DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.04.028

基于初值设定双模式电导增量法光伏 MPPT 研究①

孔德成[1]，　龙虹毓[1]，　李光林[1]，　张中华[2]，　井　伟[1]

1. 西南大学 工程技术学院，重庆 400716；2. 重庆安全技术职业学院 机电工程系，重庆 404020

摘要： 在农业生产中利用光伏发电为智能设备提供电能是精准农业发展的趋势之一，为提高单位时间光伏系统发电量，针对光伏发电系统最大功率点跟踪(MPPT)算法在跟踪速度和精度上难以兼顾的问题，提出了一种初值设定双模式电导增量法. 实验表明：相比于现有 MPPT 算法，本算法缩短了 MPPT 寻优时间，提高了系统稳态运行和环境突变两种情况下的最大功率点追踪效率 η_{MPPT} 和电能提高百分比 ζ_{MPPT}，同时减少了跟踪震荡，有效提高了系统跟踪速度和精度.

关　键　词： MPPT；双模式；电导增量法；初值设定；追踪效率

中图分类号： Tk513　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1673－9868(2017)04－0185－08

随着精准农业的发展，越来越多的智能用电设备应用在农业生产领域[1－2]，由于受地域特别是山地丘陵地区的限制，电力有效供给是农业智能化过程中面临的突出问题之一. 太阳能作为一种重要的清洁能源，适宜在农业生产中推广应用. 目前，合理高效地利用太阳能光伏发电已成为农业能源工程研究热点[3－4].

为实现提高太阳能光伏发电效率的目标，在不同的光照度和温度条件下光伏电池需运行在相应的最大功率点(Maximum Power Point，MPP). 国内外现有研究成果主要针对光伏电池电压、电流输出曲线的非线性特点，提出了不同的最大功率点跟踪方法[5－12]，2011 年悉尼大学 Dylan 等[5]采用分布式最大功率点跟踪(DMPPT)技术来提高发电效率，结果表明光伏电池输出稳态性能得到提高. 2012 年亚特兰大大学 Thomas Bennett 等[6]为提高光伏电池 MPPT 的快速性，提出忽略光伏并联电阻的光伏等效模型. 2014 年马来西亚大学 Kok 等[7]提出一种新的 INC 跟踪方法，该方法引入 P-V 曲线斜率限制条件来优化跟踪步长，从而在光照快速变化的情况下能够提高系统跟踪效率. 郭明明等[13]采用改进的变步长电导增量法，实验结果显示跟踪时间约为 3.7 s，跟踪效率约为 93.33%，能够在一定程度上解决光照大幅变化时系统的震荡现象. 栗晓政[14]提出基于分段数值逼近的可变步长电导增量法，MPPT 在响应速度和跟踪效率上得到改善，跟踪效率达到 95.24%.

本文针对电导增量法跟踪速度和稳态震荡难以兼顾的问题，提出一种具有初值设定的双模式电导增量法. 首先，文章从理论上分析了光伏电池开路电压和光照度的关系以及参考电压初值设定对 MPPT 控制程序跟踪速度的影响；其次，通过双模式控制策略的选择，使光伏系统较稳定地工作在最大功率点附近；最后，本文通过建模仿真并经物理实验平台验证了该算法的可行性.

1　光伏电池特性建模与分析

光伏电池是利用光伏半导体材料的光生伏特效应将太阳能转化为直流电能的器件[11]，按照不同的功

① 收稿日期：2016－03－01
基金项目：重庆市科委重点项目(cstc2014yykfB80013)；重庆市研究生科研创新项目(CYS16068)；中央高校基本业务费项目课题(SWU114050).
作者简介：孔德成(1989－)，男，河南周口人，硕士研究生，主要从事分布式光伏发电的研究.
通信作者：李光林，教授，博士研究生导师.

率要求，可以将光伏电池组装成不同规模的太阳能光伏模块. 光伏电池的输出功率随着太阳辐射和环境温度的变化呈现出非线性的特点. 文献[15]Marcelo GradellaVillalva 教授提出了光伏电池的方程.

$$I = I_{ph} - I_{os}\{\exp[(q/AKT)(V + IR_S)] - 1\} - (V + IR_S)/R_P \tag{1}$$

$$I_{os} = I_{or}\exp[qE_{GO}/BK((1/T_r) - (1/T))][T/T_r]^3 \tag{2}$$

$$I_{ph} = S[I_{SC} + K_I(T - 25)]/100 \tag{3}$$

式中，I 是光伏电池输出电流；V 是光伏电池输出电压；R_s 是光伏电池串联等效电阻；R_P 是光伏电池并联等效电阻；I_{ph}为光生电流；I_{OS}是光伏电池无光照时饱和电流；A 和 B 是理想因数；T 是环境温度(单位：℃)；K 为玻尔兹曼常数，$K = 1.381\times10^{-23}\mathrm{JK}^{-1}$；$q$ 为电荷数；K_I 为短路电流温度系数；S 是光照辐射强度($\mathrm{W/m^2}$)；I_{sc}为光伏电池在 25 ℃、光照强度 1 000 $\mathrm{W/m^2}$ 时的短路电流；E_{GO}为半导体硅的带隙能量；T_r 为参考基准温度；I_{or}为光伏电池在温度 T_r 时的饱和电流.

在应用中，一般由多个同性能太阳能电池单体组成光伏模块，光伏模块的输出特性和单个电池单体的输出特性一致[16-17]，由(1)、(2)、(3)式建立随光照度、温度参数变化的光伏模块仿真模型，如图 5 所示.

光伏模块输出功率与输出电压之间的关系，简称 P-V 输出特性，图 1(a)、图 1(b)中的 4 条曲线分别是在相同温度、不同的光照及相同光照、不同温度条件下所获得的光伏模块 P-V 曲线. 仿真结果和光伏模块输出特性的理论分析相吻合，由图 1 可以得出在同一环境状态下，光伏模块有且仅有一个最大功率输出工作点，即 MPP.

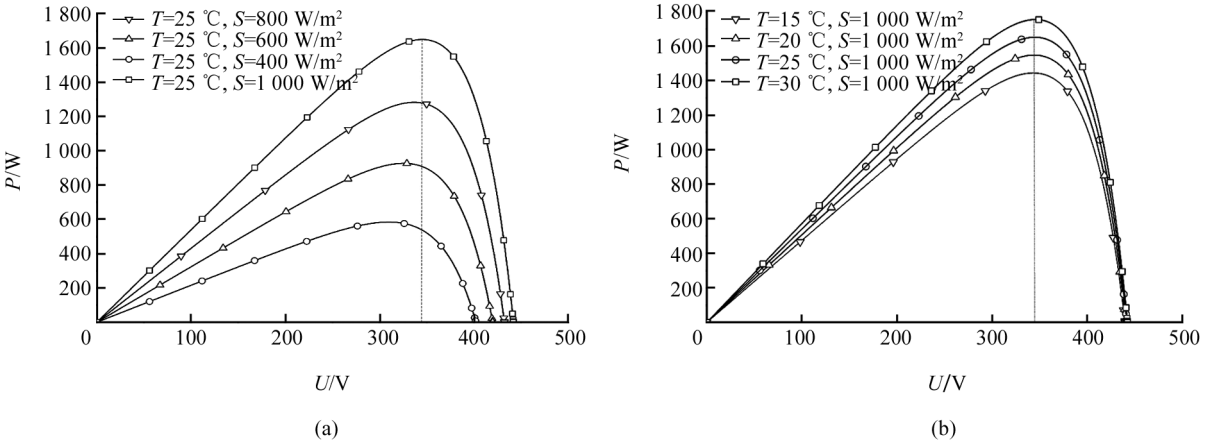


图 1 不同外部环境下的 *P-V* 特性曲线

2 最大功率点跟踪算法

2.1 参考电压初值设定对跟踪速度的影响

光伏模块的 MPPT 速度与其设定的参考电压初值 V_{ref}关系密切，在 MPPT 控制程序中，如果 V_{ref}无目的设置，V_{ref}不在最大功率点附近时，系统初始化后需要很长时间才能跟踪到最大功率点；V_{ref}设置过大时，将造成系统不能正常工作. 其中，V_{ref}是以光伏模块的开路电压 V_{oc}为变量的函数.

根据图 1(b)相同光照度，不同温度下光伏模块的 P-V 曲线，其输出的最大功率点几乎位于垂直线电压附近；但图 1(a)相同温度，不同光照度下的 P-V 曲线表明光伏模块的开路电压 V_{oc}会随着光照度 S 的变化而变化. 所以，为阐明光伏模块开路电压 V_{oc}和光照度 S 之间的理论关系，对(1)式进行推导. 通常光伏电池并联等效电阻 R_P 很大[13]，故$(V+IR_S)/R_P$ 项远远小于 I_{ph}，可省略. (1)式变为

$$I = I_{ph} - I_{os}\{\exp[(q/AKT)(V + IR_S)] - 1\} \tag{4}$$

由(4)式得输出电压方程，

$$V = \frac{AKT}{q}\ln\left(\frac{I_{ph} + I_{os} - I}{I_{os}}\right) - IR_S \tag{5}$$

令 $M = [I_{SC} + K_I(T - 25)]/100$，由(3) 式得，$I_{ph} = M \cdot S$. 由(5) 式得开路电压 V_{oc}(在 $I = 0$ 条件下)，

$$V_{oc}=\frac{AKT}{q}\ln\left(\frac{M\cdot S}{I_{os}}+1\right) \tag{6}$$

(6)式说明光伏模块的开路电压 V_{oc} 与光照度 S 的自然对数成正比. 由此理论关系，可以在不断开系统负载情况下在线得到任意光强下的系统开路电压 V_{oc}，区别于现有文献[9,13,18]. 光伏模块最大功率点电压 V_{MPP} 与开路电压 V_{oc} 存在近似的线性关系[19]，利用此特性可将光伏模块输出参考电压 V_{ref} 控制在位于最大功率点附近的某一电压处，使光伏系统开始工作就获得近似的最大功率输出. 通常，

$$V_{ref}=K_0\cdot V_{oc} \tag{7}$$

式中，系数 K_0 的取值取决于所用光伏电池的特性，一般取值在 0.7～0.8 之间. 由式(7)知，系数 K_0 的取值会影响到光伏模块 MPP 跟踪速度. 为了找到合适的系数 K_0，本文在光照强度 800 W/m^2，$T=20$ ℃的条件下对不同的系数 K_0 进行线性迭代实验，结果如图 2 所示. 由此可知，随着设定的 V_{ref} 远离系统 MPP 所对应的电压值时，系统的跟踪速度会相应变慢；$K_0=0.75$ 为最佳系数，此时 V_{ref} 位于最大功率点所对应的电压附近.

这种提前逼近的控制方法，易于实现，系统响应速度快，但农业生产环境复杂，外界条件剧烈变化时采用此方法跟踪过程震荡较大. 针对这一缺陷，下文中采用具有双模式电导增量法加以优化.

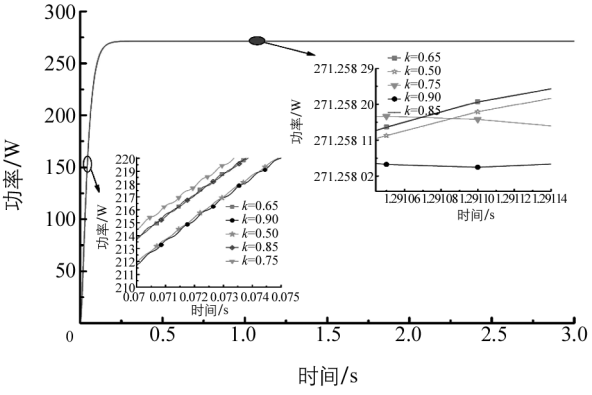


图 2　不同电压初值条件下的系统响应

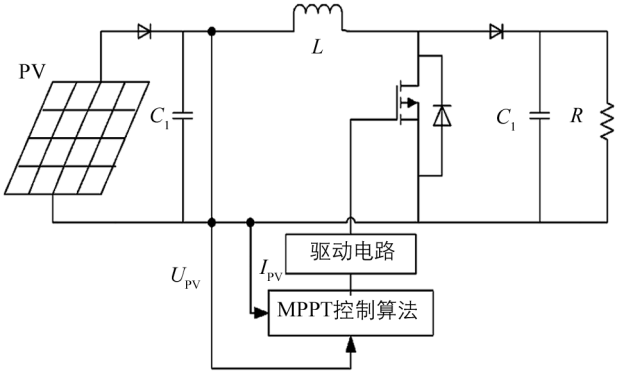


图 3　MPPT 电路控制结构图

2.2　具有设定电压初值的双模式电导增量法

电导增量法具有优良的跟踪性能，它是通过比较光伏电池的瞬时电导和电导的变化量来控制 ΔV，ΔV 称为跟踪步长. 由图 1 光伏模块 P-V 特性曲线可知，在最大功率点右侧，$\mathrm{d}P/\mathrm{d}V<0$；在最大功率点左侧，$\mathrm{d}P/\mathrm{d}V>0$；在最大功率点处，$\mathrm{d}P/\mathrm{d}V=0$. 已知光伏模块的输出功率 $P=V\cdot I$，对其两端关于电压进行求导，且在最大功率点处有，

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}V}=I+V\cdot\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}V}=0 \tag{8}$$

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}V}=-\frac{I}{V} \tag{9}$$

式(9)表明当输出电导的变化量等于输出电导的负值时，光伏模块工作在 MPP 状态. 电导增量法的最大优势在于光照强度变化时[20]，光伏模块输出电压能以较平稳的方式跟踪其变化，稳态震荡较小. 但在外界温度和光照条件瞬间变化的情形下，步长 ΔV 选择不当会影响 MPP 跟踪精度.

鉴于电导增量法在光伏模块最大功率点跟踪过程中存在的优势和不足，本文提出了一种具有设定电压初值的双模式电导增量法，采用该算法对光伏模块进行最大功率点搜索和跟踪，系统控制电路如图 3 所示.

改进算法首先利用式(6)和式(7)设定 MPPT 控制程序的电压初值 V_{ref}，使光伏模块开始工作就获得近似的最大功率输出. 其次，由光伏模块的输出特性曲线知，在最大功率点左侧，曲线较为平滑，$\mathrm{d}P/\mathrm{d}V$ 变化相对平缓，引入步长缩放因子 γ，使用大步长快速跟进；在最大功率点右侧，$\mathrm{d}P/\mathrm{d}V$ 变化相对较大，引入步长缩放因子 β，此时使用小步长精确跟踪并稳定在最大功率点. 两种控制模式交叉使用提高了 MPP 跟踪性能，程序流程图如图 4 所示.

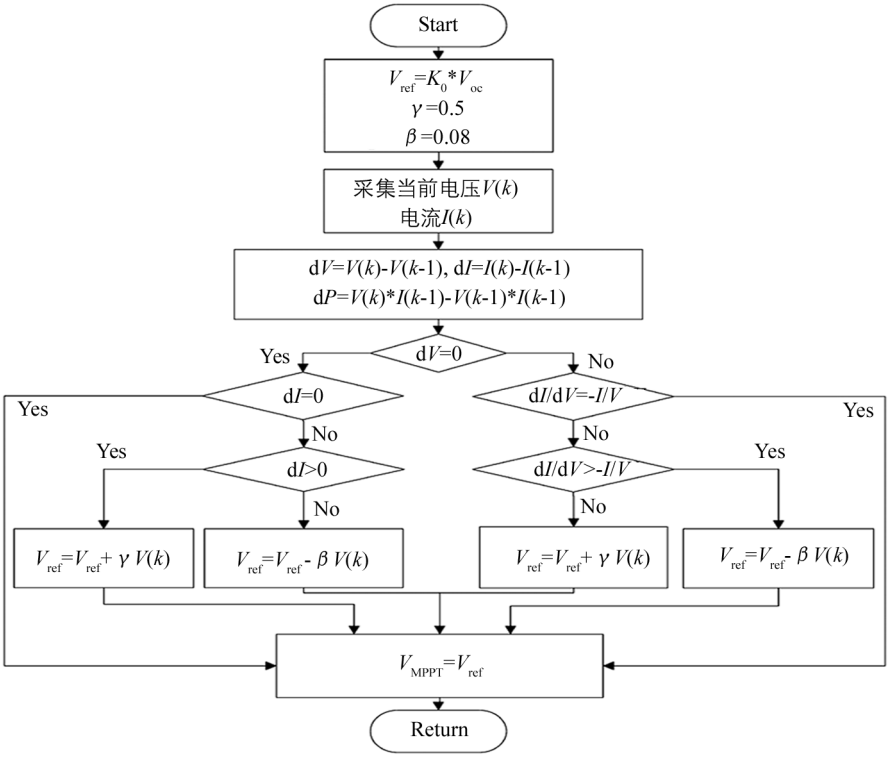


图 4　设定电压初值的双模式电导增量法流程图

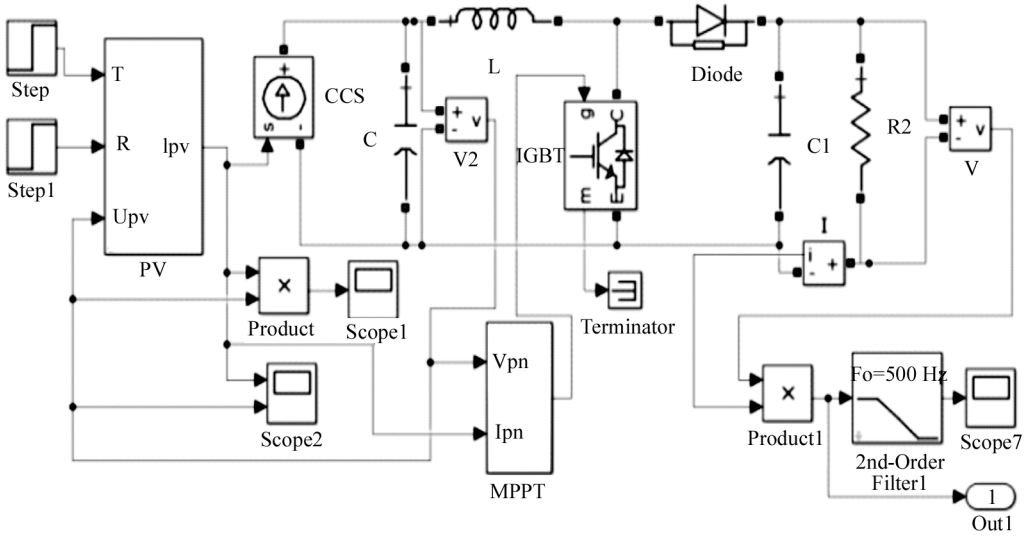


图 5　光伏系统 MPPT 仿真模型

为了量化评估基于该算法的光伏系统 MPPT 性能以及使用该控制算法前后系统获取能量的能力，引入量化指标 η_{MPPT} 和 ζ_{MPPT}，由此可以定量分析系统在不同环境以及环境突变情况下的跟踪效率和电能提高百分比. η_{MPPT} 和 ζ_{MPPT} 定义如下，

$$\eta_{MPPT}=\frac{\int_{t_0}^{t_1}P_{real}\,dt}{\int_{t_0}^{t_1}P_{max}\,dt} \tag{10}$$

$$\zeta_{MPPT}=\frac{W_{controlled}-W_{uncontrolled}}{W_{uncontrolled}} \tag{11}$$

其中，t_0，t_1 分别表示系统开始运行和结束的时间；P_{real}表示光伏模块在 MPPT 算法下实际输出功率；P_{max}表示光伏模块在 MPPT 算法下稳定输出时追踪到的最大功率；$W_{controlled}$表示施加控制算法后，系统在 t_0-t_1 时间内所获取能量；$W_{uncontrolled}$表示未施加任何控制算法，系统在 t_0-t_1 时间内所获取能量.

3　实验与结果分析

为验证外界环境快速变化时该算法的有效性，对该算法进行了计算机仿真和物理实验平台验证. 本文研究实验条件设为：取 $k_0=0.75$，$\gamma=0.5$，$\beta=0.08$；参照型号 JT255PLe 的实验光伏模块参数，设定仿真模型开路电压 37.7 V，短路电流 8.98 A. 计算机参数 CPU 为 Intel i5-2430M，2.4 GHz，4 G 内存，Win7 32bit 操作系统，代码编写和仿真平台为 MathWorks 公司的 Matlab2014rb. 为达到计算机仿真结果和物理实验结果交叉验证，实验环境统一设定：强光照 11 350 Lx(16.62 W/m^2)，弱光照 5 596 Lx(8.19 W/m^2)，环境温度 25 ℃.

3.1　光照度连续突变条件下的系统性能仿真实验

建立光伏系统仿真模型如图 5 所示，对该算法在光照度连续突变下的性能进行仿真验证. 光照度在 $t=1$ s 时刻由 16.62 W/m^2 变为 8.19 W/m^2，$t=2$ s 时刻由 8.19 W/m^2 变为 16.62 W/m^2，两次光照度突变情况下光伏模块的开路电压 V_{oc}发生变化，控制算法中电压初值 V_{ref}自动重新设置，控制系统会在新的 MPP 处先采用大步长跟踪，然后小步长逼近，仿真结果如图 6 所示.

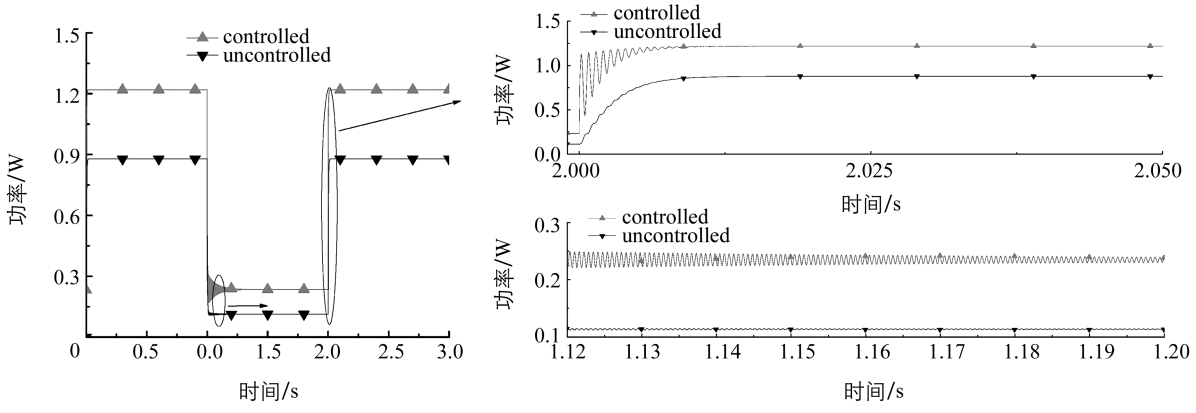


图 6　光照度连续突变下系统仿真结果

仿真结果讨论分析：仿真结果验证了该算法的可行性. 光照度两次突变时，光伏系统在该算法控制下大幅度向此刻的最大功率点逼近，追踪时间分别为 0.27 s 和 0.15 s，较快呈稳态输出并有较强的爬坡能力，减少了震荡现象. 仿真性能数据见表 1.

表 1　光照度连续突变下光伏系统仿真性能　　/(mW·h^{-1})

指标	$W_{controlled}$	$W_{uncontrolled}$	W_{max}	η_{MPPT}	ζ_{MPPT}
光照度突变	2.160	2.036	2.188	98.720%	6.090%

3.2　实际环境条件突变时系统性能验证

鉴于室外光照度不能突变，人为遮挡制造突变环境易出现不可控因素，为减少实验误差，精确控制环境中光照度的变化，在实验室内设计一套实验平台，如图 7 所示. 采用 20 只 36W 飞利浦日光灯来代替阳光，日光灯均匀分布(间隔 5cm)并上覆反光锡纸以增加光源利用率. 利用开关 A 和开关 B 分别控制标有奇数和偶数的日光灯(以下简称奇数灯和偶数灯)同时点亮或熄灭，在 8 个均匀分布的光照固定采样点测得光照数据，求其平均值如表 2 所示. 实验中设置偶数灯长亮，通过开关 A 控制奇数灯瞬间点亮或熄灭来完成实验测试过程，测试数据通过 AN87500 功率分析仪实时传回 PC 端储存. 分析仪控制界面如图 8 所示.

表 2　点亮不同盏数日光灯所对应光照度

盏数	偶数灯 10 盏	奇数灯 10 盏	20 盏全亮
光照度/Lx	5 643	5 596	11 350

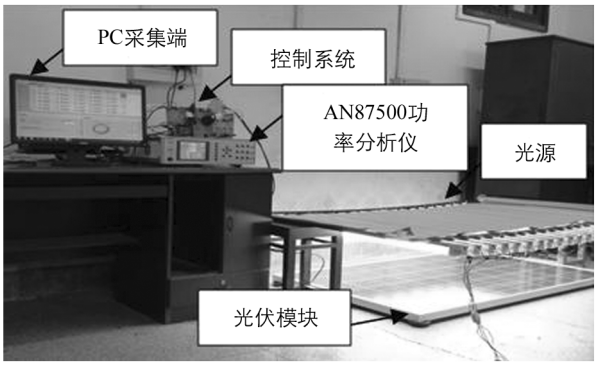


图7 光伏系统MPPT实验平台

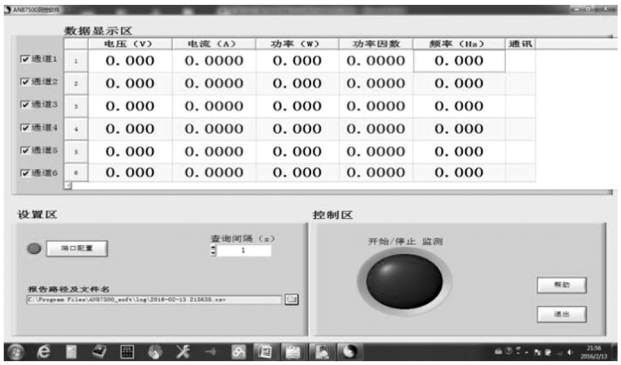
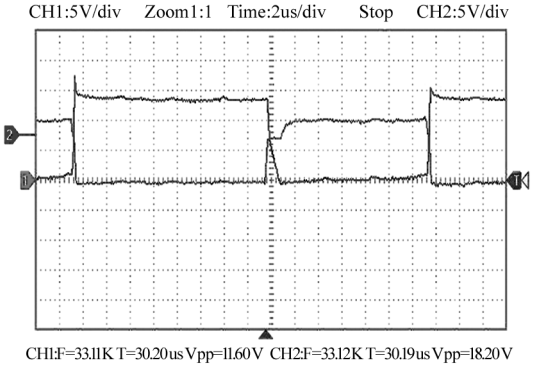
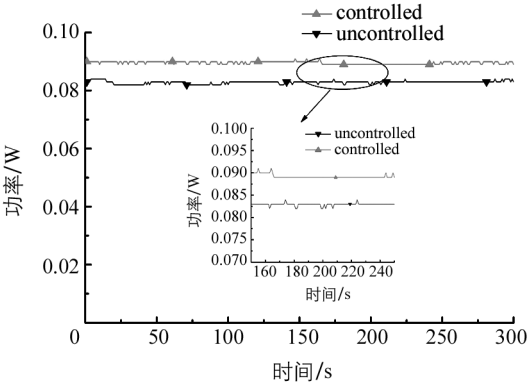


图8 AN87500分析仪PC控制端

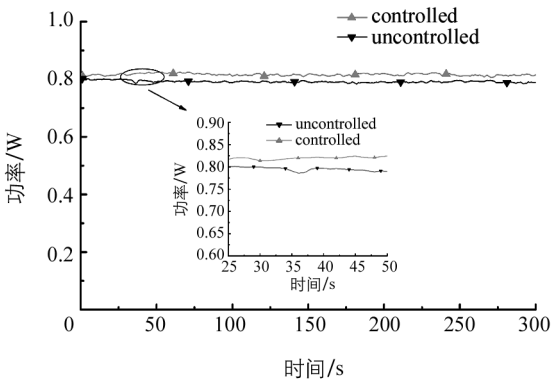
实验测试分别在弱光照(10盏灯光照度5 596 Lx)、强光照(20盏灯光照度11 350 Lx)、光照突变(20盏灯——10盏灯——20盏灯)3种环境下进行，每组测试时间为300 s. 测试结果如图9所示，系统性能指标测试数据如表3所示.



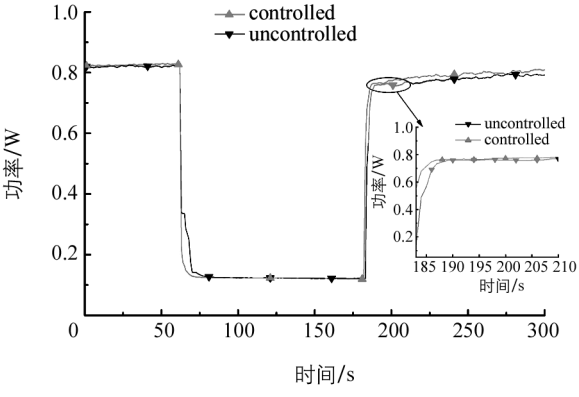
(a) 控制系统PWM驱动信号



(b) 弱光照环境下MPPT测试结果



(c) 强光照环境下MPPT测试结果



(d) 环境连续突变条件下MPPT测试结果

图9 光伏系统物理实验测试结果

表3 不同光照条件下光伏系统性能测试结果 /(mW·h^{-1})

指标	$W_{controlled}$	$W_{uncontrolled}$	W_{max}	η_{MPPT}	ζ_{MPPT}
弱光照	7.288	7.015	7.617	95.690%	3.900%
强光照	56.756	54.718	58.017	97.826%	3.724%
光照突变	43.268	41.738	45.133	95.868%	3.666%

实验结果讨论：图9(a)为控制系统PWM驱动信号，其占空比依据采样电压电流信号而变. 图9(b)、图9(c)分别为光伏系统在弱光照和强光照环境下测试结果，施加控制算法前后，系统获取能量较未加控制

算法时分别提高 3.900%、3.724%；稳态输出时，本 MPPT 控制算法效率分别达到 95.690%、97.826%，与文献[13]和文献[14]相比，弱光照和强光照两种环境下算法效率都有所提高，有效减少了稳态输出震荡. 图 9(d)为光伏系统在环境突变下测试结果，施加控制算法前后，系统获取能量提高 3.666%，两次追踪时间分别为 3.01 s、3.99 s，追踪均值时间比文献[13]提高约 0.2 s；稳态输出时，本 MPPT 控制算法效率为 95.868%，与文献[20]所提出的 MPPT 控制算法效率 95.09%相比，提高了 0.778%，环境突变情况下适应性较强并有效减少了稳态输出震荡.

4　结论与分析

1) 针对光伏发电系统 MPPT 算法在跟踪速度和稳态震荡上难以兼顾的问题，文章推导了光伏电池开路电压和光照度的数学关系，建立两者之间的数学模型，提出了一种具有初值设定的双模式电导增量法，并说明了光伏系统开路电压 V_{oc} 与电压设定初值 V_{ref} 存在线性关系，对不同的系数 K_0 进行线性迭代实验取最优值.

2) 光伏系统在不同光照环境下测试，通过所给出的公式进行量化评价. 大量的实验数据表明，所提算法是一种有效的光伏模块 MPPT 算法. 在农业生产中将本算法用于采用光伏发电供能的智能设备，能够提高单位时间光伏模块发电量，具有现实意义.

3) 通过大量仿真实验数据和物理实验数据交叉比较表明，计算机仿真从理论上验证了所提算法的可行性；物理实验从工程应用上验证了所提算法的正确性和实用性. 但是，由于物理实验中电路元件存在能量消耗以及开关器件制造工艺存在误差，光伏发电系统的物理实验未完全达到仿真实验的理论效果.

实验测试过程中，跟踪步长系数 γ，β 是根据光伏电池 P-V 特性曲线 MPP 左右两侧斜率不同，通过多次模拟手动调节到最佳效果为止，跟踪步长系数 γ，β 的微机智能设置将是下一步研究工作所关注的问题.

参考文献：

[1] 张　超，朱思洪，王军洋，等. 太阳能园艺拖拉机驱动系统匹配设计与性能分析 [J]. 农业工程学报，2015，31(11)：24－30.

[2] 杨　芳. 基于电流－电压四端法的无线土壤电导率传感器研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，2014，39(6)：59－63.

[3] 李光林，李晓东，曾庆欣. 基于太阳能的柑桔园自动灌溉与土壤含水率监测系统研制 [J]. 农业工程学报，2012，28(12)：146－152.

[4] 李辉耀，王纪元，赵　虎. 风光互补供电系统在嵌入式环境监测系统中的应用设计 [J]. 西南大学学报(自然科学版)，2011，33(9)：142－145.

[5] DU Y，LU D C. Battery-Integrated Boost Converter Utilizing Distributed MPPT Configuration for Photovoltaic Systems [J]. Solar Energy，2011，85(9)：1992－2002.

[6] BENNETT T，ZILOUCHINA A，MESSENGER R. Photovoltaic Model and Converter Topology Considerations for MPPT Purposes [J]. Solar Energy，2012，86(7)：2029－2040.

[7] TEY K S，MEKHILEF S. Modified Incremental Conductance MPPT Algorithm to Mitigate Inaccurate Responses Under Fast-Changing Solar Irradiation Level [J]. Solar Energy，2014，101：333－342.

[8] 董　密，杨　建，彭　可，等. 光伏系统的零均值电导增量最大功率点跟踪控制 [J]. 中国电机工程学报，2010，30(21)：48－53.

[9] KOTTI R，SHIREEN W. Efficient MPPT Control for PV Systems Adaptive to Fast Changing Irradiation and Partial Shading Conditions [J]. Solar Energy，2015，114(4)：397－407.

[10] BENDIB B，BELMILI H，KRIM F. A Survey of the Most Used MPPT Methods：Conventional and Advanced Algorithms Applied for Photovoltaic Systems [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews，2015，45(2)：637－648.

[11] 杨永恒，周克亮. 光伏电池建模及 MPPT 控制策略 [J]. 电工技术学报，2011，26(S1)：229－234.

[12] NORDIN A H M，OMAR A M. Modeling and Simulation of Photovoltaic (PV) Array and MaximumPower Point Tracker (MPPT) for Rid-Connected PV System [C]. Sustainable Energy & Environment. 2011：114－119.

[13] 郭明明，沈锦飞. 基于改进变步长电导增量法光伏模块 MPPT 研究 [J]. 电力电子技术，2011，45(7)：14－16.

[14] 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.

[15] VILLALVA M G，GAZOLI J R，FILHO E R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2009，24(5)：1198－1208.

[16] 谢三军，荣　飞，陈燕东，等. 光伏电池不一致性检测及其应用[J]. 中国电机工程学报，2012，32(19)：24－29.

[17] ANGEL A，BAYOD R. A Novel MPPT Method for PV Systems with Irradiance Measurement [J]. Solar Energy，2014，109(1)：95－104.

[18] LIU Y H，CHEN J H，Huang J W. A Review of Maximum Power Point Tracking Techniques for Use in Partially Shaded Conditions [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews，2015，41(41)：436－453.

[19] 郑诗程，苏建徽，沈玉梁，等. 具有TMPPT功能的数字式光伏水泵系统的设计[J]. 农业工程学报，2004，20(5)：270－274.

[20] ZHOU T，SUN W. Study on Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Array in Irregular Shadow [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2014，66(3)：227－234.

An MPPT Algorithm for PV Systems Based on Dual-Mode INC with Initial Setting

KONG De-cheng[1]，LONG Hong-yu[1]，LI Guang-lin[1]，ZHANG Zhong-hua[2]，JING Wei[1]

1. *School of Engineering and Technology，Southwest University，Chongqing 400715，China*；
2. *Department of Mechanical and Electrical Engineering，Chongqing Vocational Institute of Safety & Technology，Chongqing 404020，China*

Abstract：The use of photovoltaic power generation in agricultural production to provide power to smart devices is one of the trends in the development of precision agriculture. In the MPPT (maximum power point tracking) scheme employed in photovoltaic power generation systems，it is difficult to balance tracking speed and precision. In this paper，a new modified dual-mode INC scheme with initial setting is proposed to improve the per-unit time power generation of the system. Experiments show that the modified scheme has effectively enhanced the tracking speed and reduced the turbulence in the process of MPPT compared with the existing MPPT techniques. At the same time，the modified scheme has improved the maximum power point tracking efficiency and the percentage of power increasing.

Key words：MPPT (maximum power point tracking)；dual-mode；INC；initial setting；tracking efficiency

责任编辑　汤振金