法能够有效提高直驱式波浪发电系统的输出功率。

关键词:直驱式波浪发电系统;非规则海浪;狮群算法;最大功率跟踪控制

中图分类号:TP18 **文献标志码:**A

Research on Maximum Power Tracking Control Based on Improved Lion Swarm Optimization

PAN Haipeng, WU Xiaofeng, LEI Meizhen

(Faculty of Information Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310000, China)

✉ pan@zstu.edu.cn; 897794076@qq.com; leimeizhen_lmz@163.com

Abstract: Aiming at the problem of low output power of direct drive wave power generation system in actual sea area, this paper proposes to design a maximum power tracking control scheme based on the improved Lion Swarm Optimization. The algorithm draws on Tent chaos mapping, variation mechanism of Differential Evolution algorithm and hunting mechanism of Gray Wolf Optimization algorithm to improve the basic Lion Swarm Optimization (LSO). The simulation results show that under the condition of regular waves, the energy capture rate of the improved LSO is about 17.46% higher than that of the basic LSO, and about 5.99% higher than that of the genetic algorithm. In the case of irregular waves, the energy capture rate of the improved LSO is about 23.16% higher than that of the basic LSO, and about 18.15% higher than that of genetic algorithm. The simulation results prove that the proposed algorithm can effectively improve the output power of the direct drive wave power generation system.

Key words: direct drive wave power system; irregular sea wave; Lion Swarm Optimization; maximum power tracking control

0 引言(Introduction)

全球能源供应的不断减少和环境污染问题日益严峻,人类更加积极地寻找可持续发展的新型能源。波浪能是一种储量丰富且开发前景乐观的可再生能源^[1]。因此,合理地开发波

浪能,能够有效地缓解人类的能源危机。

最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)是当今新能源领域的研究热点,已成为提高光伏发电^[2]和风力发电^[3]系统效率的一种有效方法。WANG等^[4]提出了一种变

步长扰动观察法,通过对步长的自适应调节,减小了系统在最大功率点的振荡,提高了能量的转换效率,但仅考虑了规则海浪波的情况,在实际的非规则海浪波中可能无法达到仿真的效果。潘海鹏等^[5]将遗传算法引入波浪发电最大功率点跟踪控制中,采用遗传算法计算发电系统最大功率点对应的参数,实现发电系统在非规则波浪情况下的最大功率跟踪控制,但发电系统最大功率点对应的参数易陷入局部最优。

通过智能优化算法求解发电系统的最优参数,是实现波浪发电最大功率输出的有效途径之一。本文采用了基于改进狮群算法的最大功率点跟踪算法,引入 Tent 混沌初始化、差分进化算法和灰狼优化算法后,仿真结果表明在非规则海浪的情况下,该方法能提高直驱式波浪发电系统的最大功率输出。

1 直驱式波浪发电系统数学模型 (Mathematical model of direct drive wave power generation system)

图1为直驱式波浪发电系统的结构示意图,该发电系统主要由浮子、永磁同步发电机和变流器等部分组成。浮子和永磁同步发电机的动子直接相连,动子通过浮子的运动进行垂直方向的运动,动子切割磁场,生成电能,产生的交流电再通过变流器转换直流电,并与负载连接。

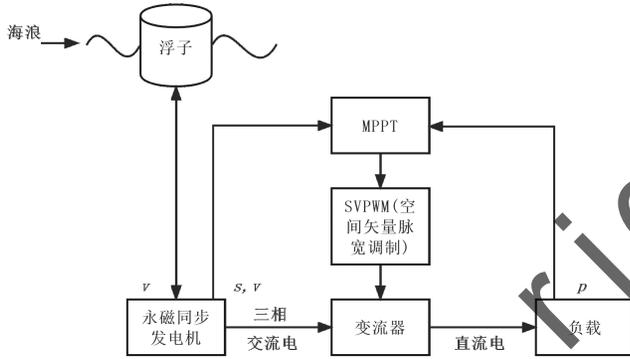


图1 直驱式波浪发电系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of direct drive wave power system

浮子在海浪中受到多个方向力的作用,但永磁同步发电机的动子只在竖直方向上运动,所以只分析浮子在垂直方向上的运动,根据牛顿第二定理可得^[6]:

$$m\ddot{z}(t) = F_p(t) + F_e(t) + F_r(t) + F_b(t) - mg \quad (1)$$

公式(1)中, m 表示浮子的质量,单位为 kg; $\ddot{z}(t)$ 表示浮子的加速度,单位为 m/s^2 ; $F_p(t)$ 表示发电机的电磁力,单位为 N; $F_e(t)$ 表示海浪激励力,单位为 N; $F_r(t)$ 表示海浪辐射力,单位为 N; $F_b(t)$ 表示浮子受到的浮力,单位为 N; g 表示重力加速度,单位为 m/s^2 。

假如浮子是圆柱状,则浮子所受到的浮力正比于其偏移的距离,假设浮子在未受到海浪作用力时的位置为平衡位置,则:

$$F_b(t) = -\rho g z(t) + mg = -Kz(t) + mg \quad (2)$$

公式(2)中, ρ 表示海水密度,单位为 kg/m^3 ; $z(t)$ 表示浮子的位移,单位为 m; K 表示静浮力系数。

在规则海浪波驱动的直驱式波浪发电系统中,永磁同步发电机的电磁力与速度、位移之间的关系可以表示如下^[7]:

$$F_p(t) = -r_g \dot{z}(t) - k_g z(t) \quad (3)$$

公式(3)中, r_g 表示吸收有功功率的阻尼系数; k_g 表示吸收无功功率的弹性系数; $\dot{z}(t)$ 表示浮子的速度,单位为 m/s 。

结合公式(1)至公式(3),可得到系统的动力学方程:

$$(m_a + m)\ddot{z}(t) + (R_a + r_g)\dot{z}(t) + (K + k_g)z(t) = F_e(t) \quad (4)$$

公式(4)中, m_a 表示海浪频率趋于无穷时的附加质量,单位为 kg; R_a 表示阻尼系数。

忽略永磁同步发电机的电磁损耗,系统的瞬时功率可以表示如下:

$$P(t) = -F_p(t)\dot{z}(t) \quad (5)$$

波浪发电输出的功率并不恒定,会随着浮子运动不断发生变化,系统的瞬时功率无法反映波浪发电的特点,因此有必要对一段时间内系统输出的平均功率进行研究。为此,从频域上分析系统可以得到更好的效果,公式(4)在频域上的表达式如下:

$$F_e(\omega) = \dot{z}(\omega) \left[R_a + r_g - \frac{K + k_g}{\omega} + j\omega(m_a + m) \right] \quad (6)$$

直驱式波浪发电系统输出的复功率的实部可以表示为从海浪中提取的平均功率^[8]:

$$P(\omega) = -R_e \left[\frac{1}{\sqrt{2}} F_p(\omega) \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{z}(\omega) \right] \quad (7)$$

发电系统输出的平均功率:

$$P(\omega) = \frac{|F_p(\omega)|^2}{8R_a} \left\{ 1 - \left| \frac{R_a - r_g - j \left[\omega(m_a + m) - \frac{K + k_g}{\omega} \right]}{R_a + r_g + j \left[\omega(m_a + m) - \frac{K + k_g}{\omega} \right]} \right|^2 \right\} \quad (8)$$

从公式(8)中可以看出,直驱式波浪发电系统的理论最大功率:

$$P_{\max}(\omega) = \frac{|F_p(\omega)|^2}{8R_a} \quad (9)$$

公式(8)中的最大功率是在规则海浪波的情况下得出的直驱式波浪发电系统的最大功率,从中可以看出要实现最大功率跟踪控制,可以通过计算解出最大功率点对应的 r_g 和 k_g ,而在实际海域中的海浪状况是不断变化的,根据线性叠加的原理,实际海域中的海浪可以等效成为无数个不同的正弦波组合。文献[9]和文献[10]中提出可以将实际海域中的不规则海浪波分解成若干个正弦波,并建立海浪频谱表征海浪的状态。

根据海浪波谱和线性叠加原理可得到海浪波高和海浪激励力之间的公式^[11]:

$$\delta(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \epsilon_i) \quad (10)$$

公式(10)中, $\delta(t)$ 表示海浪波高,单位为 m; A_i 表示第 i 个海浪波的幅值,单位为 m; ω 表示海浪的频率,单位为 rad/s ; ϵ_i 表示分布在 $[0, 2\pi]$ 的随机偏差角。频率等分法是将所取得的频率平均划分为 n 个区间。

通过对非规则海浪和规则海浪波之间关系的分析,可以得到系统在非规则海浪情况下的平均输出功率:

$$P(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{|F_P(w_i)|^2}{8R_a} \left\{ 1 - \left| \frac{R_a - r_g - j \left[w_i(m_a + m) - \frac{K + k_g}{w_i} \right]}{R_a + r_g + j \left[w_i(m_a + m) - \frac{K + k_g}{w_i} \right]} \right|^2 \right\} \quad (11)$$

从公式(11)中可以看出,非规则海浪驱动下的波浪发电系统也是通过计算出最大功率点所对应的 r_g 和 k_g , 达到发电系统的最大功率输出。

2 基于改进 LSO 的 MPPT 控制算法 (MPPT control algorithm based on improved LSO)

2.1 基础的 LSO

LSO 是将问题的最优解视为猎物所在的位置,将各头狮子的位置作为可行解。狮群算法分为成年狮和幼狮,成年狮中包括 1 头狮王(公狮)和若干头母狮,狮王的位置是每代狮群中适应度最好的位置。狮群算法的步骤如下。

(1)初始化参数:随机生成 N 头狮子的位置,成年狮的数量为 NL ,其中公狮的数量为 1 头,其余为母狮的数量,幼狮的数量为 $N - NL$,其中 NL 取值范围如下:

$$2 \leq NL \leq \frac{N}{2} \quad (12)$$

(2)适应度计算:计算适应度,将个体历史最优位置设置为各狮子当前的位置,将适应度最好的位置设为狮王的位置。

(3)狮群位置更新:捕猎中不同狮子的位置移动方式不同,狮王围绕最佳位置进行小范围移动,位置更新公式如下:

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{g}^k (1 + \gamma \|\mathbf{p}_i^k - \mathbf{g}^k\|) \quad (13)$$

母狮在捕食的过程中需要与另 1 头母狮协作,更新位置如下:

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \frac{\mathbf{p}_i^k + \mathbf{p}_c^k}{2} (1 + \alpha_f \gamma) \quad (14)$$

幼狮更新位置如下:

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \begin{cases} \frac{\mathbf{g}^k + \mathbf{p}_i^k}{2} (1 + \alpha_c \gamma), & a < \frac{1}{3} \\ \frac{\mathbf{p}_m^k + \mathbf{p}_i^k}{2} (1 + \alpha_f \gamma), & \frac{1}{3} \leq a < \frac{2}{3} \\ \frac{\bar{\mathbf{g}}^k + \mathbf{p}_i^k}{2} (1 + \alpha_c \gamma), & \frac{2}{3} \leq a < 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\alpha_f = \text{step} \cdot e^{\left(\frac{-30}{T}\right)^{10}} \quad (16)$$

$$\alpha_c = \text{step} \cdot \left(\frac{T-t}{T}\right) \quad (17)$$

$$\text{step} = 0.1 \overline{(\text{high} - \text{low})} \quad (18)$$

公式(15)至公式(18)中, α_f 表示母狮移动范围扰动因子; α_c 表示幼狮移动范围扰动因子; step 表示狮子在活动范围内最大的活动步长; γ 表示依照正态分布 $N(0, 1)$ 产生的随机数; \mathbf{p}_i^k 表示第 i 头狮子在第 k 代的历史最优位置; \mathbf{g}^k 表示第 k 代群体的最优位置; \mathbf{p}_c^k 表示第 k 代母狮群中随机挑选的一个捕猎协作伙伴的历史最优位置; \mathbf{p}_m^k 表示幼狮跟随母狮的第 k 代历史最佳位置; a 表示均匀分布在 $[0, 1]$ 的随机数; $\bar{\mathbf{g}}^k$ 表示第 k 头幼狮在捕猎范围内被驱赶的位置,通过如下公式确定:

$$\bar{\mathbf{g}}^k = \overline{\text{low}} + \overline{\text{high}} - \mathbf{g}^k \quad (19)$$

公式(19)中, $\overline{\text{low}}$ 和 $\overline{\text{high}}$ 分别是狮子活动范围内的下限和上限,对于幼狮的位置更新,是一种精英反向学习思想,有利于避免算法陷入局部最优。

(4)适应度对比:通过迭代更新后的种群适应度与上一代适应度做对比,若本次种群的适应度更好,则将上一代中的自身历史最优位置和种群最优位置替换掉,使解向最优解靠近。

(5)判断终止条件:将当前的适应度与上一次的适应度做对比,若两者间的误差不大于当前适应度的 5%,并算法的迭代次数为 15 次以上,则结束算法,输出最优解,否则返回“步骤(3)”,直至迭代次数为最大时,输出最优解。

2.2 LSO 的改进

2.2.1 混沌映射的种群初始化

为了保证初始化种群的均匀分布且具备多样性,在算法的初始化群体中引入 Tent 混沌映射,混沌映射具有随机性、遍历性的特点,常被用作优化算法的一种改进方法,它有利于维持种群的多样性和提高算法的局部搜索能力, Tent 混沌映射生成的序列如下:

$$T(n+1) = \begin{cases} \frac{T(n)}{u}, & 0 \leq T(n) < u \\ \frac{1-T(n)}{1-u}, & u \leq T(n) < 1 \end{cases} \quad (20)$$

公式(20)中, n 表示种群个数; u 表示均匀分布在 $[0, 1]$ 的随机数。结合 Tent 混沌映射,进一步生成搜索区域内狮群的初始群体位置:

$$\mathbf{x}_i = \text{low} + T(n) \times (\text{high} - \text{low}) \quad (21)$$

2.2.2 母狮的位置更新机制改进

针对狮群活动范围较大时,狮群位置容易越界,在母狮的位置更新中引入差分进化算法,则母狮的位置更新如下:

$$\alpha = e^{\left(\frac{1-k_{\max}}{k_{\max}+1-k}\right)} \quad (22)$$

$$F = F_c \times 2^\alpha \quad (23)$$

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \lambda (\mathbf{p}_i^k - \mathbf{x}_i^k) + F \times (\mathbf{x}_{i1}^k - \mathbf{x}_{i2}^k) \quad (24)$$

公式(22)至公式(24)中, k_{\max} 表示狮群最大的迭代次数; F_c 表示差分进化算法的参数; $\mathbf{x}_i^k, \mathbf{x}_{i1}^k, \mathbf{x}_{i2}^k$ 表示 3 头不同母狮的位置; λ 表示均匀分布在 $[0, 1]$ 的随机数。改进后,可以让狮群位置不易越界且不易于陷入局部最优,并且向狮群的最优位置靠近。

2.2.3 幼狮的位置更新机制改进

为了大部分幼狮能向最优位置和母狮靠近,其余幼狮随机游走,在幼狮的位置更新中引入灰狼优化算法中的狼群的捕猎机制,则幼狮的位置更新如下:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1 = \mathbf{g}^k - A_1 \cdot D_g \\ \mathbf{x}_2 = \mathbf{p}_i^k - A_2 \cdot D_i \\ \mathbf{x}_3 = \mathbf{p}_b^k - A_3 \cdot D_b \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} D_g = |C_1 \cdot \mathbf{g}^k - \mathbf{x}_i^k| \\ D_i = |C_2 \cdot \mathbf{p}_i^k - \mathbf{x}_i^k| \\ D_b = |C_3 \cdot \mathbf{p}_i^k - \mathbf{x}_i^k| \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} A = a \cdot (2 \cdot \text{rand} - 1) \\ C = 2 \cdot \text{rand} \\ a = 2 \cdot (1 - k/k_{\max}) \end{cases} \quad (27)$$

$$x_i^{k+1} = \begin{cases} \text{low} + \text{rand} \otimes (\text{high} - \text{low}), \text{rand} < p \\ \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

公式(25)至公式(28)中, rand 表示 $[0, 1]$ 之间的随机数向量; p_k^i 表示第 k 代随机一头母狮的历史最优位置; p 表示幼狮随机游走的概率, 一般不会大于 0.4。改进后的幼狮位置更新机制可以使狮群算法的收敛速度加快, 不易陷入局部最优。

2.3 改进狮群算法在 MPPT 中的应用

改进狮群算法需要设置的参数少, 性能良好, 适用于求解直驱式波浪发电系统的最大功率跟踪控制优化问题。改进狮群算法在发电系统的具体应用如下。

(1) 初始化参数: 随机生成 50 头狮子的位置, 其中狮王的数量为 1 头, 母狮的数量为 9 头, 幼狮的数量为 40 头, 最大迭代次数设为 100 次。

(2) 适应度计算: 将公式(8)作为适应度函数, 将适应度最好的位置设为狮王的位置。

(3) 狮群位置更新: 根据公式(13)、公式(24)和公式(28)更新狮王、母狮和幼狮的位置。

(4) 适应度对比: 通过迭代更新后种群的适应度与上一代适应度做对比, 若本次种群的适应度更好, 则将上一代中的自身历史最优的 r_g 、 k_g 和种群最优的 r_g 、 k_g 替换掉, 使解向最优解靠近。

(5) 判断终止条件: 将当前的适应度与上一次的适应度做对比, 若两者间的误差不大于当前适应度的 5%, 并且算法的迭代次数为 15 次以上, 则结束算法, 输出最优解, 否则返回“步骤(3)”, 直至迭代次数为最大时, 输出最优解。

改进狮群算法的算法流程如图 2 所示。

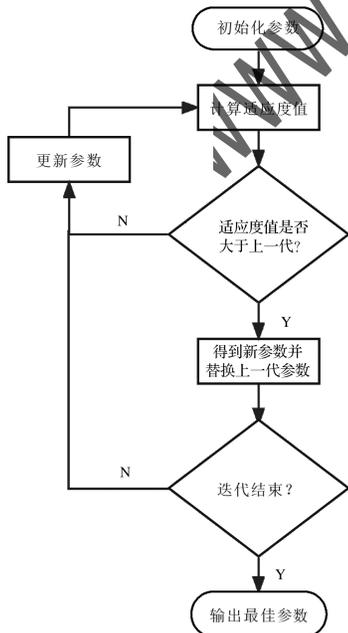


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

3 仿真分析(Simulation analysis)

在 MATLAB 的仿真工具 Simulink 中搭建直驱式波浪发电系统的仿真模型, 将提出的改进狮群算法与基础狮群算法以及遗传算法进行对比, 证明本文所提算法的可行性和有效性。其中, 仿真模型的参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数

Tab.1 Parameters of the simulation system

参数	符号	数值
海浪周期	T_p	4 s
有效波高	H	0.4 m
浮子质量	m	45 kg
附加质量	m_a	0 kg
阻尼系数	R_a	300 N/(m · s ⁻¹)

智能优化算法辨识最优参数的速度对于直驱式波浪发电系统至关重要, 因此进行 20 次仿真对比改进狮群算法、遗传算法及基础狮群算法的运行时间(如图 3 所示), 在 20 次仿真时间中, 改进狮群算法的时间略长于遗传算法和基础狮群算法, 运行时间集中于 0.3~0.4 s, 而本文研究中的海浪周期为 4 s, 海浪周期内可以实现最优参数的实时计算。

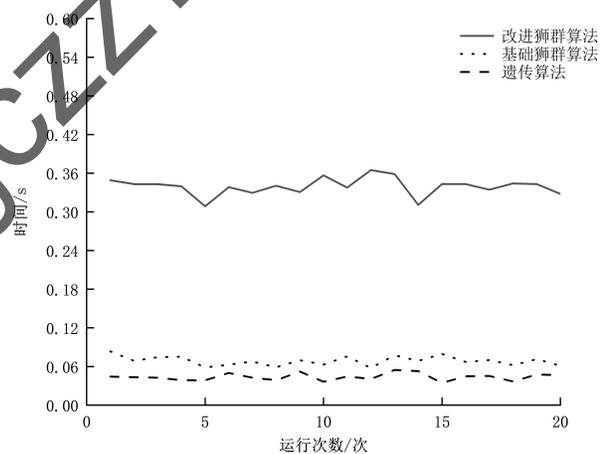
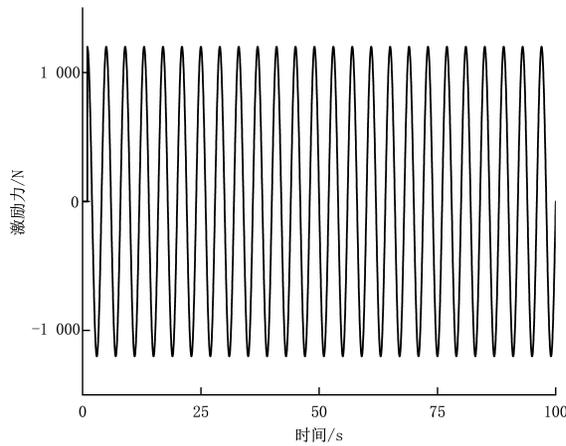


图 3 三种控制算法运行时间对比

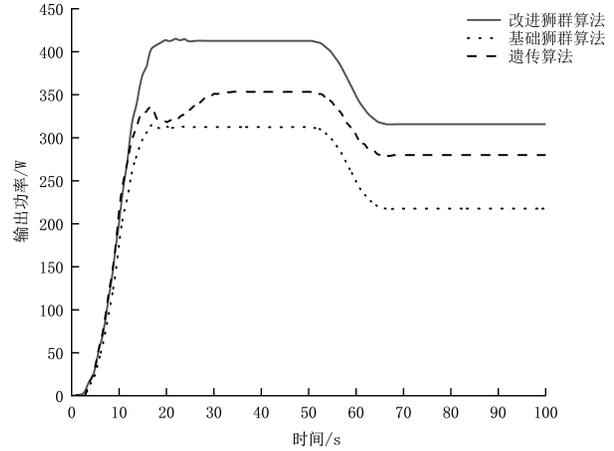
Fig. 3 Comparison of the running time of three algorithms

图 4 是对模拟规则海浪情况下的改进狮群算法、遗传算法及基础狮群算法的对比结果, 图 4(a)是模拟海浪激励力初始条件为 $F_e = 1200 \sin(\frac{\pi}{2}t)$ 时的海浪情况, 图 4(b)是三种控制算法在规则海浪情况下的功率输出对比。

由图 4 可知, 在规则海浪的情况下, 改进狮群算法、基础狮群算法和遗传算法分别在 4 个海浪周期、6 个海浪周期和 8 个海浪周期时达到最大功率输出点, 改进狮群算法的响应速度比基础狮群算法提高了 0.5 倍, 比遗传算法提高了 1 倍。改进狮群算法、基础狮群算法和遗传算法的平均输出功率分别为 396.43 W、337.51 W 和 374.03 W。由此可知, 改进狮群算法的输出功率比基础狮群算法的输出功率高约 17.46%, 比遗传算法的输出功率高约 5.99%。



(a)海浪激励力曲线

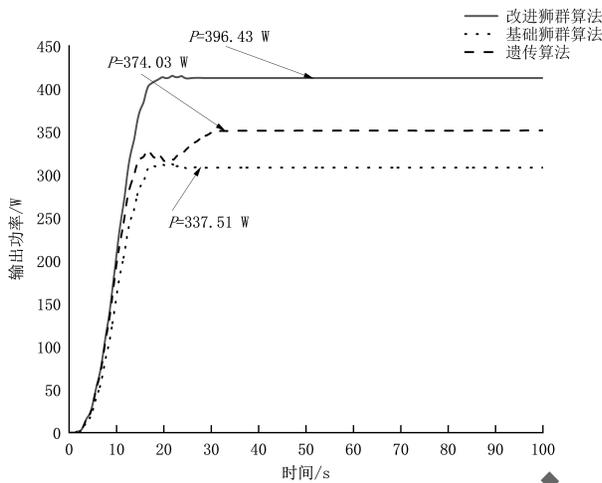


(b)输出功率曲线

图5 波浪幅值变化的仿真

Fig. 5 Simulation of wave amplitude change

如图6是对模拟规则海浪情况下改进狮群算法、基础狮群算法和遗传算法的对比,图6(a)是模拟海浪激励力初始条件为 $F_e = 1\ 200\sin(\frac{\pi}{2}t)$,在50 s时引入一个时长为4 s、作用力为200 N的海浪情况,图6(b)是三种控制算法在规则海浪情况下的功率输出对比。

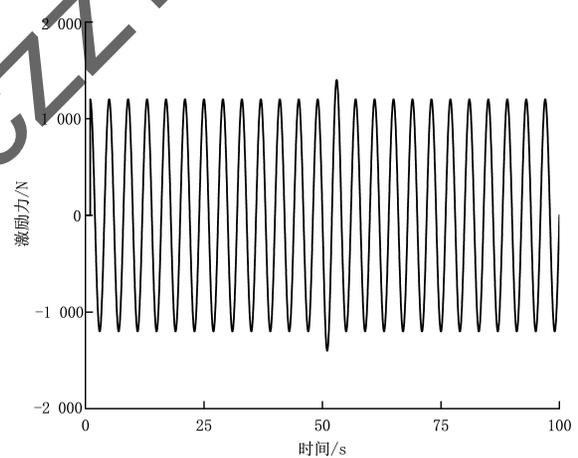


(b)输出功率曲线

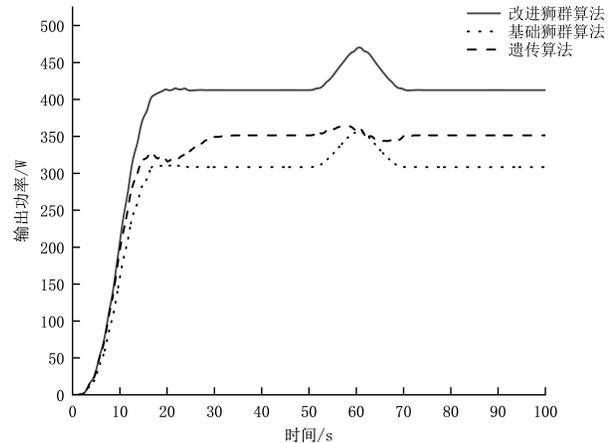
图4 规则海浪下的仿真

Fig. 4 Simulation under regular waves

图5是模拟在波浪激励力幅值变化情况下的改进狮群算法、基础狮群算法和遗传算法的对比,图5(a)是模拟海浪激励力初始条件为 $F_e = 1\ 200\sin(\frac{\pi}{2}t)$,在50 s时海浪激励力幅值突然变化为 $F_e = 1\ 000\sin(\frac{\pi}{2}t)$ 的海浪情况,图5(b)是三种控制算法在规则海浪情况下的功率输出对比。



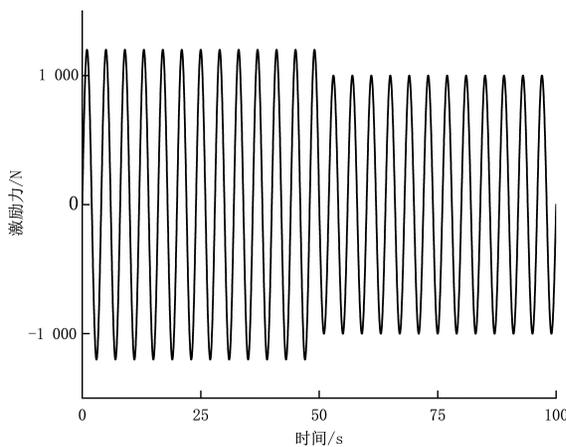
(a)海浪激励力变化曲线



(b)输出功率曲线

图6 海风扰动下的仿真

Fig. 6 Simulation under sea wind disturbance



(a)海浪激励力变化曲线

由图 5 和图 6 可知,当模拟海浪条件发生变化后,改进狮群算法相比基础狮群算法和遗传算法,仍能够维持较高的功率输出。

根据非规则海浪的叠加原理,通过仿真得到非规则的海浪激励力,则发电系统在非规则海浪情况下的输出功率的仿真结果如图 7 所示。

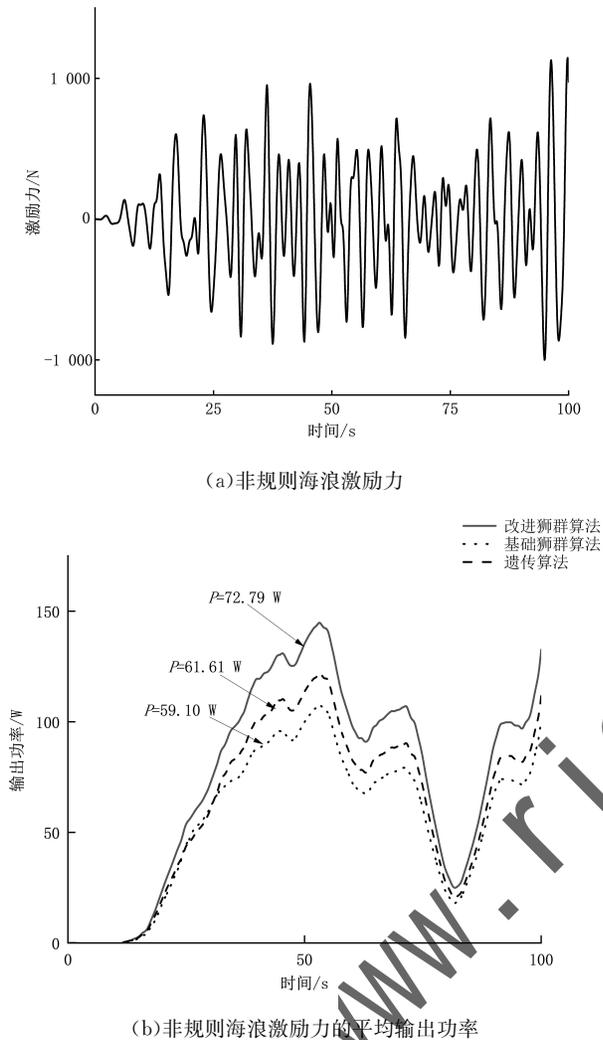


图 7 非规则海浪下的仿真

Fig. 7 Simulation under irregular ocean waves

由图 7 可知,采用改进狮群算法的最大功率跟踪点的跟踪效果明显要好于其他两种算法,采用改进狮群算法的平均输出功率为 72.79 W,而采用遗传算法和基础狮群算法的平均功率分别为 61.61 W 和 59.10 W。可以看出,改进狮群算法比遗传算法的能量捕获率提升了约 18.15%,比基础狮群算法提升了约 23.16%。

4 结论(Conclusion)

本文对直驱式波浪发电系统进行建模,针对直驱式波浪发电系统在实际海域中输出功率低的问题,提出引入 Tent 混沌映射、差分进化算法和灰狼优化算法的捕猎机制的改进狮群算法,并通过仿真和对比,得出以下结论:在规则海浪情况下,改进狮群算法的能量捕获率比遗传算法的能量捕获率高约 5.99%,比基础狮群的能量捕获率高约 17.46%。在非规则海

浪的条件下,改进狮群算法比遗传算法的能量捕获率提高了约 18.15%,比基础狮群算法的能量捕获率提高了约 23.16%。结论证明提出的改进狮群算法可以有效地提高波浪发电系统在实际海浪中的输出功率。

参考文献(References)

- [1] 张亚群,盛松伟,游亚戈,等. 波浪能发电技术应用发展现状及方向[J]. 新能源进展,2019,7(4):374-378.
- [2] 毛明轩,许钊,崔立闯,等. 基于改进灰狼优化算法的光伏阵列多峰 MPPT 研究[J]. 太阳能学报,2023,44(3):450-456.
- [3] 苏杰,曾喆昭. 基于 ACPI 的风力发电系统 MPPT 控制方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(18):119-127.
- [4] WANG C J, ZHAO X C, CHEN P, et al. Research on maximum power point tracking of pendulum wave energy generator[C]//IEEE. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). New York: IEEE, 2019:1925-1930.
- [5] 潘海鹏,丁海波,雷美珍,等. 基于遗传算法的直驱式海浪发电系统最大功率跟踪控制[J]. 太阳能学报,2021,42(3):221-227.
- [6] RICCI P, SAULNIER J B, DE O FALCÃO A F, et al. Time domain models and wave energy converters performance assessment[C]//American Society of Mechanical Engineers. Proceedings of ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: ASME, 2008:699-708.
- [7] WENG S G, WANG J Y. A novel back-stepping sliding mode control strategy of direct-drive wave energy converters[J]. Processes, 2022, 10(7): 1385.
- [8] 杨俊华,熊锋俊,吴丹琦,等. 基于傅氏分析和改进灰狼算法的波浪发电系统最大功率点跟踪[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 406-415.
- [9] LAGOUN M S, BENALIA A, BENBOUZID M E H. A predictive power control of doubly fed induction generator for wave energy converter in irregular waves[C]// IEEE. 2014 First International Conference on Green Energy. New York: IEEE, 2014:26-31.
- [10] TEDESCHI E, CARRARO M, MOLINAS M, et al. Effect of control strategies and power take-off efficiency on the power capture from sea waves[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1088-1098.
- [11] 王之海,刘可,李智生. 水下航行体在非规则波中出水运动数值仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(7): 76-79.

作者简介:

潘海鹏(1965-),男,硕士,教授。研究领域:智能检测,智能控制,图像信息处理。

吴小峰(1995-),男,硕士生。研究领域:智能检测与控制。

雷美珍(1980-),女,博士,讲师。研究领域:直线振荡电机及其控制技术,变频驱动系统设计,拖动系统的计算机仿真研究。本文通信作者。