

DOI: 10.7667/PSPC180415

# 基于改进 CPSO 的动态阴影环境下光伏 MPPT 仿真研究

葛双冶, 杨凌帆, 刘倩, 周杭霞

(中国计量大学, 浙江 杭州 310016)

**摘要:** 动态阴影下, 传统最大功率点追踪(MPPT)算法易陷入局部极值, 而常规粒子群(PSO)算法实现的 MPPT 控制易给系统带来较大的振荡。针对上述问题, 提出一种自适应精英策略改进混沌粒子群(AEM-CPSO)算法的 MPPT 控制策略。该算法对粒子前三次迭代进行混沌搜索, 使粒子在初始状态具有全局遍历性。自适应精英策略运用于粒子搜索后期, 用于缓解算法后期振荡的问题。仿真结果表明, AEM-CPSO 算法在全局搜索性, 追踪速度以及暂态稳定性都优于传统方法。

**关键词:** 动态阴影; 最大功率点追踪; 粒子群算法; 自适应精英策略; 混沌搜索

## Research on photovoltaic MPPT simulation under dynamic shadow environment based on modified CPSO

GE Shuangye, YANG Lingfan, LIU Qian, ZHOU Hangxia  
(China Jiliang University, Hangzhou 310016, China)

**Abstract:** Under the dynamic shadow, the traditional MPPT algorithm is easy to fall into the local extremum, while the MPPT control implemented by the conventional Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is easy to introduce a large shock to the system. To solve the problems above, an adaptive MPPT control strategy based on the improved Chaotic Particle Swarm Optimization (AEM-CPSO) algorithm is proposed. The algorithm performs chaotic search on the first three iterations of the particle, which makes the particle have global ergodicity in the initial state. The adaptive elite strategy is used in the late phase of particle search to mitigate the problem of late oscillation of the algorithm. Simulation results show that AEM-CPSO algorithm is superior to traditional methods in global search, tracking speed and transient stability.

This work is supported by Basic Public Benefit Research Program of Zhejiang Province (No. LGF18F020017).

**Key words:** dynamic shadow; maximum power point tracking; particle swarm optimization; adaptive elite mutation; chaotic search

## 0 引言

作为可再生清洁能源, 光伏发电已成为新能源研究的主要方向。随着太阳辐射强度的改变, 光伏阵列输出特性曲线呈非线性<sup>[1]</sup>。由于光伏组件受外界光线和温度等因素变化的影响, 致使  $P-U$  曲线呈多峰特性。因此, 如何避免陷入局部极值, 使系统追踪到全局最大功率点(Global Maximum Power Point, GMPP)是光伏发电高效率应用需要解决的一个重要技术。

近几年国内外学者对 MPPT 追踪问题开展了大量的研究工作。对传统的扰动观察法(Perturb and Observe, P&O)和电导增量法(Incremental Conductance Method, INC)等经典算法的改进使其适用于遮阴情况; 对智能算法进行优化使其适用于光伏阵列(Maximum Power Point Tracking, MPPT)的寻优。文献[2]对光伏组件所处光照情况进行分类讨论, 对均匀光照情况下直接使用 P&O 算法对最大功率点进行追踪, 对遮阴情况使用烟花算法对最大功率点进行追踪, 该方法增加的 MPPT 控制的多样性, 但需通过系统预先判断使用哪种方法, 使得系统时间开销太大, 从而无法做到 GMPP 的实时准确追踪。文献[3]提出一种检验算法结合 P&O 的方法, 在使用

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目资助(LGF18F020017)

变步长 P&O 算法之前, 通过检查算法比较现有的峰值点来确定最大值点, 进行 GMPP 搜索, 这种方法最大的缺点在于检查算法需要对曲线近 100% 部分进行扫描, 所以收敛速度很慢。文献[4]对多遮阴情况下光伏阵列输出的多峰  $P-U$  特性曲线进行分段处理, 提出一种每段内斜率不变的特性, 找出 GMPP 所在的分段后用 P&O 算法进行跟踪, 这种算法存在对全局最大功率点分段判断失误的风险, 容易陷入局部极值。文献[5]提出一种通过分数短路电流 (FSCC) 改进的 P&O 方法, 该方法能对特定环境得到令人满意的结果。文献[6]提出一种不完全微分法改进的 P&O 算法, 该方法有效改善传统 P&O 扰动步长判断函数中的高频干扰。文献[7]提出一种自适应 P&O 优化 MPPT 的控制算法, 该算法提高搜索精度和收敛时间, 但无法在遮阴情况下搜索到 GMPP。以上方法均无法避免 P&O 算法收敛处振荡的缺点。

文献[8]提出一种使用改进模糊控制的 MPPT 控制方法, 该方法控制效果好, 响应速度快, 但遮阴情况下容易陷入局部极值, 无法搜索到 GMPP。文献[9]提出一种斐波那契序列追踪阵列 GMPP 的方法, 但该方法无法在遮阴情况准确追踪最大功率点。文献[10]提出使用抛物线法追踪 GMPP 的方法, 通过建立 Lambert 函数, 获得  $P-U$  输出特性, 然后对该方程求解最大值的方式追踪 GMPP。文献[11]提出一种混沌改进猫群的 MPPT 控制方法, 该方法证实了混沌优化可以改善算法全局搜索能力的不足。文献[12]运用变尺度混沌搜索算法对 MPPT 控制, 该方法全局搜索效果好, 运用二次载波强化算法的局部搜索能力。文献[13]提出一种混合蛙跳算法, 该算法能够有效地提高最大功率点的追踪效率, 但算法收敛后有振荡, 从而造成功率损失。文献[14]提出使用 PSO 算法优化 MPPT 的控制方法, 但该方法对于遮阴情况下无法正确追踪 GMPP。文献[15]中提出一种基于  $\beta$  参数的变步长 MPPT 算法研究。文献[16]提出一种 PSO 算法结合爬山法的一种 MPPT 控制方式, 该方法也无法避免收敛后振荡的缺点。文献[17]提出一种线性重启策略改进 PSO 的 MPPT 控制方法, 该方法可有效优化 PSO 算法收敛后振荡的弊端, 但该方法不能避免 PSO 算法早熟的缺点。

本文提出了一种 AEM-CPSO 算法, 首先, 利用混沌序列初始化粒子位置, 使粒子群算法在初期具有全局多样性; 然后, 对粒子的前三次迭代进行混沌迭代使粒子具有全局遍历性; 最后, 对每次迭代的最优值进行自适应精英扰动, 使算法能够跳出

局部极值并加快算法的追踪效率和精度。

## 1 光伏阵列输出特性

为接近工程实际, 考虑光伏材料的本身特性, 可建立光伏电池的等效模型如图 1 所示<sup>[2-5,18-20]</sup>。

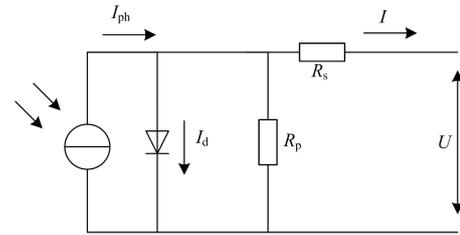


图 1 光伏电池等效模型

Fig. 1 Photovoltaic cell equivalent model

根据基尔霍夫电流定律, 对于图 1 所示的电路模型可得电流电压以及功率电压关系为

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U + R_s I)}{akT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} \quad (1)$$

$$P = \left\{ I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left[ \frac{q(U + R_s I)}{akT} \right] - 1 \right] - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} \right\} U \quad (2)$$

式中:  $I_{ph}$  为光生电流;  $I$  为光伏电池输出电流;  $R_s$  为光伏电池串联电阻;  $R_p$  为光伏电池并联电阻;  $I_0$  为 P-N 结反向饱和电流;  $q$  为电子电荷常数;  $a$  为二极管理想常数;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为 P-N 结温度<sup>[2-3]</sup>。

本文采用的光伏组件型号为哈博(HABO175), 单片组件参数见表 1。

表 1 哈博(HB175)组件参数

Table 1 Parameters of Habo (HB175) component

Maximum power	175 W
Nominal open circuit voltage ( $V_{ocn}$ )	44.2 V
Maximum power voltage ( $V_{mp}$ )	35.4 V
Nominal short circuit current ( $I_{scn}$ )	5.29 A
Maximum power current ( $I_{mp}$ )	4.95 A

标准工作情况下(环境温度为  $25^\circ\text{C}$ , 辐射为  $1000\text{ W/m}^2$ ), 组件输出的  $I-U$  和  $P-U$  特性曲线如图 2 所示。在特定的光照强度和温度下, 光伏特性曲线呈明显的对称性和非线性, 但组件存在唯一最大功率点<sup>[20]</sup>。组串式的输出电压为单串组件输出电压, 输出电流是各串联光伏组件输出电流相加。当所有组件接收相同太阳辐射量时,  $P-U$  特性曲线具

有唯一峰值;而当组件接收非均匀光照时  $P-U$  特性曲线呈多峰值, 峰的个数取决于组件所接收光照辐射不同的个数<sup>[1-3]</sup>。

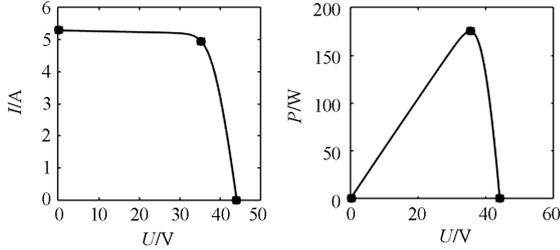


图 2 光伏组件输出特性曲线

Fig. 2 Photovoltaic cell output characteristic curve

## 2 传统的粒子群算法

PSO 算法是基于群体认知行为提出的迭代搜索算法, 具有简单的表达形式, 同时又具有较好的全局搜索能力<sup>[21-23]</sup>。PSO 迭代算法可以用下式表示。

$$\begin{cases} \Delta u_i(n+1) = \omega \cdot \Delta u_i(n) + c_1 r_1 [U_{imax} - u_i(n)] + \\ c_2 r_2 \cdot [U_{Gmax} - u_i(n)] \\ u_i(n+1) = u_i(n) + \Delta u_i(n+1) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_{imax} = u_i(n), \dots, f[u_i(n)] > f[U_{imax}] \\ U_{Gmax} = u_i(n), \dots, f[u_i(n)] > f[U_{Gmax}] \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\omega \in (0,1)$  为惯性系数;  $c_1, c_2 \in (0,2)$  为认知系数;  $r_1, r_2 \in (0,1)$  为随机系数;  $u_i(n), \Delta u_i(n)$  为第  $i$  个工作点的电压和变化步长;  $U_{imax}$  为工作点  $i$  经历的最大功率点电压;  $U_{Gmax}$  为全局最大功率点电压;  $f(x)$  为功率函数<sup>[24]</sup>。由式(4)可知, 当粒子距离最大功率点越远的时候速度越大, 而当粒子趋近于最大功率点的时候速度越小。当速度接近 0 时, 由于惯性因子  $\omega$  保持了粒子运动惯性, 所以粒子聚集于全局最大功率点附近振荡, 若此时环境突变(环境温度、光照强度、遮阴变化), 而各粒子由于已经聚集于旧的最大功率点附近而失去了多样性, 可能会陷入局部极值, 造成功率损失<sup>[23,25-27]</sup>。

## 3 AEM-CPSO 算法

### 3.1 混沌变量与迭代方式

为了能够让 PSO 算法避免早熟且具有很好的全局搜索性, 本文根据粒子群算法的优缺点, 使用混沌优化算法来提高粒子多样性的办法, 使得 PSO 算法在初始状态能获得更好的多样性和全局遍历性<sup>[11-12]</sup>。在混沌优化算法中, 通常选择 Logistic 映射来产生混沌序列, 其数学表现形式为<sup>[28]</sup>

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n); n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为控制参数, 当  $\mu = 4$  时, 系统处于完全混沌状态;  $x_n$  在  $(0, 1)$  内是遍历的。初始值为 0.6 时的 Logistic 映射分叉图如图 3。

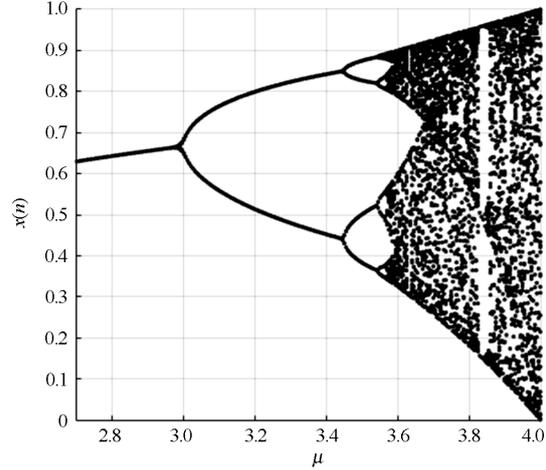


图 3 Logistic 映射的分叉图

Fig. 3 Bifurcation diagram of Logistic mapping

### 3.2 自适应精英变异策略(AEM)

为进一步增强 PSO 算法的全局搜索性, 本文引入自适应精英变异策略(Adaptive Elite Mutation, AEM), 在算法后期帮助粒子跳出局部极值, 加快算法收敛速度, 减小收敛振荡。本文使用文献[29]中提出如式(6)的 AEM 模型。

$$g_{best}^* = g_{best} + F(m) \quad (6)$$

式中,  $g_{best}$  为精英种子粒子, 在每一代种群进化过程中, 根据式(6)对  $g_{best}$  做自适应变异操作。变异后的新个体  $g_{best}^*$ , 若其适应度值优于原  $g_{best}$  的适应度值, 则令  $g_{best} = g_{best}^*$ 。

$$F(m) = \frac{1}{m} \arctan(m) + C \quad (7)$$

$$C = \begin{cases} 1.5, & st\_d < 10^{-2} \\ 1.0, & 10^{-2} \leq st\_d < 10^{-1} \\ 0.5, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $F(m)$  为扰动函数;  $C$  为待定常量, 如式(8)所示它随着适应度标准差  $st\_d$  的变化自适应变化;  $st\_d$  为适应度的标准差。变量  $m$  根据式(9)自适应控制变异大小。

$$m(i) = \exp\left(-\frac{\beta t}{t_{max}}\right) \left(1 - \frac{r(i)}{r_{max}}\right) \quad (9)$$

$$r(i) = |g_{best}(i) - avg\_p_{best}(i)| \quad (10)$$

$$avg\_pg_{best}(i) = \frac{\sum_{j=1}^N pg_{best}[j][i]}{N} \quad (11)$$

式(9)一式(11)中:  $i=1,2,\dots,D$  ( $D$  为维数, 本文中取值为 1);  $\beta$  为常数, 本文取值为 10;  $t$  为迭代次数,  $t_{max}$  为最大迭代次数;  $r(i)$  是所有粒子的  $p_{best}$  的平均值  $avg\_p_{best}$  到  $g_{best}$  在第  $i$  维上的距离;  $r_{max}$  是各维度中最大距离;  $p_{best}[j][i]$  是第  $j$  个粒子在第  $i$  维上的位置。

根据上述公式分析: 当粒子群中各粒子在当前解空间中进行着粗搜索, 即粒子飞行速度较大时(算法运行初期), 粒子搜索行为获得较大的变量量, 可对种群当前最优解造成足够大的变异扰动, 从而扩大解空间; 而随着迭代搜索的深入, 精英扰动的变量量逐渐减小, 保证优化结果平滑收敛到最优值(减少收敛处振荡), 从而加快算法收敛速度<sup>[30]</sup>。

### 3.3 自适应精英变异混沌粒子群算法

本文根据 MPPT 的优化特性提出一种自适应精英变异的混沌粒子群算法(AEM-CPSO), 算法采用 Logistic 映射产生混沌序列对粒子进行初始化, 并对粒子前三次迭代搜索进行混沌搜索, 并结合 AEM 对精英粒子进行变异扰动操作。算法 1 用伪代码描述了 AEM-CPSO 算法的基本步骤。

算法 1 AEM-CPSO 算法基本步骤如下。

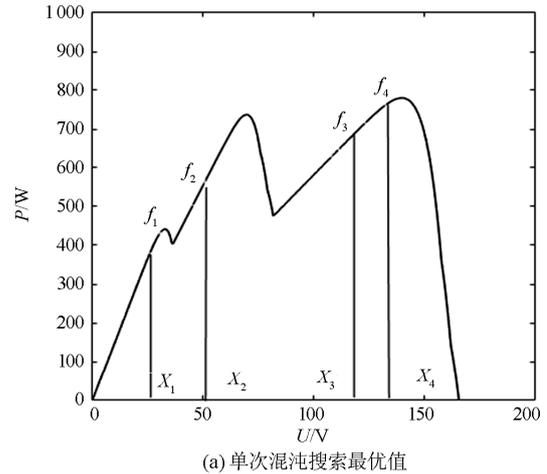
- 1) 混沌序列初始化  $N$  个粒子;
- 2) While(未达到终止条件)do
- 3) For  $i=1$  to  $N$  do
- 4) for  $i=1$  to 3 do
- 5) 根据式(5)对粒子进行混沌迭代搜索;
- 6) 更新  $p_{best}$  和  $g_{best}$ ;
- 7) End for
- 8) else
- 9) 根据式(3)获得当前粒子的速度;
- 10) 并根据式(4)更新粒子位置;
- 11) 更新  $p_{best}$  和  $g_{best}$ ;
- 12) end for
- 13) 对当前获得  $g_{best}$  的采用式(7)进行变异操作;
- 14) if  $fitness(g_{best}) < fitness(g_{best}^*)$  then
- 15) 令  $g_{best}^*$  替代  $g_{best}$ ;
- 16) end if
- 17) end while

AEM-CPSO 算法是在传统 PSO 算法的基础上, 使用混沌序列对算法进行初始化, 并加入 AEM 改进的智能算法。该算法前期搜索能力较强, 并对当

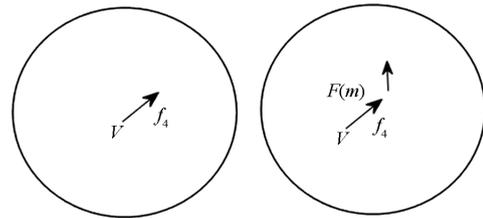
前迭代得到的  $g_{best}$  进行变异操作, 使算法后期搜索更具灵活性, 能够跳出局部解。因此, AEM-CPSO 算法具有良好的全局遍历性、精度和效率较高的优点。

## 4 AEM-CPSO 算法 MPPT 控制策略

自适应精英混沌粒子群算法(AEM-CPSO)在光伏发电 MPPT 中的控制策略如图 4 所示。图 4(a)为标准环境温度下(25°C), 选定固定外界遮阴环境下光伏组件输出  $P-U$  曲线。



(a) 单次混沌搜索最优值



(b) 单次 PSO 迭代和 AEM 变异

图 4 单次 AEM-CPSO 算法迭代搜索

Fig. 4 Single AEM-CPSO algorithm iterative search

其中,  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  和  $f_4$  为一次混沌迭代各粒子所处的最优解。 $f_4$  为经过一次混沌迭代后所得的当前最优解, 令  $f_4$  为当前  $g_{best}$ ; 然后对以  $f_4$  为中心的范围进行一次粒子群迭代, 图 4(b)展示的是一次粒子群迭代, 即当前  $g_{best}$  为  $f_4 + V$ ; 最后, 对当前  $g_{best}$  进行 AEM 变异操作。可以看出, 使用 AEM 策略可以加快粒子群算法收敛速度。

## 5 仿真结果与分析

为了验证本文提出的 AEM-CPSO 算法的有效性, 分别对静态遮阴和动态遮阴两种情况对算法性能进行测试。将本文中算法(AEM-CPSO)与基本的 PSO 算法、混沌粒子群算法(CPSO)分别对静态和动态环境进行对比。仿真的实验环境基于 Windows10

操作系统, Matlab2017a 仿真平台, 使用 inter core i7-4700mq 处理器的计算机进行。仿真设定粒子数目  $N$  为 4,  $\omega \in (0.4, 0.9)$ , 迭代次数为 40, 混沌迭代次数 3 次。便于精确比较, PSO 算法、CPSO 算法和 AEM-CPSO 算法以上参数设置相同。

### 5.1 静态阴影

假设光伏阵列处于静态遮阴状态, 将以上 3 种应用于 MPPT 优化控制, 在以上提到的硬件平台进行仿真, 输出特性如图 5 所示。

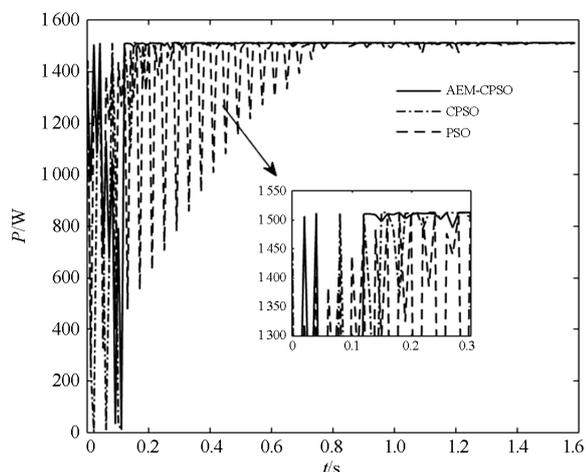


图 5 静态阴影下基于 AEM-CPSO、PSO 和 CPSO 的 MPPT 控制效果对比

Fig. 5 Contrast effect of MPPT control based on PSO, AEM-CPSO and CPSO of PV array under static shadowing

从图 5 可以看出, 采用 AEM-CPSO 控制算法在 0.15 s 时收敛于最大功率 1513 W, 而 PSO 和 CPSO 控制算法分别需要 0.79 s 和 0.32 s, 而且 PSO 和 CPSO 算法在收敛后可以看出有明显的振荡, AEM-CPSO 算法则相对平缓, 由此可以看出 AEM-CPSO 算法具有更好的稳定性。

### 5.2 动态阴影

上文仅对静态遮阴情况下验证 AEM-CPSO 算法的有效性。但阵列接收太阳辐射并非均匀不变, 因此还需考虑光照辐射强度突变情况下 AEM-CPSO 算法的有效性。具体流程如下: 光伏组件由均匀光照情况动态变化为静态遮阴情况。太阳辐射突变, 其  $P-T$  曲线如图 6 所示。仿真时间为 1.6 s 时, 光伏组件接收光照辐射由均匀光照 ( $800 \text{ W/m}^2$ ) 突变为遮阴情况。图 6 还显示光照突变时, 3 种算法的 MPPT 控制跟踪波形。均匀光照情况下 AEM-CPSO 算法需要 0.13 s 收敛于最大功率 1609 W 处, 而 PSO 和 CPSO 算法分别需要 0.82 s 和 0.22 s 光照环境突变, AEM-CPSO 算法达到稳定需要 0.17 s, 而 PSO 和 CPSO 算法分别需要 0.85 s 和

0.65 s。说明动态环境下, 基于 AEM-CPSO 算法的 MPPT 控制具有响应快、暂态过程短的优点, 可以很好地适应复杂多变的环境。

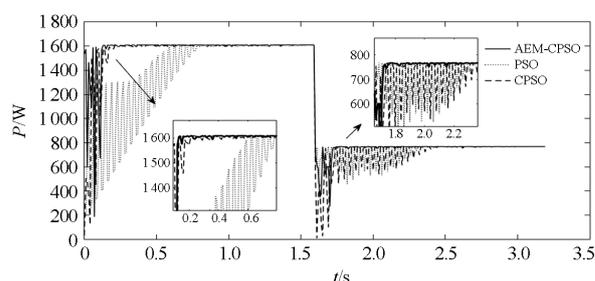


图 6 动态阴影下基于 AEM-CPSO、PSO 和 CPSO 的 MPPT 控制效果对比

Fig. 6 Contrast effect of MPPT control based on AEM-CPSO, PSO and CPSO of PV array under dynamic shadowing

## 6 结论

本文提出了一种自适应精英变异改进的混沌粒子群(AEM-CPSO)算法, 并将其运用在遮阴情况下的光伏 MPPT 控制系统, 通过仿真实验得到以下几个结论:

- 1) AEM-CPSO 算法能够很好地适应动态环境, 可以有效地实现最大功率点追踪。
- 2) AEM-CPSO 算法能够有效地解决 PSO 算收敛后振荡的缺点。
- 3) AEM-CPSO 算法能够有效地改进 PSO 算法收敛速度慢、易早熟和易陷入局部极值等缺点。

## 参考文献

- [1] BAI J, CAO Y, HAO Y, et al. Characteristic output of PV systems under partial shading or mismatch conditions[J]. Solar Energy, 2015, 112: 41-54.
- [2] MANICKAM C, RAMAN G P, RAMAN G R, et al. Fireworks enriched P&O algorithm for GMPPT and detection of partial shading in PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4432-4443.
- [3] ALIK R, JUSOH A. Modified perturb and observe (P&O) with checking algorithm under various solar irradiation[J]. Solar Energy, 2017, 148: 128-139.
- [4] BALASANKAR R, ARASU G T, CHRISTY M R J S. A global MPPT technique invoking partitioned estimation and strategic deployment of P&O to tackle partial shading conditions[J]. Solar Energy, 2017, 143: 73-85.
- [5] SHER H A, MURTAZA A F, NOMAN A, et al. A new sensorless hybrid MPPT algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4):

- 1426-1434.
- [6] 党选举, 杨阳, 姜辉, 等. 基于不完全微分的自适应步长扰动观察法MPPT控制[J]. 太阳能学报, 2016, 37(12): 3022-3029.  
DANG Xuanju, YANG Yang, JIANG Hui, et al. MPPT control based on adaptive step size perturbation based on incomplete differentiation[J]. Chinese Journal of Solar Energy, 2016, 37(12): 3022-3029.
- [7] 王书征, 李先允. 一种新型自适应扰动观察法在光伏发电MPPT策略中的应用[J]. 太阳能学报, 2016, 37(9): 2393-2400.  
WANG Shuzheng, LI Xianyun. Application of a novel adaptive perturbation observation method in photovoltaic power generation MPPT strategy[J]. Chinese Journal of Solar Energy, 2016, 37(9): 2393-2400.
- [8] 范钦民, 闫飞, 张翠芳, 等. 基于模糊控制的光伏MPPT算法改进[J]. 太阳能学报, 2017, 38(8): 2151-2158.  
FAN Qinmin, YAN Fei, ZHANG Cuifang, et al. Improvement of photovoltaic MPPT algorithm based on fuzzy control[J]. Chinese Journal of Solar Energy, 2017, 38(8): 2151-2158.
- [9] Maximum power point tracking of PV systems under uniform irradiation condition based on Fibonacci sequence[C] // International Conference on Management Science, 2010.
- [10] 卫东, 赵磊, 赖小龙. 基于抛物线极值求解的太阳电池最大功率点计算与跟踪方法[J]. 太阳能学报, 2016, 37(8): 1925-1930.  
WEI Dong, ZHAO Lei, LAI Xiaolong. Maximum power point calculation and tracking method for solar cells based on parabola extremum[J]. Chinese Journal of Solar Energy, 2016, 37(8): 1925-1930.
- [11] 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.  
NIE Xiaohua, WANG Wei. Chaos improved cat-group algorithm and its application in photovoltaic MPPT[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6103-6110.
- [12] 王立华, 魏学业, 孟一飞, 等. 基于变尺度混沌优化搜索的局部阴影条件下光伏阵列MPPT研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017(7): 1790-1796.  
WANG Lihua, WEI Xueye, MENG Yifei, et al. Study on photovoltaic array MPPT under locally shadowed condition based on mean-scale chaotic optimization search[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017(7): 1790-1796.
- [13] ISHAQUE K, SALAM Z, TAHERI H, et al. Maximum power point tracking for PV system under partial shading condition via particle swarm optimization[C] // 2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), April 18-19, 2011, Johor Bahru, Malaysia: 5-9.
- [14] 李星硕, 文辉清. 基于 $\beta$ 参数的变步长MPPT控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 58-63.  
LI Xingshuo, WEN Huiqing. Research on variable step size MPPT control based on  $\beta$  parameters[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 58-63.
- [15] 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.  
WANG Yu, HU Renjie. MPPT algorithm based on particle swarm optimization and hill-climbing method[J]. Chinese Journal of Solar Energy, 2014, 35(1): 149-153.
- [16] 丁爱华, 卢子广, 卢泉, 等. 基于改进PSO的复杂环境下光伏MPPT控制[J]. 太阳能学报, 2015, 36(2): 408-413.  
DING Aihua, LU Ziguang, LU Quan, et al. Photovoltaic MPPT control in complex environment based on improved PSO[J]. Chinese Journal of Solar Energy, 2015, 36(2): 408-413.
- [17] 吴志程, 江智军, 杨晓辉. 一种基于功率闭环控制的改进全局MPPT方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 57-62.  
WU Zhicheng, JIANG Zhijun, YANG Xiaohui. An improved global MPPT method based on power closed loop control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 57-62.
- [18] 陈杏灿, 程汉湘, 彭湃, 等. 光伏电池的建模与光伏发电系统的仿真[J]. 广东电力, 2016, 29(2): 25-29, 58.  
CHEN Xingcan, CHENG Hanxiang, PENG Pai, et al. Modeling of photovoltaic cells and simulation of photovoltaic power generation systems[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(2): 25-29, 58.
- [19] 王琦, 郑丹丹, 温正庚. 局部阴影下光伏阵列建模对比分析与改进[J]. 陕西电力, 2017, 45(5): 13-16, 63.  
WANG Qi, ZHENG Dandan, WEN Zhenggeng. Comparative analysis and improvement of photovoltaic array modeling under local shadow[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(5): 13-16, 63.
- [20] 原敬磊, 赵李宏, 李明, 等. 光伏发电系统功率输出控制模式研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 91-95.  
YUAN Jinglei, ZHAO Lihong, LI Ming, et al. Research on power output control mode of photovoltaic power generation system[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 91-95.
- [21] 郑伟, 陈仕彬, 梁福波, 等. 基于PSO-PSA的光伏系统最大功率点跟踪技术[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 76-84.  
ZHENG Wei, CHEN Shibin, LIANG Fubo, et al. Maximum

- power point tracking technology for photovoltaic systems based on PSO-PSA[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 76-84.
- [22] 张经纬, 归一数, 康英伟, 等. 基于改进粒子群算法的锅炉再热蒸汽温度模型辨识[J]. 热力发电, 2017, 46(7): 72-78.  
ZHANG Jingwei, GUI Yishu, KANG yingwei, et al. Model identification of boiler reheat steam temperature based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(7): 72-78.
- [23] 李善寿, 张兴, 张鸿恺, 等. 基于功率闭环控制与 PSO 算法的全局 MPPT 方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4809-4816.  
LI Shanshou, ZHANG Xing, ZHANG Hongkai, et al. Global MPPT method based on power closed-loop control and PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4809-4816.
- [24] 王秀云, 田壁源. 基于自适应可控开关矩阵的光伏阵列优化配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 77-83.  
WANG Xiuyun, TIAN Biyuan. Optimized configuration strategy of photovoltaic array based on adaptive controllable switch matrix[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 77-83.
- [25] 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. Simulation study of improved PSO algorithm for MPPT control of photovoltaic system under complicated shading condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 39-46.
- [26] 贺禹强, 刘故帅, 肖异瑶, 等. 基于改进 GA-PSO 混合算法的变电站选址优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 143-150.  
HE Yuqiang, LIU Gushuai, XIAO Yiyao, et al. Optimization of substation location based on improved GA-PSO hybrid algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 143-150.
- [27] 朱艳伟, 石新春, 但扬清, 等. 粒子群优化算法在光伏阵列多峰最大功率点跟踪中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 42-48.  
ZHU Yanwei, SHI Xinchun, DAN Yangqing, et al. Application of particle swarm optimization algorithm in multi-peak maximum power point tracking of photovoltaic arrays[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 42-48.
- [28] 魏薇, 史林军, 赫卫国, 等. 含 STATCOM 的风电场级多 PI 控制器参数优化[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 69-76.  
WEI Wei, SHI Linjun, HE Weiguo, et al. Parameter optimization of wind farm multi-PI controller with STATCOM[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 69-76.
- [29] 董文永, 康岚兰, 刘宇航, 等. 带自适应精英扰动及惯性权重的反向粒子群优化算法[J]. 通信学报, 2016, 37(12): 1-10.  
DONG Wenyong, KANG Lanlan, LIU Yuhang, et al. Inverse particle swarm optimization algorithm with adaptive elite perturbation and inertia weight[J]. Acta Telecom, 2016, 37(12): 1-10.
- [30] 康岚兰, 董文永, 宋婉娟, 等. 无惯性自适应精英变异反向粒子群优化算法[J]. 通信学报, 2017, 38(8): 66-78.  
KANG Lanlan, DONG Wenyong, SONG Wanjuan, et al. Non-inertial adaptive elite variation inverse particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Communications, 2017, 38(8): 66-78.

收稿日期: 2018-04-13; 修回日期: 2018-11-02

作者简介:

葛双冶(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电与并网技术; E-mail: geshuangye@163.com

周杭霞(1963—), 女, 通信作者, 硕士生导师, 研究方向为模式识别与数据挖掘。E-mail: zhx@cjlu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)