

基于 IFLO-IP&O 混合算法的船舶光伏 MPPT 控制

陈昉林¹, 汤旭晶^{1,3}, 汪 恬¹, 喻 航¹, 郭 威¹, 韩千枫¹

(1. 武汉理工大学船海与能源动力工程学院, 武汉 430063; 2. 水路交通控制全国重点实验室, 武汉 430063;

3. 武汉理工大学交通部船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 武汉 430063)

摘 要: 云层、灰尘和建筑物遮挡以及航行时各种运动会造成船舶甲板局部遮阴变化, 导致铺设在甲板上的光伏阵列功率-电压输出曲线呈多峰值特性, 传统最大功率点跟踪(MPPT)算法此时难以获得最佳功率追踪性能。为解决该问题, 提出一种基于改进伞蜥优化算法和改进型扰动观察法(IFLO-IP&O)混合算法的船舶光伏发电 MPPT 控制方法: 首先, 将非标准 Circle 混沌映射、莱维飞行策略和三角形随机游走策略引入伞蜥优化算法, 构建改进伞蜥优化算法以搜索到全局最大功率点(GMPP)邻域; 其次, 采用引入变步长机制的改进扰动观察法实现对 GMPP 的精准跟踪; 最后, 通过, 设定切换逻辑将这两种算法整合为统一的框架, 并将其应用于船舶光伏系统。仿真结果表明: 在不同太阳辐照度条件下, 所提 MPPT 控制方法在收敛速度、搜索精度和振荡程度等方面均表现良好。

关键词: 光伏发电; 最大功率点跟踪; 局部遮阴; 控制算法; 变步长扰动观察法; 伞蜥优化算法

中图分类号: TM615

文献标志码: A

0 引 言

航运业的碳排放占全球碳排放总量接近 3%^[1], 船舶作为航运载体, 是航运业节能降碳的重要角色。随着相关环保法规的不断出台及分布式发电技术的进步, 船用太阳能发电已成为助力船舶节能减排的重要途径^[2-3]。

铺设在船舶甲板上的光伏阵列除了与陆地光伏一样会被灰尘云层遮挡外, 船舶靠港时易被周围作业的大型机械遮阴, 航行时受相对狭窄的甲板空间以及横摇、纵摇、横荡、纵荡和航向改变等运动影响, 其光伏阵列更易被甲板上层建筑遮挡。相对陆地光伏, 船舶光伏阵列出现遮阴情况的可能性更大, 且会面对变化更快、更复杂的动态遮阴。当出现局部遮阴时, 光伏阵列的功率-电压(P - U)曲线会呈多峰值特性^[4], 此时传统最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制方法会因陷入局部功率最大值而失效。特别是随着船舶大型化发展趋势和光伏转化效率的提升, 船用光伏系统装机容量和渗透率的不断提高, 传统 MPPT 方法会减小船舶光伏阵列输出效率, 因此船舶光伏系统亟需适应船舶平台和环境工况的 MPPT 算法。

新型元启发式算法在处理多峰值寻优问题上有着良好的适应性, 已被国内外学者应用于光伏发电 MPPT 控制^[5]。文献[6]通过相对简单且高效的 Jaya 算法实现 MPPT

精准跟踪, 但该算法全局搜索性能较差, 收敛时间较长, 且在搜索后期仍存在一定振荡; 文献[7]通过将隐藏参数替换为莱维飞行策略方式改进了人工兔算法, 并将其应用于 MPPT 控制中, 结果表明所提算法虽具有较好的收敛性和更小的振荡, 但并未对人工兔算法的局部寻优部分进行改进; 文献[8]提出基于变异金枪鱼算法和扰动观察法的光伏 MPPT 双层控制模型, 在上层将莱维飞行和多项式变异策略嵌入金枪鱼算法中以搜索全局最大功率点(global maximum power point, GMPP), 在下层通过扰动观察法对 GMPP 进行精准跟踪以降低功率振荡, 然而该算法在初始化时所生成的占空比数值过于均匀, 并未倾向于可能的最优区间。

为提高元启发式算法应用于光伏系统 MPPT 控制性能, 本文提出一种融合改进伞蜥优化(improved frilled lizard optimization, IFLO)算法和改进型扰动观察法(improved perturbation and observation, IP&O)的混合 MPPT 控制方法, 并开展不同太阳辐照度条件下船舶光伏阵列 MPPT 仿真试验验证方法的有效性。

1 光伏阵列输出特性

图 1 是船舶上层甲板光伏组件布置示意图及 1×3 光伏阵列简化模型。通过调节光伏阵列中各组件的阴影覆盖面积以模拟不同模式的太阳辐照度条件, 设定环境温度

25 °C。该简化模型可有效表征船舶光伏阵列在不同太阳辐照度条件下的 P - U 输出特性。

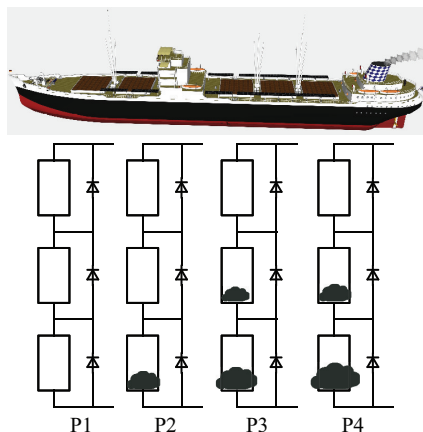


图1 船舶光伏阵列

Fig. 1 Shipboard PV array

单块光伏组件参数如表 1 所示。

表1 光伏组件参数

Table 1 PV module parameters

参数	数值
开路电压/V	36.50
短路电流/A	7.93
最大功率点电压/V	29.00
最大功率点电流/A	7.42
最大输出功率为/W	215.18

光伏阵列在不同太阳辐照度模式下的 P - U 输出特性曲线以及不同特性曲线的 GMPP 如图 2 所示。当太阳辐照度模式为 P1 时,光伏阵列接收到均匀太阳辐照度,其 P - U 特性曲线呈现单峰值特性;但当太阳辐照度模式为 P2、P3、P4 时,光伏阵列处于局部遮阴条件下,其 P - U 特性曲线呈多峰值特性,且在不同太阳辐照度模式下 GMPP 各不相同。

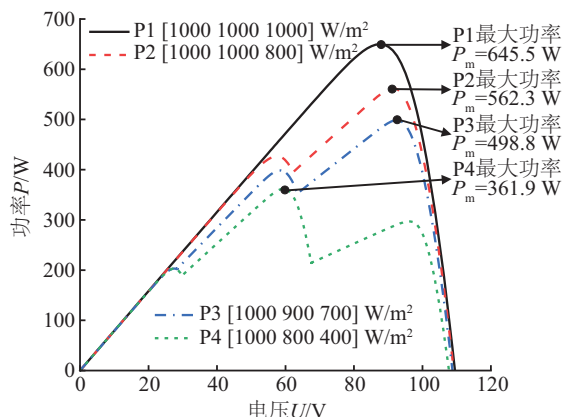


图2 不同太阳辐照度模式下光伏阵列 P - U 特性

Fig. 2 P - U characteristics of PV array under different irradiance modes

2 伞蜥优化算法

由图 2 中局部遮阴条件下的 P - U 曲线可知,光伏阵列在非均匀太阳辐照度条件下呈多峰值多极值特征。包括扰动观察法和电导增量法在内的传统 MPPT 方法依赖于局部搜索机制,受固定步长限制及单点迭代策略影响,极易在首次检测到局部功率峰值后陷入停滞,无法通过有限扰动跨越到更优极值区,从而造成输出功率损失。

为解决该问题,现有研究多引入元启发式算法以增强全局搜索能力,为复杂太阳辐照度工况下的 MPPT 控制提供新的解决方案。针对船舶光伏阵列局部遮阴工况下的 MPPT 需求,应该选用具备全局搜索能力强、参数敏感性低、响应速度快的元启发式算法作为新型船舶光伏 MPPT 方法。

伞蜥优化 (fritted lizard optimization, FLO) 算法^[9]通过模拟伞蜥种群的行为对待求解问题进行寻优,具有搜索范围大、设定参数少、策略结构简洁以及易与其他策略耦合等特点。FLO 算法主要包括狩猎和上树两种策略:1) 狩猎策略:伞蜥觅食时会快速攻击猎物;2) 上树策略:进食后伞蜥会迅速退回到树上。FLO 算法优化过程通过式(1)生成均匀种群初始化方法构建搜索代理,并基于上述两种策略动态平衡全局搜索和局部开发能力。

$$X_i = \text{rand} \cdot (u - l) + l, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: X_i ——种群初始位置向量; rand ——区间(0, 1)之间的随机数; u, l ——搜索空间上限和下限; N ——伞蜥种群数量。

2.1 狩猎策略(全局搜索阶段)

伞蜥的典型行为是狩猎策略,其表现为根据猎物的动态分布进行定向运动,从而使得种群位置在求解空间中发生较大变化。该策略在群体智能算法中映射为解空间内个体位置的全局调整机制,并通过式(2)模拟伞蜥狩猎时选取猎物的位置:

$$\begin{cases} C_i = \{X_k: F_k > F_i, k \neq i\} \\ i = 1, 2, \dots, N, k \in \{1, 2, \dots, N\} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_i ——第 i 只伞蜥的候选猎物; X_k, F_k ——目标函数值优于第 i 只伞蜥的种群成员及其目标函数值; F_i ——第 i 只伞蜥所在位置对应的目标函数值。

若搜索到的新位置对应的目标函数值更优,伞蜥便向新位置移动,否则保持不动。通过式(3)和式(4)模拟伞蜥向候选猎物移动的行为:

$$X_i^{\text{P1,update}} = X_i^{\text{P1}} + r \cdot (S_i - l \cdot X_i^{\text{P1}}) \quad (3)$$

$$X_i^{\text{P1,update}} = \begin{cases} X_i^{\text{P1,update}}, & F_i^{\text{P1,update}} > F_i^{\text{P1}} \\ X_i^{\text{P1}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $X_i^{\text{P1}}, X_i^{\text{P1,update}}$ 和 $F_i^{\text{P1}}, F_i^{\text{P1,update}}$ ——第 i 只伞蜥执行此策略进行搜索前后位置和其对应目标函数值; r ——区间(0, 1)的正态分布随机数; S_i ——被选中猎物所在的位置; l ——集合{0, 1}中随机选取的数。

2.2 上树策略(局部开发阶段)

狩猎进食后, 伞蜥会退回到它所在位置附近的树顶, 可使种群位置在求解空间内发生微小变化。通过式(5)和式(6)对该行为进行模拟:

$$X_i^{P2,update} = X_i^{P2} + (1 - 2 \cdot \text{rand}) \cdot \frac{u-l}{t}, \quad t=1,2,\dots,T \quad (5)$$

$$X_i^{P2,update} = \begin{cases} X_i^{P2,update}, & F_i^{P2,update} > F_i^{P2} \\ X_i^{P2}, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: X_i^{P2} 、 $X_i^{P2,update}$ 和 F_i^{P2} 、 $F_i^{P2,update}$ ——第 i 只伞蜥执行此策略搜索前后的位置和其对应的目标函数值; t ——当前迭代次数; T ——最大迭代次数。

3 基于 IFLO-IP&O 算法的 MPPT 控制

元启发式算法作为 MPPT 控制方法时, 将变换器的占空比 D 定义为种群个体所在的位置信息, 通过实时采集的输出功率 P 构建目标函数值。本文所提 MPPT 控制方法首先根据光伏 MPPT 的特点, 引入非标准 Circle 混沌映射、莱维飞行策略和三角形随机游走策略对 FLO 算法进行改进以构建改进伞蜥优化(IFLO)算法, IFLO 算法具有优异的全局搜索特性, 能够快速收敛至 GMPP 邻域; 其次, 在传统扰动观察法框架内设计动态步长调节机制, 通过非线性收缩函数实现扰动量自适应衰减以构建改进扰动观察法(IP&O), 该机制提升了算法后期的跟踪精度。通过建立基于功率变化率的算法切换判据, 形成 IFLO-IP&O 混合算法, 使算法兼具快速全局搜索与精准局部调节双重优势, 从而实现不同太阳辐照度条件下对 GMPP 高效跟踪。

3.1 改进伞蜥优化(IFLO)算法

3.1.1 非标准 Circle 混沌映射

传统 FLO 算法标准初始化种群由式(1)完成, 所生成的种群位置在求解空间内较为均匀, 然而并未能有效结合光伏 MPPT 特性, 实际上根据文献[10]关于开路电压法原理可知, 光伏阵列最大功率点电压通常是其开路电压的 0.7~0.8 倍, 针对该特性约束, 为确保种群位置在数值区间(0.7, 0.8)内呈现概率密度峰值分布, 提出非标准 Circle 混沌映射。

标准 Circle 混沌映射为^[11]:

$$X_{i+1} = \text{mod} \left[X_i + a - \left(\frac{b}{2\pi} \right) \sin(2\pi X_i), 1 \right] \quad (7)$$

式中: $a = 0.2$; $b = 0.5$ 。

标准 Circle 混沌映射输出值大体上在区间(0.3, 0.4)内分布较多。在本文提出的非标准 Circle 混沌映射中, 将 a 值设置为 0.9 后, 能够实现输出值在区间(0.7, 0.8)内频数较高的目标。标准初始化与非标准 Circle 混沌映射初始化种群位置的效果如图 3 和图 4 所示。

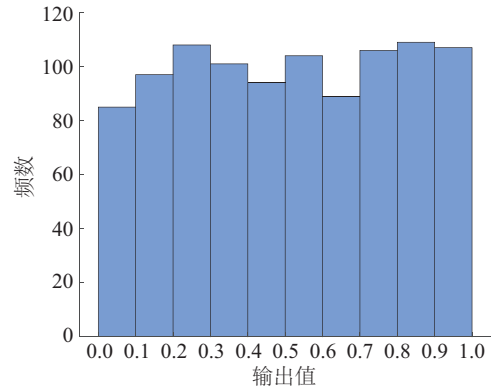


图3 标准初始化

Fig. 3 Standard initialization

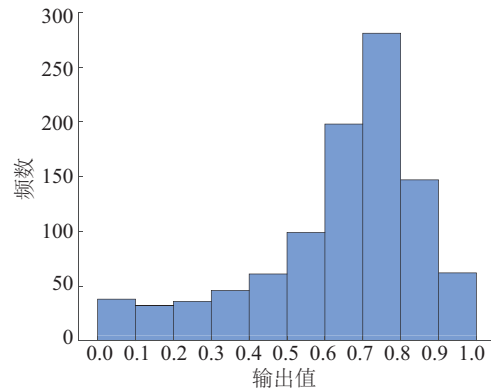


图4 非标准 Circle 混沌映射初始化

Fig. 4 Non-standard Circle chaotic mapping initialization

3.1.2 莱维飞行策略

莱维飞行具有短距精细搜索和长距跳跃迁移的特点, 可有效增强种群在解空间中的遍历性, 使种群个体广泛分布在搜索空间内。基于此, 为提高 FLO 算法的全局搜索能力, 将莱维飞行策略^[12]嵌入 FLO 算法的狩猎策略, 伞蜥种群采用改进后的狩猎策略搜索到新位置的数学表达为:

$$X_i^{P1,update} = X_i^{P1} + \alpha \oplus L(\lambda) \times (S_i - I \cdot X_i^{P1}) \quad (8)$$

式中: α ——控制步长因子; $\oplus$ ——点对点乘法; $L(\lambda)$ ——莱维飞行函数。

通常利用式(9)替代 $L(\lambda)$:

$$s = \frac{\mu}{|\nu|^{\frac{1}{\lambda}}} \quad (9)$$

其中 μ 和 ν 服从正态分布, 其计算过程为:

$$\begin{cases} \mu \sim N(0, \sigma_\mu^2) \\ \nu \sim N(0, \sigma_\nu^2) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sigma_\mu = \left[\frac{\Gamma(1+\lambda) \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)}{\lambda \times \Gamma\left(\frac{1+\lambda}{2}\right) \times 2^{\frac{\lambda-1}{2}}} \right]^{\frac{1}{\lambda}} \\ \sigma_\nu = 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (12)$$

式中: $\Gamma(x)$ ——标准伽马函数; λ ——莱维飞行指数。

3.1.3 三角形随机游走策略

三角形随机游走策略能实现精细搜索,通常用于优化算法中以增强局部搜索能力^[13],在 FLO 算法的上树策略阶段中引入该策略进行改进,通过将式(5)替换为式(13)和式(14),则得到改进后的策略公式为^[14]:

$$\begin{cases} L_1 = |S_i - X_i| \\ L_2 = \text{rand} \cdot L_1 \\ \omega = 2 \times \pi \times \text{rand} \\ L_3 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos \omega \end{cases} \quad (13)$$

$$X_i^{\text{P2,update}} = X_i^{\text{P2}} + L_3 \times \frac{u-l}{t} \quad (14)$$

式中: L_1, L_2, L_3 ——中间向量。

3.2 改进扰动观察法 (IP&O)

IFLO 算法经过数次迭代之后,种群位置会趋于一致,即此时已搜索到 GMPP 邻域,若继续采用 IFLO 算法进行搜索将导致计算资源冗余、GMPP 精准度下降和功率振荡加剧。基于对文献[15-16]的分析,本文将定义的功率变化率公式作为群体位置一致性判据,即当 IFLO 算法满足式(15)后切换为 IP&O,并通过该算法继续对 GMM 进行搜索。为确保 IFLO 算法对 GMPP 的搜索准确性和缩短收敛时间,本文通过控制变量法进行试验后设定阈值为 0.03。

$$\left| \frac{P_t - P_{t-1}}{P_t} \right| \leq 0.03 \quad (15)$$

式中: P_t, P_{t-1} ——当前迭代和其上一代搜索到的最优值, W 。

本文提出的 IP&O 步长收缩公式为:

$$d_{\text{new}} = \begin{cases} d_{\text{old}} + g \times \varphi, & P_{\text{pv}} > P_{\text{pv(ol)}} \\ d_{\text{old}}, & P_{\text{pv}} = P_{\text{pv(ol)}} \\ d_{\text{old}} - g \times \varphi, & P_{\text{pv}} < P_{\text{pv(ol)}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $d_{\text{old}}, d_{\text{new}}$ ——扰动前后的占空比; $P_{\text{pv(ol)}}, P_{\text{pv}}$ ——扰动前后的功率, W ; φ ——基准扰动量,其值应小于 IFLO 算法的步长变化量; g —— φ 的收缩因子,其计算公式为:

$$g = me^{-n \times h} \quad (17)$$

式中: m, n ——控制收缩因子减小速率的参数; e ——自然常数; h ——迭代次数。

3.3 基于 IFLO-IP&O 的 MPPT 控制方法

为适应太阳辐照度动态变化导致最优占空比移动的情况,将式(18)定义的功率变化率公式作为太阳辐照度突变检测条件。当满足该条件时,混合算法会再次进入 IFLO 算法阶段,重新初始化种群位置分布,并激活群体寻优策略以定位至新的 GMPP。该设计旨在增强混合算法对动态遮阴条件的响应能力,本文结合文献[5,8]的研究和所提算法收敛特性,同样采用控制变量法进行试验分析,从而将混合算法重

启阈值设定为 0.05。重启 IFLO 算法阶段的公式为:

$$\left| \frac{P_{\text{past}} - P_{\text{current}}}{P_{\text{past}}} \right| \geq 0.05 \quad (18)$$

式中: $P_{\text{past}}, P_{\text{current}}$ ——光伏阵列前后时刻输出功率, W 。

混合算法的控制流程如图 5 所示。

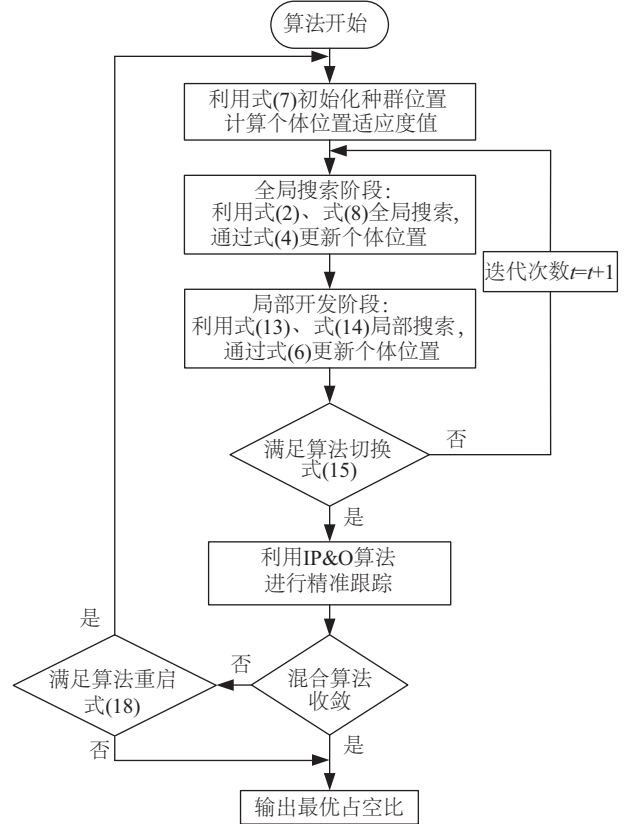


图 5 混合算法的控制流程

Fig. 5 Control flowchart of hybrid algorithm

4 仿真实验验证及分析

在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型如图 6 所示, Boost 电路中输入电容 $C_1 = 2.2 \mu\text{F}$, 输出电容 $C_2 = 22 \mu\text{F}$, 电感 $L = 5 \text{ mH}$,

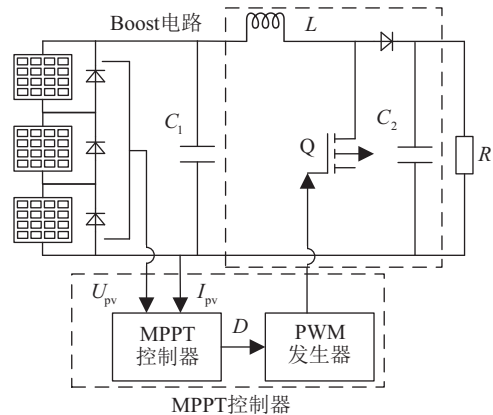


图 6 光伏系统仿真模型

Fig. 6 PV system simulation model

负载 $R=100\ \Omega$ 。MPPT 控制器采集光伏系统的电压 U_{pv} 和电流 I_{pv} , 并以使二者相乘功率 P 最大为目标来调整占空比 D 。

为全面模拟船舶光伏发电系统在不同太阳辐照度条件下的 MPPT 性能, 设置 3 种不同太阳辐照度模式: 1) 均匀太阳辐照度, 仿真过程始终采用模式 P1 太阳辐照度条件以检验算法基础性能; 2) 静态遮阴, 仿真过程始终采用模式 P2 太阳辐照度条件以检验算法在持续局部遮阴条件下的性能; 3) 动态遮阴, 在 0.5 s 的仿真周期内, 于 0.25 s 时间节点实施太阳

辐照度强度突变, 将辐照条件从模式 P3 切换至 P4, 重点测试算法在太阳辐照度突变时的动态响应特性。分别采用海马优化(sea-horse optimizer, SHO)^[17]算法、标准伞蜥优化(FLO)算法、FLO 与 IP&O 的混合算法(FLO-IP&O)和本文所提 IFLO-IP&O 混合算法对 GMPP 进行搜索跟踪, 并根据仿真结果系统评估不同算法在不同太阳辐照度条件下实现 MPPT 的适应性。经过仿真测试, 4 种算法在上述 3 种不同太阳辐照度条件下的具体效果对比如表 2 所示。

表 2 4 种算法在不同太阳辐照度条件下的效果对比

Table 2 Comparison of results of four algorithms under different lighting conditions

算法	太阳辐照度条件	收敛用时/s	稳定功率/W	理想功率/W	搜索精度/%
SHO	均匀太阳辐照度	0.177	621.6	645.5	96.3
FLO		0.136	625.1		96.8
FLO-IP&O		0.147	644.1		99.8
IFLO-IP&O		0.114	644.7		99.9
SHO	静态遮阴	0.188	543.8	562.3	96.7
FLO		0.152	545.1		96.9
FLO-IP&O		0.161	559.4		99.5
IFLO-IP&O		0.115	560.1		99.6
SHO	突变前	0.189	486.8	498.8	97.6
FLO		0.161	490.6		98.4
FLO-IP&O		0.182	496.1		99.5
IFLO-IP&O		0.129	497.0		99.6
SHO	动态遮阴	0.190	323.2	361.9	89.3
FLO		0.171	340.8		94.2
FLO-IP&O		0.182	358.2		99.0
IFLO-IP&O		0.118	359.4		99.3

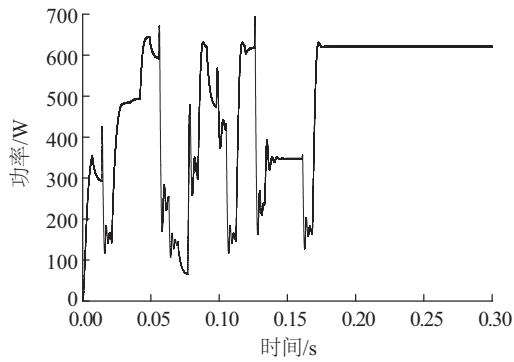
4.1 均匀太阳辐照度

由表 2 可知, SHO 与 FLO 算法在均匀太阳辐照度条件下的搜索精度相近, 分别为 96.3% 和 96.8%, 然而 SHO 算法的收敛用时比 FLO 长约 30.1%, 其原因在于 SHO 算法的策略结构比 FLO 算法更复杂, 将该算法应用于 MPPT 控制器中时需消耗更多的计算资源。融合 IP&O 机制的 FLO-IP&O 算法搜索精度比 FLO 算法高约 3%, 但其收敛时间因附加策略的影响而比 FLO 算法长约 7.5%。在 4 种算法中, IFLO-IP&O 算法的收敛用时最短, 搜索精度最高。图 7 动态曲线揭示, 在均匀太阳辐照度下, 4 种算法都存在较大的功率振荡, 说明元启发式算法在搜索时均需在求解空间内经过多次迭代才能收敛至 GMPP 邻近区域。IFLO-IP&O 算法的振荡情况明显优于其他 3 种算法, 此外 FLO-IP&O 和 IFLO-IP&O 算法因

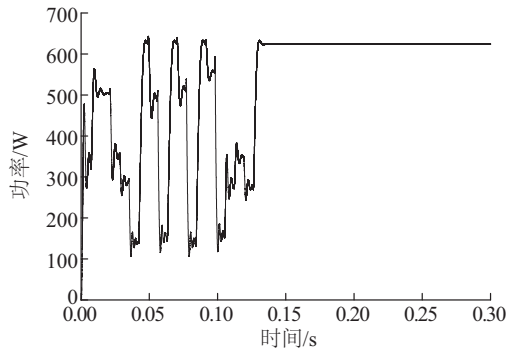
在后期会切换至 IP&O 阶段而均呈现功率跃升, 然而后者的跃升幅度小于前者, 这表明经过多策略改进后的 IFLO 算法能够更快搜索到距 GMPP 更近的区域。FLO-IP&O 和 IFLO-IP&O 算法的搜索结果初步体现多策略优化的有效性。

4.2 静态遮阴

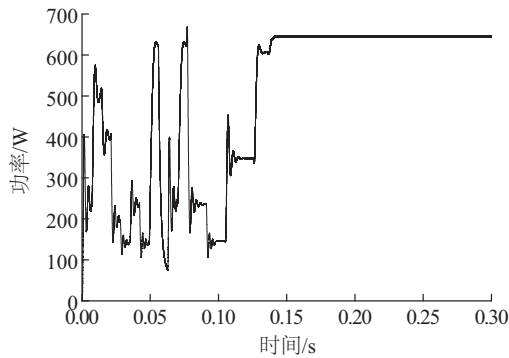
由图 2 可知, 太阳辐照度模式为 P2 时, 光伏阵列 $P-U$ 特性曲线有两个峰值点。由表 2 可知, 多峰值曲线对算法的收敛速度造成一定影响, SHO、FLO 和 FLO-IP&O 算法的收敛时间比均匀太阳辐照度时分别增加 6.2%、11.8% 和 9.5%, 而 IFLO-IP&O 算法的收敛时间几乎不变, 且其收敛时间比另外 3 种算法分别短 38.8%、24.3% 和 28.6%。相较于均匀太阳辐照度条件, 4 种算法在静态局部遮阴条件下的搜索精度基本不变, 其中 IFLO-IP&O 算法仍是 4 种算法中搜索精度最高



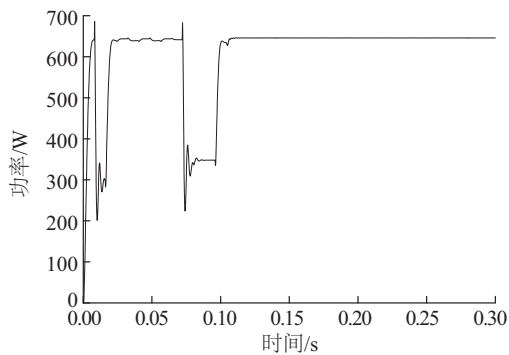
a. SHO



b. FLO



c. FLO-IP&O



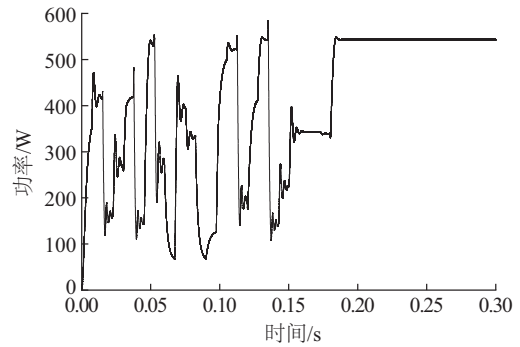
d. IFLO-IP&O

图7 均匀太阳辐照度下光伏输出功率

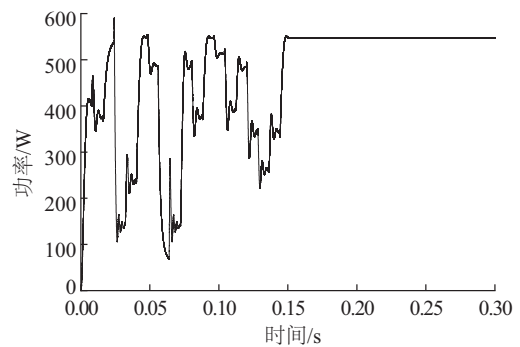
Fig. 7 PV output power under uniform solar irradiance

的。由图8可知,4种算法均能在搜索到局部最优点后继续搜索直至跟踪到GMPP,且IFLO-IP&O算法搜索过程中功率

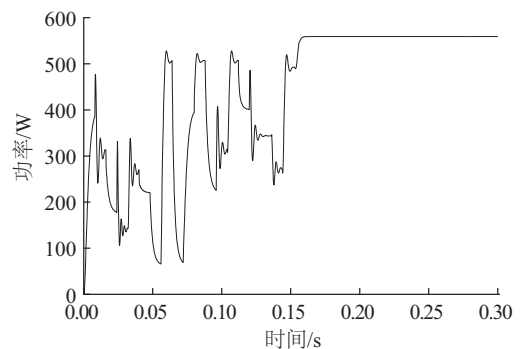
振荡小。后期切换为IP&O阶段后,IFLO-IP&O算法的功率跃升幅度比FLO-IP&O算法小,再次验证多策略改进的有效性。上述结果初步验证了IFLO-IP&O算法在局部遮阴条件下具有比其他3种算法更好的适应性。



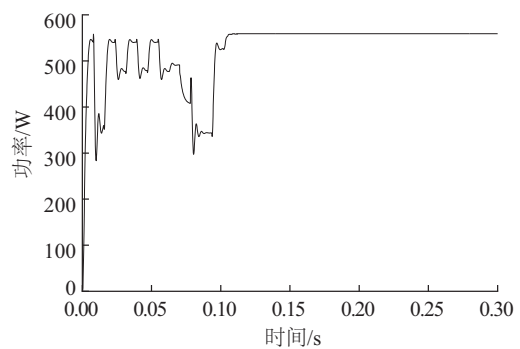
a. SHO



b. FLO



c. FLO-IP&O



d. IFLO-IP&O

图8 静态遮阴下光伏输出功率

Fig. 8 PV output power under static shading

4.3 动态遮阴

由图 2 可知,太阳辐照度模式为 P3 或 P4 时,光伏阵列 P - U 特性曲线均具有 3 个峰值,但这两种太阳辐照度模式下的 GMPP 分别靠近右端和左端,对应的最优占空比存在较大差距,体现该太阳辐照度模式的复杂性。由表 2 可知,4 种算法面对复杂太阳辐照度条件变化均能够跟踪到 GMPP 附近,表明元启发式算法良好的适应性。太阳辐照度突变前,光伏阵列的太阳辐照度情况相当于 P - U 特性曲线为 3 峰值曲线的静态遮阴,4 种算法的仿真结果与 2 峰值静态遮阴相似,IFLO-IP&O 算法是 4 种算法中性能表现最为优异的。太阳辐照度突变时,4 种算法均需重新进行种群位置初始化操作,随后按照设定的策略重新进行搜索。3 种不同的太阳辐照度条件下,SHO 算法的收敛时间均大于 FLO 算法,另外动态遮阴太阳辐照度突变后,SHO 和 FLO 算法的搜索精度减小值分别为 8.3% 和 4.2%,这表明 FLO 算法策略结构优于 SHO 算法。FLO-IP&O 和 IFLO-IP&O 算法的搜索精度在 3 种不同太阳辐照度条件下均能达到 99% 以上,这进一步验证 IP&O 机制能很好地完成提高搜索精度的目标。如图 9 所示,融合 IP&O

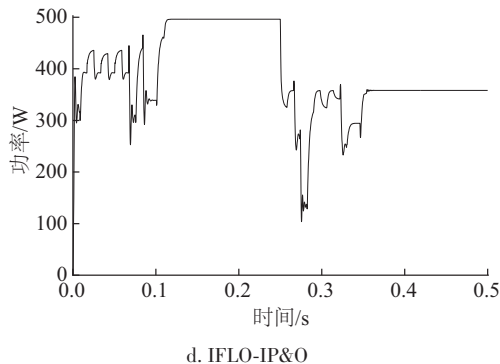
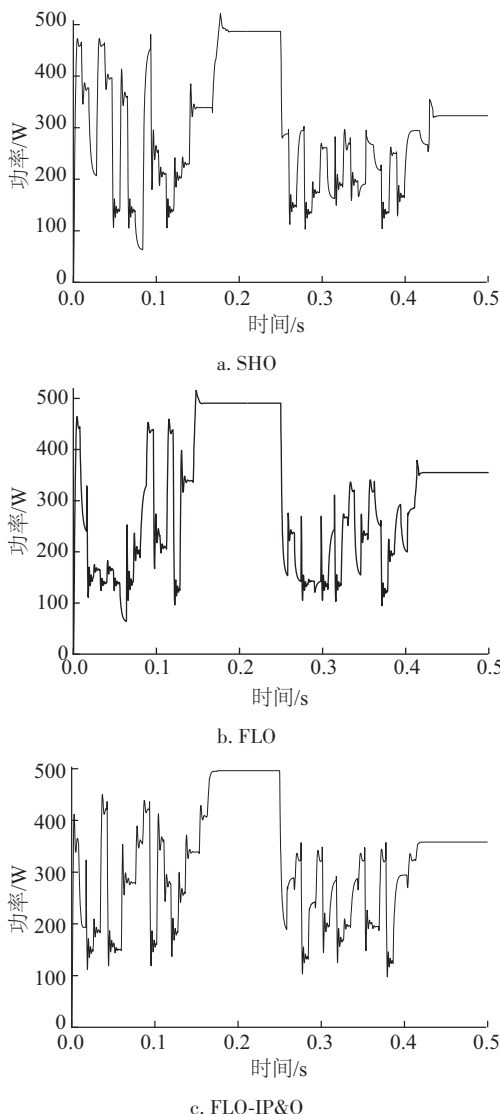


图9 动态遮阴下光伏输出功率

Fig. 9 PV output power under dynamic shading

机制的 FLO-IP&O 算法存在收敛时间长、搜索过程功率振荡大等问题。而经过多策略优化的 IFLO-IP&O 算法不仅在太阳辐照度突变前后均能快速准确搜索到 GMPP 附近,且太阳辐照度突变时功率跌落小,搜索过程功率振荡小,进一步验证了该算法具有良好的性能表现。

5 结 论

船舶光伏阵列易受云层、灰尘和建筑物航行姿态影响而造成局部遮阴,此时采用传统 MPPT 控制方法会导致光伏输出功率下降,为解决该问题,本文将非标准 Circle 混沌映射、莱维飞行策略和三角形游走策略引入 FLO 算法,并融合 IP&O 算法提出基于 IFLO-IP&O 混合算法的船舶光伏 MPPT 控制方法。仿真结果表明:

1) 对比 SHO 算法,传统 FLO 算法得益于其相对简洁高效的策略结构而展现出更快的收敛特性。这两种算法虽然均具备跳出局部最优解并跟踪到 GMPP 邻域的能力,但仍面临收敛速度慢、搜索精度有待提升、搜索过程存在较大功率振荡的缺陷;FLO-IP&O 混合算法在传统 FLO 算法的基础上提升了搜索精度,但其收敛时间随之延长,且未能有效抑制搜索过程中的功率振荡。

2) 基于多策略协同优化机制的 IFLO-IP&O 算法兼具快速收敛、高精度全局搜索能力和搜索过程低功率振荡等特点,能够有效适应船舶平台光伏阵列遮阴动态变化。该算法在复杂太阳辐照度条件下展现出显著的综合性能优势。

[参考文献]

- [1] 李欣欣,程昊,罗婷婷,等. 氨作为船舶替代燃料技术发展及挑战[J]. 船海工程, 2024, 53(5): 11-15.
LI X X, CHENG H, LUO T T, et al. Technological development and challenges of ammonia as alternative fuel for ships[J]. Ship & ocean engineering, 2024, 53(5): 11-15.
- [2] ZHANG R J, LIANG H C. Application of solar energy in ship power field [C]//2022 IEEE Asia-Pacific Conference

- on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC). Dalian, China, 2022: 1588-1590.
- [3] 姚玉璧, 郑绍忠, 杨扬, 等. 中国太阳能资源评估及其利用效率研究进展与展望[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 524-535.
- YAO Y B, ZHENG S Z, YANG Y, et al. Progress and prospects on solar energy resource evaluation and utilization efficiency in China [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(10): 524-535.
- [4] 任志玲, 毛奕栋. 基于改进黏菌算法的光伏多峰值 MPPT 控制[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 421-428.
- REN Z L, MAO Y D. Multi-peak MPPT control of PV array based on improved slime mould algorithm [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(2): 421-428.
- [5] 李艳波, 李林宜, 刘维宇, 等. 基于 TSO-MSMA 算法在光伏系统 MPPT 中的研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 324-330.
- LI Y B, LI L Y, LIU W Y, et al. Research on photovoltaic system MPPT based on TSO-MSMA algorithm [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(8): 324-330.
- [6] 林倚丞. 基于改进 Jaya 算法的光伏最大功率追踪控制[J]. 许昌学院学报, 2024, 43(5): 97-104.
- LIN Y C. Control of maximum photovoltaic power tracking based on improved Jaya algorithm [J]. *Journal of Xuchang University*, 2024, 43(5): 97-104.
- [7] BENNET G S D, SUBRAMANIAM NACHIMUTHU D. Solar PV system with modified artificial rabbit optimization algorithm for MPPT [J]. *Electrical engineering*, 2024, 106(4): 4543-4559.
- [8] 朱福宝, 付文龙, 张海荣, 等. 局部遮荫下基于改进金枪鱼算法的光伏最大功率点跟踪控制[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 30-38.
- ZHU F B, FU W L, ZHANG H R, et al. Photovoltaic MPPT control under local shade based on improved TSO algorithm [J]. *Thermal power generation*, 2024, 53(6): 30-38.
- [9] ABU FALAHAH I, AL-BAIK O, ALOMARI S, et al. Frilled lizard optimization: a novel bio-inspired optimizer for solving engineering applications [J]. *Computers, materials & continua*, 2024, 79(3): 3631-3678.
- [10] 刘珈安. 基于太阳能光伏板供电的水泵控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- LIU J A. Research on control strategy of solar-powered waterpump based on solar photovoltaic panels [D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [11] 孙仟硕, 王英博. 融合多策略的改进蜣螂优化算法及其应用[J]. 信息与控制, 2024, 53(5): 631-641, 651.
- SUN Q S, WANG Y B. Improved dung beetle optimization algorithm with multi-strategy and its application [J]. *Information and control*, 2024, 53(5): 631-641, 651.
- [12] 李飞, 王栋, 李博, 等. 改进猎人猎物优化算法的光伏发电 MPPT 控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9): 116-124, 134.
- LI F, WANG D, LI B, et al. The MPPT control strategy for photovoltaic based on improved hunter-prey optimization algorithm [J]. *Advances of power system & hydroelectric engineering*, 2023, 39(9): 116-124, 134.
- [13] 华天争. 秸秆发酵过程软测量模型关键参数的优化算法研究[J]. 数字通信世界, 2024(6): 55-57, 60.
- HUA T Z. Research on optimization algorithm of key parameters of soft measurement model for straw fermentation process [J]. *Digital communication world*, 2024(6): 55-57, 60.
- [14] 田珺玲, 荣娜, 张裕, 等. 考虑阶梯型碳交易的梯级水火风光储联合调度[J]. 南方电网技术, 2025, 19(3): 106-115.
- TIAN J L, RONG N, ZHANG Y, et al. Joint scheduling of cascade hydro-thermal-wind-photovoltaic-storage considering stepped carbon trading [J]. *Southern power system technology*, 2025, 19(3): 106-115.
- [15] 郭思桐, 粟时平, 刘桂英, 等. 基于 IGWO-IP&O 混合算法的光伏 MPPT 控制[J]. 电力科学与工程, 2025, 41(4): 35-42.
- GUO S T, SU S P, LIU G Y, et al. Photovoltaic MPPT control based on IGWO-IP&O hybrid algorithm [J]. *Electric power science and engineering*, 2025, 41(4): 35-42.
- [16] 陈刚, 刘旭阳, 李国雄, 等. 基于 INSPSO-INC 算法的光伏 MPPT 控制策略[J]. 智慧电力, 2025, 53(2): 58-64.
- CHEN G, LIU X Y, LI G X, et al. Photovoltaic MPPT control strategy based on INSPSO-INC algorithm [J]. *Smart power*, 2025, 53(2): 58-64.
- [17] ZHAO S J, ZHANG T R, MA S L, et al. Sea-horse optimizer: a novel nature-inspired meta-heuristic for global optimization problems [J]. *Applied intelligence*, 2023, 53(10): 11833-11860.

MPPT CONTROL OF MARINE PV BASED ON IFLO-IP&O HYBRID ALGORITHM

Chen Fanglin¹, Tang Xujing¹⁻³, Wang Tian¹, Yu Hang¹, Guo Wei¹, Han Qianfeng¹

(1. School of Marine Engineering, Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. National Key Laboratory of Waterway Traffic Control, Wuhan 430063, China;

3. Key Laboratory of Ship Power Engineering and Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Under conditions of partial shading caused by cloud cover, dust accumulation, building obstructions, and vessel movement during navigation, photovoltaic arrays deployed on ship decks exhibit multi-peak characteristics in their power-voltage output curves. This renders traditional maximum power point tracking (MPPT) algorithms inadequate for optimal power extraction. To address this issue, this study proposes a hybrid MPPT control method combining improved frilled lizard optimization algorithm with variable step perturbation and observation method (IFLO-IP&O) for shipboard photovoltaic systems. The methodology involves three key innovations: First, the integration of non-standard Circle chaotic mapping, Lévy flight strategy, and triangular random walk strategy into the Frilled Lizard Optimization algorithm creates an enhanced global search capability to locate the neighborhood of the global maximum power point (GMPP). Second, a variable-step perturbation mechanism enables precise tracking of GMPP. Third, an adaptive switching logic seamlessly integrates these two algorithms into a unified framework, which is then applied to shipboard photovoltaic systems. Simulation results demonstrate that the proposed IFLO-IP&O hybrid method achieves superior performance in convergence speed, tracking accuracy, and oscillation suppression across various illumination scenarios.

Keywords: PV power; maximum power point tracking; partial shaded; control algorithms; variable step size perturbation and observation method; frilled lizard optimization algorithm