

## 粒子群算法与电导增量法的双级最大功率点跟踪控制

翟小军<sup>1</sup>, 杜 衡<sup>1</sup>, 刘建义<sup>2</sup>, 马大中<sup>1</sup>, 张晨光<sup>1</sup>

- (1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
2. 浙江众合科技股份有限公司, 浙江 杭州 310051)

**摘 要:** 通过对光伏发电最大功率点跟踪系统的研究, 提出了 PSO 与电导增量法的双级最大功率跟踪(MPPT)控制算法。该算法能很好地解决传统电导增量法在采用较大跟踪步长时跟踪精度差, 采用较小跟踪步长时跟踪速度慢, 动态跟踪过程中功率震荡大的问题。所提出的算法包含最优占空比预测和最大功率点跟踪两个阶段。最优占空比预测阶段采用改进的 PSO 算法搜索最大功率点附近的工作电流和工作电压, 然后根据搜索到的电压和电流计算最大功率点附近的最优占空比, 该阶段能解决传统的电导增量法在采用较小步长时存在的跟踪速度慢、功率震荡大等问题; 在最大功率点跟踪阶段接收上一阶段所搜索到的最优占空比, 当电导增量法所产生的占空比接近最优占空比时, 采用电导增量法进行控制, 否则采用上一环节的最优占空比进行控制。仿真实验结果表明, PSO 与电导增量法的双级 MPPT 控制算法跟踪速度快, 跟踪精度高, 功率震荡小, 能很好地实现最大功率点跟踪。

**关键词:** 粒子群; 电导增量法; 最大功率点跟踪; 占空比

**中图分类号:** TM615 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0617009

## Dual stage MPPT control method of PSO and INC

Zhai Xiaojun<sup>1</sup>, Du Heng<sup>1</sup>, Liu Jianyi<sup>2</sup>, Ma Dazhong<sup>1</sup>, Zhang Chenguang<sup>1</sup>

- (1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Zhejiang United Mechanical & Electrical Co., Ltd, Hangzhou 310051, China)

**Abstract:** Studied the maximum power point tracking system, dual stage Maximum Power Point Tracking (MPPT) method of Particle Swarm Optimization(PSO) and incremental conductance algorithm was proposed. The proposed method can solve the problems of incremental conductance algorithm's worse tracking precision under large step and slower tracking speed and larger power fluctuation in the dynamic tracking process under small step tracking. The proposed method consists of two stages: the stage of optimal duty prediction and the stage of MPPT. The stage of optimal duty prediction uses improved PSO to search the working voltage and current near the maximum power point of the photovoltaic cells, next calculates the optimal duty according to the searched voltage and current. This stage can solve the problems of slower tracking speed and larger power fluctuation under small step tracking. The optimal duty is received and the system is controlled by the incremental conductance algorithm when the duty generated by the incremental

收稿日期: 2015-10-12; 修订日期: 2015-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(61203086); 教育部博士点课题新教师基金(20120042120042);

教育部基础科研业务费资助项目(N130404009); 国家自然科学基金重点基金(61433004)

作者简介: 翟小军(1991-), 男, 硕士生, 主要从事电力系统方面的研究。Email: 441879735@qq.com

导师简介(通讯作者): 马大中(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事电力系统方面的研究。Email: madzmadz4230@gmail.com

conductance algorithm is closed to the optimal duty, or the optimal duty is used to control system in the stage of MPPT. Simulation results show that the proposed method can acquire faster tracking speed, have better tracking precision, and reduce the power fluctuation in the dynamic tracking process. So the proposed method can achieve the maximum power point tracking bitterly.

**Key words:** particle swarm optimization (PSO); incremental conductance algorithm (INC); maximum power point track (MPPT); duty

## 0 引言

近年来,随着能源危机和环境污染的日益严重,太阳能以其清洁无污染、取之不尽、用之不竭的特点越来越受到人们的重视。太阳能电池输出特性具有明显的非线性,易受到外部环境如日照强度、环境温度的影响,只有在某一电压下才能输出最大功率,这时光伏阵列的工作点就达到了输出功率曲线的最高点,称之为最大功率<sup>[1]</sup>。目前的光伏电池的转换效率比较低,为了充分利用太阳能,对光伏电池进行最大功率点跟踪(MPPT)显得非常重要<sup>[2]</sup>。

最大功率点跟踪控制有多种方法,其控制效果不尽相同,实现过程也大有区别。根据控制算法的特征和控制对象不同,可以将最大功率点跟踪技术分为基于参数选择的间接控制法、基于电压电流检测的直接控制法和基于现代控制理论的人工智能算法等。常用的直接控制算法有扰动观察法、电导增量法等,该类控制算法的精度较间接控制法高,能进行实时最大功率点跟踪控制,满足一般场合要求,因此在实际工程中应用最为广泛<sup>[3]</sup>。

扰动观察法的扰动步长选取十分关键,若使用较大的扰动步长,系统对外部条件变化的响应速度快,但在最大功率点(MPP)附近的功率波动较大;反之扰动步长较小,系统在 MPP 附近的功率波动较小,但动态响应速度较慢,因此固定步长扰动观察法的动态性能与稳态性能间存在矛盾<sup>[4]</sup>。

电导增量法是通过比较光伏电池阵列的瞬时电导和电导的变化量来实现 MPPT<sup>[5]</sup>。该方法虽然能够实现真正意义上的最大功率跟踪,但针对光照和温度在短时间内变化幅度较大时,很难同时满足跟踪精度和速度<sup>[6-7]</sup>。当采用较大的步长时,跟踪速度快,但是跟踪精度低,易产生电压振荡,降低了光伏系统的效率,而采用较小步长时,情况正好相反<sup>[8]</sup>。

文中针对电导增量法在采用较小步长时所存在的跟踪速度慢、动态跟踪过程功率波动较大等问题,提出了一种基于电导增量法的粒子群优化算法(PSO)最大功率点跟踪方法。实验结果表明,相比于传统的电导增量法,所提出的算法具有较快的跟踪速度,而且在动态跟踪过程的功率波动也有所减小,实现了从动态过程到稳态过程的平稳过渡。

## 1 光伏电池的数学模型和 MPPT

光伏电池的  $I-U$  特性曲线随外界光照强度和温度的变化而变化,其输出的电流-电压数学模型<sup>[7]</sup>为:

$$i_{pv} = I_g - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q}{AKT} U_{pv} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中:  $i_{pv}$  为输出电流;  $U_{pv}$  为输出电压;  $I_g$  为光生电流;  $K$  为玻耳兹曼常数;  $T$  为电池表面温度;  $A$  为二极管因子;  $I_{sat}$  为饱和电流。

根据光伏电池的电流-电压数学模型,在 Matlab/Simulink 中建立光伏电池的仿真模型,并在环境温度为 25 °C、不同光照强度下进行仿真,仿真结果如图 1 所示。

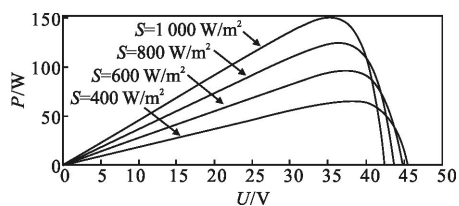


图 1 光伏电池的  $U-P$  特性曲线

Fig.1  $U-P$  curves of solar array of the different illumination intensities

从图 1 中可以看出,在不同的光照强度下,光伏电池的输出功率是不同的;在一定的光照强度下,当输出电压为某一特定值时,光伏电池的输出功率达到最大值,这个特定的最佳工作点称为最大功率点。因此,要提高光伏系统的整体效率、降低电能成本,一个最重要的途径就是实时调整光伏模块的工作

点,使之始终工作在最大功率点附近,这一过程称为 MPPT 技术<sup>[9]</sup>。目前国内外提出了很多关于最大功率点跟踪的方法,有恒定电压法、扰动观察法、电导增量法、阻抗匹配法、以及智能控制算法等,其中最为传统和普遍采用的是扰动观察法和电导增量法。扰动观察法控制方法简单,能够提高太阳能的利用率,但是步长是固定的,步长设置不合适就会导致输出效率低或系统震荡,并且在日照强度变化时会产生误判现象<sup>[10]</sup>。电导增量法以动态变化太阳能光伏电池输出电压来跟踪最大功率点,参考文献[8]指出当采用较大的步长时,跟踪速度快,但是跟踪精度低,易产生电压振荡,降低了光伏系统的效率,而采用较小步长时,情况正好相反。

## 2 PSO 与电导增量法的双级 MPPT 控制方法

PSO 与电导增量法的双级 MPPT 控制方法主要分为最优占空比预测和最大功率点跟踪两个环节。文中所提出的方法首先通过采集外界的光照强度和环境温度,生成当前环境下的  $I-V$ 、 $P-V$  特性曲线,然后利用 PSO 算法搜索最大功率点附近的工作电压和工作电流,根据搜索到的电压和电流计算最优占空比并将最优占空比送到下一环节即最大功率点跟踪环节;当最大功率点跟踪环节的电导增量法所产生的占空比接近最优占空比预测环节产生的最优占空比时,采用电导增量法进行控制,否则,采用最优占空比预测环节所产生的最优占空比对电路进行控制。

传统的电导增量法在采用较大的步长时,虽然跟踪速度较快,但是跟踪的精度差;跟踪步长较小时,虽然跟踪的精度高,但跟踪速度慢,动态过程功率震荡较大。而 PSO 与电导增量法的双级 MPPT 控制方法可以克服传统电导增量法的不足,具有跟踪速度快、动态跟踪过程功率波动小、跟踪精度高的特点。

PSO 算法采用“群体”与“进化”的概念,依据个体(粒子)的适应度进行操作。设:  $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$  为粒子  $i$  的当前所在位置;  $V_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$  为粒子  $i$  的当前飞行速度;  $P_i=(P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in})$  为粒子  $i$  所经历的最优位置。

设  $f(x)$  为目标函数,粒子  $i$  的最优位置由下式给出:

$$P_i(t+1)=\begin{cases} P_i(t), & f(X_i(t+1)) \geq f(P_i(t)) \\ X_i(t+1), & f(X_i(t+1)) \geq f(P_i(t)) \end{cases} \quad (1)$$

设在该种群中的粒子数为  $n$ , 群体中所有的粒

子所经历最优位置为  $P_g(t)$ , 如下式所示:

$$\begin{cases} P_g(t) \in \{P_0(t), P_1(t), \dots, P_n(t)\} \\ f(P_g(t)) = \min\{f(P_0(t))\} \\ f(P_1(t)), \dots, f(P_n(t)) \end{cases} \quad (2)$$

因此可以得到粒子群算法的核心迭代公式如下所示:

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 (P_i(t) - X_i(t)) + c_2 r_2 (P_g(t) - X_i(t)) \quad (3)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (4)$$

式中:  $t$  为迭代次数;  $i$  为粒子编号;  $\omega$  为惯性权值;  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子;  $r_1$ 、 $r_2$  为  $(0, 1)$  之间的随机数。公式(3)为速度更新方程,公式(4)为位置更新方程。

文中选择以电路的功率作为适应度函数。适应度函数的设置如下:

$$\text{fitness}(k) = I(k) \times U(k)$$

文中所提出的 PSO 与电导增量法的双级 MPPT 控制方法分为最优占空比预测环节和最大功率点跟踪环节。

最优占空比预测环节: 该环节采用粒子群算法进行最优占空比的预测, 首先采集外界的光照和温度信息, 利用光伏电池的电压-电流数学模型, 生成光伏电池的  $P-U$  特性曲线的拟合模型, 然后采用 PSO 算法进行最大功率点寻优, 取得最大功率点所对应的电压和电流; 利用电压、电流全局最优解计算控制电路所需占空比  $D^*$ ; 将预测到的最优占空比  $D^*$  送给最大功率点跟踪环节。

最大功率点跟踪环节: 先利用预测环节传来的最优占空比对电路进行控制, 当电导增量法的占空比接近预测环节的最优占空比时, 采用电导增量法对电路进行控制。

PSO 与电导增量法的双级 MPPT 控制方法由于预测的最优占空比和实际的最优占空比较接近, 所以文中所提出的算法在动态跟踪过程的功率波动较小, 可以实现从动态跟踪过程到稳态跟踪过程的平滑过渡, 因此文中所提出的算法不仅具有较快的跟踪速度, 而且由于采用较小的步长, 使得系统稳态时具有较高的稳态精度。

## 3 控制器的参数设置

因为 Boost 电路具有升压性质、储能电感位于升压侧、输入电流脉动小、输出容量大等特点, 所以

文中采用的直流/直流(DC/DC)转换器是 Boost 升压斩波电路。文中所设计的光伏发电最大功率点跟踪系统结构图如图 2 所示。其中,  $u$  为符号函数, 表征开关状态,  $u=0$  开关管断开,  $u=1$  开关管闭合;  $i$ 、 $i_L$ 、 $i_o$  分别为太阳能电池板输出电流、电感电流、负载电流。

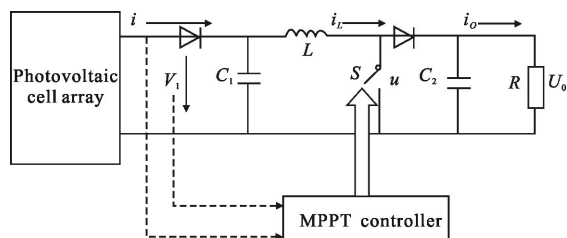


图 2 光伏发电最大功率点跟踪系统结构图

Fig.2 Maximum power point tracking system structure diagram

最优占空比预测环节的控制参数设置如下。

(1) 粒子数目: 粒子种群的规模为 50;

(2) 进化代数: 种群规模为 200, 控制电路占空比  $D$  的取值范围是  $[0, 1]$ , 当种群规模为 50 时, 经过 200 次迭代, 粒子搜索过的位置数  $S \approx 50 \times 200 = 10\ 000$ 。虽然粒子在搜索过程中可能出现对同一位置的多次搜索, 考虑到迭代后期粒子全部集中于最优值附近, 其

搜索精度完全可以达到 0.000 1;

(3) 粒子最大速度: 设置粒子最大速度为待搜索区域的 1/10;

(4) 惯性权值  $\omega$  与学习因子  $c$ : 结合经验一般设置  $\omega=0.8$ ,  $c_1=c_2=2$ ;

(5) 粒子空间的初始化: 设置搜寻空间为  $0.25 V_{oc} \sim V_{scmax}$ ;

(6) 适应度函数: 选择以电路的功率作为适应度函数。适应度函数的设置如下:

$$fitness(k) = I(k) \times U(k)$$

最大功率点跟踪环节控制参数设置如下:

① 系统采样周期: 0.000 1 s

② 电导增量法的步长: 0.000 1

#### 4 系统仿真模型的搭建和仿真结果分析

为了验证文中所提出的 PSO 与电导增量法的双级 MPPT 控制方法的有效性, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建了光伏发电最大功率点跟踪系统的仿真模型, 如图 3 所示。电路参数为:  $C_1=2\ 200\ \mu F$ ,  $C_2=22\ \mu F$ ,  $L=0.5\ mH$ ,  $R=0.5\ \Omega$ 。

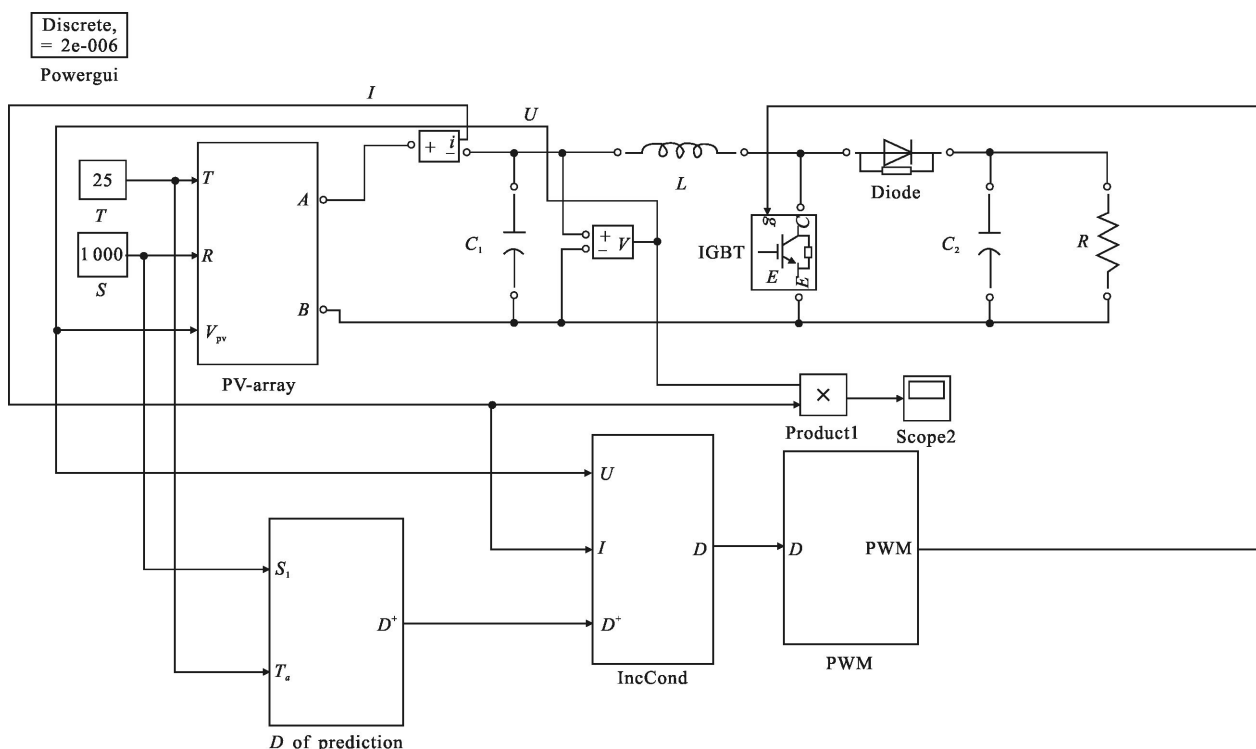


图 3 光伏发电最大功率点跟踪系统仿真模型

Fig.3 Simulation model of photovoltaic maximum power point tracking system

为了对比 PSO-IncCond 与 IncCond 的跟踪速度以及动态过程中的功率波动情况,文中将控制器的参数设置如下。

(1) 最优占空比预测环节:粒子数目为 50;迭代次数为 200;粒子最大速度为待搜索区域的 1/10;惯性权值  $\omega=0.8$ ;学习因子  $c_1=c_2=2$ ;粒子初始化空间为  $0.25 V_{oc} \sim V_{scmax}$ ;适应度函数为  $fitness(k)=I(k) \times U(k)$ 。

(2) 最大功率点跟踪环节:采样周期为  $0.0001 s$ ;步长为  $0.0001$ 。

在外界光照强度为  $1000 W \cdot m^{-2}$ ,环境温度为  $25^{\circ}C$ 的条件下进行仿真,仿真结果如图 4 所示。图中将 PSO-IncCond 和 IncCond 两种方法的光伏电池输出功率曲线放在一起。

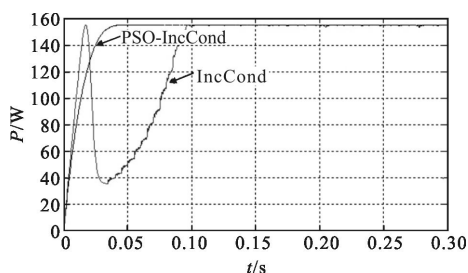


图 4 PSO-IncCond 与 IncCond 方法的功率曲线对比图

Fig.4 Output power curves of PSO-IncCond method and IncCond method

从图 4 中可以得到 PSO-IncCond 与 IncCond 方法的性能指标比较情况,如表 1 所示。

表 1 PSO-IncCond 与 IncCond 方法的性能指标对比  
Tab.1 Performance comparison of PSO-IncCond and IncCond method

	Tracking time /s	Tracking accuracy	Fluctuation of dynamic maximum power/W
PSO-IncCond	0.04	0.65%	1
IncCond	0.09	0.97%	117

从表 1 中可以看出,PSO-IncCond 的跟踪时间仅为  $0.04 s$ ,较传统的电导增量法具有较快的跟踪速度;PSO-IncCond 在动态过程中的最大功率波动为  $1 W$ ,相比于 IncCond 在动态过程中  $117 W$  的功率波动,表明 PSO-IncCond 能够克服传统的电导增量法在动态过程中功率大幅震荡所带来的能量损失;稳态时 PSO-IncCond 的跟踪精度为  $0.65%$ ,而 IncCond

的跟踪精度为  $0.97%$ ,表明 PSO-IncCond 具有较好的跟踪精度,提高了光伏发电效率。

为了对比在光照突变时 PSO-IncCond 与 IncCond 两种方法的跟踪速度和动态过程的功率波动情况,文中设置控制器的参数如下。

(1) 最优占空比预测环节:粒子数目为 50;迭代次数为 200;粒子最大速度为待搜索区域的 1/10;惯性权值  $\omega=0.8$ ;学习因子  $c_1=c_2=2$ ;粒子初始化空间为  $0.25 V_{oc} \sim V_{scmax}$ ;适应度函数为  $fitness(k)=I(k) \times U(k)$ 。

(2) 最大功率点跟踪环节:采样周期为  $0.0001 s$ ;步长为  $0.0001$ 。

当外界光照强度由  $1000 W \cdot m^{-2}$  突变到  $1200 W \cdot m^{-2}$ ,环境温度为  $25^{\circ}C$ 时进行仿真,仿真结果如图 5 所示。

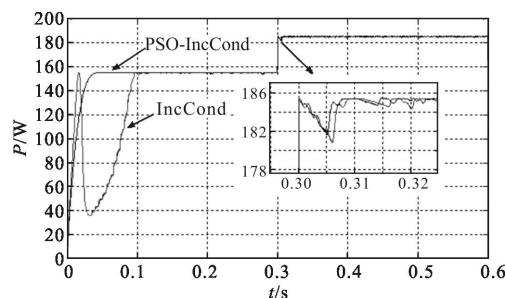


图 5 光照突变条件下,PSO-IncCond 与 IncCond 方法的功率曲线对比图

Fig.5 Output power curves of PSO-IncCond method and IncCond method under the condition of the power of mutation

从图 5 中可以得到在光照突变时,PSO-IncCond 与 IncCond 两种方法的性能指标对比情况,如表 2 所示。

表 2 光照突变时,PSO-IncCond 与 IncCond 方法的性能指标比较

Tab.2 Performance comparison of PSO-IncCond and IncCond method under the condition of the power of mutation

	Tracking time /s	Tracking accuracy	Fluctuation of dynamic maximum power/W
PSO-IncCond	0.007	0.33%	3
IncCond	0.009	0.45%	4

从表 2 中可以看出,当光照强度由  $1000 W/m^2$  突变到  $1200 W \cdot m^{-2}$  时,PSO-IncCond 的跟踪时间为

0.007 s, 相比于 IncCond 方法, 具有较快的跟踪速度; 动态过程中 PSO-IncCond 的最大功率波动为 3 W, IncCond 为 4 W, 表明动态跟踪过程中 PSO-IncCond 具有较小的功率波动; 在跟踪精度方面, PSO-IncCond 的跟踪精度为 0.33%, 而 IncCond 的跟踪精度为 0.45%, 说明 PSO-IncCond 具有较高的跟踪精度。

## 5 结 论

文中针对电导增量法在采用较小步长时所存在的跟踪速度慢、动态跟踪过程功率波动较大等问题, 提出了 PSO 与电导增量法的双级 MPPT 控制的算法。为了验证所提出算法的有效性, 文中在 Matlab/Simulink 环境下搭建了仿真模型, 与传统的电导增量法进行了实验比较。

当在外界光照强度为  $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  时, 实验结果为: PSO-IncCond 的跟踪时间为 0.04 s, 跟踪精度为 0.65%, 动态最大功率波动为 1 W, 相比于 IncCond 有较快的跟踪时间, 较高的跟踪精度, 以及较小的功率波动。

在外界光照强度由  $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  突变到  $1\ 200\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  时, 实验结果为: 相比于 IncCond, PSO-IncCond 在跟踪时间上快 0.02 s, 跟踪精度高 12%, 动态最大功率波动小 1 W。

综合上述实验结果表明: PSO 与电导增量法的双级 MPPT 控制算法可以提高当电导增量法在采用较小步长时的跟踪速度, 并且能够减小因跟踪过程中的功率震荡而造成的能量损耗, 在稳态时具有良好的跟踪精度, 可以很好地实现最大功率点跟踪。

## 参考文献:

[1] Xue Jiyuan, Feng Wenlin, Zhao Fen, et al. Output characteristic and application for solar panel[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 176-181. (in Chinese)  
薛继元, 冯文林, 赵芬, 等. 太阳能电池板的输出特性与实际应用研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 176-181.

[2] Yan Liyang, Xu Di, Ge Aiming. Novel maximum power point tracking method under non-uniform illumination conditions[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2173-2180. (in Chinese)  
严力彙, 徐迪, 葛爱明. 不均匀光照情况下太阳能最大功

率追踪算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2173-2180.

[3] Chen Yaai, Zhou Jinghua, Li Jin, et al. Application of gradient variable step size MPPT algorithm in photovoltaic system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(19): 3156-3161. (in Chinese)  
陈亚爱, 周京华, 李津, 等. 梯度式变步长 MPPT 算法在光伏系统中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3156-3161.

[4] Chen Lingjun, Dai Yuxing, Quan Huimin. Application in MPPT of photovoltaic power generation based on improved perturbation and observation method [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(3): 614-616. (in Chinese)  
陈令军, 戴瑜兴, 全惠敏. 基于改进的扰动观察法在光伏发电 MPPT 中的应用[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 614-616.

[5] Zhou Jianping, Zhu Jianping. MPPT control research using adaptive variable step size incremental conductance [J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2014, 30(3): 235-239. (in Chinese)  
周建萍, 朱建萍. 自适应变步长电导增量的最大功率点跟踪控制的研究[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(3): 235-239.

[6] Esram T, Chapman P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(2): 439-449.

[7] Huang Yao, Huang Hongquan. Maximum power point tracking control method based on incremental conductance [J]. *Modern Electronics Technique*, 2008, 31(22): 18-19. (in Chinese)  
黄瑶, 黄洪全. 电导增量法实现光伏系统的最大功率点跟踪控制[J]. 现代电子技术, 2008, 31(22): 18-19.

[8] Onat N. Recent developments in maximum power point tracking technologies for photovoltaic systems [J]. *IEEE Transactions on International Journal of Photoenergy*, 2010, 20(10): 1-11.

[9] Xue Jiyuan, Feng Wenlin, Yang Xiaozhan. Maximum power point tracking for photovoltaic panel based on FPGA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2699-2703. (in Chinese)  
薛继元, 冯文林, 杨晓占. 基于 FPGA 的光伏电池板最大功率跟踪[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2699-2703.

[10] Villalva, Marcelo G, Ruppert E. Analysis and simulation of the P & O MPPT algorithm using a linearized PV array model [C]//35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2009, 1-6: 215-220.