

一种确定太阳能电池特征参数的实验方法

田海兴 杨 宏 王 鹤

(西安交通大学物理学院, 陕西 西安 710049)

摘 要 确定太阳能电池的特征参数不仅是建立其电流-电压方程的基础,也是理解太阳能电池这一非线性器件的关键。本文提出了一种简单的实验方法,基于太阳能电池在非标准测试条件与暗条件下的电流和电压测量结果,通过修正得到了其在标准测试条件下的电流和电压,根据建立的模型得到了太阳能电池在标准测试条件下的光电流、反向饱和电流、品质因子、串联电阻与并联电阻五个特征参数,据此得到了太阳能电池的电流-电压方程。最后通过比较电流-电压方程的曲线与修正后的测量结果,发现本方法的电流均方根误差小于0.12A,能满足实验的要求。该方法有助于增强学生对太阳能电池非线性输出性能的理解。

关键词 太阳能电池;单二极管模型;电流-电压方程;特征参数

AN EXPERIMENTAL METHOD TO DETERMINE THE CHARACTERISTIC PARAMETERS OF SOLAR CELLS

TIAN Haixing YANG Hong WANG He

(School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049)

Abstract Determining the characteristic parameters of solar cells is not only the foundation for establishing their current voltage equation, but also the key to understanding the nonlinear device of solar cells. In this paper, a simple experimental method was built to determine these characteristic parameters. Firstly, the current and voltage of the solar cell under non-standard test conditions and dark conditions were measured, the current and voltage under standard test conditions were derived by correction. Secondly, light current, diode reverse saturation current, ideality factor, series resistance and shunt resistance of the solar cell under standard test conditions were determined based on the proposed model. And the current-voltage equation of the solar cell was established. Finally, by comparing the curve of the current voltage equation with the corrected measurement results, it is found that the root mean square error of the current in this method is less than 0.12A, which can meet the requirements of the experiment. This method helps to enhance students' understanding of the nonlinear output performance of solar cells.

Key words solar cells; single-diode model; current-voltage equation; characteristic parameters

收稿日期: 2023-02-27

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2018YFB1500700)。

作者简介: 王鹤,西安交通大学物理学院副教授,pv_group@126.com。

引文格式: 田海兴,杨宏,王鹤. 一种确定太阳能电池特征参数的实验方法[J]. 物理与工程,2024,34(3):164-171.

Cite this article: TIAN H X, YANG H, WANG H. An experimental method to determine the characteristic parameters of solar cells[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(3): 164-171. (in Chinese)

太阳能电池是一种光电换能器件。现有课程主要侧重对太阳能电池的能量转化原理及其输出效率进行介绍。而关于太阳能电池的深度内容,例如太阳能电池的输出特性及特征参数,大多只存在于专业课程中^[1,2]。事实上,太阳能电池输出特性的研究一直是清洁能源开发与应用工作中的重要内容,让大学生了解太阳能电池的特征参数是十分必要的。

太阳能电池的电流电压特性呈现非线性关系,要准确预测其在户外的发电性能就必须建立相应的电流-电压(I - V)方程。为此,国内外学者提出了太阳能电池的单二极管模型、双二极管模型等^[3]。无论是何种太阳能电池模型,其都包含若干个相互独立的特征参数。太阳能电池输出特性模型的精准程度与特征参数的准确性紧密相关。在生产实际中,太阳能电池在标准测试条件(Standard Test Conditions(STC):大气质量(Air Mass)为 1.5G(Global),辐照度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$,电池温度为 25°C)下的特征参数是评价电池性能的重要依据。STC 条件下特征参数的确定一直是太阳能电池研究领域的热点^[4]。

通常,要确定 STC 条件下太阳能电池的特征参数,首先要通过太阳模拟器测出太阳能电池在 STC 条件下的 I - V 曲线,接着要寻找一组合适的特征参数值使得所建模型更加贴近太阳能电池的实测 I - V 结果。在寻找特征参数过程中,常用的寻优算法有最小二乘法、Lambert W 函数法、Jaya 算法、粒子群优化算法、人工蜂群算法、蚁群算法和遗传算法等^[5,6,7]。依据以上算法确定的特征参数具有较高的精度。但算法本身的设计及优化过程十分复杂,且所需配套的专业测量设备价格昂贵。这使得依据这种方法开设普通物理实验不具备可行性^[8]。此外,在实验教学中,有的研究者直接用数据采集仪获取太阳能电池的 I - V 曲线^[9]。这种方法快速准确,但不利于学生理解 I - V 曲线测量原理。有的研究者通过单片机编程来控制电路从而实现太阳能电池输出电流与输出电压的自动测量^[10]。这种方法能较好地展示测量过程,但要求学生掌握一定的模拟电路和数字电路知识。有的研究者通过搭建测试电路,用电压表与电流表测量负载上的电压和电流,从而得到太阳能电池的 I - V 输出曲线^[11],但并未研究太阳能电池 I - V 方程中各特征参数的物理意义。

为增强学生对太阳能电池输出特性的理解,本文提出了一种通过测量电池在非 STC 条件与暗条件下的输出电流和电压来确定其在 STC 条件下的特征参数的简单实验方法。并以电流均方根误差的形式给出了该方法的精度。该方法无须建立太阳能电池的标准测试环境,且精度能满足开设大学物理实验课程的要求。在大学物理实验教学中开设该实验有助于学生更好地掌握太阳能电池这一非线性器件的输出特性。

1 实验原理

1.1 太阳能电池模型

太阳能电池的单二极管模型能较精确地模拟太阳能电池的输出特性^[12]。其等效电路如图 1 所示。

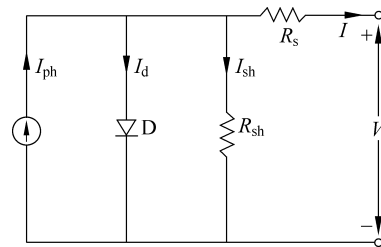


图 1 太阳能电池单二极管等效电路模型

在图 1 中,当太阳能电池外接负载时,流过外接负载的电流 I 与外接负载两端的电压 V 之间的关系为

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} = I_{ph} - I_d - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

其中, I_{ph} 为光电流,即 pn 结吸收入射光子后所产生的电子-空穴定向移动形成的电流,其值与入射光强及太阳能电池面积有关。 I_d 为流过等效二极管的正向电流,具体表达式见式(2)。 I_{sh} 为流过等效并联电阻 R_{sh} 的电流,表示 pn 结的泄漏电流。 R_s 为等效串联电阻,其主要包括电池体电阻、电池电极电阻和金/半接触电阻,其值与太阳能电池的面积有关。

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_t}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

式(2)中 I_0 为太阳能电池等效二极管的反向饱和电流,是由本征激发产生的少数载流子的漂移运动所形成的电流。 n 为品质因子,通常在 $1 \sim 2$ 之间。 n 值接近 1 表示准中性区的复合占主导, n 值接近 2 表示势垒区的复合占主导。 V_t 为热电压,

见式(3)。

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (3)$$

其中, k 为玻尔兹曼常数, T 为电池温度, q 为电子电荷。

1.2 单二极管模型中特征参数的确定方法

光电流 I_{ph} 、反向饱和电流 I_0 、品质因子 n 、串联电阻 R_s 与并联电阻 R_{sh} 是太阳电池单二极管模型中的五个特征参数。以下为本文提出的确定 STC 条件下五个特征参数的方法。

1.2.1 光电流 I_{ph} 的确定

在图 1 中, 当太阳电池在 STC 条件下短路时, 输出电压 $V=0$ 。此时流过串联电阻 R_s 的电流被称为短路电流, 记作 $I_{sc,STC}$ 。根据式(1)和式(2), 此时有

$$I_{sc,STC} = I_{ph,STC} - I_0 \left[\exp\left(\frac{I_{sc,STC}R_s}{nV_t}\right) - 1 \right] - \frac{I_{sc,STC}R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

其中, $I_{ph,STC}$ 为太阳电池在 STC 条件下的光电流。

目前, 量产的太阳电池在 STC 条件下的短路电流密度约为 $40\text{mA}/\text{cm}^2$ 。对于面积为 $158.75\text{mm} \times 158.75\text{mm}$ 的准方太阳电池, $I_{sc,STC}$ 约为 10.1A , R_s 约为 $2\text{m}\Omega$, R_{sh} 大于 50Ω 。而且, 太阳电池的 I_0 通常小于 10^{-6}A ^[13]。将以上特征参数的近似值代入式(4), 可得等号右边第二项约为 $1.2 \times 10^{-6}\text{A}$, 第三项约为 $4 \times 10^{-4}\text{A}$ 。这两项和 $I_{sc,STC}$ 相比可忽略不计。因此, 式(4)可改写为

$$I_{sc,STC} \approx I_{ph,STC} \quad (5)$$

式(5)表明, 在实验中可以将太阳电池的短路电流值当作光电流的值。

1.2.2 并联电阻 R_{sh} 的确定

太阳电池的并联电阻在不同的温度与辐照下变化并不明显。因此在确定并联电阻的过程中, 通常把太阳电池在非标准条件下的并联电阻值当作其在 STC 条件下的并联电阻值。大量测试结果表明, 这种做法产生的误差是允许的^[14]。

当太阳电池处于无光照条件时, 给其施加反向电压 $-V$, 即外加电压的正极与负极分别与太阳电池的负极与正极相连。此时, 流入太阳电池的反向电流 ($-I_{res}$) 会分别反向地流过等效二极管与并联电阻。 $-I_{res}$ 与 $-V$ 之间的关系为

$$-I_{res} = I_0 \left[\exp\left(\frac{-V - I_{res}R_s}{nV_t}\right) - 1 \right] + \frac{-V - I_{res}R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

当在实验中施加较高的反向电压时 (通常 $V > 5\text{V}$), 式(6)中等号左边项、等号右边第一项、右边第二项的数量级分别为 10^{-1}A 、 10^{-6}A 、 10^{-1}A 。因此, 等号右边第一项可以忽略不计。又因为 R_s 远小于 R_{sh} , 所以式(6)可近似为

$$I_{res} \approx \frac{V}{R_{sh}} \quad (7)$$

由式(7)可知, I_{res} 随 V 增长的比例系数近似等于太阳电池并联电阻值。因此, 在实验中可以用计算该比例系数的方式确定太阳电池的并联电阻值。

1.2.3 串联电阻 R_s 的确定

在图 1 中, 当太阳电池在 STC 条件下处于开路状态时, 输出电流 $I=0$ 。此时太阳电池两端的电压被称为开路电压, 记作 $V_{oc,STC}$ 。根据式(1)和式(2), 此时有

$$I_{ph,STC} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{oc,STC}}{nV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc,STC}}{R_{sh}} = 0 \quad (8)$$

当太阳电池处于无光照条件时, 向其施加正向电压, 即外加电压的正极与负极分别与太阳电池的正极与负极相连。此时, 流入太阳电池的电流被称为暗电流 (I_{dark})。暗电流分别正向地流过等效二极管与并联电阻。当 I_{dark} 等于太阳电池在 STC 条件下的短路电流 ($I_{sc,STC}$) 时, 将此时的暗电流记为 $I_{dark,STC}$, 外加电压记为 $V_{dark,STC}$ 。 $I_{dark,STC}$ 与 $V_{dark,STC}$ 之间的关系为

$$I_{dark,STC} = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{dark,STC} - I_{dark,STC}R_s}{nV_t}\right) - 1 \right] + \frac{V_{dark,STC} - I_{dark,STC}R_s}{R_{sh}} \quad (9)$$

联立式(5)、式(8)和式(9), 整理后发现

$$V_{dark,STC} - I_{dark,STC}R_s \approx V_{oc,STC} \quad (10)$$

因此, 在实验中可用式(11)确定太阳电池的串联电阻值^[15,16]。

$$R_s \approx \frac{V_{dark,STC} - V_{oc,STC}}{I_{sc,STC}} \quad (11)$$

1.2.4 反向饱和电流 I_0 与品质因子 n 的确定

太阳电池受到光照时, 其输出电压 V 与输出电流 I 的乘积为输出功率 P 。改变负载电阻的大

小,太阳电池的输出功率会随之变化。在 P 变化过程中存在一个唯一的最大值,该值为太阳电池在该条件下的最大输出功率。在 STC 条件下,当太阳电池在最大输出功率点工作($P_{\text{mpp,STC}}$)时,此时的电池输出电压为最佳工作电压 $V_{\text{mpp,STC}}$,输出电流为最佳工作电流 $I_{\text{mpp,STC}}$ 。根据式(1)和式(2), $I_{\text{mpp,STC}}$ 与 $V_{\text{mpp,STC}}$ 之间的关系为^[17]

$$I_{\text{mpp,STC}} = I_{\text{ph,STC}} - I_0 \times \left[\exp\left(\frac{V_{\text{mpp,STC}} + I_{\text{mpp,STC}}R_s}{nV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{\text{mpp,STC}} + I_{\text{mpp,STC}}R_s}{R_{\text{sh}}} \quad (12)$$

将式(8)代入式(12)中,可得

$$I_{\text{mpp,STC}} = I_0 \exp\left(\frac{V_{\text{oc,STC}}}{nV_t}\right) + \frac{V_{\text{oc,STC}} - V_{\text{mpp,STC}}}{R_{\text{sh}}} - \frac{I_{\text{mpp,STC}}R_s}{R_{\text{sh}}} - I_0 \exp\left(\frac{V_{\text{mpp,STC}}}{nV_t}\right) \times \exp\left(\frac{I_{\text{mpp,STC}}R_s}{nV_t}\right) \quad (13)$$

将式(8)代入式(4)中可得

$$I_{\text{sc,STC}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{\text{oc,STC}}}{nV_t}\right) - \exp\left(\frac{I_{\text{sc,STC}}R_s}{nV_t}\right) \right] + \frac{V_{\text{oc,STC}} - I_{\text{sc,STC}}R_s}{R_{\text{sh}}} \quad (14)$$

式(14)中,比较等号右边中括号内两项,可知中括号内第一项远大于第二项。因此,式(14)可被改写为

$$I_{\text{sc,STC}} = I_0 \exp\left(\frac{V_{\text{oc,STC}}}{nV_t}\right) + \frac{V_{\text{oc,STC}} - I_{\text{sc,STC}}R_s}{R_{\text{sh}}} \quad (15)$$

联立式(13)与式(15),并令 $r = 1 + R_s/R_{\text{sh}}$, 可得确定品质因子与反向饱和电流的表达式为

$$n = \frac{V_{\text{mpp,STC}} + I_{\text{mpp,STC}}R_s - V_{\text{oc,STC}}}{V_t \ln \left[\frac{(I_{\text{sc,STC}} - I_{\text{mpp,STC}})r - V_{\text{mpp,STC}}/R_{\text{sh}}}{I_{\text{sc,STC}}r - V_{\text{oc,STC}}/R_{\text{sh}}} \right]} \quad (16)$$

$$I_0 = \frac{I_{\text{sc,STC}}r - V_{\text{oc,STC}}/R_{\text{sh}}}{\exp(V_{\text{oc,STC}}/nV_t)} \quad (17)$$

1.3 非标准测试条件下太阳电池电性能测量结果的转换

在本文中,太阳电池的电性能是在实验室非标准条件下测得的,测量结果可通过以下方法修正到 STC 条件下。

1.3.1 短路电流与开路电压的修正

由于太阳电池的短路电流随温度升高而增大,随辐照度增加而线性增大。开路电压随温度升高而减小,与辐照度的对数近似成线性关系。因此对于辐照度为 $700 \sim 1300 \text{ W/m}^2$ 的测试结果,可应用式(18)~(22)将其修正至 STC 条件下的短路电流与开路电压^[18,19]。STC 条件下太阳电池短路电流与非 STC 条件下短路电流的关系为

$$I_{\text{sc,STC}} = \frac{G_{\text{STC}} I_{\text{sc,meas}}}{G_{\text{meas}} [1 + \alpha \times (T_{\text{meas}} - T_{\text{STC}})]} \quad (18)$$

其中, G_{STC} 为 STC 条件下的辐照度,为 1000 W/m^2 。 $I_{\text{sc,meas}}$ 为太阳电池在非 STC 条件下测得的短路电流值。 G_{meas} 为非 STC 条件的辐照度。 α 为短路电流的相对温度系数,定义式见式(19)。 T_{meas} 为非 STC 条件下的电池温度。 T_{STC} 为 STC 条件下的电池温度,为 25°C 。

$$\alpha = \frac{1}{I_{\text{sc,STC}}} \frac{dI_{\text{sc}}}{dT} \quad (19)$$

其中, α 的取值可以采用太阳电池生产厂家提供的典型值或通过实验确定。 α 的典型值为 $0.045\%/^\circ\text{C}$ 。若通过实验确定,则需测得太阳电池在相同辐照度,不同温度下的短路电流值,采用公式(19)可计算得到短路电流的相对温度系数 α 。

STC 条件下太阳电池的开路电压与非 STC 条件下开路电压的关系为

$$V_{\text{oc,STC}} = \frac{V_{\text{oc,meas}} f(G_{\text{meas}})}{1 + \beta \times (T_{\text{meas}} - T_{\text{STC}}) f^2(G_{\text{meas}})} \quad (20)$$

其中, $V_{\text{oc,meas}}$ 为在非 STC 条件下测得的开路电压值。 β 为开路电压的相对温度系数,见式(21)。 $f(G_{\text{meas}})$ 为辐照度修正因子,见式(22)。

$$\beta = \frac{1}{V_{\text{oc,STC}}} \frac{dV_{\text{oc}}}{dT} \quad (21)$$

其中, β 的取值可以采用太阳电池生产厂家提供的典型值或通过实验确定。 β 的典型值为 $-0.3\%/^\circ\text{C}$ 。实验确定 β 值的步骤与上述确定 α 值的方法相似。

$$f(G_{\text{meas}}) = \frac{V_{\text{oc,STC}}}{V_{\text{oc}}(G_{\text{meas}})} = B_2 \times \ln^2\left(\frac{G_{\text{STC}}}{G_{\text{meas}}}\right) + B_1 \times \ln\left(\frac{G_{\text{STC}}}{G_{\text{meas}}}\right) + 1 \quad (22)$$

其中, B_1 、 B_2 为修正系数。 B_1 表示与等效二极管

的热电压有关的修正系数, B_2 表示考虑了开路电压与辐照度之间的非线性关系的修正系数。 B_1 、 B_2 的取值与太阳电池的种类和结构有关。 B_1 、 B_2 的取值可以采用太阳电池生产厂家提供的典型值或通过实验确定。对于单晶硅钝化发射极和背面接触(Passivated Emitter and Rear Cell, PERC)太阳电池, B_1 、 B_2 的典型取值为 0.04、0.004^[18]。若通过实验确定, 则需测得太阳电池在相同温度, 不同辐照度下的开路电压值, 之后通过最小二乘法对 $V_{oc,STC}/V_{oc}(G_{meas})$ 与 $\ln(G_{STC}/G_{meas})$ 进行非线性拟合, 进而得到 B_1 与 B_2 。

1.3.2 其他电流-电压点的修正

对于在非 STC 条件下测得的其他电流值 (I_{meas}), 可通过辐照度修正和温度修正转换到 STC 条件下的电流值 (I_{STC}), 见式(23)。

$$I_{STC} = I_{meas} + I_{sc,meas} \left(\frac{G_{STC}}{G_{meas}} - 1 \right) + \alpha I_{sc,STC} (T_{STC} - T_{meas}) \quad (23)$$

对于在非 STC 条件下测得的其他电压值 (V_{meas}), 若在温度修正时忽略串联电阻和并联电阻的影响, 那么太阳电池输出电压对温度的敏感性可表示为^[20]

$$\frac{\partial V}{\partial T} = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{1}{T} \left(V - \frac{nE_g}{q} \right) \quad (24)$$

其中, E_g 为硅的禁带宽度, 25℃ 时为 1.12eV。

因此, 结合辐照度修正和式(24), V_{meas} 修正到 STC 条件下的电压值 (V_{STC}) 可表示为

$$V_{STC} = V_{meas} - R_s I_{sc,meas} \left(\frac{G_{STC}}{G_{meas}} - 1 \right) + \left[V_{meas} - R_s I_{sc,meas} \left(\frac{G_{STC}}{G_{meas}} - 1 \right) - \frac{nE_g}{q} \right] \times \frac{T_{STC} - T_{meas}}{T_{meas}} \quad (25)$$

式中, nE_g/q 的典型取值为 1.232V。

2 实验设计

2.1 实验器材

在实验中, 所用太阳电池为一片定制的独立封装的单晶硅 PERC 准方太阳电池。电池尺寸为 158.75mm×158.75mm。氙灯光源的光谱在 400~1100nm 范围内与太阳光谱较为接近, 是目前被广泛应用的太阳模拟器光源^[21]。因此, 本实验采用

中科微能公司生产的 CME-SL-1600 氙灯光源作为太阳电池的测试光源。

实验所需的器材还有: 一只由欣宝科仪公司生产的 SM206-SOLAR 太阳能功率计(用于测试太阳电池表面接收到的辐照度), 一只由泰仕电子公司生产的 TES-1310 数字式温度表, 一台直流电源(电压的调整范围为 0~30V), 两台数字万用表(电压测量精度为 0.001V; 电流测量精度为 0.001A), 一台滑线电阻器, 开关以及适量导线。

2.2 光照条件下输出电流电压的测量

图 2 给出了测量太阳电池在光照条件下输出电流电压的实验电路图。太阳电池(PV)与滑线电阻器(R_L)、电流表、开关(S)依次串联。电压表并联连接在太阳电池两端。

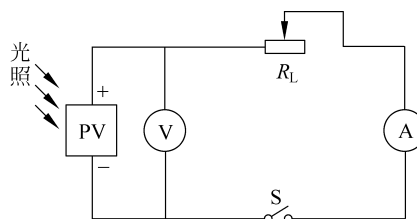


图 2 光照条件下测量太阳电池输出电流与电压的实验电路

为减小因辐照不均匀而引起的实验误差, 氙灯光束应垂直入射至太阳电池表面。为使太阳电池表面接收到的辐照度符合修正程序应用条件 ($700 \sim 1300 \text{ W/m}^2$), 氙灯与太阳电池的距离应保持在 20~30cm 之间。距离较远, 入射至电池表面的辐照度低于 700 W/m^2 ; 距离较近, 电池温度不易保持稳定。在调整过程中, 使用太阳能功率计测量入射至电池表面的辐照度。太阳能功率计探头始终与太阳电池保持在相同平面。

此外, 太阳电池温度测量的准确性也会引起实验误差。因此, 在实验中太阳电池被放置在导热性好的铝板上, 而温度传感器探头被放置在电池附近且通过导热胶固定在铝板上。

最后, 打开氙灯电源, 待氙灯工作稳定后, 闭合电路开关。缓慢调节滑线电阻器, 测量并记录不同阻值下太阳电池的输出电流 I_{meas} 与输出电压 V_{meas} 。待滑线电阻器接入阻值为 0 时, 记录此时的电流表示数, 即 $I_{sc,meas}$ 。断开开关, 记录此时的电压表示数, 即 $V_{oc,meas}$ 。测量电池输出电流与输出电压过程中, 同步记录辐照度与温度。

2.3 暗条件下太阳电池参数的测量

关闭氙灯, 移除滑线变阻器, 将太阳电池置于

暗条件下。依照图 3 将直流电源、电流表、电压表与太阳电池相连接。此时,直流电源为太阳电池施加反向电压。闭合开关,调节直流电源的输出电压,当电压值分别为 6V、7V 和 8V 时,记录对应的电流表示数。

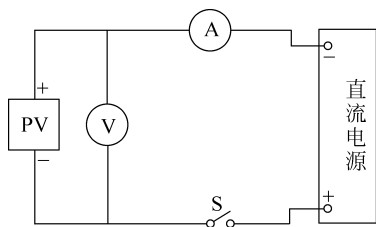


图 3 暗条件下向太阳电池施加反向电压的实验电路

改变实验电路连接,使直流电源向太阳电池施加正向电压。当太阳电池的温度为 25℃ 时,调节正向电压的大小直至电流表示数等于 $I_{sc,STC}$ (电池厂家提供 $I_{sc,STC}$ 的大小,且将其标识在实验台上),记录此时的电压表示数。

3 实验结果与讨论

实验中,太阳电池表面所接收的辐照度为 $700\text{W}/\text{m}^2$,太阳电池的温度为 35.4°C 。依照式(18)~式(22)将实验测得的一组 $I_{\text{meas}}-V_{\text{meas}}$ 数据修正至 STC 条件下的 $I_{\text{STC}}-V_{\text{STC}}$ 数据。表 1 列出了实验中测量和修正计算得到的部分数据。图 4 给出了测得的 $I_{\text{meas}}-V_{\text{meas}}$ 数据点和修正计算得到的 $I_{\text{STC}}-V_{\text{STC}}$ 数据点。

表 1 实验中测量和修正计算得到的部分数据

$V_{oc,meas}/$ V	$I_{sc,meas}/$ A	$V_{dark,STC}/$ V	$V_{oc,STC}/$ V	$I_{sc,STC}/$ A
0.655	7.083	0.708	0.687	10.071

将 I_{STC} 与 V_{STC} 相乘,乘积最大的值即为 $P_{\text{mpp},STC}$ 。与 $P_{\text{mpp},STC}$ 对应的电流和电压即为 $I_{\text{mpp},STC}$ 和 $V_{\text{mpp},STC}$,分别为 9.601A、0.563V。此外,当太阳电池置于暗条件下并向其施加反向电压时,所施加的电压值和相应的反向电流值列在表 2 中。

结合 1.2 节的内容与上述数据,可计算得到太阳电池在 STC 条件下五个特征参数的值,如表 3 所示。

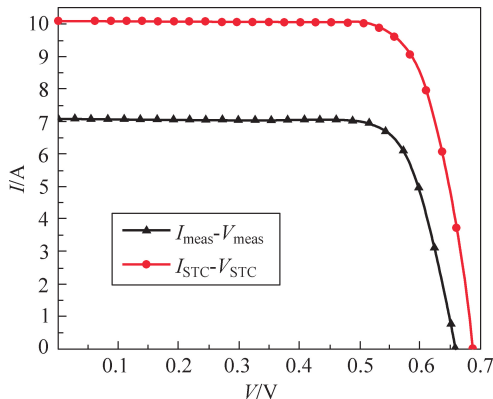


图 4 实验测得的 $I_{\text{meas}}-V_{\text{meas}}$ 数据点和修正计算得到的 $I_{\text{STC}}-V_{\text{STC}}$ 数据点

表 2 暗条件下的太阳电池反向特性

V/V	6.000	7.000	8.000
I_{res}/A	0.104	0.124	0.140

表 3 太阳电池单二极管模型中的五个特征参数值

I_{ph}/A	R_{sh}/Ω	$R_s/\text{m}\Omega$	n	I_0/A
10.071	57.1	2.09	1.31	1.40×10^{-8}

确定特征参数后,依据式(1)和式(2)建立太阳电池在 STC 条件下的 $I-V$ 方程,并采用 Matlab 中的 ezplot 函数绘制出 $I-V$ 曲线(见图 5)。从图 5 可以看出,本实验方法确定的模型能较好地描述太阳电池的电学行为。

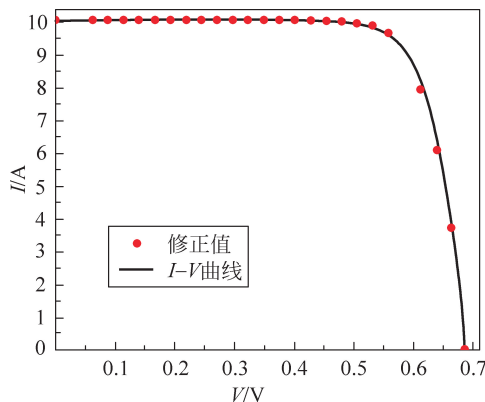


图 5 修正后的 $I-V$ 值与太阳电池在 STC 条件下的 $I-V$ 曲线

本实验通过计算电流均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)的方法来衡量所建模型的精度。电流 RMSE 的定义式见式(26)。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (I_{\text{STC}}^i - I_{\text{cal}}^i)^2} \quad (26)$$

其中, m 为所测数据的个数, I_{STC}^i 为修正至 STC 条件的第 i 个数据中的电流值, I_{cal}^i 为修正至 STC 条件下的第 i 个数据中的电压值在 I - V 方程中对应的电流值。

经计算, 本实验的电流 RMSE 为 0.117A, 实验的准确程度可以满足普通物理实验课程的开设要求。

4 结语

本文提出了一种确定太阳能电池特征参数的简单实验方法, 通过对太阳能电池在非标准条件以及暗条件下电流电压的测量, 确定出了太阳能电池在 STC 条件下的特征参数, 最后用计算电流均方根误差的方式给出了该实验的精度。本实验不需要昂贵的专业测试设备, 操作简单。在大学物理实验教学中可利用本文提出的方法开设太阳能电池的特征参数实验, 有助于增强学生对太阳能电池特征参数及输出特性的理解。

参 考 文 献

- [1] 黄雨竹, 黄致新. 解决芯片技术卡脖子的问题, 应从高中物理教学抓起——基于中美高中物理教材中“固态电子学”知识的比较[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 18-23.
HUANG Y Z, HUANG Z X. Starting from physics teaching in high school to solve the bottleneck of chip technology—Based on the comparison of “solid-state electronic” knowledge in Chinese and American high school physics textbooks[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 18-23. (in Chinese)
- [2] 雷鸣. 对一个电源模型的深入研究[J]. 物理与工程, 2016, 26(2): 46-50.
LEI M. Deep study of a photo solar cell[J]. Physics and Engineering, 2016, 26(2): 46-50. (in Chinese)
- [3] 易施光, 张文杰, 罗志荣, 等. 太阳能电池各等效电路模型的对比分析[J]. 玉林师范学院学报, 2020, 41(3): 20-25.
YI S G, ZHANG W J, LUO Z R, et al. Comparative analysis of various equivalent circuit models of solar cells[J]. Journal of Yulin Normal University, 2020, 41(3): 20-25. (in Chinese)
- [4] 张云龙, 陈新亮, 周忠信, 等. 晶体硅太阳能电池研究进展[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 49-60.
ZHANG Y L, CHEN X L, ZHOU Z X, et al. Research progress of crystalline silicon solar cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10): 49-60. (in Chinese)
- [5] 张士顺, 陈栋, 刘威. 一种新型光伏组件单二极管模型求解算法分类方法[J]. 电子测试, 2019(11): 67-68, 58.
ZHANG S S, CHEN D, LIU W. A novel classification method of the solving algorithm of photovoltaic module single diode model[J]. Electronic Test, 2019(11): 67-68, 58. (in Chinese)
- [6] 吴忠强, 刘重阳, 赵德隆, 等. 基于 IEHO 算法的太阳能电池模型参数辨识[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 97-103.
WU Z Q, LIU C Y, ZHAO D L, et al. Parameter identification of solar cell model based on IEHO algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(9): 97-103. (in Chinese)
- [7] 曾一婕, 王龙, 黄超. 基于 Jaya-DA 算法的太阳能电池模型参数辨识[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 198-202.
ZENG Y J, WANG L, HUANG C. Parameter identification of solar cell model based on Jaya-DA algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(2): 198-202. (in Chinese)
- [8] 刘银春, 陈雄, 魏芬, 等. 太阳能电池基本特性测试仪的原理及其应用[J]. 福建师大福清分校学报, 2009, No. 96(S1): 50-54.
LIU Y C, CHEN X, WEI F, et al. Principle and application of solar cell basic character Tester[J]. Journal of Fuqing Branch Fujian Normal University, 2009, No. 96(S1): 50-54. (in Chinese)
- [9] 王虎. 硅太阳能电池串联电阻的温度特性[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(17): 179-183.
WANG H. Silicon solar cells series resistance temperature characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(17): 179-183 (in Chinese)
- [10] 魏宇星, 张健男, 刘平洋, 等. 太阳能电池特性的自动测量[J]. 物理与工程, 2011, 21(6): 25-28.
WEI Y X, ZHANG J N, LIU P Y, et al. Automatic measurement for parameters of solar cells[J]. Physics and Engineering, 2011, 21(6): 25-28. (in Chinese)
- [11] 杨诗晨, 刘灿, 徐铁钢. 太阳能电池特性的研究——一项有意义的创新研究实验[J]. 物理与工程, 2014, 24(2): 69-72.
YANG S C, YANG C, XU T G. Research on characteristic of solar battery—A significant innovation research experiment[J]. Physics and Engineering, 2014, 24(2): 69-72. (in Chinese)
- [12] 马涛, 申璐. 光伏组件在非标准测试条件下的能量分布[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 169-175.
MA T, SHEN L. Analysis of energy distribution of photovoltaic module under non-standard test conditions[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(2): 169-175. (in Chinese)
- [13] 肖文波, 刘伟庆, 吴华明, 等. 太阳能电池单二极管模型中的参数提取方法[J]. 物理学报, 2018, 67(19): 25-35.
XIAO W B, LIU W Q, WU H M, et al. Review of parameter extraction methods for single-diode model of solar cell[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(19): 25-35. (in Chinese)

- [14] 张翠丽,胡建民,王月媛,等. P-N 结太阳能电池暗特性的数值分析[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2017, 33(6): 39-42.
ZHANG C L, HU J M, WANG, Y Y, et al. Numerical analysis of dark characteristics of P-N junction Solar cells [J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2017, 33(6): 39-42. (in Chinese)
- [15] PYSCH D, METTE A, GLUNZ S W. A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2007, 91(18): 1698-1706.
- [16] 张忠政,程晓舫,刘金龙. 非线性太阳能电池的负载电阻输出功率的研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(6): 1474-1480.
ZHANG Z Z, CHENG X F, LIU J L. Output power of load resistance of non-linear solar cell[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(6): 1474-1480. (in Chinese)
- [17] 杨秀增,杨仁桓. 基于斜率法的太阳能电池串联电阻测量方法[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(2): 42-44.
YANG X Z, YANG R H. Method of experimental measurement of solar cell series resistance based on slope algorithm[J]. Experimental Technology and Management, 2016, 33(2): 42-44. (in Chinese)
- [18] 杨虎,崔容强,徐林. 非标条件下太阳能电池短路电流向标准条件下的转化[J]. 太阳能学报, 2003(5): 663-667.
YANG H, CUI R Q, XU L. The transform of I_{sc} of solar cell from non-standard test condition to the standard test condition[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2003(5): 663-667. (in Chinese)
- [19] LI B J, MIGAN-DUBOIS A, CLAUDE D, et al. Evaluation and improvement of IEC 60891 correction methods for I-V curves of defective photovoltaic panels[J]. Solar Energy, 2021, 216: 225-237.
- [20] HISHIKAWA Y, DOI T, HIGA M, et al. Voltage-dependent temperature coefficient of the I-V curves of crystalline silicon photovoltaic modules[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2017(8): 48-53.
- [21] 陈文志,张然,钟楚巍,等. 连续氙灯发光光谱的设计与应用研究[J]. 发光学报, 2013, 34(12): 1651-1656.
CHEN W Z, ZHANG R, ZHONG C W. Luminescent spectra design and application research on continuous xenon Lamp[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(12): 1651-1656. (in Chinese)