

# 任意辐照强度和温度下的光伏组件输出特性模拟仿真

陈建东 黄仕华

浙江师范大学物理系, 浙江 金华 321004

**摘要** 基于太阳能电池的一般理论模型,通过对太阳能电池的 $I-V$ 方程在短路点、最大功率点、开路点处进行一阶求导,构造代数方程组。根据光伏组件厂商提供的标准测试条件下的技术参数(短路电流、开路电压、最大功率点电流和电压等),采用遗传算法,求解5参量模型中的光生电流、反向饱和电流、等效串联电阻、等效并联电阻和理想因子等参数。与牛顿迭代法相比,遗传算法得到的结果稳定性和精确性更好,模拟结果的相对误差在2%左右。同时,针对Matlab仿真环境,构建了光伏组件的仿真模拟器,可以对任意环境温度、太阳辐射强度下光伏组件的输出特性进行仿真实验,对光伏发电系统研究人员来说,具有很好的实用参考价值。

**关键词** 光学器件;光伏组件;理论模型;遗传算法;仿真模拟

中图分类号 TK519 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.022303

## Simulation of Photovoltaic Module Characteristics in Arbitrary Solar Radiation and Temperature

Chen Jiandong Huang Shihua

Physics Department, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

**Abstract** Based on the general theoretical model of solar cell, algebraic equations are constructed by means of the derivative of the short circuit, maximum power point and open circuit of photovoltaic (PV) module. Using parameters, such as short-circuit current, open-circuit voltage, current and voltage at maximum power, given by PV manufacturer at standard test condition, five model parameters (photo current, diode saturation current, series resistance, parallel resistance, ideality factor) can be simulated by genetic algorithm. Compared with Newton iterative method, genetic algorithm can give more accurate and stable simulation results, and the relative error is about 2%. Also, PV module simulator operated in Matlab environment is constructed, and it can simulate the electric characterization of PV module in arbitrary solar radiation and temperature, which is helpful to PV systems researchers.

**Key words** optical devices; photovoltaic module; theoretical model; genetic algorithm; simulation

**OCIS codes** 230.5170; 000.4430; 350.6050

### 1 引言

鉴于常规能源供给的有限性和环保压力的增加,世界上许多国家掀起了开发和利用新能源的热潮。在新能源中,特别引人瞩目的是太阳能,它是一种干净、清洁、无污染、取之不尽用之不竭的自然能源,将太阳能转换为电能是大规模利用太阳能的重要技术基础。光伏(PV)发电将在未来的能源结构中占有重要的战略地位,并将成为未来的一种主要能源形式。在实际的光伏发电应用中,单个太阳能电池片因为输出电压太低、输出电流不合适,需要将若干个电池片进行串、并联以获得必要的输出电压、电流(功率),才可以作为光伏电源使用的光伏组件或太阳能电池组件。

收稿日期: 2015-08-24; 收到修改稿日期: 2015-09-13; 网络出版日期: 2016-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(61076055)、复旦大学应用表面物理国家重点实验室开放课题(KF2015\_02)

作者简介: 陈建东(1994—),男,本科生,主要从事太阳能电池方面的研究。E-mail: chenjianyxyq@qq.com

导师简介: 黄仕华(1967—),男,教授,硕士生导师,主要从事太阳能电池方面的研究。

E-mail: huangshihua@zjnu.cn(通信联系人)

对于实际光伏发电系统而言,光伏组件的输出特性受光照强度、环境温度和负载情况的影响很大。在光照强度和环境温度不变的情况下,光伏组件可以输出不同的电压,但是只有在某一输出电压值时,组件的输出功率才能达到最大值。因此,为了提高光伏发电系统的效率,应该实时调整光伏阵列的工作点,使之始终工作在最大功率点附近,这就需要知道光伏组件的输出特性。若直接对光伏组件进行实际测量,由于组件的输出特性对自然气候条件依赖性强,则需要特定的环境条件,同时也要耗费较高的实验成本。如果能根据厂商提供的电池片技术参数预测电池片在不同光照和温度下的输出特性,以及电池片经过串、并联构成组件后新的输出特性,并由此分析其最大的输出功率,就能够节约大量的实验成本。

由于厂商提供的电池片或组件的技术参数是在标准测试条件下(AM1.5, 25 °C)获得的,因此,很难根据这些参数来确定组件在实际条件下的输出特性。为了能根据这些标准参数来预测任意条件下的组件输出特性,一个精确合理的预测模型是需要的。晶体硅太阳能电池的电学特性可以用电流-电压( $I-V$ )曲线来表征,如何根据电池的 $I-V$ 曲线简单而又精确地确定这些参数,成为太阳能电池应用基础研究的一个重要内容<sup>[1]</sup>。双二极管模型被提出来模拟电池的输出特性<sup>[2]</sup>,但是由于需要求解含两个指数项的非线性隐方程,所以非常复杂且计算耗时长。为此,又提出了单二极管模型<sup>[3]</sup>,在忽略并联电阻影响的前提下,所谓的4参量模型被提出<sup>[4-5]</sup>。为了模拟较为精确且计算不太复杂,提出了基于单二极管的5参量模型<sup>[6-8]</sup>,这5个参数分别是理想因子、反向饱和电流、光生电流、串联电阻、并联电阻。在求解5参量模型的实际计算中,常常利用迭代求解的方法来获取参数的数值解<sup>[5-6,8]</sup>。但在迭代求解这些方程组时,迭代过程极易造成发散,同时,由于方程的复杂性,迭代法求解对初始值要求比较高,当电池参数偏离正常值时不能得到好的结果,而且计算量也比较大。国内也有课题组开展了这方面的研究,大多是把5参数化简为3参数,计算相对简单,并未通过解非线性方程组而得<sup>[9-12]</sup>。

通过对太阳能电池的 $I-V$ 方程在短路点(0,  $I_{sc}$ )、最大功率点( $V_m$ ,  $I_m$ )、开路点( $V_{oc}$ , 0)处进行一阶求导,构造代数方程组,采用遗传算法求解5参量模型中的参数,可以较为快速而精确地预测光伏组件在任意条件下的输出特性。遗传算法是一类借鉴生物界的进化规律演化而来的随机化搜索方法,其具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力且采用概率化的寻优方法,能自动获取和指导优化的搜索空间,自适应地调整搜索方向,不需要确定的规则<sup>[13]</sup>。同时,针对Matlab仿真环境,以太阳能电池5参量模型为基础,构建了光伏组件的仿真模拟器,可以对任意环境温度、太阳辐射强度下光伏组件的输出特性进行仿真实验,这对光伏发电系统研究人员来说具有很好的实用参考价值。

## 2 理论模型

一般情况下,单个太阳能电池的等效电路可以看成由二极管、恒流源  $I_{ph}$ 、串联电阻  $R_s$  和并联电阻  $R_p$  组成,如图1所示。根据基尔霍夫电流定律,单个太阳能电池的 $I-V$ 方程可以写为

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}, \quad (1)$$

式中  $I$  为太阳能电池两端的电流,  $I_{ph}$  为光生电流,  $I_0$  为反向饱和电流,  $V$  为太阳能电池两端的电压,  $R_s$  为等效串联电阻,  $R_p$  为等效并联电阻,  $n$  为理想因子。  $V_t$  ( $V_t = kT/q$ ) 为热电压,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度,  $q$  为基本电荷。

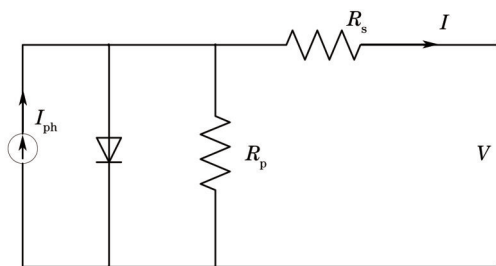


图1 太阳能电池的等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit for a solar cell

由  $N_s$  个串联、 $N_p$  个并联的光伏组件(见图2)的 $I-V$ 方程可以写成

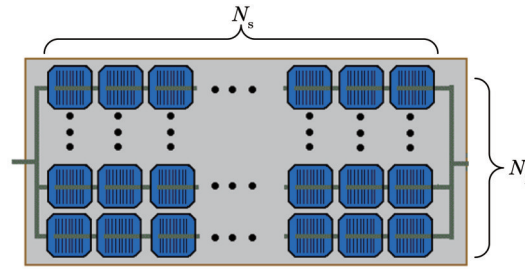


图2 光伏组件示意图

Fig.2 Schematic diagram of PV module

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{1}{V_t} \left( \frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right) \right] - 1 \right\} - \frac{N_p}{R_p} \left( \frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right). \quad (2)$$

如果有  $N_m$  个组件串联,  $N_n$  个组件并联, 只需将(2)式中  $N_s$ 、 $N_p$  改为  $N_s = N'_s \times N_m$ ,  $N_p = N'_p \times N_n$  ( $N'_s$ 、 $N'_p$  分别为电池片串联个数和并联个数)即可。从(2)式可知, 要研究光伏组件的输出特性, 需要知道5个未知模型参数( $R_s$ 、 $R_p$ 、 $I_0$ 、 $I_{ph}$ 、 $n$ ), 而要求解这5个模型参数, 至少需要5个独立的方程。通过光伏组件制造商提供的标准条件下的技术参数, 建立5个确定的方程, 通过解方程得到相应的模型参数。

对于标准条件下的短路情况, 有  $V=0$ ,  $I=I_{sc}$ , 代入(2)式可得

$$I_{sc} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp \left( \frac{I_{sc} R_s}{N_p V_t} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_p}. \quad (3)$$

对于标准条件下的开路情况, 有  $I=0$ ,  $V=V_{oc}$ , 可得

$$0 = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_{oc}}{N_s V_t} \right) - 1 \right] - \frac{N_p V_{oc}}{N_s R_p}. \quad (4)$$

对于标准条件下最大功率点情况, 有  $I=I_m$ ,  $V=V_m$ , 可得

$$I_m = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{1}{V_t} \left( \frac{V_m}{N_s} + \frac{I_m R_s}{N_p} \right) \right] - 1 \right\} - \frac{N_p}{R_p} \left( \frac{V_m}{N_s} + \frac{I_m R_s}{N_p} \right). \quad (5)$$

上面已有3个方程, 要想得到5个未知数, 还需2个方程, 故引入  $V$  对  $I$  的一阶导。假设

$$I = f(I, V), \quad (6)$$

则有

$$\frac{dV}{dI} = \frac{1 - \frac{\partial f(I, V)}{\partial I}}{\frac{\partial f(I, V)}{\partial V}}. \quad (7)$$

在短路点位置,  $V=0$ ,  $I=I_{sc}$ , 定义  $\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0, I=I_{sc}} = -R_{p0}$ , 又有  $R_{p0} = R_p$ <sup>[8]</sup>, 故代入(7)式并化简得到

$$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0, I=I_{sc}} = \frac{1 - \frac{\partial f(I, V)}{\partial I}}{\frac{\partial f(I, V)}{\partial V}} \Bigg|_{V=0, I=I_{sc}} = - \frac{1 + \frac{R_s}{V_t} I_0 \exp \left( \frac{I_{sc} R_s}{N_p V_t} \right) + \frac{R_s}{R_p}}{\frac{1}{V_t} I_0 \exp \left( \frac{I_{sc} R_s}{N_p V_t} \right) + \frac{1}{R_p}} = -R_{p0}, \quad (8)$$

在最大功率点位置,  $V=V_m$ ,  $I=I_m$ , 有

$$\left. \frac{dP}{dI} \right|_{V=V_m, I=I_m} = \frac{d(IV)}{dI} \Bigg|_{V=V_m, I=I_m} = V + \frac{dV}{dI} I = 0, \quad (9)$$

即

$$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=V_m, I=I_m} = - \frac{V_m}{I_m}. \quad (10)$$

将(10)式代入(7)式进行简化, 可以得到

$$\frac{dV}{dI} \left| \begin{matrix} V=V_m \\ I=I_m \end{matrix} \right. = \frac{1 - \frac{\partial f(I,V)}{\partial I}}{\frac{\partial f(I,V)}{\partial V}} \left| \begin{matrix} V=V_m \\ I=I_m \end{matrix} \right. = - \frac{1 + \frac{R_s}{V_t} I_0 \exp\left(\frac{N_p V_m + N_s I_m R_s}{N_p N_s V_t}\right) + \frac{R_s}{R_p}}{\frac{N_p}{N_s V_t} I_0 \exp\left(\frac{N_p V_m + N_s I_m R_s}{N_p N_s V_t}\right) + \frac{N_p}{N_s R_p}} = - \frac{V_m}{I_m}. \quad (11)$$

由此得到(3)、(4)、(5)、(8)和(11)式共5个独立方程,通过解这5个非线性方程就可以得到电池的模型参数。

### 3 模型仿真结果与比较

遗传算法是计算机模拟自然界的遗传规律演化而来的搜索方法,其运用首先需确定目标函数。将(3)式等号左边部分移至右边,令

$$g_1 = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{N_p V_t}\right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_p} - I_{sc}, \quad (12)$$

同理,(4)、(5)、(8)、(11)式按上述步骤得到  $g_2$ 、 $g_3$ 、 $g_4$ 、 $g_5$ ,构造目标函数

$$G = \sum_{n=1}^5 g_n^2. \quad (13)$$

通过遗传算法对5个模型参数进行全局寻优,得到目标函数的最小值点。首先对设定的解空间进行编码,随机生成一定数量的个体。然后对每个个体进行适应度的计算,若满足合适的条件,则退出循环,否则对群体进行选择、交叉、变异运算,之后再行适应度的判定,如此循环直到目标函数达到期望的值或进化代数超过设定的值为止。

在短路情况下,  $I_{ph} \gg (I_{sc} R_s)/R_p$ ,并且分流到二极管的暗电流很小,故  $I_{ph}$  只是略大于  $I_{sc}$ 。 $I_0$  为饱和电流,其主要与太阳能电池自身的材料(禁带宽度)有关,基本不受光照影响,而与温度相关。在标准测试条件下,  $I_0/I_{sc} \approx 10^{-10} \sim 10^{-8}$  [8]。 $R_s$  和  $R_p$  为等效串、并联电阻,对于单个太阳能电池而言,  $R_s$  一般在  $10^{-3} \sim 10^{-2} \Omega$  量级,  $R_p$  一般取  $1 \sim 10 \Omega$  [6-8]。 $n$  为二极管理想因子,在一般情况下,取值范围为  $1 \sim 2$ 。综合上述考虑并适当扩充范围,选定初值区间为

$$\begin{cases} I_{sc} \leq I_{ph} \leq 1.5 I_{sc} \\ I_{sc} \cdot 10^{-10} \leq I_0 \leq I_{sc} \cdot 10^{-8} \\ 0 \leq R_s \leq 0.1 \\ 1 \leq R_p \leq 10 \\ 1 \leq n \leq 2 \end{cases}. \quad (14)$$

通过组件模型,并使用遗传算法,取用表1的东磁集团 DM305-P156-72 多晶组件规格参数,得到模型仿真结果。

表1 东磁 DM305-P156-72 光伏组件规格参数

Table 1 Specifications of DMEGC DM305-P156-72 PV module

Specification	Value
Short-circuit current $I_{sc}$ /A	8.91
Open-circuit voltage $V_{oc}$ /V	44.9
Current at maximum power $I_m$ /A	8.48
Voltage at maximum power $V_m$ /V	36
Maximum power ( $P_{max}$ ) /W	305 W
Temperature coefficient of $I_{sc}$ ( $\alpha$ ) /(%/°C)	0.0457
Temperature coefficient of $V_{oc}$ ( $\beta$ ) /(%/°C)	-0.3538

在通过遗传算法得到表2的东磁电池模型参数后,需要绘制  $I$ - $V$  曲线。而由于(2)式为隐性方程,难以得到  $I$  或  $V$  显函数,所以一般绘制曲线时,会给定一系列  $V$  值,然后通过迭代得到相应的  $I$  值,造成的结果是计算量庞大,计算时间长。在此采取了一种简单的方法得到  $I$ - $V$  曲线。

表2 计算得到的电池和组件的模型参数

Table 2 Calculated specifications of PV cell / modules

	$I_{ph} / A$	$I_0 / A$	$R_s / \Omega$	$R_p / \Omega$	$n$
Cell	8.923	$5.69 \times 10^{-8}$	$1.91 \times 10^{-3}$	3.786	1.287
Model	8.923	$5.69 \times 10^{-8}$	0.138	271.3	1.287

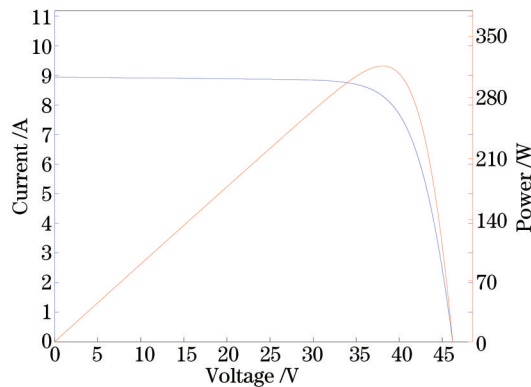
在(2)式中令

$$Z = \frac{IR_s}{N_p} + \frac{V}{N_s} \quad (15)$$

可以得到  $I = I(Z)$  的单值函数, 取  $Z = \left[ 0, \frac{I_{sc}R_s}{N_p} + \frac{V_{oc}}{N_s} \right]$  的范围, 得到相应的  $I$  值, 则相应的  $V$  值为

$$V = \left( Z - \frac{IR_s}{N_p} \right) N_s \quad (16)$$

去掉  $I$  与  $V$  中不符合物理意义的点, 即  $I < 0$  与  $V < 0$  的部分, 得到标准测试条件下光伏组件的  $I-V$  和  $P-V$  曲线, 如图3所示。

图3 标准测试条件下光伏组件的  $I-V$  和  $P-V$  模拟曲线Fig.3 Simulated  $I-V$  and  $P-V$  curves of PV modules under standard condition

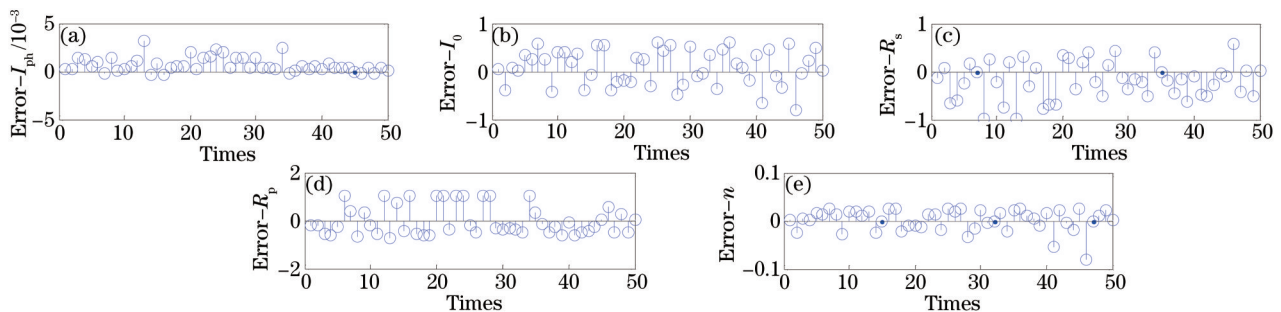
将计算得到的  $I_m$ 、 $V_m$ 、 $P_m$  与实际值进行比较, 如表3所示, 相对误差为2%左右。

表3 实验结果与模拟结果的比较

Table 3 Comparison of experimental results and simulation results

	Actual value	Calculated value	Relative error
$I_m$	8.48 A	8.30 A	2.12%
$V_m$	36 V	36.79 V	2.19%
$P_m$	305.28 W	305.36 W	0.026%

为验证遗传算法的稳定性, 现在将遗传算法与牛顿迭代算法进行比较。按(14)式确定初值范围, 用遗传算法进行50次运算, 得到50组数据, 作图4所示相对误差图, 可见5个参数在选定范围内稳定性非常好,  $I_{ph}$  相对误差在  $10^{-3}$  数量级,  $n$  保持在10%以内,  $I_0$ 、 $R_s$ 、 $R_p$  均在两倍以内。

图4 遗传算法计算值相对误差图。(a)  $I_{ph}$ ; (b)  $I_0$ ; (c)  $R_s$ ; (d)  $R_p$ ; (e)  $n$ Fig.4 Relative errors of calculated value using genetic algorithm. (a)  $I_{ph}$ ; (b)  $I_0$ ; (c)  $R_s$ ; (d)  $R_p$ ; (e)  $n$



牛顿迭代法,又称牛顿-拉夫逊法,是求方程近似根的方法。在求解过程中,设定5参数的初值、迭代步数及求解精度,并求得方程组的Jacobi矩阵,按牛顿迭代

$$x^{k+1} = x^k - \frac{f(x^k)}{F(x^k)}. \quad (17)$$

进行迭代,直到得到合适的解,其中 $F(x^k)$ 为Jacobi矩阵。由于牛顿迭代法无法给定初值范围,只能选定一个初值。故以4个参考数据作为4个初值,剩下一个初值在(14)式内按一定步长逐渐递增。由于篇幅有限,选取 $R_s$ 为变化初值,步长设定为 $0.0005 \Omega$ 。为显示大部分数据,剔除掉相对误差超过20倍的数据,剔除数据见表4。

表4 相对误差超过20倍的个数

Table 4 Numbers of relative error larger than 20 times

	$I_{ph}$	$I_0$	$R_s$	$R_p$	$n$
Newton iterative method (199 sets)	2	11	116	101	3
Genetic algorithm (50 sets)	0	0	0	0	0

对剩余数据进行作图,如图5所示。 $I_{ph}$ 在大部分范围内保持稳定,但在一小段区间有5倍以内的波动。 $I_0$ 在 $R_s$ 变化的后半段比较稳定,但在一开始波动较大。 $R_s$ 与 $R_p$ 虽然基本稳定,但表4所示相对误差20倍以上太多,基本占50%以上。 $n$ 对于两种算法来说都很稳定,但遗传算法相对误差更小。因此,遗传算法计算模型相比于牛顿迭代法可以得到更稳定的模拟结果。

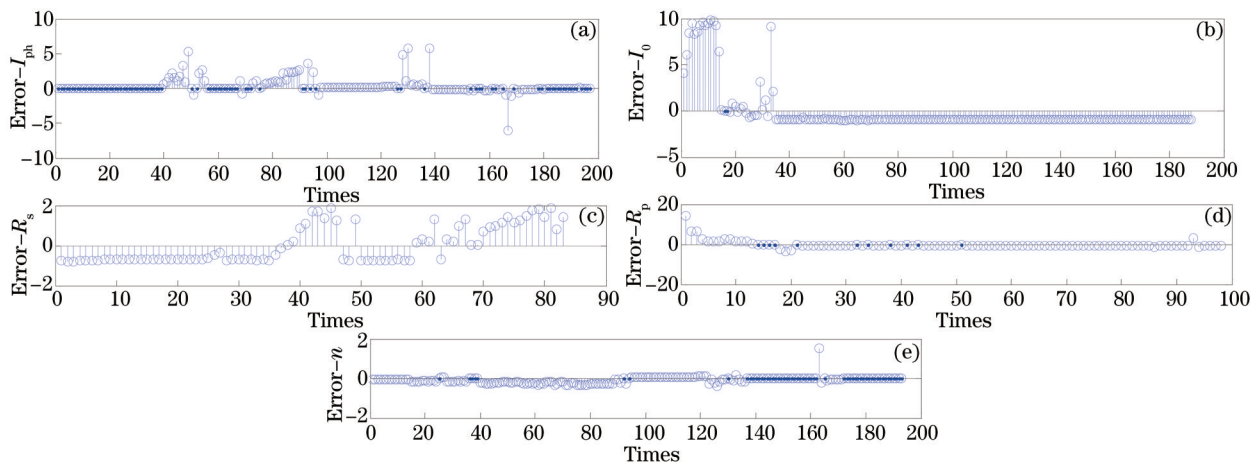


图5 牛顿迭代法计算值相对误差图。(a)  $I_{ph}$ ; (b)  $I_0$ ; (c)  $R_s$ ; (d)  $R_p$ ; (e)  $n$

Fig.5 Relative error of calculated value using Newton iterative method. (a)  $I_{ph}$ ; (b)  $I_0$ ; (c)  $R_s$ ; (d)  $R_p$ ; (e)  $n$

#### 4 任意辐照强度及温度下光伏组件的输出特性

组件生产商给定的均为标准测试条件下的规格参数,而组件的输出特性对自然气候条件(主要为太阳辐照强度与温度)依赖性强,故需要研究不同辐照强度及温度下电池的输出特性。由于光生电流 $I_{ph}$ 受太阳辐照强度及温度影响<sup>[6-8]</sup>,有

$$I_{ph} = I'_{ph} [1 + \alpha(T - T_0)] \frac{S}{S_0}, \quad (18)$$

式中 $I'_{ph}$ 、 $T_0$ (K)、 $S_0$ ( $W/m^2$ )分别为标准条件下的光生电流、热力学温度及辐照度, $T$ 、 $S$ 为任意条件下的温度与辐照度, $\alpha$ 为短路电流温度系数,单位是 $\%/^{\circ}C$ 。对于二极管反向饱和电流,其受禁带宽度与温度影响。硅的禁带宽度与温度的关系为<sup>[14]</sup>

$$E_g = 1.16 - 7.02 \times 10^{-4} \times \frac{T^2}{T - 1108}, \quad (19)$$

则温度与禁带宽度对反向饱和电流的影响可描述为<sup>[6-7]</sup>

$$I_0 = I'_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^3 \left( \frac{E_{g0}}{kT_0} - \frac{E_g}{kT} \right), \quad (20)$$

式中禁带宽度  $E_g$  与  $E_{g0}$  单位均为 eV。

理想因子  $n$  的变化对  $I-V$  曲线的形状影响不是很大,故可以认为理想因子不受温度、辐照度影响<sup>[7]</sup>。而由于热电压  $V_i$  含温度,故  $V_i$  表达为

$$V_i = V_i \frac{T}{T_0}, \quad (21)$$

等效并联电阻  $R_p$  代表电池漏电流的大小,一般认为  $R_p$  的大小与光辐照强度成反比<sup>[6,8]</sup>,即

$$R_p = R_p \frac{S_0}{S}, \quad (22)$$

一般情况下,等效串联电阻  $R_s$  为一常量,温度与辐照度对其无影响,即可直接选用标准测试条件下计算得到的  $R_s$ <sup>[3,6-7]</sup>。

经过温度与光辐照度对以上参量的修正,便可得到一般条件下的光伏组件模型,从而获得  $I-V$ 、 $P-V$  曲线。图6给出了环境温度为 25 °C,光照强度为 200~1000 W/m<sup>2</sup> 条件下组件的  $I-V$  曲线和  $P-V$  曲线。而图7给出了光照强度为 200 W/m<sup>2</sup>,环境温度为 10~75 °C 条件下组件的  $I-V$  曲线和  $P-V$  曲线。

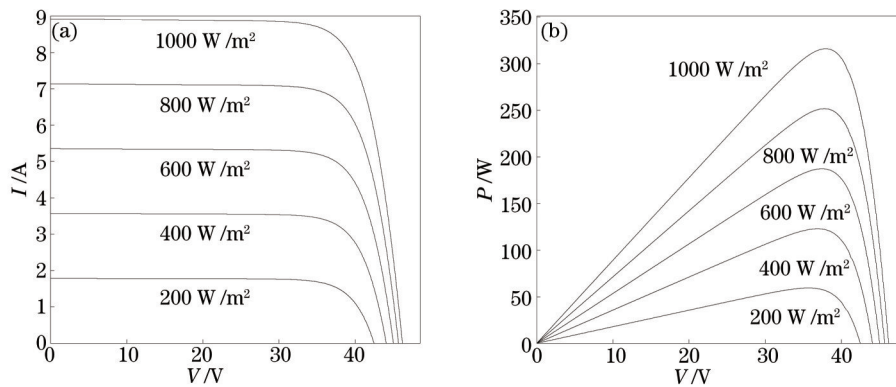


图6 不同光照强度下(环境温度为 25 °C)的组件输出特性。(a)  $I-V$ ; (b)  $P-V$

Fig.6 Characteristics under different solar radiations (ambient temperature is 25 °C). (a)  $I-V$ ; (b)  $P-V$

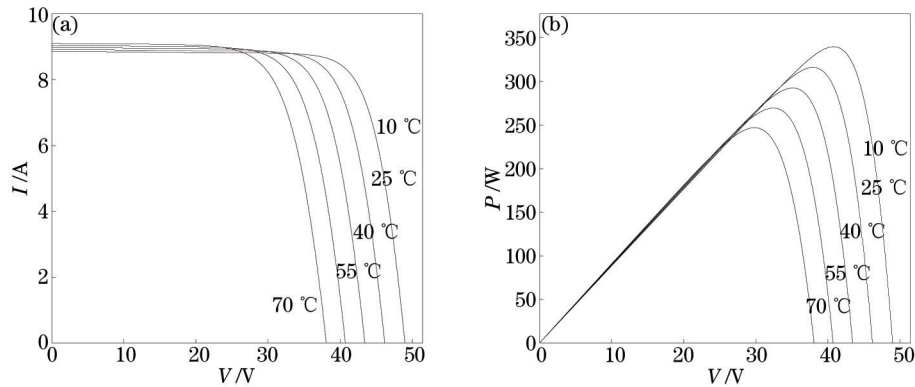


图7 不同温度下(光照强度为 1000 W/m<sup>2</sup>)的组件输出特性。(a)  $I-V$ ; (b)  $P-V$

Fig.7 Characteristics under different temperatures (irradiance intensity is 1000 W/m<sup>2</sup>). (a)  $I-V$ ; (b)  $P-V$

## 5 光伏组件的仿真模拟

图形用户界面,简称 GUI,通过它可以更方便地进行人机交互。利用 Matlab 程序中的 GUI 设计,依靠功能强大的 Matlab 支撑,使用编程设计了太阳能电池仿真模拟的 GUI,并导出成独立程序,不需要安装 Matlab 程序即可运行 GUI,如图 8 所示。在光伏组件的仿真模拟器中,包括了厂商提供的光伏组件技术参数、环境温度、太阳辐照强度的输入,标准条件下模型参数、任意条件下组件的输出特性、 $I-V$  曲线图、 $P-V$  曲线图的显示,以及可以更改串并联的个数。光伏组件仿真模拟器不需要了解内部的程序,可直接通过输入必要的的数据得到结果,方便简洁。

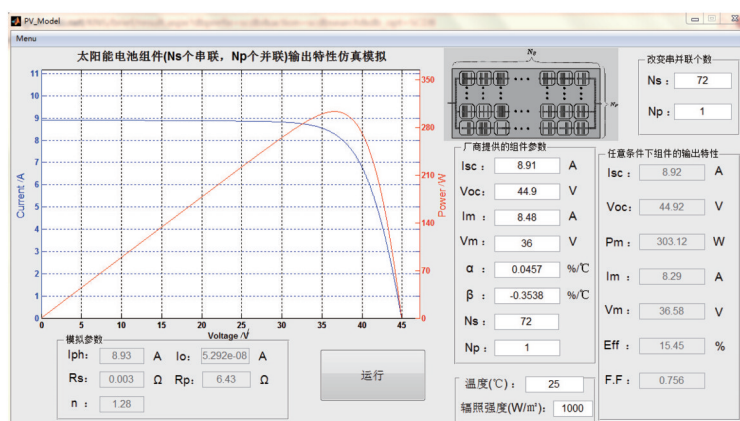


图8 光伏组件的仿真模拟器

Fig.8 PV module simulator

## 6 结 论

光伏组件厂商给定的技术参数是在标准条件下测量得到的,而组件的输出特性对自然气候条件(主要为太阳辐照强度与温度)依赖性强,因此研究不同辐照强度及温度下组件的输出特性很有意义。通过对太阳能电池的  $I-V$  方程在短路点  $(0, I_{sc})$ 、最大功率点  $(V_m, I_m)$ 、开路点  $(V_{oc}, 0)$  处进行一阶求导,构造代数方程组。根据光伏组件厂商提供的在标准测试条件下的技术参数,采用遗传算法,求解5参量模型中的参数值,从而可以较为快速而精确地预测光伏组件在任意条件下的输出特性。与牛顿迭代法相比,遗传算法得到的结果稳定性和精确性更好,模拟结果的相对误差在2%左右。同时,针对 Matlab 仿真环境,构建了光伏组件的仿真模拟器,可以对任意环境温度、太阳辐射强度下光伏组件的输出特性进行仿真实验,对光伏发电系统研究人员来说,具有很好的实用参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Xiaoguang, Hua Wenshen, Liu Xun. Experimental investigations of laser intensity and temperature dependence of single crystal silicon photovoltaic cell parameters[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802011.  
刘晓光, 华文深, 刘 恂. 激光辐照单晶硅光伏电池输出特性的实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802011.
- 2 D S H Chan, J C H Phang. Analytical methods for the extraction of solar-cell single-and double-diode model parameters from I-V characteristics[J]. IEEE T Electron Dev, 1987, 34(2): 286-293.
- 3 W De Soto, S A Klein, W A Beckman. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance[J]. Sol Energy, 2006, 80(1): 78-88.
- 4 R Khezzar, M Zereg, A Khezzar. Comparative study of mathematical methods for parameters calculation of current-voltage characteristic of photovoltaic module[C]. Electrical and Electronics Engineering International Conference (ELECO), 2009, 1-24-28.
- 5 A Mellit, M Benghanem, S A Kalogirou. Modeling and simulation of a stand-alone photovoltaic system using an adaptive artificial neural network: Proposition for a new sizing procedure[J]. Renew energy, 2007, 32(2): 285-313.
- 6 T Ma, H Yang, L Lu. Development of a model to simulate the performance characteristics of crystalline silicon photovoltaic modules/strings/arrays[J]. Sol Energy, 2014, 100: 31-41.
- 7 H Tian, F Mancilla-David, K Ellis, *et al.*. A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels[J]. Sol Energy, 2012, 86(9): 2695-2706.
- 8 V L Brano, A Orioli, G Ciulla, *et al.*. An improved five-parameter model for photovoltaic modules[J]. Sol Energ Mat Sol C, 2010, 94(8): 1358-1370.
- 9 Zhai Zaiteng, Cheng Xiaofang, Ding Jinlei, *et al.*. Characteristics of partially shadowed serial PV module output[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(4): 398-402.  
翟载腾, 程晓航, 丁金磊, 等. 被部分遮挡的串联光伏组件输出特性[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(4): 398-402.
- 10 Hu Yihua, Chen Hao, Xu Ruidong, *et al.*. PV module characteristics effected by shadow problem[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 123-128.



- 胡义华, 陈 昊, 徐瑞东, 等. 光伏电池板在阴影影响下输出特性[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 123-128.
- 11 Dan Yangqing, Liu Wenying, Zhu Yanwei. Matlab simulation of PV array and analysis of output efficiency under partial shading [J]. Acta Enerciae Solaris Sinca, 2013, 34(6): 997-1001.  
但扬清, 刘文颖, 朱艳伟. 局部阴影条件下光伏阵列 Matlab 仿真及输出效率分析[J]. 太阳能学报, 2013, 34(6): 997-1001.
- 12 Xu Yuzhen, Zhan Hongxia, Zhang Ruidong, *et al.*. Analysis on the output power of photovoltaic cells based on simulation model[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(6): 1115-1118.  
许玉贞, 詹红霞, 张瑞冬, 等. 基于仿真模型的光伏电池输出功率的分析[J]. 半导体光电, 2014, 35(6): 1115-1118.
- 13 Tang Yunhai, Wu Quanying, Chen Xiaoyi, *et al.*. Optimization design of the meridian line of progressive addition lenses based on genetic algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0922005.  
唐运海, 吴泉英, 陈晓翌, 等. 基于遗传算法的渐进多焦点镜片子午线优化设计[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0922005.
- 14 S K Kim, J H Jeon, C H Cho, *et al.*. Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis[J]. Sol Energy, 2009, 83(5): 664-678.

栏目编辑: 张 雁