

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.03.10

应用于太阳能电池的 I - V 曲线测试仪在线校准方法

张楠

(广东省计量科学研究院, 广东 广州 510405)

摘要: 为解决 I - V 曲线测试仪在量传溯源方面的技术问题, 通过对太阳能电池开路电压(V_{oc})、短路电流(I_{sc})测量方法和技术的研究, 实现了对 I - V 曲线测试仪 V_{oc} , I_{sc} 参数的在线测量, 从而完成了对 I - V 曲线测试仪的系统在线校准。研究结果表明, 太阳能电池开路电压、短路电流在线校准的相对示值误差分别为 0.45%, 0.20%, 满足了光伏产业相关设备的量传溯源需求, 为该产业健康发展提供了技术支撑。

关键词: I - V 曲线测试仪; 在线校准方法; 太阳能电池; 开路电压; 短路电流

中图分类号: TB97; TM933

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)03-0051-04

Online Calibration Method of I - V Curve Tester for Solar Cells

ZHANG Nan

(Guangdong Provincial Institute of Metrology, Guangzhou 510405, China)

Abstract: In order to solve the technical problem of I - V curve tester in terms of quantity transmission and traceability, the author has realized the online measurement of the open circuit voltage (V_{oc}) and short circuit current (I_{sc}) parameters of I - V curve tester through the research and development of solar cell's V_{oc} and I_{sc} measurement method and technology, thus completing the system online calibration of the I - V curve tester. The relative indication errors of V_{oc} and I_{sc} online calibration are 0.45% and 0.20% respectively. This work meets the demand of traceability of related equipment in photovoltaic industry, and provides the technical support for the healthy development of the industry.

Key words: I - V curve tester; online calibration method; solar cell open-circuit voltage; short-circuit current

0 引言

以开路电压(V_{oc})和短路电流(I_{sc})为代表的光电参数是评估太阳能电池质量可靠性的重要指标^[1-2], 也是太阳能电池贸易结算的依据。 V_{oc} 和 I_{sc} 测量的准确性影响着太阳能电池的技术创新及发展^[3]。测量光电参数的 I - V 曲线测试仪是由数据采集、数据传输、数据转换、模型计算、软件控制等多环节构成的复杂系统^[4], 实现对 I - V 曲线测试仪的校准是准确测量光电参数的保证。

I - V 曲线测试仪体积较大, 拆卸和搬运不方便, 整体送到计量实验室校准十分困难^[5], 且通用测量设备无法对该类仪器的脉冲输出信号进行系统性准确测量, 对 I - V 曲线测试仪进行校准的常规方法是对仪器各个功能模块分别进行校准。这一做法费时费力, 且系统中的算法模块、软件控制模块无法实现单独校准, 导致无法对系统误差进行准确评估。本文通过对太阳能电池 V_{oc} 和 I_{sc} 测量方法的研究和测量技术的开发, 实现了对 V_{oc} 和 I_{sc} 两个参数的在线测量, 将 V_{oc} , I_{sc} 的标准值与示

值进行比对, 实现对 I - V 曲线测试仪的系统在线校准。

1 基本原理

图 1 是太阳能电池的 I - V 特性曲线及等效电路图, 通过分析可知当电路处于开路时, 电流 I 为零, 此时的电压 U 即为 V_{oc} , 此时的负载电阻可视为无穷大; 当电路处于短路时, 电压 U 为零, 此时的电流 I 即为 I_{sc} , 此时的负载电阻可视为零^[7-8]。 V_{oc} , I_{sc} 是太阳能电池重要的光电参数, 影响太阳能电池光电转换效率。 V_{oc} , I_{sc} 通过 I - V 曲线测试仪扫描采集得到^[1-2], 因此对 I - V 曲线测试仪的系统校准可通过间接校准 V_{oc} , I_{sc} 两个参数实现。

对 V_{oc} , I_{sc} 两个参数校准的关键在于对其进行实时在线采集, 即外接标准测试设备与被校 I - V 曲线测试仪同时对 V_{oc} , I_{sc} 进行比较测量, 测量过程中相互之间不产生信号干扰。外接标准测试设备所测得的数据为标准值, 被校 I - V 曲线测试仪采集的数据为示值, 示值与标准值之差即为被校 I - V 曲线测试仪所测 V_{oc} , I_{sc} 的绝对示值误差。

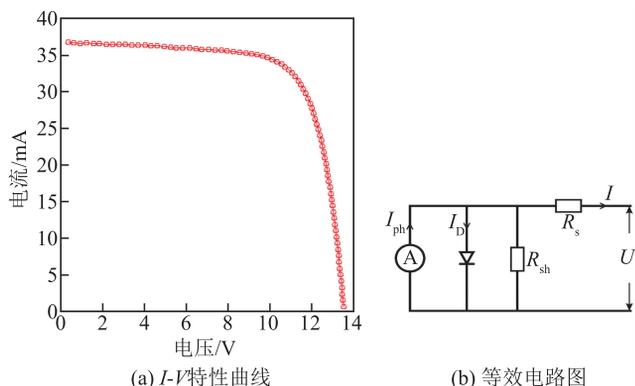


图 1 太阳电池 I - V 特性曲线及等效电路图

2 实验与方法

由于 I - V 曲线测试仪中的 V_{oc} 、 I_{sc} 信号持续时间均为 ms 量级，普通的电学类电压、电流测试设备无法捕捉这类信号，无线电类的通用设备示波器可以实时捕捉这类信号，但其电压测量的最大允许误差一般大于 0.5%，准确性无法满足校准要求。本实验采用的标准设备为多通道电压高速数据采集卡（以下简称高速数据采集卡）和霍尔电流传感器，该套设备具有采集速率高，多通道同时采集信号，可以给出拟合曲线，电压、电流测量最大允许误差可达 0.05% 等特点，较好地解决了 I - V 曲线测试仪的校准问题。其中， V_{oc} 直接在线测量得到； I_{sc} 在线采集后再换算为电流得到。如图 2 所示，高速数据采集卡通道 1 正负接线端直接连接 U 两端即可实现对 V_{oc} 的测量。对于 I_{sc} 的测量，先借助霍尔电流传感技术完成太阳能电池对模拟太阳脉冲光信号响应情况的隔离转换，使脉冲信号转换为电流信号，再借助电流-电压转换模块将电流转换为电压，之后高速数据采集卡的通道 2 完成数据采集，最后将采集到的电压转换为电流。实验中使用的高速数据采集卡、霍尔传感器均经过计量校准，数据可溯源至国家基准。

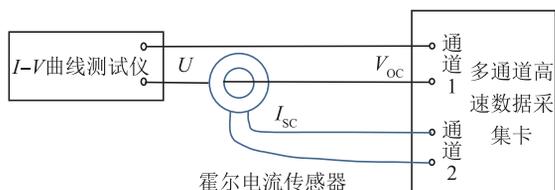


图 2 I - V 曲线测试仪校准连线框图

整个实验在现场完成，测量中借助了现场的太阳组件测试仪和晶硅太阳电池组件。测量步骤为：①将太阳电池组件安装在太阳组件测试仪玻璃感光区，接

通太阳电池组件与组件测试仪；②将高速数据采集卡的通道 1 正负端连接在图 1 中的 U 两端，确保通道 1 测量 V_{oc} 参数；③将霍尔传感器的电流钳钳住太阳电池组件的导线，并将高速数据采集卡通道 2 的正负端分别连接在霍尔传感器的输出端正负极，确保通道 2 测量 I_{sc} 参数；④确保组件测试仪的 I - V 曲线测试单元、高速数据采集卡均处于采集状态；⑤开启组件测试仪的太阳模拟光源模块，待其脉冲光源触发曝光的瞬间，使组件测试仪的 I - V 曲线测试单元、高速数据采集卡同时采集到太阳电池输出的 V_{oc} 、 I_{sc} ；⑥对比两者数据的差异，计算示值误差，实现对 I - V 曲线测试仪的校准。

3 结果与讨论

3.1 开路电压 V_{oc} 的相对示值误差

太阳组件测试仪的模拟脉冲光源每触发曝光一次，记录一组标准值 U_s 、示值 U_1 ，标准值从高速数据采集卡采集的数据中选取，示值直接从 I - V 曲线测试仪上读取，记录 10 组数据后取平均，分别得到标准值、示值的平均值，结果见表 1，再根据公式(1)计算 V_{oc} 的相对示值误差。

表 1 开路电压 V_{oc} 的相对示值误差

测量次数	标准值 U_s/V	示值 U_1/V
1	37.95	38.11
2	37.98	38.10
3	37.94	38.12
4	37.90	38.14
5	37.96	38.08
6	37.92	38.11
7	37.95	38.13
8	37.91	38.15
9	37.97	38.10
10	37.95	38.09
平均值	37.94	38.11

被校准 I - V 曲线测试仪所测开路电压的相对示值误差计算公式为

$$\eta_{rel1} = \frac{U_1 - U_s}{U_s} \times 100\% \quad (1)$$

经过计算得到开路电压的相对示值误差为 0.45%，参照 JJG 124 - 2005《电流表、电压表、功率表及电阻表检定规程》计量性能要求中关于准确度等级的规定，本文对 I - V 曲线测试仪关键测量参数开路电压 V_{oc} 的校准符合准确度等级 0.5 级对应最大允许误差 $\pm 0.5\%$ 的要求^[8]。

3.2 短路电流 I_{sc} 的相对示值误差

短路电流的测量与 3.1 中开路电压的测量原理相似, 太阳组件测试仪的模拟脉冲光源每触发曝光一次, 记录一组标准值 I_s 、示值 I_1 , 记录 10 组数据后, 分别计算得到短路电流 I_{sc} 标准值、示值的平均值, 结果见表 2, 再根据公式(2)计算 I_{sc} 的相对示值误差。

表 2 短路电流 I_{sc} 的相对示值误差

测量次数	标准值 I_s/A	示值 I_1/A
1	9.217	9.232
2	9.223	9.223
3	9.211	9.231
4	9.216	9.232
5	9.214	9.234
6	9.210	9.232
7	9.208	9.231
8	9.218	9.233
9	9.220	9.235
10	9.213	9.233
平均值	9.215	9.233

被校准 $I-V$ 曲线测试仪所测短路电流 I_{sc} 的相对示值误差计算公式为

$$\eta_{rel2} = \frac{I_1 - I_s}{I_s} \times 100\% \quad (2)$$

经过计算得到短路电流 I_{sc} 的相对示值误差为 0.20%, 参照 JJG 124 - 2005《电流表、电压表、功率表及电阻表检定规程》计量性能要求中关于准确度等级的规定, 本文对 $I-V$ 曲线测试仪关键测量参数短路电流 I_{sc} 的校准符合准确度等级 0.2 级对应最大允许误差 $\pm 0.2\%$ 的要求^[8]。

3.3 在线校准问题分析

大型 $I-V$ 曲线测试仪需在设备安装现场进行校准, 由于现场环境较为复杂, 为保证校准结果的准确性, 需特别关注外部因素对校准数据的影响。包括:

1) 本方法采用霍尔电流传感技术测量电流, 因此现场的电磁场环境会对测量结果产生较大影响, 校准时应避免周边存在大功率电磁场干扰源、外置线圈(如互感器)等通电设备^[9]。

2) 本方法主要通过高速数据采集卡采集数据, 且需要记录瞬时数据, 在校准前应做好设备的接地, 从而有效避免部分干扰信号的影响^[10]。

3) 由于在线校准的环境条件复杂多变, 在实际校准过程中采集到的数据可能会出现突变, 以图 3 为例, 在实际的数据分析中需要剔除尖峰脉冲信号, 只在直线段 A 至 B 间选取数据^[11]。

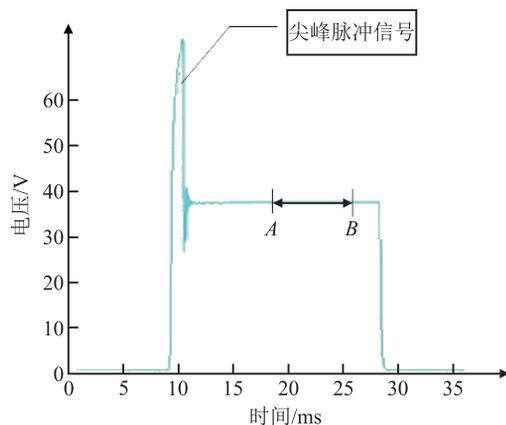


图 3 高速数据采集卡实际采集到的电压脉冲信号

4) 由于不同的 $I-V$ 曲线测试仪触发曝光时间不同, 一般介于 10 ms 至 60 ms 之间, 因此在实际测量时, 可根据需要调节高速数据采集卡的采样频率, 从而保证测量结果的准确可靠。

5) 需要对 $I-V$ 曲线进行分析, 由于数据是通过高速数据采集卡的不同通道、利用不同原理采集得到的, 受通道间差异、霍尔电流传感器响应时间等因素的影响, 电压和电流曲线不是直接对应关系, 需要准确找出时间对应关系后才能得出 $I-V$ 曲线。

6) 太阳能电池的最大功率也可以根据 4) 中得到的 $I-V$ 曲线换算得出。

4 结论

本文给出的太阳能电池开路电压 (V_{oc}), 短路电流 (I_{sc}) 的测量方法, 可以实现对 $I-V$ 曲线测试仪测量参数 V_{oc} , I_{sc} 的在线测量, 解决该类仪器因体积大而送检困难(测不了)、通用测量设备无法对该类仪器的脉冲输出信号进行系统性准确测量(测不准)等问题。经验证, V_{oc} , I_{sc} 在线校准的相对示值误差可分别控制在 0.45%, 0.20% 的水平, 满足了 JJG 124 - 2005《电流表、电压表、功率表及电阻表检定规程》中关于电压、电流计量性能准确度等级为 0.5, 0.2 级时对应最大允许误差的要求^[8]。 $I-V$ 曲线测试仪系统的现场在线校准方法, 为光伏产业该类设备的量传溯源提供了技术支撑。

参 考 文 献

- [1] UNE-EN60904 - 1 - 2007 Photovoltaic devices-Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics[S]. 2007.
- [2] Emery K A. Solar simulators and *I-V* measurement methods[J]. Solar Cells, 1986, 18(3-4): 251 - 260.
- [3] 周军红, 吴健鸥, 梅书刚, 等. 从参考太阳电池到太阳电池组件的量值传递技术研究[J]. 中国测试, 2019, 45(2): 7 - 10.
- [4] 冯志诚, 王亚辉, 田瑞, 等. 便携式光伏组件 *I-V* 特性测试系统研究[J]. 能源工程, 2013, (1): 52 - 55.
- [5] 国家市场监督管理总局. JJF1615 - 2017 太阳模拟器校准规范[S]. 2017.
- [6] 云平, 张志祥, 刘恒. 基于 *I-V* 特性的多晶硅光伏组件故障及失效研究[J]. 太阳能, 2020, 309(1): 63 - 71.
- [7] 陈辛尘, 唐晓燕, 钟端民. 非晶硅太阳电池伏-安特性曲线的测定[J]. 无机材料学报, 1988(2): 75 - 80.
- [8] 国家市场监督管理总局. JJG 124 - 2005 电流表、电压表、功率表及电阻表检定规程[S]. 2005.
- [9] 国家市场监督管理总局. JJF 1075 - 2015 钳形电流表校准规范[S]. 2015.
- [10] 董杰. 干扰及其抑制[J]. 科技与创新, 2016, (5): 90 - 91.
- [11] 黄典庆, 黄新波, 朱永灿, 等. 基于小波变换的断路器振动信号去噪处理[J]. 广东电力, 2019, 32(7): 98 - 105.

收稿日期: 2021 - 03 - 10

基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目(2019MK051)

引用格式: 张楠. 应用于太阳电池的 *I-V* 曲线测试仪在线校准方法[J]. 计测技术, 2021, 41(3): 51 - 54.