

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305068

# 基于 IPSO-IP&O 混合算法的光伏最大 功率点跟踪

秦智恒, 任磊, 秦岭, 茅靖峰  
(南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019)

[摘要] 在局部遮阴条件下, 光伏阵列的  $P-U$  特性曲线会出现多峰现象。传统的方法易陷入局部最大功率点 (LMPP), 而基于元启发式算法的最大功率点跟踪 (MPPT) 方法难以兼顾快速性和准确性。对此, 设计了一种基于改进粒子群 (IPSO) 算法内嵌变步长扰动观察法 (IP&O) 的 IPSO-IP&O 混合算法。首先, 采用 IPSO 对粒子的速度和位置进行更新; 然后, 通过 IP&O 对粒子进行最大功率点跟踪, 并将跟踪得到的功率作为粒子的适应度值, 以便于 IPSO 在诸多局部最大功率点中找到全局最大功率点; 最后, 以 IPSO 输出的全局最优为初始位置, 再次利用 IP&O 进行全局最大功率点跟踪。将所提算法与 IP&O、IPSO、改进粒子群算法结合扰动观察 (IPSO-P&O) 算法进行仿真对比, 仿真结果表明: 所提算法在跟踪速度和精度上表现优异, 尤其是在宽电压搜索范围的情况下; 并且在跟踪过程中的功率振荡更小。

[关键词] 光伏系统; 最大功率点跟踪; 局部遮阴; 改进粒子群算法; 变步长扰动观察法

[引用本文格式] 秦智恒, 任磊, 秦岭, 等. 基于 IPSO-IP&O 混合算法的光伏最大功率点跟踪[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 90-97. QIN Zhiheng, REN Lei, QIN Ling, et al. Photovoltaic maximum power point tracking based on IPSO-IP&O hybrid algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 90-97.

## Photovoltaic maximum power point tracking based on IPSO-IP&O hybrid algorithm

QIN Zhiheng, REN Lei, QIN Ling, MAO Jingfeng  
(College of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** Under partial shading conditions (PSC), the  $P-U$  characteristics of a solar photovoltaic array may exhibit multi-peak phenomena. Conventional algorithms tend to fall into local maximum power point (LMPP), while maximum power point tracking (MPPT) methods based on meta heuristic algorithms are difficult to balance speed and accuracy. In this regard, this paper designs a hybrid algorithm based on the improved particle swarm optimization (IPSO) with embedded the improved perturbation and observation (IP&O). The velocity and position of the particle are first updated by the IPSO algorithm. Then, perform MPPT based on the position of particles using the IP&O algorithm. The tracked power is used as the fitness value of the particles, so that IPSO can find the global maximum power point (GMPP) among many LMPPs. Finally, with the global optimal output of IPSO as the initial position, IP&O is used again for global maximum power point tracking (GMPPT). Comparing the proposed algorithm with IP&O, IPSO, and IPSO-P&O through simulation, the simulation results show that the proposed algorithm performs excellently in tracking speed and accuracy, especially in the case of a wide voltage search range, and has smaller power oscillations during the tracking process.

**Key words:** photovoltaic systems; maximum power point tracking; partial shading; improved particle swarm optimization algorithm; improved perturbation and observation algorithm

收稿日期: 2023-05-05

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(22KJB470025); 南通市社会民生科技计划面上项目(MS12021015)

Supported by: Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (22KJB470025); Nantong Social Livelihood Science and Technology Plan General Project (MS12021015)

第一作者简介: 秦智恒(1996), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术, 2111320007@stmail.ntu.edu.cn.

通信作者简介: 任磊(1991), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为新能源发电技术、电力电子电路健康监测技术, ee\_renlei@ntu.edu.cn.

太阳辐射强度、温度等因素极易影响光伏系统的功率输出,故通常采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术,追踪其最大功率点,提高其发电效率<sup>[1]</sup>。越来越多的光伏系统应用于大型城市的中心,更易被建筑物、树木、云等遮挡。光伏阵列上的太阳能辐射分布受到干扰, $P-U$ 曲线表现出多峰值特性。为此,各国学者针对该问题开展了大量研究工作。

目前 MPPT 算法主要分为传统算法、人工智能算法、元启发式算法 3 类。传统 MPPT 算法如扰动观察法(P&O),虽然有着极好的局部寻优能力,但是在局部遮阴条件(partial shading conditions, PSC)下易陷入局部最大功率点(LMPP)<sup>[2]</sup>。人工智能算法如模糊控制(FLC),虽然有着很好的跟踪性能,但是庞大的计算量对控制芯片要求较高<sup>[3]</sup>。元启发式算法如粒子群(PSO)算法。因其在处理复杂问题方面的有效性而变得流行<sup>[4]</sup>,但是在局部遮阴条件下难以兼顾跟踪的快速性和准确性。

为弥补上述存在的问题,诸多最大功率点跟踪混合算法被提出,主要分为分步式和选择式 2 类。文献[5]先利用传统算法找出所有局部最大功率点,进而比较大小确定全局最大功率点。其缺点为需要扫描大部分功率曲线,所以收敛速度很慢。文献[6]将 PSO 与 FLC 相结合,待 PSO 收敛至全局最大功率点(GMPP)附近后利用 FLC 精准跟踪。因传统 PSO 易局部收敛,所以此方案鲁棒性较差,复杂情况难以精确跟踪。文献[7]在文献[6]的基础上引入遗传算法,提高跟踪准确率的同时存在复杂性高,计算量大的缺点。文献[8-10]与文献[6]相似,将改进粒子群(IPSO)与变步扰动观察法(IP&O)、P&O 结合。文献[8,10]为改进收敛速度,避免局部收敛,引入了自适应惯性权重和学习因子。文献[9]为提升收敛速度,减小电压波动程度,优化了 PSO 的种群信息和搜索顺序。上述 3 种算法相较传统 PSO 提升有限。文献[11-13]将 IPSO 与电导法结合。其中,文献[11]从力学的角度对 PSO 进行优化,有效提升跟踪性能,但粒子的搜索区域依旧存在重叠,不利于算法的快速性。文献[12]通过优化迭代策略,有效避免粒子搜索区域的重复,算法收敛速度得到提升,但在某些 PSC 下依旧陷入局部最优。文献[13]在文献[12]的基础上缩短光照变化后 PSO 算法的寻优周期,但陷入局部最优的问题依然存在。文献[14-15]与上述分步式算法相反,其先利用传统算法找出一个局部最优解,再通过 PSO 算法搜索其余

范围。这种方法只适用于串联少量光伏阵列的情况,且提升效果不显著。文献[16]为选择式算法,将 PSO 与 P&O 结合,并通过比较算法收敛过程中存储的电流和电压信息,判断遮阴情况,选择 PSO 或 P&O。因为过于依赖功率和电压的变化,所以很容易产生误判,导致算法收敛于 LMPP。

为解决上述问题,本文将 IP&O 内嵌于 IPSO 算法,提出 IPSO-P&O 算法。先利用 IPSO 算法对粒子的速度和位置进行更新;再通过 IP&O 算法对粒子进行最大功率点跟踪,并将跟踪得到的功率作为粒子的适应度值,以便于 IPSO 在诸多局部最大功率点中找到全局最大功率点;最终,以 IPSO 输出的全局最优为初始位置,利用 IP&O 算法进行精确跟踪。在 MATLAB/Simulink 中将算法与 IP&O、IPSO、IPSO-P&O 算法进行对比。仿真结果表明,本文所提算法即使在宽电压搜索范围的情况下,也保持较快的跟踪速度以及较高的跟踪精度,并且跟踪过程中的功率波动较小。

## 1 光伏组件模型与输出特性

### 1.1 光伏组件的数学模型

光伏组件是利用光伏效应将光能转化为电能的器件。光伏组件单 PN 结的二极管等效电路模型如图 1 所示<sup>[17]</sup>。

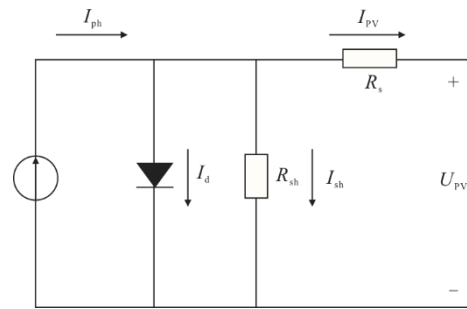


图 1 光伏组件单二极管模型等效电路  
Fig.1 Equivalent circuit of single diode model of photovoltaic module

由图 1 等效电路可得,各电流方程式<sup>[18]</sup>为:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

式中: $I_{pv}$ 为光伏组件输出电流,A; $I_{ph}$ 为光生电流之和,A; $I_d$ 为光伏组件内部暗电流,A; $I_{sh}$ 为内部旁路电流,A。

$$I_{ph} = \left[ I_{sc} + C_t (T - T_0) \right] \frac{S}{S_0} \quad (2)$$

式中: $I_{sc}$ 为标准条件下光伏组件短路电流,A; $C_t$ 为短路电流温度系数; $T$ 为温度,K; $T_0$ 为标准条件温

度,  $K$ ;  $S$  为太阳辐照度,  $W/m^2$ ;  $S_0$  为标准条件太阳辐照度,  $W/m^2$ 。

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_{PV} + IR_s)}{nkN_s T} \right] - 1 \right\} \quad (3)$$

式中:  $I_0$  为二极管饱和电流,  $A$ ;  $U_{PV}$  为光伏组件输出电压,  $V$ ;  $R_s$  为等效串联电阻,  $\Omega$ ;  $q$  为单个电荷带电量,  $C$ ;  $n$  为二极管理想因素;  $k$  为玻尔兹曼常数,  $J/K$ ;  $N_s$  为串联电池数量。

$$I_{sh} = \frac{U_{PV} + IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

式中:  $R_{sh}$  为等效并联电阻,  $\Omega$ 。

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^3 \cdot \exp \left[ \frac{qE_0 \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}{nk} \right] \quad (5)$$

式中:  $I_{rs}$  为标准条件下二极管饱和电流,  $A$ ;  $E_0$  为光伏组件能带系数。

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left( \frac{qU_{oc}}{nkTN_s} \right) - 1} \quad (6)$$

式中:  $U_{oc}$  为标准条件下光伏组件开路电压,  $V$ 。

### 1.2 光伏组件的输出特性

光伏组件的输出特性主要与光照强度和环境温度有关, 其输出特性曲线呈非线性关系。通过 MATLAB/Simulink 搭建上述光伏组件模型, 在标准温度  $25\text{ }^\circ\text{C}$  的情况下, 改变光伏组件光照强度得到光伏组件的  $P-U$  特性曲线如图 2 所示。

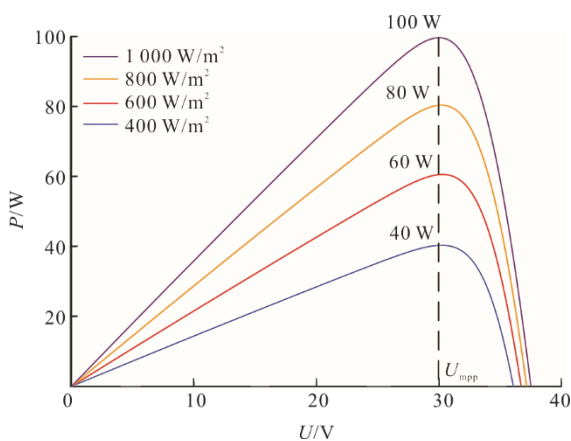


图 2 光伏组件在不同太阳辐照度 ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) 下的功率-电压特性曲线

Fig.2 Power voltage characteristic curves of photovoltaic module with different solar irradiance ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )

实际使用中为满足输出功率的需求, 通常将多个单体光伏组件串并联组成光伏阵列。光伏阵列在

PSC 下  $P-U$  特性曲线会出现多峰值现象<sup>[6]</sup>。以上述光伏组件为个体, 通过 MATLAB/Simulink 搭建  $4 \times 1$  的光伏阵列。在标准温度  $25\text{ }^\circ\text{C}$  的情况下, 改变 4 块单体光伏组件的光照强度可得到光伏阵列在无遮阴的标准测试条件 (STC) 下以及 3 种光照不同 PSC 下的  $P-U$  特性曲线如图 3 所示。

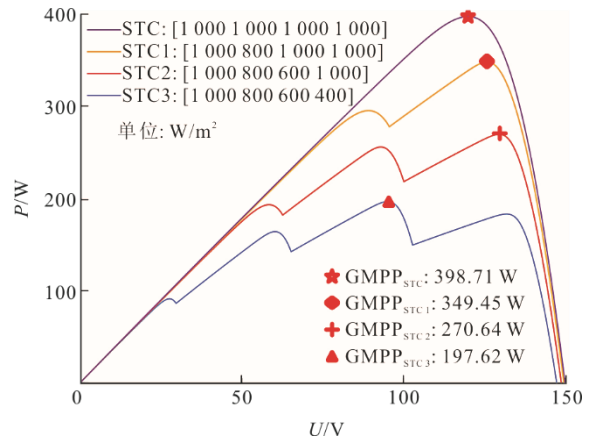


图 3 光伏阵列在 STC 和多种 PSC ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) 下的功率-电压特性曲线

Fig.3 Power voltage characteristic curve of photovoltaic array in STC and various PSCs ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )

不难发现, 当光伏阵列所受光照越不均匀, 其  $P-U$  特性曲线峰值越多且越明显, 最大功率越小, 此时最大功率点可能是众多峰值中的任意一个<sup>[19]</sup>。因此, 为保证光伏发电系统的发电效能, MPPT 算法应能解决不同情况下的光伏输出多峰问题, 使得系统输出始终运行于全局最大功率点。

## 2 基于 IPSO-P&O 算法的 MPPT

### 2.1 改进粒子群算法

当粒子群算法应用于 MPPT 中时, 粒子所处的空间为一维, 粒子的位置信息为变换器的占空比, 粒子的速度信息为占空比的扰动量。粒子群算法寻优的核心是利用局部最优 (PB) 和全局最优 (GB) 不断更新粒子的速度和位置信息。

然而, 传统的粒子群算法也存在诸如收敛速度慢、易收敛于 LMPP、重复扫描等缺陷<sup>[20]</sup>。为弥补上述存在问题, 本文提出一种改进粒子群算法。

为更快更准确地从多峰中找出 GMPP, IPSO 算法的适应度函数表达式为:

$$f = U_{pmpp} \times I_{pmpp} \quad (7)$$

式中:  $f$  为粒子群算法适应度函数;  $U_{pmpp}$  为粒子附近 LMPP 处电压;  $I_{pmpp}$  为粒子附近 LMPP 处的电流。

以图 3 中的 PSC3 为例, IPSO 算法的适应度函

数得到功率曲线不再为多峰曲线,而是转换为分段常数的形式,具体如图 4 所示。电压搜索区间被划分为 4 个子区间,分别为 R1、R2、R3、R4,不同搜索区间内可以搜索到不同的 LMPP。又因粒子群算法存在记忆性,只需要粒子经过每个区间中的任意一点,便能搜索到 GMPP,这大大降低搜索难度。

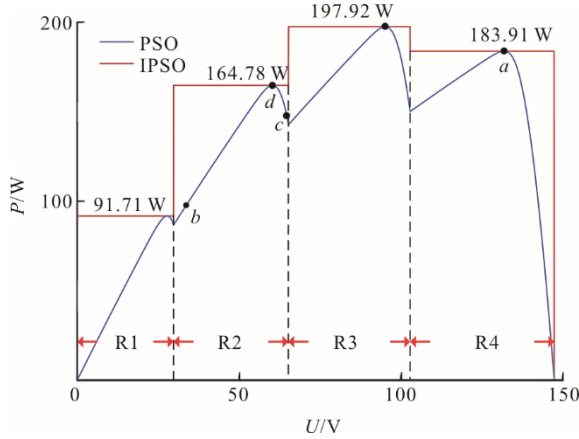


图 4 适应度函数功率曲线

Fig.4 Power curve obtained by fitness function

在得到附近 LMPP 的前提下,若依旧按照标准粒子群算法的更新公式,粒子需要经过多轮迭代才可以进入新的搜索区间。为此,本文提出速度和位置更新表达式:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + \eta \times c_1 \times \text{rand}_1^k \times (X_{\text{PBi}}^k - X_i^k) + \eta \times c_2 \times \text{rand}_2^k \times (X_{\text{GB}}^k - X_i^k) \quad (8)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (9)$$

$$X_{\text{PBi}}^k = \begin{cases} X_i^k, f(X_{\text{PBi}}^{k-1}) \leq f(X_i^k) \\ X_{\text{PBi}}^{k-1}, f(X_{\text{PBi}}^{k-1}) > f(X_i^k) \end{cases} \quad (10)$$

$$X_{\text{GB}}^k = \begin{cases} X_{\text{PBi}}^k, f(X_{\text{GB}}^{k-1}) \leq f(X_{\text{PBi}}^k) \\ X_{\text{GB}}^{k-1}, f(X_{\text{GB}}^{k-1}) > f(X_{\text{PBi}}^k) \end{cases} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{4}{\sqrt{2 + 4c_{\text{sum}} - \sqrt{2c_{\text{sum}}^2 - 4c_{\text{sum}}}}} \quad (12)$$

$$c_{\text{sum}} = c_1 + c_2, c_{\text{sum}} > 2 \quad (13)$$

当  $X_i^k < X_{\text{GB}}^k$  时,粒子的位置为:

$$X_i^k = \begin{cases} X_i^k, X_i^k > X_{\text{pmppi}}^k \\ X_{\text{pmppi}}^k, X_i^k \leq X_{\text{pmppi}}^k \end{cases} \quad (14)$$

否则,粒子的位置为:

$$X_i^k = \begin{cases} X_i^k, X_i^k < X_{\text{pmppi}}^k \\ X_{\text{pmppi}}^k, X_i^k \geq X_{\text{pmppi}}^k \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $k$  为迭代次数;  $i$  为粒子的序号;  $V$  为粒子的

速度;  $X$  为粒子的位置;  $\omega$  为惯性权重;  $c_1$ 、 $c_2$  分别为自身学习因子和社会学习因子;  $\text{rand}$  为  $[0,1]$  之间的随机数;  $\eta$  为收缩系数;  $c_{\text{sum}}$  为综合学习因子;  $X_{\text{pmppi}}$  为粒子附近 LMPP 处的位置。

式(14)和式(15)通过选择合适的起点,跳过已知区域更快地接近全局最优。如图 4 中,  $a$  点为 GB, 粒子从  $b$  点跟踪到附近 LMPP 的  $d$  点,那么粒子以  $d$  点为初始位置进行更新。若粒子从  $c$  点开始,同样跟踪到  $d$  点,粒子的初始位置则为  $c$  点。此外,为合理控制粒子的速度,本文引入收缩系数削弱学习因子设置过大造成的影响。其原理为通过增大收缩系数的分母,使得收缩系数的收敛速度变快,可以将过大的学习因子控制在合理范围内,降低粒子群算法参数设置的难度。

为了避免算法重复扫描,可将粒子数  $N_P$  设置为 2,初始位置为搜索区间两端。但是当搜索范围为宽电压时,只能通过增大  $N_P$  以提高准确性<sup>[21]</sup>。针对这一点,本文提出一种休眠规则,并引入变量  $D_T$  和  $D_A$  用以记录粒子顶端休眠和吞并休眠的状态。顶端休眠是指全局最优粒子只更新速度和位置信息,不参加扫描过程。若粒子  $i$  为 GB,则  $D_{T,i}=1$  (休眠),反之,  $D_{T,i}=0$ 。吞并休眠是指所有相邻适应度值的粒子中,只保留最靠近 GB 的粒子,其余粒子不参加扫描。其判断方法如下:

$$|f_i^k - f_{i+o}^k| < 0.05 f_i^k \quad (16)$$

式中:若  $X_i^k < X_{\text{GB}}^k$ ,  $\theta=1$ ;若  $X_i^k \geq X_{\text{GB}}^k$ ,  $\theta=-1$ 。

若粒子  $i$  满足式(16),则  $D_{A,i}=1$  (休眠)。一旦有  $N_P-1$  个粒子满足式(16),所有粒子将全部进入休眠,算法满足终止条件,输出  $X_{\text{GB}}^k$ 。

## 2.2 变步长扰动观察法

扰动观察法的核心是在系统中加入一个小扰动,观察由扰动引起的变化,即“主动扰动、自动寻优”<sup>[22]</sup>。

固定的扰动量难以兼顾跟踪速度和精度,为弥补这一缺陷,本文提出一种变步长扰动观察法,其扰动量为:

$$\Delta D = \left(1 - \frac{1}{e^{A \cdot \Delta P}}\right) \cdot \delta_{\text{step}} \quad (17)$$

式中:  $\Delta D$  为占空比的扰动量;  $A$  为步长变化阈值;  $\Delta P$  为功率的变化量;  $\delta_{\text{step}}$  为基准步长。

算法初期通过较大的扰动量更快地接近最大功率点。待算法跟踪到最大功率点后,功率变化量减小,扰动量变小,跟踪精度提高。

### 2.3 基于 IPSO-IP&O 算法的 MPPT 控制策略

本文以 IPSO 为主算法, IP&O 为辅助算法, 将 IP&O 内嵌于 IPSO 算法。在 IPSO 算法中 2 处调用 IP&O 算法: 1) 通过 IP&O 获得粒子位置附近 LMPP 的信息; 2) 在 IPSO 满足终止条件后, 通过 IP&O 获得更为准确的 GMPP, 保证算法的准确性。

基于 IPSO-IP&O 算法的控制流程如图 5 所示。其中, 占空比扫描范围为[0.1, 0.9]<sup>[23]</sup>, 为避免算法陷入局部最优, 需对粒子速度进行限制, 粒子最大速度表达式为:

$$V_{\max} = \frac{X_H - X_L}{N_{PV}} \quad (18)$$

式中:  $V_{\max}$  为粒子最大速度;  $X_H$ 、 $X_L$  分别为粒子位置上限和下限;  $N_{PV}$  为光伏阵列中光伏组件的数量。

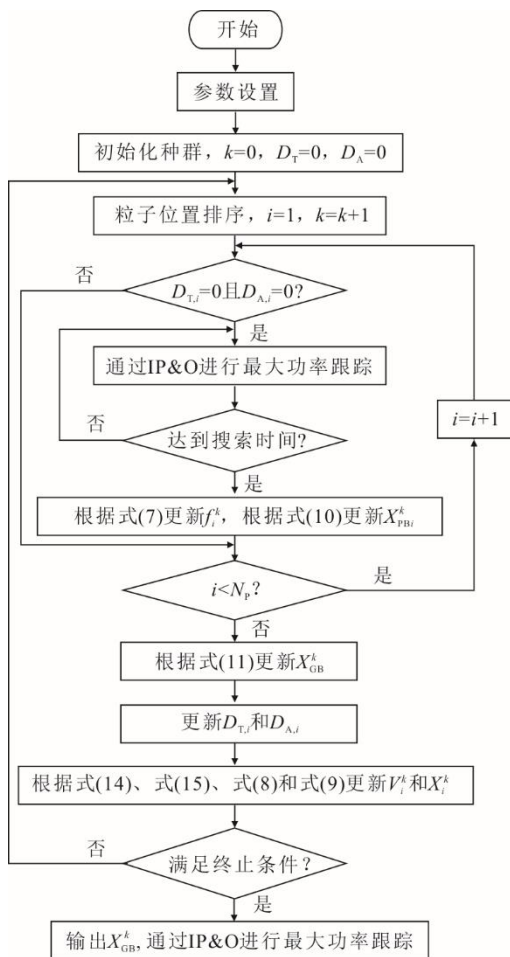


图 5 基于 IPSO-IP&O 算法的控制流程  
Fig.5 Control flow chart based on IPSO-IP&O algorithm

粒子扫描顺序为升序与降序交替<sup>[24]</sup>。当 IPSO 算法中粒子位置跨度较大时, 输入功率及输出电压振荡剧烈。而 IPSO 内嵌 IP&O 算法不但可以简化搜寻过程, 有效减少振荡次数, 而且使系统在扫描

过程中工作于 LMPP (功率大于区间内其他工作点)。升序与降序交替的扫描顺序, 有效减小振荡幅度。因此, 此方案功率损耗小, 电压振荡幅度小, 毛刺数量少。

### 3 仿真验证

由文献[6]可知, PSC 下  $m \times 1$  的光伏阵列输出特性曲线由多段组成, 每段分别为不同有效光伏组件工作时的输出特性曲线。 $1 \times m$  与  $m \times m$  的光伏阵列亦是如此, 它们有着相似的输出特性曲线。因此, 在验证本文 MPPT 算法有效性时, 仅采用由  $4 \times 1$  光伏阵列和 Boost 电路组成光伏系统进行仿真。光伏阵列在不同光照条件下的输出特性曲线如 1.2 节中图 3 所示。该光伏系统的仿真模型如图 6 所示, 光伏组件短路电流  $I_{sc}=3.6 \text{ A}$ , 短路电压  $U_{oc}=37.5 \text{ V}$ , 最大功率点电流  $I_m=3.3 \text{ A}$ , 最大功率点电压  $U_m=30.0 \text{ V}$ 。

在此模型中, 将本文算法与 IPSO、IP&O、文献[10]的 IPSO-P&O 算法进行对比。

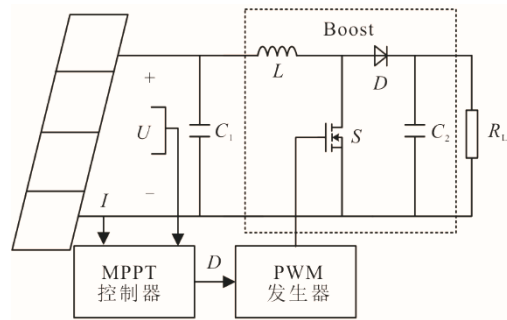


图 6 光伏系统仿真模型  
Fig.6 Simulation model of the photovoltaic system

#### 3.1 不同算法不同静态光照下的功率跟踪

均匀光照条件下, 光伏阵列采用图 3 中 STC 的光照参数, 全局最大功率为 398.71 W。PSO 算法中  $N_p=2$  时, 仿真结果如图 7 所示。

PSC 下, 光伏阵列采用图 3 中 PSC3 光照参数, 全局最大功率为 197.62 W, LMPP 如图 4 所示。PSO 算法中  $N_p=2$  时, 仿真结果如图 8 所示。由图 7 和图 8 可知: IP&O 算法在均匀光照条件下收敛速度快, 收敛精度高, 但在 PSC 下只能跟踪到局部最大功率点; IPSO 算法在 2 种条件下因重复扫描收敛时间较长, 收敛精度也不及 IPSO-P&O 和本文算法; IPSO-P&O 算法较 IPSO 算法有所提升, 但依旧收敛时间较长; 本文算法在 2 种条件下, 都能经过较少迭代, 快速、准确地跟踪到 GMPP。均匀光照和

局部遮阴条件下算法的具体性能详见表 1 和表 2。

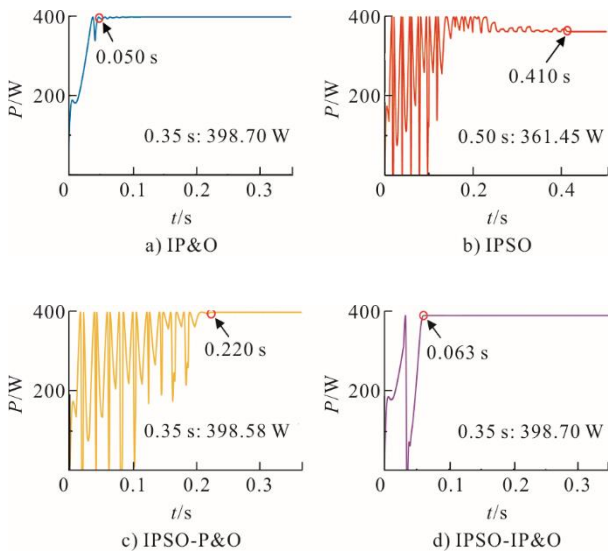


图 7 不同算法在 STC (25 °C) 下的功率跟踪仿真结果  
Fig.7 Simulation results of power tracking for different algorithms in STC (25 °C)

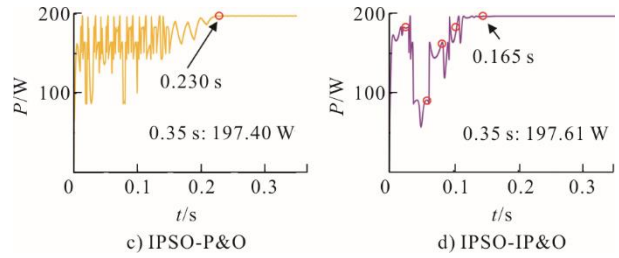
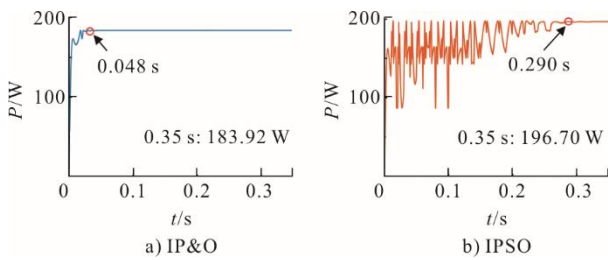


图 8 不同算法在 PSC3 (25 °C) 下的功率跟踪仿真结果  
Fig.8 Simulation results of power tracking for different algorithms PSC3 (25 °C)

表 1 不同算法在 STC (25 °C) 下的性能  
Tab.1 Performance of different algorithms in STC (25 °C)

| 统计量      | IP&O   | IPSO   | IPSO-P&O | IPSO-IP&O |
|----------|--------|--------|----------|-----------|
| 理想值/W    | 398.71 |        |          |           |
| 平均跟踪值/W  | 398.70 | 361.45 | 398.58   | 398.70    |
| 平均误差/%   | 0.003  | 9.345  | 0.033    | 0.003     |
| 平均跟踪时间/s | 0.050  | 0.410  | 0.220    | 0.063     |

表 2 不同算法在 PSC3 (25 °C) 下的性能  
Tab.2 Performance of different algorithms in PSC3 (25 °C)

| 统计量      | IP&O   | IPSO   | IPSO-P&O | IPSO-IP&O |
|----------|--------|--------|----------|-----------|
| 理想值/W    | 197.62 |        |          |           |
| 平均跟踪值/W  | 183.92 | 196.70 | 197.40   | 197.61    |
| 平均误差/%   | 6.932  | 0.466  | 0.111    | 0.005     |
| 平均跟踪时间/s | 0.048  | 0.290  | 0.230    | 0.165     |

### 3.2 不同算法不同 $N_p$ 静态局部遮阴下的功率跟踪

光伏阵列采用图 3 中 PSC3 的光照参数。PSO 算法中  $N_p=4、8、16$  时, 仿真结果如图 9 所示。

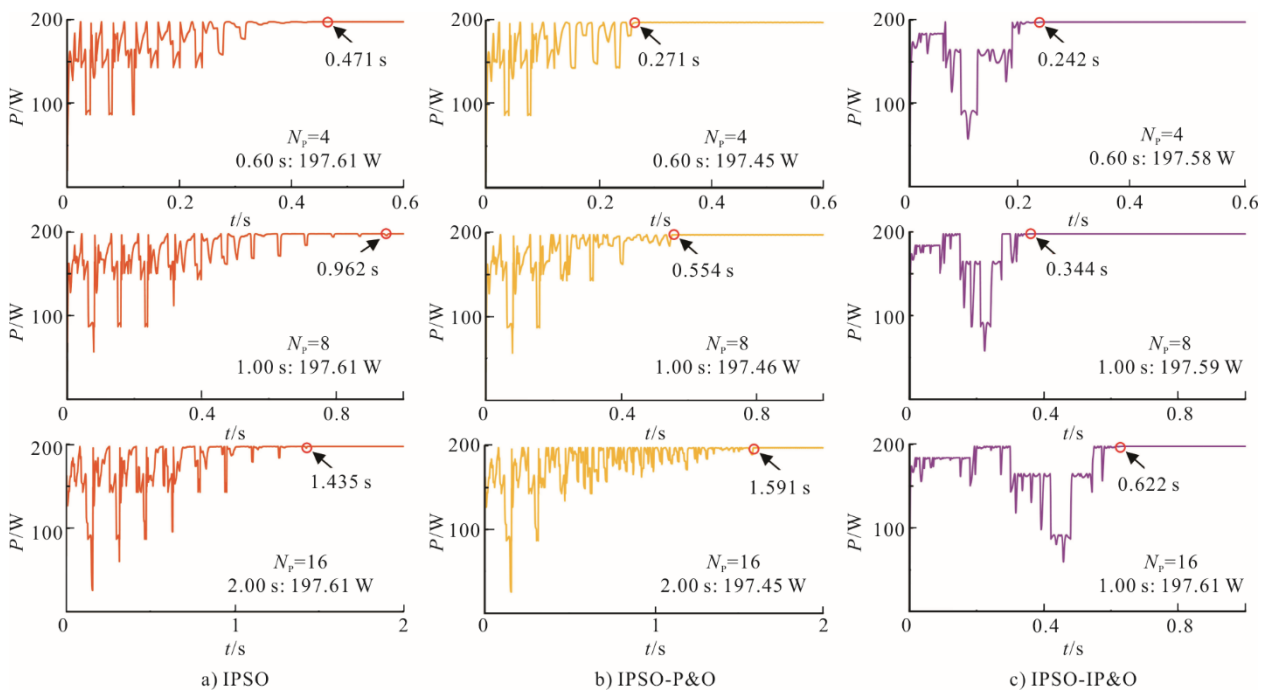


图 9 不同算法不同  $N_p$  的功率跟踪仿真结果  
Fig.9 Simulation results of power tracking for different algorithms and  $N_p$ s

由图 9 可见: IPSO 算法收敛时间与  $N_p$  约为线性关系; IPSO-P&O 算法只在  $N_p$  较小时存在优势,  $N_p$  较大相仿; 本文算法在不同  $N_p$  下都能较快收敛并且跟踪精度较高。

### 3.3 仿真分析

本文算法在  $N_p$  为 2、4、8、16 时粒子的移动轨迹如图 10 所示。结合图 8d)和图 10a), 以  $N_p=2$  为例进行分析。本文算法中  $X_1$  在 0.025 s 通过 IP&O 跟踪到初始位置附近的局部最大功率为 182.5 W;  $X_2$  在 0.057 s 跟踪到初始位置附近的局部最大功率为 91.34 W;  $X_1$  为 GB,  $D_{T,1}=1, D_{T,2}=0$ ,  $X_1$  和  $X_2$  更新至 0.288 和 0.522。  $X_2$  在 0.087 s 跟踪到局部最大功率为 162.2 W;  $X_1$  仍为 GB,  $D_{T,1}=1, D_{T,2}=0$ ,  $X_1$  和  $X_2$  更新至 0.288 和 0.368。  $X_2$  在 0.117 s 跟踪到

局部最大功率为 196.3 W;  $X_2$  为 GB,  $D_{T,1}=0, D_{T,2}=1$ ,  $X_1$  和  $X_2$  更新至 0.488 和 0.482。  $X_1$  在 0.147 s 跟踪到局部最大功率为 197.57 W;  $X_1$  为 GB,  $D_{T,1}=1, D_{T,2}=0, D_{A,2}=1$ , 此时算法满足终止条件, 输出  $X_{GB^4}=0.504$ 。最终利用 IP&O 以  $X_{GB^4}$  为初始位置跟踪 GMPP。

由上述仿真结果可知, IPSO 和 IPSO-P&O 在不同情况下各有利弊, 而本文算法在每种情况下都能保持较好的跟踪性能。在均匀光照条件下,  $N_p=2$  时, 跟踪速度相较以往算法提升 71.36%; 在 PSC 下,  $N_p=2$  时, 跟踪速度相较以往算法提升 28.26%;  $N_p=4$  时, 提升 10.7%;  $N_p=8$  时, 提升 37.91%;  $N_p=16$  时, 提升 56.66%。在跟踪过程中, 本文算法的功率振荡也明显小于其余 2 种算法。

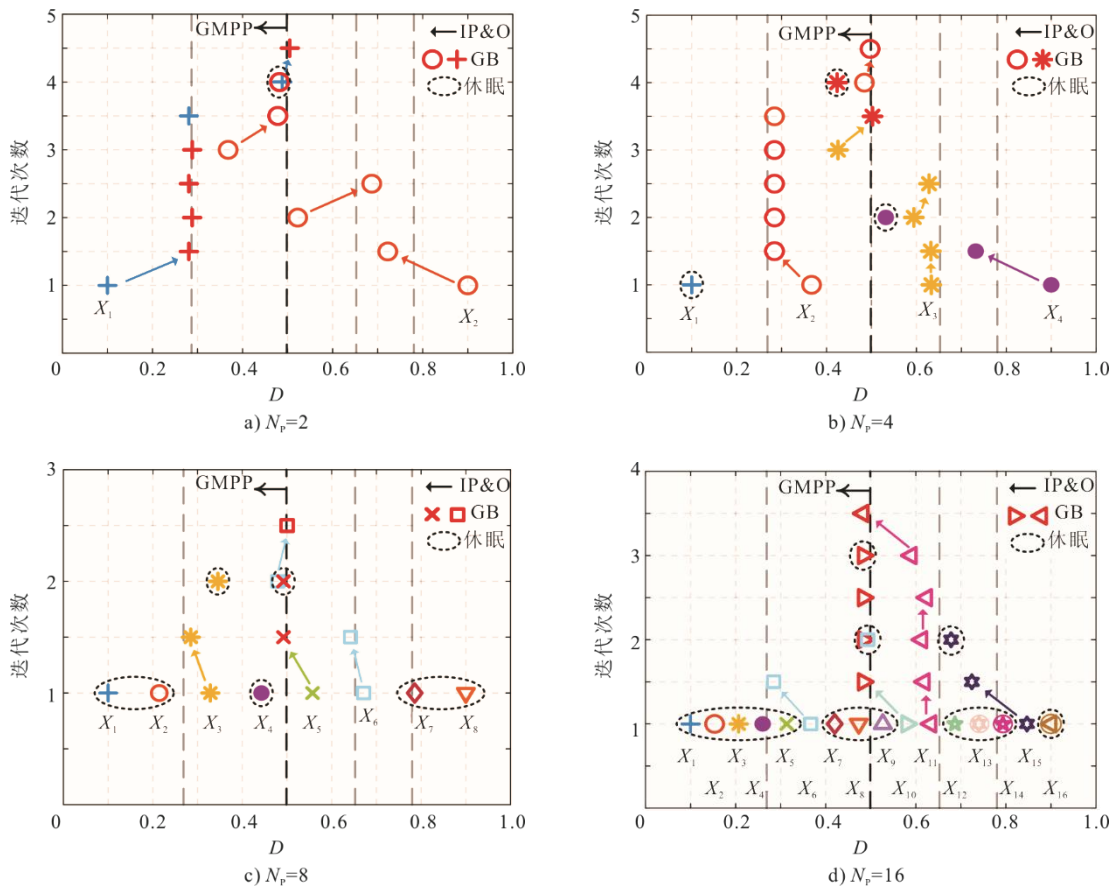


图 10 所提算法在 PSC3 下不同  $N_p$  的跟踪轨迹  
Fig.10 Tracking trajectories of different  $N_p$ s in PSC3 of the proposed algorithm

## 4 结 论

本文针对 PSO 算法寻优性能的不足, 对 PSC 下光伏系统多峰输出特性进行分析, 提出了基于 IPSO-P&O 的混合算法。仿真结果表明:

- 1) 本文算法在均匀光照和 PSC 下都能较快跟踪到 GMPP, 并且跟踪精度较高。
- 2) 本文算法相较于以往算法 (IPSO、IPSO-P&O), 增加  $N_p$  依旧可以实现快速寻优。
- 3) 本文算法寻优过程中跟踪各个 LMPP, 不仅

准确性高,而且功率损耗小,电压振荡小,毛刺数量少。

### 【参考文献】

- [1] 李昂,刘文锋,李音柯,等.基于IP&O-ICS算法的光伏系统MPPT控制研究[J].太阳能学报,2023,44(5):203-209.  
LI Ang, LIU Wenfeng, LI Yinke, et al. Research on MPPT control of photovoltaic system based on IP&O-ICS algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(5): 203-209.
- [2] 陈景文,张文倩,李晓飞.基于改进电导增量法的光伏MPPT控制[J].智慧电力,2021,49(9):47-55.  
CHEN Jingwen, ZHANG Wenqian, LI Xiaofei. Photovoltaic MPPT control based on improved conductance increment method[J]. Smart Power, 2021, 49(9): 47-55.
- [3] WASIM M S, AMJAD M, HABIB S, et al. A critical review and performance comparisons of swarm-based optimization algorithms in maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading conditions[J]. Energy Reports, 2022, 8: 4871-4898.
- [4] PEDEMONTE M, NESMACHNOW S, CANCELA H. A survey on parallel ant colony optimization[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(8): 5181-5197.
- [5] PATEL H, AGARWAL V. Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1689-1698.
- [6] 王航宇.粒子群和模糊算法相结合的MPPT算法[J].探测与控制学报,2021,43(4):112-116.  
WANG Hangyu. MPPT algorithm based on combination of particle swarm optimization and fuzzy algorithm[J]. Journal of Detection & Control, 2021, 43(4): 112-116.
- [7] 郭昆丽,刘璐雨,蔡维正.基于混合算法的光伏多峰值MPPT研究[J].电源技术,2021,45(8):1040-1043.  
GUO Kunli, LIU Luyu, CAI Weizheng. Research on photovoltaic multi peak MPPT based on hybrid algorithm[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(8): 1040-1043.
- [8] 赵阳,张军朝,陶亚男,等.基于粒子群优化变步长扰动观察MPPT算法[J].计算机仿真,2017,34(11):78-83.  
ZHAO Yang, ZHANG Junchao, TAO Yanan, et al. MPPT algorithm based on particle swarm optimizing variable step P&O[J]. Computer Simulation, 2017, 34(11): 78-83.
- [9] 李山,李科娜,陈艳,等.基于改进粒子群和变步长扰动的复合MPPT算法[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2019,33(7):207-213.  
LI Shan, LI Kena, CHEN Yan, et al. Hybrid MPPT algorithm based on improved particle swarm optimization and variable step disturbance[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2019, 33(7): 207-213.
- [10] FIGUEIREDO S, NAYANA R. Hybrid MPPT technique PSO-P&O applied to photovoltaic systems under uniform and partial shading conditions[J]. IEEE Latin America Transactions, 2021, 19(10): 1610-1617.
- [11] 李志军,张奕楠,王丽娟,等.基于改进量子粒子群算法的光伏多峰MPPT研究[J].太阳能学报,2021,42(5):221-229.  
LI Zhijun, ZHANG Yinan, WANG Lijuan, et al. Study of photovoltaic multimodal maximum power point tracking based on improved quantum particle swarm optimization[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(5): 221-229.
- [12] SHI J, ZHANG W, ZHANG Y, et al. MPPT for PV systems based on a dormant PSO algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 123: 100-107.
- [13] LEOPOLDINO A L M, FREITAS C M, MONTEIRO L F C. Analysis of the hybrid PSO-InC MPPT for different partial shading conditions[J]. Advances in Electrical and Computer Engineering, 2022, 22(2): 29-36.
- [14] LIAN K L, JHANG J H, TIAN I S. A maximum power point tracking method based on perturb-and-observe combined with particle swarm optimization[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(2): 626-633.
- [15] ABDULKADIR M, YATIM A H M. Hybrid maximum power point tracking technique based on PSO and incremental conductance[C]//2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON). IEEE, 2014: 271-276.
- [16] MANICKAM C, RAMAN G R, RAMAN G P, et al. A hybrid algorithm for tracking of GMPP based on P&O and PSO with reduced power oscillation in string inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6097-6106.
- [17] 朴政国,安悦珩,张永昌,等.光伏电池电路理论模型在工程应用中的计算方法[J].东南大学学报:自然科学版,2012,42(A01):103-106.  
PIAO Zhengguo, AN Yueheng, ZHANG Yongchang, et al. Calculation method of solar cells model in engineering applications based on circuit theory[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(A01): 103-106.
- [18] 鲍玉军.风光发电及传输技术[M].南京:东南大学出版社,2014:1.  
BAO Yujun. Wind power generation and transmission technology[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2014: 1.
- [19] 刘文锋,李昂.基于变步长扰动观察法结合改进天牛群优化算法的三步复合光伏最大功率跟踪算法[J].热力发电,2022,51(10):138-144.  
LIU Wenfeng, LI Ang. Three-step composite photovoltaic MPPT algorithm based on IP&O-IBSO[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 138-144.
- [20] KERMADI M, SALAM Z, AHMED J, et al. An effective hybrid maximum power point tracker of photovoltaic arrays for complex partial shading conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(9): 6990-7000.
- [21] JAVED S, ISHAQUE K, SIDDIQUI S A, et al. A simple yet fully adaptive PSO algorithm for global peak tracking of photovoltaic array under partial shading conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(6): 5922-5930.
- [22] 方胜利,侯贺军,马春艳,等.基于闭环模糊控制的扰动观察法MPPT研究[J].计算机仿真,2022,39(12):77-83.  
FANG Shengli, HOU Maojun, MA Chunyan, et al. Research on MPPT with perturb-observe method based on close-loop fuzzy control[J]. Computer Simulation, 2022, 39(12): 77-83.
- [23] ELTAMALY A M, AI-SAUD M S, ABO-KHALIL A G. Performance improvement of PV systems' maximum power point tracker based on a scanning PSO particle strategy[J]. Sustain Ability, 2020, 12(3): 1185.
- [24] 张永革,石季英,张文,等.复杂遮阴条件下光伏系统MPPT控制改进PSO算法仿真研究[J].中国电机工程学报,2014,34(增刊1):39-46.  
ZHANG Yongge, SHI Jiying, ZHANG Wen, et al. Research of improved PSO in MPPT control of PV systems under complex shading condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(Suppl.1): 39-46.

(责任编辑 杜亚勤)