

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415637

基于改进白骨顶鸡算法的局部荫蔽光伏 MPPT^{*}瞿 崎¹ 谭功全^{1,2} 庞宏杰² 冯志强²

(1. 四川轻化工大学 自贡 643000; 2. 人工智能四川省重点实验室 宜宾 644000)

摘 要: 针对光伏发电系统在局部荫蔽下传统最大功率点追踪方法极易陷入局部最优而导致功率震荡范围较大等问题,提出一种基于改进白骨顶鸡算法的光伏 MPPT 方法。该算法在传统白骨顶鸡算法的基础上,将 Logistic-Sine-Cosine 混沌映射因子引入种群跟随者的链式移动中,从而使链式移动变为混沌移动,让算法具备跳出局部最优解的能力;对每次寻优结束后的当前最优位置进行柯西变异,对比变异前后择优更新替代,增加算法的全局搜索能力。在四种光照模式下,将 ICOOT 与另外三种算法的 MPPT 进行仿真分析。结果显示,所提改进算法的追踪速度为 0.14 s, 1.13 s, 0.13 s, 1.07 s, 系统稳定率为 99.43%, 99.34%, 98.73%, 98.80%。综合来看,ICOOT 在用于光伏发电局部荫蔽 MPPT 时能有效解决传统算法易于陷入局部最大功率点而导致寻优速度慢、功率震荡大的问题。

关键词: 最大功率点追踪;局部荫蔽;白骨顶鸡算法;混沌映射;柯西变异

中图分类号: TM615;TN709 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4047

Local shaded photovoltaic MPPT based on improved coot chicken algorithm

Qu Qi¹ Tan Gongquan^{1,2} Pang Hongjie² Feng Zhiqiang²

(1. Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

2. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province, Yibin 644000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional Maximum power point tracking method is easy to fall into local optimal and lead to large power oscillation range in photovoltaic power generation system under local shade, an improved algorithm based on Coot chicken was proposed. The photovoltaic MPPT method of ICOOT. Based on the traditional Coot bird optimization algorithm, the algorithm introduced the logistics-sine-cosine chaotic mapping factor into the chain movement of the population follower, so that the chain movement became chaotic movement. The algorithm has the ability to jump out of the local optimal solution; The current optimal position after each optimization is modified by Cauchy, and the optimal update and replacement before and after the optimization are compared to increase the global search ability of the algorithm. Under four lighting modes, ICOOT and MPPT of the other three algorithms were simulated and analyzed. The results show that the tracking speed of the proposed algorithm is 0.14 s, 1.13 s, 0.13 s, 1.07 s, and the system stability rate is 99.43%, 99.34%, 98.73%, 98.80%. In summary, ICOOT can effectively solve the problem that traditional algorithm is easy to fall into the local maximum power point, which leads to slow optimization speed and large power oscillation when used for local concealed MPPT of photovoltaic power generation.

Keywords: maximum power point tracking; local shading; COOT bird algorithm; chaos mapping; Cauchy mutation

0 引 言

在实际运行过程中,最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)技术受限于各种环境因素的影响,例如云层荫蔽、建筑物遮挡、灰尘污渍等,均会对光伏阵列的输出功率产生一定的影响,使其输出曲线呈现出多

峰值情况。传统的 MPPT 技术,如扰动观察法^[1]、电压跟踪法^[2]、电导增量法^[3]等在局部荫蔽条件下算法极易陷入即局部最优处,从而导致光伏发电的效率降低。

近年来,针对局部荫蔽的情况,许多新型的优化算法被运用于 MPPT。王琳等^[4]提出一种粒子群算法运用于 MPPT 中,算法融入自适应的惯性权重系数与异步变化的

收稿日期:2024-03-14

^{*} 基金项目:四川省科技厅项目(2020JDJQ0075)、人工智能四川省重点实验室科研项目(2019RYJ08)资助

学习因子,可以解决陷入局部最优值的问题,但搜索前期步长过大,从而导致功率震荡幅度增大。欧阳名三等^[5]提出一种基于松鼠算法的最大功率点追踪方式,该算法对比传统的启发式粒子群算法能有效减小功率震荡,但该算法参数较多,参量设置相对复杂。赵斌等^[6]针对传统的蚁狮算法进行改进,将蚂蚁的位置更新公式引入自适应权重系数调整,使算法能够具备很好的跟踪精度,但该方法需要进行多次迭代,导致效率过差。此外,例如蝴蝶算法^[7],布谷鸟算法^[8],灰狼算法(gray wolf optimization,GWO)^[9]等优化算法,在用于局部隐蔽下 MPPT 时,也存在着容易陷入局部最优值、功率震荡范围较大等的问题。

Naruei 等^[10]于 2021 年提出了一种名为白骨顶鸡优化算法(coot bird optimization algorithm,COOT)的元启发式算法。该算法模拟了一种叫做 Coot 的鸟类行为,该种群通过划分领导者和跟随者,根据不同条件进行不同方式的位置移动,最后不断调整以向最优区域靠近。相比于其他智能算法,COOT 算法具有参数少、易于实现、收敛性能强等特点,因此近年来被广泛应用于各方面,如优化企业电力市场利润^[11]、短期光伏发电功率预测^[12]、光伏阵列 MPPT 研究^[13]等领域。

但后续学者发现该算法依然存在着容易陷入局部最优值,从而导致收敛速度慢、寻优过程震荡大等问题。于是有研究在 COOT 算法中引入佳点集和正余弦优化方法来增强算法的全局寻优能力^[14]。或在算法中引入复合突变策略和反向随机优化策略从而改进算法容易陷入局部最优的问题^[15]。

针对该算法用于光伏发电局部隐蔽 MPPT 时,易于陷入局部最大功率点,从而导致寻找最大输出功率点的过程缓慢、输出功率震荡范围大的问题,本文提出一种改进白骨顶鸡算法(improved coot bird optimization algorithm,ICOOT),将 Logistic-Sine-Cosine 混沌映射因子引入传统 COOT 算法中,将种群跟随者的链式移动方程改进为混沌移动,使算法具备跳出局部最优值的能力;并且在每轮寻优结束后,对当前最优值进行柯西变异,对比前后最优值并进行更新替代,以增强算法的全局搜索能力。最后,在四种不同光照模式下,分别采用 ICOOT 算法、COOT 算法、GWO 算法、引入莱维飞行模块的灰狼算法(levy gray wolf optimization,LGWO)算法进行光伏 MPPT 仿真,以验证所提算法的有效性。

1 光伏电池数学模型及输出特性

1.1 光伏电池输出模型

光伏电池的作用为将太阳能转换为电能,其基本结构由无数的 P-N 节构成。太阳光直射到半导体的 P-N 节上,使内部形成空穴和电子对,在内部电场的作用下,光生电子发生定向移动,在 P-N 节内部形成电势差,接通电路之后,形成电流。因此,光伏电池的等效模型如图 1 所示^[16]。

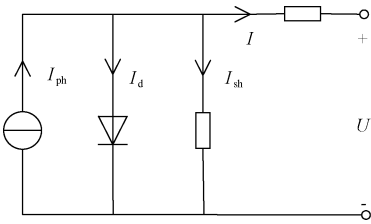


图 1 光伏电池等效模型图

由图 1 的电路模型可以得出:

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

式中的每个参数具体含义由表 1 给出:

表 1 符号表

参数	含义
I	输出电流/A
U	输出电压/V
I_{ph}	光生电流/A
I_d	二极管饱和电流/V
q	电子电荷(1.6×10^{-19} C)
R_s	串联电阻/ Ω
R_{sh}	并联电阻/ Ω
n	P-N 节理想因子(取 1)
K	玻尔兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K)
T	电池工作温度/ $^{\circ}\text{C}$

1.2 光伏阵列输出特性

在恒定光照时,光伏阵列的输出曲线只应该存在一个全局最大功率点;而局部荫蔽时,功率输出特性曲线会呈现多峰值的情况^[17]。为了更直观描述其输出特性,选取五块光伏电池进行串联,分别测试光伏阵列在恒定光照和局部阴影情况下的输出特性。进行输出测试,输出特性曲线如图 2 所示。

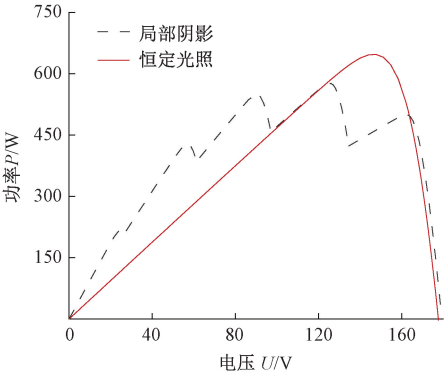


图 2 光伏阵列 P-U 输出特性曲线

由图 2 可以看出,对比于恒定光照情况,局部阴影下 P-U 输出特性曲线存在多个峰值,即多个局部最优值,但只存在一个全局最优值。因此,如何使算法在寻优过程中

跳出局部最优值,且减小功率震荡范围,对提高光伏发电至关重要。

2 白骨顶鸡算法及改进

2.1 传统白骨顶鸡算法

COOT 算法将种群划分为领导者和跟随者,跟随者有两种移动方式,分为主动移动和被动移动。又将主动移动划分为随机移动和链式移动。在主动移动中,跟随者并不依赖领导者的位置,而在被动移动中,跟随者根据领导者的位置进行移动更新。在每次位置更新之后,对领导者的位置进行一次更新^[18]。

生成一个 $[0,1]$ 之间的随机数 r_1 ,当 $r_1 > 0.5$ 时,跟随者种群选择主动移动策略。生成 $[0,1]$ 之间的随机数 r_2 。当 $r_2 < 0.5$ 时,种群跟随者采取随机移动方式。首先生成一个随机数 R ,其数学公式为:

$$R = \text{rand}(0,1) \cdot (u - l) + l \quad (2)$$

式中: u 为搜索上限; l 为搜索下限。

然后根据式(3)对跟随者的位置进行随机移动。

$$f_i = f_i + r_2 \cdot (1 - t/t_m) \cdot (R - f_i) \quad (3)$$

t 为当前迭代次数; t_m 为设定最大迭代次数; f_i 为第 i 个跟随者位置。

当 $r_2 > 0.5$ 时,根据式(4)对种群跟随者采取链式移动。

$$f_i = 0.5 \times (f_{i-1} + f_i) \quad (4)$$

式中: f_{i-1} 为上一跟随者的位置。

当 $r_1 < 0.5$ 时,白骨顶鸡种群中的跟随者移动方式选择为被动移动。根据式(5)对领导者进行选择:

$$k = 1 + \text{bmod}(i, N) \quad (5)$$

式中: k 为领导者的索引数; i 为跟随者的索引数; $\text{mod}(i, N)$ 为计算 i 除以 N 的余数; N 为种群数量。

根据式(6)对跟随者的位置进行被动移动。

$$f_i = l_k + 2R_1 \cos(2\pi R_2) \cdot (l_k - f_i) \quad (6)$$

式中: l_k 为选定的领导者位置; R_1, R_2 为 $(0,1)$ 中的随机数。

根据式(7)对领导者的位置进行移动:

$$l_i = \begin{cases} (2 - t/t_m) \cdot R_3(g - l_i) \cdot \cos(2\pi R_4) + g & R_5 < 0.5 \\ (2 - t/t_m) \cdot R_3(g - l_i) \cdot \cos(2\pi R_4) - g & R_5 \geq 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

式中: R_3, R_4, R_5 为 $(0,1)$ 之间的随机数; g 为种群的最优位置。

2.2 改进白骨顶鸡算法

针对光伏局部荫蔽下的 MPPT,引入 Logistic-Sine-Cosine 混沌映射和标准柯西变异对 COOT 进行改进。

1) Logistic-Sine-Cosine 混沌映射

在 COOT 算法中,当适应度较差的种群跟随者采用式(4)进行链式移动时,可能导致算法的优化变差,从而陷入局部最优值,影响寻优效率。因此,对链式移动公式进行改进,引入 Logistic-Sine-Cosine 混沌映射,使链式移动变化

为混沌移动,使适应度较差的个体能够跳出当前位置,增加寻优过程的混沌性,从而增强最大功率点追踪的多峰寻优能力。

Logistic-Sine-Cosine 混沌映射是将 Logistic 混沌映射和 Sine 混沌映射用余弦映射相连接,对比于单个混沌映射,Logistic-Sine-Cosine 混沌映射具有更好的混沌特性,其混沌性能在文献[19]已被验证,即映射中的参数改变,但输出状态仍随机分布,仍可以呈现出复杂的混沌行为。在文献[20]中,学者对该混沌映射进行试验,根据映射的分叉图、Lyapunov 指数、样本熵的结果显示,该混沌映射的输出序列呈均匀分布,混沌性能远比 Logistic 和 Sine 映射更好,本文不再赘述。因此选取 Logistic-Sine-Cosine 混沌映射作为算法的改进基础。

混沌映射标准公式为:

$$x(i+1) = \cos\{\pi[4rx(i)(1-x(i)) + (1-r)\sin[\pi x(i)] - 0.5]\}, r \in [0,1] \quad (8)$$

式中: r 为搜索参数值。

Logistic 混沌映射为:

$$y(i+1) = 4ry(i) \cdot (1-y(i)) \quad (9)$$

Sine 混沌映射公式为:

$$z(i+1) = r \sin(\pi z(i)) \quad (10)$$

将 Logistic-Sine-Cosine 混沌映射引入 COOT 算法中,对算法的链式移动公式改进为混沌移动,以此解决适应度差的个体链式移动时导致的陷入局部最优值的问题,增加算法的混沌性能,使算法能够跳出局部值,在 MPPT 中能够更快地找到全局最大功率点。改进后的混沌链式移动公式如下:

$$f_i = 0.5 \times (f_{i-1} + f_i) \cdot x(n+1) \quad (11)$$

2) 标准柯西变异

针对 COOT 算法易于陷入局部最优值的问题,引入标准柯西变异来对种群最优值进行变异优化,提高算法的搜索范围,使种群更容易逃离局部最优。标准柯西分布(Cauchy)的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{x(1+x^2)}, -\infty < x < +\infty \quad (12)$$

其分布函数拥有原点处峰值较小的特性,有利于在每次变异后减小算法的搜索范围,使算法将更多时间用于全局搜索;而分布函数的两侧下降平缓的且分布较长的特性,可使得变异能够产生更多远离原点的随机数,有利于算法逃离局部最优^[21-22]。利用柯西变异的特性来增强种群的多样性,以此使改进的算法在变异之后能够更好地逃离局部最优值,提高算法的全局搜索能力。

因此,在每次迭代后的最优值处引入标准柯西变异,对当前位置进行扰动变异,得到一个新解,通过计算新旧解所对应的功率输出值大小来判断解的优劣,选择较大值进行择优替换,以此解决算法易于陷入局部最优的问题。

使用式(13)对当前最优值进行扰动。

$$X' = X + X \cdot Cauchy(0,1) \tag{13}$$

式中:Cauchy(0,1)为标准柯西分布函数;X 为当前最优值;X' 为变异后最优值。

2.3 算法实现过程

改进算法流程图如图 3 所示。

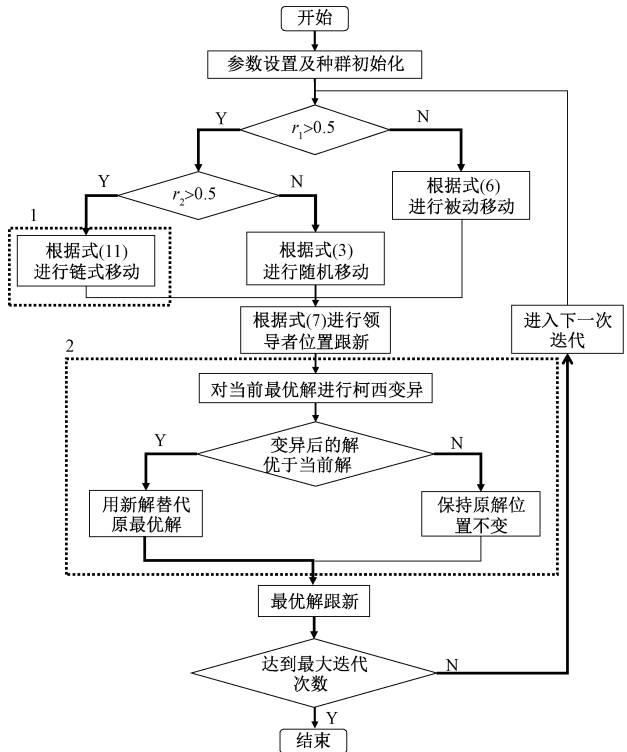


图 3 算法流程图

流程图中虚线框 1 表示:引入 Logistic-Sine-Cosine 混沌映射,将原式(4)改进为式(11);虚线框 2 表示:在每次迭代后对当前最优解进行标准柯西变异并择优。

当上述算法用于光伏发电系统时,以最优解的位置表示 Boost 电路的占空比,以光伏阵列的功率输出作为目标函数,用于判断解的优劣。

3 仿真测试及结果分析

使用 Matlab/Simulink 软件建立光伏发电系统的结构如图 4,模型采用 Boost 电路作为光伏系统 MPPT 的控制电路,模型中设置的参数为: $C_1=500\ \mu\text{F}$ 、 $C_2=200\ \mu\text{F}$ 、 $L=8.5\ \text{mH}$ 、 $R=15.5\ \Omega$ 。

图 4 中所示 PV array 模块为光伏阵列封装模块,封装内部由五块小型光伏阵列串联构成,每一小型光伏阵列模块设置为 2 块光伏电池串联,4 块光伏电池并联,光伏电池采用常规的电池模型,每一块光伏电池的参数设置为:开路电压为 43.6 V,短路电流 8.35 A,最大功率点电压 35 V,最大功率点电流 7.6 A。

设定仿真工作温度恒为 25℃,对每块光伏阵列进行光照设定,光照强度设定值如表 2,光照强度单位为 W/m^2 。

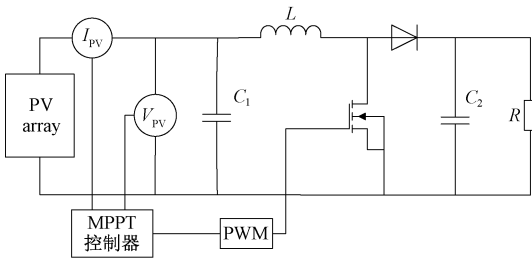


图 4 基于 Boost 电路的光伏发电系统结构

表 2 光照设置表

模式	Pv1	Pv2	Pv3	Pv4	Pv5
模式一	1 000	1 000	400	800	800
模式二	1 000	1 000	300	700	700
模式三	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
模式四	1 000	1 000	1 200	900	650

在 4 种模式下的仿真输出光伏阵列的 P-U 输出曲线,结果如图 5。

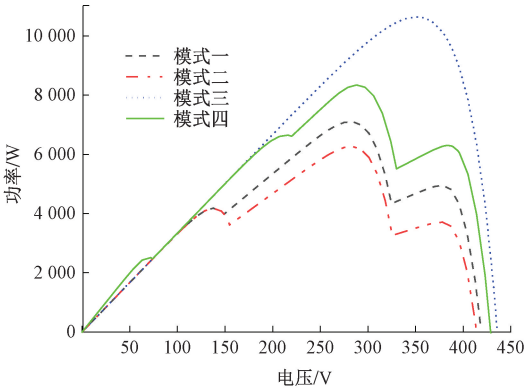


图 5 4 种模式下的 P-U 输出曲线

如图 5 所示,在 4 种模式下,模式一、二存在三个峰值;模式三为均匀光照只存在一个峰值;模式四存在 4 个峰值。

分别测试算法在单模式以及模式间切换的情况,进行仿真对比。将 4 种算法的种群数量设置为 7,最大迭代次数设置为 10,搜索上下限为[0.2,0.8],莱维指数取[0,2]之间的随机数,终止条件设置为达到最大迭代次数。

3.1 阴影恒定情况

当局部阴影恒定不变时,将工况温度设置为 25℃,光照强度采用模式一的所示的参数设置,此时光伏发电 P-U 输出曲线存在 3 个峰值,对 4 种算法进行多次实验,仿真结果如图 6。

由图 6 可以看出,在模式一的情况下,四种算法均能稳定下来找到最大功率点,而 ICOOT 算法稳定下来的速度最快,且在稳定前产生的功率震荡范围最小。

3.2 阴影变化情况

当局部阴影的光照强度发生变化时,将工况温度设定为 25℃,光照强度在 0~1 s 内采用模式一的所示参数;在

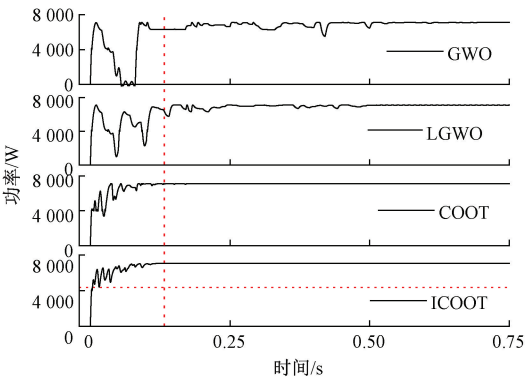


图 6 恒定阴影时的仿真结果图

1 s 时,阴影变化,光照强度设置为模式二,以此测试局部阴影发生变化的情况。多次实验,仿真结果如图 7。

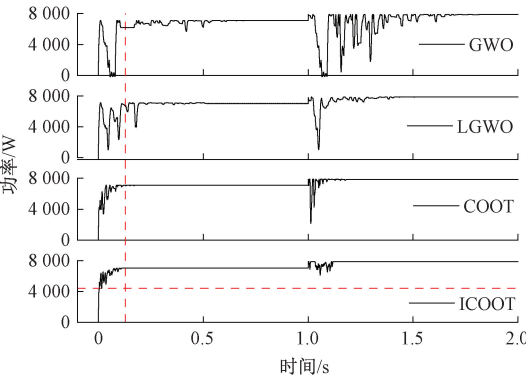


图 7 变化阴影时的仿真结果图

由图 7 可以看出,由模式一切换位模式二的情况,在设定时间范围内,4 种算法最终都能够稳定找到最大功率值,而从追踪时间和震荡范围来看,ICOOT 算法仍最优。

3.3 恒定光照突变为局部阴影情况

测试系统从恒定光照突变为四峰值局部阴影情况,将工况温度设定为 25 ℃,光照强度在 0~1 s 内采用模式三的所示参数;在 1 s 时,突变为局部阴影,光照强度设置为模式四,仿真结果图如图 8。

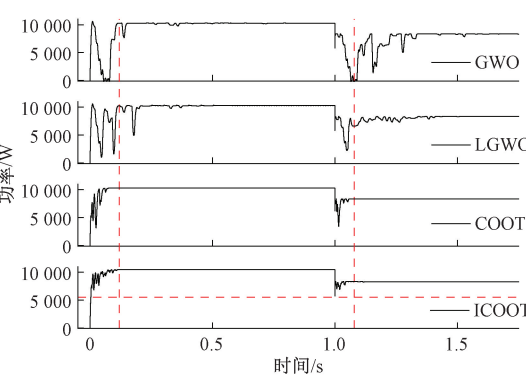


图 8 恒光照突变为局部阴影情况仿真结果图

由图 8 可以看出,在模式三和模式四的情况下,4 种算

法均能在设定时间范围内趋于稳定。从追踪时间来看,COOT 与 ICOOT 相差无大,但 ICOOT 算法的震荡范围更小。

3.4 结果分析

对四种算法在四种模式下的追踪速度进行记录,制作成表,表中数据单位为 s,结果如表 3 所示。

表 3 追踪时间结果表

模式	GWO	LGWO	COOT	ICOOT
模式一	0.62	0.52	0.23	0.14
模式二	1.72	1.43	1.21	1.13
模式三	0.65	0.47	0.11	0.13
模式四	1.73	1.53	1.10	1.07

将仿真所得数据进行图像可视化,四种算法在四种模式下的追踪时间对比如图 9 所示。其中模式二和模式四是 1 s 阴影突变后的结果,其追踪时间从 1 s 开始。

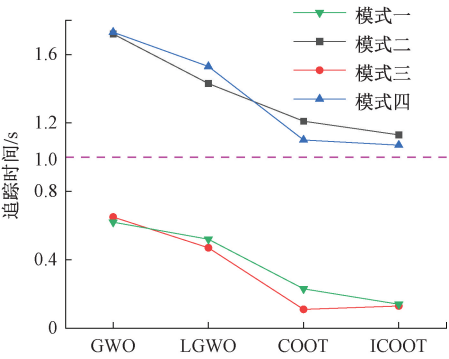


图 9 追踪时间对比图

从图 9 中可以看出,改进算法的追踪时间在模式一、二、四下均最短,而在模式三均匀光照下的追踪时间,略高于原算法,但仍保持低位,追踪速度仍然优秀。

采集计算 4 种算法在 4 种模式下的输出功率稳定值与输出功率均值。用如下公式来计算稳定率:

稳定率=输出功率均值 / 输出功率稳定值 (14)

稳定率越大,则表示系统震荡范围越小,系统输出越稳定。结果如表 4 所示。

表 4 稳定率结果表

模式	GWO	LGWO	COOT	ICOOT	%
模式一	96.60	97.48	99.01	99.43	
模式二	89.36	96.86	99.17	99.34	
模式三	93.77	95.40	98.34	98.73	
模式四	94.32	96.33	98.19	98.80	

同时将结果可视化为矩形图如图 10 所示。

如图 10 所示,其中用输出功率稳定值和输出功率均值

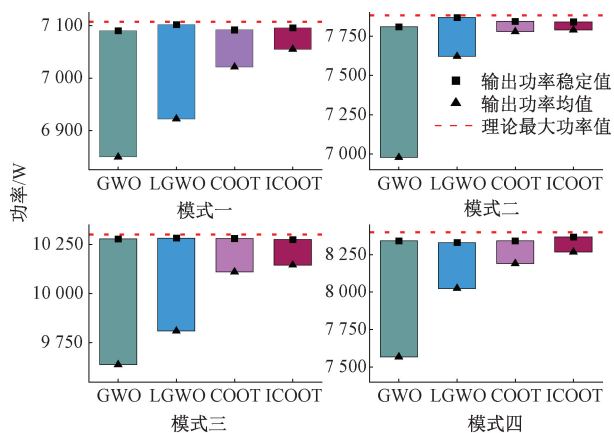


图 10 功率输出对比图

之间的差,即箱体高度,表示算法在寻优过程中产生的震荡大小。箱体高度越高,表示算法寻优产生震荡越大,越容易破坏系统的稳定性;而输出功率稳定值越靠近红色虚线,表示算法的追踪精度越高。

因此可以从图 10 可以看出,在四种模式下,所提改进算法在光伏系统局部阴影 MPPT 时,所产生的震荡最小,对系统稳定性的破坏最小。同时通过数据计算,四种算法在四种模式下的追踪精度均大于 99.3%,也证明对比数据的可行性。在这其中,改进算法在模式一、四的追踪精度最高,而在模式二、三的追踪精度和其余对比算法的结果几乎一致。

综合追踪速度和追踪精度来看,改进算法的效果更优,能够有效解决局部阴影光伏 MPPT 时,易于陷入局部最大功率点,而导致寻优速度慢、功率震荡大的问题。

4 结 论

该研究针对光伏发电局部阴影时的 MPPT,提出一种改进的 COOT 算法。将 Logistic-Sine-Cosine 混沌映射因子引入算法中,将种群的链式移动方式改进为混沌移动,使其具备跳出局部最优值的能力。其次,在每轮寻优结束后,对当前最优值引入柯西变异,对比新旧解的适应度而进对最优值进行择优选择,从而增强算法的全局搜索能力。通过上述仿真分析,相较 COOT 算法、GWO 算法、LGWO 算法,本文所提算法具有以下优点:

所提 ICOOT 算法在用于局部阴影多峰情况下能够有效减小寻优过程产生的功率震荡问题,限制震荡幅值,从而减小功率震荡对系统产生的影响。

所提 ICOOT 算法寻找全局最大功率点的速度更快。

所提 ICOOT 算法能够有效解决智能算法用于光伏系统局部阴影光伏发电时,易于陷入局部最大功率点,而导致寻优速度慢、功率震荡大的问题。

参考文献

[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.

[2] 朱拓斐,陈国定. 光伏发电中 MPPT 控制方法综述[J]. 电源技术,2011,35(10):1322-1324.

[3] 汤济泽,王丛岭,房学法. 一种基于电导增量法的 MPPT 实现策略[J]. 电力电子技术,2011,45(4):73-75.

[4] 王琳,阚加荣. 改进粒子群算法在光伏多峰值 MPPT 中的应用[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),2022,35(3):67-71.

[5] 欧阳名三,于浩. 基于松鼠算法的光伏最大功率点追踪研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2022,42(4):71-77.

[6] 赵斌,袁清,王力,等. 基于改进蚁狮算法的光伏多峰值 MPPT 控制[J]. 太阳能学报,2021,42(9):132-139.

[7] 郑旭彬,李梦达,梁智超,等. 局部遮荫下改进蝴蝶算法的 MPPT 控制仿真研究[J]. 计算机仿真,2022,39(1):96-101.

[8] 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.

[9] 张铁晟,张凤武,张明毅. 基于 LGWO 和扰动观察复合算法的 MPPT 研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2022,40(3):379-386.

[10] NARUEI I, KEYNIA F. A new optimization method based on COOT bird natural life model[J]. Expert Systems with Applications, 2021,183:115352.

[11] MEMARZADEH G, KEYNIA F. A new optimal energy storage system model for wind power producers based on long short term memory and coot bird search algorithm[J]. Journal of Energy Storage, 2021,44:103401.

[12] 陈晓华,王志平,吴杰康,等. 基于 COOT-SVM 的短期光伏发电功率预测[J]. 四川电力技术,2023:1-7.

[13] 张曦,高昕. 基于 COOT 算法的局部阴影下光伏阵列 MPPT 控制研究[J]. 机电信息,2023(16):13-16.

[14] 张立峰,陈达. 基于改进白骨顶鸡优化算法的 ECT 图像重建[J]. 计量学报,2023,44(11):1692-1698.

[15] 贾鹤鸣,李玉海,文昌盛,等. 改进白骨顶鸡优化算法的 WSN 网络覆盖[J]. 福建工程学院学报,2022,20(6):561-566.

[16] 杨永康,缪书唯. 基于 DE-GWO 算法的光伏系统 MPPT 仿真研究[J]. 电子测量技术,2022,45(7):75-81.

[17] 李成颖,张江,莫思特,等. 基于混合 ICS-PSO 算法的温差发电系统 MPPT 设计[J]. 电子测量技术,2023,46(18):76-84.

[18] 周雪莹,杜逆索,欧阳智. 基于柯西变异和差分进化的混沌白骨顶鸟算法[J]. 计算机科学,2023:1-18.

[19] HUA Z, ZHOU Y, HUANG H. Cosine-transform-based chaotic system for image encryption[J]. Information Sciences, 2019,480:403-419.

[20] 张赛男,李千目. 一种基于 Logistic-Sine-Cosine 映射的彩色图像加密算法[J]. 计算机科学,2022,49(1):353-358.

[21] 李爱莲,全凌翔,崔桂梅,等. 融合正余弦和柯西变异的麻雀搜索算法[J]. 计算机工程与应用,2022,58(3):91-99.

[22] 高文欣,刘升,肖子雅,等. 柯西变异和自适应权重优化的蝴蝶算法[J]. 计算机工程与应用,2020,56(15):43-50.

作者简介

瞿崎,硕士研究生,主要研究方向为光伏系统最大功率点追踪技术、光储直流微电网控制。

E-mail:13666284209@163.com

谭功全(通信作者),学士,教授,主要研究方向为控制理论与控制工程。

E-mail:1193715260@qq.com

庞宏杰,硕士研究生,主要研究方向为光伏发电量预测。

冯志强,硕士研究生,主要研究方向为逆变器控制。