

孔晓光,陈飞险,王伟凡,等.基于LGWO-ZVINC混合算法的光伏MPPT控制[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3):348-357.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240154
KONG Xiaoguang, CHEN Feixian, WANG Weifan, et al. Photovoltaic MPPT control based on LGWO-ZVINC hybrid algorithm[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(3): 348-357. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240154

基于LGWO-ZVINC混合算法的光伏MPPT控制

孔晓光¹, 陈飞险¹, 王伟凡², 李中心¹

(1. 沈阳化工大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110142; 2. 华能辛店发电有限公司, 山东 淄博 255400)

摘要: 针对局部阴影导致光伏阵列呈现多峰功率-电压特性时, 传统最大功率点跟踪 (MPPT) 算法响应慢、易陷入局部最优的问题, 提出一种融合改进灰狼优化算法 (LGWO) 与分区变步长电导增量法 (ZVINC) 的混合控制策略 (LGWO-ZVINC)。该策略采用线性递增函数初始化狼群, 保证狼群个体多样性; 引入非线性可调节因子平衡局部和全局搜索能力; 结合Levy算法和贪婪选择机制, 避免狼群陷入局部最优; 采用分区变步长电导增量法进行局部搜索, 加快收敛, 提高精度。仿真实验和实验结果表明: 在静态和动态多峰值条件下, 相较于3个对比算法, LGWO-ZVINC算法跟踪速度最快, 且精度达到99.90%以上。研究结论为局部遮阴条件下光伏MPPT控制提供参考。

关键词: 光伏阵列; 灰狼算法; Levy算法; 最大功率跟踪; 电导增量法

中图分类号: TP18; TM615

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)03-0348-10

Photovoltaic MPPT control based on LGWO-ZVINC hybrid algorithm

KONG Xiaoguang¹, CHEN Feixian¹, WANG Weifan², LI Zhongxin¹

(1. School of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; 2. Huaneng Xindian Power Generation Company Limited, Zibo 255400, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional maximum power point tracking (MPPT) algorithm has slow response and is easy to fall into local optimum when the PV array presents multi-peak power-voltage characteristics due to local shadows, a hybrid control strategy (LGWO-ZVINC) combining improved gray wolf optimization algorithm (LGWO) and partitioned variable step size incremental conductance method (ZVINC) is proposed. The strategy uses a linear increasing function to initialize the wolves to ensure the individual diversity of the wolves. A nonlinear adjustable factor is introduced to balance the local and global search ability. Combined with Levy algorithm and greedy selection mechanism, the wolf pack is avoided to fall into local optimum. The partitioned variable step size conductance increment method is used for local search to accelerate convergence and improve accuracy. Simulation experiments and experimental results show that under static and dynamic multi-peak conditions, the LGWO-ZVINC algorithm has the fastest tracking speed and accuracy of more than 99.90% compared with the three comparison algorithms. The research conclusions provide a reference for photovoltaic MPPT control under partial shading conditions.

Keywords: photovoltaic array; grey wolf algorithm; Levy algorithm; maximum power tracking; incremental conductance method

0 引言

在光伏发电系统中, 光伏电池性能容易受到光照、温度等环境因素的影响, 导致其工作点偏离最大功率点 (MPP), 光电转化效率降低。MPPT控制技术通过实时监测光伏阵列的输出电压和电流, 动态调整系统工作点以持续追踪当前环

境下的MPP, 从而提高系统整体效率。随着环境变化对光伏系统性能的影响日益显著, 如何优化MPPT控制策略, 已成为光伏技术研究领域的一个关键问题^[1-2]。

传统的MPPT控制策略采用固定步长, 难以兼顾跟踪速度和稳态精度, 尤其是在光照发生剧烈

收稿日期: 2024-06-11 修回日期: 2024-07-10 接受日期: 2024-07-30 责任编辑: 张雯

基金项目: 辽宁省教育厅高校基本科研项目 (LJKMZ20220778); 国家外国专家项目 (DL2021006001L)

作者简介: 孔晓光 (1974-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事光伏发电系统设计与并网方面的研究。

E-mail: kongxiaoguang@syuct.edu.cn

变化时,固定步长容易导致跟踪速度降低,或者稳态误差增大。因此学者们提出了多种改进的控制策略。文献[3]提出了修正步长的电导增量法,有效提升了系统在单峰值条件下的跟踪精度,但在多峰值场景下,易陷入局部最优。文献[4]提出变步长扰动观察法,与传统扰动观察法相比,跟踪速度更快、精度更高,但后期精度低且模型结构过于复杂。文献[5]提出一种基于分数阶控制的电导增量法,通过系统的小信号模型确定分数阶积分器的阶数和增益的最佳值,动态跟踪性能较好,但缺少实验验证。智能优化算法为局部遮阴下MPPT提供了新思路,如蚂蚁优化算法^[6]、果蝇优化算法^[7]和金枪鱼群优化算法^[8],这些算法复杂度高,精度低,不易实现。

灰狼优化(grey wolf optimization, GWO)算法参数少,控制过程简单,但在收敛速度、收敛精度等方面还有待改进。文献[9]引入Levy飞行策略,增强全局搜索能力,但收敛速度有待提升。文献[10]将灰狼算法和定步长电导增量法相结合,加快了收敛速度,但是后期局部振荡问题未得到改善。文献[11]将樽海鞘群优化算法和GWO算法相结合,利用SSA算法的自适应机制,跳出局部最优解,降低功率损耗,但跟踪速度较慢。文献[12]将粒子群搜索机制与GWO算法相结合,但参数设置复杂。

本文将改进的灰狼优化算法与变步长电导增量法相结合。在搜索最大功率过程中,利用改进的灰狼优化算法逼近全局最大功率点,以防止算法陷入局部最优解。在找到最大功率点位置后,采用变步长电导增量法,以提高收敛速度和精度,解决振荡幅度大等问题。

1 光伏电池模型

光伏电池等效电路^[13]见图1。其中, I_{ph} 为光生电流, A; I_d 为二极管反向饱和电流, A; I 为输出电流, A; U 为输出电压, V。

光伏电池的电流-电压(I - U)方程为

$$I = I_{ph} - I_d \left\{ \exp \left[\frac{q(U + R_s I)}{ATK} \right] - 1 \right\} - \frac{U + R_s I}{R_{sh}}, \quad (1)$$

式中: q 为电子电荷,取 1.6×10^{-19} C; T 为温度, °C; A 为二极管品质因子; K 为玻尔兹曼常数,取 1.38×10^{-23} J/K; R_s 、 R_{sh} 为等效串、并联内阻, Ω 。

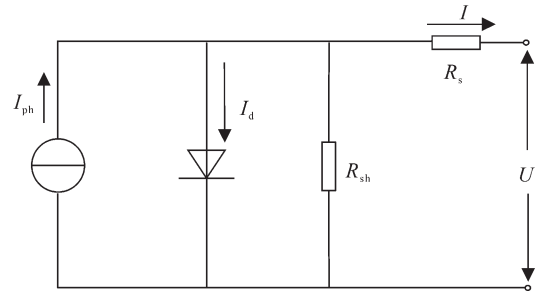


图1 光伏电池等效电路

Fig.1 equivalent circuit of photovoltaic cell

由于 $R_{sh} \gg R_s$,可忽略 R_{sh} ,式(1)简化为

$$I = I_{ph} - I_d \left\{ \exp \left[\frac{q(U + R_s I)}{ATK} \right] - 1 \right\}. \quad (2)$$

为了方便工程应用,引入关键参数 C_1 和 C_2 ^[14],式(2)简化为

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{U}{C_2 U_{oc}} \right) - 1 \right] \right\}, \quad (3)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I} \right) \exp \left(- \frac{U_m}{C_2 U_{oc}} \right), \quad (4)$$

$$C_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right), \quad (5)$$

式中: U_{oc} 为开路电压, V; I_{sc} 为短路电流, A; U_m 为最大功率点处电压, V; I_m 为最大功率点处电流, A。

2 多策略融合的灰狼优化算法

2.1 灰狼优化算法

灰狼优化(GWO)算法主要用于求解连续型优化问题,将其狼群按等级分为 α 狼、 β 狼、 δ 狼。算法通过模拟狼群包围、追捕和攻击猎物的3阶段协作,通过各等级灰狼合作来完成捕食猎物行为,从而实现全局优化的搜索过程^[15]。

(1) 包围阶段

狼群通过计算与猎物距离调整位置,即

$$D = |CX_t^p - X_t|, \quad (6)$$

$$X_{t+1} = X_t^p - AD, \quad (7)$$

式中: X_t^p 为猎物的当前位置; t 为迭代次数; D 为搜索步长; X_t 为狼群当前位置; X_{t+1} 为狼群最新位置; A 、 C 为扰动系数,计算式为

$$A = 2ar_1 - a, \quad (8)$$

$$C = 2r_2, \quad (9)$$

式中: a 为收敛因子, 从 2 到 0 线性递减; r_1 和 r_2 为随机数, 取值范围为 $[0,1]$ 。

参数 C 主要影响灰狼对目标的勘察能力, $|C| < 1$ 时勘察能力较强, $|C| > 1$ 时勘察能力则较弱。参数 A 控制灰狼靠近目标狼行为, $|A| \geq 1$ 时远离目标, $|A| < 1$ 时靠近目标。

(2) 追捕阶段

当灰狼包围猎物后, 狼群展开追捕, β 狼在 α 狼的带领下逐渐逼近猎物, 可表示为

$$\begin{cases} D^\alpha = |C^\alpha X_t^\alpha - X_t| \\ D^\beta = |C^\beta X_t^\beta - X_t|, \\ D^\delta = |C^\delta X_t^\delta - X_t| \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} X_{t+1}^\alpha = X_t^\alpha - A_1 D^\alpha \\ X_{t+1}^\beta = X_t^\beta - A_2 D^\beta, \\ X_{t+1}^\delta = X_t^\delta - A_3 D^\delta \end{cases} \quad (11)$$

$$X_{t+1} = \frac{X_{t+1}^\alpha + X_{t+1}^\beta + X_{t+1}^\delta}{3}, \quad (12)$$

式 (10) ~ 式 (12) 中: D^α 、 D^β 、 D^δ 分别为 α 狼、 β 狼、 δ 狼个体与同种群其他个体间的空间距离, 即搜索步长; X_t^α 、 X_t^β 、 X_t^δ 分别为 α 狼、 β 狼、 δ 狼在 t 时刻的位置; C^α 、 C^β 、 C^δ 、 A_1 、 A_2 、 A_3 均为扰动系数; X_t 为当前灰狼个体在 t 时刻位置。

(3) 攻击阶段

当猎物停止运动时, 灰狼通过攻击阶段完成狩猎。此时收敛因子 a 趋于 0, 带动 A 同步趋于 0, 灰狼的位置更新公式可简化为

$$X_{t+1} = X_t^p, \quad (13)$$

此时狼群位置为最优解。

2.2 灰狼优化算法改进策略

(1) 均匀化初始策略

狼群初始位置对 GWO 算法的整体搜索性能影响显著。标准 GWO 算法采用随机初始化的策略, 容易导致狼群个体聚集, 难以均匀覆盖整个搜索空间, 降低算法的多样性和灵活性, 阻碍了最优解的产生。因此, 引入基于均匀分布的初始化策略, 以确保种群分布均匀。改进后第 i 只灰狼的初始位置为

$$X_i = (X_{\max} - X_{\min})S_i + X_{\min}, \quad (14)$$

式中: X_{\max} 、 X_{\min} 为初始化最大值和最小值; S_i 表示狼群第 i 个个体的收敛系数, 可表示为

$$S_i = \frac{\lambda i}{N}, \quad (15)$$

式中: λ 为收敛权重, 取 0.95; N 为灰狼总数。

(2) 非线性收敛因子和控制参数协同调节

标准 GWO 算法中, 收敛因子 a 减小会导致全局搜索与局部搜索耗时平衡, 且对不同优化问题的适应性不足, 可能降低算法的准确性。针对光伏系统 MPPT 优化需求, 提出非线性收敛因子更新策略, 以改善收敛速度和精度, 即

$$a = \frac{2}{1 + \exp\left(\frac{15t}{T} - 10\right)}, \quad (16)$$

式中, T 为最大迭代次数。

改进前后收敛因子 a 的迭代曲线见图 2, 图中 LGWO 表示改进灰狼优化算法。改进后 a 下降速率在前期小于传统收敛因子。根据式 (8), $|A|$ 为较大值时, 灰狼个体远离目标, 全局搜索能力较强。在迭代中期, 改进后的 a 迭代曲线斜率的绝对值增大, $|A|$ 逐渐减小, 灰狼全局搜索能力减弱, 局部搜索能力增强。在迭代后期, a 达到最小值, 使得 $|A|$ 达到最小值, 表现出较强的局部搜索能力。与传统的 a 相比, 改进后的 a 更注重前期全局搜索能力, 以确保找到全局最优解。

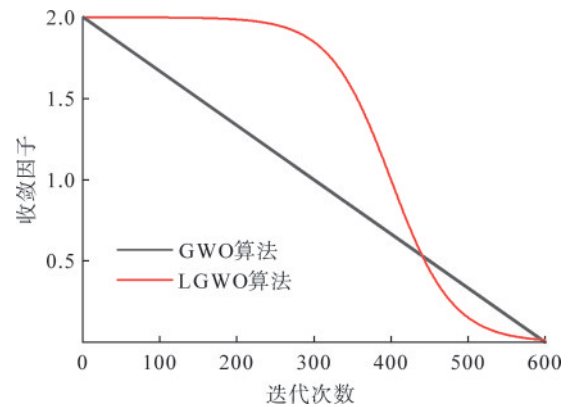


图 2 改进前后收敛因子迭代曲线

Fig.2 convergence factor iteration curve before and after improvement

为了增强全局与局部搜索性能, 引入改进后的收敛因子 a 对控制参数进行改进, 即

$$C = 2r_3 - a, \quad (17)$$

式中: r_3 为随机数, 取值范围为 $[0,1]$ 。

根据式 (16) 和式 (17), 前期 $|C|$ 较小, 灰狼的勘察能力强, 适合全局搜索; 后期 $|C|$ 较大, 灰

狼的勘察能力较弱,更适合局部搜索。

(3) Levy算法和贪婪选择机制

针对GWO算法易陷入局部最优的缺陷,引入Levy算法,通过在位置更新中加入随机距离跳跃,提升算法的全局搜索能力。改进后灰狼个体最终位置为

$$X_{t+1}^{best} = \mu L_{\eta} (X^a - X_{t+1}) + X_{t+1}, \quad (18)$$

式中: μ 为控制步长系数,取0.3。 L_{η} 表示随机搜索路径,表达式为

$$L_{\eta} = \frac{u}{|v|^{1/\eta}}, \quad (19)$$

式中: η 为莱维指数,取1.5; u 和 v 是服从正态分布的随机变量, $u \sim N(0, \sigma_u^2)$, $v \sim N(0, \sigma_v^2)$, $\sigma_v = 1$,

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\eta) \sin\left(\frac{\eta\pi}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\eta}{2}\right) 2^{\frac{\eta-1}{2}} \eta} \right\}^{1/\eta}. \quad (20)$$

GWO算法过度依赖传统位置更新公式,导致收敛慢、精度低。将贪婪选择机制与GWO算法相结合,利用贪婪选择机制的局部优化能力,增强GWO算法的局部搜索能力,从而提升算法的整体性能。

贪婪选择机制原理如下: 设 d_i 和 d_j 分别为 i 时

刻和 j 时刻的占空比, d 为输出的占空比, $P(d)$ 为占空比 d 所对应的光伏输出功率。若 $P(d_i) < P(d_j)$, 则 $d = d_j$; 若 $P(d_i) \geq P(d_j)$, 则 $d = d_i$ 。

(4) 算法测试

为验证改进算法的有效性,选取4个基准函数,对粒子群优化(PSO)算法、GWO算法和LGWO算法进行对比测试。实验中,所有算法的初始种群数为30,最大迭代次数为500。所有基准函数的全局最优理论解均为0。基准函数见表1,各算法的测试结果见图3,算法性能对比见表2。

表1 基准测试函数

Tab.1 information of benchmark functions

函数名称	表达式
Sphere	$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$
Schwefel 2.22	$f_2(x) = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) + \prod_{i=1}^n x_i $
step	$f_3(x) = \sum_{i=1}^d (x_i + 0.5)^2$
Rastrigin	$f_4(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$

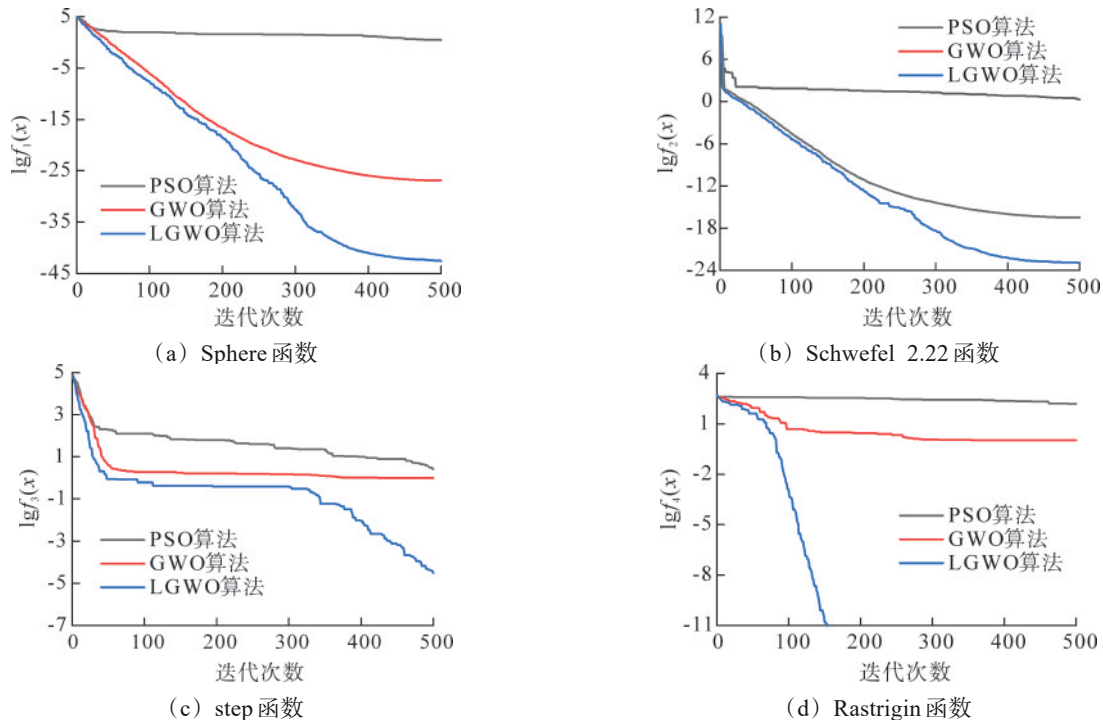


图3 基准函数测试结果

Fig.3 benchmark function test results

表 2 算法性能对比

Tab.2 algorithm performance comparison

函数	输入变量取值范围	算法	最优值
Sphere	[-100,100]	PSO	2.68×10^0
		GWO	1.24×10^{-24}
		LGWO	2.78×10^{-45}
Schwefel 2.22	[-10,10]	PSO	1.98×10^0
		GWO	3.18×10^{-17}
		LGWO	1.22×10^{-23}
Step	[-100,100]	PSO	2.69×10^0
		GWO	1.00×10^0
		LGWO	3.04×10^{-5}
Rastrigin	[-5.12,5.12]	PSO	1.52×10^2
		GWO	1.03×10^0
		LGWO	0

由图 3 和表 2 可知, PSO 算法的收敛速度和收敛精度明显落后于 GWO 算法和 LGWO 算法。在 Sphere 函数和 Schwefel 2.22 函数中, GWO 算法和 LGWO 算法寻优效果较好, LGWO 算法略优于 GWO 算法。在多峰值函数 Step 和 Rastrigin 中, GWO 算法易陷入局部最优, 优化效果欠佳, 而 LGWO 算法寻优效果明显优于 GWO 算法。

2.3 分区变步长电导增量法(ZVINC)

传统电导增量法^[16]精度与收敛速度受步长制约, 本文提出分区调节步长策略。步长调整系数见图 4, 其中, A 为最大功率点, B 为实时输出功率值, B_p 为 B 对应的电压值。

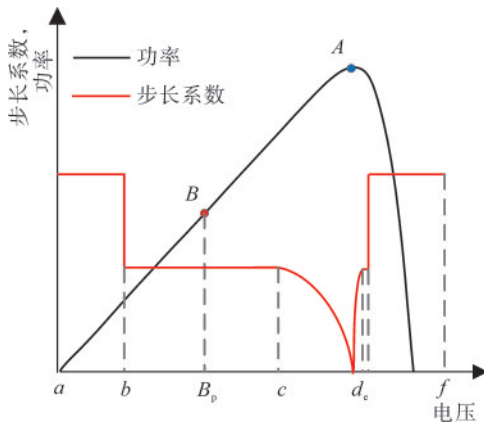


图 4 步长调整系数

Fig.4 step size adjustment coefficient

变步长系数 l_k 为

$$\begin{cases} l_k = \Delta U_{\max} & 1 < S_k \\ l_k = \Delta U_{\max}/3 & 0.3 < S_k < 1 \\ l_k = \Delta U_{\max} S_k/3 & S_k \leq 0.3 \end{cases}, \quad (21)$$

式中, ΔU_{\max} 为最大定步长, 取 3×10^{-6} 。

$$S_k = \left| \frac{dP}{dU} \right| / I_k, \quad (22)$$

式中, I_k 为在第 k 次迭代时的电流。

由图 4 可知, 当 B_p 处于 $[a,b]$ 和 $[e,f]$ 时, 采用大步长策略, 可以快速接近最大功率点 A; 当 B_p 输出功率在 $[b,c]$ 和 $[d,e]$ 时, 切换为小步长, 避免大步长导致的功率振荡, 提升跟踪精度; 当 B_p 点处于 $[c,d]$ 时, 如果继续保持固定步长, 可能导致 B 在 A 点附近振荡, 无法继续接近点 A, 则此时采用变步长策略。由式 (21) 和式 (22) 可知, 距离点 A 越近, S_k 越小, 步长也就越小, 当步长为 0 时, 此时 B 点与 A 点重合。

2.4 LGWO-ZVINC 算法流程

为应对光照条件变化导致的最大功率点偏移, 引入终止和重启机制, 确保算法在动态环境下得到全局最优解。

(1) 重启条件

针对光照条件变化, 引入基于相对功率误差的重启机制, 相对误差为

$$\Delta P = \left| \frac{P_{\text{real}} - P_m}{P_m} \right|, \quad (23)$$

式中: P_{real} 为实时功率; P_m 为重启前最大功率。

若 $\Delta P > 0.01$, 则重新启动 LGWO-ZVINC; 否则, 输出当前最优占空比参数。

(2) 终止条件

当算法满足以下两个条件之一则终止: ①迭代次数达到最大; ②全体灰狼位置标准差小于设定的阈值。

LGWO-ZVINC 算法的步骤如下:

步骤 1 初始化狼群位置, 此时灰狼个体的位置代表占空比。

步骤 2 将光伏阵列 $P = UI$ 作为算法的目标函数, 计算每只灰狼个体的适应度, 保留表现最好的 3 只狼的位置, 命令其他狼向它们靠近。

步骤 3 根据式 (11)、式 (12)、式 (18), 不断更新狼群位置, 锁定最大功率点。

步骤 4 当算法达到终止条件后, 通过分区变步长电导增量法进行局部搜索, 逐步逼近最大功率点所对应的占空比。

步骤 5 持续输出最大功率所对应的占空比, 即 α 狼所在的位置。

步骤 6 当满足重启条件时, 将重复执行步骤 1~步骤 5, 否则维持当前最优占空比输出。

当 LGWO 达到终止条件时, 系统自动切换至

分区变步长电导增量法进行局部精细搜索。该方法通过PWM技术动态调节占空比,实现MPP的精确跟踪。算法流程见图5。其中, U_k 为第 k 次迭代

时的光伏阵列输出电压值; D_k 为第 k 次迭代时的PWM占空比调节量。

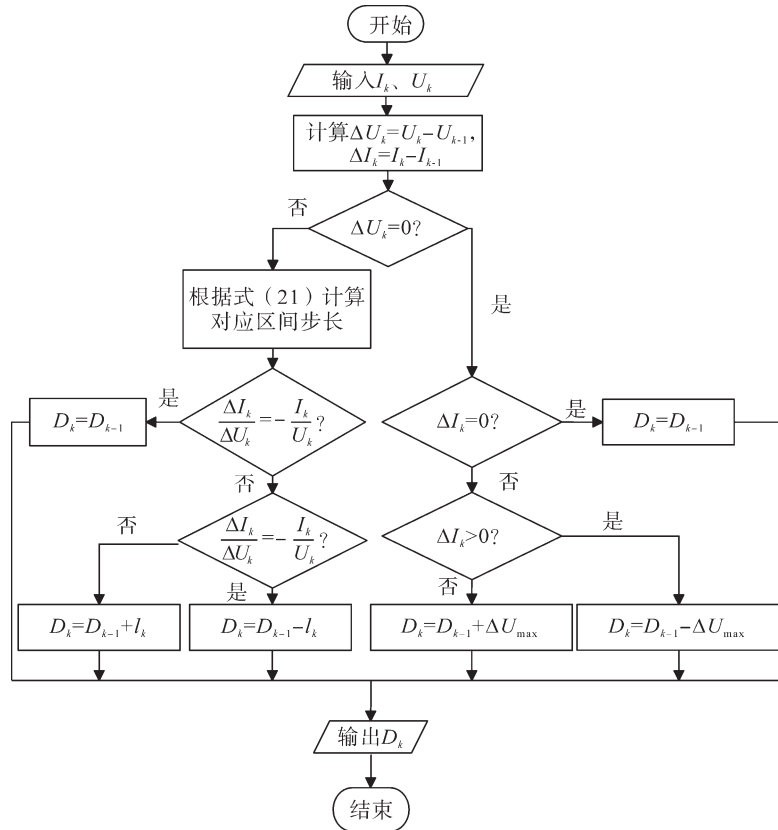


图5 分区变步长电导增量法

Fig.5 zoned variable step conductance increment method

3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建 4×2 光伏阵列的光伏发电仿真模型。该模型主要包含 4×2 光伏阵列、BOOST 升压电路、MPPT 控制模块和负载。其中, BOOST 升压电路的输入电容 C_{in} 为 $0.5 \mu\text{F}$, 用于平滑光伏阵列输出的电压波动; 电感 L 为 8.6 mH , 用于存储能量并实现电压升压; 输出电容 C_{dc} 为 $20.25 \mu\text{F}$, 用于平滑输出电压的纹波; 负载电阻 R 为 20Ω , 代表系统的用电设备, 环境温度设为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在同一仿真环境下, 分别对灰狼优化算法与扰动观察法结合 (GWO-P&O) 算法、PSO 算法、灰狼优化算法和电导增量法结合 (GWO-INC) 算法、LGWO-ZVINC 算法进行仿真分析。实验保持环境温度不变, 改变光伏阵列各组件的光照强度来模拟不同的遮阴方式, 各组件的局部遮阴工况参数见表3。仿真得到 $P-U$ 曲线, 见图6。

表3 光伏组件光照强度参数

Tab.3 light intensity parameters of PV modules

测试模式	光照强度/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)							
	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	PV6	PV7	PV8
模式1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
模式2	1.0	0.9	0.8	0.7	1.0	0.9	0.8	0.7
模式3	1.0	0.8	0.7	0.6	1.0	0.8	0.7	0.6

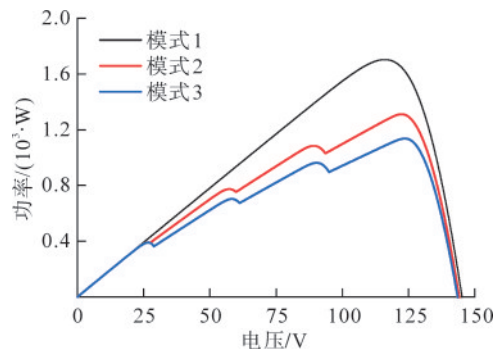


图6 光伏阵列 $P-U$ 曲线

Fig.6 $P-U$ curve of PV array

由图 6 可知,在模式 1 下,光照强度相同, $P-U$ 曲线呈单峰特征,全局最大功率点为 1 703.56 W;在模式 2 和模式 3 下,光照强度不同, $P-U$ 曲线呈多峰值特征,对应的最大功率点分别为 1 311.57 W 和 1 136.84 W。表明随着光照强度变化,光伏阵列整体输出功率发生变化,最大功率点也随之改变。

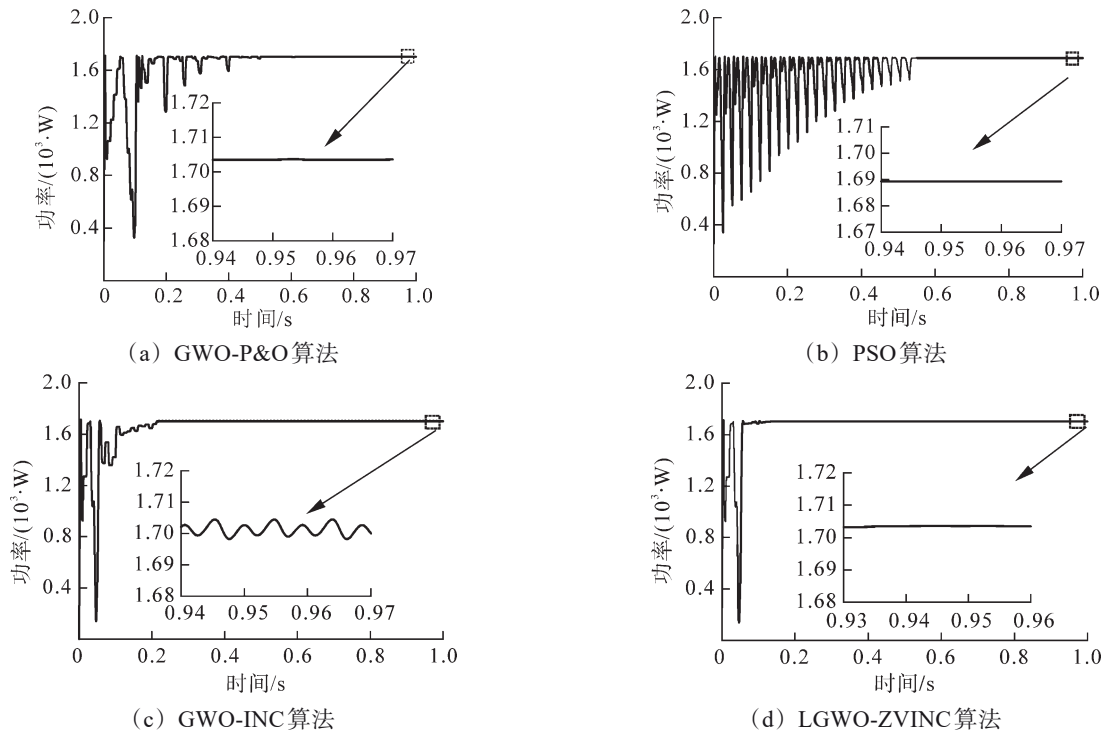


图 7 无遮阴情况下的光伏输出功率

Fig.7 photovoltaic output power without shading

4 种算法的收敛时间、稳定功率、功率振荡统计见表 4。由图 7 和表 4 可知, LGWO-ZVINC 算法的收敛时间和跟踪精度都优于其他 3 种算法,并且算法后期振荡程度远远小于 GWO-INC 算法; PSO 算法后期功率振荡小,但是收敛时间长,且精度不高; GWO-P&O 算法精度高但收敛时间长,后期出现轻微振荡; GWO-INC 算法收敛快,但后期功率出现明显振荡。

表 4 无遮阴情况下 MPPT 控制效果

Tab.4 MPPT control effect without shading

算法	时间/s	功率/W	功率振荡
GWO-P&O ^[16-17]	0.52	1 703.20	较小
PSO	0.45	1 689.25	小
GWO-INC ^[10]	0.24	1 701.97	大
LGWO-ZVINC	0.17	1 703.17	小

3.1 静态无遮阴情况下最大功率点跟踪仿真实验

在静态无遮阴条件下,对上述 4 种算法进行对比分析,光伏功率曲线见图 7。所有算法前期均产生不同程度的振荡,这是由于元启发式算法具有随机初始化机制。

3.2 局部遮阴情况下最大功率点跟踪仿真实验

光伏阵列在局部遮阴情况下,对 4 种 MPPT 算法进行动态跟踪性能测试,各算法性能对比见表 5,光伏输出功率实时响应曲线见图 8。

由图 8 和表 5 可知,在局部遮阴情况下,4 种算法都可实现最大功率点追踪。PSO 算法过早收敛导致精度低; GWO-INC 算法采用定步长,导致它在最大功率点附近振荡; GWO-P&O 算法虽然后期振荡较小,精度高,但是收敛时间长。LGWO-ZVINC 算法的收敛时间、功率跟踪精度、稳态功率振荡均优于其他 3 种算法。

表 5 部分遮阴情况下 MPPT 控制效果

Tab.5 MPPT control effect under partial shading condition

算法	时间/s	功率/W	功率振荡
GWO-P&O ^[20-21]	0.72	1 310.08	较小
PSO	0.64	1 302.72	小
GWO-INC ^[10]	0.28	1 310.99	大
LGWO-ZVINC	0.16	1 311.48	小

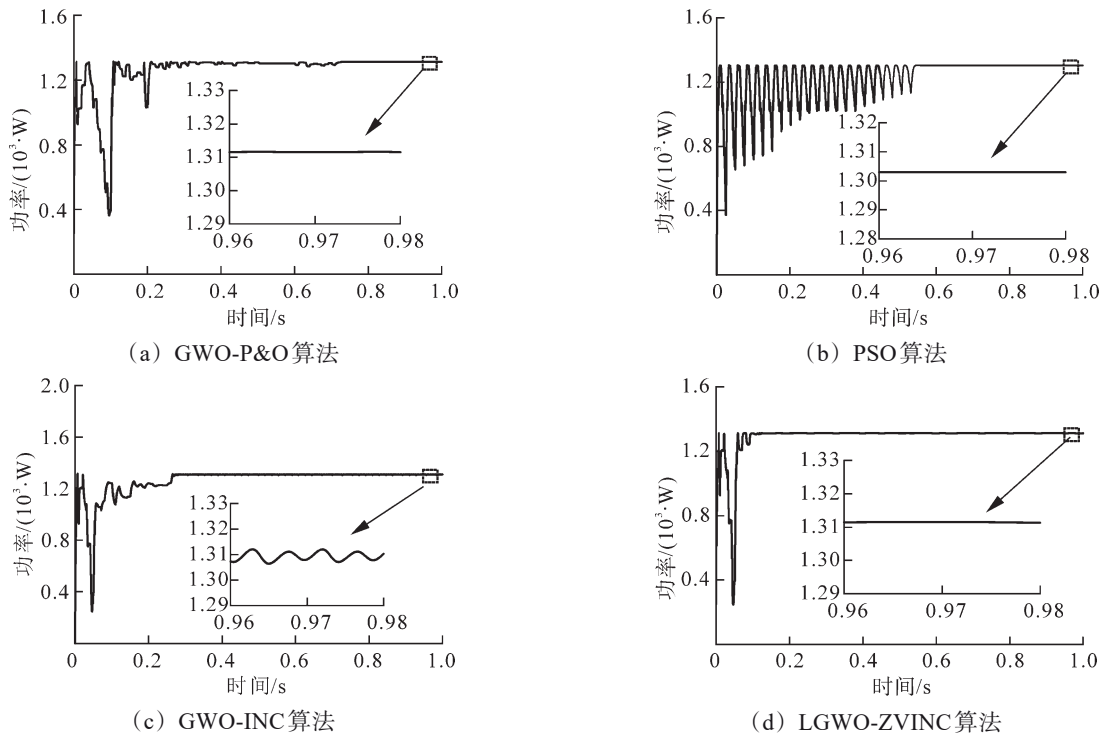


图 8 局部遮阴情况下的光伏输出功率

Fig.8 photovoltaic output power under partial shading

3.3 动态光照条件下仿真实验

在光照发生突变条件下对 4 种算法进行动态仿真。0~1 s 为无遮阴条件 (模式 1), 此时最大功率约为 1 703 W; 1~2 s 为局部遮阴条件 (模

式 2), 最大功率约为 1 311 W; 2~3 s 为局部遮阴条件 (模式 3), 最大功率约为 1 137 W。4 种算法输出功率动态响应曲线见图 9, 算法性能对比见表 6。

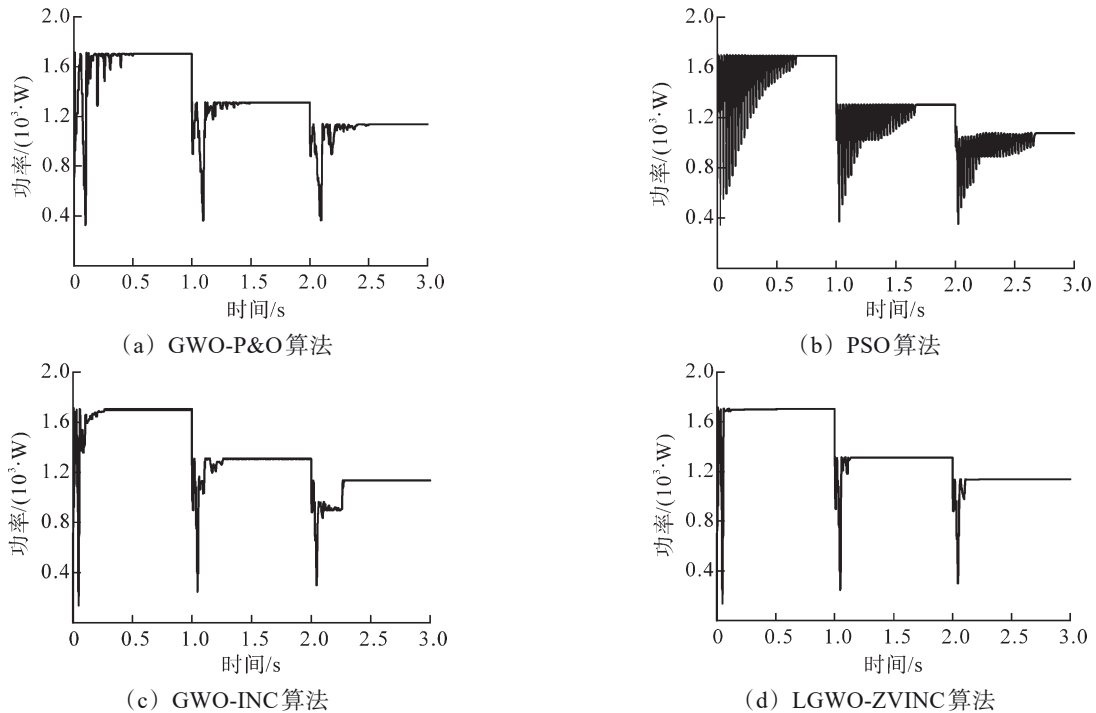


图 9 动态光照条件下光伏输出功率

Fig.9 photovoltaic output power under dynamic illumination conditions

表 6 动态光照情况下 MPPT 控制策略的工作情况

Tab.6 works of MPPT control strategy under dynamic illumination

算法	模式 1		模式 2		模式 3	
	时间/s	功率/W	时间/s	功率/W	时间/s	功率/W
GWO-P&O ^[16-17]	0.52	1 701.75	1.25	1 311.05	2.54	1 130.20
PSO	0.67	1 690.70	1.69	1 301.20	2.71	1 076.33
GWO-INC ^[10]	0.28	1 700.20	1.30	1 307.62	2.29	1 134.07
LGWO-ZVINC	0.11	1 702.50	1.23	1 311.80	2.16	1 136.50

在光照突变条件下, PSO 算法的收敛速度和精度远低于其他 3 种算法; GWO-P&O 算法优于 PSO 算法, 但是仍有一定程度的功率损失; GWO-INC 算法的收敛速度优于 GWO-P&O 算法和 PSO 算法, 但是后期出现明显的振荡; LGWO-ZVINC 算法的精度和收敛速度都优于其他 3 个算法。

4 实验验证分析

为了进一步验证算法的可行性, 基于光伏系统实验平台开展实测研究, 见图 10。该平台包括光伏阵列、DC/DC 电路和 8 块采集板。其中, 光伏阵列采用 SP10-12P 型太阳能电池板, 以 4×2 排列构成, 单个光伏板参数见表 7。



图 10 光伏系统实验平台

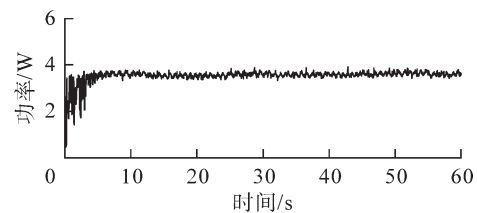
Fig.10 photovoltaic system experiment platform

表 7 单个光伏板参数

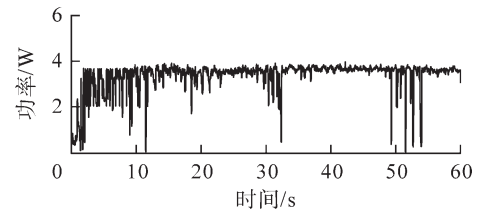
Tab.7 single photovoltaic panel parameters

参数	取值
开路电压/V	21.4
短路电流/A	0.62
最大功率/W	10
峰值电压/V	18.0
峰值电流/A	0.56

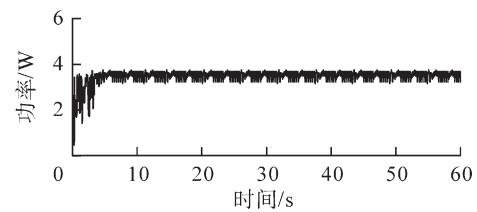
实验采用 3 台 QVF135 IXHAL-TDS500W BK CN 型卤素照明灯作为可调光源。不同算法输出功率见图 11, MPPT 控制效果对比见表 8。由图 11 可知, 最大功率点位于 (31.98 V, 3.62 W) 附近。LGWO-ZVINC 算法的收敛时间为 3.53 s, 最终稳定工作在 3.62 W 功率输出点附近, 其动态响应速度与稳态精度优于其他 3 个算法。



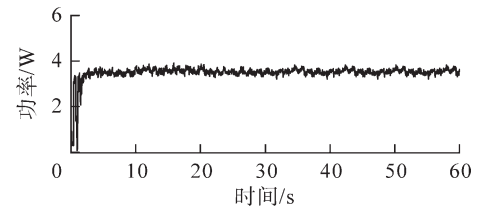
(a) GWO-P&O 算法



(b) PSO 算法



(c) GWO-INC 算法



(d) LGWO-ZVINC 算法

图 11 不同算法下光伏系统输出功率

Fig.11 output power of photovoltaic system under different algorithms

表 8 不同算法 MPPT 控制效果对比

Tab.8 comparison of MPPT control effects of different algorithms

算法	时间/s	功率/W	功率振荡
GWO-P&O ^[16-17]	6.40	3.60	小
PSO	64.50	3.60	大
GWO-INC ^[10]	6.00	3.60	大
LGWO-ZVINC	3.53	3.62	小

5 结论

针对标准GWO算法在寻优过程中容易陷入局部最优和收敛精度低的问题,提出一种基于LGWO-ZVINC的光伏MPPT控制方法。通过理论分析和实验验证得出以下结论。

(1) 在基准测试函数对比中,与GWO和PSO算法相比,LGWO算法收敛精度更高,寻优能力更强。从理论层面验证了LGWO算法的可行性。

(2) 仿真实验结果表明,在无遮阴条件下,LGWO-ZVINC算法收敛时间较GWO-P&O算法、PSO算法和GWO-INC算法分别缩短0.35 s、0.28 s和0.12 s;在有遮阴条件下,LGWO-ZVINC算法收敛时间分别缩短0.56 s、0.45 s和0.12 s。LGWO-ZVINC算法在两种条件下的追踪效率均稳定在99.90%以上。表明LGWO-ZVINC算法具有较高的环境适应性和鲁棒性。

(3) 实验结果表明,与PSO算法、GWO-P&O算法和GWO-INC算法相比,LGWO-ZVINC算法的收敛时间分别缩短2.84 s、60.97 s和2.47 s,且收敛精度达到99.90%以上,验证了其工程应用的可行性。

参考文献(References):

- [1] 花赞昊,朱武,郭启明.光伏发电系统MPPT算法研究综述[J].电源技术,2020,44(12):1855-1858.
HUA Yunhao,ZHU Wu,GUO Qiming.Review of MPPT algorithm of photovoltaic power generation system[J]. Chinese Journal of Power Sources,2020,44(12):1855-1858.
- [2] 石瑛琪,王斌,朱成成.光伏并网发电系统MPPT技术的研究[J].电工技术,2023(10):84-87.
SHI Yingqi,WANG Bin,ZHU Chengcheng.Research on MPPT technology for photovoltaic grid-connected generation systems[J]. Electric Engineering,2023(10):84-87.
- [3] 朱新霞,张庆高,张波,等.基于改进型变步长电导增量法的最大功率点跟踪控制[J].信息技术与信息化,2016(10):44-48.
ZHU Xinxia,ZHANG Qinggao,ZHANG Bo,et al.The MPPT based on the cremental conductance of correctting variable step size[J]. Information Technology and Informatization,2016(10):44-48.
- [4] 吴馥云,陆卫卫.一种变步长扰动观察法的光伏最大功率跟踪技术的研究[J].电气开关,2017,55(6):86-89,92.
WU Fuyun,LU Zhuwei.Research on a variable step perturbation and observation method for photovoltaic maximum power point tracking[J].Electric Switchgear,2017,55(6):86-89,92.
- [5] AL-DHAIFALLAH M, NASSEF A M, REZK H, et al. Optimal parameter design of fractional order control based INC-MPPT for PV system[J].Solar Energy,2018,159:650-664.
- [6] XIA K, LI Y, ZHU B J. Improved photovoltaic MPPT algorithm based on ant colony optimization and fuzzy logic under conditions of partial shading[J].IEEE Access,2024,12:44817-44825.
- [7] 吴玲,张秀锦,刘秋华,等.基于多元宇宙优化算法的光伏发电MPPT控制算法[J].太阳能学报,2023,44(9):204-211.
WU Ling,ZHANG Xiujin,LIU Qiuhua,et al.Mppt control algorithm of photovoltaic power generation based on multi-verse optimization algorithm[J].Acta Energiae Solaris Sinica,2023,44(9):204-211.
- [8] 孙淑琴,李丞,李再华,等.基于金枪鱼群优化算法的光伏MPPT控制策略研究[J].电源技术,2023,47(9):1202-1206.
SUN Shuqin,LI Cheng,LI Zaihua,et al.Research on photovoltaic MPPT control strategy based on tuna swarm optimization algorithm [J].Chinese Journal of Power Sources,2023,47(9):1202-1206.
- [9] 施磊,郝武帮,郭晓龙.基于Levy飞行策略和改进灰狼算法的光伏阵列MPPT研究[J].电力科学与工程,2023,39(6):17-24.
SHI Lei,HAO Wubang,GUO Xiaolong.Study on MPPT of photovoltaic array based on levy flight strategy and improved grey wolf algorithm[J]. Electric Power Science and Engineering,2023,39(6):17-24.
- [10] 王金玉,苗飞祥,董秀波.基于灰狼&电导增量的局部遮阴下光伏最大功率跟踪[J].电气自动化,2023,45(3):37-39.
WANG Jinyu,MIAO Feixiang,DONG Xiubo.Photovoltaic maximum power point tracking control under local shading based on gray wolf algorithm & conductance increment[J]. Electrical Automation,2023,45(3):37-39.
- [11] WAN Y H, MAO M X, ZHOU L, et al. A novel nature-inspired maximum power point tracking (MPPT) controller based on SSA-GWO algorithm for partially shaded photovoltaic systems[J]. Electronics,2019,8(6):680.
- [12] CHTITA S, MOTAHHIR S, EL HAMMOUMI A, et al. A novel hybrid GWO-PSO-based maximum power point tracking for photovoltaic systems operating under partial shading conditions[J]. Scientific Reports,2022,12:10637.
- [13] 付华,张彤,于田,等.改进FA算法在阴影条件下光伏MPPT中的应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(2):156-162.
FU Hua,ZHANG Tong,YU Tian,et al.Application of improved FA algorithm in photovoltaic MPPT under shadow conditions[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2021,40(2):156-162.
- [14] 崔琛彬.基于IPOA-IP&O的光伏MPPT及并网控制策略研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2024:18-22.
- [15] MIRJALILI S,MIRJALILI S M,LEWIS A.Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software,2014,69:46-61.
- [16] HARRISON A, ALOMBAH N H, DE DIEU NGUIMFACK NDONGMO J. A new hybrid MPPT based on incremental conductance-integral backstepping controller applied to a PV system under fast-changing operating conditions[J]. International Journal of Photoenergy,2023,2023:9931481.
- [17] ZHAO F, XIAO C R, CHEN X Q, et al. Maximum photovoltaic power point tracking based on hybrid GWO-P & O algorithm under local shadow[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation,2024,15(1):64-71.