

基于改进多元宇宙优化算法的光伏系统最大功率点跟踪

吴忠强* 曹碧莲 侯林成 胡晓宇 马博岩

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

摘要: 在局部遮蔽条件下, 光伏阵列的功率输出曲线呈现多峰特性, 传统控制算法无法持续准确地跟踪最大功率输出点, 该文提出一种基于改进多元宇宙优化(MVO)算法跟踪全局最大功率点的方法(IMVO)。引入螺旋更新和自适应压缩因子, 增强了算法的全局搜索能力; 改变旅行距离率的更新方式, 加快了算法的收敛速度, 3方面改进有效提高了算法的寻优能力。仿真结果表明: 在均匀光照、局部遮蔽和变光照强度3种条件下, 改进多元宇宙优化算法均能持续稳定地跟踪最大功率点, 在收敛时间和收敛精度上均有较大提高, 由此验证了该算法在最大功率点跟踪控制中的可行性。

关键词: 光伏系统; 最大功率点跟踪; 局部遮蔽; 多元宇宙优化算法

中图分类号: TN911.7; TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)12-3735-08

DOI: 10.11999/JEIT200599

Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System Based on Improved Multi-Verse Optimization

WU Zhongqiang CAO Bilian HOU Lincheng HU Xiaoyu MA Boyan

(Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The power output curve of the photovoltaic array exhibits multi-peak characteristics under partial shading conditions, and the traditional control algorithm can not track the maximum power point continuously and accurately. A method for tracking the global maximum power point based on the Improved Multi-Verse Optimization (IMVO) algorithm is proposed. Spiral update and adaptive compression factor are introduced to enhance the algorithm's global search capability. Travelling distance rate update method is changed, and the convergence speed of algorithm is accelerated, so the optimization ability of the algorithm is improved. The simulation results show that the improved Multi-Verse Optimization (MVO) algorithm can track the maximum power point continuously and stably under the three conditions of uniform irradiance, partial shading and variable irradiance, and the convergence time and convergence accuracy are greatly improved, thus the feasibility of the algorithm is verified in the maximum power point tracking control.

Key words: Photovoltaic system; Maximum power point tracking; Partial shadow; Multi-Verse Optimization (MVO)

1 引言

太阳能是一种可再生能源, 全球有丰富的蕴含量, 光伏发电前景广阔^[1,2]。在光伏发电过程中, 如何提高发电效率, 降低成本, 是光伏发电产业化的重点, 因此精确且快速地实现光伏系统的最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT), 进而提高发电效率是十分必要的^[3-5]。

光伏电池板在光照相同时, 其功率、电压特性曲线呈现单峰特性, 传统的扰动观察法(Perturb & Observe, P&O)^[6]、增量电导法(INcreases Conductance, INC)^[7]和爬山法等常规跟踪算法可以取得较好的MPPT效果。然而, 在实际应用中, 由于受云层、树木、建筑物及灰尘的遮挡, 光伏阵列存在局部阴影和温度偏差, 致使光伏系统的功率、电压特性曲线呈现多峰特性^[8], 常规跟踪算法往往会陷入局部极值而导致算法失效。为了实现多峰MPPT, 利用智能优化算法寻找最大功率点已成为研究热点。文献^[9]将改进萤火虫算法引入到光伏系统MPPT控制中, 取得了较明显的效果。文献^[10]采用了猫群算法(Cat Swarm Optimization, CSO), 并引入了

收稿日期: 2020-07-21; 改回日期: 2021-04-02; 网络出版: 2021-06-11

*通信作者: 吴忠强 mewzq@163.com

基金项目: 河北省自然科学基金(F2020203014)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Hebei Province (F2020203014)

混沌搜索, 利用logistic混沌序列的遍历性、随机性, 解决了猫群算法的“早熟”问题。文献[11]提出了先采用粒子群算法定位近似最大功率点, 然后利用爬山法准确跟踪最大功率点的MPPT控制。文献[12]将遗传算法应用到多峰MPPT寻优中, 该算法不能使功率稳定在MPP附近, 且算法较为复杂。

多元宇宙优化算法(Multi-Verse Optimization, MVO)由Mirjalili等人[13]于2016年提出, 并通过实验证明了该算法能够在短时间搜索到全局最优解, 在收敛速度上优于PSO算法。然而, MVO算法依然存在全局搜索和局部搜索相对不平衡, 易陷入局部最优和收敛速度慢等问题[14-16]。

本文提出一种改进的多元宇宙优化算法(Improved Multi-Verse Optimization, IMVO), 并应用于光伏发电系统的MPPT控制。针对MVO算法在接近全局最优时种群多样性减少, 容易陷入局部最优的缺陷, 引入了螺旋更新策略, 增加了种群的多样性, 利于跳出局部最优[17]; 改进旅行距离率的更新方式, 使其以指数函数的方式下降, 保证了宇宙的多样性, 加快了算法的收敛速度; 引入自适应压缩因子, 使算法在优化前期有较强的全局搜索能力, 后期有较强的局部搜索能力, 进一步提高算法的搜索性能。在光伏发电系统MPPT控制中的应用表明, IMVO算法能够有效避免陷入局部最优, 具有更快的收敛速度和更高的收敛精度, 且具有较好的应对太阳光照变化的能力, 是实现部分阴影情况下光伏多峰MPPT的有效方法。

2 光伏系统介绍

光伏阵列在部分阴影情况下会出现多峰现象, 在光伏阵列中, 每个组件的输出端并联一个反向二极管, 以避免产生热斑效应。本文以 1×3 光伏阵列对其特性进行说明, 单个光伏电池组件的等效电路图[18]如图1所示。

图1中, I_{ph} 为光生电流, R_s 为由电池的表面电阻、体电阻以及接触电极电阻构成的串联电阻, R_{sh} 为等效并联电阻, 正向电流 I_d 以及旁路电流

I_{sh} 由 I_{ph} 提供, 剩余光电流 I 输出到负载, 由上述定义可得等效电路的光电流 I 表达式[19]为

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{Q(U + IR_s)}{AKT} \right) - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

其中, I_0 为等效二极管PN结反向饱和电流; Q 为电子电荷($1.60217646 \times 10^{-19}$); K 为玻尔兹曼常数($1.3806503 \times 10^{-23} \text{J/K}$); T 为热力学温度; A 为二极管品质因子, U 为负载电压。

式(1)求解较困难, 并且参数 A , I_{ph} 随光照强度和温度的变化而变化, 不适合工程应用。在实际工程中, 需对式(1)进行适当的简化。在通常情况下 R_{sh} 值很大, R_s 值很小, 所以 $(U + IR_s)/R_{sh}$ 和 IR_s 可以忽略不计。由于 R_s 值远小于二极管正向导通时的阻值, 所以 I_{ph} 近似等于短路电流 I_{sc} 。为方便推导, 引入 D_1 和 D_2 两个变量: $D_1 I_{sc} = I_0$, $D_2 = AKT/Q$, 则对式(1)进行简化得到工程计算的光伏数学模型式[20]

$$\left. \begin{aligned} I &= I_{sc} \cdot \left[1 - D_1 \cdot \left(e^{\frac{U}{D_2 \cdot U_{oc}}} - 1 \right) \right] \\ D_1 &= \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \cdot e^{-\frac{U_m}{D_2 \cdot U_{oc}}} \\ D_2 &= \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \cdot \left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, U_m , I_m , U_{oc} , I_{sc} 为光伏阵列厂家提供的参数, 分别为最大功率点电压、最大功率点电流、开路电压与短路电流。

光伏电池在局部遮蔽条件下, 功率、电压特性曲线会出现多个局部最大功率点。图2(a)为由3个光伏组件组成的 1×3 光伏阵列, 分别设置不同的辐

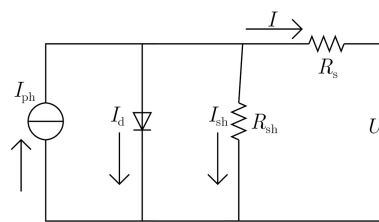
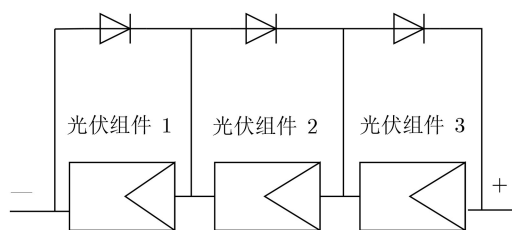
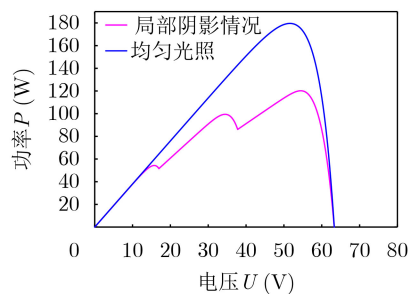


图1 光伏电池模型等效电路图



(a) 光伏阵列模型电路



(b) 不同辐照度下的 $P-U$ 特性曲线

图2 光伏系统模型及不同照度下的 $P-U$ 特性曲线

照度条件：温度均为25 °C，均匀辐照度时，光伏阵列辐照度均为1000 W/m²；局部遮蔽时，3片光伏电池辐照度分别设置为1000 W/m²，800 W/m²，600 W/m²，可得到不同工况条件下的功率、电压特性曲线，如图2(b)所示。

由图2(b)可知，光伏组件均无遮挡情况下的P-U特性曲线只有一个最大功率点，而在局部遮蔽条件下，P-U特性曲线出现多个局部最大功率点，为保证系统一直工作在全局最大功率点，引入优化算法对光伏系统进行优化控制。

3 改进多元宇宙优化算法(IMVO)

3.1 多元宇宙优化算法(MVO)

多元宇宙优化算法(MVO)主要思想：依据多元宇宙理论的3个主要概念，即白洞、黑洞和虫洞来建立模型。白洞是一个只发射不吸收的天体，黑洞吸收宇宙中一切事物，虫洞就像一个连接白洞和黑洞的时空隧道，将个体传送到宇宙的任何角落，甚至是从一个宇宙到另一个宇宙，多元宇宙通过三者达到一个稳定状态。定义候选解为宇宙，候选解的适应度为宇宙的膨胀率。MVO算法可以简单划分为以下几个步骤：

(1) 设有一个由 N 个宇宙组成的群体在 D 维的目标空间中进行搜索，对其进行初始化

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \cdots & x_1^d \\ x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_2^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \cdots & x_n^d \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) 为了建立白黑洞之间的数学模型和交换宇宙的对象，使用轮盘机制，在每次迭代中，根据宇宙的膨胀率(适应度)对其进行排序，并通过轮盘赌选择一个白洞。

$$x_i^j = \begin{cases} x_k^j, & r_1 < \text{NI}(X_i) \\ x_i^j, & r_1 \geq \text{NI}(X_i) \end{cases} \quad (4)$$

其中， x_i^j 为第 i 个宇宙的第 j 个参数， $\text{NI}(X_i)$ 为第 i 个宇宙的归一化膨胀率， r_1 是[0,1]之间的随机数， x_k^j 是由轮盘赌机制选择的第 k 个宇宙的第 j 个参数。

(3) 虫洞存在概率 W_{EP} 在迭代过程中线性增加，旅行距离率 T_{DR} 在迭代过程中不断减小，以便在获得的全局最佳范围内进行更精确的局部搜索，两个系数的自适应公式为式(5)和式(6)

$$W_{EP} = W_{EP\min} + l \times \left(\frac{W_{EP\max} - W_{EP\min}}{L} \right) \quad (5)$$

$$T_{DR} = 1 - \frac{l^{1/p}}{L^{1/p}} \quad (6)$$

其中， $W_{EP\min}$ 为 W_{EP} 的最小值， $W_{EP\max}$ 是 W_{EP} 的最大值， l 是当前迭代次数， L 是最大迭代次数， p 定义了迭代过程中的开发精度， p 值越高，局部搜索越快。

(4) 更新宇宙位置并寻找最优个体。

当 $r_2 < W_{EP}$ 时，

$$x_i^j = \begin{cases} x_j + T_{DR} \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j), & r_3 < 0.5 \\ x_j - T_{DR} \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j), & r_3 \geq 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

当 $r_2 \geq W_{EP}$ 时，

$$x_i^j = x_j^j \quad (8)$$

其中， x_j 表示目前形成的最佳宇宙的第 j 个参数， ub_j 和 lb_j 表示 j 变量的上限和下限， r_2 ， r_3 和 r_4 是[0, 1]之间的随机数。

3.2 改进多元宇宙算法(IMVO)

原MVO已经证明是一种有价值的优化算法，然而与其他群智能优化算法一样，MVO也面临一些挑战，它在迭代初始阶段收敛得较快，但后期容易陷入局部最优，导致求解精度不高，为提升MVO算法的收敛速度和寻优精度，本文从以下3个方面对该算法进行改进。

(1)引入螺旋更新：在MVO算法中，当 $r_2 < W_{EP}$ 时，使用式(7)来更新宇宙位置，其中位置的更新都是根据迄今为止最好的宇宙来进行的，这样加快了算法的搜索效率，但当 $r_2 \geq W_{EP}$ 时，原MVO算法宇宙位置保持不变，算法性能没有得到提高。此处引入螺旋更新，强调全局搜索，防止种群一直根据最好的宇宙更新而陷入局部最优，增加种群的多样性，达到全局搜索和局部开发之间的平衡。

引入的螺旋更新如式(9)

$$x_i^j = \left| x_j - x_i^j \right| \times e^{bm} \times \cos(2\pi l) + x_j \quad (9)$$

其中， b 是定义的对数螺旋形状的常数， m 是[0, 1]之间的常数。

(2)改进旅行距离率 T_{DR} 的更新机制。在多元宇宙算法中，旅行距离率是影响算法性能的重要参数。因为MVO算法需要通过虫洞的随机性来保证宇宙的多样性，因此，合适的 T_{DR} 值可以使算法更容易找到全局最优。原MVO算法中， T_{DR} 下降速度较慢，导致旅行距离增加，为了进一步提升算法的性能，使 T_{DR} 以指数函数的方式下降，此时的旅行距离率 T_{DR} 按照式(10)更新。

$$T_{DR} = (1/Q_c)^{l/L} \times 0.6 \quad (10)$$

其中， Q_c 为0~6000间的常数。

(3)自适应压缩因子: MVO算法与其他算法一样,在搜索当前最优宇宙的过程中,先执行的是全局搜索,后执行局部搜索,为了提高算法的搜索能力,引入一种自适应压缩因子 λ 来改变当前最优宇宙的位置,当其他宇宙远离当前最优宇宙时,压缩因子 λ 增大,增加算法的收敛速度;当其他宇宙靠近当前最优宇宙时,压缩因子 λ 缩小,迫使算法执行更精确的搜索行为,自适应压缩因子按照式(11)更新。

$$\lambda = \cos\left(\frac{\pi l}{2L}\right) \quad (11)$$

此时式(7)相应地变为式(12)

$$x_i^j = \begin{cases} \lambda \times x_j + T_{DR} \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j), & r_3 < 0.5 \\ \lambda \times x_j - T_{DR} \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j), & r_3 \geq 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

改进后的算法步骤如下:

步骤1 对宇宙个数 X ,最大迭代次数 L ,求解空间的上限 ub 、下限 lb 和位置进行初始化。

步骤2 根据宇宙膨胀率排列宇宙并通过轮盘赌机制式(4)选择一个白洞。

步骤3 根据式(5)和式(10)更新虫洞存在概率 W_{EP} 和旅行距离率 T_{DR} ,并进行边界检查。

步骤4 计算当前宇宙膨胀率。若宇宙膨胀率优于当前宇宙膨胀率,则更新当前宇宙膨胀率,否则保持当前宇宙。

步骤5 执行宇宙的个体位置更新,寻找最优个体。当 $r_2 < W_{EP}$ 时,按照式(12)更新宇宙位置,当 $r_2 \geq W_{EP}$ 时,使用式(9)更新宇宙位置。

步骤6 终止条件判定。若满足条件(足够好的宇宙或者最大迭代次数),则输出对应结果,否则迭代次数加1,返回执行步骤2。

4 基于IMVO算法的MPPT设计

光伏系统的参数值如表1所示。

在MATLAB/Simulink中搭建光伏MPPT控制系统,如图3所示。电路中的仿真参数为: C_1

$=440 \mu\text{F}$, $C_2=220 \mu\text{F}$, $L=10 \text{ mH}$, $R_L=6 \Omega$ 。系统的主要工作原理为:将光伏系统的输出电压和输出电流读入到最大功率控制器中,利用IMVO算法以电压 U 作为变量进行寻优,以占空比的形式输出控制指令控制MOSFET,从而动态地调节电压,直到电压达到稳定。采用的适应度函数为 $NI = P = U \cdot I$ 。

在均匀光照强度、局部遮蔽和变光照等3种条件下,分别对IMVO与MVO, PSO, INC, P&O的MPPT控制效果进行对比。参数设置为:种群数目均为5,最大迭代次数为30;在MVO中, $W_{EP\min}=0.2$, $W_{EP\max}=1$, $p=6$;在IMVO中, $b=1$, $Q=5000$;在PSO中,学习因子 $c_1=c_2=2$,惯性权重 $\omega=0.6$ 。

(1)均匀光照。3块光伏板均接受辐照度为 800 W/m^2 的均匀光照,温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,系统理论最大输出功率为 143.7 W ,运行得到如图4所示的系统响应图。

由图4可见,在均匀光照的情况下,5种算法都能收敛到全局最大功率点(Global Maximum Power Point, GMPP)附近,误差小于 0.5 W ,其中P&O收敛速度最慢,在 0.23 s 才达到GMPP附近,INC和P&O的振荡最大,原因是两算法都是固定步长的算法,难以收敛到最小点,而是在最小点附近振荡。而IMVO仅在 0.016 s 就收敛到了GMPP,与其他算法相比,输出的电流、电压和功率的振荡最小,具有良好的收敛稳定性。

(2)恒定阴影情况。为模拟局部遮蔽下光伏系统的运行情况,对光伏板#1, #2, #3分别施加 1000 W/m^2 , 800 W/m^2 , 600 W/m^2 的辐照度,在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,系统理论最大输出功率为 120.02 W ,系统运行得到如图5所示的系统响应图。

由图5可见,在局部遮蔽条件下,IMVO算法在 0.015 s 就收敛到GMPP且振荡最小,展现了出色的寻优能力。P&O最终仅收敛于局部最大功率点(Local Maximum Power Point, LMPP) 99.38 W ,原因是步长选择不当,使算法陷入局部极小。其余算法均能收敛到GMPP,偏差在 0.2 W 以内;INC

表1 系统参数设置

参数名称	参数值
短路电流	3.8 A
开路电压	21.1 V
最大功率点电流	3.5 A
最大功率点电压	17.1 V
标准辐照度	1000 W/m^2
标准温度	$25 \text{ }^\circ\text{C}$

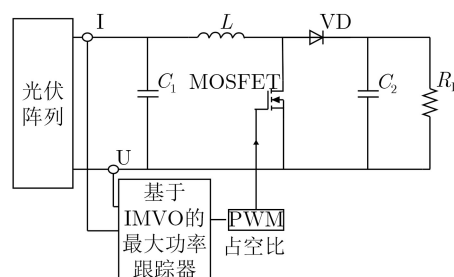


图3 基于IMVO算法的光伏系统MPPT结构图

振荡最大且收敛速度也较慢，原因是步长选择虽然避免了局部极小，但是固定步长的缺点仍是系统在最小点附近振荡。MVO的收敛时间是0.025 s，收敛速度上慢于IMVO，精度也低于IMVO，说明改进是有效的。改变旅行距离率的更新方式有效地避免算法陷入局部极小；引入螺旋更新，增强了算法的全局搜索能力，加快了收敛速度；自适应压缩因子，增强了算法的局部搜索能力，提高了精度。3方面改进策略使算法的收敛速度和精度都得到提高。

(3)变光照强度。为模拟实际运行中辐照度时刻变化的情况，在25 °C温度下，对光伏阵列每隔0.4 s施加1个阶跃的光照强度变化，如图6(a)所示，得到如图6(b)所示的*P-U*特性曲线，图6中阶段

1、阶段2、阶段3分别为[0,0.4]，[0.4,0.8]和[0.8,1.2]这三个时间区间的辐照度，3个阶段的系统理论最大功率分别为120.02 W，98.27 W，124.12 W。据此条件，得到如图7所示的系统响应图。

由图7可见，在两次光照强度变化时，IMVO算法均能快速收敛到GMPP，在第1次光照变化时，IMVO算法的收敛时间为0.421 s，而MVO的收敛时间为0.44 s，偏差约为2 W，再次说明了3个改进策略的效果。PSO的收敛时间为0.451 s，偏差约为4 W，且在第2次光照变化时，稳定值与理论值误差较大，很明显陷入了LMPP，说明PSO也存在易陷入局部极小而无的缺点；INC在阶段1和阶

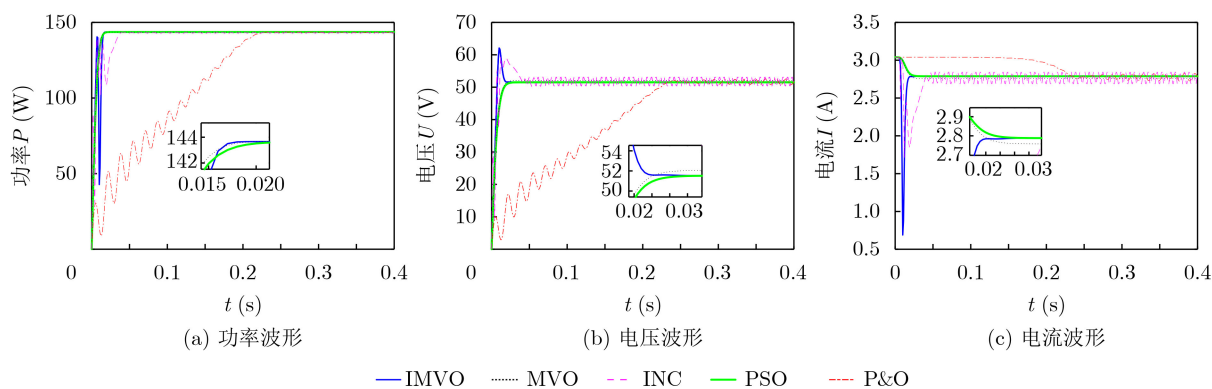


图4 均匀光照下不同算法的系统响应图

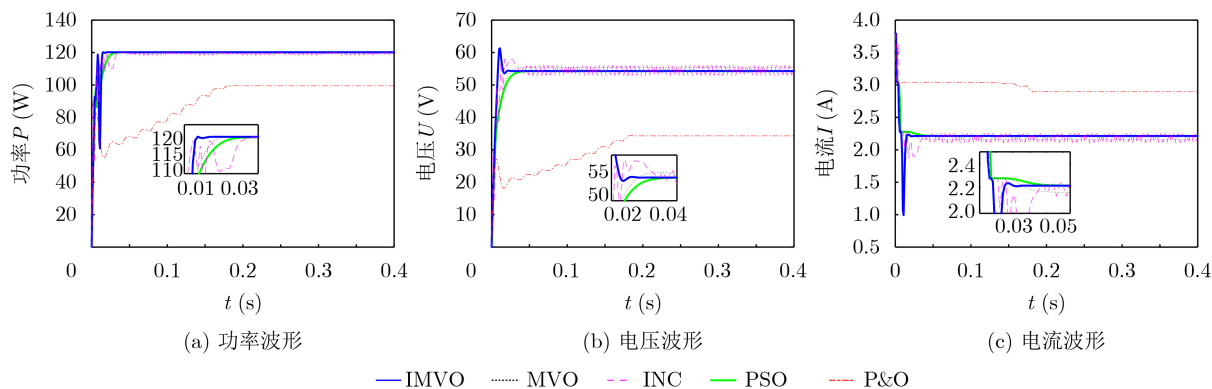


图5 局部遮蔽不同算法的系统响应图

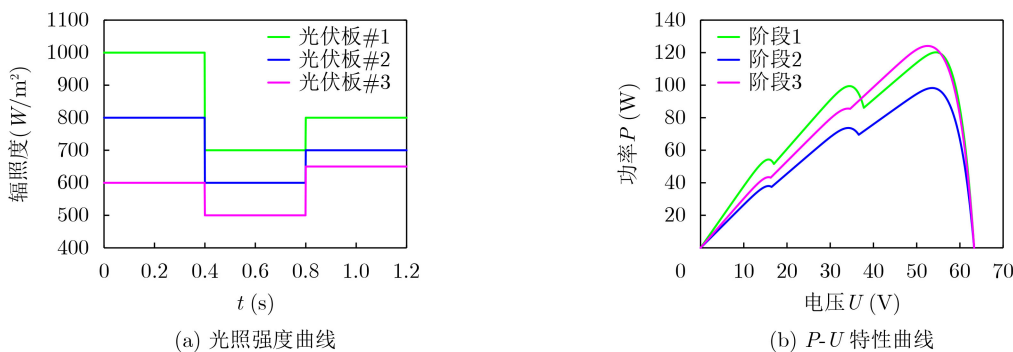


图6 光照强度变化曲线及*P-U*特性曲线

段2能够较快收敛到最大输出功率，但固定步长的缺点使收敛过程存在很大振荡，且收敛时间长于IMVO；P&O在前两个阶段都陷入了LMPP，只在阶段3收敛到GMPP，收敛速度最慢，是固定步长和陷入极小点后无逃离机制造成的。

5 结果统计

(1) 仿真结果统计

为了更直观地比较各算法在MPPT中的控制性能，对各算法在3种情况下的收敛时间和稳定功率值进行统计，如表2所示。

由表2可看出，在均匀光照时，5种算法均能收敛至全局最大功率点附近，在收敛时间上有略微差距，而当在局部遮蔽和变光照时，IMVO收敛时间明显低于其他算法，收敛精度高于其余算法，具有

明显的优势，表明IMVO中3个改进策略有效地提升了原MVO的收敛速度和寻优精度，相比P&O、INC、PSO更适合应用到光伏系统MPPT控制中。

(2) 实际算例验证

根据文献[21]的实验条件进行实际算例仿真验证，实验使用的太阳能电池板最大功率为100 W，最大功率点电压为18.48 V，最大功率点电流为5.41 A，开路电压为22.92 V，短路电流为5.7 A，实验温度大约20 °C。采用两块上述电池板串联，两片光伏板辐照度分别设置为800 W/m²和600 W/m²，文献[21]给出的电压实验结果(示波器图)如图8(a)所示，为便于比较本文算法也给出电压的仿真结果如图8(b)所示。

由图8可看出，两者电压最终都能稳定在32.58 V左右，IMVO能跟踪文献[21]实际算例的最大功率

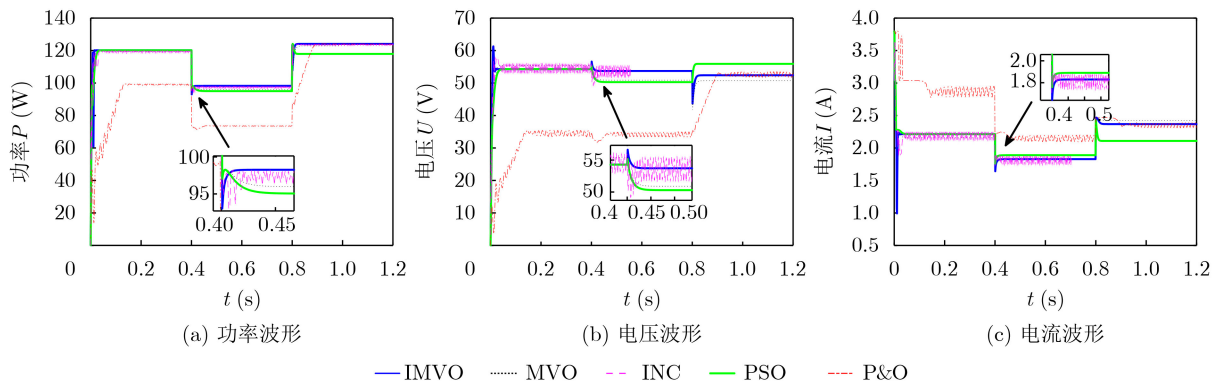
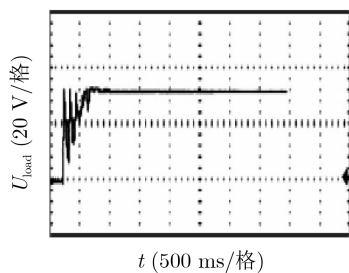


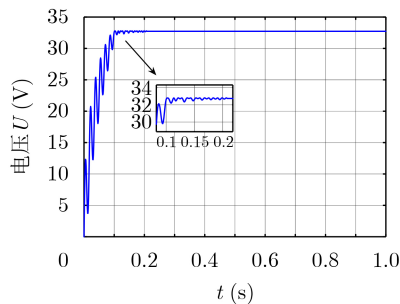
图7 变辐照度下不同算法的系统响应图

表2 5种算法在各算例下的稳定值和收敛时间统计结果

算例	统计量	IMVO	MVO	PSO	INC	P&O
均匀光照 (143.7)	收敛时间(s)	0.016	0.017	0.021	0.048	0.231
	稳定值(W)	143.7	143.5	143.6	143.5	143.5
恒定阴影条件 (120.02)	收敛时间(s)	0.015	0.025	0.029	0.042	0.181
	稳定值(W)	120.02	120.01	120.01	119.87	99.38
变光照(120.02/ 98.27/124.12)	收敛时间(s)	0.015/0.421/0.821	0.025/0.443/0.821	0.029/0.451/0.788	0.042/0.431/0.785	0.181/0.452/0.895
	稳定值(W)	120.02/98.27/124.12	120.01/97.88/123.65	120.01/95.12/120.02	119.87/96.55/123.48	99.38/70.56/124.01



(a) 文献[21]的电压波形



(b) 本文算法的电压波形

图8 文献[21]和本文算法电压波形对比

点, 文献[21]电压达到稳定时间为0.56 s左右, 而IMVO达到稳定时间为0.21 s, 进一步验证了IMVO在局部遮蔽下的可靠性和快速性。

6 结束语

本文提出一种IMVO算法, 用于实现局部遮蔽下的光伏系统MPPT。针对MVO算法存在的不足, 从3个方面进行改进。引入螺旋更新方式, 增强了算法的全局搜索能力, 避免算法陷入局部最优, 有效提高了算法的收敛精度; 改变旅行距离率的更新方式, 使其以更快的速度下降, 有效提高了算法的收敛速度, 改善了算法的寻优效率; 引入自适应压缩因子, 使算法能够动态地调节迭代过程中最优宇宙的位置, 满足算法在不同时期的寻优要求。将IMVO算法应用到光伏系统的MPPT中, 3种情况的仿真结果表明, IMVO算法能够使系统快速达到最大功率且稳定运行, 在收敛速度和收敛精度方面均优于其他算法, 且显著减小了光伏系统输出电压、电流和功率的波动; 同时通过与实际条件下的验证对比表明, IMVO在局部遮蔽的条件下依旧能可靠快速地跟踪到最大功率点, 且具有良好的稳定性和适应性。

参考文献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893–1904. doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.180067.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, *et al.* Technology features of the new generation power system in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(7): 1893–1904. doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.180067.
- [2] SANGWONGWANICH A, YANG Yongheng, and BLAABJERG F. High-performance constant power generation in grid-connected PV systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(3): 1822–1825. doi: 10.1109/TPEL.2015.2465151.
- [3] 王立舒, 蒋赛加, 王君, 等. 基于混合策略的光伏MPPT算法优化控制[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1396–1402. doi: 10.3969/j.issn.0254-0096.2016.06.006.
WANG Lishu, JIANG Saijia, WANG Jun, *et al.* Optimization control of PV MPPT algorithm based on mixed strategy[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(6): 1396–1402. doi: 10.3969/j.issn.0254-0096.2016.06.006.
- [4] ZHANG Longlong, HURLEY W G, and WÖLFLE W H. A new approach to achieve maximum power point tracking for PV system with a variable inductor[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(4): 1031–1037. doi: 10.1109/TPEL.2010.2089644.
- [5] 张商州, 楚冰清, 袁训锋, 等. 光伏阵列模型分析及最大功率点跟踪研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(10): 114–116. doi: 10.14016/j.cnki.1001-9227.2019.10.114.
ZHANG Shangzhou, CHU Bingqing, YUAN Xunfeng, *et al.* Photovoltaic array model analysis and maximum power point tracking study[J]. *Automation & Instrumentation*, 2019(10): 114–116. doi: 10.14016/j.cnki.1001-9227.2019.10.114.
- [6] 蔡小庆, 陈晓芳. 改进型扰动观察法在光伏发电MPPT中的应用[J]. 电子测试, 2019(1): 59–60, 90. doi: 10.3969/j.issn.1000-8519.2019.01.024.
CAI Xiaoqing and CHEN Xiaofang. Application of improved perturbation observation method in MPPT of photovoltaic[J]. *Electronic Test*, 2019(1): 59–60, 90. doi: 10.3969/j.issn.1000-8519.2019.01.024.
- [7] 苏有功, 王大成, 王毅, 等. 基于改进型变步长电导增量法的MPPT控制策略仿真[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(10): 11–15. doi: 10.3969/j.issn.1003-7241.2019.10.003.
SU Yougong, WANG Dacheng, WANG Yi, *et al.* Simulation of MPPT control strategy based on improved variable step conductance increment method[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2019, 38(10): 11–15. doi: 10.3969/j.issn.1003-7241.2019.10.003.
- [8] 贾林壮, 陈侃, 李国杰, 等. 局部阴影条件下光伏阵列MPPT算法研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(9): 1614–1621. doi: 10.19768/j.cnki.dgjs.2020.04.020.
JIA Linzhuang, CHEN Kan, LI Guojie, *et al.* The MPPT method research for PV array under partially shaded conditions[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2014, 35(9): 1614–1621. doi: 10.19768/j.cnki.dgjs.2020.04.020.
- [9] TESHOME D F, LEE C H, LIN Y W, *et al.* A modified firefly algorithm for photovoltaic maximum power point tracking control under partial shading[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(2): 661–671. doi: 10.1109/JESTPE.2016.2581858.
- [10] 聂晓华, 王薇. 混沌改进猫群算法及其在光伏MPPT中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6103–6110. doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.161022.
NIE Xiaohua and WANG Wei. Chaos improved cat swarm optimization and its application in the PV MPPT[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(22): 6103–6110. doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.161022.
- [11] 王雨, 胡仁杰. 基于粒子群优化和爬山法的MPPT算法[J]. 太阳能学报, 2014, 35(1): 149–153. doi: 10.3969/j.issn.0254-0096.2014.01.025.
WANG Yu and HU Renjie. MPPT algorithm based on particle swarm optimization with hill climbing method[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2014, 35(1): 149–153. doi: 10.3969/j.issn.0254-0096.2014.01.025.
- [12] 胡克用, 胥芳, 艾青林, 等. 自适应遗传算法在光伏发电系统中

- 的应用[J]. 光子学报, 2016, 45(1): 158–166. doi: [10.3788/gzxb20164501.0135001](https://doi.org/10.3788/gzxb20164501.0135001).
- HU Keyong, XU Fang, AI Qinglin, *et al.* Adaptive genetic algorithm in the application of photovoltaic power generation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(1): 158–166. doi: [10.3788/gzxb20164501.0135001](https://doi.org/10.3788/gzxb20164501.0135001).
- [13] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, and HATAMLOU A. Multi-verse optimizer: A nature-inspired algorithm for global optimization[J]. *Neural Computing and Applications*, 2016, 27(2): 495–513. doi: [10.1007/s00521-015-1870-7](https://doi.org/10.1007/s00521-015-1870-7).
- [14] KUMAR P, GARG S, SINGH A, *et al.* MVO-based 2-D path planning scheme for providing quality of service in UAV environment[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(3): 1698–1707. doi: [10.1109/JIOT.2018.2796243](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2796243).
- [15] 刘小龙. 改进多元宇宙算法求解大规模实值优化问题[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(7): 1666–1673. doi: [10.11999/JEIT180751](https://doi.org/10.11999/JEIT180751).
- LIU Xiaolong. Application of improved multiverse algorithm to large scale optimization problems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1666–1673. doi: [10.11999/JEIT180751](https://doi.org/10.11999/JEIT180751).
- [16] LAI Wenhao, ZHOU Mengran, HU Feng, *et al.* A new DBSCAN parameters determination method based on improved MVO[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 104085–104095. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2931334](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931334).
- [17] MIRJALILI S and LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 95: 51–67. doi: [10.1016/j.advengsoft.2016.01.008](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008).
- [18] KIM K A, XU C Y, JIN L, *et al.* A dynamic photovoltaic model incorporating capacitive and reverse-bias characteristics[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, 3(4): 1334–1341. doi: [10.1109/JPHOTOV.2013.2276483](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2276483).
- [19] 邹德旋, 高立群, 段纳. 用修正的差分进化算法确定光电模型参数[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2521–2525.
- ZOU Dexuan, GAO Liqun, and DUAN Na. Determining the parameters of photovoltaic modules by a modified differential evolution algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2521–2525.
- [20] 刘宜罡, 邹应全, 张晓强, 等. 基于差分进化的光伏MPPT算法改进[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 264–271.
- LIU Yigang, ZOU Yingquan, ZHANG Xiaoqiang, *et al.* An improved photovoltaic MPPT algorithm based on differential evolution algorithm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(6): 264–271.
- [21] 石季英, 张登雨, 薛飞, 等. 基于改进灰狼优化-黄金分割混合算法的光伏阵列MPPT方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(5): 21–26. doi: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.000020](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000020).
- SHI Jiying, ZHANG Dengyu, XUE Fei, *et al.* Maximum power point tracking method for photovoltaic array based on modified hybrid method of grey wolf optimization and golden-section optimization[J]. *Proceedings of the CSU-EPISA*, 2019, 31(5): 21–26. doi: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.000020](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000020).
- 吴忠强: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源发电系统的状态监测与控制、参数测量与辨识、能量管理与优化等。
- 曹碧莲: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为光伏系统最大功率点跟踪、故障诊断。
- 侯林成: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为风力发电非线性控制。
- 胡晓宇: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为锂电池的联合估计、辨识。
- 马博岩: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为新能源汽车能量管理。

责任编辑: 马秀强