

文章编号 1004-924X(2007)04-0517-05

太阳能电池测试系统及其参数匹配优化研究

蔡建文, 李萍萍, 徐传明, 黄文浩

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为了获得太阳能电池的 $I-V$ 特性曲线及特性参数, 利用 Visual C++ 语言开发出基于 Windows 平台的太阳能电池测试软件系统, 并对基于补偿原理的 $I-V$ 测试电路参数匹配进行了详细分析。电路中串联电阻及桥式直流电源对电池的暗特性影响变化不大, 但可使光特性 $I-V$ 曲线发生显著变化。通过参数匹配的调整与优化, 测量数据与电池的标准数据基本吻合, 其误差仅为 1%~2%, 表明该测试软件系统满足实际使用要求, 为电池性能分析提供了准确的依据。

关键词: 太阳能电池; 测试系统; $I-V$ 特性曲线; 参数匹配

中图分类号: TM914.4 **文献标识码:** A

Study on solar cell testing system and its parameter matching optimization

CAI Jian-wen, LI Ping-ping, XU Chuan-ming, HUANG Wen-hao

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In order to get $I-V$ characteristic curves and characteristic parameters of solar cells, the software system for solar cell testing is developed using Visual C++ based on Windows operator system. The parameters matching in compensative $I-V$ testing circuit is analyzed in details. Analysis results show that series resistance and bridge DC power in the measurement circuit can slightly affect the dark $I-V$ curve, however, they modify the light $I-V$ curve significantly. The measurement data are basically agree with the standard data of solar cells by adjusting and optimizing the matching parameters and this error is only between 1% and 2%. The results show that this software system can meet the practical needs and also can provide accurate basis for the analysis of solar cells performances.

Key words: solar cell; testing system; $I-V$ characteristic curve; parameter matching

1 引言

太阳能电池作为洁净新能源在光伏领域已获得良好的商业应用和发展^[1,2], 但许多制约电池

发展的影响因素尚不清楚如电光学特性等。太阳能电池 $I-V$ 特性曲线是衡量太阳能电池品质优劣的重要依据, 它给出了短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、光电转换效率 η 、电池内阻、最大输出功率 P_{max} 点等丰富物理信息^[3], 为改进电池制备工艺和电学性

能提供了重要的分析依据^[4]。对 $I-V$ 曲线实验数据进行拟合分析的许多方法,如解析法^[5]、数论方法^[6]、从暗 $I-V$ 曲线中取得电池的特性参数^[7,8]等,已取得较深入的研究成果。国内外在光电检测,光电跟踪等方面已经做了很多研究工作^[9-11],但是如何测量太阳电池并获得准确的 $I-V$ 特性曲线的实验数据,相关研究较少。

本文在 Windows 平台上,利用 Visual C++ 6.0 语言开发出太阳电池测试软件系统,对多功能数据采集系统取得的 $I-V$ 数据进行了分析处理,并对基于补偿原理的 $I-V$ 测试电路参数匹配进行了详细分析。通过参数匹配的调整与优化,可以取得准确的测量数据,为 $I-V$ 曲线的实验数据拟合分析以及改进电池性能提供了必要的依据。

2 太阳测试系统

本测试系统采用了 TM-500A 小型太阳模拟器(AM1.0),它是一个以 500 W 短弧氙灯为光源的通用准直型太阳模拟器(图 1)。

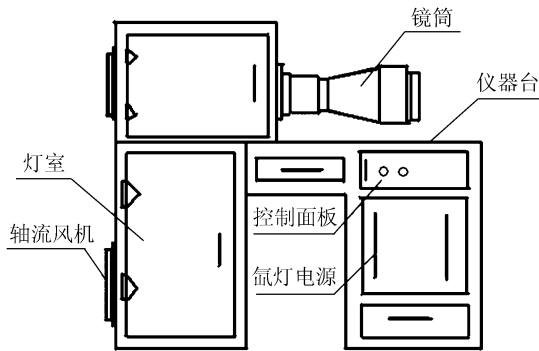


图 1 TM-500A 太阳模拟器外形图

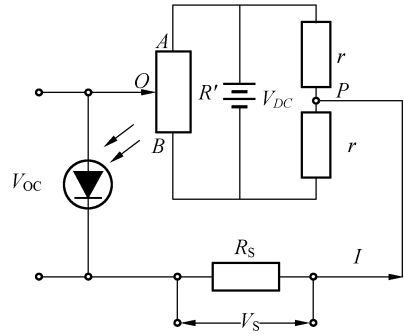
Fig. 1 Figuration of TM-500A sun simulator

2.1 采集电流与电压的电路设计

$I-V$ 特性曲线是太阳电池的最主要性质,直接反映了电池的开路电压(V_{OC})和短路电流(I_{SC})的关系,从而可计算出输出功率以及电池的效率。只有当负载连到太阳电池时,才能决定其输出电压及输出电流。在一定太阳光(或模拟光)照射下,曲线完全由电池的 p-n 结特性以及测量电路中的电阻参数所确定。当太阳光接受从弱到强的光照射时,电池在某一光强下 V_{OC} 和 I_{SC} 的关系是^[1]:

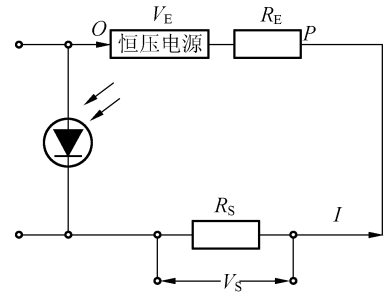
$$V_{OC} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1\right), \quad (1)$$

式中 A 为二极管品质因子, k 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度, q 为电子电荷, I_0 为二极管饱和电流。



(a) 电路原理图^[1]

(a) circuit's theory



(b) 等效电路图

(b) equivalent circuit

图 2 补偿原理的数据采集

Fig. 2 Data gathering of compensation theory

基于补偿原理的数据采集电路^[1]可以利用桥式电路的可变电阻 R 调节,通过串联提取电流的取样电阻 R_S 很快获得与 $I-V$ 坐标的交点(图 2(a))。其等效电路图如图 2(b)所示,桥式电路可简化表示为恒压电源 V_E 及电阻 R_E , 其中:

$$V_E = \frac{V_{DC}(R_{OB} - R_{OA})}{2(R_{OB} + R_{OA})}$$

$$R_E = \left| \frac{(R_{OB} + R_{OA})r + 2R_{OB}R_{OA}}{R_{OB} - R_{OA}} \right|, \quad (2)$$

当电桥由平衡点 O 向 A 变化时,外加恒压电源 V_E 给电池施以正向偏置,可使流过 p-n 结的电流大于光生电流,通过测量电池的两端电压,即可得到 V_{OC} ;当电桥由平衡点 O 向 B 变化时,电池

受到 V_E 的反向偏置,而反向电流增大到和正向光生电流相等时,使得 p-n 结处于截止状态,通过测量 R_S 两端电压 V_S ,只要除以其电阻值,就可以间接得到 I_{SC} 。

通过上述电路,在电池没有光照时,可以测到的是暗 $I-V$ 曲线;但是在加上光照以及偏压后,测到的电流和电压必须减去暗电流和暗电压才能得到真正的太阳能电池光生 $I-V$ 曲线。在测试系统中,采用具有 A/D 转化功能 Evoc 公司的 PCL-711B 多功能数据采集卡,实现对电池及取样电阻 R_S 两端电压信号的快速提取。该采集卡对 PC 为基础的数据采集系统有很好的适应性,增益编程可调,增益分别与外界模拟信号输入的量程电压相对应,最高采样频率可达 25 kHz,误差在 1 BitLSB 之内,很好地满足了电池的实际测量要求。

2.2 测试系统的软件设计

在 Windows 平台上,利用 Visual C++6.0 语言开发出的太阳能电池测试软件系统设计包含两大模块:数据采集模块和数据处理模块(图 3)。数据采集模块主要通过调节可变电阻 R' 改变 R_E 的大小,实现对两路模拟电压信号进行采集和 A/D 转换、实时显示和数据保存,一路为测量电池两端的电压 V ,另一路为标准电阻两端的电压 V_S (其实相当于是回路中的电流值)。数据处理模块实现对数据进行分析拟合处理,通过软件系统的计算处理,可以对无光照和光照条件下的 $I-V$ 特性曲线进行分析比较,从而得到太阳能电池的 I_{SC} 、 V_{OC} 、转换效率 η 、最大输出功率 P_{max} 点等性能参数。电池的明暗 $I-V$ 特性曲线如数据处理模块的基本界面中所示(图 4)。

3 测试电路的参数匹配优化

在不改变桥式电路中 R' 与 r 的情况下,电池的输出电流和电压值受补偿电路中外加偏置直流 V_{DC} 以及串联电阻 R_S 影响较大。从等效电路图中(图 2(b))可以发现:外加恒压电源 V_E 提供的电压(除去加在 R_E 与 R_S 上的分压)必须大于电池的开启电压,才能引起光 $I-V$ 曲线产生明显的变化。在 $R_S = 10 \Omega$ 条件下(图 5),当 $V_{DC} = 4 V$ 时,只显示出近似直线的部分光 $I-V$ 曲线段;当 V_{DC} 逐渐增至 16 V 时,可以完整地得到光 $I-V$ 曲

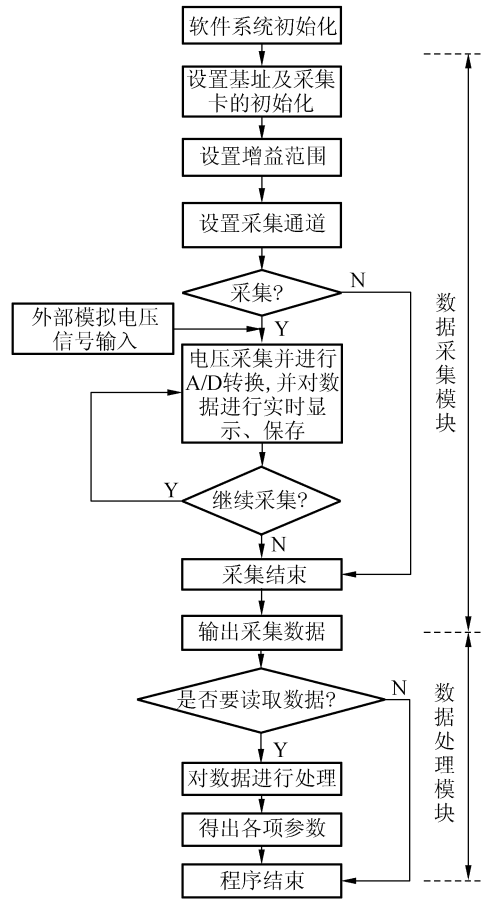


图 3 太阳能电池测试软件系统流程图

Fig. 3 Flow chart of solar cell testing system

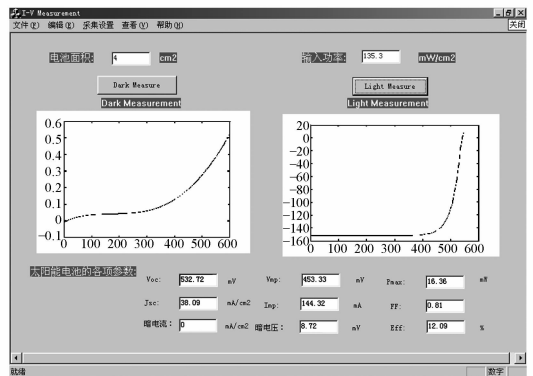


图 4 数据处理模块的基本界面图

Fig. 4 Basic interface of model for data processing

线。对于暗 $I-V$ 曲线, V_{DC} 的影响相对就不那么明显,但较大 V_{DC} 值可以延迟曲线的拐点,更清楚地反映出暗 $I-V$ 曲线的变化。相对而言, $V_{DC} = 8 V$ 能更准确地反映实际的电池 $I-V$ 曲线特性(图 5 和图 7)。

与 V_{DC} 对 $I-V$ 曲线的影响相比, R_S 的匹配选

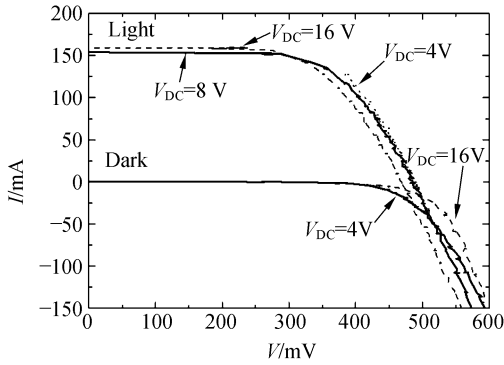


图 5 在 $R_s = 10 \Omega$ 条件下 $I-V$ 测量曲线随 V_{DC} 变化的比较

Fig. 5 $I-V$ curve vs V_{DC} in $R_s = 10 \Omega$

择显得更重要。 R_s 要远远大于电池内阻,但是 R_s 的分压又会增大外加直流电压 V_{DC} ,同时将会使暗电流 I 和暗电压 V 变化不明显。在 $V_{DC} = 4 \text{ V}$ 条件下(图 6), $R_s = 0.5 \Omega$ 时,光 $I-V$ 曲线呈折线变化,表明此时 R_s 与电池内阻相当,受电池内阻影响很大;当 R_s 逐渐增至 50Ω 时,由于 R_s 的分压,与 $R_s = 10 \Omega$ 相比,电池开路电压 V_{OC} 显著减小,相应的暗 $I-V$ 曲线近似呈直线变化。

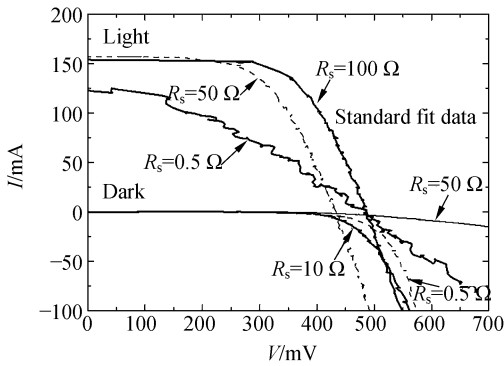


图 6 在 $V_{DC} = 8 \text{ V}$ 条件下 $I-V$ 测量曲线随 R_s 变化的比较

Fig. 6 $I-V$ curve vs R_s in $V_{DC} = 8 \text{ V}$

通过对一块已知性能参数的标准太阳能电池 ($I_{SC} = 38.09 \text{ mA/cm}^2, V_{OC} = 533.5 \text{ mV}, \eta = 12.24\%$)

进行测试(图 7),暗 $I-V$ 曲线中的暗电流和暗电压分别为 0 mA 和 8.72 mV ,对光 $I-V$ 曲线 ($I_{SC} = 37.5 \text{ mA/cm}^2, V_{OC} = 532.72 \text{ mV}, \eta = 12.09\%$) 进行比较可以得出误差在 $1\% \sim 2\%$ 之间。这表明,经过测试电路的 R_s 与 V_{DC} 优化调整,该测试软件系统能较准确地得到实际的电池 $I-V$ 特性曲线。

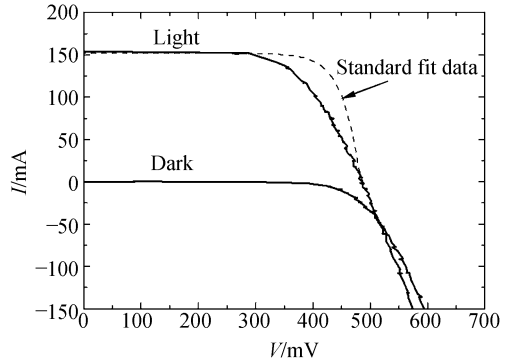


图 7 在 $R_s = 10 \Omega, V_{DC} = 8 \text{ V}$ 条件下标准电池的 $I-V$ 测量曲线与标准曲线比较

Fig. 7 $I-V$ metrical curve vs standard curve of standard cell in $R_s = 10 \Omega, V_{DC} = 8 \text{ V}$

4 结 论

本文利用基于 Windows 平台的太阳能电池测试软件系统,对基于补偿原理的 $I-V$ 测试电路参数匹配进行了分析和优化。电路中串联电阻及桥式直流电源对电池的暗 $I-V$ 曲线影响并不明显,但光特性 $I-V$ 曲线受之影响很大。通过参数匹配的调整与优化,分析发现 $R_s = 10 \Omega, V_{DC} = 8 \text{ V}$ 条件下,测量数据与电池的标准数据基本吻合,误差在 1% 与 2% 之间。结果表明,该测试软件系统较好地满足了实际的电池性能要求,可为电池性能的改善与提高提供准确的综合分析依据。

致谢:感谢中国科学技术大学物理系刘宏图教授在研究工作中提供的帮助。

参考文献:

[1] 赵富鑫,魏彦章. 太阳能电池及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
 ZHAO F X, WEI Y ZH. *Solar Cells and Its Application* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985. (in Chinese)

- [2] 耿新华,孙云,王宗畔,等. 薄膜太阳能电池的研究进展[J]. 物理,1999,28(2):96-102.
GENG X H, SUN Y, WANG Z P, *et al.*. Thin film solar cells[J]. *Physics*, 1999, 28(2):96-102. (in Chinese)
- [3] 苗建勋,李水泉,石发旺,等. 太阳能电池基本特性研究[J]. 大学物理实验,1996,9(4):23-25.
MIAO J X, LI SH Q, SHI F W, *et al.*. Study on the basic properties of the solar cell[J]. *Phys. Experim. Coll.*, 1996, 9(4):23-25. (in Chinese)
- [4] PAUL A B, DONALD A C. PCID version 4 for windows: from analysis to design[C]. *IEEE Electron Devices Society, Proceedings of the 25th Photovoltaic Specialists Conference, Washington*, 1996, 377-381.
- [5] 卢景宵. 用解析模型拟合太阳能电池 $I-V$ 特性的实验数据[J]. 太阳能学报,1996,17(1):44-49.
LU J X. Fitting the experimental data of solar cell $I-V$ characteristics with analytic model[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1996, 17(1):44-49. (in Chinese)
- [6] 徐林,崔容强,鹿乾骏,等. 对太阳能电池 $I-V$ 曲线进行拟合的数论方法[J]. 太阳能学报,2000,21(2):160-164.
XU L, CUI R Q, PANG Q J, *et al.*. A numerical method for correlating the $I-V$ curve of solar cells[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2000, 21(2):160-164. (in Chinese)
- [7] SHARMAT S K, PAVITHRA D, SRINIVASAMURTHY N, *et al.*. Determination of solar cell parameters: an analytical approach[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1993, 26: 1130-1133.
- [8] KING D L, HANSEN B R, KRATOCHVIL J A, *et al.*. Dark current-voltage measurements on photovoltaic modules as a diagnostic or manufacturing tool[C]. *IEEE Electron Devices Society*, 1997, 1125-1128.
- [9] 马军山,侯琳琳,付东翔,等. 双荧光标记生物芯片激光共聚焦检测系统[J]. 光学精密工程,2005,13(6):727-734.
MA J SH, HOU L L, FU D X, *et al.*. Two-laser scanning confocal system for microarray analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):727-734. (in Chinese)
- [10] 范大鹏,张智永,范世珣,等. 光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究[J]. 光学精密工程,2006,14(4):673-680.
FAN D P, ZHANG ZH Y, FAN SH X, *et al.*. Research of basic principles of E-O stabilization and tracking devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):673-680. (in Chinese)
- [11] 陈浩,谭久彬. 一种用于光电目标跟踪的非线性滤波算法[J]. 光学精密工程,2006,14(5):917-921.
CHEN H, TAN J B. Nonlinear filtering algorithm for improving opto-electric target tracking[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):917-921. (in Chinese)

作者简介:蔡建文(1978—),男,江苏常州人,博士研究生,主要从事太阳能电池测试及双光子三维光存储方面的研究工作。E-mail:caijw@mail.ustc.edu.cn

黄文浩(1944—),男,江苏武进人,教授,博导,主要从事精密机械与纳米技术以及双光子三维加工等方面的研究工作。