

基于改进鸚鵡算法的光伏多峰值 MPPT 控制^{*}魏业文^{1,2} 邱天一¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2. 新能源微电网湖北省协同创新中心 宜昌 443002)

摘要: 针对光伏阵列在光照不均条件下呈现多峰突变,导致传统的最大功率点追踪失衡问题,提出了一种基于改进鸚鵡算法的 MPPT 控制。首先考量 Halton 序列进行种群初始化,使多样性变化显著;其次选取切线搜索算法中的切线飞行机制减少动态跳跃,克服早熟和局部极点问题;后期通过鸚鵡翻筋斗觅食策略进行二次更新,减小自适应范围,加速收敛。对比传统鸚鵡算法、金豺算法以及灰狼优化算法,测试结果显示,改进的鸚鵡算法的 MPPT 控制跟踪效率分别为 98.23%、97.26%、96.91% 和 96.81%,跟踪时间分别为 0.077 s、0.112 s、0.127 s、0.156 s,最后通过实验验证跟踪精度和速率均显著高于其余 3 种算法。

关键词: 最大功率点追踪;光伏阵列;局部遮阴;改进鸚鵡算法;Halton 序列

中图分类号: TN911-34 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4047

PV multi-peak MPPT control based on improved parrot algorithm

Wei Yewen^{1,2} Qiu Tianyi¹

(1. College of Electrical and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, Yichang 443002, China)

Abstract: Aiming at the problem that PV arrays show multi-peak mutation under uneven light conditions, which leads to the imbalance of the traditional maximum power point tracking, an MPPT control based on the Improved Parrot Algorithm is proposed. Firstly, the Halton sequence is considered for population initialization to make the diversity change significant; secondly, the tangent flight mechanism in the Tangent Search Algorithm is selected to reduce the dynamic jumps and overcome the problems of precocity and local polarity; and later, the secondary update is performed by the parrot somersaulting foraging strategy to reduce the adaptive range and accelerate the convergence. Comparing the traditional parrot algorithm, the golden jackal algorithm and the gray wolf optimization algorithm, the test results show that the improved parrot algorithm's MPPT control tracking efficiency is 98.23%, 97.26%, 96.91% and 96.81%, and the tracking time is 0.077 s, 0.112 s, 0.127 s, and 0.156 s, respectively, and the tracking accuracy and rate are significantly higher than the remaining three algorithms.

Keywords: maximum power point tracking; photovoltaic array; localized shading; Improved Parrot Algorithm; Halton sequence

0 引言

随着“绿水青山就是金山银山^[1]”的理念深入人心,国家开始转型发展光伏清洁能源。但在实际应用中,光伏阵列局部阴影导致多个峰值的问题影响其发电效率。因此,如何解决局部遮阴最大功率点跟踪失效是一个非常重要的研究课题。国内外学者提出的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)算法中,传统 MPPT 控制算法如扰动观察法和电导增量法、恒定电压法等实际追踪效

果欠佳且使用环境较为局限。智能优化算法以及通过混合控制跟踪算法由于具有较强搜索能力,已被广泛应用。如文献[2]根据调整权重因子,对粒子群算法改进,根据最优位置调整,加快了算法的收敛速度,减少了功率振荡,但不易于确定稳态功率。文献[3]在构建的最大功率点预测模型基础上,采用遗传算法对门控循环单元神经网络的参数进行优化,能显著提高光伏系统的能量转换效率,但复杂化了追踪过程。文献[4]提出了在黏菌算法中引入领导者及凸透镜策略,在提高算法计算精度、收敛速度的同时克服了

算法易“早熟”现象,但抗干扰能力较差。文献[5]引入混沌映射函数初始化黏菌个体,使种群分布更加均匀,同时引入算术优化算法[6]实现了局部高精度[7]探索,但数据冗余。

上述方法普遍存在复杂化追踪振荡过程、初始化种群数据处理复杂的问题,如何在保证追踪速度的同时兼顾精确度和适用性仍是具有挑战性的问题。针对光照不均[8](uneven lighting, UL)现象,本文在传统鸚鵡优化算法[9](parrot optimizer, PO)的基础上提出了一种基于改进鸚鵡算法(improved parrot optimizer, IPO)的 MPPT 控制策略,并结合其较强的躲局部极值及自动优化追踪路径[10]等特点,通过考量 Halton 序列进行种群初始化,使多样性变化显著,选取切线搜索算法中的切线飞行机制减少动态跳跃,克服早熟和局部极点问题,通过鸚鵡翻筋斗觅食策略进行二次更新,减小自适应范围,加速收敛,使其能在兼顾精确度和适用性的同时更加快速地进行最大功率点追踪,本文首先分析了光伏阵列模型,其次介绍了基于 IPO 的 MPPT 控制策略,最后通过仿真和实验验证该策略的优越性。

1 局部遮阴光伏阵列模型分析

1.1 光伏电池等效模型

理想情况下,光伏电池模型[11]可简化为恒定电流源和理想二极管,具体结构如图 1 所示。

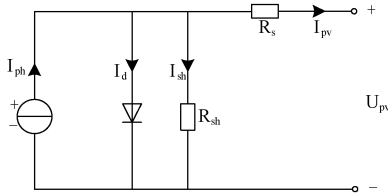


图 1 光伏电池等效电路模型

Fig.1 Photovoltaic cell equivalent circuit model

$$I_{pv} = I_{ph} - \frac{U_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U_{pv} + I_{pv}R_s)}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中: I_{pv} 为光照电池输出电流; A 为特性因子; T 为光伏电池温度; I_{ph} 为光生电流; I_d 为暗电流; U_{pv} 为单体光伏输出电压; I_o 为饱和逆向电流; R_{sh} 为等效并联电阻; R_s 为等效串联电阻, K 为玻尔兹曼常数($K=1.35 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)。

1.2 光伏阵列多峰特性分析

将单个光伏组件进行编号,通过 Matlab/Simulink 软件搭建 3×1 光伏阵列[12]。设定光伏电池的温度均为 25°C ,同时该阵列选择的光伏组件[13]的具体参数为:开路电压 U_{oc} 均为 37.3 V 、短路电流 I_{sc} 均为 8.66 A 、最大输出电流 U_m 均为 30.7 V 、最大输出电流 I_m 均为 8.15 A 。每组并联光照实验都会使用相同的初始条件,共设定了 4 组不同的光照方案,各种光照情况的仿真参数如表 1 所示。

表 1 25°C 下不同光照方案

Table 1 Different light regimens at 25°C

光照方案	不同光照/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$		
	PV1	PV2	PV3
无遮阴	1 000	1 000	1 000
遮阴 1	1 000	1 000	800
遮阴 2	810	730	620
遮阴 3	400	300	100

光伏电池特性曲线如图 2 所示,由图 2 分析可知,当光照不均时,其输出曲线将会出现多极值点,当光伏阵列处遮阴 1 状态时,其 P-U 曲线具有两个极值点;而当光伏阵列在遮阴 2、3 方案时,其 P-U 曲线具有 3 个极值点。

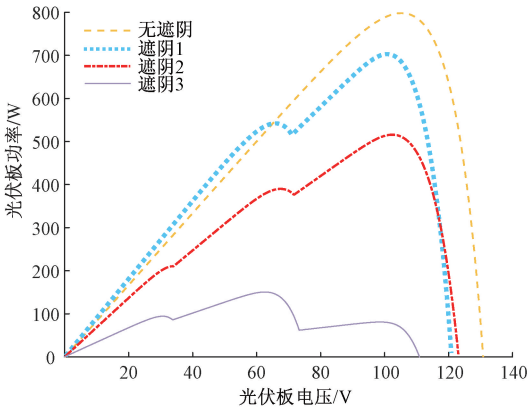


图 2 光伏电池 PU 特性曲线

Fig.2 Photovoltaic cell PU characteristic curve

仿真测试显示:光照不均时,光伏阵列输出曲线出现非单一峰值,MPPT 因跟踪局部最优而导致全局搜索失能。

2 改进鸚鵡算法及其应用

2.1 传统鸚鵡优化算法

鸚鵡优化算法是 2024 年提出的新型的元启发式算法,由鸚鵡表现出的 4 种不同的行为特征组成:觅食、停留、交流和恐惧。

重置种群 N :

$$x_i = rand(ub - lb) + lb \quad (2)$$

式中: ub 为搜索空间上界; lb 为搜索空间下界; $rand$ 为 $[0,1]$ 区间随机数; x_i 为第 i 个鸚鵡最初位置。

在觅食行为中,鸚鵡主要通过观察食物的位置或考虑主人的位置来估计食物的大致位置,位置运动遵循如下公式:

$$x_i^{t+1} = (x_i^t - x_{best})Levy(d) + rand(1 - \frac{t}{\max})^{\frac{2t}{\max}} \cdot x_{mean}^t \quad (3)$$

x_i^{t+1} 为更新位置; x_{mean} 为当前种群内平均位置; $Levy(d)$ 为描述鸚鵡飞行情况; x_{best} 为当前搜索到的最佳位置。

停留行为:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + x_{best} Levy(d) + ones(1, d) rand \quad (4)$$

Ones(1, d)为维度 dim 的全 1 向量。

鸚鵡是天生的社会性动物,其特点是群体内的密切交流。这种沟通行为包括飞向鸟群和不飞向鸟群的沟通。在 PO 中,假设这两种行为发生的概率相等,并使用当前种群的平均位置来象征群体的中心。这个过程可以表示为:

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} 0.2rand(1 - \frac{t}{Max})(x_i^t - x_{mean}^t), & p \leq 0.5 \\ 0.2rand(1 - \frac{t}{Max})\exp(-\frac{t}{Max \cdot rand}), & p > 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

与不熟悉的个体保持距离,重新寻找安全环境的行为可以用以下公式表示:

$$\begin{cases} x_i^{t+1} = x_i^t + A - B \\ A = rand \cos(\frac{\pi}{2} \frac{t}{Max})(x_{best} - x_i^t) \\ B = \cos(rand \pi)(\frac{t}{Max})^{\frac{2}{Max}}(x_i^t - x_{best}) \end{cases} \quad (6)$$

2.2 改进鸚鵡算法

1) Halton 序列初始化种群

传统的种群初始化方法过度依赖于随机数生成,该方式虽实现简单,但存在搜索时种群个体分布不均匀等问题,使其形成空间留白。而 Halton 序列^[14]是一种小差异序列,是以质数为基数的确定性方法构造的,使得种群密布,增加种群的多样性,从而提高了算法的寻优速度与精度。

在二维空间中,选取两个质数对应不同维度,分别重复分段取值,数学模型如式(7)所示。

$$\begin{cases} n = \sum_{i=0}^{m_0} a_i p_1^i = a_0 + a_1 p_1^1 + \dots + a_{m_0} p_1^{m_0} \\ \phi_{p_1}(n) = a_0 p_1^{-1} + a_1 p_1^{-2} + \dots + a_{m_0} p_1^{-m_0-1} \\ H(n) = [\phi_{p_{1,1}}(n), \phi_{p_{1,2}}(n)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: n 为 Halton 序列序数; p_1 为 Halton-n 序列基数(其中质数 > 2); a_i 为常变量。

设置种群规模为 100,上界为 100,下界为 0, Halton 初始化与传统初始化分布对比如图 3 所示。

由图 3 可知,通过 Halton 序列初始化种群空间,分布更匀称,减少留白并增加了种群多样性。

2) 切线飞行策略

PO 算法在觅食与停留阶段采用了莱维飞行^[15]策略来计算步长。由于步长大有利于探索,步长小有利于开发,采用切线飞行^[16]策略,可以高效利用切线函数贯穿全局,逃离局部最优解。如式(8)所示。

$$x^{t+1} = x^t + Stan(\theta) \quad (8)$$

S 为移动的距离大小; $\tan(\theta)$ 为移动的方向。通常莱维飞行产生的步幅大、区间短,会使迭代早期搜索不充分,

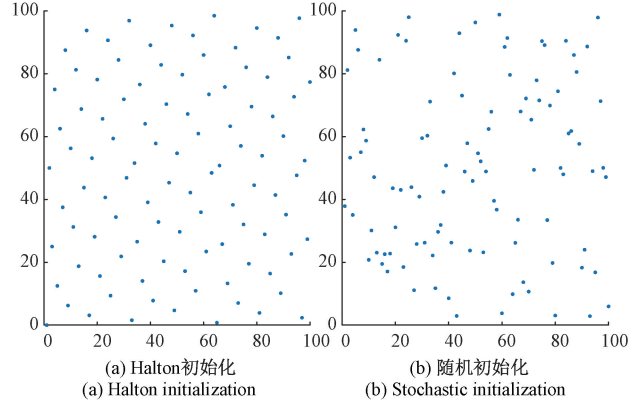


图 3 Halton 分布与随机分布初始化种群空间

Fig. 3 Halton distributions and random distributions initialize the population space

迭代末期搜索过于繁琐,导致精度欠缺;切线飞行产生大跨步可以解决搜寻距离忽高忽低的问题。

3) 翻筋斗觅食策略

算法搜索后期,所有鸚鵡个体均向当前群体中最优个体所在区域靠拢,导致群体多样性损失,则算法极易陷入局部极值,当发现物资时,每只蝠鲼都优先围绕枢轴和翻筋斗来更新位置,其数学模型如式(9):

$$O_s(t+1) = O_s(t) + S(r_1 O_{bs} - r_2 O_s(t)) \quad (9)$$

式中: O_s 为个体当前位置; O_{bs} 为全局最优个体; S 为空翻因子(当前设置为 2); r 为随机数(0~1)。

如图 4 所示,随着算法的不断迭代,鸚鵡翻筋斗范围自适应缩小使得收敛加剧,逐渐逼近搜索空间最优。经测试取 0~1 的随机数 rand,如果 $rand > 0.1$,执行鸚鵡翻筋斗觅食策略的效果为最佳,否则不执行。

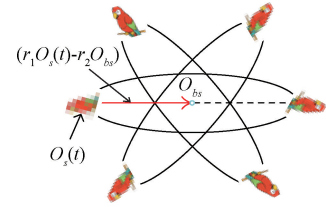


图 4 鸚鵡翻筋斗觅食示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a parrot somersaulting for food

2.3 算法性能测试

为验证改进鸚鵡算法的优越性和稳定性,选用 CEC2005 测试函数中 f_1 、 f_3 、 f_5 、 f_7 、 f_9 函数对 IPO、PO、黑鸢算法^[17](black-winged kite algorithm, BKA)、霜冰算法^[18](rime optimization algorithm, RIME)、金豺算法(golden jackal optimization, GJO)^[19]以及灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)进行对比分析。设种群数量为 30、最大迭代次数为 500 次,运行次数为 5,各算法运行结果如表 2 所示、平均收敛曲线如图 5 所示。由仿真实验得到当最大迭代次数大于 60 次,种群数量大于 30 时,跟踪

稳定性及效率提升并不显著,且浪费大量不必要的运行成本,综合考虑最大迭代次数 $\max=60$,种群数为 30。

表 2 算法测试函数优化结果

Table 2 Algorithm test function optimization results							
函数	适应度	IPO	PO	BKA	RIME	GJO	GWO
f_1	最优值	0	4.45×10^{-144}	8.71×10^{-102}	2.115 2	1.61×10^{-55}	7.76×10^{-29}
	标准差	0	7.24×10^{-122}	8.41×10^{-85}	0.385 1	1.03×10^{-54}	9.46×10^{-28}
	平均值	0	3.31×10^{-122}	3.76×10^{-85}	2.502 8	9.89×10^{-55}	1.02×10^{-27}
f_3	最优值	0	2.34×10^{-189}	1.13×10^{-100}	519.213 8	5.11×10^{-21}	5.57×10^{-7}
	标准差	0	8.03×10^{-111}	1.49×10^{-95}	521.009 6	9.24×10^{-17}	2.47×10^{-5}
	平均值	0	3.59×10^{-111}	1.05×10^{-95}	1.30×10^3	4.17×10^{-17}	1.44×10^{-5}
f_5	最优值	2.31×10^{-5}	0.839 4	26.971 5	81.814 3	27.183 1	27.091 0
	标准差	0.277 1	3.374 1	0.772 7	1.14×10^3	0.677 8	0.374 4
	平均值	0.131 4	3.145 1	28.131 3	686.952 1	28.178 8	27.285 4
f_7	最优值	0	2.98×10^{-5}	8.45×10^{-5}	0.029 0	1.37×10^{-4}	6.67×10^{-4}
	标准差	0	5.33×10^{-5}	5.51×10^{-4}	0.009 7	6.25×10^{-4}	0.002 7
	平均值	0	8.18×10^{-5}	4.88×10^{-4}	0.040 3	6.89×10^{-4}	0.002 7
f_9	最优值	0	0.057 4	0	56.466 1	0	0
	标准差	0	2.01×10^{-7}	0	9.588 1	0	3.731 4
	平均值	0	9.17×10^{-8}	0	66.429 5	0	3.372 9

由图 5 可知 IPO 算法适用于任何峰值测试函数。并且在寻优能力、稳定性和收敛速度方面相较于 PO、BKA、RIME、GJO、GWO 算法均展现出更佳的性能。将光伏发电系统的输出功率作为目标函数,将鸚鵡的位置作为光伏电池某一点的输出电压,基于改进鸚鵡算法的 MPPT 具体流程图如图 6 所示。

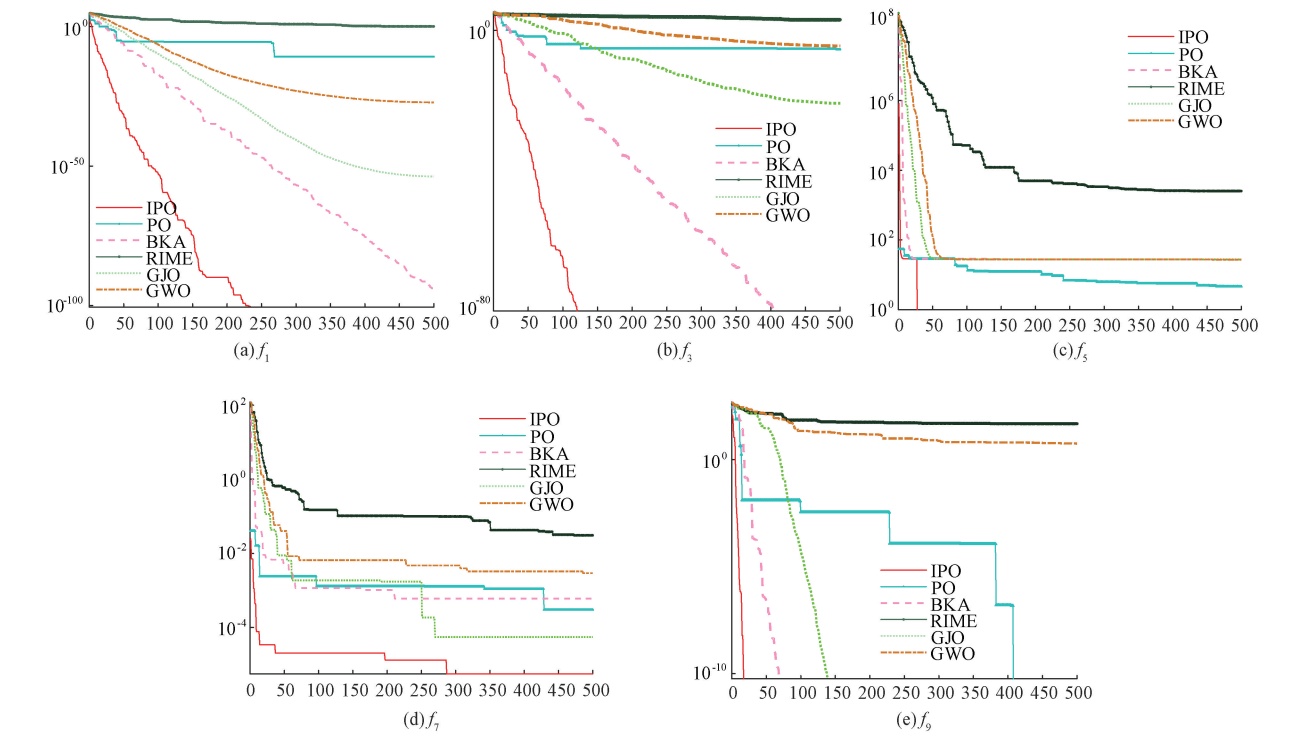


图 5 测试函数平均收敛曲线

Fig. 5 Average convergence curve of test functions

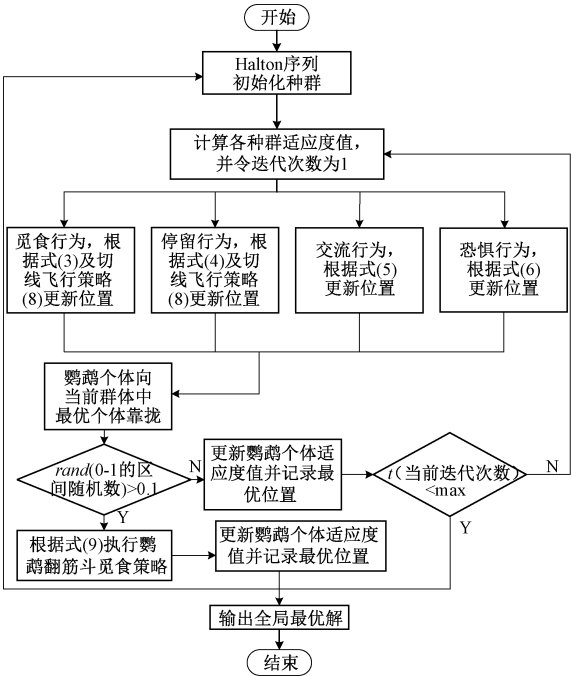


图 6 基于改进鸚鵡优化算法的光伏 MPPT 流程图

Fig. 6 Flowchart of PV MPPT based on improved parrot

3 仿真与实验分析

本实验采用 Matlab/simulink (R2022b) 仿真建模, Win11 64 bit 操作系统, Intel (R) Core (TM) i9-12700H, NVIDIA GeForce 3060Ti 显卡。选取上述算法测试中表现较好的 PO、GJO 和 GWO 进行仿真对比, 以验证 IPO 的优劣。本研究选取某型号光伏电池, 其参数如表 3 所示。设置 $\max=60, n=30$, 分别模拟动态和静态光照进行测试^[20], 3 块串联光伏板分别设置为 $1\ 000/800/600\ \text{W}/\text{m}^2$ 环境温度 $T=25\ ^\circ\text{C}$ 测试结果如图 7 所示。

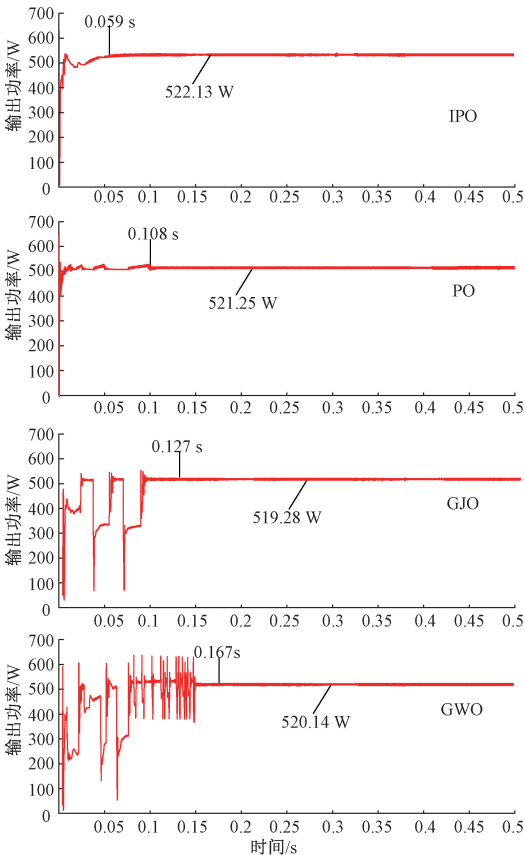
表 3 PV Array 光伏单元模块参数设置

Table 3 Photovoltaic unit module parameter setting

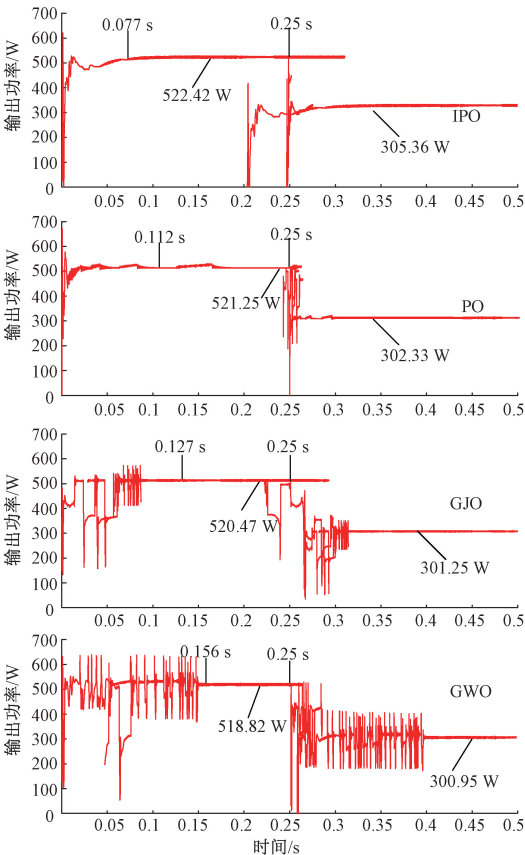
参数名称	设定值
开路电压 U_{oc}	43.6 V
短路电流 I_{sc}	8.35 A
最大功率点电压 U_{mp}	35 V
最大功率点电流 I_{mp}	7.6 A
最大功率设定值	266 W

3.1 静态光照实验分析

静态峰值输出特性曲线如图 7(a)所示。



(a) 静态局部遮阴下系统输出功率
(a) System output power under static partial shading



(b) 动态局部遮阴下系统输出功率
(b) System output power under dynamic partial shading

图 7 局部阴影系统输出

Fig. 7 Localized shading system output power curve

数据显示,光伏阵列在静态峰值测试中的理想最大输出功率为 528.73 W,参数如表 4。

表 4 PV 静态光伏遮阴实验参数

Table 4 PV static photovoltaic shading experiment parameters

常规	IPO	PO	GJO	GWO
跟踪时间/s	0.059	0.108	0.127	0.167
均稳定功率/W	522.13	521.25	519.28	520.14
跟踪精度/%	98.75	98.58	98.21	98.37

PO 的跟踪精度和稳定性较好,但是跟踪时间较长,GJO 与 GWO 的稳定性较差,跟踪时间较长,IPO 在静态光照分别比其他算法快 0.049 s、0.068 s、0.108 s,并且跟踪精度更高。

3.2 动态光照实验分析

太阳是时变光照,因此 IPO 在动态阴影条件下的优劣需加以验证,在 0.25 s 左右,光照强度开始发生突变,光照强度依次减少 200 W/m²,为 800/600/400 W/m²,如图 7(b)所示。

而此时的理想最大功率为 527.67 W,动态实验参数如表 5 所示。经过 0.25 s 辐照突变后,IPO 最终稳定在 305.36 W,此时的理想最大功率为 310.86 W,算法后期跟踪精度最佳,为 98.23%,PO 易陷入局部极值,GWO 和 GJO 都存在振荡剧烈问题,不易捕捉稳定状态。

表 5 PV 动态光伏遮阴实验参数

Table 5 PV dynamic photovoltaic shading experiment parameters

常规	IPO	PO	GJO	GWO
跟踪时间/s	0.077	0.112	0.127	0.156
均稳定功率/W	522.42	521.25	519.28	518.82
跟踪精度/%	99.00	98.78	98.21	98.32
均稳定功率/W	310.86	302.33	301.25	300.95
跟踪精度/%	98.23	97.26	96.91	96.81

综上对比实验 PO、GJO、GWO、IPO 的迭代跟踪反应速度最快,且跟踪精度高,在光照突变情况下,相比于其他算法,IPO 算法暂态过程短,具有更好的鲁棒性和适应性。

4 实验验证

光伏阵列实验验证平台主要由 PVS1000 光伏阵列模拟器、某型号 Buck-Boost 升降压变换器、PEL-3031E 电子负载、基于 STM32 的 MPPT 控制器及 GDS-2102 示波器,如图 8 所示,实验原理示意图如图 9 所示。

设置 PVS1000 的参数来模拟光伏阵列,进行模拟最大功率追踪实验。将基于改进鸚鵡算法的 MPPT 控制程序

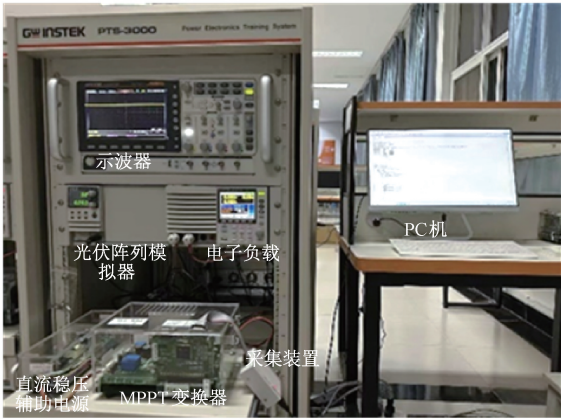


图 8 光伏发电系统实验平台

Fig. 8 Experimental platform for photovoltaic power generation system

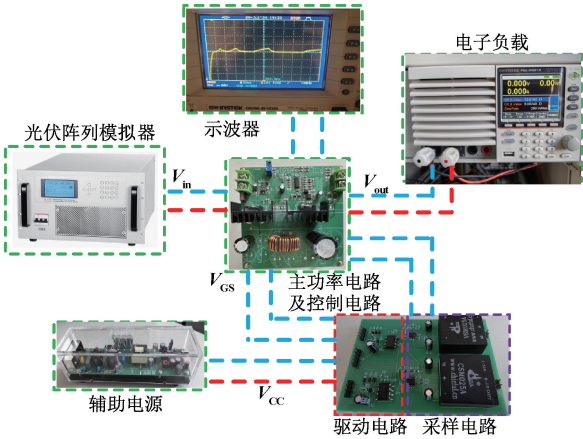
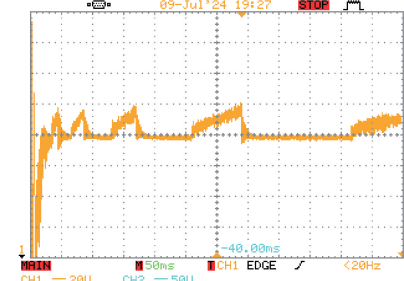


图 9 实验平台详细接线图

Fig. 9 Experimental platform detailed wiring diagram

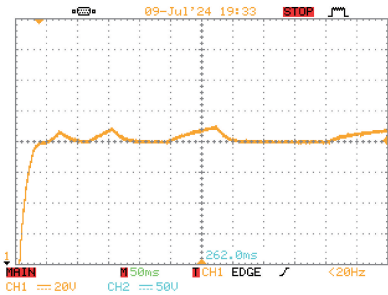
以及 PO、GWO、改进 GWO 算法上载至 STM32 中,详细实验接线过程如图 9 所示,并依次记录 GDS-2102 波形。

由图 10 及表 6 可知,GWO 和改进 GWO 算法追踪最大功率时出现了明显的震荡现象,PO 算法在前期出现波动,但稳定追踪时间较长,本文所提 IPO 算法追踪速度最快且最稳定。

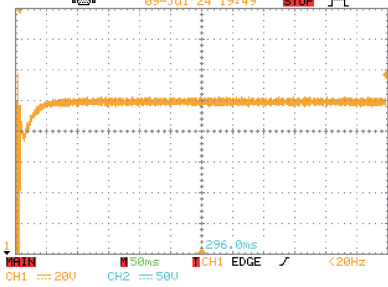


(a) GWO算法下的功率输出波形

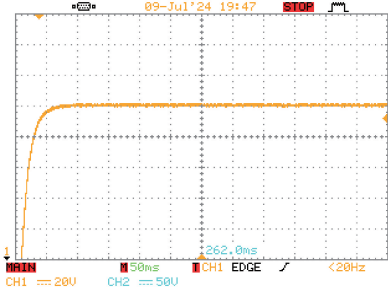
(a) Power output waveforms under the GWO algorithm



(b) 改进GWO算法下的功率输出波形
(b) Power output waveform with improved GWO algorithm



(c) PO算法下的功率输出波形
(c) Power output waveform under PO algorithm



(d) IPO算法下的功率输出波形
(d) Power output waveform under IPO algorithm

图 10 实物验证功率输出波形图

Fig. 10 Physical verification of power output waveforms

表 6 不同算法的跟踪效率对比

Table 6 Comparison of tracking efficiency of different algorithms

常规	本文	文献[3]	文献[4]	文献[13]
跟踪精度/%	99.96	98.87	98.32	99.10

5 结 论

本研究提出了基于改进型鸚鵡优化算法(IPO)的MPPT复合控制策略。通过引入 Halton 序列初始化种群,增加了种群多样性;通过引入切线搜索算法中的切线飞行策略,弥补了 Levy 搜寻距离跳跃的问题,有利于跳出局部极值,增大搜索范围;后期通过鸚鵡翻筋斗觅食策略使范围自适应减小,加速收敛。

实验结果表明,与传统的 PO、改进 GWO、GWO 相比,所提的 IPO 算法在动态跟踪精度提升 0.97%,跟踪速度提

升 0.658 s,均优于其他算法。在动态或静态 UL 下,IPO 均可提高光伏面板输出功率时的稳定性,同时减小过程中的功率误差及能量损耗。

参考文献

[1] 王璐.“双碳”目标下清洁能源话语体系的建构[J]. 中国石油大学学报(社会科学版),2024,40(1):72-78.
WANG L. The construction of clean energy discourse system under the goal of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences),2024,40(1):72-78.

[2] 解宝,李萍宇,苏绎仁,等.局部阴影下光伏阵列的最大功率点跟踪算法研究[J]. 太阳能学报,2023,44(12):47-52.
XIE B,LI P Y,SU Y R,et al. Research on maximum power point tracking algorithm of PV array under local shadow [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(12):47-52.

[3] 王冉冉,高慧敏,张昕宇.基于 GA-GRU 神经网络的光伏 MPPT 算法[J]. 太阳能学报,2023,44(9):212-219.
WANG R R,GAO H M,ZHANG X Y. MPPT algorithm for photovoltaics based on GA-GRU neural network [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(9):212-219.

[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 ZH 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] 李红岩,王磊,安平娟,等.基于改进黏菌算法的局部遮阴下光伏 MPPT 研究[J]. 太阳能学报,2023,44(10):129-134.
LI H Y,WANG L,AN P J,et al. Study on photovoltaic MPPT under local shade based on improved slime mold algorithm [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2023,44(10):129-134.

[6] 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 L,ZHANG X J,LIU Q H,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.

[7] 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 [2024-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240426.1026.026.html>.
LIU B H,CHEN B,QIAN L F,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 [2024-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240426.1026.026.html>.
- [8] 韩思鹏,蒋晓艳,罗意,等. 遮阴条件下光伏 MPPT 自适应粒子群算法优化[J]. 太阳能学报,2022,43(6): 99-105.
HAN S P, JIANG X Y, LUO Y, et al. Photovoltaic MPPT adaptive particle swarm optimization optimization under shading conditions [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2022,43(6):99-105.
- [9] LIAN J B, HUI G H, MA L, et al. Parrot optimizer: Algorithm and applications to medical problems[J]. Computers in Biology and Medicine, 2024,172: 108064.
- [10] 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.
- [11] 曲朝阳,臧积业,曲楠,等. 基于拟态视觉的光伏电池缺陷检测仿生模型[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14 [2024-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240407.1443.003.html>.
QU ZH Y, ZANG J Y, QU N, et al. Biomimetic Model of Photovoltaic Cell Defect Detection Based on Mimic Vision [J/OL]. Chinese Journal of Electrical Engineering,1-14[2024-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240407.1443.003.html>.
- [12] 陈波,蔡礼,谢凡,等. 光伏直流升压系统中级联 DC/DC 变流器的均流/均压控制策略[J]. 太阳能学报, 2023,44(9):169-179.
CHEN B, CAI L, XIE F, et al. Current-sharing/voltage-sharing control strategy of cascaded DC/DC converter for photovoltaic dc boost system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2023,44(9):169-179.
- [13] 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.
MAO M X, XU ZH, CUI L CH, et al. Research on multi-peak MPPT of photovoltaic array based on modified gray wolf optimization algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2023,44(3):450-456.
- [14] 杜晓昕,郝田茹,王波,等. 基于双重随机扰动的大猩猩算法及工程应用[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-17 [2024-05-08]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0404>.
DU X X, HAO T R, WANG B, et al. Artificial gorilla troops optimizer based on double random disturbance and its application of engineering problem [J/OL]. Journal of beijing university of aeronautics and astronautics: 1-17 [2024-05-08]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0404>.
- [15] 吴慧玲,刘升. 精英协同进化的蜉蝣算法[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(7):1346-1356.
WU H L, LIU SH. Elite coevolutionary mayfly algorithm [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2024,58(7):1346-1356.
- [16] 周玉,房倩,裴泽宣,等. 基于切线飞行的麻雀搜索算法[J]. 计算机应用研究,2023,40(1):141-146.
ZHOU Y, FANG Q, PEI Z X, et al. Sparrow search algorithm based on tangent flight [J]. Application Research of Computers,2023,40(1):141-146.
- [17] WANG J, WANG W CH, HU X X, et al. Black-winged kite algorithm: A nature-inspired meta-heuristic for solving benchmark functions and engineering problems[J]. Artificial Intelligence Review, 2024,57(4):98.
- [18] SU H, ZHAO D, HEIDARI A A, et al. RIME: A physics-based optimization[J]. Neurocomputing,2023, 532:183-214.
- [19] CHOPRA N, ANSARI M M. Golden jackal optimization: A novel nature-inspired optimizer for engineering applications [J]. Expert Systems with Applications,2022,198:116924.
- [20] 白小惠,莫思特,范松海,等. 基于 NACS-PSO 算法的光伏系统 MPPT 控制研究[J]. 电子测量技术,2024, 47(3):62-70.
BAI X H, MO S T, FAN S H, et al. Research on MPPT control of photovoltaic systems based on NACS-PSO algorithm [J]. Electronic Measurement Technology,2024,47(3):62-70.

作者简介

魏业文,博士,硕士生导师,主要研究方向为新能源发电技术和电网无功补偿。

E-mail: weiyewen8@126.com

邱天一(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为光伏发电系统优化等。

E-mail: 568379255@qq.com