

基于 TBKA-P&O 算法的光伏系统 MPPT 控制研究^{*}

王欣峰 姜鑫杰 张 丕 赵恩琴

(山西大学自动化与软件学院 太原 030031)

摘要: 针对光伏阵列输出功率曲线在局部遮阴条件下存在多峰值的特性,导致传统算法在最大功率点跟踪(MPPT)过程中易陷入局部最优的问题,本文提出一种基于改进黑翅鸢算法(TBKA)与扰动观察法(P&O)相结合的MPPT控制策略,称为TBKA-P&O算法。在全局搜索阶段,首先通过 Tent-Logistic-Cosine 混沌映射初始化种群,其次引入切线飞行策略优化 TBKA 算法的搜索效率和收敛精度,同时设计了一种基于贪婪策略的动态透镜成像反向学习策略用于提升搜索多样性,避免陷入局部最优;在局部搜索阶段,结合 P&O 实现最大功率点的快速定位和高精度跟踪。为验证算法的有效性,构建了包含传统 P&O 算法、BKA-P&O 算法、量子 CS-P&O 算法以及 TBKA-P&O 算法的光伏发电系统仿真模型,实验结果显示,TBKA-P&O 在 4 种工况下的跟踪精度分别为 100%、99.97%、99.96% 和 99.96%,跟踪时间分别为 0.093、0.090、0.077 和 0.047 s。与其他算法相比,TBKA-P&O 算法在动态追踪速度、稳态跟踪精度及功率振荡控制方面均表现出显著优势。

关键词: 光伏发电系统;最大功率点跟踪;局部遮阴;改进黑翅鸢算法;扰动观察法

中图分类号: TN01 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4047

Research on MPPT control of photovoltaic systems based on the TBKA-P&O algorithm

Wang Xinfeng Jiang Xinjie Zhang Pi Zhao Siqin

(School of Automation and Software Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: To address the issue of traditional algorithms being prone to local optima during the maximum power point tracking (MPPT) process due to the multi-peak characteristic of photovoltaic array output power curves under partial shading conditions, this paper proposes an MPPT control strategy combining the improved Black-winged kite algorithm (TBKA) and the Perturb and observe method (P&O), referred to as TBKA-P&O. In the global search phase, the population is first initialized using the Tent-Logistic-Cosine chaotic mapping. Then, a tangent flight strategy is introduced to enhance the search efficiency and convergence accuracy of the TBKA. Additionally, a dynamic lens imaging reverse learning strategy based on a greedy approach is designed to improve search diversity and prevent local optima. In the local search phase, the P&O method is incorporated to achieve rapid localization and high-precision tracking of the maximum power point. To verify the effectiveness of the proposed algorithm, a photovoltaic power generation system simulation model was constructed, incorporating the traditional P&O algorithm, the BKA-P&O algorithm, the quantum CS-P&O algorithm, and the TBKA-P&O algorithm. Experimental results demonstrate that the TBKA-P&O algorithm achieved tracking accuracies of 100%, 99.97%, 99.96% and 99.96% under four operating conditions, with corresponding tracking times of 0.093, 0.090, 0.077 and 0.047 s. Compared to other algorithms, the TBKA-P&O algorithm exhibited significant advantages in terms of dynamic tracking speed, steady-state tracking accuracy, and power oscillation control.

Keywords: photovoltaic power generation system; maximum power point tracking; partial shading; improved black-winged kite algorithm; perturb and observe method

0 引言

随着全球能源需求的持续增长与气候变化问题的加剧,为了实现碳达峰、碳中和的目标,新能源发电方式已成为众多学者研究的热点问题^[1-2]。在光伏发电系统中,最大

功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术对提高系统效率和稳定性具有至关重要的作用。然而,由于光伏阵列的输出特性在局部阴影条件下,其输出功率曲线往往呈现多峰值特性,传统 MPPT 算法:扰动观察法^[3](perturb and observe, P&O)和电导增量法^[4](incremental

conductance, INC), 尽管实现简单,但在应对多峰值条件下易陷入局部最优,且跟踪精度和收敛速度均受到限制^[5-6]。

为了解决上述问题,近年来,各类智能优化算法被学者们广泛应用于光伏系统 MPPT 领域。罗皓鹏等^[7]将改进哈里斯鹰和电导增量法结合较改进前搜索速度平均提高 50%,但该方法可能在复杂动态环境中对参数敏感性较高,影响适应性表现;樊立萍等^[8]融合莱维改进金枪鱼算法与变步长扰动观测法构建混合优化算法,可以更加精准且快速的实现最大功率点跟踪,但该算法跟踪速度较慢,仍需继续改进;Auila-leon 等^[9]采用灰狼算法和增强型粒子群算法,大幅提升了 MPPT 控制性能,但混合算法的计算复杂度较高,可能限制了其在实时性要求较高的场景中的应用;姚天祺等^[10]改进天鹰优化算法相较于粒子群算法和鲸鱼优化算法,能够更快、更平稳精准地搜索到全局最大功率点(maximum power point, MPP),但在应对多峰复杂光伏特性曲线时的鲁棒性仍有改进空间。

黑翅鸢优化算法(black-winged kite algorithm, BKA)是 Wang 等^[11]于 2024 年提出的一种新颖的基于群体智能的元启发式算法,灵感来源于黑翅鸢的迁徙和捕猎行为,具有简单高效的优点。该算法通过结合柯西变异策略和领导者策略,具备较强的全局搜索能力和收敛速度。

本文提出了一种融合改进黑翅鸢优化算法(TBKA)与扰动观察法(P&O)的混合 MPPT 算法。通过在 TBKA 中嵌入三种改进策略,显著提升算法的全局搜索能力;同时,结合定步长 P&O 在局部范围内的快速跟踪特性,实现对光伏系统全局最大功率点的精确定位与稳定跟踪。本文通过构建不同复杂工况的仿真模型,验证了该算法在动态响应速度、稳态跟踪精度及功率振荡控制方面的显著优势。

1 光伏阵列输出特性

1.1 光伏电池数学模型

光伏电池由光生电流、并联二极管、串联和并联电阻组成^[12],如图 1 所示。

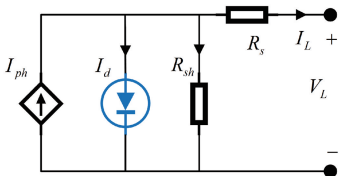


图 1 光伏电池等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of a photovoltaic cell

输出电流可以按式(1)计算。

$$I_L = I_{ph} - I_d \left[\exp\left(\frac{q(V_L + R_s \cdot I_L)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V_L + R_s \cdot I_L}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: I_{ph} 为光生电流源; I_d 为反向饱和电流; R_s 为串联电阻; R_{sh} 为并联电阻; n 为二极管理想因数; q 是电子电荷常数,值为 1.602×10^{-19} C; k 是玻尔兹曼常数,值为 $1.38 \times$

10^{-23} J/K; T 为光伏电池工作时的温度。

1.2 局部遮阴光伏阵列输出特性分析

光伏电池通过串并联可组成光伏阵列,本文在 Matlab/Simulink 中搭建 5×1 光伏阵列,环境温度设为 25°C 。单个光伏组件参数为:最大功率 $P_{\max} = 2128$ W,开路电压 $U_{oc} = 87.2$ V,短路电流 $I_{sc} = 33.4$ A,最大功率点电压 $U_{mp} = 70$ V,最大功率点电流 $I_{mp} = 30.4$ A。设计 4 种光照情况如表 1 所示。

表 1 25°C 下光伏阵列各组件光照情况

Table 1 The illumination conditions of each component in the photovoltaic array at 25°C

光照情况	光照强度/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)				
	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5
工况 1	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
工况 2	1 000	1 000	400	800	800
工况 3	1 000	800	600	300	300
工况 4	1 000	1 000	500	900	900

如图 2 所示为光伏阵列功率-电压($P-U$)输出特性曲线,可以看出在不同遮阴条件下, $P-U$ 特性曲线呈现多个极值点,因而在 MPPT 控制中极易陷入局部最优而导致全局搜索失能,同时图中标明了理论 MPP 值。

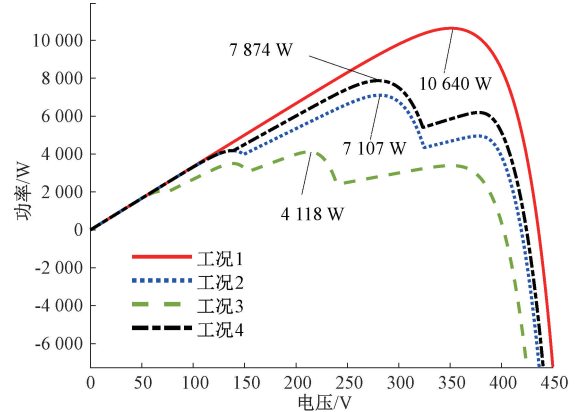


图 2 光伏阵列 $P-U$ 输出特性曲线

Fig. 2 $P-U$ output characteristic curve of the photovoltaic array

2 改进黑翅鸢优化算法

2.1 黑翅鸢算法(BKA)

BKA 的灵感来源于黑翅鸢的生存策略。算法的探索阶段模拟黑翅鸢的攻击行为,数学模型表示为:

$$y_{t+1}^{i,j} = \begin{cases} y_t^{i,j} + n(1 + \sin(r)) \times y_t^{i,j}, & p < r \\ y_t^{i,j} + n \times (2r - 1) \times y_t^{i,j}, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$n = 0.05 \times e^{-2 \times \left(\frac{t}{T}\right)^2} \quad (3)$$

式中: $y_t^{i,j}$ 和 $y_{t+1}^{i,j}$ 分别表示第 t 次和第 $t+1$ 次迭代次数中第 i 只黑翅鸢在第 j 维中的位置, r 为 $[0, 1]$ 之间的随机

数, p 取常数 0.9, t 为当前迭代次数, T 为最大迭代次数; n 表示控制黑翅鸢攻击行为过程中位置的更新幅度, 其值随着迭代次数 t 的增加而逐渐减小。

算法的开发阶段模拟鸟类的迁徙行为, 数学模型表示为式(4):

$$y_{t+1}^{i,j} = \begin{cases} y_t^{i,j} + C(0,1) \times (y_t^{i,j} - L_t^j), & F_i < F_{ri} \\ y_t^{i,j} + C(0,1) \times (L_t^j - m \times y_t^{i,j}), & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C(0,1)$ 代表 Cauchy 变异^[13], L_t^j 代表迄今为止第 t 次迭代的第 j 维中黑翅鸢的领导者, F_i 表示第 t 次迭代的当前种群中第 i 个黑翅鸢的适应度值, F_{ri} 表示第 t 次迭代中随机一只黑翅鸢的适应度值。

2.2 改进的黑翅鸢算法(TBKA)

1) Tent-Logistic-Cosine 混沌映射

在改进 BKA 的过程中, 初始种群的分布均匀性对于算法的性能具有重要影响。传统的单一混沌映射(如 Tent, Logistic, Cosine)虽然具有一定的混沌特性, 可以在一定程度上增加种群的多样性, 但其产生的混沌序列往往在局部区域呈现周期性或均匀分布不足。而 Tent-Logistic-Cosine 混沌映射通过将这 3 种混沌映射的特性进行融合, 产生更复杂且不可预测的混沌行为^[14]。相比于单一混沌映射, TLC 混沌映射在处理具有高度非线性和多峰值的目标函数时, 具有更强的抗干扰能力和鲁棒性。数学模型如式(5)所示。

$$x_{i+1} = \begin{cases} \cos(\pi(2rx(i) + 4(1-r)x(i) \\ (1-x(i)) - 0.5)), & x(i) < 0.5 \\ \cos(\pi(2r(1-x(i)) + 4(1-r)x(i) \\ (1-x(i)) - 0.5)), & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $r \in [0, 1]$ 。

本文用于改进 BKA 的初始化种群公式如式(6)所示。

$$X_i = BK_{lb} + (BK_{ub} - BK_{lb}) \times x_i \quad (6)$$

式中: $x_i \in [0, 1]$ 为混沌序列, r 取 $[0, 1]$ 之间的随机数。

2) 切线飞行策略

切线飞行^[15]是一种受 Levy^[16]飞行启发的随机运动模式, 通过模拟粒子沿着目标函数的切线方向移动, 从而更新其在解空间中的位置。

如图 3 所示为模拟切线飞行 100 步的随机游走示意图, 可以看出正切飞行的轨迹表现出更连续和细致的搜索特征, 其步长变化平稳, 能在搜索空间中执行更有方向性的移动, 切线飞行大跨步的步长也较远, 这有利于算法进行全局大范围搜索。

本研究在攻击行为阶段引入切线飞行策略用于扩大算法的搜索范围, 位置更新公式如下:

$$y_{t+1}^{i,j} = \begin{cases} y_t^{i,j} + n(1 + \sin(r)) \times y_t^{i,j} \times \tan(\theta), & p < r \\ y_t^{i,j} + n \times (2r - 1) \times y_t^{i,j} \times \tan(\theta), & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: θ 的计算公式为式(8), $rand$ 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

$$\theta = (rand - 0.5) \times \pi \quad (8)$$

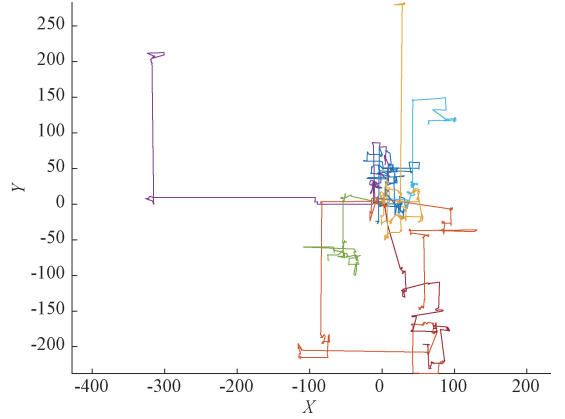


图 3 切线飞行随机游走图

Fig. 3 Tangent flight random walk diagram

3) 动态透镜成像学习策略

本文在黑翅鸢迁徙行为结束后, 设计了一种动态透镜成像反向学习策略^[17], 以帮助算法跳出局部最优。

透镜成像反向学习^[18]模拟了光学定律中的凸透镜成像现象, 通过在当前个体位置的基础上生成一个反向解, 从而扩展搜索范围, 避免算法陷入局部最优。

如图 4 所示, 用 y 轴模拟焦距为 f 的凸透镜, O 为搜索空间中 $[lb, ub]$ 的中点, 高度为 h 的点 P 投影在 x 轴上为原个体位置 Y (红点), 凸透镜成像后, 高度为 h^* 的点 P^* 投影在 x 轴上的个体位置 Y^* (绿点) 即为反向解。根据凸透镜成像原理, 其数学公式为:

$$\frac{(lb + ub)/2 - Y}{Y^* - (lb + ub)/2} = \frac{h}{h^*} \quad (9)$$

令 $\frac{h}{h^*} = k$, 通过变换可得:

$$Y^* = \frac{lb + ub}{2} + \frac{lb + ub}{2k} - \frac{Y}{k} \quad (10)$$

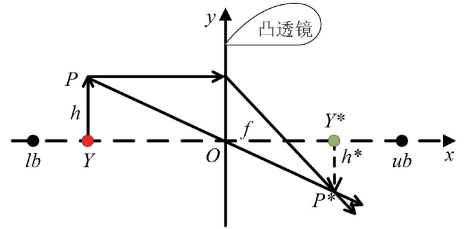


图 4 透镜成像反向学习原理图

Fig. 4 Lens opposition-based learning principle diagram

通过调整参数 k , 可以实现动态反向解的生成。较小的 k 会扩大逆解范围, 而较大的 k 则会缩小逆解的范围^[19]。本文采取的 k 值计算公式为式(11), 其值随迭代次数的增加由小变大, 满足前期大范围搜索, 后期局部搜索的特点。

$$k = \left(1 + \frac{t}{T}\right)^{10} \quad (11)$$

考虑到无法判断通过凸透镜映射得到的反向解是否优于原来个体, 故采用贪婪策略^[20]进行个体筛选, 留下适应

度值更好的个体。

4)TBKA 算法性能测试

为了评估改进 TBKA 算法的性能,选用 20 维的 IEEE CEC-2022^[21]测试集进行有效性验证,如表 2 所示,其包括 12 个基准函数,涉及单峰、多峰、混合和复合函数,旨在评估算法在不同维度和复杂性问题上的表现,考察算法在高维空间中的全局搜索能力和跳出局部最优的能力。并与非洲秃鹫优化算法(AVOA)^[22]、蜣螂优化算法(DBO)^[23]、速度暂停粒子群算法(VPPSO)^[24]、一种改进 BKA 的算法(MBKA)^[25]以及原始 BKA 进行对比分析。所有算法的

初始种群设为 30,最大迭代次数为 500 次。每个算法均独立运行 30 次,取平均值(Mean)、标准差(Std)和排名(Rank)。

图 5 绘制了 12 个测试函数的雷达图,TBKA 扫过了最小的雷达图面积。如表 3 所示,将最优平均值使用粗体标出,最后两行统计了各个算法的平均排名和最终排名,表 3 的数据统计分析中显示 TBKA 获得了 10 个最佳平均值,最终排名第 1,而原 BKA 获得第 6 的最终排名。如图 6 所示绘制了 12 个测试函数的收敛曲线图,可以看出 TBKA 在收敛速度和收敛精度上相比原 BKA 都大幅提高。

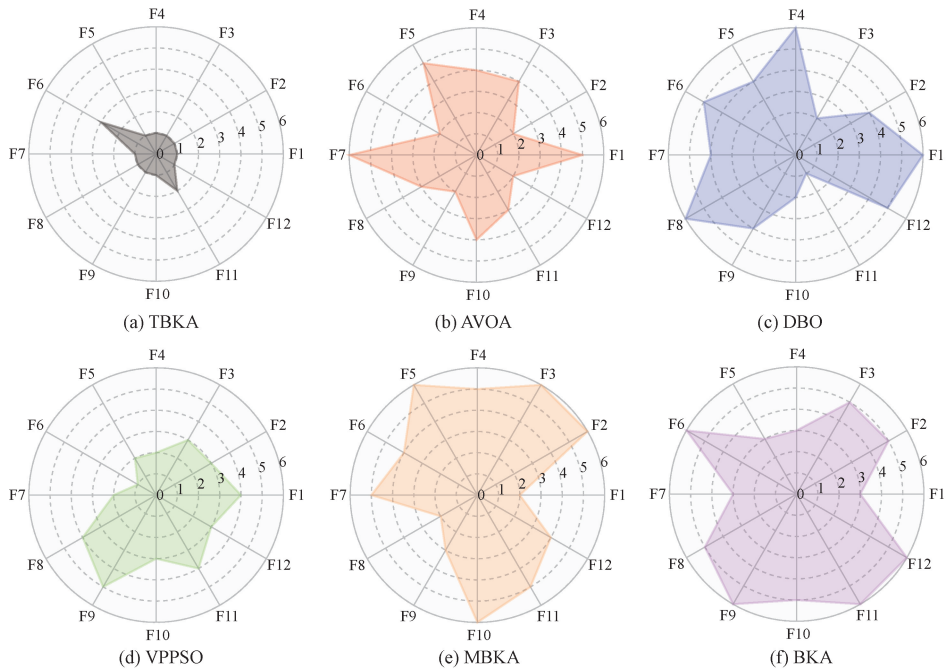


图 5 各算法在 CEC-2022 测试集上的雷达图(dim=20)

Fig. 5 Radar chart of various algorithms on the CEC-2022 test set (dim=20)

表 2 CEC-2022 函数测试集

Table 2 Overview of IEEE CEC2022 benchmark suite

类型	编号	函数	最优值
单峰函数	1	Shifted and Rotated Zakharov Function	300
	2	Shifted and full Rotated Rosenbrock's Function	400
多峰函数	3	Shifted and full Rotated Expanded Schaffer's f6 Function	600
	4	Shifted and full Rotated Non-Continuous Rastrigin's Function	800
	5	Shifted and full Rotated Levy Function	900
混合函数	6	Hybrid Function 1 (N=3)	1 800
	7	Hybrid Function 2 (N=6)	2 000
	8	Hybrid Function 3 (N=5)	2 200
复合函数	9	Composition Function 1 (N=5)	2 300
	10	Composition Function 2 (N=4)	2 400
	11	Composition Function 3 (N=5)	2 600
	12	Composition Function 4 (N=6)	2 700

注:搜索范围: $[-100,100]^D$

表 3 各算法在 CEC-2022 测试集上的统计结果 (dim=20)

Table 3 Statistical results of various algorithms on the CEC-2022 test set (dim=20)

函数	指标	TBKA	AVOA	DBO	VPPSO	MBKA	BKA
F1	Mean	1.570×10³	2.008×10 ⁴	3.877×10 ⁴	8.850×10 ³	4.592×10 ³	7.457×10 ³
	Std	1.806×10 ³	9.518×10 ³	1.078×10 ⁴	4.193×10 ³	2.456×10 ³	8.639×10 ³
	Rank	1	5	6	4	2	3
F2	Mean	4.590×10²	4.938×10 ²	5.031×10 ²	4.965×10 ²	5.886×10 ²	6.105×10 ²
	Std	1.845×10 ¹	5.056×10 ¹	7.534×10 ¹	3.236×10 ¹	7.414×10 ¹	2.369×10 ²
	Rank	1	2	4	3	5	6
F3	Mean	6.208×10²	6.488×10 ²	6.331×10 ²	6.385×10 ²	6.643×10 ²	6.533×10 ²
	Std	6.961×10 ⁰	1.233×10 ¹	1.225×10 ¹	9.826×10 ⁰	8.346×10 ⁰	1.164×10 ¹
	Rank	1	4	2	3	6	5
F4	Mean	8.705×10²	8.884×10 ²	9.067×10 ²	8.748×10 ²	8.916×10 ²	8.774×10 ²
	Std	1.383×10 ¹	2.302×10 ¹	2.792×10 ¹	1.431×10 ¹	9.751×10 ⁰	2.408×10 ¹
	Rank	1	4	6	2	5	3
F5	Mean	1.934×10³	2.367×10 ³	2.160×10 ³	2.069×10 ³	2.516×10 ³	2.107×10 ³
	Std	3.188×10 ²	3.034×10 ²	5.379×10 ²	4.303×10 ²	1.505×10 ²	2.351×10 ²
	Rank	1	5	4	2	6	3
F6	Mean	3.137×10 ⁴	6.860×10 ³	1.973×10 ⁶	4.060×10³	5.642×10 ⁴	6.915×10 ⁶
	Std	9.581×10 ⁴	5.352×10 ³	7.098×10 ⁶	1.906×10 ³	1.011×10 ⁵	3.511×10 ⁷
	Rank	3	2	5	1	4	6
F7	Mean	2.083×10³	2.177×10 ³	2.153×10 ³	2.126×10 ³	2.153×10 ³	2.133×10 ³
	Std	3.322×10 ¹	6.755×10 ¹	6.210×10 ¹	4.402×10 ¹	2.540×10 ¹	4.386×10 ²
	Rank	1	6	4	2	5	3
F8	Mean	2.231×10³	2.255×10 ³	2.306×10 ³	2.267×10 ³	2.241×10 ³	2.276×10 ³
	Std	7.537×10 ⁰	4.154×10 ¹	7.960×10 ¹	5.966×10 ¹	2.277×10 ¹	5.486×10 ¹
	Rank	1	3	6	4	2	5
F9	Mean	2.482×10³	2.492×10 ³	2.518×10 ³	2.524×10 ³	2.507×10 ³	2.558×10 ³
	Std	3.334×10 ⁰	8.211×10 ⁰	3.755×10 ¹	4.882×10 ¹	1.909×10 ¹	1.128×10 ²
	Rank	1	2 2	4	5	3	6
F10	Mean	3.001×10³	3.766×10 ³	3.287×10 ³	3.576×10 ³	4.600×10 ³	4.060×10 ³
	Std	4.886×10 ²	8.888×10 ²	1.179×10 ³	1.043×10 ³	9.475×10 ²	1.082×10 ³
	Rank	1	4	2	3	6	5
F11	Mean	2.989×10 ³	3.073×10 ³	2.948×10³	3.294×10 ³	4.058×10 ³	4.317×10 ³
	Std	8.966×10 ¹	2.857×10 ²	1.480×10 ²	5.094×10 ²	5.411×10 ²	1.046×10 ³
	Rank	2	3	1	4	5	6
F12	Mean	2.965×10³	2.998×10 ³	3.030×10 ³	3.005×10 ³	3.012×10 ³	3.060×10 ³
	Std	1.984×10 ¹	5.788×10 ¹	5.525×10 ¹	3.754×10 ¹	6.416×10 ¹	8.149×10 ¹
	Rank	1	2	5	3	4	6
平均排名		1.25	3.50	4.08	3.00	4.33	4.75
最终排名		1	3	4	2	5	6

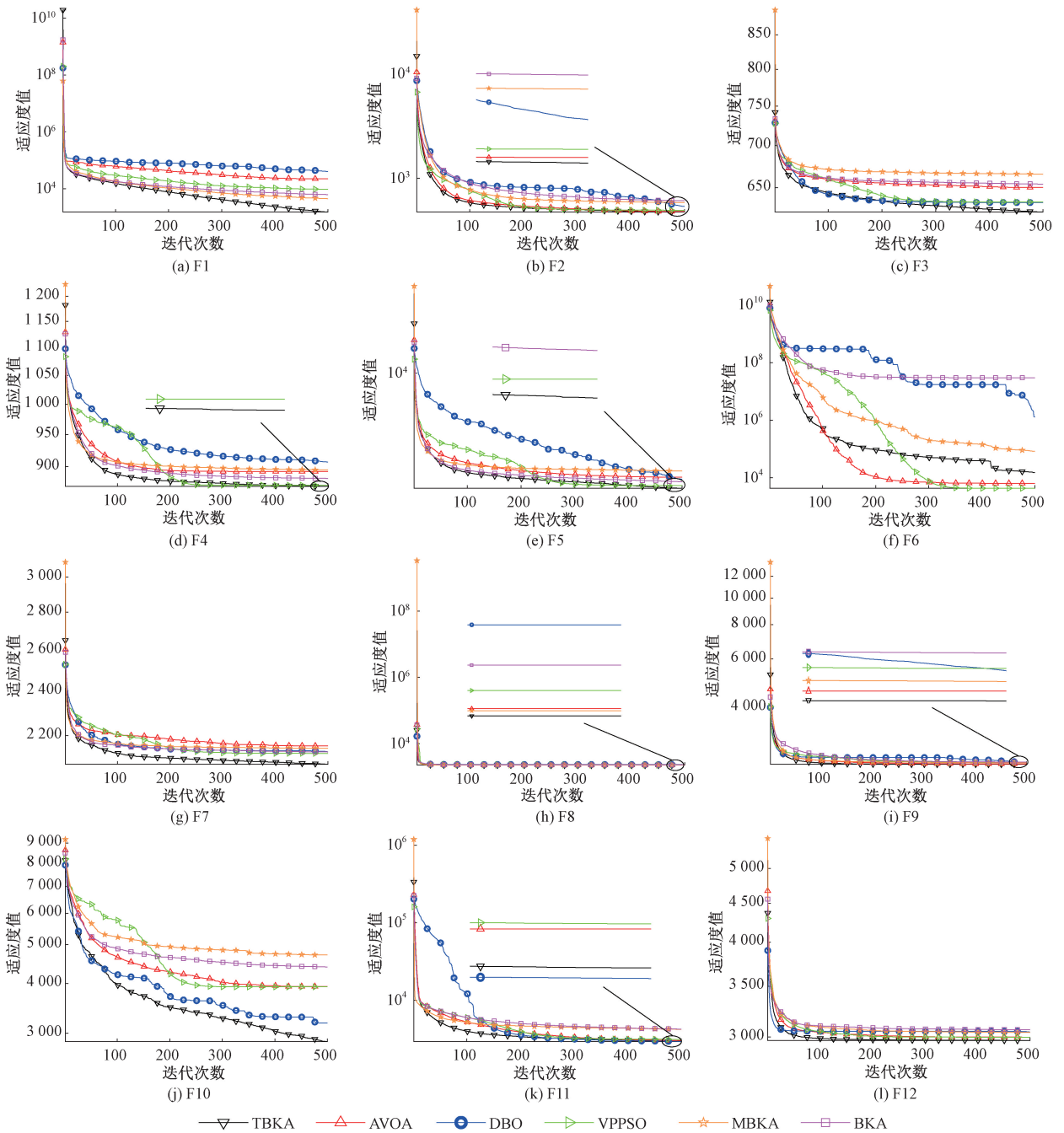


图6 各算法在CEC-222测试集上的收敛曲线(dim=20)

Fig. 6 Convergence curves of various algorithms on the CEC-222 test set (dim=20)

3 TBKA-P&O复合算法在MPPT中的应用

3.1 扰动观察法(P&O)

P&O是一种简单高效的局部搜索算法,广泛应用于光伏发电系统MPPT领域。其基本原理是通过在光伏阵列工作点施加小幅度扰动,观察扰动后输出功率的变化趋势,并据此调整输入方向,使系统逐步接近最优解^[26]。该方法无需复杂建模,具有实现简单、适应性强的优点,但在

动态环境或多峰优化问题中可能陷入局部最优。本文将其与智能优化算法TBKA结合,有助于克服P&O方法在多峰优化问题中易陷入局部最优的不足。结合两者优势,形成的混合算法能够更快速、更精确地跟踪光伏系统的最大功率点。

3.2 算法重启

当外部环境发生动态变化时,光伏系统的MPP可能发生偏移,此时需要重新启动TBKA算法进行追踪,若继

续使用 P&O 算法进行追踪,可能会导致陷入局部最优,无法捕捉到新的 MPPT^[27]。算法进行重启的条件为式(12)。

$$|P_{new} - P_{old}| > 0.05P_{old} \tag{12}$$

式中: P_{new} 为当前时刻的功率值, P_{old} 为前一时刻的功率值,当检测到前后时刻功率变化量满足 5% 时重启复合算法。

3.3 算法实现

TBKA-P&O 复合算法的光伏系统 MPPT 控制应用流程如图 7 所示,前期先用 TBKA 快速搜索到 MPP 附近,迭代 3 次后切换为 P&O 算法进行局部追踪。

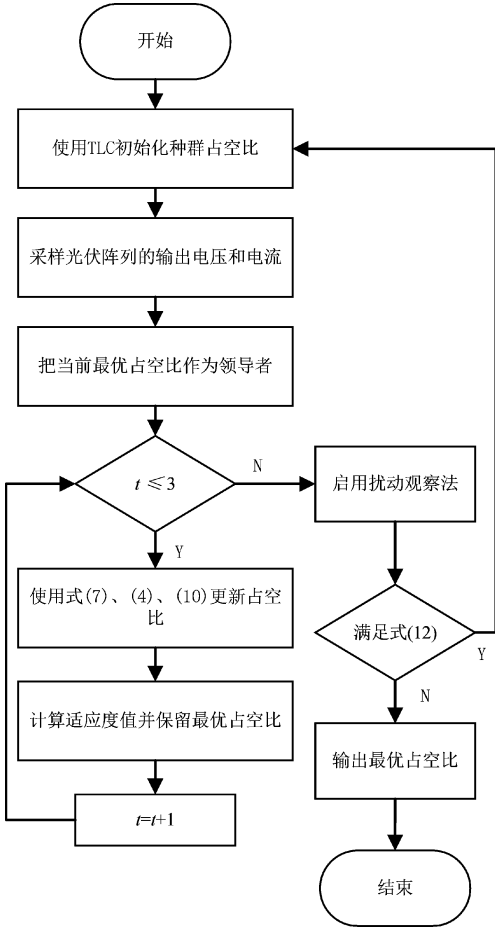


图 7 TBKA-P&O 复合算法流程

Fig. 7 Flowchart of the TBKA-P&O hybrid algorithm

4 仿真实验结果与分析

为验证本文所提复合算法的有效性,在 Matlab/Simulink 中搭建光伏 MPPT 控制系统仿真模型,控制原理如图 8 所示。该系统由 5×1 的光伏阵列、Boost 电路、TBKA-P&O 控制器和负载组成。在如图 2 所示的 4 种工况条件下,分别采用传统 P&O 算法、BKA-P&O 算法、量子 CS-P&O 算法^[28]以及 TBKA-P&O 算法进行仿真对比实验。所有算法的初始种群设为 4,最大迭代次数设为 15,

传统 P&O 的步长设为 1×10^{-6} ,各复合算法的 P&O 步长设为 1×10^{-4} 。

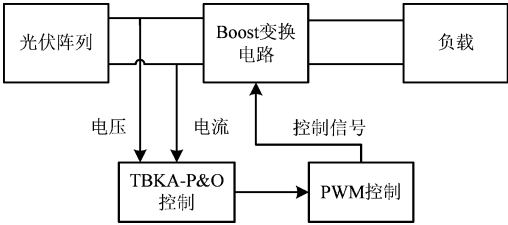


图 8 光伏 MPPT 控制系统原理图

Fig. 8 Photovoltaic MPPT control system schematic

4.1 标准光照条件仿真(工况 1)

如图 9 所示,4 种算法在工况 1 条件下均成功实现了最大功率点(MPP)的追踪,但其性能存在显著差异。其中,TBKA-P&O 算法表现最优,仅需 0.093 s 便完成了算法收敛,相较于传统 P&O 算法、BKA-P&O 算法和量子 CS-P&O 算法,其跟踪效率分别提升了 65.17%、70.29% 和 55.50%。

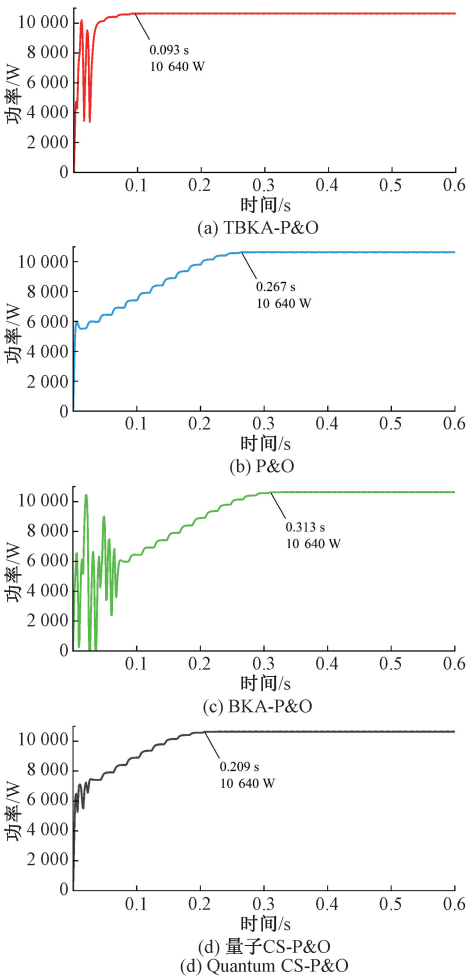


图 9 工况 1 下各算法功率输出曲线

Fig. 9 Power output curves of various algorithms under operating condition 1

这一结果充分证明了TBKA-P&O算法在提升追踪速度方面的显著优势。此外,TBKA-P&O算法在追踪过程中波动幅度较小,功率输出更为平稳,这表明,将TBKA与P&O相结合,不仅提高了算法的寻优效率,还增强了系统的稳健性和可靠性。

4.2 静态局部阴影仿真(工况2)

如图10所示,在局部阴影条件下,传统P&O算法尽管收敛时间较短,但由于陷入局部最优值,导致跟踪精度显著降低,仅为58.80%。同样地,BKA-P&O算法也未能摆脱局部极值的限制,从而影响了其整体性能。而量子CS-P&O算法虽然能够避免陷入局部极值,但其收敛时间相对较长,降低了跟踪效率。

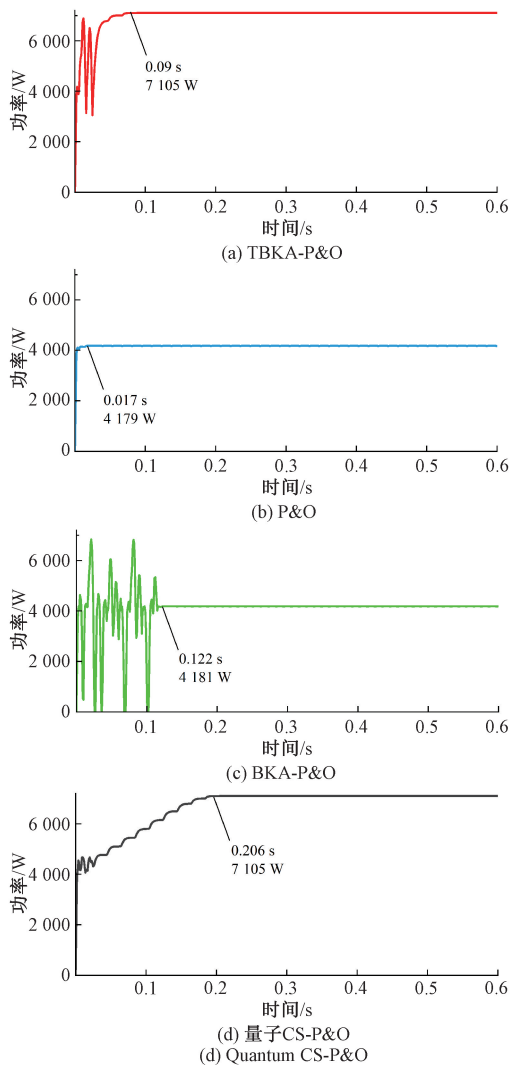


图10 工况2下各算法功率输出曲线

Fig.10 Power output curves of various algorithms under operating condition 2

相比之下,TBKA-P&O算法在0.09 s内即可跟踪至MPP附近,且跟踪精度高达99.97%。与量子CS-P&O算法相比,TBKA-P&O的跟踪效率提升了56.31%,在快速

收敛和高精度跟踪之间实现了良好的平衡。这一结果充分证明了TBKA-P&O算法在局部遮阴下的卓越表现,能够同时满足快速性与准确性的双重需求。

4.3 光照动态变化仿真

为了验证光照情况发生突变时TBKA-P&O算法性能的鲁棒性,本文设置在0.6 s光照条件由工况3突变为工况4,仿真结果如图11所示。根据仿真结果可知:在工况3的条件下,TBKA-P&O和量子CS-P&O算法跟踪时间几乎相同,跟踪精度均为99.96%,而P&O的跟踪精度为84.80%;

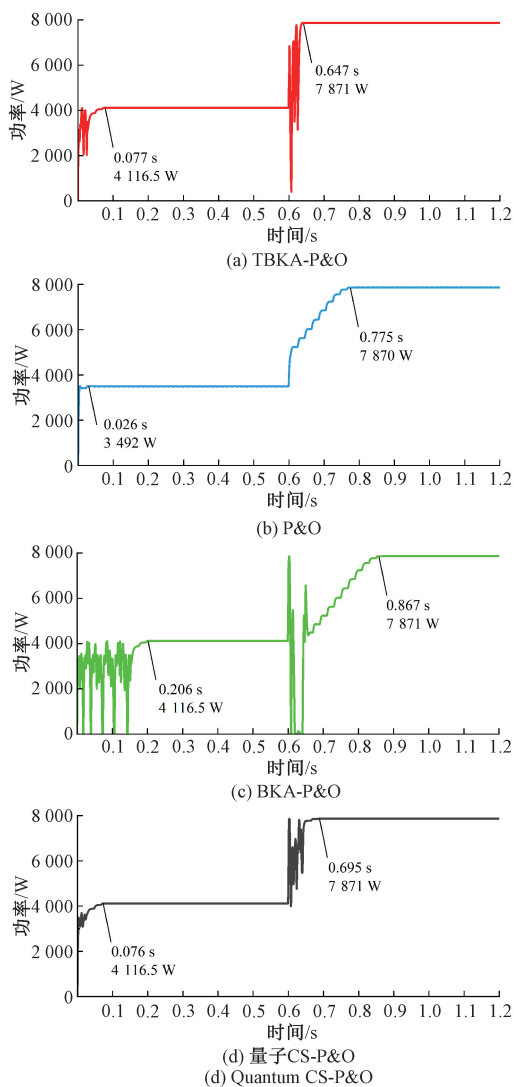


图11 光照动态变化各算法功率输出曲线

Fig.11 Power output curves of various algorithms under dynamic illumination conditions

在0.6 s光照条件发生突变时,TBKA-P&O以最快速度跟踪到MPP附近,仅用时0.647 s,跟踪精度为99.96%,其余3种算法虽均能跟踪到MPP附近,但跟踪速度相比TBKA-P&O显著降低,证明了TBKA-P&O在

寻优速度、收敛精度和鲁棒性方面的优越性和有效性。

5 结 论

本文提出了一种融合改进黑翅鸢优化算法(TBKA)与扰动观察法(P&O)的混合算法,用于光伏系统的最大功率点跟踪。针对光伏阵列在局部阴影条件下的多峰值功率特性,该方法在 TBKA 中引入 Tent-Logistic-Cosine 混沌映射、切线飞行和动态透镜成像反向学习策略提升了全局搜索能力,通过 CEC-2022 测试集且与其他五种算法对比验证了 TBKA 的有效性;在局部搜索阶段,采用 P&O 算法提高了局部跟踪精度与动态响应速度。本文基于 4 种典型工况构建仿真模型,对提出算法进行了验证。

实验结果表明,与传统的 P&O、BKA-P&O、量子 CS-P&O 算法相比,TBKA-P&O 算法能够有效避免陷入局部最优,同时在光伏系统的多峰值功率曲线下实现了快速且稳定的最大功率点跟踪,为光伏发电系统的高效运行提供了有力支持。未来的研究可进一步结合硬件实现,探索算法在不同类型光伏阵列中的实际性能表现,并针对动态复杂环境条件下的优化策略进行深入研究。

参考文献

- [1] 魏业文,邱天一. 基于改进鸚鵡算法的光伏多峰值 MPPT 控制[J]. 电子测量技术,2024,47(12):83-90.
WEI Y W, QIU T Y. PV multi-peak MPPT control based on improved parrot algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2024,47(12):83-90.
- [2] 郑晓亮,杨晓亮,来文豪. 新能源发电预测方法分类及研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (34): 14503-14521.
ZHENG X L, YANG X L, LAI W H. Classification and research progress of new energy power generation forecasting methods [J]. Science Technology and Engineering, 2024,24(34):14503-14521.
- [3] 周睿,徐良,刘文浩,等. 基于改进扰动观察法的光伏 MPPT 控制算法研究 [J]. 电源技术, 2023, 47 (3): 388-392.
ZHOU R, XU L, LIU W H, et al. Research on MPPT algorithm based on improved perturbation and observation method [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023,47(3):388-392.
- [4] 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 D N. Research on photovoltaic maximum power point tracking strategy based on improved conductance increment method [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022,43(8):82-90.
- [5] KONG L, WANG B, FAN D, et al. Optimize photovoltaic MPPT with improved snake algorithm[J]. Energy Reports, 2024, 11: 5033-5045.
- [6] 秦世清,何映谊,曹通,等. 基于 MPPT 光伏系统 SIC-FT 控制算法的研究 [J]. 太阳能学报,2024, 45 (9): 405-413.
QIN SH Q, HE Y Y, CAO T, et al. Research on SIC-FT control algorithm for MPPT photovoltaic system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024,45(9): 405-413.
- [7] 罗皓鹏,汪隆臻,刘婷,等. 基于改进哈里斯鹰和电导增量法的 MPPT 控制研究 [J/OL]. 电源学报, 1-12 [2025-01-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240710.1922.006.html>.
LUO H P, WANG L ZH, LIU T, et al. Research on composite MPPT control based on improved Harris Hawk optimization and incremental conductance method[J/OL]. Journal of Power Supply. 1-12[2025-01-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240710.1922.006.html>.
- [8] 樊立萍,史斌. 基于 LTSO-VP&O 算法的光伏系统 MPPT 控制 [J]. 电子测量技术, 2024, 47 (13): 120-127.
FAN L P, SHI B. MPPT control of photovoltaic system based on LTSO-VP&O algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47 (13): 120-127.
- [9] AUILA-LEON J, VARGAS-SALGADO C, DIAZ-BELLO D, et al. Optimizing photovoltaic systems: A meta-optimization approach with GWO-enhanced PSO algorithm for improving MPPT controllers [J]. Renewable Energy, 2024, 230: 120892.
- [10] 姚天棋,柴琳,肖凡,等. 基于改进天鹰优化算法的光伏阵列多峰最大功率跟踪控制[J]. 热力发电,2023,52 (12):98-105.
YAO T Q, CHAI L, XIAO F, et al. Multi peak MPPT control of photovoltaic array based on improved aquila optimizer [J]. Thermal Power Generation, 2023,52(12):98-105.
- [11] WANG J, WANG W, HU 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.
- [12] LYU G H, FARAH A S, MUHAMMAD M A, et al. Improved maximum power point tracking algorithms by using numerical analysis techniques for photovoltaic systems[J]. Results in Engineering,2024, 21:101740.
- [13] 班云飞,张达敏,左锋琴,等. 精英反向学习及柯西扰动引导的瞪羚优化算法[J]. 国外电子测量技术,2024,43

- (7):1-13.
- BAN Y F, ZHANG D M, ZUO F Q, et al. Elite reverse learning and Cauchy perturbation-guided gazelle optimization algorithm[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024,43(7):1-13.
- [14] HUA Z, ZHOU Y, HUANG H. Cosine-transform-based chaotic system for image encryption [J]. Information Sciences, 2019, 480: 403-419.
- [15] LAYEB A. Tangent search algorithm for solving optimization problems [J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(11): 8853-8884.
- [16] YANG X S, TING T O, KARAMANOGLU M. Random walks, Lévy flights, Markov chains and metaheuristic optimization [J]. Future Information Communication Technology and Applications: ICFICE 2013, 2013: 1055-1064.
- [17] XIAO Y, CUI H, HUSSIEEN A G, et al. MSAO: A multi-strategy boosted snow ablation optimizer for global optimization and real-world engineering applications[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 61: 102464.
- [18] SAHOO S K, SAHA A K, NAMA S, et al. An improved moth flame optimization algorithm based on modified dynamic opposite learning strategy [J]. Artificial Intelligence Review, 2023, 56 (4): 2811-2869.
- [19] 林雨珊,刘升.多策略强化的金豺优化算法[J].计算机应用研究,2024,41(12):3679-3688.
- LIN Y SH, LIU SH. Multi-strategy strengthening golden jackal optimization[J]. Application Research of Computers, 2024,41(12):3679-3688.
- [20] 何静,高见,张昌凡.集成自适应变异混沌松鼠搜索和LSTM算法的RUL预测方法及应用[J].电子测量与仪器学报,2023,37(5):88-97.
- HE J, GAO J, ZHANG CH F. Prediction of RUL and application of the integrated squirrel search algorithm with adaptive mutation chaos for LSTM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(5):88-97.
- [21] BIEDRZYCKI R. Revisiting CEC 2022 ranking: A new ranking method and influence of parameter tuning[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2024, 89: 101623.
- [22] ABDOLLAHZADEH B, GHAREHCHOPOGH F S, MIRJALILI S. African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 158: 107408.
- [23] XUE J, SHEN B. Dung beetle optimizer: A new meta-heuristic algorithm for global optimization [J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79 (7): 7305-7336.
- [24] SHAMI T M, MIRJALILI S, AL-ERYANI Y, et al. Velocity pausing particle swarm optimization: A novel variant for global optimization[J]. Neural Computing and Applications, 2023, 35(12): 9193-9223.
- [25] 王旭杰.基于改进黑鸢搜索算法的区域学校选址优化研究[D].黄石:湖北师范大学,2024.
- WANG X J. Research on optimization of regional school site selection based on improved black kite search algorithm [D]. Huangshi: Hubei Normal University, 2024.
- [26] 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.
- [27] 罗程浩,胡骅,魏云冰,等.局部阴影下基于IBOA-INC的光伏复合MPPT控制[J].电测与仪表,2024,61(5):182-189.
- LUO CH H, HU H, WEI Y B, et al. MPPT control of photovoltaic composite based on IBOA-INC under partial shading [J]. Electrical Measurement & Instrumentation. 2024,61(5):182-189.
- [28] 王金玉,王雨欣,王海生.基于量子CS-P&O算法的光伏最大功率点跟踪[J].电源技术,2022,46(7):789-792.
- WANG J Y, WANG Y X, WANG H SH. Photovoltaic maximum power point tracking based on quantum CS-P&O algorithm[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022,46(7):789-792.

作者简介

王欣峰,硕士,副教授,主要研究方向为智能控制。

E-mail:wangxinfenghao@yeah.net

姜鑫杰(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为智能控制。

E-mail:15713502757@163.com

张丕,硕士研究生,主要研究方向为智能控制。

E-mail:2968159181@qq.com

赵思琴,硕士研究生,主要研究方向为智能控制。

E-mail:1983331937@qq.com