



户外用硅基太阳总辐射计的设计

黄静, 刘江峰, 赵志强, 韩会丽, 陆晓曼, 朱志恒

引用本文:

黄静, 刘江峰, 赵志强, 韩会丽, 陆晓曼, 朱志恒. 户外用硅基太阳总辐射计的设计[J]. 信阳师范学院学报自然科学版, 2023, 36(1): 122–126. doi: 10.3969/j.issn.1003–0972.2023.01.020

HUANG Jing, LIU Jiangfeng, ZHAO Zhiqiang, HAN Huili, LU Xiaoman, ZHU Zhiheng. Design of Silicon-based Total Solar Radiometer for Outdoor Use[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2023, 36(1): 122–126. doi: 10.3969/j.issn.1003–0972.2023.01.020

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2023.01.020>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Eu³⁺和Yb³⁺掺杂的近红外发光材料的制备及荧光性能

Preparation and Spectroscopic Characterization of Eu³⁺ and Yb³⁺ Near Infrared Luminescent Material

信阳师范学院学报自然科学版, 2018, 31(2): 268–271. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2018.02.018>

异质结光生电荷分离机制与光电性质研究

Study of Separation Mechanism of Photogenerated Charges and Photoelectric Properties in Heterojunction

信阳师范学院学报自然科学版, 2016, 29(4): 512–518. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2016.04.007>

晶体硅光伏组件电势诱导衰减的研究

Study on the Potential Induced Degradation of Monocrystalline Silicon Photovoltaic Modules

信阳师范学院学报自然科学版, 2023, 36(1): 98–101. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2023.01.015>

光伏组件自然老化年度衰减率分析

Analysis on Annual Attenuation Rate of PV Modules Due to Natural Aging

信阳师范学院学报自然科学版, 2018, 31(3): 375–380. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2018.03.007>

Gd₂O₃中掺杂 Eu³⁺和 Yb³⁺荧光粉的制备及荧光性能

Preparation and Spectroscopic Characterization of Eu³⁺ and Yb³⁺ Doped Gd₂O₃ Phosphors

信阳师范学院学报自然科学版, 2015(3): 385–388. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2015.03.018>

户外用硅基太阳总辐射计的设计

黄 静^{1*}, 刘江峰¹, 赵志强¹, 韩会丽¹, 陆晓曼¹, 朱志恒²

(1. 信阳师范学院 建筑节能材料河南省协同创新中心, 河南 信阳 464000;

2. 信阳启航信息科技有限公司, 河南 信阳 464000)

摘要:为长期监测光伏电站中太阳辐射强度,设计了一种户外用硅基太阳总辐射计。采用同种技术类型硅太阳电池作为传感器,并以光伏组件制作工艺来封装硅太阳电池;采用测温热敏电阻测试硅电池的工作温度,为辐照度测量值增加温度修正;采用合适的取样电阻串接于硅电池正负极两端,使硅太阳电池近似工作于短路电流状态。最后在户外自然光下与标准硅太阳电池进行辐照度对比测试,最大误差为1.2%,最小误差为0.2%,平均误差为0.4%。

关键词:太阳总辐射计;硅太阳电池封装;温度修正;取样电阻

中图分类号: TM914.4 **文献标识码:** A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of Silicon-based Total Solar Radiometer for Outdoor Use

HUANG Jing^{1*}, LIU Jiangfeng¹, ZHAO Zhiqiang¹, HAN Huili¹, LU Xiaoman¹, ZHU Zhiheng²

(1. Energy-saving Building Materials Innovative Collaboration Center of Henan Province,

Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China;

2. Xinyang Qihang Information Technology Limited Company, Xinyang 464000, China)

Abstract: A silicon-based total solar radiometer for outdoor use is designed. The silicon solar cells of the same technology type are used as sensors, and the silicon solar cells are encapsulated by photovoltaic module manufacturing process. The temperature measuring thermistor is used to measure the working temperature of the silicon cell, and the temperature correction is added to the irradiance measurement value. In addition, a suitable sampling resistor is connected in series to the positive and negative terminals of the silicon solar cell to make the silicon solar cell work approximately in the short-circuit current. Finally, the irradiance contrast test is conducted with standard silicon solar cells under outdoor natural light. The maximum error is 1.2%, the minimum error is 0.2%, and the average error is 0.4%.

Key words: total solar radiometer; silicon solar cell packaging; temperature correction; sampling resistance

0 引言

太阳总辐射计是一种重要的地面气象观测仪器,也是太阳能资源普查与光伏电站监控领域不可缺少的设备。太阳总辐射计按原理分为光电型和热电型两大类:前者是利用光电效应将光信号转换成电信号;后者则是用太阳辐射热吸收系数的不同而造成热电堆冷、热端点的温差而形成电势差,从而形成与太阳辐照度成正比的电信号。

在光伏组件的现场 $I-V$ 测试中,常采用热电

堆太阳总辐射计来测量太阳辐射强度,现场太阳光参数的准确检测是影响测量精度的关键因素^[1-2]。因天气、环境等自然因素而强弱不同的太阳光,存在较明显的光谱差异,硅太阳电池对不同波长光的量子效率也存在一定的差异,而热电堆太阳总辐射计的良好线性光谱响应使其无法区别这种光谱的差异性,因此会产生光谱失配问题^[3-4]。在评估光伏组件功率衰减的测量中,使用与被测光伏组件相同光谱响应特性的硅太阳电池总辐射计,可以消除光谱失配影响,解决现场自然光测试的光谱失配问

收稿日期:2022-05-04;修订日期:2022-11-15; * 通信联系人, E-mail: huangjing571@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(11604279)河南省科技计划项目(212102210629);河南省高等学校重点科研项目(21A430033);信阳师范学院青年科研基金项目(2020-QN-045)

作者简介:黄静(1988—),女,河南信阳人,实验师,硕士,主要从事光伏电站检测及系统效率提升和系统优化设计研究。

题,这是硅基太阳总辐射计相对于热电堆太阳总辐射计的一个显著应用优势。

文献[4]设计了一种具有温度修正功能的太阳辐照度计,所采用的硅太阳电池焊接在大面积铜箔上,用于测试铜箔温度的热敏电阻则置于硅电池同一面,适用于户外短期测试,但长期户外测试可能会导致硅电池及热敏电阻的快速老化。为满足光伏电站中太阳辐射强度的准确长期监测需求,设计了一种可长期户外使用、带有温度修正功能、具备RS485通信功能的硅基太阳总辐射计。

1 硅基太阳总辐射计整体设计方案

图1为硅基太阳总辐射计主体结构,包括金属外壳、传感器和太阳辐射测试电路板。该装置的结构设计满足以下两点:1)密封性,金属外壳各部件连接配置有密封圈,传感器模块与金属外壳连接配置有耐光热和防水的密封胶,传感器的封装有较好的密封性,确保该装置长期适用于户外暴晒、风吹雨淋等自然条件;2)通信功能,光伏系统监控平台或光伏逆变器可直接读取该装置的太阳辐射数据。

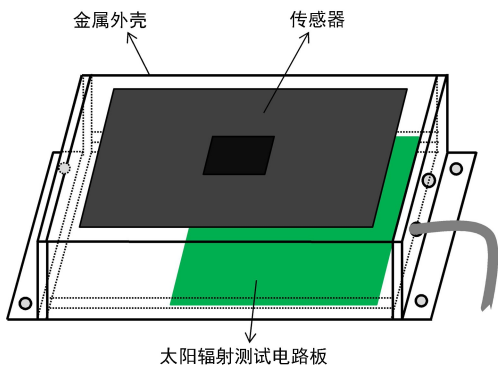


图1 硅基太阳总辐射计主体结构图

Fig. 1 Main structure diagram of silicon based solar total radiometer

1.1 传感器选择

晶硅太阳电池具有很好的抗衰减性,且输出短路电流与辐照度的线性度较好,是硅基太阳总辐射计的最佳传感部件。而选择与被测电池类型一致的硅太阳电池作为传感器,则具备与被测电池相近的光谱响应特性,可以消除光谱失配影响,真实反映被测电池表面所吸收的太阳辐射。选择表面颜色均匀的电池,裁切成合适的尺寸,裁切时保留电池片正面主栅线,用于引出正负电极。

1.2 传感器封装

为保证入射光线全部覆盖硅太阳电池片,视角应大于 160° ,并且传感器视角范围内封装表面具

有不反射特性^[5]。硅太阳电池封装如图2所示,与光伏组件封装工艺相同,测温热敏电阻通过有机硅胶贴置于电池中心处的背板表面,用于测试电池实际工作温度。

选取硅太阳电池尺寸为 $27\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 180\text{ }\mu\text{m}$,透明玻璃尺寸为 $12\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 3.2\text{ mm}$,电池片距离玻璃表面约 4 mm ,电池片中心置于透明玻璃中心,电池片边缘距离玻璃边缘约 4.65 cm 和 3.25 cm ,计算视角为 170.2° 和 170.0° ,如图3所示,满足视角要求。

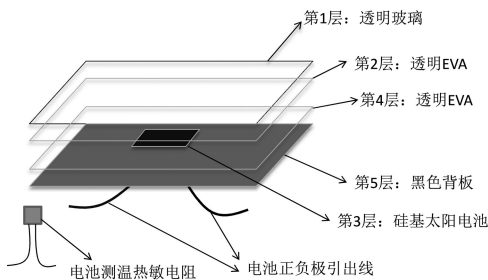


图2 传感器封装

Fig. 2 Sensor package

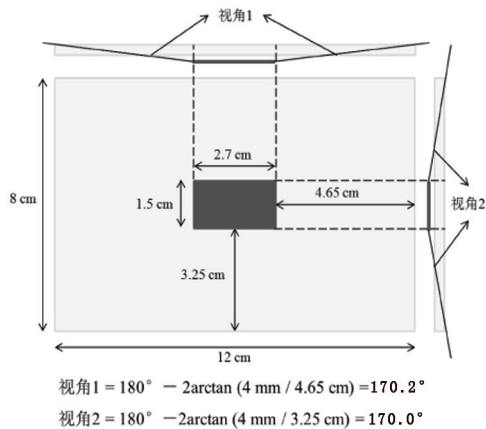


图3 视角计算

Fig. 3 Visual angle calculation

1.3 传感器标定

封装好的硅太阳电池(简称:硅太阳组件)首先进行紫外老化筛选,选择无EL缺陷、稳定性好的组件进行标定,采用稳态太阳模拟器 XEF-300 对硅太阳组件进行标定。硅太阳组件的标定直接决定了太阳总辐射计测量结果的准确度,作为标定基准的参考标准电池也应采用同种类晶硅电池,避免标定时因电池光谱响应波段不一致造成误差。

硅太阳组件输出短路电流与辐照度呈线性关系,定义标定值(即线性系数):

$$CV = I_{sc} / E = I_{sc} / 1\ 000, \quad (1)$$

其中: I_{sc} 为硅太阳组件在标准测试条件下的短路电流; E 为标准光强。标准测试条件:温度为

25 °C ± 2 °C, 光照强度为 1 000 W/m², 太阳光谱为 AM1.5。

将实际测得的短路电流加入温度修正^[6]:

$$I_{SCTC} = I_{SCT} + \alpha \times I_{SC} \times (25 - T), \quad (2)$$

其中: I_{SCTC} 为温度修正后的短路电流值; I_{SCT} 为实际温度下测试的短路电流值; α 为硅太阳电池电流温度系数; T 为硅太阳组件实际工作温度。

实际测量的太阳辐照度值:

$$E_1 = I_{SCTC} / CV. \quad (3)$$

2 硬件电路设计

太阳辐射测试电路的系统结构框图如图 4 所示。硅太阳组件正负极引出线通过串接合适的取样电阻, 将组件的短路电流转换为微弱电压信号, 微弱电压信号通过差分放大电路放大, 放大的电压信号经过滤波电路消除同时被放大的噪声信号, 滤波后的放大电压信号被送入单片机 AD 接口。测温热敏电阻接入温度采集电路, 温度采集电路将组件工作温度转换成电压信号, 送入单片机 AD 接口。单片机换算出辐照度值, 并通过 RS485 电路输出。此外, 硬件电路通过外部供电引出端接入 DC 9~30 V, 通过 DC-DC 电路变换成各个电路所需的供电电压。

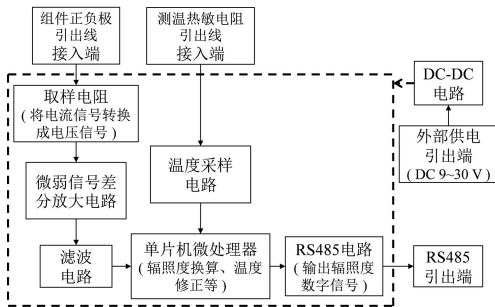


图 4 系统硬件电路结构框图

Fig. 4 System hardware circuit block diagram

2.1 取样电阻选择

硅太阳组件短路电流的测量采用取样电阻法, 通过测量取样电阻两端的电压间接地得到短路电流。取样电阻的取值需保证整个太阳辐射范围内组件均工作在线性恒流区, 且保证硅太阳组件近似工作于短路电流状态。

取样电阻的预设电阻值 R 的取值范围^[7]为:

$$R < 0.03(U_{oc} / I_{sc}), \quad (4)$$

其中: U_{oc} 为标准条件下硅太阳组件的开路电压, I_{sc} 为标准条件下硅太阳组件的短路电流。

一块电池面积 27 mm × 15 mm 的硅太阳组件, 其标准条件下的 $I-V$ 曲线如图 5 所示, 短路电流 $I_{sc} = 130.6$ mA, 开路电压 $V_{oc} = 0.62$ V。根据公式(4)可得到取样电阻 R 取值范围: $R < 0.14 \Omega$, 如图 5 灰色区域所示。

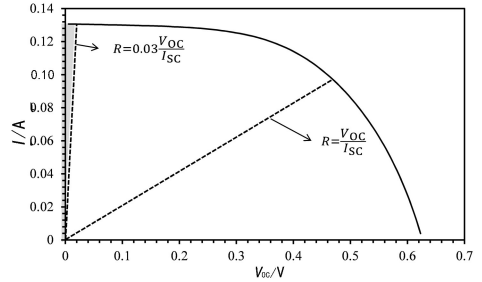


图 5 取样电阻取值范围

Fig. 5 Sampling resistance value range

为更形象地描述不同规格 R 值对硅太阳组件实际工作电流的影响, 利用 MC-LED-VIS 全光谱 LED 光源系统模拟标准光强 1 000 W/m², R 分别取 0.1、0.2 和 0.3 Ω 时, 测试硅太阳组件流过取样电阻的短路电流 I_{SCT} 以及组件工作温度 T , 并依据公式(2)来修正短路电流 I_{SCT} , 修正后的短路电流 I_{SCTC} 以及相比于标准短路电流 I_{sc} 的偏差见表 1。

表 1 3 种不同 R 值对应的电流及误差

Tab. 1 Current and error corresponding to three different R values

| R 取值/ Ω | 辐照度 H / ($W \cdot m^{-2}$) | 温度修正后的短路电流 I_{SCTC} / mA | 标准短路电流 I_{sc} / mA | 偏差 / % |
|------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------|--------|
| 0.1 | 1 000 | 130.45 | 130.6 | -0.11 |
| 0.2 | 1 000 | 130.12 | 130.6 | -0.37 |
| 0.3 | 1 000 | 130.05 | 130.6 | -0.42 |

在标准光强 1 000 W/m² 条件下, 3 种不同规格 R 值时, 温度修正后的短路电流 I_{SCTC} 相比于标准条件下的短路电流 I_{sc} 都有所下降。 $R = 0.1 \Omega$ 时, I_{SCTC} 下降 0.11%; $R = 0.2 \Omega$ 时, I_{SCTC} 下降 0.37%; $R = 0.3 \Omega$ 时, I_{SCTC} 下降 0.42%。所以相对于 $R = 0.1 \Omega$, 硅太阳组件的工作电流更接近于短路电流。3 种不同规格 R 值对应的辐照度测试数据见表 2。

表 2 3 种不同 R 值对应的辐照度测试数据

Tab. 2 Irradiance test data corresponding to three different R values

| 辐照度标准值 / ($W \cdot m^{-2}$) | 辐照度测试值 / ($W \cdot m^{-2}$) | | |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|
| | $R = 0.1 \Omega$ | $R = 0.2 \Omega$ | $R = 0.3 \Omega$ |
| 1 200 | 1 196.5 | 1 195.7 | 1 195.5 |
| 1 000 | 998.9 | 996.3 | 995.8 |
| 800 | 798.6 | 798.6 | 792.1 |
| 600 | 601.5 | 600.5 | 600.9 |
| 400 | 399.2 | 399.5 | 400.2 |
| 20 | 200.0 | 200.8 | 201.7 |

由表 2 知, $R=0.1 \Omega$ 对应的辐照度测试数据更贴近于标准值。需要注意:在满足取样电阻的取值范围内,应尽可能选取最大的电阻值规格,以提高取样电压等级,便于测量及提高测量精度,同时降低后级信号放大电路的设计难度及成本。

2.2 微弱信号差分放大

取样电阻将硅太阳组件 μA 、 mA 级的短路电流转换成 μV 、 mV 级的电压信号,不易直接进行观测,也不易被单片机进行采集和处理,必须通过电压放大电路进行信号放大预处理,使之满足单片机 AD 接口所要求的电压范围。

图 6 为微弱电压信号放大电路,其结构上下对称,即 $R_1=R_3=40 \text{ k}\Omega$, $R_2=R_4=40 \text{ k}\Omega$, $R_5=R_6=25 \text{ k}\Omega$,通过调节 R_G 可以改变放大器的闭环增益,运算放大器 U_1 、 U_2 和 U_3 使用相同的运算放大器,最后输出电压为

$$V_{\text{out}} = (V_{\text{in1}} - V_{\text{in2}}) \left(1 + \frac{2R_5}{R_G} \right) \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

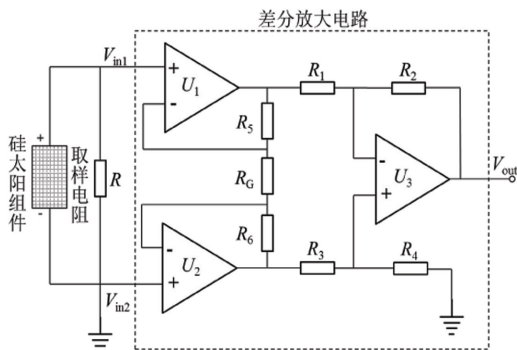


图 6 差分放大电路

Fig. 6 Differential amplifier circuit

整个放大电路具有很好的共模抑制能力,具有很小的输入失调电压以及较高的差模电压增益。选择的放大倍数为 50 倍,设计辐照度测试量程为 $0 \sim 1\,500 \text{ W/m}^2$,硅太阳组件短路电流输出范围为 $0 \sim 500 \text{ mA}$,取样电压范围为 $0 \sim 50 \text{ mV}$,放大后的电压范围 $0 \sim 2.5 \text{ V}$ 。

2.3 滤波电路

微弱电压信号被差分放大电路放大的同时,其中的噪声信号也会随之被放大,为了提高辐照度测试数据的准确性,放大的电压信号需要经滤波处理。由于硅太阳组件输出的是直流信号,且其电压、电流随着太阳辐射强度或温度变化以较低频率发生改变,所以选择二阶低通滤波器作为滤波电路,如图 7 所示。

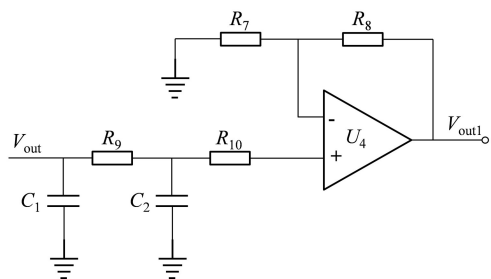


图 7 二阶低通滤波电路

Fig. 7 Second-order low-pass filter circuit

图 7 中, $R_7=R_8=10 \text{ k}\Omega$, $R_9=R_{10}=24 \text{ k}\Omega$, $C_1=C_2=33 \text{ nF}$,滤波器的截止频率可以通过公式(6)计算:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{RC} = \frac{1}{R_9 C_1} \quad (6)$$

滤波器信号截止频率约为 200 Hz 。

3 测试与分析

为验证所设计硅基太阳总辐射计测试的可靠性及准确性,采用标准硅太阳电池来标定户外自然光下的太阳辐照度。将硅基太阳总辐射计与标准硅太阳电池(柯尼卡美能达 AK-200)放置于户外同一平面,尽量保证入射光线垂直于电池片表面,且四周无遮挡,如图 8 所示。测试之前,总辐射计与标准电池需放置户外一段时间,让两者的电池温度基本稳定。



图 8 户外辐照度测试

Fig. 8 Outdoor irradiance testing

总辐射计可通过采集显示屏进行自动记录辐照度数据,标准电池通过六位半高精度源表(吉时利 2450)进行短路电流测试,两者同时记录数据,测试数据见表 3。根据公式(1)~(3),标准电池的短路电流通过使用硅基总辐射计的电池温度进行简单换算,得到标准辐照度值。硅基太阳总辐射计

测得的辐照度值与标准值最大偏差为1.2%，最小(148.4 W/m²)下的偏差为0.6%，说明所设计的硅基太阳总辐射计具有较好的测试结果。

表3 户外辐照度测试数据

Tab. 3 Outdoor irradiance test data

| 测试时间 | 总辐射计电池温度 / °C | 总辐射计测试值 / (W · m ⁻²) | 标准电池短路电流 / mA | 换算的标准辐照度值 / (W · m ⁻²) | 偏差 / % | 平均偏差 / % |
|---------------------|---------------|----------------------------------|---------------|------------------------------------|--------|----------|
| 12:56:26 | 55.96 | 1 038.4 | 131.5 | 1 043.0 | -0.4 | |
| 14:01:39 | 53.27 | 933.1 | 117.9 | 935.1 | -0.2 | |
| 14:45:29 | 49.31 | 817.6 | 103.4 | 820.4 | -0.3 | |
| 15:02:29 | 49.85 | 763.8 | 96.1 | 761.3 | 0.3 | |
| 15:38:43 | 47.36 | 628.5 | 79.1 | 625.7 | 0.4 | |
| 2022-05-02 16:03:27 | 42.91 | 531.7 | 66.7 | 528.1 | 0.7 | 0.4 |
| 16:30:40 | 39.13 | 417.5 | 52.1 | 412.4 | 1.2 | |
| 16:50:25 | 37.17 | 331.7 | 41.8 | 330.5 | 0.4 | |
| 17:08:47 | 34.06 | 254.8 | 31.9 | 252.3 | 1.0 | |
| 17:36:40 | 30.93 | 149.3 | 18.8 | 148.4 | 0.6 | |

5 结论

针对光伏电站中太阳辐射强度的准确长期监测,设计了一种户外用硅基太阳总辐射计。通过传感器的选择、封装、标定,再到硬件电路的设计,最后与标准硅太阳电池进行户外辐照度对比测试,表

明所设计的硅基太阳总辐射计具备可行性,且偏差小于1.2%,具有较好的测试效果,满足光伏电站高精度测试要求。所设计的户外用硅基太阳总辐射计适用于光伏组件功率衰减评估、光伏系统效率评估、光伏系统数据监控等方面,为光伏电站现场辐照度的准确测试提供了新的选择。

参考文献:

- [1] 张栋莉, 杨万均, 崔兵兵, 等. 一种野外环境太阳辐射测量仪的信号处理方法[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(3): 34-40.
ZHANG Dongli, YANG Wanjun, CUI Bingbing, et al. A signal processing method for field solar radiation measuring instrument[J]. Metrology Science and Technology, 2022, 66(3): 34-40.
- [2] 胡金龙, 盛翔. 一种太阳辐照度计的设计[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2019, 18(2): 29-32.
HU Jinlong, SHENG Xiang. Design of solar irradiation meter [J]. Journal of Anhui Vocational College of Electronics & Information Technology, 2019, 18(2): 29-32.
- [3] 蔡一凡, 张臻, 刘升, 等. 便携式智能太阳辐照传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2015(6): 17-19.
CAI Yifan, ZHANG Zhen, LIU Sheng, et al. Research of portable solar radiation sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(6): 17-19.
- [4] 韩国华, 朱文星, 朱炬. 具有温度修正功能的太阳辐照度计设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015(3): 103-106.
HAN Guohua, ZHU Wenxing, ZHU Ju. The design of solar irradiance detector with temperature correction[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2015(3): 103-106.
- [5] 国家技术监督局. 光伏器件 第2部分: 标准太阳电池的要求(GB/T 6495.2—1996)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Photovoltaic devices Part 2: Requirements for reference solar cells(GB/T 6495.2—1996)[S]. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- [6] 国家技术监督局. 晶体硅光伏度器件的 I-V 实测特性的温度和辐照度修正方法(GB/T 6495.4—1996)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices(GB/T 6495.4—1996)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [7] IEC. Photovoltaic devices (Part 2): Requirements for photovoltaic reference devices(IEC 60904—2: 2015)[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2015.

责任编辑:任长江