

doi: 10.3788/gzxb20134209.1077

基于改进型双二级管模型的户外模组电量预测技术研究

周健¹, 李红飞¹, 刘毓成¹, 易亚沙^{1,2,3}, 刘世勇⁴, 孟凡英¹, 刘正新¹

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

(2 纽约大学, 纽约, 美国 NY10012)

(3 麻省理工学院, 剑桥, 马萨诸塞, 美国 MA02139)

(4 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 基于 20 kW 晶硅户外试验电站, 实现了对光伏方阵开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大功率点功率 P_m 、最大功率点电压 V_m 、最大功率点电流 I_m 阳辐照度以及环境温度等参量的自动测试记录。将实验测量的 7 个不同条件下的 $I-V$ 电学参量外推广到标准光条件下, 对常规双二级管模型进行补正, 成功预测任意选定(除上述 7 条 $I-V$ 曲线之外)的光照和温度条件下的功率输出, 偏差小于 2.73%。实验表明, 该模型对上海户外环境条件下的电站发电规律具有较好的表述, 对于电站电力预测具有参考价值。

关键词: 模组; 电量预测; 模型; 修正

中图分类号: TK512; TK514

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)09-1077-6

A Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Module under Natural Environment

ZHOU Jian¹, LI Hong-fei¹, LIU Yu-cheng¹, YI Ya-sha^{1,2,3},
LIU Shi-yong⁴, MENG Fan-ying¹, LIU Zheng-xin¹

(1 Shanghai Institute of micro-system and information technology, CAS, Shanghai 200050, China)

(2 New York University, New York, NY 10012)

(3 Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts MA02139)

(4 Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on MATLAB software and iterative method, a kind of trial-error method for different natural environments (NET) is proposed. Solar module temperature, solar radiation and their effects on series resistance are taken into account in this model. Nine $I-V$ curves are measured under natural environmental conditions to predict the model parameters under STC (i. e. open voltage V_{ocref} , short current I_{scref} , maximum voltage V_{mref} , maximum current I_{mref} , maximum power P_{mref} , $i=1\sim 7$). Increasing the number of the measured $I-V$ curves may help for obtaining more accurate real value of V_{ocref} , I_{scref} , V_{mref} , I_{mref} , P_{mref} under STC. In order to test the validation of this model, the proposed model is used to evaluate the solar energy output of the module under a condition except for the nine $I-V$ curves with nine different natural conditions. The deviation of the output of the calculated P_{mC} from the measured output P_{mE} under the investigated condition ($G=647\text{ W/m}^2$, $T=67.7^\circ\text{C}$) turns out to be 2.73%, which means that

基金项目: 上海 AM 基金项目(No. 0952067.74700)、上海市自然科学基金(No. 09ZR1437500)、中国科学院重要方向项目(No. KG CX2-YW-399+1)和中国科学院院地合作项目(No. YDJDBNJ-2012-027)资助

第一作者: 周健(1970-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为太阳能电池模组户外测试技术、太阳能电池标准测试技术等. Email: zjian@mail.sim.ac.cn

收稿日期: 2013-03-08; **录用日期:** 2013-05-16

this kind of trial-error model can be used to design PV modules and predict the yield of the module under arbitrary natural environment.

Key words: PV module; Power prediction; Model; Correction

0 引言

太阳能作为一种可持续的、清洁能源在未来具有广阔的应用前景. 作为太阳能转换的载体, 光伏电池、光伏模组和发电系统越来越受到广大科技界和产业界的重视. 目前由于光伏模组投资成本相对较高, 这使得在安装前, 基于自然光条件下的光伏模组精确和可靠预测模拟显得尤为必要.

影响太阳电池电站电量预测准确度关键是对光伏模组电量预测的准确性, 通常最受欢迎的模拟方法是基于等效电路模型来评估模组的电流-电压关系. 已有科研人员提出了多个模型. 其中最为简单的是基于带有与二极管并联的线性独立电流源的单二极管模型^[1-2]. 该模型只需要开路电压(V_{oc})、电路电流(I_{sc})和理想因子(n)等 3 个参量就可以模拟 $I-V$ 曲线. 后来该模型得到进一步拓展, 变为 R_s -模型, 其中增加了串联电阻(R_s)^[3-5]. 尽管该方法在光伏系统发电量预测方面比较流行, 其存在一个重要的不足, 就是对于不同温度和不同光强的自然光下的电量不能提供准确的预测^[4], 计算便捷性也不足, 如 M. G. Villala 基于该模型提出了计算 R_{sh} 和 R_s 的关系式, 但在计算时容易出现不收敛的情况^[6]. R_s 模型增加对并联电阻的考量, 可以拓展为 R_p (或 R_{sh}) 模型, 又称为五参量模型, 尽管在高辐射(高照射强度)区准确度较高, 但在低辐射强度条件下尤其是考虑电压附近模型与试验结果变差较为明显^[7]. 尽管针对部分阴影模组的电量和模型进行预测, 但在准确度方面有待提高^[8-9].

借助于现代计算机强大的计算能力, 更为精确但更为复杂的模型被提出, 一个主要代表是双二极管模型^[10]. 该模型将可变参量增加到 7 个, 成为 7 参量模型, 增加了计算的复杂度和计算时间.

最近有研究人员提出了新的模拟方法, 基于 Lambert 功函数方程, 在恒定光照下采用单一 $I-V$ 曲线来估算电池的参量^[11]. 尽管该方法可以很精确地确定 n 、 R_{sh} 和 R_s 三个参量, 但是采用迭代法迭代时获得 $I-V$ 的计算窗口比较小, 很容易出现不完整的 $I-V$ 曲线的情况.

国内也有不少单位开展了电量预测方面的建模与仿真研究, 多基于发电系统开展, 丁明等人基于马尔可夫链提出对发电系统输出功率短期预测方法^[12], 华北电力大学对于各种发电系统模型比较, 总结了利用各元件模型建立系统模型的方法以

及孤岛保护的研究现状及其建模方法^[13]. 但所调研的中文文献中未见针对太阳电池单片模组电量预测方面的研究^[14-19].

其它的双二极管模型基于少子寿命、电子扩散系数、本征载流子浓度和其它物理参量^[20-22]. 尽管这些参量有助于理解太阳电池半导体物理特征, 但研究者给出的太阳电池光谱照度和温度参量主要依据当地气象数据, 未给出模组所在环境光照和模组实测数据, 使得建立的模型在大多数情况下与实际偏差较大.

为解决以上诸多问题, 本文基于双二极管模型, 提出了一种实际的模拟方法, 可以预测电池模组的任意温度和光强下的 $I-V$ 和 $I-P$ 曲线, 模拟是在 Matlab 环境下进行, 基于对某一实际试验测得的 $I-V$ 曲线的比较验证, 模型的准确度得到了确认, 该模型为研究人员提供了一种自然光条件下的快速、准确和综合的光伏电量预测方法.

1 光伏模组和测试设备

试验系统采用 230 W 的多晶模组置于上海嘉定新能源技术中心楼顶(121.48°E; 31.22°N), 模组安装倾斜度同所在纬度, 面南. 图 1 为置于楼屋顶的测试现场模组, 模组技术参量为: 基准条件下, 短路电流 $I_{sc,ref}=8.46$ A, 开路电压 $V_{oc,ref}=37.27$ V, 最大功率点工作电流 $I_{mp,ref}=7.88$ A, 最大功率点工作电压 $V_{mp,ref}=29.19$ V, 最大功率 $P_{mp,ref}=230$ W. 这些参量是由模组厂家在标准条件下测得(STC 代表在光强为 1000 W/m², 温度 25°C AM1.5 光照条件).



图 1 测试中的屋顶模组(左侧第二片为研究对象)
Fig. 1 Solar module under testing on the roof(second module from left side is the object under testing)

所研究的光伏模组由 60 片电池串联而成, 每 20 片并联一个旁路二极管, 每片电池面积为 $0.024\ 336$ m², 模组面积为 $1.460\ 16$ m². 多晶硅的电子能隙 E_g 为 1.124 eV. 测试仪器如图 2.



图 2 测试仪器和设备

Fig. 2 Solar module IV curve testing equipment

2 光伏电池模型

2.1 五参量模型

五参量模型^[23]可以用式(1)表示, I 表示负载电流, V 表示光伏面板的输出电压, I_0 表示通过二极管的反向饱和电流, I_{ph} 表示光电流, R_s 表示串联电阻, q 表示电子电荷, T 表示温度, 单位 K, n 为理想因子.

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[\exp \left(\frac{V + R_s \times I}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \quad (1)$$

给定温度和光照下的五参量可以通过 $I-V$ 曲线的开路电压端和短路电流端的斜率计算得出^[22], 由于取点数没有规定, 所以不同的研究者采用该方法会得出不同的结果.

2.2 改进型双二极管模型

基于 K. Ishaque's 的七参量模型, 由模组串并联形成的光伏阵列电流可以表示为^[24-25]

$$I = N_{pp} \left\{ I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{a_1 V_T N_{ss}} + \exp \left(\frac{V + IR_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{a_2 V_T N_{ss}} \right) \right) - 2 \right] \right\} - \frac{V + IR_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{R_{sh} \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (2)$$

式中, 两个二极管的理想因子 a_1 和 a_2 分别代表扩散和符合电流分量, R_s 表示串联电阻, R_{sh} 表示并联电阻, N_{ss} 表示光伏阵列中的串联模组的个数, N_{pp} 表示光伏阵列中的并联模组的个数. N_s 表示单一模组中串联的电池片数量, 这里只研究单一模组情况, 因此 $N_{ss} = 1, N_{pp} = 1, N_s = 60$.

表 1 是基于式(2)和不同光照和模组温度条件下的实测 $I-V$ 曲线进行模拟, 获得的 R_s 表示串联电阻, R_{sh} 表示并联电阻, α, β, a_2 等参量. 表 2 对比了模组厂商提供的模组技术参量和采用的模拟参量.

表 1 模组不同光强和模组温度条件下的串联电阻和并联电阻

Table 1 Simulated R_{sh}, R_s of module under different T and G

G	T	R_{sh}	R_s	α	β	a_2
351	43.165	160.000	0.300	0.043	(0.350)	5.100
578	62.153	160.000	0.430	0.038	(0.350)	4.620
610	66.457	165.000	0.470	0.040	(0.350)	4.470
640	68.451	165.000	0.490	0.046	(0.350)	4.390
592	67.596	165.000	0.520	0.008	(0.350)	4.500
480	61.647	165.000	0.380	0.054	(0.350)	4.550
327	52.374	160.000	0.260	0.062	(0.350)	4.850

表 2 模组制造商提供和模拟的标准光条件下的参量比较

Table 2 Simulated and manufacture-provided parameter under standard testing condition (STC)

Parameter	Unit	STC(Manufacture)	Simulated
V_{ocref}	V	37.27	36.94
I_{sc}	A	8.46	8.87
V_{pm}	V	29.19	29.19
I_{pm}	A	7.88	7.92
P_{mm}	W	230	226.6
R_{sh}	Ω	114	163
R_s	Ω	0.6	0.4
I_{ph}	A	8.46	8.87
I_0	A	2.41E-10	2.44E-10
α	A/ $^\circ$ C	0.05	0.042
β	V/ $^\circ$ C	-0.35	-0.35

关于模组输出, Ali Naci Celik 等人^[26]给出了短路电流和开路电压的温度系数, 为恒定常量, 然而将实际测量时基于不同光照 G_i 和温度 T_i ($i=1 \sim 7$, 图 3) 带入表达式发现, 计算出的输出功率 P_{mref} 和标准光下厂家给出的功率 P_{mstc} 相差较大. 为提高模拟准确度, 本文给出修正型双二极管模型, 即在开路电压和短路电流的关系中增加 h_1 和 h_2 常量, 作为修正, 见方程(3)和(4).

$$V_{ocref} = V_{oc} - h_1 \beta (T - T_{ref}) - m V_T \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (3)$$

$$I_{scref} = \frac{G_{ref}}{G} (I_{sc} - h_2 a (T - T_{ref})) \quad (4)$$

式中, m 是常量值, 可通过如下公式计算: $m = 0.0256 \times N_s / T_{ref} = 0.0256 \times 60 / 298 = 5.12E-3$ V/K, 与日本 Kyocera 公司的 KC175GHT 和三洋公司的 HIP-240 HDE4 模组相应值在同一数量级上^[27-28], G_{ref} 为标准光辐射强度 1000 W/m², G 为自然光辐射强度, α, β 分别为电流和电压温度系数, $T_{ref} = 25^\circ$ C.

将表 3 中 V_{ocref}, I_{scref} 的值设置为与标准光下的 V_{ocstc} (37.27 V) 和 I_{scstc} (8.46 A) 分别相等, h_1, h_2 的值可以通过计算得出.

表 3 计算得到的不同 G 和 T 条件下的

$V_{ocref}, I_{scref}, V_{mref}, I_{mref}, P_{mref}$

Table 3 Simulated $V_{ocref}, I_{scref}, V_{mref}, I_{mref}, P_{mref}$ data of module under different G and T

$V_{ocstc} = 37.27 \text{ V}, I_{scstc} = 8.46 \text{ A}, V_{mstc} = 29.19 \text{ V};$					
$I_{mstc} = 7.88 \text{ A}, P_{mstc} = 230 \text{ W}$					
V_{ocref}	dev/(%)	I_{scref}	dev/(%)	P_{mref}	dev/(%)
35.4	-4.9	8.5	0.3	219.3	-4.7
37.2	-0.2	8.7	3.0	222.3	-3.4
37.4	0.4	8.8	4.5	223.8	-2.7
37.7	1.1	9.2	8.4	230.7	0.3
37.4	0.4	9.0	6.2	226.6	-1.5
37.3	0.1	9.1	7.7	235.8	2.5
36.2	-2.9	8.8	3.8	228.0	-0.8

2.3 基于改进型双二极管模型的模拟过程

基于改进型双二极管模型的模拟过程(如图

3):

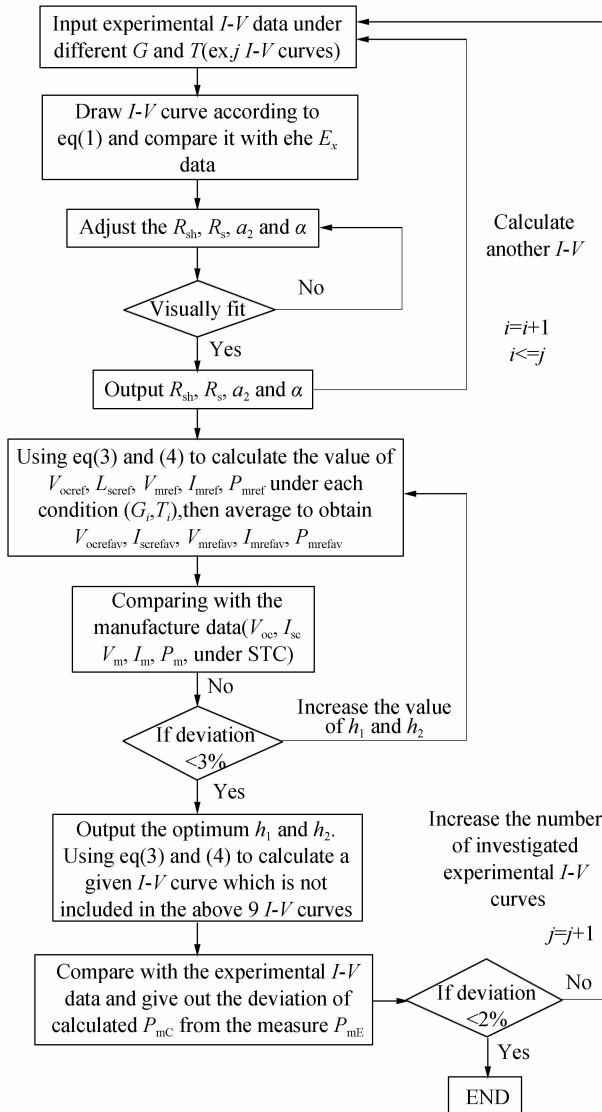


图 3 改进型双二极管模型的建模流程

Fig. 3 Procedure of building double-diode model

- 1) 在不同光照和温度下测量模组 $I-V$ 曲线;
- 2) 给出 V_{oc} 、 I_{sc} 、 V_m 、 I_m 和 P_m 在不同光照和温

度下的值,基于双二极管模型,根据公式(2),借助 matlab 编程,通过改变参量,达到模拟和实际测量 $I-V$ 重合(偏差小于 0.5%),得出厂家未提供的系列参量(R_{sh}, R_s, β, a_2 , 等,见表 1 和表 2);

3) 采用方程(3)和(4)及不同光照和温度下 $I-V$ 曲线来预测 $V_{ocref}, I_{scref}, V_{mref}, I_{mref}, P_{mref}$ 的值,结果见表 3;

4) 综合考虑自然光推算的 STC 条件和厂家室内模拟光的光谱失配 10%,计算其导致的 P_{mref} 与 P_{mstc} 不确定度为 $\pm 0.4\%$ 。在 0-1 之间调节 h_1 和 h_2 ,比较 $V_{ocref}, I_{scref}, V_{mref}, I_{mref}, P_{mref}$ 的平均值与模组厂商给出的 $V_{ocstc}, I_{scstc}, V_{mstc}, I_{mstc}, P_{mstc}$ 值,如果 P_{mref} 与 P_{mstc} 的偏差小于 2.6%,那么停止计算给出 h_1 和 h_2 的结果;

5) 测量最大功率与相应计算最大功率的平均百分误差 (APEMP) 表示为

$$\delta_{mpp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_{mre} - P_{mstc}}{P_{mstc}} \right| \quad (5)$$

根据表 3,不难计算得出 δ_{mpp} 为 2.7%。

6) 利用 $V_{ocstc}, I_{scstc}, V_{mstc}, I_{mstc}, P_{mstc}, h_1, h_2, \alpha, \beta$ 数据和式(3)和(4) 预测不同上述讨论的 7 条 $I-V$ 以外的任一条 $I-V$ 实验曲线 ($G = 647, T = 67.7^\circ\text{C}$);

7) 在所研究条件 ($G = 647, T = 67.7^\circ\text{C}$) 下,比较预测的 $I-V$ 曲线和在自然光条件下实测的 $I-V$ 曲线。

3 模型验证

根据程序 3.3-2), 借助 matlab 编程,通过改变参量,达到模拟和实际测量 $I-V$ 曲线重合(偏差小于 0.5%),图 4、5 显示不同温度和光照条件下的计算(基于改进型双二极管模型)和实验 $I-V$ 和 $P-V$ 曲线比较,可以发现模拟与实验测量曲线重合,保证了用于后续计算的各参量的准确性。

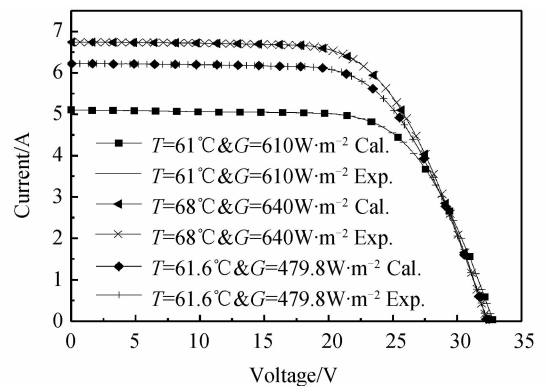


图 4 不同温度和光照条件下的计算(基于改进型双二极管模型)和实验 $I-V$ 曲线比较

Fig. 4 Calculating and experimental $I-V$ curve under different temperature and irradiance

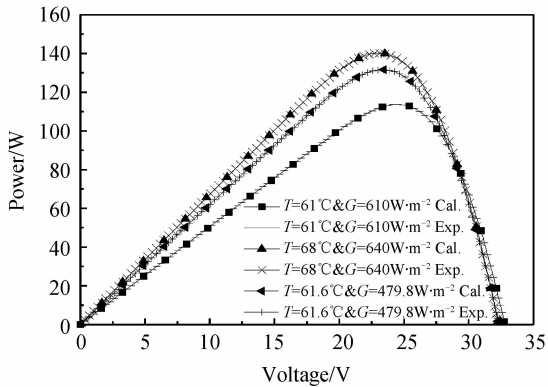


图5 不同温度和光照条件下的计算(基于改进型双二极管模型)和实验 $P-V$ 曲线比较

Fig. 5 Calculating and experimental $P-V$ curve under different temperature and irradiance

根据程序 3.3-4), 改变 h_1 和 h_2 (从 0 到 1, step = 0.01), 如果 P_{mref} 和 P_{mstc} 偏差小于 3% 则停止计算, 得出结果 $h_1 = 0.4, h_2 = 0.5$. 图 6 和图 7 显示了标准光条件下计算和实验得出的 $I-V$ 和 $I-P$ 曲线对比图 ($h_1 = 0.4, h_2 = 0.5$).

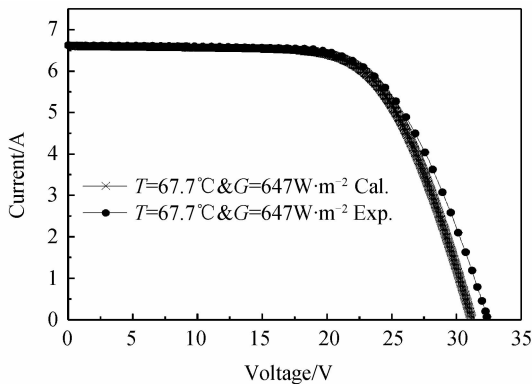


图6 $T=67.7^\circ\text{C}$ 和 $G=647\text{ W/m}^2$ 条件下的计算(基于改进型双二极管模型)和实验 $I-V$ 曲线比较

Fig. 6 Calculated and experimental $I-V$ curve ($T=67.7^\circ\text{C}$, $G=647\text{ W/m}^2$)

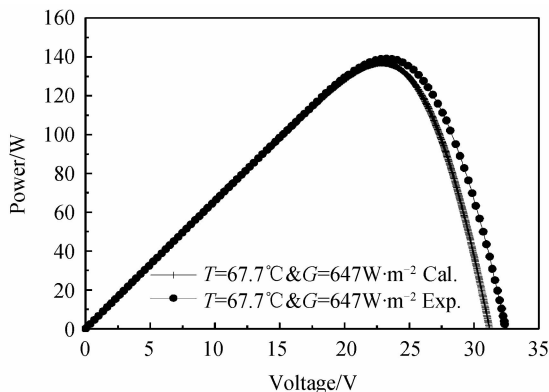


图7 $T=67.7^\circ\text{C}$ 和 $G=647\text{ W/m}^2$ 条件下的计算(基于改进型双二极管模型)和实验 $P-V$ 曲线比较

Fig. 7 Calculating and experimental $P-V$ curve ($T=67.7^\circ\text{C}$ and $G=647\text{ W/m}^2$)

将 V_{ocstc} 、 I_{scstc} 、 V_{mstc} 、 I_{mstc} 、 P_{mstc} 、 $h_1 = 0.4$ 、 $h_2 = 0.5$ 、 $\alpha = 0.04\text{ A/K}$ 、 $\beta = -0.35\text{ V/K}$ 带入方程(3)

和(4)借助程序 3.3-5), 预测任意其它 $I-V$ 曲线(除上述 7 条曲线外的第八条曲线, $G=647\text{ W/m}^2$, $T=67.7^\circ\text{C}$). 计算的功率输出 P_{mc} 和测量输出 P_{mE} 比较 ($G=647$, $T=67.7^\circ\text{C}$), 计算其偏差. 表 4 显示模组输出功率 P_{mpp} 的计算值 P_{mc} 与测量值 P_{mE} 偏差为 2.73%. 开路电压 V_{oc} 和短路电流 I_{sc} 偏差分别为 4.3% 和 0.39%, 这些偏差可能与自然光条件下太阳光强涨落有关. 偏差可以通过增加用以计算 V_{oc} 、 I_{sc} 、 V_m 、 I_m 和 P 的 $I-V$ 曲线条数(如由 7 条增加到 10 条)来进一步降低.

表4 模组输出功率 P_{mpp} 的计算值 P_{mc} 与测量值 P_{mE} 偏差
Table 4 The deviation of calculated and measured module Power output

	V_{oc}	I_{sc}	V_{mpp}	I_{mpp}	P_{mpp}
Exp.	32.35	6.62	23.216	5.99	139.1
Cal.	30.94	6.59	22.62	5.98	135.30
dev	-0.043	0.003 9	-0.025	0.008	-0.027 3

4 结论

本文给出了改进型双二极管模型, 基于不同光照和温度条件, 选择自然光条件下测得的 7 条 $I-V$ 曲线, 用以预测 STC 条件下的模型参量 (V_{ocrefi} 、 I_{screfi} 、 V_{mrefi} 、 I_{mrefi} 、 P_{mrefi} , $i=1\sim 7$). 增加用于模型研究的 $I-V$ 曲线条数有利于提高模型准确度. 模拟结果和实验结果对比表明, 采用该模型预测的某自然条件下 ($G=647\text{ W/m}^2$, $T=67.7^\circ\text{C}$) 模组输出与实际测量的功率输出偏差为 2.73%. 模型提供了可接受的模型预测准确度, 对于预测光伏模组在任意自然条件下的发电量具有重要价值.

参考文献

- [1] KAJIHARA A, HARAKAWA A T. Model of photovoltaic cell circuits under partial shading[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2005, [S. l.]: [S. n.]: 866-870.
- [2] BENAVIDES N D, CHAPMAN P L. Modeling the effect of voltage ripple on the power output of photovoltaic modules[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, **55**(7): 2638-2643.
- [3] XIAO W, DUNFORD W G, CAPEL A. A novel modeling method for photovoltaic cells[C]. IEEE 35TH Annual Power Electronics Specialists Conference. (PESC), 2004, 3: 1950-1956.
- [4] WALKER G. Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model[J]. *Journal of Electrical. & Electronic. Engineering*, 2001, **21**(1): 45-55.
- [5] PARASKEVADAKI E V. Evaluation of MPP volt-age and power of mc-Si PV modules in partial shading conditions[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, **26**(3): 923-932.
- [6] VILLALVA M G, GAZOLI J R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays[J]. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2009, **24**(5): 1198-1208.
- [7] YADIR S, BENHMIDA M. New method for extracting the

- model physical parameters of solar cell using explicit analytic solutions of current-voltage equation [C]. Proceeding of International .Conference. Microelectronics (ICM), 2009, [S. 1]: 390-393.
- [8] DING Kun, BIAN Xin-gao, LIU Hai-hao. A MATLAB-simulink based pv module model and its application under conditions of nonuniform irradiance[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2012, **27**(4): 864-872.
- [9] BIDRAM A, DAVOUDI A, BALOG R S. Control and circuit techniques to mitigate partial shading effects in photovoltaic arrays-an overview [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2012, **2**(4): 532-546.
- [10] ISHAQUE K, SALAM Z. Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model [J]. *Simulation Modeling practice and Theory*, 2011, **19**: 1613-1626.
- [11] ZHANG C F, ZHANG J C. A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve[J]. *Journal of applied physics*, 2011, **110**(064504): 1-7.
- [12] XU Hong-hua. The study on development of PV technology in china[J]. *Power System Technology*, 2007, **31**(20): 77-81.
许洪华, 中国光伏发电技术发展研究[J], 电网技术, 2007, **31**(20): 77-81.
- [13] DING Ming, XU Ning-zhou. A method to forecast short-term output power of photovoltaic generation system based on markov chain[J]. *Power System Technology*, 2011, **35**(1): 152-157.
丁明, 徐宁舟. 基于马尔可夫链的光伏发电系统输出功率短期预测方法[J]. 电网技术, 2011, **35**(1): 152-157.
- [14] SHI Wen-hui, BIE Zhao-hong, WANG Xi-fan. Applications of markov chain monte carlo in large-scale system reliability evaluation [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2008, **28**(4): 9-15.
石文辉, 别朝红, 王锡凡. 大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, **28**(4): 9-15.
- [15] LIU Hua, LU Zheng-wu, ZHU Rui, *et al.* RX non-imaging solar concentrator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 194-197.
刘华, 卢振武, 朱瑞, 等. RX型非成像太阳能聚光镜的设计[J]. 光子学报, 2008, **37**(2): 194-197.
- [16] ZHAO Hui-fu, LIU Hua, SUN Qiang, *et al.* Design of outdoor concentration test system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1270-1275.
赵会富, 刘华, 孙强, 等. 户外聚光测试系统设计[J]. 光子学报, 2011, **40**(8): 1270-1275.
- [17] NING Duo, WU Tao, HUANG Jian-bing, *et al.* Signal acquisition device of concentrating solar rough and fine adjustment complementary[J]. *Acta Photonica Sinica* 2011, **40**(5): 878-882.
宁铎, 吴涛, 黄建兵, 等. 聚光型粗细调互补阳光信号采集器的研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(5): 878-882.
- [18] ZHU Rui, LU Zhen-wu, LIU Hua, *et al.* The solar concentrator design method based on non-imaging optics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **31**(8): 45-47.
朱瑞, 卢振武, 刘华, 等. 基于非成像原理设计的太阳能聚光镜[J]. 光子学报, 2008, **31**(8): 45-47.
- [19] JIAO Yang, SONG Qiang, LIU Wenhua. Practical simulation model of photovoltaic cells in photovoltaic generation system and simulation [J]. *Power System Technology*, 2010, **34**(11): 198-202.
焦阳, 宋强, 刘文华. 光伏电池实用仿真模型及光伏发电系统仿真[J]. 电网技术, 2010, **34**(11): 198-202.
- [20] KUROBE K, MATSUNAMI H. New two-diode model for detailed analysis of multi-crystalline silicon solar cells[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, **44**(12): 8314 - 8321.
- [21] NISHIOKA K. Analysis of the temperature characteristics in polycrystalline Si solar cells using modified equivalent circuit model[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, **42**(12): 7175 - 7179.
- [22] NISHIOKA K, SAKITANI N. Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration [J]. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2007, **91**(13): 1222-1227.
- [23] ZEGAOU A, PETIT P. Experimental validation of photovoltaic direct and reverse mode model influence of partial shading[J]. *Energy Procedia*, 2012, **18**: 1247-1253.
- [24] ISHAQUE K, SALAM Z. A comprehensive MATLAB simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model[J]. *Solar Energy*, 2011, **85**(9): 2217-2227.
- [25] RAMAPRABHA R, MATHUR B L. Development of an Improved Model of SPV Cell for Partially Shaded Solar Photovoltaic Arrays [J]. *European Journal of Scientific Research*, 2010, **47**(1): 122-134.
- [26] CELIK A N, ACIKGOZ N. Modeling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models [J]. *Applied Energy*, 2007, **84**(1): 1-15.
- [27] VALERIO L B, ALDO O. An improved five-parameter model for photovoltaic modules[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2010, **94**: 1358-1370.
- [28] VALERIO L B, ALDO O. On the experimental validation of an improved five-parameter model for silicon photovoltaic modules[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2012, **105**: 27-39.