DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.157 **中图分类号**：TM615 **文献标志码**：A

基于改进哈里斯鹰和电导增量法的MPPT控制研究

罗皓鹏[1]，汪隆臻[2]，刘 婷[1]，谭亲跃[1]
(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院，杨凌 712100；2.国网安徽省电力公司马鞍山供电公司，马鞍山 243000)

摘要：针对光伏阵列局部遮阴时 *P-U* 输出特性曲线呈多峰值的特点，以及传统最大功率点追踪 MPPT (maximum power point tracking)法易陷入局部最优且难以平衡追踪精度和速度的难题，提出一种改进哈里斯鹰优化 IHHO (improved Harris hawk optimization)算法与变步长电导增量 INC (incremental conductance)法复合的 MPPT 算法。该算法通过波峰区间划分分析极值存在的电压区间，以缩小算法搜索范围，区间内采用 IHHO 算法进行全局搜索。首先使用 IHHO 算法依次优化初始位置于各区间 0.8 倍开路电压附近；然后使用莱维飞行优化勘探阶段缩放因子，算法收敛后切换为变步长 INC 法进行局部开发；最后设置 4 种光照情况进行验证。仿真结果表明，所提复合 MPPT 算法在复杂遮阴与低光照情况下以及光照突变情况下，均能有效避免掉入局部陷阱，较改进前搜索速度平均提高 50%。

关键词：光伏发电；局部遮阴；最大功率点追踪 MPPT；复合算法；改进哈里斯鹰优化 IHHO 算法

Research on MPPT Control Based on Improved Harris Hawk Optimization Algorithm and Incremental Conductance Method

LUO Haopeng[1], WANG Longzhen[2], LIU Ting[1], TAN Qinyue[1]
(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;
2. Ma'anshan Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Ma'anshan 243000, China)

Abstract: Aimed at the multi-peak characteristics of *P-U* output characteristic curves when a photovoltaic array is partially shaded, as well as the problem that the traditional maximum power point tracking (MPPT) method is easy to fall into local optimum and difficult to strike a balance between its tracking accuracy and speed, an MPPT algorithm combining the improved Harris hawk optimization (IHHO) algorithm and variable-step incremental conductance (INC) method is proposed. This algorithm divides the peak region to determine the voltage range where the extreme point exists, so as to narrow the search scope of the algorithm, and then applies the IHHO algorithm for global search in this range. First, the IHHO algorithm optimizes the initial position near 0.8 times the open-circuit voltage in each interval sequentially. Then, the Levy flight is used to optimize the scaling factor at the exploration stage. After the algorithm converges, it is switched to the variable-step INC method for local development. Finally, four kinds of illumination conditions are set up for verification. Simulation results show that the proposed composite MPPT algorithm can effectively avoid falling into local traps under complex shading, low illumination and illumination mutation conditions. In addition, the search speed is improved by 50 % on average.

Keywords: Photovoltaic power generation; partial shading; maximum power point tracking (MPPT); composite algorithm; improved Harris hawk optimization (IHHO) algorithm

收稿日期：2024-01-12；**修回日期**：2024-04-11，2024-05-30；
录用日期：2024-06-14；**网络首发日期**：2024-07-13
基金项目：国家电网科技资助项目(B312B023000G)
This work is supported by Technology Project of State Grid Corporation of China under the grant B312B023000G

光伏发电在清洁能源中占据重要地位[1-2]，但其效率受外部环境影响较大。例如，当树木、云层等对光伏组件遮挡造成局部阴影时，其效率会大幅降低[3]。为了高效利用太阳能，部分学者将研究

重心集中到最大功率点追踪 MPPT (maximum power point tracking)技术。传统 MPPT 法如扰动观察法[4]、电导增量 INC (incremental conductance)法[5]等均可以准确找到最大功率点 MPP (maximum power point)，但易陷入局部最优，导致功率损耗[6-8]。

随着非线性理论和智能优化算法的发展，模糊算法[9]、自适应算法[10]、群智能算法[11-17]已经能较好地解决 MPPT 面临的多峰问题。文献[9]提出一种粒子群和模糊变步长 INC 法，该算法能快速有效追踪到 MPP；文献[10]提出一种改进 INC 法，该方法简洁且效果较好；文献[11]提出一种自适应果蝇算法，该算法有效避免了陷入局部极值；文献[12]通过模仿哈里斯鹰提出哈里斯鹰优化 HHO (Harris hawk optimization) 算法，该算法的全局搜索能力强，且无需烦琐的调参。文献[13-16]综合对比各类算法得出，复合算法在性能和复杂度上较为均衡，其优化主要集中于参数优化，通过引入特定数学公式使参数自适应，但较少关注搜索范围问题；文献[17]通过 *I-U* 特性曲线的斜率 I_{sc}/U_{oc} 求得 MPP 所处电压大于 $0.5U_{oc}$，该方法极大减少了无效搜索次数，其中，I_{sc} 为短路电流，U_{oc} 为开路电压。

综合上述分析，本文提出一种改进哈里斯鹰优化 IHHO(improved Harris hawk optimization)与变步长电导增量法(IHHO-INC)的复合 MPPT 控制策略。针对原始 HHO 算法存在收敛精度低、跟踪速度慢、易陷入局部最优的不足，本文首先优化哈里斯鹰的初始位置，令哈里斯鹰分布在 0.8 倍 U_{oc} 处，并采用波峰区间划分法将所有局部最大功率点 LMPP (local maximum power point)以及全局最大功率点 GMPP (global maximum power point)包含在搜索范围内。该划分法在剔除无效范围的同时，避免了遗漏 GMPP 导致的功率损失。接着将越界个体引导至最优个体附近。然后在勘探阶段加入莱维飞行，在 IHHO 算法收敛时，切换变步长 INC 法，进行局部开发。最后利用 MATLAB/Simulink 仿真，结果表明 IHHO-INC 复合 MPPT 法能在静态、动态的多种情况下实现光伏阵列 GMPP 的快速精确跟踪。

1 局部遮阴下光伏阵列多峰特性

光伏电池等效电路如图 1 所示。

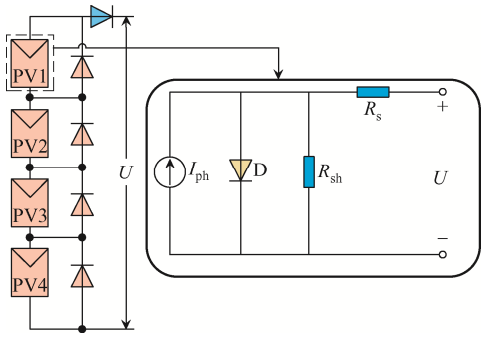


图 1 光伏电池等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of photovoltaic cell

图 1 中：I_{ph} 为光生电流；D 为二极管；R_{sh} 和 R_s 均为光伏电池非理想效应产生电阻。光伏电池输出电流的数学方程为

$$I = I_{ph} - I_0\left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{nkT_c}} - 1\right) - \frac{U+IR_s}{R_{sh}} \tag{1}$$

式中：I、U 分别为单体光伏电池输出电流与电压；I_0 为反向饱和电流；q 为单位负荷；n 为二极管指数；k 为玻尔兹曼常数；T_c 为外界温度。

为了便于工程应用，式(1)可简化为

$$I = I_{sc}\left[1 - C_1 I_{sc}\left(e^{\frac{U}{C_2 U_{oc}}} - 1\right)\right] \tag{2}$$

式中，C_1、C_2 均为待定系数，其表达式分别为

$$\begin{cases} C_1 = \left(1 - \dfrac{I_m}{I_{sc}}\right) e^{\frac{-U_m}{C_2 U_{oc}}} \\ C_2 = \left(\dfrac{U_m}{U_{oc}} - 1\right)\left[In\left(1 - \dfrac{I_m}{I_{sc}}\right)\right]^{-1} \end{cases} \tag{3}$$

式中：I_m 为 MPP 电流；U_m 为 MPP 电压。

设光伏电池开路电压为 35.4 V，短路电流为 7.44 A，MPP 电压、电流分别为 28.8 V 和 6.94 A，电压、电流温度系数分别为−0.320 690%/℃和 0.078 276%/℃。在 MATLAB/Simulink 中搭建 4×1 的光伏阵列模型，光伏阵列光照情况见表 1。

表 1　光伏阵列各组件光照情况

Tab. 1 Irradiance of each component of photovoltaic array

参数	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
PV1/(W/m^2)	1 000	1 000	1 000	1 000
PV2/(W/m^2)	1 000	1 000	800	300
PV3/(W/m^2)	1 000	800	600	150
PV4/(W/m^2)	1 000	600	200	200
MPP 功率/W	794.6	534.4	390.2	180.5

图 2 为 4 种光照情况下的光伏阵列 *P-U* 特性曲线，其中，虚线为标准条件下 MPP 对应的等效电阻负载特性曲线。由图 2 可观察到以下现象。

(1)光伏阵列在局部遮挡情况下将出现多个极值点。光伏阵列的多峰数量与遮挡组件数有关，遮挡严重时 MPP 电压处于低压侧，反之位于高压侧。

(2)在光照情况由光照情况 1 突变为光照情况 3 时，点 *E* 在 MPP 点 *C* 所处波峰，尚能准确寻优。

(3)经典扰动式 MPPT 法在多峰曲线中会误认其中 1 个 LMPP 为 GMPP，从而造成功率损失。在光照情况由光照情况 1 突变为光照情况 2 时，MPPT 将寻优至点 *D* 附近的 LMPP，而非 MPP 点 *B*。

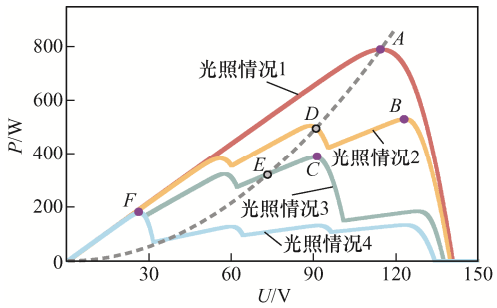


图 2　光伏阵列 *P-U* 特性曲线

Fig. 2 *P-U* characteristic curves for photovoltaic array

将光伏特性曲线规律用于改进全局搜索能力更强的 MPPT 法能有效解决易陷入局部最优的问题。

2　基于 IHHO-INC 的 MPPT 控制策略

2.1　哈里斯鹰算法

经典 HHO 算法[12]主要分为勘探阶段、勘探向围捕转变的阶段、围捕阶段 3 部分。

(1)勘探阶段

该阶段哈里斯鹰随机栖息在某个地方，并通过 2 种选择概率相等的策略进行全局搜索，，可表示为

$$X_i^{t+1}=\begin{cases}X_{\text{rand}}^t-r_1\cdot\left|X_{\text{rand}}^t-2r_2\cdot X_i^t\right| & q\geqslant 0.5\\ \left|X_{\text{rabbit}}^t-X_{\text{m}}^t\right|-r_3\left[L_{\text{b}}+r_4\left(U_{\text{b}}-L_{\text{b}}\right)\right] & q<0.5\end{cases}\tag{4}$$

式中：t 为当前迭代次数；X_{rand}^t 为 t 次迭代后随机选择个体位置；r_1、r_2、r_3、r_4、q 均为[0, 1]中的数；X_i^t 为第 t 次迭代后个体 i 的位置；X_{rabbit}^t 为当前猎物位置；U_{b} 和 L_{b} 分别为搜索空间的上、下限；X_{m}^t 为 t 次迭代后种群的平均位置，计算公式为

$$X_m^t=\frac{\sum_{i=1}^{N}X_i^t}{N}\tag{5}$$

式中，N 为种群大小。

(2)勘探向围捕转变的阶段

猎物逃逸能量会随迭代次数的增加动态减少，HHO 算法根据猎物的逃逸能量在勘探与不同开发行为之间转换。逃逸能量可表示为

$$E=2E_0\left(1-\frac{t}{T}\right)\tag{6}$$

式中：E_0 为猎物初始逃逸能量，是[−1, 1]之间的随机数；T 为最大迭代次数。当$|E|\geqslant 1$时执行全局探索策略，当$|E|<1$时执行局部开发策略。

(3)围捕阶段

当$|E|<1$时，种群进入围捕猎物阶段，根据哈里斯鹰的捕食策略，局部开发策略设计了软包围、硬包围和渐进式快速俯冲的软、硬包围 4 种策略进行位置更新。定义 r 为[0, 1]的随机数，用来判断采用的不同策略。

①软包围

当 $0.5\leqslant|E|<1.0$ 且 $r\geqslant 0.5$ 时，采用软包围策略进行位置更新，更新公式为

$$X_i^{t+1}=\Delta X^t+E\cdot\left|J\cdot X_{\text{rabbit}}^t-X_i^t\right|\tag{7}$$

式中：ΔX^t 为猎物位置与当前候选位置的距离，$\Delta X^t=X_{\text{rabbit}}^t-X_i^t$；$J$ 为[0, 2]的随机数。

②硬包围

当$|E|<0.5$且$r\geqslant 0.5$时，采用硬包围策略进行

位置更新，更新公式为

$$X_i^{t+1} = X_{\text{rabbit}}^t - E\left|\Delta X^t\right| \tag{8}$$

③渐进式快速俯冲的软包围

当 $0.5 \leqslant |E| < 1.0$ 且 $r < 0.5$ 时，采用渐进式快速俯冲的软包围进行位置更新，更新公式为

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} Y & f(Y) < f(X_i^t) \\ Z & f(Y) \geqslant f(X_i^t),\ f(Z) < f(X_i^t) \\ \text{保持} & f(Y) \geqslant f(X_i^t),\ f(Z) \geqslant f(X_i^t) \end{cases} \tag{9}$$

$$Y = X_{\text{rabbit}}^t - E \cdot \left| J \cdot X_{\text{rabbit}}^t - X_i^t \right| \tag{10}$$

$$Z = Y + \boldsymbol{S} \cdot L_{\text{LF}}(D) \tag{11}$$

式中：Y、Z 分别为第一、第二候选解；$f(\cdot)$ 为适应度函数；D 为维度；$\boldsymbol{S}$ 为 $1\times D$ 的随机向量；L_{LF} 为莱维飞行，其公式为

$$L_{\text{LF}}(x) = \frac{u\sigma}{100|v|^{\frac{1}{\beta}}} \tag{12}$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta)\cdot \sin\left(\frac{1}{2}\cdot\pi\beta\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right)\cdot\beta\cdot 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \tag{13}$$

式中：u、v 均为[0,1]的随机数；σ 为生成莱维分布必需的标准差控制参数；β 为随机常量；$\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

④渐进式快速俯冲的硬包围

当 $|E| < 0.5$ 且 $r < 0.5$ 时，采用渐进式快速俯冲的硬包围策略进行位置更新，见式(9)。此策略下 Z 的更新公式同式(11)，Y 的更新公式为

$$Y = X_{\text{rabbit}}^t - E \cdot \left| J \cdot X_{\text{rabbit}}^t - X_{\text{m}}^t \right| \tag{14}$$

2.2 IHHO-INC 复合算法在 MPPT 中的应用

对经典 HHO 算法初始位置分布、种群越界限制和种群遍历性进行改进，并结合变步长 INC 法优化算法精度不足的问题。

2.2.1 初始位置及种群越界优化

相同环境温度下不同遮挡状态组串的波峰数量和分布区间不同，含 M 个组件意味着最多存在 M 个波峰。若忽略旁路二极管导致的压降及光照强度对 U_{oc} 的影响，波峰必定分布在被 M 等分的区间内，且各区间只有 1 个波峰[18]。以表 1 中的光照情况 3 为例，各波峰分布曲线的初始位置分布及算法搜索范围如图 3 所示。若不考虑旁路二极管的导通压降和光照强度对 U_{oc} 的影响，则有 $U_{\text{oc}} = Mu_{\text{oc}}$，其中，$u_{\text{oc}}$ 为光伏组件的开路电压。

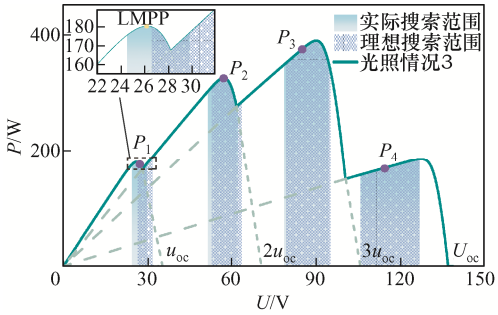


图 3 各波峰 *P-U* 曲线初始位置分布及算法搜索范围

Fig. 3 Distribution of initial position, and search range of algorithm for each peak of the *P-U* curves

由于各光伏组件 MPP 电压均为 U_{mpp}，故光伏多峰曲线的 LMPP 电压 U_i 近似分布于

$$U_i = iU_{\text{mpp}} \quad i = 1,\ 2,\ \cdots,\ M \tag{15}$$

根据恒定电压法原理可知，MPP 的位置与 U_{oc} 呈近似线性关系，故取 0.75~0.85 倍的 u_{oc}[15]。串联光伏组件的输出特性为不受遮挡的组件先工作，受遮挡的组件二极管导通。当组串的光生电流小于遮挡组件时，旁路二极管截止，继而组件工作[17]。考虑到实际旁路二极管导通存在压降，综上可将 式(15)改进为

$$U_i = \frac{KiU_{\text{oc}}}{M} - (M - i - 1)u_{\text{d}} \tag{16}$$

式中：K 为比例常数，取值范围为 0.75~0.90；u_{d} 为二极管导通电压。

图 1 所示的光伏阵列中 M=4，故哈里斯鹰的搜索范围依据式(16)划分区间，将各 LMPP 包含在搜索范围。当组件较多导致第 i 个和第 i+1 个区间相交时，令后者上界等于前者下界以避免重复搜索。哈里斯鹰初始位置定于 $0.8iu_{\text{oc}}$ 附近，如图 3 中的 P_1、P_2、P_3 和 P_4，该初始化位置方式缩短了个体至 LMPP 的距离，可在图 2 案例中避免对无效区间的搜索，在不降低全局搜索能力的同时，节省搜索时间、减少算法运算量。

相对经典 HHO 算法将越限个体随机分布至范围内，其更新越限个体位置的表达式为

$$X_i^t = X_{\text{rabbit}}^t + r_{\text{rand}} \cdot \frac{2T}{t} \tag{17}$$

式中，r_{rand} 为随机数。通过式(17)将越限个体带回至上次最优候选解附近，以降低电压和功率波动。

2.2.2　种群遍历性改进

莱维飞行作为一种随机游走方式，能较好地增强哈里斯鹰在勘探阶段的遍历性。为了提升全局寻优能力，避免陷入局部最优，引入莱维飞行替换 HHO 勘探阶段的缩放因子，其表达式为

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{rand}}^t - L_{\text{LF}}(D) \cdot \left| X_{\text{rand}}^t - 2L_{\text{LF}}(D) \cdot X_i^t \right| & q \geqslant 0.5 \\ \left| X_{\text{rabbit}}^t - X_{\text{m}}^t \right| - L_{\text{LF}}(D)[L_{\text{b}} + L_{\text{LF}}(D)(U_{\text{b}} - L_{\text{b}})] & q < 0.5 \end{cases} \tag{18}$$

2.2.3　变步长电导增量法

针对 HHO 算法局部开发精度存在不足的问题，在 IHHO 算法达到迭代次数时，终止算法输出最优解。

设定约束条件

$$\Delta P = \frac{\left| P_{\text{new}} - P_{\text{old}} \right|}{P_{\text{old}}} < 0.05 \tag{19}$$

式中：ΔP 为功率偏差比例；P_{new}、P_{old} 分别为算法最新位置功率、上一次所在位置功率。当满足式(19)后，将复合算法切换为变步长 INC 算法。

INC 法是一种扰动式 MPPT 算法，利用 MPP 处 $\mathrm{d}P/\mathrm{d}U = 0$ 的特性，该方法跟踪平稳且精度高，适用于局部开发。与传统 HHO 算法相比，IHHO-INC 复合算法具有更优的综合搜索能力，算法流程如图 4 所示。

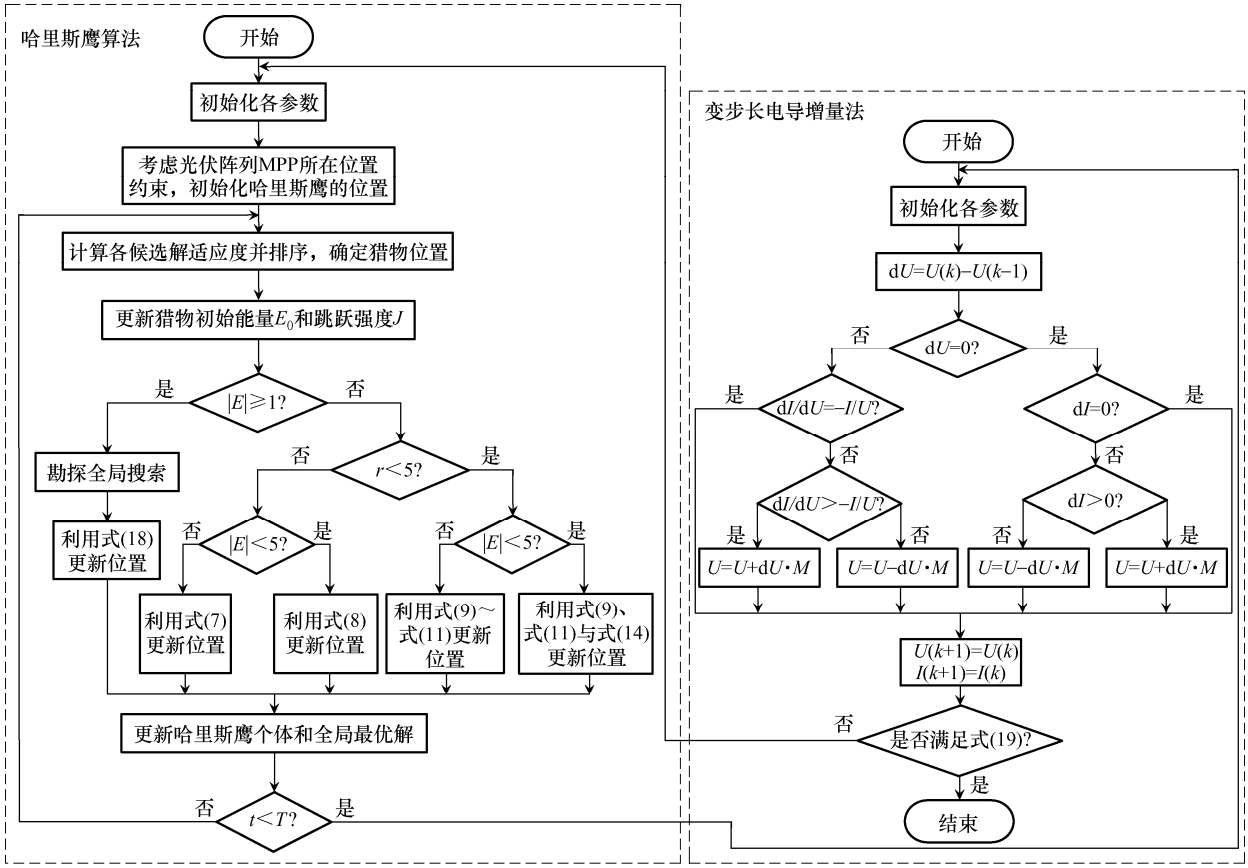


图 4　IHHO-INC 复合算法流程

Fig. 4 Flow chart of IHHO-INC composite algorithm

3 IHHO-INC 复合的 MPPT 控制算法仿真实验

3.1 仿真对比分析

为验证所提 MPPT 控制算法的有效性，本文在 MATLAB/Simulink 中搭建光伏 MPPT 模型，其系统结构如图 5 所示。系统由 4×1 光伏阵列、Buck 电路、MPPT 模块、PWM 及低通滤波器 LPF (low-pass filter)组成。图中：C_1、C_2 分别为输入、输出电容；L 为电感；U_{pv} 、I_{pv} 分别为光伏阵列输入电压与电流。

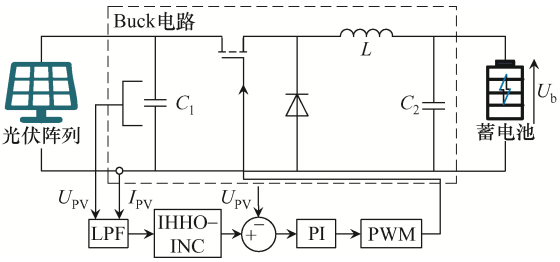


图 5 光伏 MPPT 模型系统结构

Fig. 5 System structure of photovoltaic MPPT model

将文中所提算法与未改进前的经典 HHO 算法、INC、改进电导增量 AD-INC (adaptive differential-incremental conductance)法以及粒子群优化 PSO (particle swarm optimization)算法进行对比，静态情况模拟情况 1(均匀光照)、情况 2(局部遮挡-高压 MPP)、情况 4(局部遮挡-低压 MPP)，动态情况模拟情况 1 至情况 2 再到情况 3，性能仿真对比结果如图 6 所示。

为直观看出各算法性能，将各算法跟踪速度与效率进行对比，仿真结果如图 7 所示，效率 η 的公式为

$$\eta=\frac{P_{out}}{P_{max}}\times 100\% \tag{20}$$

式中：P_{out} 为算法运行得到的稳态输出功率；P_{max} 为光伏阵列理论最大输出功率。

由图 7 可知，均匀光照下，小步长 INC 法的寻优精度虽高，但其收敛速度相对较慢；若取较大步长，INC 的振荡会相应增大；自适应步长的 INC 虽能较好地兼顾寻优速度与寻优精度，但并未提

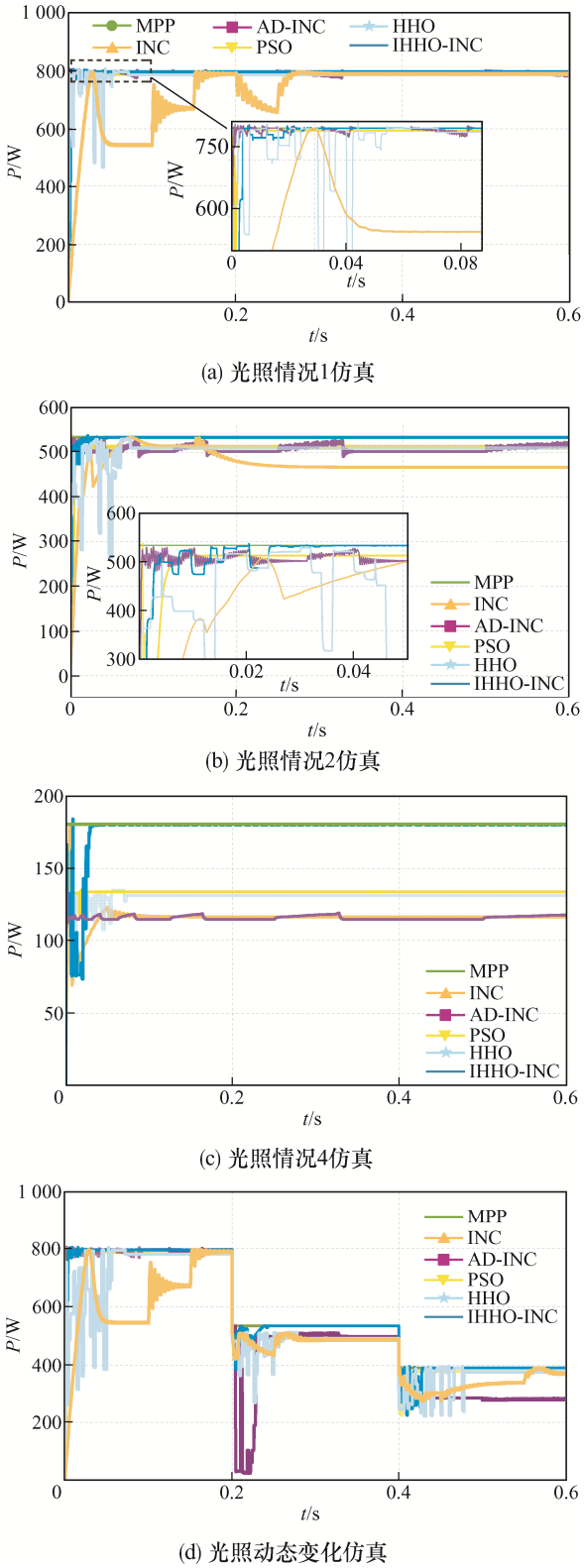


图 6 HHO 算法改进前、后性能对比

Fig. 6 Comparison of performance before and after improvement of HHO algorithm

升算法全局搜索能力。局部遮挡时，2 种 INC 算法相较于智能算法寻优效率降低；遮挡情况加重时，仅本文所提算法收敛至 MPP 附近。光照动态变化时，各对比算法的效率均出现了不同程度的降低。总体而言，本文所提算法在收敛速度方面快于除 PSO 算法外的对比算法，平均收敛时间为 0.038 s；而在寻优精度方面，IHHO-INC 算法在静态和动态光照下均优于其他对比算法。相较于改进前，本文算法收敛速度缩短 50.0%、效率平均提升 24.2%。

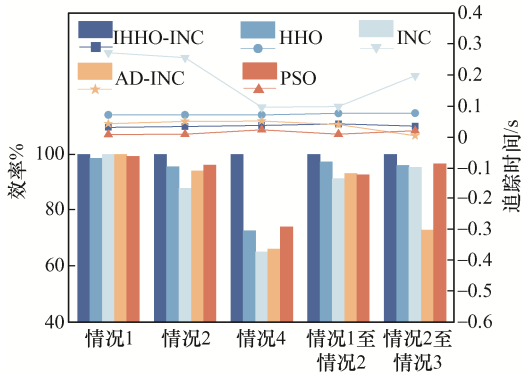


图 7　仿真结果

Fig. 7 Simulation results

3.2　实验分析

为验证所提算法在实际应用中的效果，搭建光伏发电系统实验平台，如图 8 所示，实验平台主要包括 2×2 光伏阵列、DC-DC 电路、蓄电池和上位机等。实验所用单个光伏板最大输出功率为 20 W，MPP 电流为 1.14 A，MPP 电压为 17.6 V，开路电压为 21.7 V，短路电流为 1.26 A。蓄电池模拟器中的电池类型为磷酸铁锂，电池参数分别为 5.0 kW·h、48.0 V、100.0 A·h。

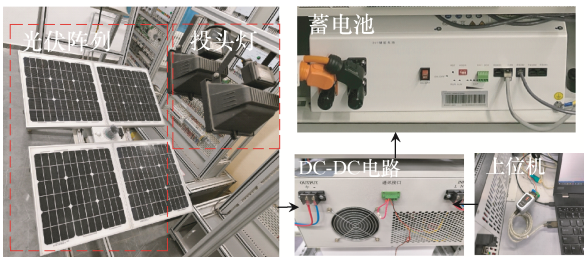


图 8　光伏发电系统实验平台

Fig. 8 Experimental platform for photovoltaic power generation system

光照情况验证均匀光照与局部遮挡 2 种情况，均匀光照强度为 1 000 W/m^2，局部遮挡时一串光伏板光照强度降低为 600 W/m^2，在上位机中运行算法并将占空比输入至 DC-DC 电路控制开关管。本次实验分别验证均匀光照和局部遮挡下 IHHO-INC 算法的寻优能力，光伏 *P-U* 曲线及实验结果如图 9 所示，可知均能追踪至 MPP。

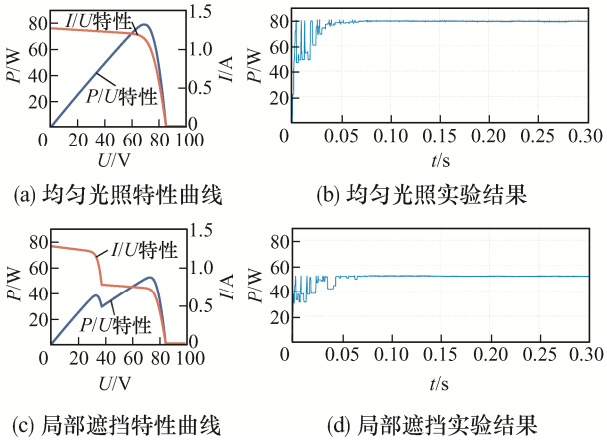


图 9　光伏 *P-U* 曲线及实验结果

Fig. 9 Photovoltaic *P-U* curves and experimental results

4　结论

光伏阵列在部分遮挡情况下，其输出特性曲线具有多个极值点，通过分析多峰曲线 MPP 位置规律，本文提出一种改进哈里斯鹰与电导增量法结合的 MPPT 算法，并得出以下结论。

(1)光伏局部遮阴导致多极值曲线需应用全局搜索能力强的算法，将莱维飞行引入哈里斯鹰勘探阶段，有效提升了全局搜索能力，搜索效率平均提高 24.2%。

(2)优化初始位置且按区间限制搜索范围能有效提升寻优效率，有效覆盖高、低压 MPP，追踪时间缩短 50.0%。

(3)IHHO-INC 算法稳态误差极小，具有较优的稳态和动态性能。考虑到 IHHO 算法仍有改进空间，可针对算法参数继续优化，如搜索范围可以尝试确定波谷所处位置，以进一步缩小区间。

参考文献：

[1] 李政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4000.
Li Zheng, Chen Siyuan, Dong Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4000. (in Chinese)

[2] 魏一鸣, 韩融, 余碧莹, 等. 全球能源系统转型趋势与低碳转型路径：来自于IPCC第六次评估报告的证据[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 163-188.
Wei Yiming, Han Rong, Yu Biying, et al. Global energy systems transition trend and low-carbon transformation pathways: Evidences from the IPCC AR6 [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2022, 24(4): 163-188. (in Chinese)

[3] 周元贵, 陈启卷, 何昌炎, 等. 局部阴影下光伏阵列建模及多峰值MPPT控制[J]. 太阳能学报, 2016, 37(10): 2484-2490.
Zhou Yuangui, Chen Qijuan, He Changyan, et al. Model of PV array under partial shading and MPPT control of multi-peak characteristics [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(10): 2484-2490. (in Chinese)

[4] 商立群, 李帆. 基于自适应布谷鸟搜索和扰动观察法的光伏最大功率点跟踪[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 99-107.
Shang Liqun, Li Fan. PV power point tracking based on adaptive cuckoo search and perturbation observation method [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 99-107. (in Chinese)

[5] 陈景文, 张文倩, 李晓飞. 基于改进电导增量法的光伏MPPT控制[J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 47-55.
Chen Jingwen, Zhang Wenqian, Li Xiaofei. Photovoltaic MPPT control based on improved conductance increment method [J]. Smart Power, 2021, 49(9): 47-55. (in Chinese)

[6] John Bosco M, Carolin Mabel M. A novel cross diagonal view configuration of a PV system under partial shading condition [J]. Solar Energy, 2017, 158: 760-773.

[7] Bana S, Saini R P. Experimental investigation on power output of different photovoltaic array configurations under uniform and partial shading scenarios [J]. Energy, 2017, 127: 438-453.

[8] 毛琳, 任正云. 基于变步长不完全偏微分电导增量法的MPPT控制[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 125-132, 187.
Mao Lin, Ren Zhengyun. MPPT control based on variable step size incomplete partial differential incremental conductance method [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 125-132, 187. (in Chinese)

[9] 梅润杰, 张经炜. 基于 Z 源逆变器的粒子群和模糊变步长电导增量MPPT算法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(1): 137-145.
Mei Runjie, Zhang Jingwei. MPPT algorithm of particle swarm optimization and fuzzy variable step incremental conductance method based on Z-source inverter [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(1): 137-145. (in Chinese)

[10] 张东宁. 基于改进电导增量法的光伏最大功率点跟踪策略研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 82-90.
Zhang Dongning. Research on photovoltaic maximum power point tracking strategy based on improved conductance increment method [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(8): 82-90. (in Chinese)

[11] 原琳, 程海军, 赵凤贤. 自适应果蝇算法多峰值光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 电源学报, 2020, 18(3): 168-174.
Yuan Lin, Cheng Haijun, Zhao Fengxian. Maximum power point tracking of multi-peak PV array using adaptive fruit fly optimization algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(3): 168-174. (in Chinese)

[12] Heidari A A, Mirjalili S, Faris H, et al. Harris hawks optimization: Algorithm and applications [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 97: 849-872.

[13] Yap K Y, Sarimuthu C R, Lim J M. Artificial intelligence based MPPT techniques for solar power system: A review [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(6): 1043-1059.

[14] 肖义平, 赵云峰. 基于混沌映射和高斯扰动的改进粒子群优化算法MPPT控制策略研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 96-104.
Xiao Yiping, Zhao Yunfeng. Research on MPPT control strategy based on improved PSO algorithm using chaotic mapping and Gaussian perturbation [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 96-104. (in Chinese)

[15] 刘志赢, 汪友华, 刘成成, 等. 基于多岛遗传算法与响应面法的横向磁通感应加热装置参数优化设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(10): 3180-3191.
Liu Zhiying, Wang Youhua, Liu Chengcheng, et al. Optimization design of parameters for transverse flux induction heating device based on multi-island genetic algorithm and response surface method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(10): 3180- 3191. (in Chinese)

[16] 李翠萍, 司文博, 李军徽, 等. 基于集合经验模态分解和多目标遗传算法的火-多储系统调频功率双层优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 2017-2032.
Li Cuiping, Si Wenbo, Li Junhui, et al. Two-layer optimization of frequency modulated power of thermal generation and multi-storage system based on ensemble empirical mode decomposition and multi-objective genetic algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 2017-2032. (in Chinese)

[17] 卫永琴, 李震, 林孟涵, 等. 局部遮阴下双优化 PSO 在光伏 MPPT 中的应用研究[J]. 电源技术, 2023, 47(2): 260-264.
Wei Yongqin, Li Zhen, Lin Menghan, et al. Application of double-optimized PSO in photovoltaic MPPT under partial shading [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(2): 260-264. (in Chinese)

[18] 韩鹏, 李银红, 何璇, 等. 结合量子粒子群算法的光伏多峰最大功率点跟踪改进方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 101-108.
Han Peng, Li Yinhong, He Xuan, et al. Improved maximum power point tracking method for photovoltaic multi-peak based on quantum-behaved particle swarm optimization algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 101-108. (in Chinese)



罗皓鹏

作者简介：

罗皓鹏(1999—　)，男，硕士研究生。研究方向：光伏最大功率点追踪及并网技术。E-mail：hpluo@nwsuaf.edu.cn。

汪隆臻(1984—　)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统及其自动化。E-mail：wanglz0014@ah.sgcc.com.cn。

刘婷(1999—　)，女，硕士研究生。研究方向：柔性直流输电线路故障识别。E-mail：tingliu@nwsuaf.edu.cn。

谭亲跃(1975—　)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：可再生能源发电。E-mail：qinyuetan@nwsuaf.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)