

基于APSO算法的局部阴影下光伏最大功率跟踪研究

殷梅¹, 叶明月², 宋景利², 薛卫星²

(1. 中原新华水利水电投资公司, 河南 郑州 450016; 2. 河南至坚智慧新能源有限公司, 河南 郑州 450018)

摘要: 针对传统的最大功率点追踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 算法在局部阴影条件下易陷入局部最优以及粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 存在的收敛速度慢和易陷入局部最优等问题, 提出一种基于自适应粒子群优化 (Adaptive Particle Swarm Optimization, APSO) 算法的复合 MPPT 方法。在 APSO 中, 初始化阶段使用拉丁超立方抽样代替随机初始化, 使用自适应惯性权重策略来平衡算法的探索 and 开发, 在提高算法收敛速度的同时, 避免陷入局部最优解。通过仿真实验证明该算法在局部阴影下能够跳出局部最优, 快速收敛到最大功率点处, 与 LPSO、PSO 算法进行对比, 所提算法具有更快的追踪速度、更高的追踪效率和更强的鲁棒性。

关键词: 最大功率点追踪; 局部阴影; 拉丁超立方抽样; 自适应惯性权重; APSO

Research on photovoltaic maximum power tracking under local shadow based on APSO algorithm

YIN Mei¹, YE Mingyue², SONG Jingli², XUE Weixing²

(1. Central Plains Xinhua Water Resources and Hydropower Investment Company, Zhengzhou 450016, China;

2. Henan Zhijian Wisdom New Energy Co., Ltd., Zhengzhou 450018, China)

Abstract: The traditional Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm is easy to fall into the local local optimum under the local shadow condition, and the Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO). In this paper, a composite MPPT tracking method based on Adaptive particle swarm optimization (APSO) is proposed. In APSO, Latin hypercube sampling is used to replace random initialization, and adaptive inertial weight strategy is used to balance the exploration and development of the algorithm, so as to improve the convergence speed of the algorithm and avoid falling into the local optimal solution. Through simulation experiments, the proposed algorithm can jump out of the local optimal under the local shadow and quickly converge to the maximum power point. Compared with LPSO and PSO algorithms, the proposed algorithm has faster tracking speed, higher tracking efficiency and stronger robustness.

Keywords: maximum power point tracking; local shadow; latin hypercube sampling; adaptive inertia weight; APSO

0 引言

近年来, 各行各业对可再生能源的需求显

著上升, 其中太阳能是使用最广泛的能源之一。光伏 (Photovoltaic, PV) 系统能将太阳能转化

为可用的电能。PV的关键技术是在不同的环境和局部条件下有效提取最大功率。部分遮光不仅会对光伏阵列产生不利影响，也会减少整个光伏系统的总输出功率。最大功率点跟踪技术（MPPT）是提高系统性能的关键技术，确保光伏系统的工作点保持在最大功率点附近。传统的MPPT方法，如恒定电压法、电导增量法（INC）、扰动观察法和滞环比较法等主要适用于具有单峰输出特性的光伏阵列^[1-2]。随着智能算法的不断发展和应用，不断有学者用智能算法来进行最大功率跟踪。

文献[3]提出一种改进PSO算法的光伏发电MPPT控制，采用惯性权重自适应调整、飞行速度动态钳位和迭代周期动态更新的改进型粒子群优化算法，对光伏阵列输出调节电路实施控制。MATLAB仿真结果表明，与常规扰动观察法、基本粒子群优化算法相比，该算法在静态与动态的局部遮阴工况下均能获得较高的最大功率点跟踪准确度，且缩短了近50%的跟踪时间，提高了光伏阵列的发电效率。文献[4]提出一种改进天鹰算法的光伏MPPT控制，通过引入混沌映射改进初始化种群，将占空比作为控制变量，从而实现MPPT控制。仿真结果表明，和原始算法相比，改进天鹰算法在MPPT应用的基础上，显著提升了收敛速度和收敛准确度，同时提高了发电效率。

为了进一步提高粒子群优化算法的全局搜索能力，更好地对光伏最大功率点进行跟踪，本文提出了一种基于自适应粒子群优化（APSO）算法的局部阴影下的光伏最大功率点跟踪方法。算法初始化阶段使用拉丁超立方抽样代替随机初始化，使用自适应惯性权重策略来平衡算法的探索 and 开发，在提高算法的收敛速度同时，避免陷入局部最优解。

1 光伏组件原理及特性

1.1 光伏电池数学模型

光伏组件的等效电路模型如图1所示^[5]。

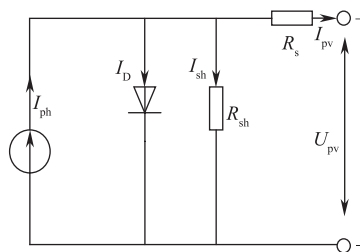


图1 光伏组件等效模型

Fig. 1 Equivalent model of PV modules

由基尔霍夫电流定律计算，电阻 R_s 的光伏输出电流 I_{pv} 为

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh}$$

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

式中， U_{pv} 和 I_{pv} 分别为单体光伏电池的输出电压与输出电流； I_{ph} 为光生电流； q 为二极管电荷； I_0 为二极管反向饱和电流； R_{sh} 和 R_s 分别为并联电阻和串联电阻； k 为玻耳兹曼常数， $k=1.35 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； A 为PN结特性因子； T 为当前光伏电池的温度。

1.2 光伏组件输出特性

根据文献[6]可知，峰值点的个数与串联光伏板个数有关，即几个光伏板串联，最多就有几个峰值点。在MATLAB 2021a/Simulink中搭建 5×1 光伏阵列模型并进行分析，光伏阵列结构示意图如图2所示，光伏组件参数为：最大输出功率 $P_m=200.27 \text{ W}$ ；最大功率点电压 $U_m=27.21 \text{ V}$ ；最大功率点电流 $I_m=7.36 \text{ A}$ ；开路电压 $U_{oc}=32.72 \text{ V}$ ；短路电流 $I_{sc}=7.86 \text{ A}$ 。

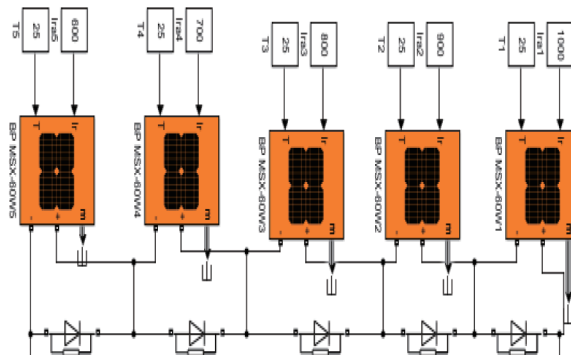


图2 光伏阵列结构图

Fig. 2 Photovoltaic array structure diagram

本文实验设置三种条件光照情况，环境温度都为25℃。模式1：PV1~PV5光照强度均为1 000 W/m²；模式2：PV1光照强度为1 000 W/m²，PV2、PV3光照强度为800 W/m²，PV4、PV5光照强度为600 W/m²；模式3：PV1光照强度为1 000 W/m²，PV2光照强度为900 W/m²，PV3光照强度为800 W/m²，PV4光照强度为700 W/m²，PV5光照强度为600 W/m²。三种模式下光伏阵列输出特性仿真曲线如图3所示。

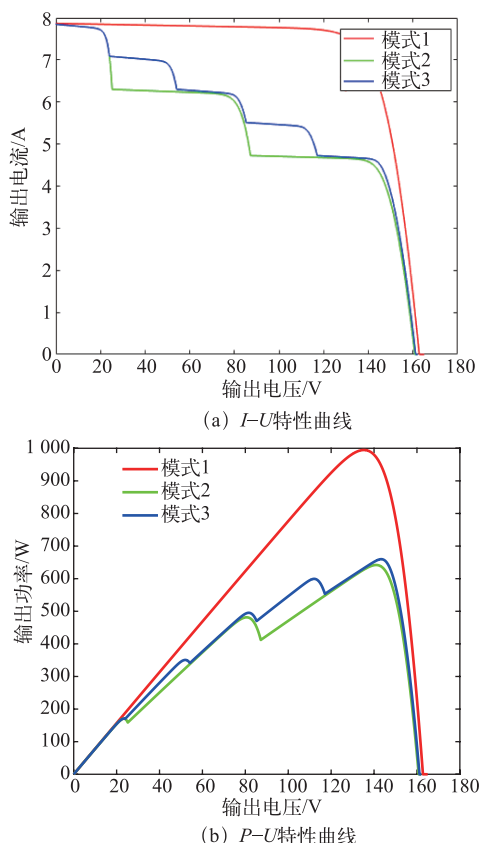


图3 三种条件下光伏阵列输出特性仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of output characteristics of photovoltaic arrays under three conditions

由图3可知，当光伏阵列光照不均匀时，输出特性曲线将出现多个极值点；当光伏阵列光照为模式2时，其P-U特性曲线有3个峰值点，I-U特性曲线呈三阶梯形状；当光伏阵列光照为模式3时，其P-U特性曲线有5个峰值点，I-U特性曲线呈五阶梯形状。综上可知，当光伏阵列处于不同光照情况时，其功率特性曲线的峰值数量也不同。由文献[7]，传统的MPPT算法由于其搜索机

制的限制，将陷入局部峰值点（Local Maximum Power Point, LMPP），无法准确跟踪到全局最大峰值点（Global Maximum Power Point, GMPP），因此需要研究一种适用于局部遮阴的光伏MPPT控制算法。

2 自适应粒子群算法在MPPT中的应用

2.1 PSO算法

PSO算法模拟鱼群和鸟类在自然界中的群聚行为，使用了群体智能的行为^[8]。

在PSO算法中，在d维目标函数空间中随机成一群粒子表示可能解，每个粒子i的位置为 $X_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^d]$ ，速度为 $V_i = [v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^d]$ ，根据目标函数设置粒子的维度、速度和位置的范围。在算法执行过程中，粒子i的速度和位置更新公式为

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 \times \text{rand}_1 \times [p_{\text{Best}}(t) - X_i(t)] + c_2 \times \text{rand}_2 \times [n_{\text{Best}}(t) - X_i(t)] \quad (2)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t) \quad (3)$$

式中， c_1 和 c_2 为加速度系数； rand_1 和 rand_2 为在[0,1]之间的随机数； p_{Best} 为个体最优位置； n_{Best} 为种群最优位置。

2.2 SPSO算法

PSO算法初始化阶段使用拉丁超立方抽样（Latin Hypercube Sampling, LHS）代替随机初始化，使用自适应惯性权重策略来平衡算法的探索 and 开发，提高算法的收敛速度，同时避免陷入局部最优解。

(1) LHS

LHS是一种在多维空间内进行均匀采样的方法，用于在给定参数空间内生成一组尽可能均匀且尽可能少重复的样本^[9]。

APSO算法中采用在区间(0,1)中均匀分布的LHS来初始化种群位置，即

$$X(i) = (\text{ub} - \text{lb}) \times \text{lhs}(1, d) + \text{lb} \quad (4)$$

式中，lhs为基于拉丁超立方抽样函数返回一个 $1 \times d$ 的矩阵。

假设种群数量为30，维数为2，模拟随机初

始化种群和LHS初始化种群进行对比。图4a为随机初始化的种群分布图，图4b为LHS初始化的种群分布图。对比可知，随机初始化生成的种群个体较聚集，种群多样性低，容易出现相近且低质量的解；而LHS初始化生成的种群均匀程度和覆盖性较高，初始化种群的质量更高。

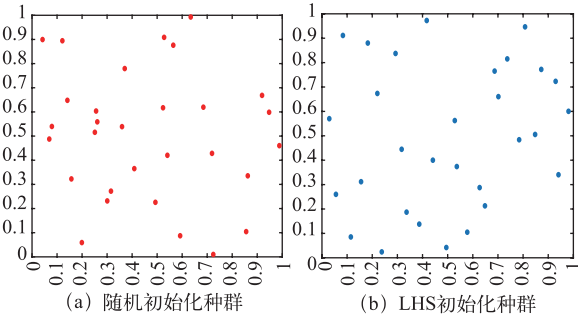


图4 初始化种群对比

Fig. 4 Comparison of initial populations

LHS的全覆盖性和等概率抽样特性使得抽样产生的样本比随机抽样产生的样本更均匀。因此，将LHS用于算法的种群初始化，能有效避免种群在初始化阶段陷入局部最优解。种群的初始分布增加了探索和搜索空间的区域，提高了算法的执行效率。

(2) 自适应惯性权重

为了更好地平衡改进算法的全局搜索能力和局部开发能力，在全局搜索阶段引入自适应惯性权重，算法初期较大的惯性权重可以避免算法陷入局部最优解；后期较小的惯性权重能够提高算法的收敛能力。自适应惯性权重 ω 的公式为

$$\omega(t) = \omega_{\max} - t(\omega_{\max} - \omega_{\min}) / T \quad (5)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \omega(t)V_i(t) \quad (6)$$

式中， T 为最大迭代次数； $\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 分别为惯性权重的上下限。

2.3 APSO算法优化流程

粒子位置 $X_i(t)$ 代表系统控制电路开关器的占空比，粒子的适应度为光伏电池的输出功率，算法最终跟踪最优位置为 n_{Best} 。算法迭代步骤如下。

1) 使用式(4)初始化粒子位置，该式能使粒子更加均匀地分布在目标空间中。

2) 计算每个粒子适应度函数值，得出 p_{Best} 和 n_{Best} 。

3) 通过式(5)更新粒子惯性权重系数。

4) 通过式(2)和式(6)更新粒子速度和位置，并判断是否超出范围，计算适应度函数值得出 p_{Best} 和 n_{Best} 。

5) 重复以上步骤，直至算法迭代结束。

3 仿真结果分析

3.1 仿真模型

为了验证本文算法对局部遮阴光伏最大功率跟踪控制的有效性和可行性，对APSO、LPSO和PSO进行对比实验，在MATLAB/Simulink上搭建了光伏系统模型，如图5所示。

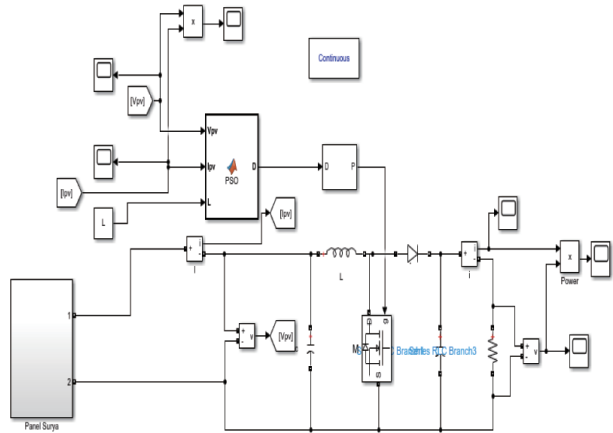


图5 MPPT控制系统仿真图

Fig. 5 MPPT control system simulation diagram

3.2 仿真参数设置

通过对算法进行仿真测试可知，不同的 c_1 、 c_2 、lb、ub、 $\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 对光伏MPP的追踪速度和准确度有一定影响，各算法的最终参数设置见下表。

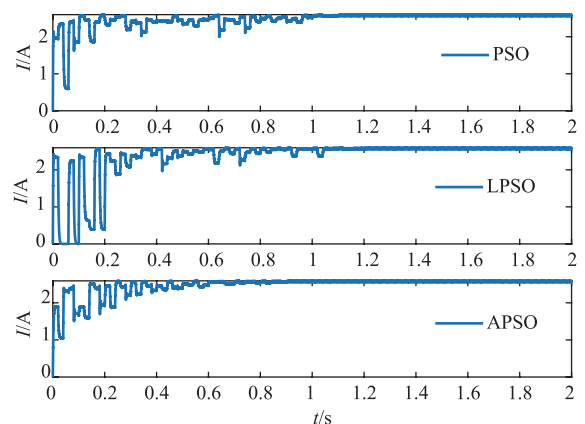
表 不同算法仿真参数设置

Tab. Different algorithm simulation parameter settings

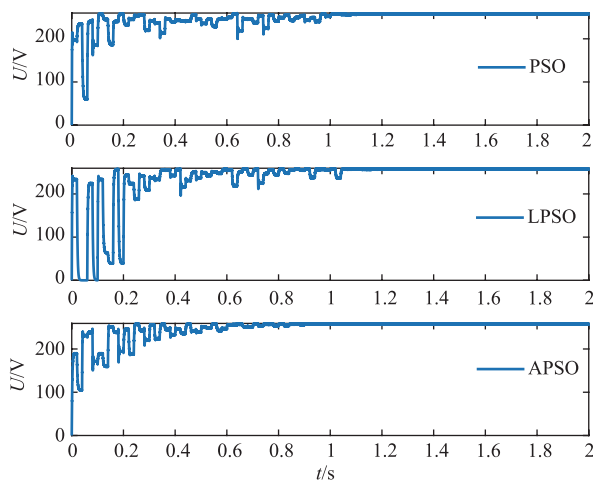
算法	参数
PSO	$T=30, N=5, c_1=1, c_2=1.6, lb=0.1, ub=0.6$
LPSO	$T=30, N=5, c_1=1, c_2=1.6, lb=0.1, ub=0.6$
APSO	$T=30, N=5, c_1=1, c_2=1.6, \omega_{\min}=0.3, \omega_{\max}=0.5, lb=0.1, ub=0.6$

3.3 局部阴影下功率追踪

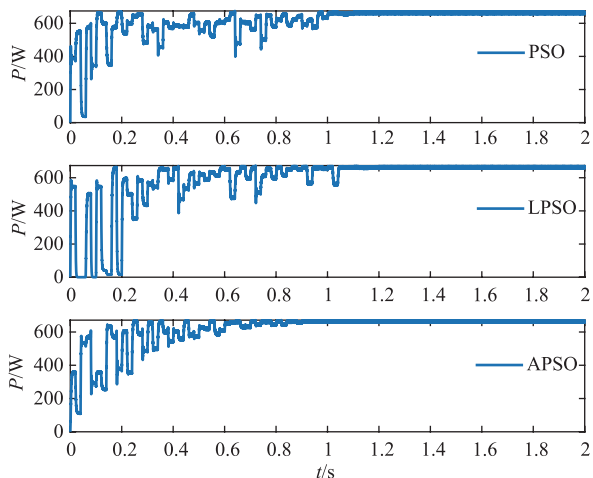
将三种算法在阴影条件模式3的工况下进行仿真对比, 追踪对比图如图6所示。



(a) 模式3下电流追踪图



(b) 模式3下电压追踪图



(c) 模式3下功率追踪图

图6 模式3下追踪图

Fig. 6 Trace plot in mode 3

由图6可知, 在搜索的初期, 三种算法都剧烈的抖动, 这是因为算法随机初始化进行搜索, 可能会在解空间中发生剧烈波动, 导致搜索路径出现抖动。三种算法在模式3下, 均能追踪到MPP附近, 其中APSO算法在追踪速度和准确度方面均优于其余两种算法。PSO算法虽然能追踪到全局最大功率点, 但是其收敛速度较慢, 而且在收敛之前一直伴随着较大的功率振荡。PSO算法在1.1 s寻找到最大功率点, 其最大输出功率为667 W; LPSO算法的光伏阵列在1.04 s时寻找到最大功率点, 其最大输出功率约为667 W; APSO算法在0.91 s寻找到最大功率点, 其最大输出功率为667 W。综上所述, 在条件3下, APSO算法追踪速度明显高于其他两种算法。

4 结束语

在固定光照环境下, 光伏阵列的输出曲线呈现单峰特性, 传统的MPPT方法能够对最大功率点进行追踪。但是实际工作环境中, 由于受到外部环境变化的影响, 光伏阵列输出特性曲线呈现多峰特性, 此时传统的MPPT方法容易陷入局部最优解。为了更好地对最大功率点进行追踪, 本文提出了基于APSO算法的局部阴影下的MPPT方法, 通过仿真实验结果得到如下结论。

1) 对比LPSO算法和PSO算法, APSO算法在模式3局部阴影下, 能够快速准确地收敛到最大功率点, 且全程保持较小的功率振荡。

2) 对于大规模光伏电站来说, 如何提高光伏系统的功率追踪效率十分重要。因此, 需要光伏从业者和研究者们在未来进行进一步的研究和探索。

3) 智能算法能够有效地提高光伏功率的追踪, 在后续研究工作中考虑传统的MPPT与智能算法相融合的方法对光伏功率进行追踪, 以求在最短时间内追踪到最大功率点。

参考文献

- [1] 张波. 光伏发电最大功率跟踪及并网运行控制策略研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2021.

- [2] 张鹏. 局部遮阴情况下光伏阵列最大功率点跟踪技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [3] 方胜利, 朱晓亮, 马春艳, 等. 局部遮荫下基于改进PSO算法的光伏发电MPPT控制[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2024, 38(1): 54-59.
- [4] 潘海鹏, 吴小峰, 雷美珍. 基于改进狮群算法的最大功率跟踪控制研究[J]. 软件工程, 2023, 26(10): 5-10.
- [5] 欧阳名三, 周杰. 基于HPO-IP&O算法的光伏MPPT控制研究[J/OL]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 1-10[2024-08-10].
- [6] 李强, 刘文华, 雷奇. 基于IBFA的局部阴影下光伏最大功率点追踪研究[J]. 电气开关, 2023, 61(3): 82-86.
- [7] 谢承峰, 明月. 不均匀光照下光伏阵列输出特性建模分析[J]. 大学物理实验, 2024, 37(2): 112-115.
- [8] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]. Proceedings of ICNN' 95 - International Conference on Neural Networks, IEEE, 1995.
- [9] 詹楷杰, 蔡茂国, 洪广杰, 等. 基于LHS和正余弦搜索的阿基米德优化算法[J]. 计算机与现代化, 2024(6): 38-42, 58.

作者简介

殷梅 (1987—), 女, 工程师, 研究方向为新能源。

(收稿日期: 2024-09-03)