

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.02.008

# 基于双侧扰动变步长的光伏电池阵列MPPT

雷敏, 孔令倩, 邓昭俊, 李丹

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对光伏电池阵列最大功率点跟踪速度和跟踪精度难以同时兼顾的问题, 提出了一种基于双侧扰动变步长MPPT控制算法, 即双向变步长扰动观察法, 并与电导增量法、传统扰动观察法进行仿真对比分析。仿真结果表明, 该算法可以快速跟踪到最大功率点, 精确度提高了15 ms, 具有较好的时效性。

**关键词:** 光伏电池阵列; MPPT; 双向变步长; 扰动观察法

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2015)02-0044-06

## MPPT of PV Battery Array Based on Bilateral Disturbance Variable Step Size

Lei Min, Kong Lingqian, Deng Zhaojun, Li Dan

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** For photovoltaic battery array, the maximum power point tracking speed and tracking accuracy is difficult to taking into account simultaneously, proposes a MPPT control algorithm based on bilateral disturbance variable step length, namely two-way variable step perturbation and observation method. Simulates and comparative analyzes the algorithm with the incremental conductance method and the traditional perturbation and observation method. The results show that the algorithm can quickly track the maximum power point and improve the accuracy of 15 ms, and it has better timeliness.

**Keywords:** photovoltaic battery array; MPPT; bidirectional variable step size; perturbation and observation method

## 0 引言

能源是人类赖以生存和发展的基础, 但是由于社会经济的不断发展, 以及人类生活水平的提高, 世界各国对能源的需求量逐渐增大, 并且燃烧这些一次能源带来的环境污染已相当严重。目前光伏发电正在大力推广, 为了提高微型逆变器的发电量, 需要对光伏电池阵列进行最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)<sup>[1]</sup>。

近年来, 国内外许多学者都在研究最大功率点跟踪算法<sup>[2-9]</sup>。文献[10]提出一种基于P-V微分曲线控制的算法, 该算法具有较好的动态特性, 但当外界环境发生突变时, 该算法不能保证系统的稳定性。文献[11]提出了一种PI调节器的方法, 该方法能根据具体情况调节占空比, 使得逆变器有较好的输出稳定性, 但比例积分因子的确定比较复杂。文献[12]提出了一种改进的电导增量法, 该方法在传统电导增量法的基础上, 通过改变电压的参考值, 实现最

收稿日期: 2014-11-09

基金项目: 湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目(13JJ9036), 湖南工业大学研究生创新基金资助项目(CX1303), 湖南工业大学自然科学研究基金资助项目(2012HZX08)

作者简介: 雷敏(1973-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事复杂网络理论及其在电网稳定性分析中的应用研究, E-mail: leimin0606@hotmail.com

大功率点跟踪,从而提高跟踪精度。但该算法把参考电压附近的最大功率点看作全局的最优点,因此具有一定的局限性。文献[13]提出了基于固定阴影模式下的粒子群算法,在多峰值情况下,该算法能很好地跟踪最大功率点,但只限于固定的阴影模式下,使用时有一定的局限性。另外,比较新的算法有模糊控制法<sup>[14-15]</sup>、神经网络法<sup>[16]</sup>等,但这些智能控制算法更多的是凭借个人的经验,缺乏自学能力,仍然有一定的局限性。

通过以上分析,为了使得MPPT的性能更加优化,本文提出了基于双侧扰动变步长观察MPPT算法,即双向变步长扰动观察法。

## 1 光伏电池模型

光伏电池的等效电路如图1所示。图中, $I$ 为光伏电池的输出电流; $I_{sc}$ 为所测量光伏电池的短路电流; $I_d$ 为流过二极管的反向暗电流; $U$ 为光伏电池的输出电压; $R_{sh}$ 为电池的等效并联电阻; $R_s$ 为电池的等效串联电阻。

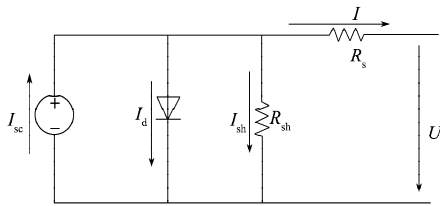


图1 光伏电池的等效电路图

Fig. 1 The equivalent circuit of photovoltaic cells

### 1.1 光伏电池阵列的工程模型

根据光伏电池阵列实际输出特性拟合光伏电池模型。在实际中,根据电池厂家提供的标准环境下的电池开路电压 $U_{oc0}$ 、短路电流 $I_{sc0}$ 、最大功率电压 $U_{max0}$ 和最大功率电流 $I_{max0}$ 这4个参数<sup>[17]</sup>构造数学表达式,就可以拟合出实际 $I-U$ 曲线。

电流与电压的关系为

$$I = I_{sc} - I_d \left[ e^{\frac{q(U+IR_s)}{AkT}} - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}, \quad (1)$$

式中: $T$ 是光伏电池所处环境的绝对温度;

$q$ 为电子电荷;

$k$ 为玻耳兹曼常数;

$A$ 为P-N结的理想因子。

由于 $R_{sh}$ 很大, $R_s$ 很小,可把 $IR_s$ 和 $\frac{U+IR_s}{R_{sh}}$ 忽略不计,则式(1)简化为

$$I = I_{sc} - I_d \left( e^{\frac{qU}{AkT}} - 1 \right). \quad (2)$$

再把简化式(2)转化成工程法形式

$$I = I_{sc} \left[ 1 - C_1 \left( e^{\frac{U}{C_2 U_{oc}}} - 1 \right) \right], \quad (3)$$

式中 $C_1, C_2$ 为待定系数。

式(3)并没有改变式(2)的基本函数特性,关键就是求 $C_1, C_2$ 。

当在最大功率点时, $I=I_{max}, U=U_{max}$ ,即

$$I_{max} = I_{sc} \left[ 1 - C_1 \left( e^{\frac{U_{max}}{C_2 U_{oc}}} - 1 \right) \right], \quad (4)$$

由于 $e^{\frac{U_{max}}{C_2 U_{oc}}}$ 远大于1,则 $e^{\frac{U_{max}}{C_2 U_{oc}}} - 1 \approx e^{\frac{U_{max}}{C_2 U_{oc}}}$ ,所以式(4)简化为

$$I_{max} = I_{sc} \left( 1 - C_1 e^{\frac{U_{max}}{C_2 U_{oc}}} \right). \quad (5)$$

对式(5)进行整理,可得到包含了 $C_2$ 的 $C_1$ 的表达式

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_{max}}{I_{sc}} \right) e^{-\frac{U_{max}}{C_2 U_{oc}}}. \quad (6)$$

当光伏电池开路时,输出的电流 $I=0$ ,输出的电压 $U=U_{oc}$ ,将式(6)代入式(3),整理可得

$$I_{sc} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{I_{max}}{I_{sc}} \right) e^{-\frac{U_{max}}{C_2 U_{oc}}} \left( e^{\frac{U_{oc}}{C_2 U_{oc}}} - 1 \right) \right] = 0. \quad (7)$$

由于 $e^{\frac{1}{C_2}}$ 远大于1,则 $e^{\frac{U_{oc}}{C_2 U_{oc}}} - 1 \approx e^{\frac{U_{oc}}{C_2 U_{oc}}}$ ,所以整理式(7)可得到 $C_2$ 的表达式

$$C_2 = \frac{\frac{U_{max}}{U_{oc}} - 1}{\ln \left( 1 - \frac{I_{max}}{I_{sc}} \right)}. \quad (8)$$

求出 $C_1, C_2$ 后就求解式(2),但上面求解 $C_1, C_2$ 及 $I$ 时都是近似计算的,所以光伏电池的输出电流与实际值存在一定的误差。

下面对输出特性进行修正,使得工程模型能更真实地反映实际电池模型。

输出特性电流补偿量

$$\Delta I_{sc} = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} (a\Delta T + 1) - I_{sc}; \quad (9)$$

输出特性电压补偿量

$$\Delta U = R_s \Delta I_{sc} + b\Delta T; \quad (10)$$

式(9)~(10)中: $\Delta T=T-T_{ref}$ , $T$ 为实际温度, $T_{ref}$ 为标准条件下的温度;

$S$ 为实际的光照强度;

$S_{ref}$ 为标准条件下的光照强度;

$a$ 为温度对电流的影响补偿系数;

$b$  为温度对电压的补偿系数。

上述 4 个特性参数：电池开路电压  $U_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$ 、最大功率电压  $U_{max}$  和最大功率电流  $I_{max}$  都是在标准环境下测得的，当环境发生变化时，它们的数值也会发生变化。下面给出对环境变化的补偿，即对 4 个性能参数进行补偿：

$$I_{sc} = I_{sc0} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a_0 \Delta T), \quad (11)$$

$$I_{max} = I_{max0} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a_0 \Delta T), \quad (12)$$

$$U_{oc} = U_{oc0} (1 - b_0 \Delta T) \ln(e + c \Delta S), \quad (13)$$

$$U_{max} = U_{max0} (1 - b_0 \Delta T) \ln(e + c \Delta S). \quad (14)$$

式 (11) ~ (14) 中： $a_0$  为温度对电流的补偿系数； $b_0$  为温度对电压的补偿系数； $c$  为光照对电压的补偿系数； $\Delta S = S - S_{ref}$ ， $S$  为实际光照强度， $S_{ref}$  为标准条件下的光照强度。

因此，经过输出特性补偿和环境变化补偿后的工程输出电流为

$$I = I_{sc} \left[ 1 - C_1 \left( e^{\frac{U + R_s \Delta I_{sc} + b \Delta T}{C_2 U_{oc}}} - 1 \right) \right] + \Delta I_{sc0} \quad (15)$$

### 1.2 电池模型仿真

当温度为 25 °C，光照强度分别为 800, 1 000, 1 200 W/m<sup>2</sup> 时，光伏电池阵列随光照强度变化的  $I-U$  曲线和  $P-U$  曲线如图 2 所示。

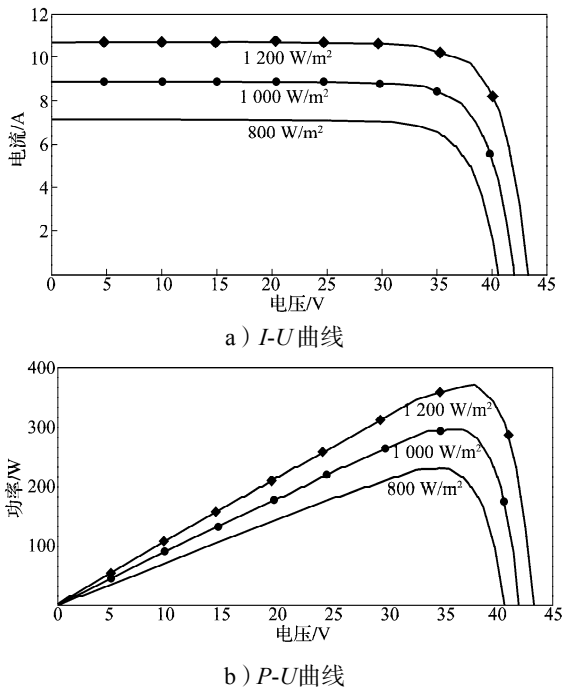


图2 光伏电池阵列随光照强度的变化曲线

Fig. 2 The curve of photovoltaic cell array varying with the light intensity

由图 2a 可知，当光照强度增大时，短路电流随

之增大，但开路电压基本保持不变，说明光伏电池阵列的开路电压基本不受光照强度的影响。由图 2b 可以看出，光伏电池阵列输出的最大功率随着光照强度的增大而增大，并且这 3 条  $P-U$  曲线的峰值几乎在同一条垂直线上。

## 2 最大功率点跟踪的 Simulink 仿真

### 2.1 基于 Boost 电路的 MPPT 控制

图 3 为 Boost 等效电路图。基于 Boost 电路的 MPPT 控制原理是：将光伏电池的输出侧等效为一个负载阻抗，可以不停地调节负载阻抗阻值，当负载阻抗的阻值与太阳能光伏电池的输出阻抗值相等时，光伏电池的输出功率达到最大值。所以只要用控制方法实现对负载阻抗的实时调节，就能使光伏电池工作于最大功率输出点，这就是所说的 MPPT 控制。它的控制分为 2 种，一种是改变转换器的占空比，另一种是改变扰动电压。

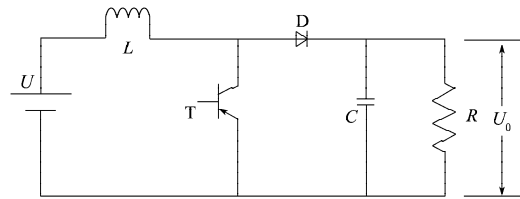


图3 Boost 等效电路图

Fig. 3 Boost equivalent circuit diagram

### 2.2 双向变步长扰动观察法流程

本文提出了双向变步长扰动观察法，其流程见附图 1。首先在开始部分要设定电压的初始值、占空比的初始值、功率阈值  $E_p$  和电压步长阈值  $E_U$ 。从初始电压  $U_B$  开始，然后进行双向扰动，即减小一个步长  $\Delta U$ ，得到观测点  $U_A = U_B - \Delta U$ ；增加一个步长  $\Delta U$ ，得到观测点  $U_C = U_B + \Delta U$ ；然后计算这 3 点的功率  $P_A, P_B, P_C$ ，令  $\Delta P_1 = P_C - P_B, \Delta P_2 = P_B - P_A$ 。比较  $\Delta P_1, \Delta P_2$  与阈值  $E_p$  的大小，比较一半步长  $0.5 \Delta U$  与步长阈值  $E_U$  的大小，根据这些对比结果来判断最大功率点是否变动，步长是否变为上一个周期步长的一半。

### 2.3 双向变步长扰动观察法的仿真模型

采用双向扰动观察法，利用 Simulink 搭建 MPPT 仿真模型，如图 4 所示。在图 4 中设定的条件为：光照强度  $S = 1200 \text{ W/m}^2$ ，温度  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ，初始电压  $U_0 = 40 \text{ V}$ 。

图 5 是分别采用电导增量法、传统扰动观察法和双向变步长扰动观察法的功率随时间的跟踪曲线。

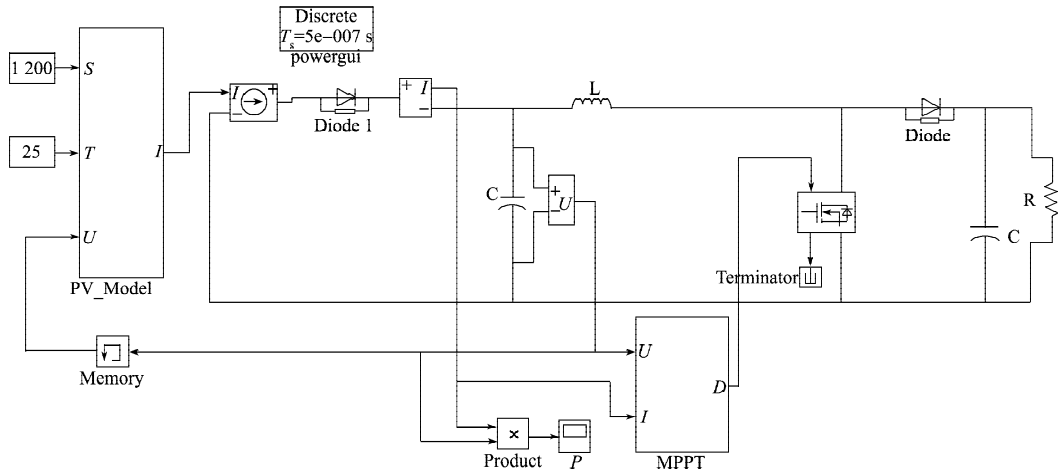


图4 MPPT 仿真模型

Fig. 4 MPPT simulation model

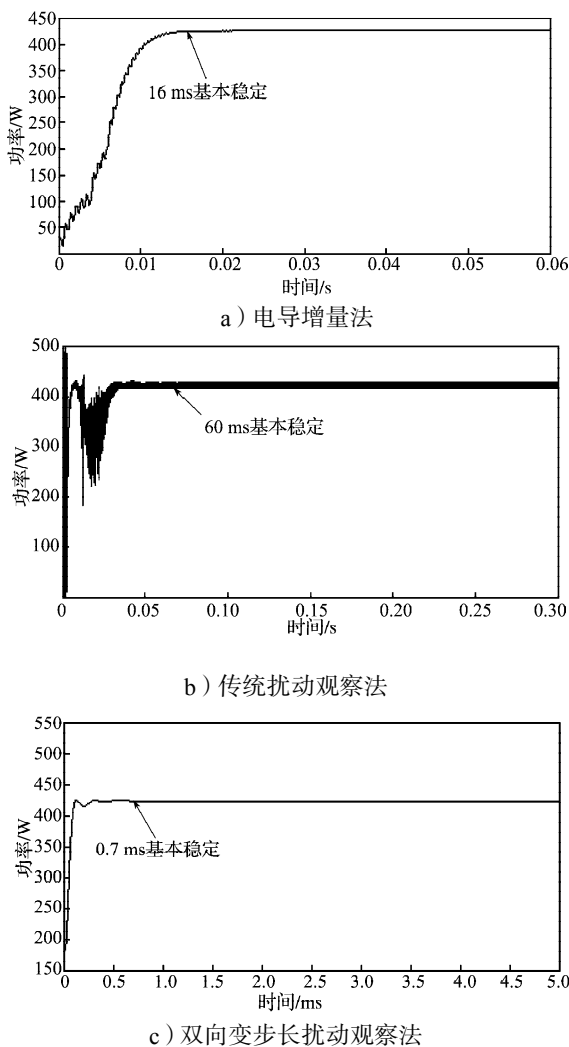


图5 功率随时间的跟踪曲线

Fig. 5 The curve of power with time tracking

由图5a可知, 采用电导增量法, 在  $t=16\text{ ms}$  的时刻追踪到最大功率点, 且之后基本上是稳定的。而图5b中采用传统扰动观察法, 在  $t=60\text{ ms}$  的时刻

追踪到最大功率点后才基本稳定, 但是稳定后的纹波还是比较大。图5c中采用双向扰动变步长观察法, 可以清晰看出, 在  $t=0.7\text{ ms}$  的时刻追踪到最大功率点, 并稳定在最大功率点处, 且几乎没有纹波。这3种不同MPPT控制算法的仿真结果表明, 本文提出的双向变步长扰动观察法, 能快速跟踪到最大功率点, 跟踪速度比电导增量法约提高了15 ms, 时速性很好。

上面分析的是外界环境不变的情况, 下面再分析当外界环境发生突变, 以及外界环境发生动态变化时的情况。

图6为光照强度发生突变时的功率跟踪情况。从图中可以看出, 当光照强度在  $t=0.03\text{ s}$  时发生突变, 由  $800\text{ W/m}^2$  变为  $1200\text{ W/m}^2$ , 最大功率点跟踪没有出现“误判”现象, 也没有出现太大震荡, 在1 ms的时间内就从原来的最大功率点快速跟踪到新环境下的最大功率点, 稳定性非常好。

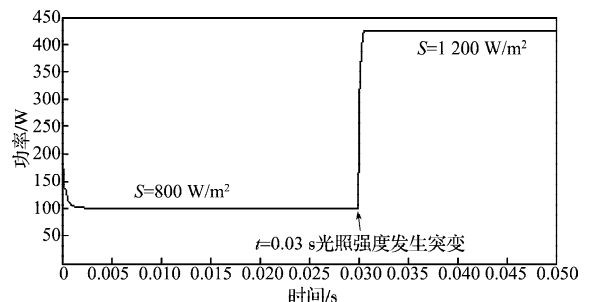


图6 光照强度发生突变时的功率跟踪情况  
Fig. 6 The power tracking situation when the light intensity mutated

图7为当光照强度发生连续变化时的电流和功率随时间的变化曲线。从图中可以看出, 电流和功率的变化曲线基本上和光照强度的变化曲线一致, 此仿真的最大功率点跟踪效果好, 说明本文提出的双向变步长扰动观察法, 实现了快速、实时跟踪最大功率

点的功能。

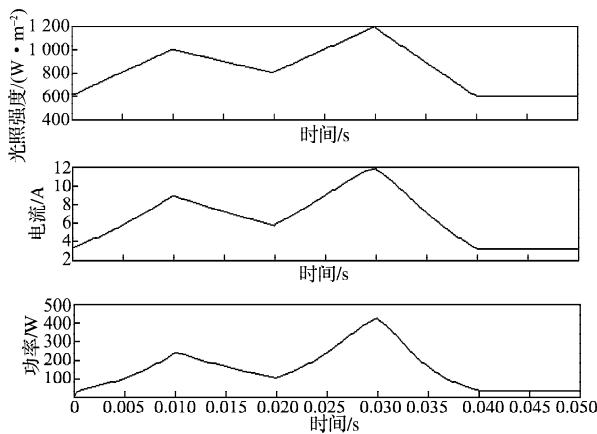


图7 光照强度发生率连续变化时的电流和功率的变化曲线

Fig. 7 The variation curves of current and power when light intensity changed continuously

### 3 结语

针对光伏电池阵列最大功率点跟踪速度和跟踪精度难以同时兼顾的问题,本文提出了一种跟踪速度快、时速性高的双向变步长扰动观察法。并将这种控制算法与电导增量法、传统扰动观察法进行了仿真对比。仿真结果表明,采用双向变步长扰动观察法,能以更快的速度跟踪到最大功率点,并且几乎没有纹波。当外界环境发生变化,其跟踪的动态响应也非常迅速、准确。

#### 参考文献:

- [1] 张澧生,施佳,施大发.一种改进INC和MPC的光伏最大功率点跟踪算法[J].电源学报,2014(2):95-100.  
Zhang Lisheng, Shi Jia, Shi Dafa. A Photovoltaic MPPT Based on Improved INC and MPC Algorithm[J]. Journal of Power Supply, 2014(2): 95-100.
- [2] 张超,何湘宁.短路电流结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中的应用[J].中国电机工程学报,2006,26(20):98-102.  
Zhang Chao, He Xiangning. Short-Current Combined with Perturbation and Observation Maximum-Power-Point Tracking Method for Photovoltaic Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 98-102.
- [3] 陈剑,赵争鸣,袁立强,等.光伏系统最大功率点跟踪技术的比较[J].清华大学学报:自然科学版,2010,50(5):700-704.  
Chen Jian, Zhao Zhengming, Yuan Liqiang, et al. Comparison of Maximum Power Point Tracking Photovoltaic System[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(5): 700-704.
- [4] 张小莲,李群,殷明慧,等.一种引入停止机制的改

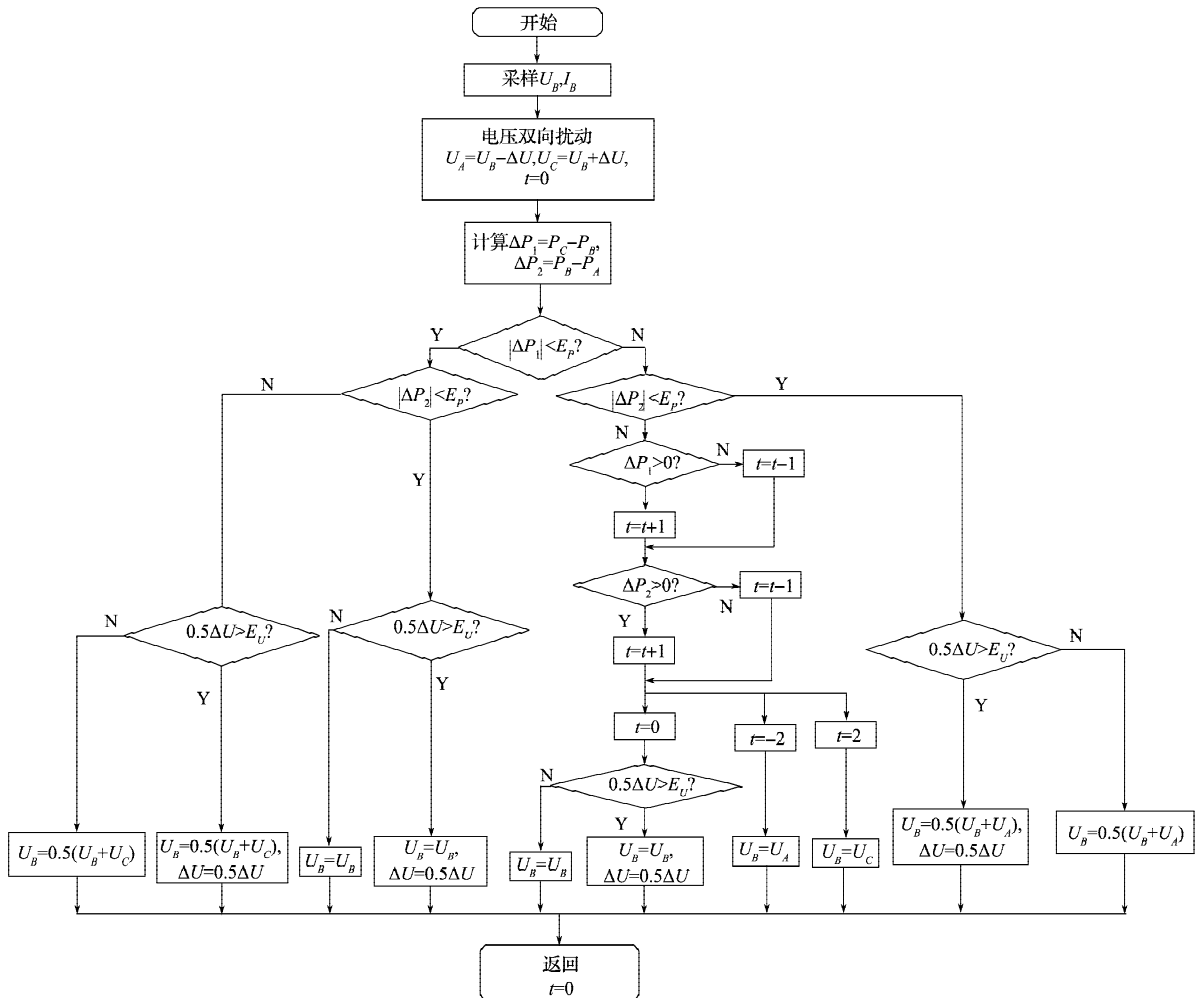
进爬山算法[J].中国电机工程学报,2012,32(14):128-134.

Zhang Xiaolian, Li Qun, Yin Minghui, et al. An Improved Hill-Climbing Searching Method Based on Halt Mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14): 128-134.

- [5] 刘邦银,段善旭,刘飞,等.基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪[J].电工技术学报,2009,24(6):91-94.  
Liu Bangyin, Duan Shanxu, Liu Fei, et al. Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Based on Improved Perturbation and Observation Method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 91-94.
- [6] 栗晓政,孙建平.基于分段数值逼近的自适应步长电导增量法MPPT控制仿真[J].太阳能学报,2012,33(7):1164-1170.  
Li Xiaozheng, Sun Jianping. Simulation of Auto-Adapted Step Size Incremental Conductance Method MPPT Control Based on Segmented Numerical Approximation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(7): 1164-1170.
- [7] 何海华,郑寿森,祁新梅,等.基于模糊控制的最大功率点跟踪的仿真研究[J].系统仿真学报,2012,24(2):398-403.  
He Haihua, Zheng Shousen, Qi Xinmei, et al. Research on Maximum Power Point Tracking Based on Fuzzy Controlling Technology[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(2): 398-403.
- [8] 吴海涛,孙以泽,孟焯.粒子群优化模糊控制器在光伏发电系统最大功率跟踪中的应用[J].中国电机工程学报,2011,31(6):52-57.  
Wu Haitao, Sun Yize, Meng Chuo. Application of Fuzzy Controller with Particle Swarm Optimization Algorithm to Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Generation System[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 52-57.
- [9] 龙洁.基于NN模型估计的光伏最大功率点跟踪控制技术[J].电力系统保护与控制,2011,39(20):38-42.  
Long Jie. Research on the MPPT Technology of Photovoltaic System Based on NN Model Estimation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 38-42.
- [10] Pandey A, Dasgupta N, Mukerjee A K. Design Issues in Implementing MPPT for Improved Tracking and Dynamic Performance[C]//IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. Paris: IEEE, 2006: 4387-4391.
- [11] Abdelsalam A K, Massoud A M, Ahmed S, et al. High-Performance Adaptive Perturb and Observe MPPT Technique for Photovoltaic-Based Microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1010-1021.
- [12] 蔡明想,姜希猛,谢巍.改进的电导增量法在光伏系

- 统MPPT中的应用[J]. 电气传动, 2011, 41(7): 21-24.  
 Cai Mingxiang, Jiang Ximeng, Xie Wei. Improved Increment Conductance MPPT Method for Photovoltaic System[J]. Electric Drive, 2011, 41(7): 21-24.
- [13] 周航. 基于粒子群算法的局部遮阴光伏发电系统MPPT控制的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.  
 Zhou Hang. Research on MPPT Control of Partially Shaded PV System Based on PSO Algorithm[D]. Tianjing: Tianjing University, 2009.
- [14] 陶靖琦, 廖家平, 赵熙临. 基于模糊控制的光伏发电系统MPPT技术研究[J]. 湖北工业大学学报, 2011, 26(1): 16-19.  
 Tao Jingqi, Liao Jiaping, Zhao Xilin. The Research of Photovoltaic Power Generation System with MPPT Based on Fuzzy Logic[J]. Hubei University of Technology, 2011, 26(1): 16-19.
- [15] Wu T F, Chang C H, Chen Y H. A Fuzzy-Logic-Controlled Single-Stage Converter for PV-Powered Lighting System Applications[J]. IEEE Transactions Industrial Electronics, 2000, 47(2): 287-296.
- [16] Salah C B, Ouali M. Comparison of Fuzzy Logic and Neural Network in Maximum Power Point Tracker for PV Systems [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(1): 43-50.
- [17] 蒋亚娟. 光伏电池建模及其在光伏发电预测中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
 Jiang Yajuan. Modeling of Photovoltaic Cells and Its Application in Energy Prediction[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

(责任编辑: 邓光辉)



附图1 双向扰动观察法的流程图

Fig. 1 The flow chart of bi-directional perturbation and observation method