DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.216　　**中图分类号**：TM615　　**文献标志码**：A

基于改进蜣螂算法的光伏 MPPT 控制

孔令哲[1]，林孟涵[2]，卫永琴[1]，李　震[1]

(1.山东科技大学电气与自动化工程学院，青岛 266590；2.温州技师学院智能控制学院，温州 325003)

摘要：局部阴影条件下，光伏阵列的 *P-U* 曲线呈多峰状态，常规的最大功率点追踪 MPPT(maximum power point tracking)算法容易陷入局部极值，无法及时精确地跟踪光伏发电系统的最大功率点，针对此问题提出 1 种基于改进蜣螂 IDBO(improved dung beetle optimizer)算法的 MPPT 控制策略。首先对蜣螂种群的初始化进行针对性优化，并在位置更新过程中引入 Levy 飞行策略。通过在 MATLAB/Simulink 平台进行仿真验证及实物实验验证，证明了 IDBO 算法相较于传统算法，无论是在静态还是动态条件下，均能更快且更稳定地找到全局最大功率点。

关键词：局部阴影；光伏发电；最大功率点追踪；Levy 飞行；蜣螂优化

Photovoltaic MPPT Control Based on Improved DBO Algorithm

KONG Lingzhe[1], LIN Menghan[2], WEI Yongqin[1], LI Zhen[1]

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Intelligent Control, Wenzhou Technician Institute, Wenzhou 325003, China)

Abstract: Under partial shading conditions, a multi-peak state will appear in the *P-U* curve of photovoltaic array. In this case, the conventional maximum power point tracking (MPPT) algorithm is prone to fall into local extremum, which cannot accurately track the maximum power point of a photovoltaic power generation system in time. Aimed at this problem, a MPPT control strategy based on an improved dung beetle optimizer (IDBO) algorithm is proposed. First, the targeted initialization of the dung beetle population is optimized, and the Levy flight strategy is introduced in the position update process. Through simulation verification and physical experiment verification on a MATLAB/Simulink platform, the IDBO algorithm can find the global maximum power point faster and more stably than the traditional algorithm under both the static and dynamic conditions.

Keywords: Partial shading; photovoltaic power generation; maximum power point tracking (MPPT); Levy flight; dung beetle optimizer

依托我国能源战略的“双碳”愿景，结合目前光伏产业的成本和技术优势，光伏并网规模迅速扩张[1]，光伏发电已成为最重要的新能源发电方式之一，由于光伏阵列的输出特性受到外部因素的影响，如太阳辐照度和温度，光伏阵列的最大功率点会因这些外部因素而变化[2]。当太阳能光伏阵列被外界物体，如乌云、树叶、鸟群等遮挡时，其输出的功率特性曲线呈现多个峰值，这导致传统最大功率点追踪 MPPT(maximum power point tracking)控制策略，如恒定电压法、扰动观察法、电导增量法算法，因易于陷入局部最优而无法实现最大功率点跟踪[3]。针对传统 MPPT 算法在局部阴影条件下的局限性，近年来智能算法在光伏 MPPT 领域呈现多元化发展趋势[4]，粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)算法因其数学结构和实现简单而被广

收稿日期：2023-04-07；**修回日期**：2023-05-12，2023-07-27，2023-09-12；**录用日期**：2023-11-21；**网络首发日期**：2024-01-17

泛用于 MPPT[5]，但易较早收敛于局部最优；文献[6]提出了 1 种改进的鲸鱼优化 MPPT 算法，通过引入自适应与非收敛因子来提高 MPPT 速度；文献[7]提出了改进的海鸥 MPPT 算法，利用混沌序列克服过早收敛的缺陷；文献[8]指出现有算法大多仅采用单一标准衡量适用性。为此，设计 1 种考虑精度、速度等多方面的 MPPT 控制算法是十分必要的。

本文针对蜣螂 DBO(dung beetle optimizer)算法在光伏多峰寻优问题中的不足，提出 1 种基于改进蜣螂 IDBO(improved dung beetle optimizer)算法的 MPPT 控制策略。仿真与实验结果表明，该方法在速度与精度上均有优势。

1　光伏阵列输出特性

1.1　光伏电池数学模型

为满足实际需求，光伏发电系统通常采用由多个光伏电池串并联组成的光伏阵列，单个光伏电池的等效模型如图 1 所示。图中：I_{ph} 为光伏效应产生的光生电流；I_d 为反向饱和电流；I_p 为分流并联电阻电流；I 为工作电流；D 为二极管；R_p 为分流并联电阻；R_s 为串联等效电阻；U_{oc} 为开路电压。

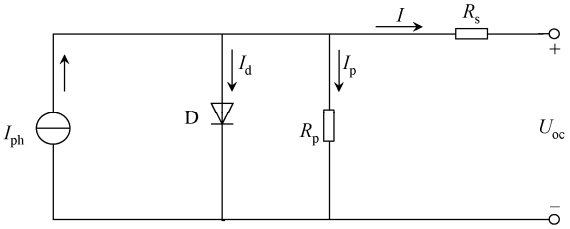


图 1　光伏电池等效模型

Fig. 1 Equivalent model of photovoltaic cell

光伏电池中的部分参数易受外部环境影响，在偏离外部标准的光照与温度条件下，需要对参数进行修正，修正后的光伏电池模型[9]可表示为

$$\begin{cases} I = I_{sc}(\Delta s+1)(1+0.002\,5\Delta T)(1-AB) \\ A = \left(1-\dfrac{I_m}{I_{sc}}\right)\mathrm{e}^{\frac{-U_m}{\left(\frac{U_m}{U_{oc}}-1\right)\left[\ln\left(1-\frac{I_m}{I_{sc}}\right)\right]^{-1}U_{oc}}} \\ B = \mathrm{e}^{\frac{U}{\left(\frac{U_m}{U_{oc}}-1\right)\left[\ln\left(1-\frac{I_m}{I_{sc}}\right)\right]^{-1}U_{oc}(1-0.002\,8\Delta T)\ln(\mathrm{e}+0.5\Delta s)}}-1 \\ P = UI \end{cases} \tag{1}$$

式中：I_{sc} 为短路电流；s 为当前光照强度，$\Delta s=s/1000-1$；T 为当前温度，$\Delta T=T-25$；U_m 和 I_m 分别为最大功率点电压和电流；U 为工作电压。

1.2　局部遮阴下的光伏阵列输出特性

当出现局部遮阴时，光伏阵列的 P-U 曲线出现多峰值。利用 MATLAB/Simulink 搭建由 3 块相同的电池板串联连接组成的光伏阵列，单个光伏组件参数为：最大功率 P_m=213.15 W；最大功率点电流 I_m=7.35 A；最大功率点电压 U_m=29 V；短路电流 I_{sc}=7.84 A；开路电压 U_{oc}=36.3 V。设定环境温度均为 25 ℃。为了更好地模拟局部遮阴的情况，设置了不同的光照条件见表 1，其中，Case Ⅰ~Case Ⅲ为 3 种不同的光照情况，S_1~S_3 为 3 块光伏组件接受的光照强度。图 2 为不同光照条件下光伏阵列的输出特性曲线。

表 1　不同阴影下各组件光照强度

Tab. 1 Solar irradiance of each component under different shading conditions

W/m^2

光照情况	S_1	S_2	S_3
Case Ⅰ	1 000	1 000	1 000
Case Ⅱ	1 000	1000	800
Case Ⅲ	1 000	800	600

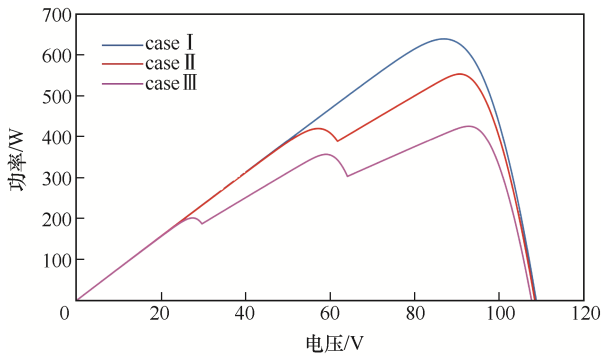


图 2　不同光照条件下光伏阵列的 *P*-*U* 输出特性曲线

Fig. 2 *P*-*U* output characteristic curves of photovoltaic array under different illumination conditions

由图 2 可见，在均匀光照下，光伏阵列的 P-U 输出曲线仅有 1 个峰值，而在局部遮阴条件下，光伏阵列的 P-U 曲线会出现多个峰值，遮阴的情况不

同，*P-U* 输出曲线峰值的个数与最大功率点也不同。

2 基本蜣螂算法

DBO 算法是由 Xue 与 Shen 于 2022 年提出的 1 种新型群智能算法[10]，其灵感来源于蜣螂的繁殖与觅食行为。在 DBO 算法中，提出了 1 种边界选择策略来模拟蜣螂觅食区域，将目标函数变量的上、下限比作蜣螂的初始觅食范围，蜣螂种群的活动被限制在该范围内，觅食范围会受到蜣螂种群活动的影响，蜣螂在空间中的移动可表示为

$$x_i(t+1)=x_i(t)+c_1[x_i(t)-L_\mathrm{b}]+c_2[x_i(t)-U_\mathrm{b}] \tag{2}$$

式中：t 为迭代次数；$x_i(t)$为第 t 次迭代中第 i 个蜣螂的位置；c_1 为服从正态分布的随机数；c_2 为属于(0, 1)的随机向量；L_b 与 U_b 分别为蜣螂移动的上、下边界，其更新可表示为

$$\begin{cases}L_\mathrm{b}=\max(X_\mathrm{b}(1-R),L_\mathrm{b})\\U_\mathrm{b}=\min(X_\mathrm{b}(1-R),U_\mathrm{b})\end{cases} \tag{3}$$

式中：R=1/(1−t/$T_{\max}$)，$T_{\max}$ 为最大迭代次数；X_b 为目前的局部最优位置，其更新可表示为

$$X_\mathrm{b}=x_i(t)\qquad f(x_i(t))>f(X_\mathrm{b}) \tag{4}$$

式中，$f(\cdot)$为算法粒子所在位置的函数，在本文中指代式(1)中的 P。

在蜣螂移动过程中，觅食范围不断向全局最优点逼近，最终搜寻到全局最优点。

3 改进蜣螂算法

传统蜣螂算法应用于光伏 MPPT 时，搜索速度较慢，并且无法较好地适应光照动态变化，针对这些问题，本文对算法初始化，对蜣螂位置更新过程进行改进。

3.1 蜣螂初始化改进

合适的初始值对于提高基于群智能算法 MPPT 的跟踪速度非常重要[11]。DBO 算法初始化蜣螂的位置为随机的，而光伏组件最大功率点电压位于开路电压区间[0.50$U_{\mathrm{oc,array}}$, 0.85$U_{\mathrm{oc,array}}$]内[12]，因此为了避免盲目初始化，将初始觅食范围设置为[0.4$U_{\mathrm{oc,array}}$, $U_{\mathrm{oc,array}}$]，并将蜣螂的初始化位置分别设置在 0.4$U_{\mathrm{oc,array}}$、0.6$U_{\mathrm{oc,array}}$ 和 0.8$U_{\mathrm{oc,array}}$ 处，其中 $U_{\mathrm{oc,array}}$ 为整个光伏阵列的开路电压。最大迭代次数 $T_{\max}$ 的定值对于寻优过程有着极大影响，$T_{\max}$ 过大或过小，蜣螂的最优觅食范围将得不到及时更新，导致追踪速度缓慢，经多次实验，将 $T_{\max}$ 的值设置为 7。

3.2 Levy 飞行策略

为了避免算法陷入局部最优，在更新公式中引入 Levy 飞行环节。Levy 飞行策略会随机产生步长，可以扩大搜索范围。Levy 飞行过程模拟的步幅公式为

$$\mathrm{Levy}(\beta)=\frac{\mu}{|\nu|^{-\beta}} \tag{5}$$

式中：Levy(β)为服从参数为 β 的 Levy 分布，0<β<2；μ 为服从 N(0, 1)标准正态分布的随机数。加入 Levy 飞行后对式(2)进行更新，即

$$\begin{aligned}x_i(t+1)=&x_i(t)+c_1[x_i(t)-L_\mathrm{b}]+c_2[x_i(t)-U_\mathrm{b}]+\\&\alpha\cdot\mathrm{Levy}(\beta)\cdot r(t)\end{aligned} \tag{6}$$

$$r(t)=\begin{cases}0 & rand<0.5\\1 & rand\leqslant 0.5\end{cases} \tag{7}$$

式中：α 为缩放因子，取 0.01；$r(t)$为随机函数；*rand* 为[0, 1]的随机数。

3.3 算法重启条件

考虑到分布式光伏具有间歇性和波动性[13]，为了及时追踪最大功率点，需要为 MPPT 算法加入重启功能。算法重启需满足的条件为

$$\begin{cases}\left|\dfrac{P'-P}{P}\right|\geqslant\Delta P\\t\geqslant T_{\max}\end{cases} \tag{8}$$

式中：P 与 P' 分别为功率的采样值及算法搜寻到的最大功率点；ΔP 为设定重启阈值，设为 0.05。

基于 IDBO 算法的 MPPT 控制流程如图 3 所示。

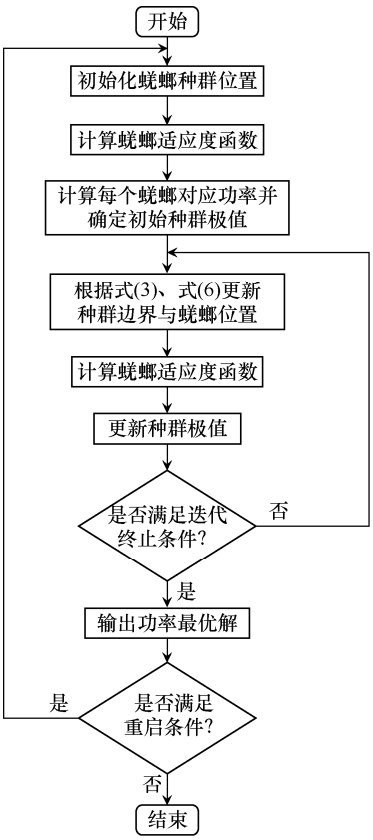


图 3　IDBO 算法流程

Fig. 3 Flow chart of IDBO algorithm

4　仿真结果与分析

为了验证IDBO算法在寻优精度与追踪速度上的优越性，利用 MATLAB/Simulink 软件进行仿真实验。在不同光照条件下分别用 PSO、DBO 与 IDBO 算法进行光伏 MPPT 控制。PSO 算法采用线性方式调节惯性因子与学习因子。3 种算法种群数量均设定为 3。

4.1　静态环境下的光伏追踪

在均匀光照情况下，光伏阵列的 *P-U* 输出曲线仅有 1 个峰值，设置 3 个光伏组件的光照强度为 1.2 节的 Case Ⅰ，此时光伏阵列的最大输出功率为 641.64 W，先后利用 PSO、DBO 与 IDBO 算法进行仿真，结果如图 4 所示。Case Ⅰ下算法性能对比见表 2。

局部遮阴情况下，光伏阵列的 *P-U* 输出曲线会出现多个峰值，当光伏阵列的光照情况设置为 1.2 节中的 Case Ⅱ时，*P-U* 曲线出现双峰情况，最大输出功率为 552.36 W。当光伏阵列的光照情况设置为 Case Ⅲ时，*P-U* 曲线出现 3 个峰值，最大输出功率为 414.74 W。依次采用 PSO、DBO、IDBO 算法对这 2 种光照情况进行仿真，结果如图 5 所示。Case Ⅱ和 Case Ⅲ下算法性能对比分别见表 3 和表 4。

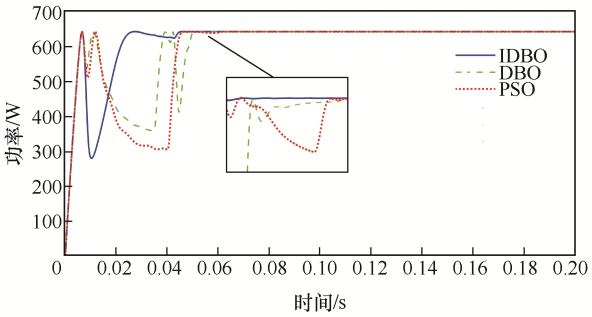


图 4　均匀光照下 MPPT 算法控制对比

Fig. 4 Comparison of MPPT control among algorithms under uniform illumination condition

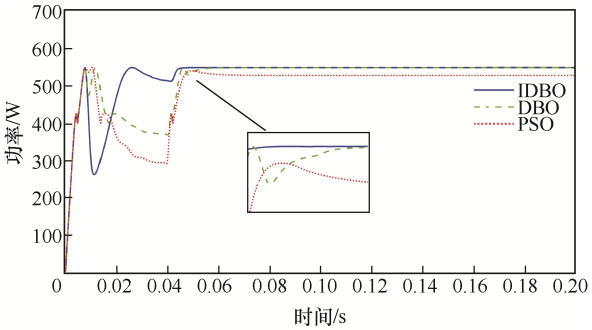
表 2　Case Ⅰ下算法性能对比

Tab. 2 Comparison of performance among different algorithmsin Case Ⅰ

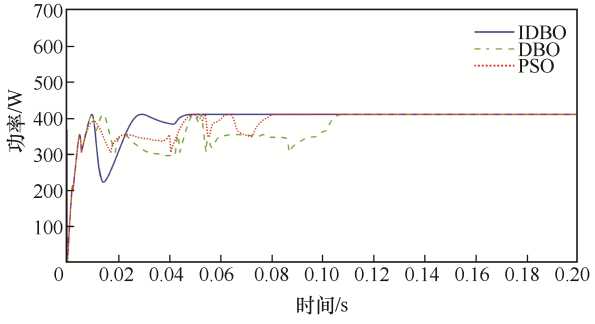
参数	PSO	DBO	IDBO
追踪功率/W	633.29	640.36	640.36
追踪时间/s	0.061	0.071	0.046
寻优精度/%	98.7	99.8	99.8

4.2　动态环境下的光伏追踪

当光照强度变化时，光伏阵列的最大功率点也会随之移动，此时算法应快速重启，重新寻找最大功率点，因此在动态阴影条件下验证算法的有效性是十分必要的。设置 0.35 s 前光照条件为表 1 的 Case Ⅰ；0.35~0.70 s 的光照条件为表 1 的 Case Ⅱ；



(a) Case Ⅱ



(b) Case Ⅲ

图 5 静态遮阴条件下 MPPT 算法控制对比

Fig. 5 Comparison of MPPT control among algorithms under static shading conditions

表 3 Case Ⅱ下算法性能对比

Tab. 3 Comparison of performance among algorithms in Case Ⅱ

参数	PSO	DBO	IDBO
追踪功率/W	529.04	551.26	551.26
追踪时间/s	0.063	0.059	0.047
寻优精度/%	95.8	99.8	99.8

表 4 Case Ⅲ 下算法性能对比

Tab. 4 Comparison of performance among algorithms in Case Ⅲ

参数	PSO	DBO	IDBO
追踪功率/W	411.42	413.61	413.61
追踪时间/s	0.083	0.117	0.049
寻优精度/%	99.2	99.7	99.7

0.70 s 后的光照条件为表 1 的 Case Ⅲ。动态遮阴条件下 MPPT 算法控制对比如图 6 所示。

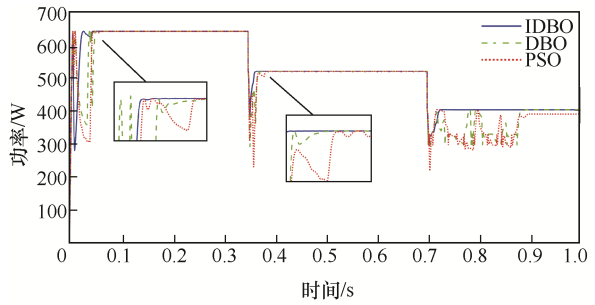


图 6 动态遮阴条件下 MPPT 算法控制对比

Fig. 6 Comparison of MPPT control among algorithms under dynamic shading conditions

通过以上数据可得，PSO 算法在静态光照环境下，寻优精度略低于 DBO 与 IDBO 算法，并且在动态光照与局部遮阴环境下出现了局部最优问题；IDBO 算法与 DBO 算法追踪精度相同，但在追踪过程中 IDBO 算法收敛速度略快，功率振荡幅度较小。

4.3 实验验证与结果分析

为了进一步验证算法有效性进行实验，主控制器采用 STM32G431 单片机；Boost 电路参数设定电容 C_1、C_2=100 μF，电感 L=50 μH；光伏组件参数：I_m=3.1 A，U_m=15.6 V，I_{sc}=3.3 A，U_{oc}=16.3 V；系统采样周期为 0.5 s。在阳光充足时进行实验，利用不透明挡板对其中1块光伏组件进行遮挡来模拟局部遮阴，如图 7 所示，最大功率点位于 31.3 V、98.7 W 处。

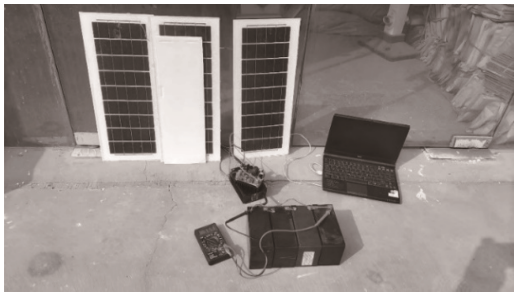
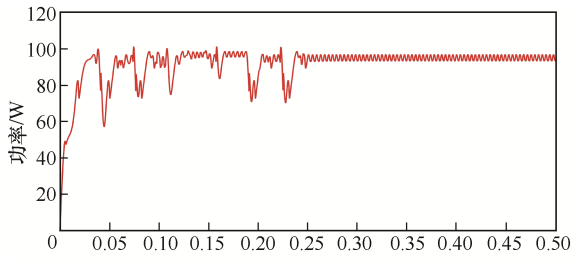


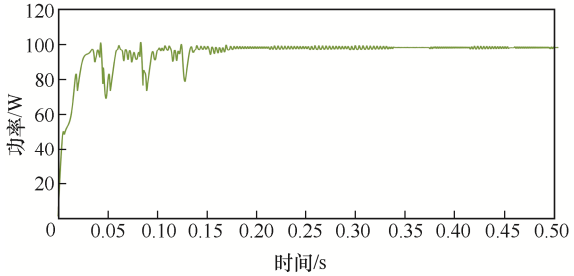
图 7 实验平台

Fig. 7 Experimental platform

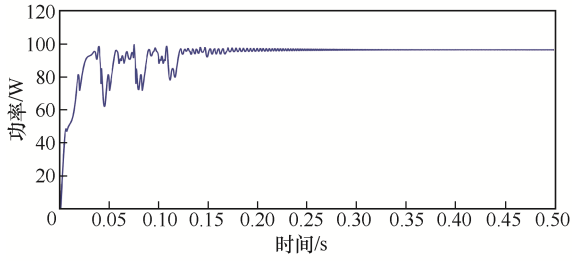
将 PSO、DBO、IDBO 算法控制程序分别下载至单片机中进行实验，算法功率对比结果如图 8 所示。



(a) PSO算法



(b) DBO算法



(c)IDBO算法

图 8　功率输出波形

Fig. 8 Waveforms of power output

由图 8 可见，PSO 算法追踪最大功率点所用时间约为 0.25 s，且在后期出现了明显的振荡现象，DBO 算法追踪时间约为 0.18 s，依然存在较小的波动，IDBO 算法追踪最大功率点所用时间约为 0.12 s，且几乎无波动。

5　结论

本文提出的基于改进蜣螂算法的 MPPT 控制，通过对算法初始化进行优化、将 Levy 飞行策略引入蜣螂位置更新公式，提高了算法性能。将改进蜣螂算法与其他 MPPT 控制算法进行对比，通过实验进行分析，得出如下结论。

(1)在光伏组件串联情况下的光伏 MPPT 实验中，本文提出的基于改进蜣螂算法的光伏 MPPT 控制不仅能够保持较高的寻优精度，在静态光照环境下，寻优精度可达 99.8%；在追踪速度上也明显优于其他 2 种算法。

(2)基于改进蜣螂算法的 MPPT 控制可以很好地适应动态光照环境，有效地追踪最大功率点。

参考文献：

[1] 易建波, 王舒儀, 胡维昊, 等. 新型储能配合光伏并网的构网自适应惯量阻尼控制策略验证[J/OL]. 电工技术学报, 1-15. (2025-06-19)[2026-01-22]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250181.
Yi Jianbo, Wang Shuyi, Hu Weihao, et al. Verification of grid-forming adaptive inertia-damping control strategy for novel energy storage integrated with photovoltaic systems [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-15. (2025-06-19)[2026-01-22]. https://doi.org/10.19595/j.cnki. 1000-6753. tces. 250181. (in Chinese)

[2] Bollipo R B, Mikkili S, Bonthagorla P K. Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 9-33.

[3] 刘宝宏, 陈斌, 钱立峰, 等. 改进 LGWO 和变步长 P&O 的光伏阵列功率跟踪策略[J/OL]. 电源学报, 1-12. (2024-04-26)[2026-01-22]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20240426.1026.026.
Liu Baohong, Chen Bin, Qian Lifeng, et al. Photovoltaic array power tracking strategy with an improved Levy-flight grey wolf optimization and variable-step perturbation & observation [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-12. (2024-04-26)[2026-01-22]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20240426.1026.026. (in Chinese)

[4] 张舒涵, 许峰, 温成瑾, 等. 改进速度暂停粒子群优化算法在光伏 MPPT 中的应用[J/OL]. 电源学报, 1-10. (2025-08-22)[2026-01-22]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250822.1015.006.
Zhang Shuhan, Xu Feng, Wen Chengjin, et al. Improved velocity pausing particle swarm optimization algorithm for photovoltaic MPPT application [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-10. (2025-08-22)[2026-01-22]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250822.1015.006. (in Chinese)

[5] Charin C, Ishak D, Mohd Zainuri M A A, et al. A hybrid of bio-inspired algorithm based on Levy flight and particle swarm optimizations for photovoltaic system under partial shading conditions [J]. Solar Energy, 2021, 217: 1-14.

[6] 陈斌, 王俊江, 赵明胤, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的光伏发电系统 MPPT 控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2): 19-26.
Chen Bin, Wang Junjiang, Zhao Mingyin, et al. Research on MPPT control of photovoltaic power generation system based on improved whale optimization algorithm [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(2): 19-26. (in Chinese)

[7] 李大华, 聂前, 田禾, 等. 改进海鸥优化算法在光伏系统 MPPT 中的应用[J]. 电源技术, 2022, 46(5): 556-559.
Li Dahua, Nie Qian, Tian He, et al. Improved seagull

optimization algorithm for MPPT in PV systems [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(5): 556-559. (in Chinese)

[8] Rezk H, AL-Oran M, Gomaa M R, et al. A novel statistical performance evaluation of most modern optimization-based global MPPT techniques for partially shaded PV system [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115: 109372.

[9] 王若谷, 刘佳玲, 刘宛菘, 等. 基于 PSO 算法的直流近区光伏发电系统控制参数优化方法[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(12): 19-29.
Wang Ruogu, Liu Jialing, Liu Wansong, et al. Control parameter optimization method of DC near-field photovoltaic power generation system based on particle swarm optimization [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(12): 19-29. (in Chinese)

[10] Xue Jiankai, Shen Bo. Dung beetle optimizer: A new meta-heuristic algorithm for global optimization [J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(7): 7305-7336.

[11] Sundareswaran K, Vigneshkumar V, Sankar P, et al. Development of an improved P&O algorithm assisted through a colony of foraging ants for MPPT in PV system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(1): 187-200.

[12] 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)

[13] 王守相, 尹孜阳, 赵倩宇. 考虑多供电层级耦合的中低压配电网分布式光伏承载力一体化精细评估方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(6): 1930-1944.
Wang Shouxiang, Yin Ziyang, Zhao Qianyu. A precise distributed PV hosting capability evaluation method for MV and LV distribution network considering the coupling of multiple power supply layers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(6): 1930-1944. (in Chinese)



孔令哲

作者简介：

孔令哲(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：电力系统及其自动化。E-mail：limbo3737@163.com。

林孟涵(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：电力光伏。E-mail：13868502252@163.com。

卫永琴(1975—)，女，通信作者，博士，副教授。研究方向：电力系统故障诊断。E-mail：13705420480@163.com。

李震(1995—)，男，硕士研究生。研究方向：电力系统运行与控制。E-mail：1374334719@qq.com。

(责任编辑：耿越)