

基于能量守恒的光伏组件温度的估算

程 泽, 杨根源, 刘 力

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘 要: 用逐层遮挡的方法模拟太阳能电池不同的光能吸收率, 采用自适应混沌粒子群算法辨识出相应状态下太阳能电池模型的5个参数值, 建立与光能吸收率之间的对应关系, 并基于能量平衡方程进行光伏组件温度的估算。通过辨识模型参数确定吸收率, 基于能量平衡估算光伏组件温度的模型能够较好地吻合实验数据。

关键词: 光能吸收率; 模型参数辨识; 能量平衡; 光伏组件温度

中图分类号: TP277

文献标识码: A

0 引 言

近年来, 太阳能电池在中国生产和应用飞速发展, 光伏系统的装机容量快速增长, 据不完全统计, 2015年中国新增光伏装机容量接近15.13 GW。太阳能是取之不尽的清洁能源, 加上光伏组件价格的降低, 使得太阳能电池得到广泛的应用。而太阳能电池的效率和故障诊断一直是人们关注的问题, 光伏组件的工业发电效率一般为15%~30%, 光伏组件温度(T_m)的增加会降低其效率。长时间运行在多变的环境中可能会发生热斑、裂片、老化等故障, 导致光伏组件温度急剧升高, 严重时甚至发生火灾^[1]。因此能够对光伏组件温度进行准确地估算, 对考察光伏组件工作效率和进行太阳能电池的故障诊断具有较高的参考价值。文献[2, 3]直接用辐照度和光伏组件面积的乘积作为组件的吸收光能, 并未考虑光伏组件的光能吸收率(μ)会随老化程度的不同而改变。很多研究人员把吸收率做为常数进行光伏组件吸收光能的计算, 其中文献[4]设为0.875, 文献[5]设为0.9, 文献[6]设为0.81。而文献[7]根据实验测量数据大致推算出吸收率为0.81。光伏组件的吸收能力表征了组件老化的程度, 是太阳能电池模型5个参数的综合反映。因此, 本文用聚乙烯薄膜逐层遮挡的方法模拟不同的吸收率状态, 并辨识出不同

同吸收率所对应的5个模型参数的具体变化规律, 为基于能量平衡进行 T_m 的估算提供可靠依据。 T_m 的准确求取对进行光伏组件生产效率的估算和故障诊断问题的研究提供了很好的参考价值。

1 温度对光伏组件性能的影响

温度和辐照度对太阳能电池性能的影响直接反映在模型参数和电学参数上。光伏组件的两个重要参数分别是短路电流 I_{sc} 和开路电压 V_{oc} 。 I_{sc} 和 V_{oc} 随着辐照度 G 和环境温度 T_a 变化而变化。短路电流与辐照度大致呈线性关系, 而当辐照度增加时开路电压按照近似对数关系增加。光伏组件温度的增加会使短路电流有所增加, 但开路电压几乎是线性下降的, 仍导致光伏组件最大功率点 P_{max} 和效率的明显下降。文献[8]指出随着温度的增加, 太阳能电池的能隙(使电子脱开原子核束缚的最小能量)变窄, 光生电流的温度系数为正, 约为0.107 mA/°C, 而温度增加时, 由于光伏单体反向饱和电流的增加, 开路电压的温度系数为负, 约为-2.25 mV/°C, 这就使得光伏组件的最大功率随着温度的增加而减小, 其温度系数约为-0.45%/°C。文献[9]给出了在辐照度为1000 W/m²时, 单晶硅和多晶硅开路电压的温度系数分别为-0.32%/°C和-0.30%/°C。单晶硅和多晶硅的短路电流的温度系数分别为0.09%/°C和0.07%/°C。因为单晶硅和多晶硅的能

收稿日期: 2016-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(61374122)

通信作者: 程 泽(1959—), 男, 博士、教授, 主要从事太阳能电池故障诊断方面的研究。chengze@tju.edu.cn

隙相似,为 1.1~1.2 eV,其效率的温度系数几乎相同为 -0.33%/℃。可见温度对光伏组件性能的影响非常显著,为考察太阳电池的工作状态,求取其组件的温度非常必要。

2 太阳电池模型

太阳电池模型的等效电路如图 1 所示。图中, I_0 为二极管反向饱和电流; R_L 为负载电阻。该单二极管物理模型广泛应用于太阳电池的理论分析中。模型由 5 个参数组成,其 I - V 特性方程如式(1)所示:

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

式中, I_{ph} —— 光生电流; I_0 —— 二极管反向饱和电流; R_{sh} —— 并联电阻; R_s —— 串联电阻; n —— 二极管品质因子。

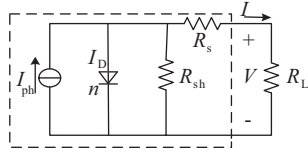


图 1 单二极管模型

Fig. 1 The one-diode model

为了建立不同吸收率与电池模型参数的对应关系,需要引用 Lambert W 函数对超越方程进行简化^[10],通过 I 的显式表达式(2),推导出 5 个模型参

数显式。

$$I = \frac{R_{sh}(I_{ph} + I_0) - V}{R_{sh} + R_s} - \frac{nV_{th}}{R_s} \times W \left\{ \frac{R_s R_{sh} I_0}{nV_{th}(R_{sh} + R_s)} \times \exp \left[\frac{R_{sh} R_s (I_{ph} + I_0) + R_{sh} V}{nV_{th}(R_{sh} + R_s)} \right] \right\} \quad (2)$$

式中, $V_{th} = kT/q$; W —— Lambert W 函数。

在 I - V 曲线的低电压段时,流过二极管上的反向电流极小,可忽略,对电流方程进行求导:

$$\frac{dV}{dI} = -R_s - \frac{nV_{th} R_{sh}}{nV_{th} + (R_{sh} + R_s)(I_{sc} - I) - V} \quad (3)$$

在短路点 $I = I_{sc}$, $V = 0$ V 时,有式(4)成立:

$$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} = -R_s - R_{sh} \quad (4)$$

在开路点 $I = 0$ A, $V = V_{oc}$ 时,有式(5)成立:

$$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=0} = -R_s - \frac{nV_{th} R_{sh}}{nV_{th} + (R_{sh} + R_s)I_{sc} - V_{oc}} \quad (5)$$

在最大功率点,式(3)可简化为:

$$\frac{dV}{dI} = R_s + \frac{nV_{th} R_{sh}}{nV_{th} + (R_{sh} + R_s)(I_{sc} - I_m) - V_m} \quad (6)$$

另外,在开路点 $I = 0$ A 时,式(1)可简化为:

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (7)$$

由式(8)解得电池 5 个模型参数在不同辐照度下的估计值^[11]: 串联电阻 R_s 、并联电阻 R_{sh} 、光生电流 I_{ph} 、二极管理想因子 n 以及反向饱和电流 I_0 。

$$\left\{ \begin{aligned} R_s &= \frac{V_m \left(\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=0} - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} \right) \left[\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} (I_{sc} - I_m) \right] - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=0} \left(\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} I_m + V_m \right) \left(\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} I_{sc} + V_{oc} \right)}{I_m \left(\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=0} - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} \right) \left[\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} (I_{sc} - I_m) \right] + \left(\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} I_m + V_m \right) \left(\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} I_{sc} + V_{oc} \right)} \\ R_{sh} &= -R_s - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} \\ I_{ph} &= I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) \\ n &= \frac{\left(\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=0} + R_s \right) \left(\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} I_{sc} + V_{oc} \right)}{V_{th} \left(\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=0} - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} \right)} \\ I_0 &= \frac{I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_{th}} \right) - 1} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

3 光能吸收率的模拟及模型参数辨识

3.1 不同光能吸收率的模拟实验

光伏组件常见的封装结构如图 2 所示,从上到下依次是超白钢化玻璃、EVA (ethylene- vinyl acetate)、胶膜、电池片、EVA 胶膜、背板。作为光伏组件重要的封装材料乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)在使用过程中容易受到热、光、氧、水分等自然因素的影响而降解老化,使其脱层变色,导致透光率下降^[12, 13]。EVA 材料的优劣直接影响到组件的工作寿命,而电池封装玻璃腐蚀、增透膜老化以及 EVA 变色脱层等均会导致电池透光率降低。基于同样的原理,用透光率高且均匀的聚乙烯薄膜逐层遮挡,通过降低电池表面透光率的方法来模拟不同的光能吸收率状态。

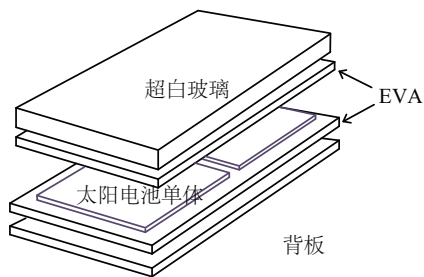


图2 光伏组件结构

Fig. 2 Structure of photovoltaic panel

令标准测试条件 (standard testing conditions, STC) 辐照度为 G_{ref} (1000 W/m^2) 下, 遮挡后辐照度衰减值为 ΔG , 遮挡后的辐照度值为 $G = G_{\text{ref}} - \Delta G$, 则定义太阳能电池的光能吸收率 μ 为:

$$\mu = \frac{G}{G_{\text{ref}}} \quad (9)$$

表1 遮挡薄膜层数与吸收率变化关系

Table 1 Relation between shading layers and the changed μ

遮挡层数	0	1	2	4	6	8	10	12	14
ΔG	0	50	95	142	185	236	280	328	360
μ	1.000	0.950	0.905	0.858	0.815	0.764	0.720	0.672	0.640
遮挡层数	16	18	20	22	24	26	28	30	32
ΔG	405	446	480	515	554	585	625	670	725
μ	0.595	0.554	0.520	0.485	0.446	0.415	0.375	0.330	0.275

新的单晶硅电池板其老化程度接近于零,保证了实验的准确性。辐照度测试仪和温度传感器能够随时记录 G 、 T_m 和 T_a 的变化。测量装置采用 DSP 数据采集卡, 笔记本电脑进行数据存储。由于电池单体电压约为 0.5 V , 故将 8 块单体串联作为实验对象。

实验条件为光伏板面向正南方, 与地平面成 35° , 辐照度为 1000 W/m^2 , 环境温度分别为 5 、 15 、 25 、 35°C (测试时间很短, 确保过程中辐照度和温度不变)。将光伏组件的吸收率模拟分为表 1 所示的 18 个阶段。每个阶段, 调节负载电阻的阻值, 测出太阳能电池组输出曲线。

3.2 模型参数辨识方法

太阳电池的 $I-V$ 曲线是电池特性的宏观表述, 模型中的 5 个参数是太阳电池模型内在特性的反映, 对太阳电池参数进行辨识可以研究分析其老化程度和透光率的变化规律。本文利用自适应混沌粒子群算法进行太阳电池模型参数的辨识, 对采集的数据用数字滤波进行平滑处理, 得到的 $I-V$ 曲线由数千个点组成, 提取具有代表性的点带入到辨识算法中进行模型参数的辨识。采用自适应算法可以增强算法在全局与局部搜索的平衡性, 降低算法迭代次数, 提高参数辨识的准确性和可靠性。

参数辨识算法的流程图如图 3 所示, 其中环境温度为 25°C 时的不同吸收率下实测 $I-V$ 曲线所对应模型参数的辨识结果见表 2。结果表明, 在环境温度不变的条件下, 随着光伏组件光能吸收率的不断变化, 太阳电池模型参数呈一定规律的变化。

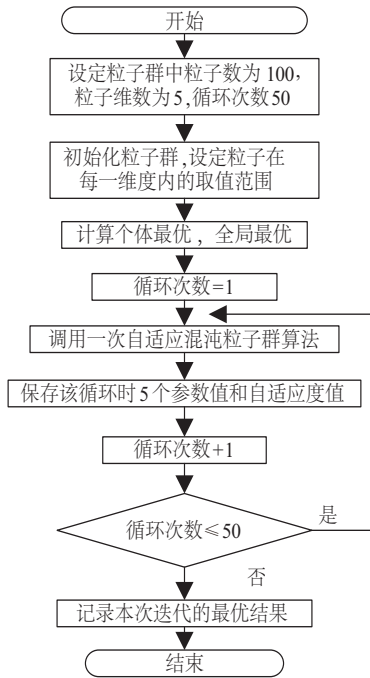


图3 太阳能电池模型参数辨识算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the algorithm

表2 25 °C时不同吸收率下的参数辨识结果

Table 2 Identification results of different μ for 25 °C

μ	I_{ph}/A	I_0/mA	n	R_s/Ω	R_{sh}/Ω
0.275	1.45	0.0174	15.00	0.343	538.0
0.330	1.75	0.0199	15.10	0.342	545.0
0.375	2.02	0.0218	15.19	0.348	549.2
0.415	2.23	0.0245	15.26	0.351	553.0
0.446	2.40	0.0270	15.32	0.356	556.0
0.485	2.62	0.0305	15.40	0.361	559.0
0.520	2.81	0.0340	15.48	0.366	561.5
0.554	3.00	0.0375	15.55	0.372	563.1
0.595	3.22	0.0433	15.64	0.378	565.8
0.640	3.47	0.0490	15.75	0.386	567.5
0.672	3.65	0.0545	15.82	0.394	569.0
0.720	3.92	0.0620	15.94	0.405	571.0
0.764	4.17	0.0710	16.05	0.409	573.0
0.815	4.45	0.0805	16.19	0.417	575.2
0.858	4.69	0.0890	16.31	0.421	576.3
0.905	4.96	0.1000	16.44	0.430	577.5
0.950	5.22	0.1100	16.58	0.435	578.5
1.000	5.50	0.1220	16.73	0.445	579.0

4 光能吸收率和模型参数对应关系

4.1 吸收率和光生电流 I_{ph} 的对应关系

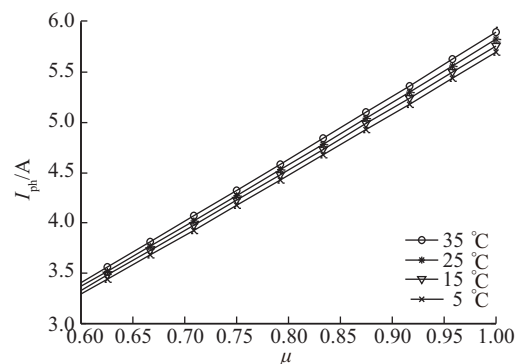
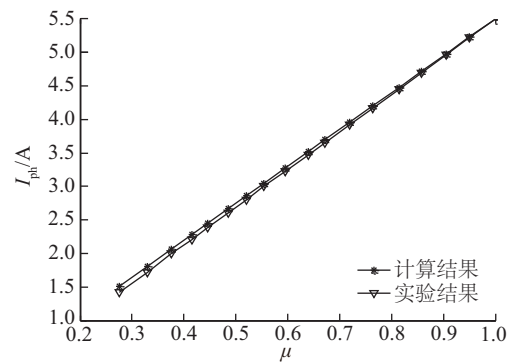
太阳能电池的基本工作原理是半导体吸收光能使电子从价带跃迁到导带形成电子空穴对。空间电荷区中 p-n 结的内建电场分离电子空穴对形成电流。光生电流 I_{ph} 是光照强度的直接反应, I_{ph} 受到辐照度和温度的影响如式(10)^[14]所示:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{sc-ref} + \beta_{I_{sc}} (T_m - T_{m-ref})] \quad (10)$$

式中, I_{sc-ref} ——STC 下的短路光生电流; $\beta_{I_{sc}}$ ——STC 下的短路电流温度系数; T_{m-ref} ——STC 下光伏板温度。如图 4 所示, I_{ph} 随着光伏板温度的增加而增加(图 4a), 这主要是因为能隙的变窄, 吸收限移向低能量范围, 提高了长波光谱效应, 使能产生载流子的光子数增大, 导致光生电流的增加。

实验所测 $I_{sc-ref} = 5.5 A$, 吸收率为 μ 时, 在风速不是过快的条件下, 由式(10)进行简化并结合实验数据推导出 I_{ph} 方程, 如式(11)所示:

$$I_{ph} = 0.198\mu^2 + \mu(5.137 + 0.0066T_a) \quad (11)$$

a. I_{ph} 走势图b. I_{ph} 对比图图4 I_{ph} 变化趋势和结果对比Fig. 4 I_{ph} trends and results contrast

环境温度 T_a 为 25 °C 时辨识的 I_{ph} 数据与测量计算的数据对比, 见图 4b。 I_{ph} 随温度增加稍有增加, 随吸收率的增加近似呈线性的增加。

4.2 吸收率和反向饱和电流 I_0 的对应关系

反向饱和电流是由少数载流子的漂移运动形成的。一般认为反向饱和电流受偏压、温度和禁带宽度等参数的影响, 可以把注入电流及复合电流之和当作其值, 简化为单指数形式^[8], 如式(12)所示:

$$I_0 = K \left[\exp \left(\frac{qV_j}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (12)$$

式中, V_j ——加在二极管 p-n 结上的外电压。

由图 5 可知, I_0 会随着 μ 的增加而增加, 这是由于光生载流子的表面复合作用的增强(图 5a)。 I_0 会随着光伏板温度的增加而增加, 这是因为带隙变窄导致少数载流子的增加, 这也是开路电压变小的主要原因。

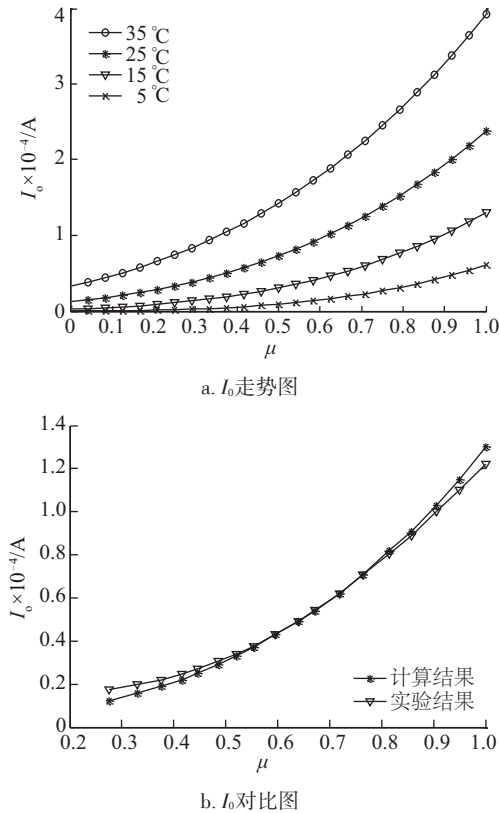


图5 I_0 变化趋势和结果对比

Fig. 5 I_0 trends and results contrast

在风速不是过快的条件下, 结合实验数据给出反向饱和电流的表达式如式(13)所示。

$$I_0 = I_{0-ref} \left(\frac{T_a + k_1 \mu}{T_{m-ref}} \right)^3 \ln(\mu + k_2) \quad (13)$$

式中, I_{0-ref} ——STC 下的 I_0 值, k_1, k_2 为常数。环境温度 T_a 为 25 °C 时, 辨识数据与测量计算数据的对比如图 5b 所示。可见温度对 I_0 的影响很大, 吸收率较低时 I_0 变化缓慢, 当吸收率增加到一定程度时 I_0 增加迅速。

4.3 吸收率和理想因子 n 的对应关系

理想因子 n 又叫品质因数, n 与复合过程(空间电荷复合、体复合和表面复合)有直接关系。是 p-n 结的工作状态与理想状态的差距, 表示 p-n 结的电子运载能力。用牛顿拉夫逊法求解光伏参数时, n 取值会影响其他参数的求解, 导致参数漂移^[15]。实验结果如图 6a 所示, 可看出 n 随着温度的增加而增加, 在环境温度不变的条件下, 辐照度的增加会使得光伏组件温度近似线性增加, 在风速不是过快的条件下, 结合实验数据推导出理想因子的表达式, 见式(14)。 T_a 为 25 °C, 辨识数据与计算数据的对比如图 6b 所示, 理想因子与吸收率呈近似线性的增加。

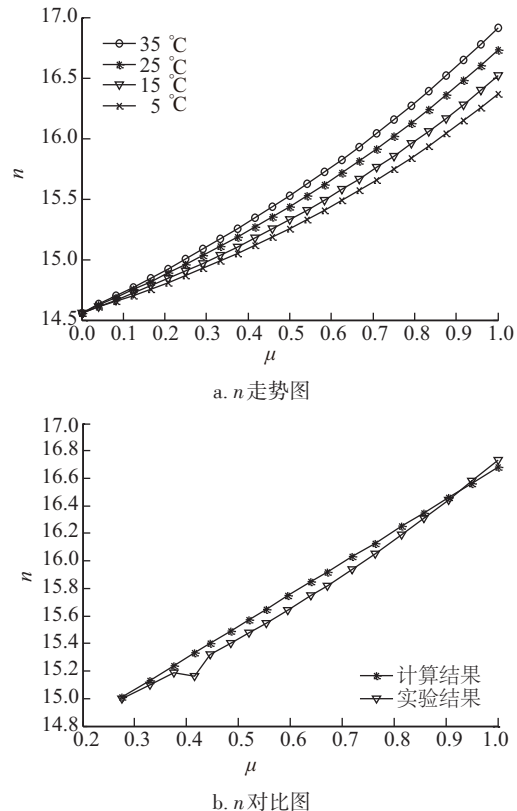


图6 n 变化趋势和结果对比

Fig. 6 n trends and results contrast

$$n = k_3 e^{\mu} + k_4 \frac{T_a}{T_{m-ref}} \mu + n_0 \quad (14)$$

式中, n_0 ——参考理想因子; μ ——吸收率; k_3 、 k_4 ——常数。

4.4 吸收率和串联电阻 R_s 的对应关系

串联电阻由扩散顶区的表面电阻、电池的体电阻和上下电极与太阳电池之间的欧姆电阻及金属导体的电阻构成的^[8]。

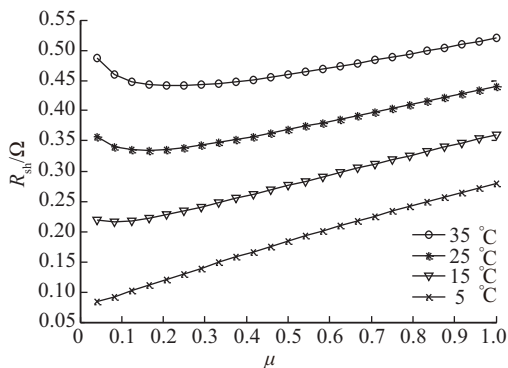
串联电阻的测定方法很多,较简单的方法是根据正向特性的线性部分计算出其值,即依据正向电流间的电压降求串联电阻,一般这种方法求出的串联电阻是体电阻及电极接触电阻之和。其次还有光强变化法和利用元件的开路电压与短路电流之间的关系得到串联电阻的方法。

由模型的近似推导可知,串联电阻可以用 I - V 曲线开路电压处的斜率表示,见式(15)。如图 7a 所示, R_s 随着吸收率的增加而降低,这归因于活性层导电率的增加,而随着温度的增加而有所增加,但吸收率的增加本身也会使温度增加,所以串联电阻下降到一个极值点开始上升。本文结合实验数据推导了在风速不是过快的条件下 R_s 的表达式,见式(16)。环境温度为 25 °C 下辨识的 R_s 数据和测量计算数据对比如图 7b, 温度较低时随吸收率增加 R_s 的变化较大,温度偏高时 R_s 变化平缓。

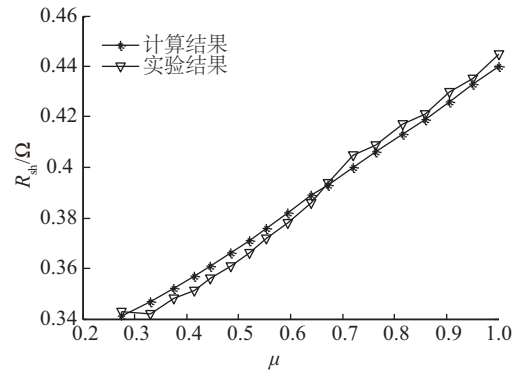
$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_{oc-ref}, I=0} = -\frac{1}{R_s} \quad (15)$$

$$R_s = R_{s-ref} \frac{T_a + k_5 \mu}{T_{m-ref}} (1 - k_6 \ln \mu) \quad (16)$$

式中, V_{oc-ref} ——STC 下开路电压值; R_{s-ref} ——STC 下的 R_s 值; k_5 、 k_6 ——常数。



a. R_s 走势图



b. R_s 结果对比图

图 7 R_s 变化趋势和结果对比

Fig. 7 R_s trends and results contrast

4.5 吸收率和并联电阻 R_{sh} 的对应关系

并联电阻主要由以下因素引起:表面沾污而产生的沿着电池边缘的表面漏电流,沿着位错和晶粒间界的不规则扩散或在电极金属化处理之后,沿着微观裂缝、晶粒间界和晶体缺陷等形成的细小桥路而产生的漏电流^[8]。并联电阻可用短路电流处的斜率表示,见式(17),其绝对值越大, R_{sh} 越小。

$$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0, I=I_{ref}} = -\frac{1}{R_{sh}} \quad (17)$$

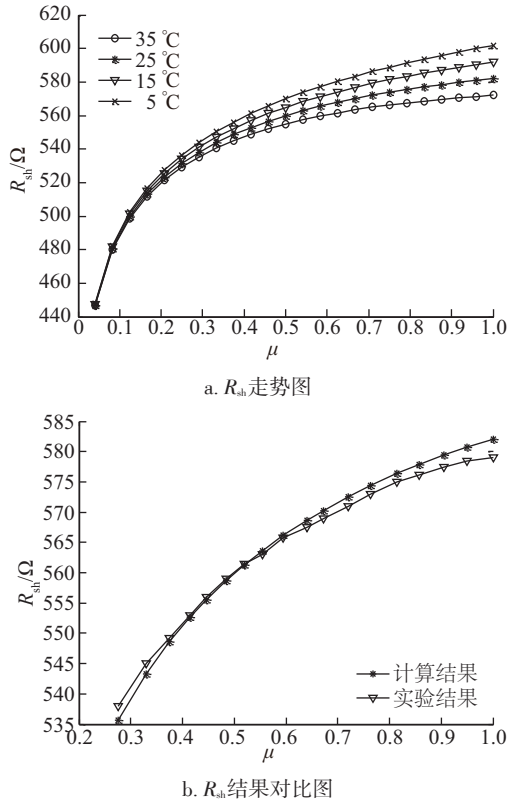
式中, I_{ref} ——STC 下的短路电流值。

如图 8a 所示,并联电阻随着吸收率的增加而增加,到光伏组件温度偏大时趋于饱和。这是由于随着吸收率的增加,空穴开始被填充,减少了分流电流,从而增加了并联电阻。并联电阻随着环境温度的增加而减少,这个减少可以解释为在空间电荷区载流子的捕获和逃逸的复合通道处于缺陷态,这种缺陷态是电子和空穴的复合中心^[16]。

结合实验数据推导出并联电阻的变化趋势的近似表达式,见式(18)。 T_a 为 25 °C 时,辨识的 R_{sh} 值与测量计算数据对比如图 8b 所示, R_{sh} 随着环境温度增加而稍微降低,在低吸收率阶段 R_{sh} 增加速度较快,吸收率和组件温度到达一定程度时变化趋于平缓。

$$R_{sh} = k_7 \ln(\mu) - k_8 T_a \mu + R_{sho} \quad (18)$$

式中, R_{sho} ——参考并联电阻值; k_7 、 k_8 ——常数。

图8 R_{sh} 变化趋势和结果对比Fig. 8 R_{sh} trends and results contrast

5 光伏组件温度 T_m 模型的建立

5.1 基于能量守恒的 T_m 模型

假设光伏单体和光伏组件表面玻璃层温度差被忽略,在光伏单体之间无热传播,正常光伏组件的温度是均匀的^[17]。在能量转化方面,考虑太阳能电池光能吸收率的作用,光伏组件的整个工作过程可用式(19)表示,能量平衡方程的作用是把太阳能电池特性和温度特性连接起来。

$$G \cdot A \cdot \mu = VI + U_{pv} A (T_m - T_a) \quad (19)$$

式中, A ——光伏组件有效面积; U_{pv} ——热能转化因数。

由式(19)得出 T_m 的表达式为:

$$T_m = \frac{G \cdot A \cdot \mu - VI}{U_{pv} A} + T_a \quad (20)$$

为求取 T_m , 易得到 G 、 T_a 、输出功率值, A 可从光伏组件铭牌尺寸计算得到, 而吸收率 μ , 要用自适应混沌粒子群算法辨识出电池模型的 5 个参数值, 求出各自对应的吸收率值, 为综合考虑 5 个参

数的共同作用, 取平均数作为此光伏组件的光能吸收率。 U_{pv} 的确定成为关键, 文献[7]把 U_{pv} 当作常数 $28.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 但是风速 v 对 U_{pv} 的影响很大, 不能忽略, 所以 Nolas^[7]给出表达式:

$$U_{pv} = 11.64 + 8.14 v \quad (21)$$

文献[7]给出相似的表达式:

$$U_{pv} = 11.34 + 7.72 v \quad (22)$$

文献[7]认为对流表面的热交换系数的大小受风向的影响很大, 所以给出区别向风面和背风面的表达式。向风面侧:

$$U_{pv} = 11.4 + 5.7 v \quad (23)$$

背风面侧:

$$U_{pv} = 5.7 v \quad (24)$$

两者相加得到表达式:

$$U_{pv} = 17.1 + 5.7 v \quad (25)$$

若选用式(21), 代入式(20)得:

$$T_m = \frac{GA\mu - IV}{(11.64 + 8.14 v) \cdot A} + T_a \quad (26)$$

若选用式(22), 代入式(20)得:

$$T_m = \frac{GA\mu - IV}{(11.34 + 7.72 v) \cdot A} + T_a \quad (27)$$

若选用式(25), 代入式(20)得:

$$T_m = \frac{GA\mu - IV}{(17.1 + 5.7 v) \cdot A} + T_a \quad (28)$$

5.2 T_m 模型的选择及验证

为了选择最符合的 T_m 模型, 选择型号为 TOP90(12)的光伏组件进行试验。光伏板的尺寸为 $1210 \text{ mm} \times 560 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$, 计算得到 A 为 0.672 m^2 , 在标准测试条件下光伏板的峰值功率为 90 W 。实验选择环境温度为 25°C , 此时辐照度为 $890 \text{ W}/\text{m}^2$, 此光伏板的吸收率经参数辨识如表 3 所示, 每个模型参数对应的吸收率 μ 的计算如式(29)所示。通过调节风扇风速和距离实现风速从 $1.5 \sim 5 \text{ m/s}$ 范围改变, 此风速范围为天津常年平常风速区间。如图 9 所示, 式(26)~式(28)与测量 T_m 值相差较大, 不能作为 T_m 的估算模型, 所以拟合出更贴合实验数据的曲线, 得到 U_{pv} 的表达式, 如式(30)所示:

$$\mu = \frac{G_{\text{ref}} \cdot \mu_i}{G} \quad (29)$$

式中, G_{ref} ——STC 辐照度, $G_{\text{ref}} = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$; G ——

实验时的辐照度值； μ_i ——辨识模型参数对应的吸收率。

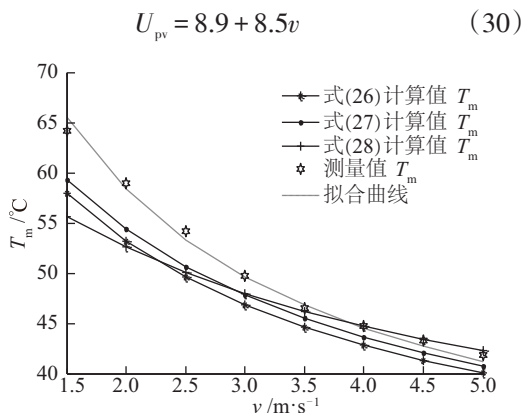


图9 T_m 模型的选择 $v(1.5\sim5.0\text{ m/s})$

Fig. 9 The selection of the T_m model for $v(1.5\sim5.0\text{ m/s})$

表3 PV模型参数和吸收率的辨识

Table 3 The identification of PV model parameters and μ

μ_{ave}	$I_{ph}/A(\mu_1)$	$I_0/mA(\mu_2)$	$n(\mu_3)$	$v/\Omega(\mu_4)$	$R_{sh}/\Omega(\mu_5)$
0.920	4.51	0.0718	16.24	0.410	575.5
	(0.922)	(0.906)	(0.937)	(0.907)	(0.928)

注： μ_{ave} ——平均吸收率值；表3中括号中的数值代表模型参数推导出的吸收率值。

为了验证上述拟合所得 T_m 模型的准确性,我们选择 2015 年 6 月 8 日 08:00~11:00 的记录数据如表 4 所示,时段风速为 3 m/s,空气温度变化区间 26.98~32.92 $^{\circ}\text{C}$,辐照度变化区间 771~958 W/m^2 。式(30)作为 T_m 模型的热能转化因数,如图 10 所示模型的最大误差为 1.36 $^{\circ}\text{C}$,平均误差为 0.64 $^{\circ}\text{C}$,对这样一个简单的 T_m 模型,已相当精确。

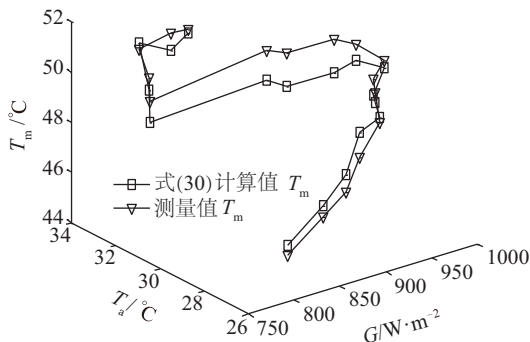


图10 T_m 模型的验证 $v(3\text{ m/s})$

Fig. 10 The verification of the T_m model for $v(3\text{ m/s})$

表4 记录值和模型估计值 T_m

Table 4 Recorded and estimated T_m by the model

$G/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	$T_a/^{\circ}\text{C}$	$T_{m,mes}/^{\circ}\text{C}$	$T_{m,est}/^{\circ}\text{C}$
816	26.98	45.18	45.57
857	27.06	46.18	46.64
886	27.23	46.81	47.47
916	27.84	47.55	48.55
934	27.68	48.81	49.02
937	28.03	49.18	49.44
939	28.18	50.26	49.64
958	28.48	50.68	50.37
940	29.04	51.27	50.61
920	29.18	51.62	50.26
880	29.68	51.31	49.95
867	30.03	51.36	50.19
771	31.34	49.81	48.96
784	31.92	50.37	49.84
797	32.92	50.88	51.13
816	32.26	51.64	50.91
836	32.30	51.97	51.40

6 结 论

本文基于能量平衡原理对光伏组件的温度进行估算。利用聚乙烯薄膜逐层遮挡来模拟光伏组件不同的光能吸收率。用自适应混沌粒子群算法辨识出 5 个太阳电池模型参数随不同吸收率在不同环境温度下的对应关系。并计算对应不同的吸收率值,综合考虑参数的共同作用,求其平均值作为光伏组件的吸收率。根据能量守恒和确定的吸收率值,对实验数据拟合得到适合的 T_m 模型,并验证了此模型的准确性,为研究光伏组件生产效率问题和光伏组件的故障诊断打下了基础。

[参考文献]

- [1] 王元章,李智华,吴春华.光伏系统故障诊断方法综述[J].电源技术,2013,37(9):1700—1705.
- [1] Wang Yuanzhang, Li Zhihua, Wu Chunhua. Fault diagnosis technologies for photovoltaic system[J]. Power Technology, 2013, 37(9): 1700—1705.
- [2] Firth S K, Lomas K J, Rees S J. A simple model of PV system performance and its use in fault detection [J].

- Solar Energy, 2010, 84(4): 624—635.
- [3] Andò B, Baglio S, Pistorio A, et al. Sentinella: Smart monitoring of photovoltaic systems at panel level [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(8): 2188—2199.
- [4] Brogren M, Nostell P, Karlsson B. Optical efficiency of a PV-thermal hybrid CPC module for high latitudes [J]. Solar Energy, 2000, 69(1-6): 173—85.
- [5] Sandnes B, Rekstad J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate, experimental study and analytical model [J]. Solar Energy, 2002, 72(1): 63—73.
- [6] Hegazy A A. Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors [J]. Energy Conversion Manage, 2000, 41(8): 861—881.
- [7] Mattei M, Notton G, Cristofari C, et al. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance [J]. Renewable Energy, 2006, 31(4): 553—567.
- [8] 安其霖, 曹国琛, 李国欣, 等. 太阳能电池原理与工艺 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
- [8] An Qilin, Cao Guoshen, Li Guoxin, et al. Principle and process of solar cell [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984.
- [9] 翁敏航, 刘 玮. 太阳能电池材料·制造·检测技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [9] Weng Minhang, Liu Wei. Solar cell materials, manufacturing and testing technology [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [10] 翟载腾, 程晓舫, 杨臧健, 等. 太阳能电池一般电流模型参数的解析解 [J]. 太阳能学报, 2009, 30(8): 1078—1082.
- [10] Zhai Zaiteng, Cheng Xiaofang, Yang Zangjian, et al. The analytic solution of the general current module of solar cells [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2009, 30(8): 1078—1082.
- [11] Laudani A, Mancilla-David F, Riganti-Fulginei F, et al. Reduced-form of the photovoltaic five-parameter model for efficient computation of parameters [J]. Solar Energy, 2013, 97(5): 122—127.
- [12] 王 响, 沈 辉, 李光吉, 等. EVA 老化机理以及 EVA 老化对太阳电池的影响 [J]. 合成材料老化与应用, 2008, 37(2): 32—34.
- [12] Wang Xiang, Shen Hui, Li Guangji. The ageing mechanism and its influence on solar cells of EVA [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2008, 37(2): 32—34.
- [13] 陈小春, 申明霞. 光伏组件用 EVA 封装胶膜的老化研究进展 [J]. 粘接, 2010, (12): 65—69.
- [13] Chen Xiaochun, Shen Mingxia. Research progress on the aging of EVA encapsulated plastic film for photovoltaic modules [J]. Adhesive, 2010, (12): 65—69.
- [14] Coelho R F, Concer F, Martins D C. A proposed photovoltaic module and array mathematical modeling destined to simulation [A]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics [C], Seoul, South Korea, 2009.
- [15] 王立国, 颜洪正, 刘宝柱. 光伏组件 5 参数模型的等值修正求取算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 67—72.
- [15] Wang Liguang, Yan Hongzheng, Liu Baozhu. The equivalent modified solve method of the five parameters photovoltaic module [J]. Power System Protect and Control, 2013, 41(23): 67—72.
- [16] Cuce E, Cure P M, Bali T. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters [J]. Applied Energy, 2013, 111: 374—382.
- [17] Hu Yihua, Gao Bin, Song Xueguan, et al. Photovoltaic fault detection using a parameter based model [J]. Solar Energy, 2013, 96(4): 96—102.

CALCULATION OF PV MODULE TEMPERATURE USING ENERGY BALANCE

Cheng Ze, Yang Genyuan, Liu Li

(College of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The temperature of PV module is a sign parameter that reflects the efficiency and health status. We cover polyethylene film layer by layer to simulate different absorption rate. The parameters of PV model were identified using the self-adaptive chaos particle swarm optimization algorithm (SA-CPSO), which could establish corresponding relationship between the model parameters and the absorption rate. In this paper we calculate the PV module temperature based on energy balance. This simple model using identification absorption rate and a simple energy balance is in good agreement with the experimental data.

Keywords: solar absorption rate; model parameter identification; energy balance; PV module temperature