DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.105 **中图分类号**：TM615 **文献标志码**：A

基于 Jaya 算法的遮阴条件下光伏 MPPT 控制研究

郭伟欣(中国电源学会会员)，张志东
(山西工程技术学院大数据与智能工程系，阳泉 045000)

摘要：针对光伏阵列在遮阴条件下群体启发式算法最大功率点跟踪 MPPT(maximum power point tracking)执行依赖于算法特定的参数设置，导致算法设计难度较大、追踪效率较低、追踪误差较大等问题，提出了基于 Jaya 算法实现遮阴条件下 MPPT 的追踪控制。该算法只需通用的控制参数，不需要任何特定的控制参数，且在迭代过程中，最大功率的解始终朝着最佳解移动，并且舍弃最坏解，避免陷入局部解的情况，使系统始终准确追踪最大功率，保持高效率的运行。在 MATLAB/Simulink 中搭建遮阴条件下光伏阵列仿真模型，将 Jaya 算法与传统 PSO、GA 算法在同一模型下进行对比分析，实验结果表明：在寻优过程中，采用 Jaya 算法，最大功率追踪时间最短、追踪误差及振荡最小。在光照强度突变时，同样可以重新准确、快速定位到全局最大功率点。

关键词：光伏阵列；遮阴条件；最大功率点跟踪；Jaya；寻优

Research on Photovoltaic MPPT Control under Shading Conditions Based on Jaya Algorithm

GUO Weixin, *Member*, *CPSS*, ZHANG Zhidong
(School of Big Data and Intelligent Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China)

Abstract: Aimed at the issue that the implementation of maximum power point tracking (MPPT) using group heuristic algorithms for photovoltaic arrays under shading conditions depends on algorithm-specific parameter settings, which leads to problems such as difficulty in the design of algorithms, a low tracking efficiency and large tracking errors, the tracking control of MPPT under shading conditions is implemented based on the Jaya algorithm. The proposed algorithm requires only general control parameters without any specific control parameters, and the solution of maximum power always moves towards the best solution during iterations. In addition, the worst solution is discarded to avoid local solutions, so that the system always tracks the maximum power accurately and maintains efficient operation. A simulation model of photovoltaic arrays under shading conditions is built in MATLAB/Simulink, and the Jaya algorithm is compared with traditional PSO and GA algorithms under the same model. Experimental results show that during the process of optimization, the use of the Jaya algorithm can track the maximum power in the shortest time while keeping the smallest tracking error and oscillation. At the same time, the global maximum power point can also be re-located accurately and quickly when the light intensity changes abruptly.

Keywords: Photovoltaic array; shading condition; maximum power point tracking (MPPT); Jaya; optimization

光伏发电具有污染小、成本低的优势，已经成为备受欢迎的可再生能源之一。然而，受太阳辐射和温度等生态环境变化的影响，光伏阵列在使用过程中的电压、电流会呈现多峰值特性，导致系统输出功率的特征曲线是非线性变化的[1-4]。因此，为了提高光伏阵列的输出功率，提出采用最大功率点跟踪 MPPT(maximum power point tracking)技术，使系统始终保持最优状态运行。

由于光伏系统输出功率特征曲线的非线性变化，传统的 MPPT 算法如扰动观察法 P&O(perturbation and observation method)、电导增量法 INC(inc-

收稿日期：2023-06-05；**修回日期**：2023-07-30，2023-09-30；
录用日期：2023-11-03；**网络首发日期**：2025-01-25

remental conductance)、爬山法 HC(hill climbing)等，已无法对该问题进行处理[5]。目前，光伏阵列的 MPPT 常采用基于群体的启发式算法[6-7]。基于群体的启发式算法可归纳为 2 大类：基于进化算法 EA (evolutionary algorithm)和基于群体智能 SI(swarm intelligence)的算法。常用的 EA 有：遗传算法 GA (genetic algorithm)[8]、进化策略 ES(evolutionary strategies)算法[9]、人工免疫算法 AIA(artificial immune algorithm)[10]等。常用的 SI 算法有：粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)算法[11]、蚁群优化 ACO(ant colony optimization)算法[12]、蝴蝶优化算法 BA(butterfly algorithm)[13]等。但所有基于 EA 和 SI 的算法，本质上是概率算法，都需要 2 种参数：一种是共同的控制参数，如群体规模、迭代次数等；另一种是算法特定的控制参数，如 GA 使用的突变概率、交叉概率、选择算子和 PSO 使用的惯性权重、认知权重、社会权重因子参数等。特定参数调优不当不仅会增加计算量，还会产生局部最优解，导致效率较低和精确跟踪速度较慢等问题，同时特定参数的设置也会给算法的设计增加难度。

为解决上述问题，本文提出 1 种相对简单且效率高、可实现精确追踪的 Jaya 算法。该算法只需要种群大小和迭代次数控制参数即可工作，简化了算法设计，减少了因调整特定算法参数而带来的测试麻烦。在迭代过程中，最大功率的解始终朝着最优解移动，并舍弃最坏解；在寻优过程中避免了局部解，使系统始终准确地跟踪最大功率，保持高效率运行。通过仿真实验，验证了该算法可以精确迅速追踪到最大功率点的可行性，且振荡小、性能良好。

1 光伏电池模型及问题表述

1.1 光伏电池模型

光伏电池的核心是 PN 结半导体，其等效单二极管电路如图 1 所示，由 1 个并联二极管、1 个 PN 结半导体模块和 2 个电阻(R_s、R_{sh})组成，2 个电阻分别串、并联在电路中。电路中电流源 I_{ph}(光伏电流)受光照强度和温度等影响，I_d 为二极管饱和电流，U 和 I 分别为光伏电池输出的电压和电流。根据基尔霍夫第一定律，可得输出电压和电流关系的表达式为

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \tag{1}$$

$$I_{ph} = \left[I_{sc} + k_i(T - T_{STC})\right] \cdot \frac{G}{G_{STC}} \tag{2}$$

$$I_d = I_0\left(e^{\left[\frac{q(U+IR_s)}{nKT}\right]} - 1\right) \tag{3}$$

式中：T 为光伏电池表面温度；T_{STC} 为标准测试条件下的温度；G 为当前光照强度；G_{STC} 为标准条件下的光照强度；I_{sc} 为标准条件下测得的短路电流；q 为单位电荷，q=1.6×10^{-9} C；k_i 为电流温度系数；I_0 为二极管反向饱和电流；n 为二极管的品质因数；K 为玻尔兹曼常数。

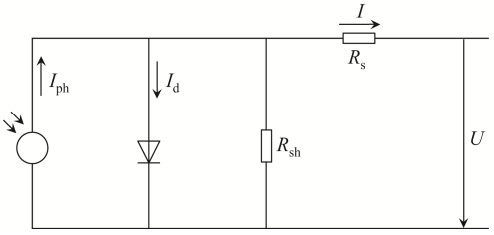
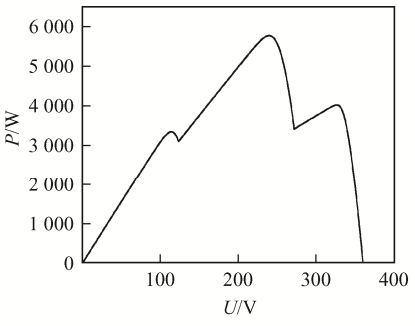


图 1 光伏等效单二极管电路

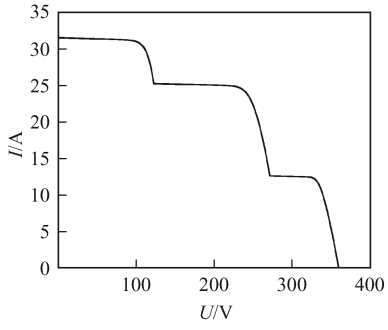
Fig. 1 Photovoltaic equivalent single-diode circuit

1.2 多峰值输出特性

本文以 5×1 光伏阵列为研究对象，5 个光伏电池串联构成。在遮阴条件下，可得出如图 2 所示的 *P-U* 曲线和 *I-U* 曲线。从图 2(a)可知，光伏阵列 *P-U* 曲线是非线性变化的，呈现多峰值状态，可得到多个功率最优解；从图 2(b)可知，*I-U* 曲线呈现阶梯



(a) *P-U*曲线



(b) *I-U*曲线

图 2　*P-U* 和 *I-U* 曲线

Fig. 2 *P-U* and *I-U* curves

状。因此，提高光伏输出功率的问题可转换为全局 MPPT 寻优，即寻找合适的电压电流关系，使功率最大化。

1.3 问题描述

目前 MPPT 寻优的方法主要是在光伏板之后安装 DC-DC 转换器，通过优化 MPPT 计算模块，实现对转换器的控制，以便最大限度地利用光伏板所产生的功率。因此，MPPT 的核心就是优化 MPPT 计算模块[14-15]。光伏 MPPT 架构如图 3 所示。优化 MPPT 计算模块主要是利用 I 和 U 之间的等式约束关系来获取最大功率点，其数学表达式为

$$\begin{cases} \max\limits_{I,U}[P(I,U)] \\ g(I,U)=0 \end{cases} \tag{4}$$

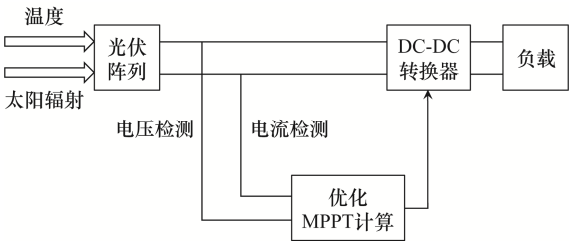


图 3　MPPT 的综合系统架构

Fig. 3 Integrated system architecture of MPPT

依据式(4)可推导出

$$\begin{cases} P(I,U)=I\cdot U \\ g(I,U)=I_{\mathrm{ph}}-I_0(\mathrm{e}^{\left[\frac{q(U+IR_{\mathrm{s}})}{nKT}\right]}-1)- \\ \qquad \dfrac{U+IR_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{sh}}}-I \end{cases} \tag{5}$$

优化 MPPT 计算模块主要思想是解决式(5)的优化问题。

2　Jaya 算法

为了演示 Jaya 算法，需先设定 1 个目标函数[16]，结合本文的研究内容，设定目标函数为 $P(X)$，且 $P(X)=P(I,U)$。基于该设定，所处理问题为求解目标函数的最大值，即 $\max P(X)=\max P(I,U)$。Jaya 算法基于持续改进的原理，不断提高解的质量，以寻找组合中最合适的电压电流关系(即 X)，使 $P(X)$ 最优。

Jaya 是 1 种元启发式优化算法，可用于解决优化问题。其种群由一系列个体组成，若种群规模为 m，则种群 N 可表示为

$$N=X_1, X_2, \cdots, X_m \tag{6}$$

式中，X_j 为种群 N 的第 j 个个体，$j\in[1,m]$。

每个个体由 n 个参数组成，这些参数称为个体变量，即

$$X_j=[X_{j,1}, X_{j,2}, \cdots, X_{j,n}] \tag{7}$$

式中，$X_{j,k}$ 为 X_j 的第 k 个个体变量，$k\in[1,n]$。

评估所有个体的适应度值，得到种群最优值的位置 X_{best} 和最优适应值 P_{best}、种群最差值的位置 X_{worst} 和最差适应值 P_{worst}。计算出种群中所有个体的目标函数值，将目标函数值最大的个体作为最优个体，记为 X_{best}；将目标函数值最小的个体作为最差个体，记为 X_{worst}。

Jaya 算法流程如图 4 所示，基于 Jaya 优化算法，简化流程设计，缩短追踪时间，其关键步骤如下。

步骤 1 种群的更新。依据 Jaya 优化算法更新个体位置，所有个体进行迭代更新后，便可得到新的种群。Jaya 优化算法的表达式为

$$\begin{aligned} X'_{j,k,i}=X_{j,k,i}&+r_{1,j,i}(X_{j,\mathrm{best},i}-\left|X_{j,k,i}\right|)- \\ &r_{2,j,i}(X_{j,\mathrm{worst},i}-\left|X_{j,k,i}\right|) \end{aligned} \tag{8}$$

式中：i 为迭代次数；$r_{1,j,i}$ 和 $r_{2,j,i}$ 是[0, 1]的随机数，

是影响算法收敛特性的关键特征，通过调整这 2 个参数的大小，可调整逼近最优解的能力，较大的设置有利于全局搜索，较小的设置有利于局部搜索；$r_{1,j,i}(X_{j,\text{best},i}-\left|X_{j,k,i}\right|)$ 表示将当前个体朝当前最优解的方向进行进化，$-r_{2,j,i}(X_{j,\text{worst},i}-\left|X_{j,k,i}\right|)$ 表示将当前个体朝远离当前最差解的方向进行进化。

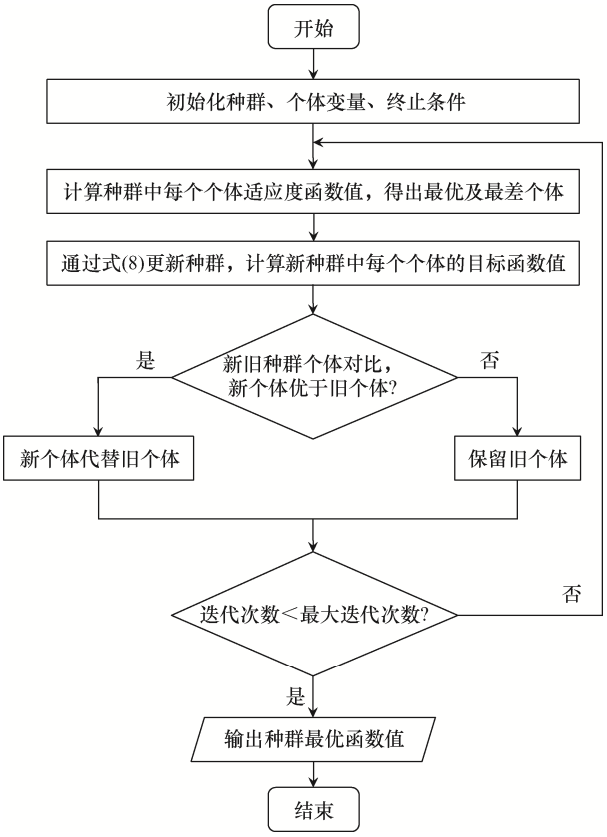


图 4 Jaya 算法流程

Fig. 4 Flow chart of Jaya algorithm

步骤 2 新种群的评估和替换。对比新旧种群个体，若新种群个体优于旧种群个体，则新个体替换旧个体，否则不替换。

步骤 3 检测迭代次数。若迭代次数大于最大迭代次数，则输出全局寻优结果最优目标函数值，否则返回评估所有个体适应度值处继续执行。

通过以上过程可知，在使用 Jaya 算法时，只需要设置通用的控制参数：种群大小、个体变量及最大迭代次数，不需要设置特定的控制参数。

3 仿真及结果分析

3.1 仿真实验

为了验证基于 Jaya 的算法在 MPPT 中的可行性，在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了 MPPT 电路仿真模型。光伏电池选用 1Soltech 1STH-215-P，每个光伏组件的内部参数为：开路电压 U_{oc}=36.3 V；短路电流 I_{sc}=7.84 A；最大功率电流 I_{m}=7.35 A；最大功率电压 U_{m}=29 V；最大功率 P_{m}=213.15 W。仿真时，光伏阵列温度固定为 25 ℃。遮阴条件下，光照强度分别设置为 1 000、1 000、400、800、800 W/m^2，最大功率目标值为 5 761 W；0.5 s 后，光伏阵列去除遮阴，光照强度突变为 1 000、1 000、500、900、900 W/m^2，最大功率目标值为 6 343 W。图 5 为 Jaya 算法的仿真模型，PSO、GA 与 Jaya 算法仿真模块只有 MPPT 模块不同。3 种算法的共同参数种群数量均设为 n_i=8 (i=1, 2, 3, 4)且最大迭代次数为 20，其他特定参数见表 1。

3.2 结果分析

通过仿真实验得出结果如图 6~图 9 所示。为了方便对仿真结果进行分析，列出了仿真性能比较，见表 2。从图 6 及表 2 可知，在遮阴条件下，用 PSO 算法进行 MPPT，可追踪最大功率值为 4 515 W，追踪精度为 78.37%，与最大功率目标值相差 1 246 W，追踪时间为 0.38 s，追踪过程会陷入局部最优的情况；在光照强度突变时，MPPT 追踪时间增加了 0.32 s，追踪过程同样会陷入局部最优的情况，光照强度变化前后的曲线振荡皆较大。

如图 7 所示，相比 PSO 算法的 MPPT，GA 算法在进行 MPPT 时，可追踪最大功率值为 5 055 W，追踪精度提高至 87.75%，追踪最大功率值与最大功率目标值相差 706 W，且追踪时间快了 0.1 s，但 GA 算法在追踪过程中同样会陷入局部解情况，光照强度变化前后的曲线振荡皆较大。由此可得出，PSO 算法、GA 算法存在陷入局部最优解情况。

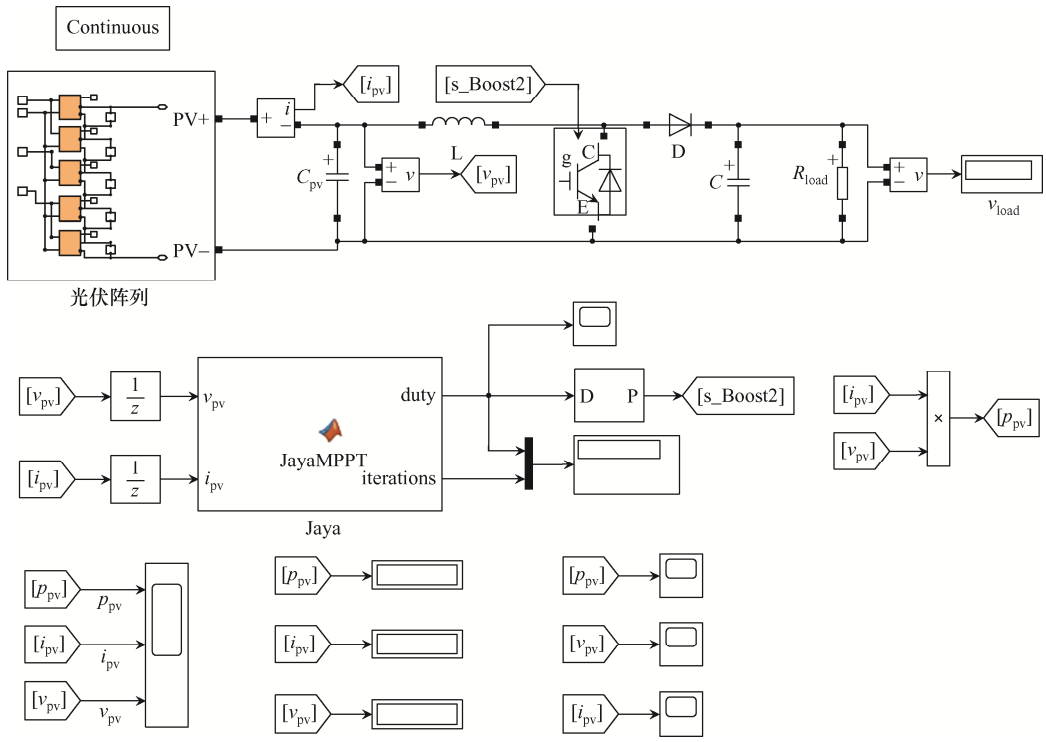


图 5　Jaya 算法的仿真模型

Fig. 5 Simulation model of Jaya algorithm

表 1　算法特定参数设置

Tab. 1 Algorithm-specific parameter settings

算法	特定参数设置
PSO	c_1=1.2、c_2=2.0、w=0.4
GA	P_c=0.5、p_m=0.1
Jaya	—

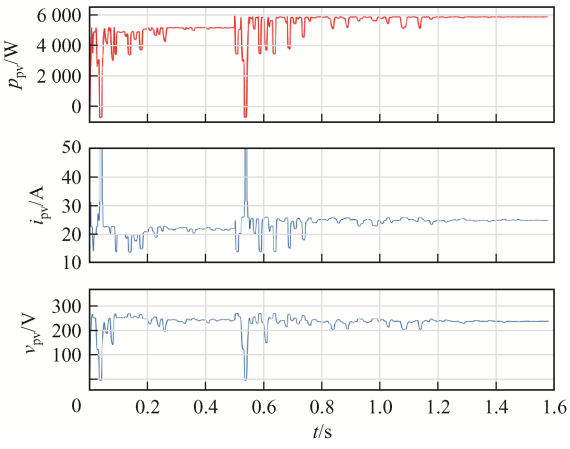


图 6　遮阴条件下 PSO 算法的 MPPT 仿真

Fig. 6 MPPT simulation using PSO algorithm under shading conditions

从图 8 及表 2 可知，运用 Jaya 算法进行 MPPT 优势较为明显，其追踪的最大功率值为 5 669 W，

表 2　性能比较

Tab. 2 Comparison of performance

条件	算法	追踪功率/W	最大功率目标值/W	目标值与追踪功率差值/W	追踪时间/s	追踪精度/%	振荡情况
遮阴	PSO	4 515		1 246	0.38	78.37	振荡大
	GA	5 055	5 761	706	0.28	87.75	振荡大
	Jaya	5 699		62	0.15	98.92	微振荡
未遮阴	PSO	5 121		1 222	0.70	—	—
	GA	5 574	6 343	769	0.27	—	—
	Jaya	6 289		62	0.12	—	—

追踪精度可达 98.92%，比 PSO、GA 算法分别提高了 20.55 和 11.17 个百分点，追踪时间分别快了 0.23 s 和 0.13 s，且追踪过程中振荡明显减小；在光照强度突变后，仍可保持该状态，快速、准确地进行 MPPT 追踪。从图 9 可知，以参数 $r_{1,j,i}$ 为例，Jaya 算法在运行过程中，会自动根据解的运行情况进行参数修整，使参数值产生看似无规律的运动轨迹，快速稳定在最优值附近。由此可见，Jaya 算法在 MPPT 追踪过程中，无需特定参数，可以避免局部解，可寻找到全局最优功率点，且用时短，振荡

情况良好。

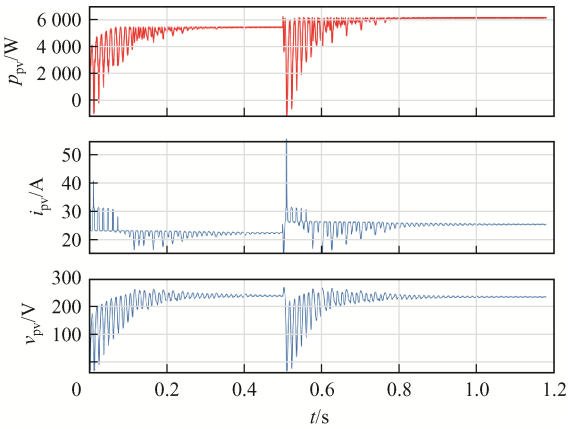


图 7 遮阴条件下 GA 算法的 MPPT 仿真

Fig. 7 MPPT simulation using GA algorithm under shading conditions

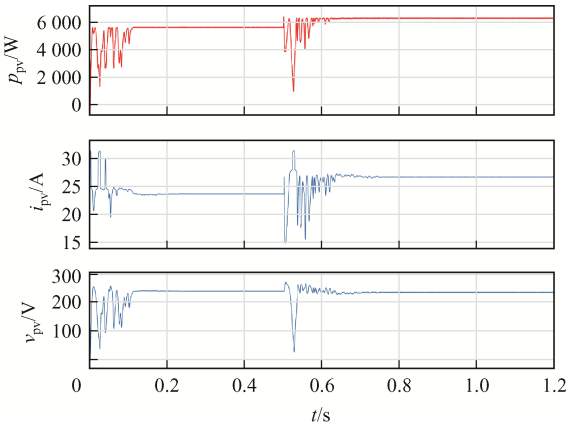


图 8 遮阴条件下 Jaya 算法的 MPPT 仿真

Fig. 8 MPPT simulation using Jaya algorithm under shading conditions

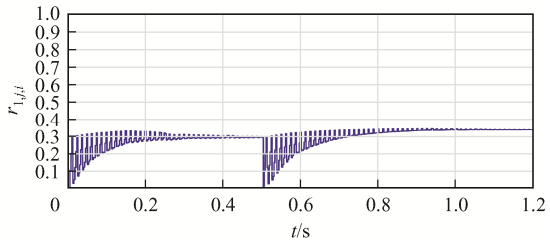


图 9 Jaya 算法参数 $r_{1,j,i}$ 优化过程波形

Fig. 9 Waveform of parameter $r_{1,j,i}$ in Jaya algorithm during optimization process

4 结语

本文基于 Jaya 算法实现了遮阴条件下光伏阵列的 MPPT，该算法只需要设定通用的控制参数，就可解决基于 EA 和 SI 的算法在迭代过程中依赖特定参数调优的问题，确保了算法的有效性。Jaya 算法在迭代的过程中，MPPT 的解始终向最优解靠拢，同时舍弃最坏解，避免了陷入局部解的情况，使系统始终准确地追踪最大功率，保持高效率运行。同时，Jaya 算法减少了算法特定参数调优环节，简化了算法的设计，加快了追踪速度。通过在 MATLAB/Simulink 中用同一模型进行仿真，与 PSO、GA 算法仿真结果相比，Jaya 算法在遮阴条件下处理 MPPT 的追踪时间最短，追踪功率误差最小，且在追踪过程中，振荡较小，追踪更稳定。在光照强度变化时，仍可以实现快速准确追踪，追踪效果不变。因此，基于 Jaya 算法在遮阴条件下 MPPT 的追踪控制更具有优越性。

参考文献：

[1] 田政卿, 张勇, 刘向, 等. 光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 239-247.
Tian Zhengqing, Zhang Yong, Liu Xiang, et al. Effects of photovoltaic power station construction on terrestrial environment: Retrospect and prospect [J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 239-247. (in Chinese)

[2] Bag A, Subudhi B, Ray P K. An adaptive sliding mode control scheme for grid integration of a PV system [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2018, 3(4): 362-371.

[3] Hamidi F, Olteanu S C, Popescu D, et al. Model based optimisation algorithm for maximum power point tracking in photovoltaic panels [J]. Energies, 2020, 13 (18): 4798.

[4] 李琼, 吴文宝, 刘斌, 等. 基于迁移学习的光伏组件鸟粪覆盖检测[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 233-237.
Li Qiong, Wu Wenbao, Liu Bin, et al. Bird droppings coverage detection of photovoltaic module based on transfer learning [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(2): 233-237. (in Chinese)

[5] 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.

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. (in Chinese)

[6] Bansal J C, Singh P K, Pal N R. Evolutionary and Swarm Intelligence Algorithms [M]. Switzerland: Springer Cham, 2019.

[7] Díaz D, Valledor P, Ena B, et al. Improved method for parallelization of evolutionary metaheuristics [J]. Mathematics, 2020, 8(9): 1476.

[8] Syafrudin M, Alfian G, Fitriyani N L, et al. A self-care prediction model for children with disability based on genetic algorithm and extreme gradient boosting [J]. Mathematics, 2020, 8(9): 1590.

[9] 公茂果, 高原, 王炯乾, 等. 基于进化策略的自适应联邦学习算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(3): 437-453.

Gong Maoguo, Gao Yuan, Wang Jiongqian, et al. Adaptive federated learning algorithm based on evolution strategies [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2023, 53(3): 437-453. (in Chinese)

[10] 张春黎. 基于人工免疫算法和蚁群算法的协同控制方法研究[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2022, 34(3): 69-73.

Zhang Chunli. Research on the cooperative control method based on artificial immune algorithm and ant colony algorithm [J]. Journal of Henan University of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 34(3): 69-73. (in Chinese)

[11] 梁明玉, 蔡新红, 赵咪. 基于改进粒子群算法的光伏系统 MPPT 控制研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(10): 133-139, 153.

Liang Mingyu, Cai Xinhong, Zhao Mi. Research on MPPT control of photovoltaic system based on improved particle swarm optimization [J]. Computer Simulation, 2021, 38(10): 133-139, 153. (in Chinese)

[12] Deng Wu, Xu Junjie, Zhao Huimin. An improved ant colony optimization algorithm based on hybrid strategies for scheduling problem [J]. IEEE Access, 2019, 7: 20281-20292.

[13] 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.

Zheng Xubin, Li Mengda, Liang Zhichao, et al. MPPT control strategy of improved butterfly algorithm under partial shading [J]. Computer Simulation, 2022, 39(1): 96-101. (in Chinese)

[14] 刘聘凭，程若发，许立斌，等. 基于光伏 MPPT 采样电流的自适应变步长 INC 算法[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 58-66.

Liu Pinping, Cheng Ruofa, Xu Libin, et al. Adaptive variable-step INC algorithm based on PV MPPT sampling current [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 58-66. (in Chinese)

[15] Abdel-Rahim O, Wang Haoyu. A new high gain DC-DC converter with model-predictive-control based MPPT technique for photovoltaic systems [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(2): 191-200.

[16] Dash S K, Ray P K. Power quality improvement utilizing PV fed unified power quality conditioner based on UV-PI and PR-R controller [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2018, 3(3): 243-253.



郭伟欣

作者简介：

郭伟欣(1994—)，男，中国电源学会会员，通信作者，硕士，助教。研究方向：电力系统自动控制研究。E-mail：1050140102@qq.com。

张志东(1979—)，男，硕士，副教授。研究方向：智能控制，大数据技术及应用。E-mail: zhangzhidong@sxgcjsxy7.wecom.work。

(责任编辑：郭凯凯)