

JJF (闽) 1162—2025



福建省地方计量技术规范

JJF (闽) 1162—2025

双面太阳能电池电流 – 电压特性校准规范

Calibration Specification for Current – Voltage

Characteristics of Bifacial Solar Cell

2025 – 08 – 11 发布

2025 – 11 – 11 实施

福建省市场监督管理局 发布

双面太阳电池电流—电压特性校准规范

Calibration Specification for Current —
Voltage Characteristics of Bifacial Solar Cell

JJF (闽) 1162—2025

归口单位：福建省市场监督管理局

主要起草单位：福建省计量科学研究院

参加起草单位：福州大学

福建江夏学院

本规范委托福建省计量规范技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

黎健生（福建省计量科学研究院）

康 艳（福建省计量科学研究院）

陈彩云（福建省计量科学研究院）

参加起草人：

魏明灯（福州大学）

邱 羽（福建江夏学院）

福建省计量规范技术委员会

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(2)
5 计量特性	(2)
5.1 短路电流	(2)
5.2 开路电压	(2)
5.3 最大功率	(2)
5.4 转换效率	(2)
5.5 填充因子	(2)
5.6 双面率	(2)
6 校准条件	(3)
6.1 校准环境条件	(3)
6.2 标准器及配套设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(3)
8 校准结果表达	(5)
9 复校时间间隔	(6)
附录 A 双面太阳电池电流 – 电压特性校准记录 (式样)	(7)
附录 B 双面太阳电池电流 – 电压特性校准证书内页格式 (式样)	(9)
附录 C 校准不确定度评定示例	(10)

引 言

本规范依据 JJF1001《通用计量术语及定义》和 JJF1071《国家计量校准规范编写规则》编制，并按照 JJF1059.1《测量不确定度评定与表示》构成基础性的要求。

本规范为首次制定。

福建省计量规范技术委员会

双面太阳电池电流——电压特性校准规范

1 范围

本规范适用于双面太阳电池电流——电压特性的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1622—2017 太阳电池校准规范：光电性能

IEC 60904-1：2020 光伏器件 – 第 1 部分：光伏电流 – 电压特性测量

IEC 60904-1-2：2019 光伏器件 – 第 1-2 部分：双面光伏器件电流 – 电压特性测量方法

IEC 60904-9：2020 光伏器件 – 第 9 部分：太阳模拟器特性分级

IEC TS 63202-3:2023 光伏电池 – 第 3 部分：双面光伏电池电流 – 电压特性测量

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语

3.1 双面太阳电池 bifacial solar cell

正面与背面均能发电的太阳电池。

3.2 双面率 bifaciality (BiFi)

双面太阳电池背面与正面分别在标准测试条件下测得的短路电流、开路电压及最大功率的比值。

3.3 正面 front side

依制造厂商设计的光伏器件朝向太阳的一面。

3.4 背面 rear side

依制造厂商设计的光伏器件远离太阳的一面。

3.5 标准测试条件 standard test condition (STC)

总辐照度为 1000 W/m^2 ，具有 AM1.5G 的太阳光谱辐照度分布，电池结温 25°C 。

3.6 短路电流 short-circuit current

在一定的温度和辐照度条件下，太阳电池在端电压为零时的输出电流，通常用 I_{sc} 来表示。

3.7 开路电压 open-circuit voltage

在一定的温度和辐照条件下, 太阳能电池在空载 (开路) 情况下的端电压。

3.8 最大功率 maximum power

在太阳能电池的伏安特性曲线上, 电流电压乘积的最大值。

3.9 转换效率 conversion efficiency

指受光照太阳能电池正面 (背面) 的最大功率与入射到该太阳能电池上的全部辐射功率的百分比。

3.10 填充因子 fill factor

指太阳能电池的最大功率与开路电压和短路电流乘积之比。

4 概述

双面太阳能电池的正背面能同时接受光辐照实现光电转换获得较高的发电功率, 已广泛应用于各种光伏发电场景。当光子撞击到太阳能电池的表面时, 如果能量足够大, 就可以将电子从原子中激发出来, 形成自由电子和空穴对。在电池内部的电场作用下, 电子和空穴会向相反方向移动, 从而产生电流。由于双面太阳能电池的正背面可以同时接收光辐照, 因此能够在相同的安装面积内提供更多的电能输出。双面太阳能电池的结构通常包括硅基底、发射极、背场、减反射涂层、透明导电氧化物层、金属接触网格、钝化层及边缘隔离等。

5 计量特性

5.1 短路电流 I_{sc}

一般范围: 0.1 A ~ 20 A。

5.2 开路电压 V_{oc}

一般范围: 0.1 V ~ 5 V。

5.3 最大功率 P_m

一般范围: 0.01 W ~ 50 W。

5.4 转换效率 η

一般范围: 10% ~ 40%。

5.5 填充因子 FF

一般范围: 50% ~ 90%。

5.6 双面率 BiFi

包含短路电流双面率 $\psi(I_{sc})$, 开路电压双面率 $\psi(V_{oc})$ 及最大功率双面率 $\psi(P_m)$ 。一般范围: 20% ~ 100%。

注: 以上指标不是用于合格性判别, 仅供参考。

6 校准条件

6.1 校准环境条件

校准时环境条件应满足：温度 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，湿度 $\leq 80\%\text{RH}$ 。

6.2 标准器及配套设备

6.2.1 太阳模拟器：采用 A 级或更优太阳模拟器光源；

6.2.2 宜采用与被测电池具备相近光谱响应的标准电池，否则应做光谱失配修正，短路电流校准不确定度不大于 $1.5\% (k=2)$ ；

6.2.3 I-V 曲线测试仪：用于采集在太阳模拟器的辐射下太阳电池所产生的信号， I_{sc} 、 V_{oc} 的最大允许误差应不超过 $\pm 0.2\%$ ；

6.2.4 影像测量仪：最大允许误差应为 $\pm (2.5+L/300) \mu\text{m}$ ，其中 L 为边长测量值。

6.2.5 温控设备：被测太阳电池表面温控为 $(25.0 \pm 2.0)^\circ\text{C}$ ，均匀度为 2.0°C ，波动度为 $\pm 2.0^\circ\text{C}$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准前准备

确认标准器及配套设备满足 6.2 条件后再开始校准。

双面太阳电池的电流 - 电压特性的测量条件需要特别注意其测量结果更容易因测量条件偏离参考条件而受到影响。例如，被校准双面太阳电池背面的反射会显著增加测量不确定度。正确选择测量条件可避免或最小化应用于测量电流 - 电压特性的修正幅度。

7.2 校准前检查

7.2.1 核对被校准双面太阳电池的名称、规格型号及编号等。

7.2.2 检查被校准双面太阳电池的表面有无裂纹、斑点或划痕等影响测量结果的缺陷。如有条件，校准前宜对电池进行光致发光缺陷检测。

7.3 短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、最大功率 P_m 的测量

将标准太阳电池放在测试平台上，使其有效受光面法线与太阳模拟器光束的中心线平行，偏差小于 $\pm 5^\circ$ ，温度维持在 $(25.0 \pm 2.0)^\circ\text{C}$ 。根据标准太阳电池的短路电流校准值调整太阳模拟器在测试面上的辐照度为 1000 W/m^2 。

维持太阳模拟器的设置不变，将标准太阳电池替换成被校准双面太阳电池，保证两者受光面的几何中心位置与高度一致；同样地，应确保与标准太阳电池一致的辐照度与温度条件，分别测试双面太阳电池的正面与背面的电流 - 电压特性，测量示意图如图 1 所示。

分别在正、背面重复上述测量 3 次，按式 (1)、(2) 和 (3) 计算短路电流 I_{sc} ，开路电压 V_{oc} 和最大功率 P_m 的算术平均值，以其作为测量结果。

$$\bar{I}_{sc} = \frac{I_{sc1} + I_{sc2} + I_{sc3}}{3} \quad (1)$$

$$\bar{V}_{oc} = \frac{V_{oc1} + V_{oc2} + V_{oc3}}{3} \quad (2)$$

$$\bar{P}_m = \frac{P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}}{3} \quad (3)$$

式中:

$\bar{I}_{sc}$ —— 短路电流的算术平均值, A;

$I_{sc1}, I_{sc2}, I_{sc3}$ —— 分别为重复测量三次的短路电流值, A;

$\bar{V}_{oc}$ —— 开路电压的算术平均值, V;

$V_{oc1}, V_{oc2}, V_{oc3}$ —— 分别为重复测量三次的开路电压值, V;

$\bar{P}_m$ —— 最大功率的算术平均值, W;

P_{m1}, P_{m2}, P_{m3} —— 分别为重复测量三次的最大功率值, W。

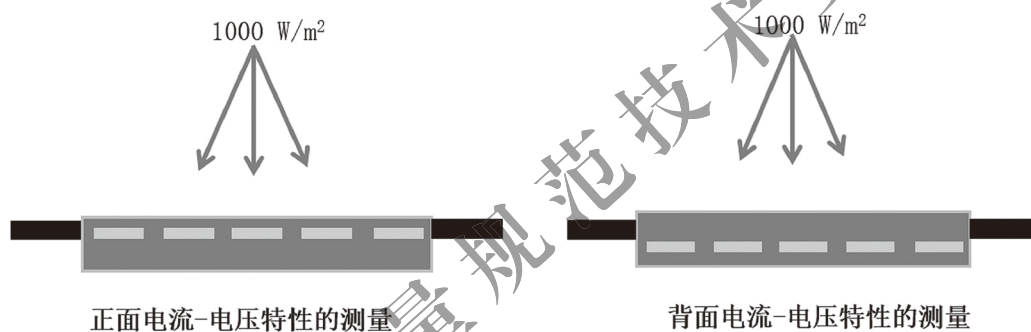


图 1 双面太阳能电池正面与背面的电流 - 电压特性测量

7.4 转换效率 η 的计算

用影像测量仪测量双面太阳能电池的面积 A 。按式 (4) 计算转换效率 η 。

$$\eta = \frac{P_m}{G \times A} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

η —— 转换效率;

P_m —— 最大功率, W;

G —— 单位面积入射光功率, W/m^2 ;

A —— 面积, m^2 。

7.5 填充因子 FF 的计算

根据 7.3 的测得结果, 按式 (5) 计算填充因子 FF 。

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

FF —— 填充因子;

P_m —— 最大功率, W;

I_{sc} —— 短路电流, A;

V_{oc} —— 开路电压, V。

7.6 双面率 BiFi 的计算

根据 7.3 测得的数据, 按式 (6)、式 (7) 和式 (8) 分别计算双面太阳电池的短路电流双面率、开路电压双面率及最大功率双面率。

$$\psi(I_{sc}) = \frac{I_{sc, rear}}{I_{sc, front}} \times 100\% \quad (6)$$

$$\psi(V_{oc}) = \frac{V_{oc, rear}}{V_{oc, front}} \times 100\% \quad (7)$$

$$\psi(P_m) = \frac{P_{m, rear}}{P_{m, front}} \times 100\% \quad (8)$$

式中:

$\psi(I_{sc})$ —— 短路电流双面率;

$I_{sc, rear}$ —— 双面太阳电池背面产生的短路电流, A;

$I_{sc, front}$ —— 双面太阳电池正面产生的短路电流, A;

$\psi(V_{oc})$ —— 开路电压双面率;

$V_{oc, rear}$ —— 双面太阳电池背面产生的开路电压, V;

$V_{oc, front}$ —— 双面太阳电池正面产生的开路电压, V;

$\psi(p_m)$ —— 最大功率双面率;

$p_{m, rear}$ —— 双面太阳电池背面产生的最大功率, W;

$p_{m, front}$ —— 双面太阳电池正面产生的最大功率, W。

8 校准结果表达

根据校准结果, 出具校准证书, 所有校准项目及其结果均应在证书中反映。校准证书应包含以下信息内容:

- a) 标题: “校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点 (如果与实验室的地址不同);
- d) 证书的唯一性标识 (如编号), 每页及总页数的标识;
- e) 客户的名称以及地址;
- f) 被校对象的描述和明确标识;
- g) 进行校准的日期, 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应说明被校对象的接受日期;
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应对被校样品的抽样程序进行说明;
- i) 校准所依据的技术规范的标识, 包括名称及代号;
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;

- k) 校准环境的描述;
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象的有效性说明;
- p) 未经实验室书面批准,不得部分复制证书或报告的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔建议不超过 12 月。

附录 A

双面太阳电池电流——电压特性校准记录（式样）

						记录编号	
送校信息							
送校单位				送校单位地址			
名 称				编 号			
型号规格				制 造 厂			
校准使用设备							
标准器	名 称	规格型号	编号	校准范围	不确定度或准确度等级或最大允许误差	证书编号	有效期至
技术依据							
校准地点				环境温度		环境湿度	
校准条件							
校准结果：							
双面太阳电池电流－电压特性校准参数如下：							
	测量次数	短路电流 I_{sc} （A）	开路电压 V_{oc} （V）	填充因子 FF （%）	转换效率 η （%）	最大功率 P_m （W）	面 积 A （cm ² ）
正 面	1						
	2						
	3						
	均值						
背 面	1						
	2						
	3						
	均值						
说明：							
校 准 员				核 验 员			
校准日期				核验日期			

双面太阳电池电流－电压特性校准记录（续页）（式样）

		记录编号									
校准结果：											
<table border="1"><tr><td colspan="2">双面率 BiFi（%）</td></tr><tr><td>$\psi（I_{sc}）$</td><td></td></tr><tr><td>$\psi（V_{oc}）$</td><td></td></tr><tr><td>$\psi（P_m）$</td><td></td></tr></table>				双面率 BiFi（%）		$\psi（I_{sc}）$		$\psi（V_{oc}）$		$\psi（P_m）$	
双面率 BiFi（%）											
$\psi（I_{sc}）$											
$\psi（V_{oc}）$											
$\psi（P_m）$											
不确定度：											
$I_{sc}：U_{rel} = \underline{\hspace{2cm}}，（k = 2）；$											
$V_{oc}：U_{rel} = \underline{\hspace{2cm}}，（k = 2）；$											
$P_m：U_{rel} = \underline{\hspace{2cm}}，（k = 2）；$											
$\eta：U_{rel} = \underline{\hspace{2cm}}，（k=2）。$											

附录 B

双面太阳电池电流 – 电压特性校准证书内页格式（式样）

校准结果

双面太阳电池电流 – 电压特性校准参数如下：

	短路电流 I_{sc} (A)	开路电压 V_{oc} (V)	填充因子 FF (%)	转换效率 η (%)	最大功率 P_m (W)
正 面					
背 面					

双面率 BiFi (%)	
$\psi(I_{sc})$	
$\psi(V_{oc})$	
$\psi(P_m)$	

不确定度：

I_{sc} : $U_{rel} =$ _____, ($k = 2$) ;

V_{oc} : $U_{rel} =$ _____, ($k = 2$) ;

P_m : $U_{rel} =$ _____, ($k = 2$) ;

η : $U_{rel} =$ _____, ($k=2$) 。

附录 C

校准不确定度评定示例

根据本校准规范的各项计量特性、校准条件、校准项目和校准方法的规定,对双面太阳能电池进行了校准。以下针对短路电流 (I_{sc})、开路电压 (V_{oc})、最大功率 (P_m)、转换效率 (η) 关键参数校准结果的不确定度逐一进行评定分析。

C.1 双面太阳能电池短路电流校准不确定度的评定

C.1.1 测量模型

$$\bar{I}_{sc} = \frac{I_{sc1} + I_{sc2} + I_{sc3}}{3} \quad (C1)$$

式中:

$I_{sc1}, I_{sc2}, I_{sc3}$ —— 分别为 3 次测得的太阳能电池短路电流值, A;

$\bar{I}_{sc}$ —— 被测太阳能电池短路电流值的算术平均值, A。

C.1.2 标准不确定度分量的评定

C.1.2.1 双面太阳能电池短路电流测量重复性引起的标准不确定度分量 $u(I_{sc1})$

表 C1 双面太阳能电池短路电流测量重复性

	测 量 次 数										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
短路电流 (A)	13.76	13.75	13.75	13.76	13.75	13.77	13.75	13.77	13.76	13.76	13.76

则单次测量结果的实验标准偏差为:

$$s(I_{sc}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (I_{sci} - \bar{I}_{sc})^2}{10-1}} \approx 0.008A \quad (C2)$$

测量时采用 3 次测量数值的平均值作为测量结果,因此,由重复性引入的标准不确定度分量 $u(I_{sc1})$ 为:

$$u(I_{sc1}) = \frac{s(I_{sc})}{\sqrt{3}} = 0.005 A \quad (C3)$$

C.1.2.2 参考太阳能电池的短路电流引起的标准不确定度分量 $u(I_{sc2})$

参考太阳能电池的短路电流校准结果的相对扩展不确定度为 $U_{rel}(Ref)=0.7\%$ ($k=2$)。校准时直接采用参考太阳能电池的短路电流来作为太阳模拟器辐照度的调整参考,因此,由于参考太阳能电池的短路电流引起的标准不确定度分量 $u(I_{sc2})$ 为:

$$u(I_{sc2}) = \frac{U_{rel}(Ref)}{k} \times \bar{I}_{sc} = 0.048 A \quad (C4)$$

C.1.2.3 太阳模拟器光源稳定性引起的标准不确定分量 $u(I_{SC3})$

由于采用参考太阳电池进行太阳模拟器辐照度校准与使用太阳模拟器进行被测太阳电池短路电流测量不是同时进行的, 需要考虑太阳模拟器光源稳定性引起的测量误差。

校准报告中太阳模拟器光源 10 分钟的稳定性为 0.15%, 按均匀分布考虑, 取 $k=\sqrt{3}$, 则:

$$u(I_{SC3}) = \frac{0.15\%}{k} \times I_{SC} = 0.012 \text{ A} \quad (\text{C5})$$

C.1.2.4 光谱失配引起的标准不确定度分量 $u(I_{SC4})$

查校准报告, 太阳模拟器的光谱匹配度不超过 8%, 在此基础上即便是参考电池和被校准电池的材料完全不一样, 光谱失配因子 (MMF) 引起的短路电流相对扩展不确定度不超过 $U_{rel}(MMF)=0.1\%$ 。

针对目前被测的晶体硅太阳电池, 由于光谱失配引起的标准不确定度分量 $u(I_4)$ 为:

$$u(I_{SC4}) = \frac{U_{rel}(MMF)}{k} \times I_{SC} = 0.007 \text{ A} \quad (\text{C6})$$

C.1.2.5 参考电池和被测电池之间面积差异和模拟器辐照度不均匀性引起的标准不确定度分量 $u(I_{SC5})$

参考太阳电池尺寸通常为 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$, 被测电池通常为 $156\text{mm} \times 156\text{mm}$ 及以上尺寸。两者存在面积差异。查校准报告, 对于太阳模拟器辐照度不均匀性 $u_{rel}(\text{Uni})$ 在有效辐照面下不超过 1%。因此由于电池面积的差异以及辐照度不均匀性, 按均匀分布考虑, 取 $k=\sqrt{3}$, 则:

$$u(I_{SC5}) = \frac{U_{rel}(\text{Uni})}{k} \times I_{SC} = 0.079 \text{ A} \quad (\text{C7})$$

C.1.2.6 测试平台温度引起的标准不确定度分量 $u(I_{SC6})$

短路电流的温度系数 $K(I_{sc})$ 一般不超过 $0.06\%/^{\circ}\text{C}$, 要求测试平台温度需要控制在 $25.0^{\circ}\text{C} \pm 2.0^{\circ}\text{C}$, 但实际在测试的持续辐照过程中, 温度会有不同程度的上升, 假设温升的最大幅度按 2°C 算, 按均匀分布考虑, 取 $k=\sqrt{3}$, 则:

$$u(I_{SC6}) = \frac{K(I_{sc}) \times 2}{k} \times I_{SC} = 0.01 \text{ A} \quad (\text{C8})$$

C.1.2.7 电流测量电路非线性引起的标准不确定度分量 $u(I_{SC7})$

参考太阳电池短路电流通常为 140mA, 采用 200mA 量程档。而晶体硅太阳电池短路电流通常为 (10 ~ 15) A, 采用 20A 档。则由于电流测量电路非线性 $u_{rel}(\text{Linear})$ 引起的误差为 0.05%, 按均匀分布考虑, 取 $k=\sqrt{3}$, 则:

$$u(I_{SC7}) = \frac{U_{rel}(\text{Linear})}{k} \times I_{SC} = 0.004 \text{ A} \quad (\text{C9})$$

短路电流测量的标准不确定度分量汇总见表 C2:

表 C2 短路电流测量的标准不确定度分量汇总表

序号	测量不确定度来源	标准不确定度符号	数值 (A)
1	太阳电池短路电流测量重复性	$u(I_{SC1})$	0.005
2	参考太阳电池的短路电流	$u(I_{SC2})$	0.048
3	太阳模拟器光源稳定性	$u(I_{SC3})$	0.012
4	光谱失配	$u(I_{SC4})$	0.007
5	参考电池和被测电池之间面积差异和 模拟器辐照度不均匀性	$u(I_{SC5})$	0.079
6	测试平台温度	$u(I_{SC6})$	0.01
7	电流测量电路非线性	$u(I_{SC7})$	0.004

C.1.3 合成标准不确定度

由于各影响量彼此独立不相关, 因此短路电流测量结果的合成标准不确定度 $u_c(I_{SC})$ 为:

$$u_c(I_{SC}) = \sqrt{u(I_{SC1})^2 + u(I_{SC2})^2 + u(I_{SC3})^2 + u(I_{SC4})^2 + u(I_{SC5})^2 + u(I_{SC6})^2 + u(I_{SC7})^2}$$

$$= 0.095 \text{ A} \quad (\text{C10})$$

C.1.4 相对扩展不确定度

$$U_{rel} = \frac{u_c(I_{SC}) \times k}{I_{SC}} \times 100\% = 1.4\%, \quad k=2 \quad (\text{C11})$$

C.2 双面太阳电池开路电压校准不确定度的评定

C.2.1 测量模型

$$V_{OC} = \frac{V_{OC1} + V_{OC2} + V_{OC3}}{3} \quad (\text{C12})$$

式中:

$V_{OC1}, V_{OC2}, V_{OC3}$ —— 分别为 3 次测得的太阳电池开路电压值, V ;

V_{OC} —— 被测太阳电池开路电压值的算术平均值, V 。

C.2.2 标准不确定度分量的评定

C.2.2.1 双面太阳电池开路电压测量重复性引起的标准不确定度分量 $u(V_{OC1})$

表 C3 双面太阳电池开路电压测量重复性

	测 量 次 数										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
开路 电压 (V)	0.7485	0.7486	0.7483	0.7485	0.7480	0.7479	0.7491	0.7485	0.7488	0.7492	0.7485

则单次测量结果的实验标准偏差为:

$$s(V_{OC}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (V_{OCi} - \bar{V}_{OC})^2}{10-1}} \approx 0.00042 \text{ V} \quad (\text{C13})$$

测量时采用 3 次测量数值的平均值作为测量结果, 因此, 由重复性引入的标准不确定度分量 $u(V_{OC1})$ 为:

$$u(V_{OC1}) = \frac{s(V_{OC})}{\sqrt{3}} = 0.00024 \text{ V} \quad (\text{C14})$$

C.2.2.2 太阳模拟器辐照度引入的标准不确定度分量 $u(V_{OC2})$

太阳模拟器辐照度的调整和校准通常采用参考太阳电池的短路电流来作为参考。由于太阳电池的开路电压主要取决于电池自身的 P-N 结, 在低辐照度条件下, 开路电压基本达到其理论内建电场的稳定值, 受太阳模拟器辐照度值的影响较小。因此, 参考太阳电池的短路电流校准结果引入的相对扩展不确定度为 $U_{rel}(Ref)=0.2\%(k=2)$ 。则由于太阳模拟器辐照度引入的标准不确定度分量 $u(V_{OC2})$ 为:

$$u(V_{OC2}) = \frac{U_{rel}(Ref)}{k} \times \bar{V}_{OC} = 0.00075 \text{ V} \quad (\text{C15})$$

C.2.2.3 测试平台温度引入的标准不确定度分量 $u(V_{OC3})$

测试平台温度需要控制在 $25.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 开路电压的温度系数一般为 $-0.28\%/^{\circ}\text{C} \sim -0.35\%/^{\circ}\text{C}$, 但实际在测试的持续辐照过程中, 温度会有不同程度的上升, 假设温升的最大幅度为 2°C 且温度系数 $K(V_{oc})$ 为 $-0.35\%/^{\circ}\text{C}$, 按均匀分布考虑, 取 $k=\sqrt{3}$ 则:

$$u(V_{OC3}) = \frac{K(V_{OC})}{k} \times \bar{V}_{OC} = 0.00303 \text{ V} \quad (\text{C16})$$

开路电压测量的标准不确定度分量汇总见表 C4:

表 C4 开路电压测量的标准不确定度分量汇总表

序号	测量不确定度来源	标准不确定度符号	数值 (V)
1	太阳电池开路电压测量重复性	$u(V_{OC1})$	0.00024
2	太阳模拟器辐照度	$u(V_{OC2})$	0.00075
3	测试平台温度	$u(V_{OC3})$	0.00303

C.2.3 合成标准不确定度

由于各影响量彼此独立不相关, 因此开路电压测量结果的合成标准不确定度 $u_c(V_{OC})$ 为:

$$u_c(V_{OC}) = \sqrt{u(V_{OC1})^2 + u(V_{OC2})^2 + u(V_{OC3})^2} = 0.00313 \text{ V} \quad (\text{C17})$$

C.2.4 相对扩展不确定度

$$U_{rel} = \frac{u_c(V_{OC}) \times k}{\bar{V}_{OC}} \times 100\% = 1.0\%, k=2 \quad (\text{C18})$$

C.3 双面太阳电池最大功率校准不确定度的评定

C.3.1 测量模型

$$P_m = \frac{P_{m1} + P_{m2} + P_{m3}}{3} \quad (C19)$$

式中：

P_{m1} , P_{m2} , P_{m3} ——分别为 3 次测得的太阳电池最大功率值, W;

P_m ——被测太阳电池最大功率值的算术平均值, W。

C.3.2 标准不确定度分量的评定

C.3.2.1 太阳电池最大功率测量重复性引起的标准不确定度分量 $u(P_{m1})$

表 C5 太阳电池最大功率测量重复性

	测 量 次 数										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
最大功率 (W)	8.835	8.834	8.836	8.835	8.829	8.841	8.837	8.834	8.840	8.836	8.836

则单次测量结果的实验标准偏差为：

$$s(P_m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (P_{mi} - \bar{P}_m)^2}{10-1}} \approx 0.00335 \text{ W} \quad (C20)$$

测量时采用 3 次测量数值的平均值作为测量结果, 因此, 由重复性引入的标准不确定度分量 $u(P_{m1})$ 为:

$$u(P_{m1}) = \frac{s(P_m)}{\sqrt{3}} = 0.00193 \text{ W} \quad (C21)$$

C.3.2.2 太阳模拟器辐照度引入的标准不确定度分量 $u(P_{m2})$

太阳模拟器辐照度的调整和校准通常采用参考太阳电池的短路电流来作为参考。参考太阳电池的短路电流校准结果的相对扩展不确定度为 $U_{rel}(Ref)=0.7\%(k=2)$ 。太阳模拟器的辐照度调整结果应当尽量保证参考太阳电池的短路电流值以及最大功率值与校准证书的数值一致。因此, 由于参考太阳电池的最大功率引起的标准不确定度分量 $u(P_{m2})$ 为:

$$u(P_{m2}) = \frac{U_{rel}(Ref)}{k} \times \bar{P}_m = 0.0309 \text{ W} \quad (C22)$$

C.3.2.3 太阳模拟器光源稳定性引起的标准不确定分量 $u(P_{m3})$

由于采用参考太阳电池进行太阳模拟器辐照度校准与使用太阳模拟器进行被测太阳电池最大功率测量不是同时进行的, 需要考虑太阳模拟器光源稳定性引起的测量误差。校准报告中太阳模拟器光源 10 分钟的稳定性为 0.15%, 按均匀分布考虑, 取 $k=\sqrt{3}$ 则:

$$u(P_{m3}) = \frac{U_{rel}(Light)}{k} \times \bar{P}_m = 0.00765 \text{ W} \quad (C23)$$

C.3.2.4 光谱失配引起的标准不确定度分量 $u(P_{m4})$

查校准报告，太阳模拟器的光谱匹配度不超过 6%，在此基础上即便是参考电池和被校准电池的材料完全不一样，光谱失配因子（MMF）引起的短路电流相对扩展不确定度不超过 $U_{rel}(MMF)=0.5\%$ ($k=2$)。

针对目前被测的晶体硅太阳电池，由于光谱失配引起的标准不确定度分量 $u(P_{m4})$ 为：

$$u(P_{m4}) = \frac{U_{rel}(MMF)}{k} \times \bar{P}_m = 0.0221 \text{ W} \quad (C24)$$

C.3.2.5 参考电池和被测电池之间面积差异和模拟器辐照度不均匀性引起的标准不确定度分量 $u(P_{m5})$

参考太阳电池尺寸通常为 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ ，被测电池通常为 $182\text{mm} \times 182\text{mm}$ 及以上尺寸，两者存在面积差异。而对于测量用 3A+ 级太阳模拟器，辐照度不均匀性一般为 1.5%。因此按均匀分布，由电池面积的差异以及辐照度不均匀性引起的测量不确定度为：

$$u(P_{m5}) = \frac{1.8\%}{k} \times \bar{P}_m = 0.077 \text{ W} \quad (C25)$$

C.3.2.6 测试平台温度引起的标准不确定度分量 $u(P_{m6})$

测试平台温度需要控制在 $25.0^\circ\text{C} \pm 2.0^\circ\text{C}$ ，由温度引入的误差为 $U_{rel}(Temp)=0.1\%$ ， $k=2$ ，则：

$$u(P_{m6}) = \frac{U_{rel}(Temp)}{k} \times \bar{P}_m = 0.0044 \text{ W} \quad (C26)$$

C.3.2.7 电流测量电路非线性引起的标准不确定度分量 $u(P_{m7})$

太阳电池最大功率是通过 I-V 特性曲线上的电流电压相乘得到的。校准时太阳电池最大功率对应的电流通常采用 200mA 量程档，电压采用 1V 量程档。而晶体硅太阳电池最大功率对应的电流通常采用 20A 量程档，电压采用 1V 量程档。则由于电流和电压测量电路非线性引起的误差为 0.2%，按均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$ 则：

$$u(P_{m7}) = \frac{U_{rel}(Linear)}{k} \times \bar{P}_m = 0.0102 \text{ W} \quad (C27)$$

最大功率测量的标准不确定度分量汇总见表 C6：

表 C6 最大功率测量的标准不确定度分量汇总表

序号	测量不确定度来源	标准不确定度符号	数值 (W)
1	太阳电池最大功率测量重复性	$u(P_{m1})$	0.00193
2	太阳模拟器辐照度	$u(P_{m2})$	0.0309
3	太阳模拟器光源稳定性	$u(P_{m3})$	0.00765

续表 C6

序号	测量不确定度来源	标准不确定度符号	数值 (W)
4	光谱失配	$u(P_{m4})$	0.0221
5	参考电池和被测电池之间面积差异 和模拟器辐照度不均匀性	$u(P_{m5})$	0.077
6	测试平台温度	$u(P_{m6})$	0.0044
7	电流测量电路非线性	$u(P_{m7})$	0.0102

C.3.3 合成标准不确定度

由于各影响量彼此独立不相关，因此最大功率测量结果的合成标准不确定度 $u_c(P_m)$ 为：

$$u_c(P_m) = \sqrt{u(p_{m1})^2 + u(p_{m2})^2 + u(p_{m3})^2 + u(p_{m4})^2 + u(p_{m5})^2 + u(p_{m6})^2 + u(p_{m7})^2} \\ = 0.087 \text{ W} \quad (\text{C28})$$

C.3.4 相对扩展不确定度

$$U_{\text{rel}} = \frac{u_c(P_m) \times k}{P_m} \times 100\% = 2.0\%, \quad k=2 \quad (\text{C29})$$

C.4 双面太阳电池转换效率校准不确定度的评定

C.4.1 测量模型

$$\eta = \frac{P_m}{A} \times \frac{1}{G} \times 100\% \quad (\text{C30})$$

式中：

η —— 被测量太阳电池的转换效率；

P_m —— 被测量太阳电池的最大功率值，W；

A —— 被测量太阳电池面积， m^2 ；

G —— 入射到太阳电池的太阳辐照度值，在 STC 条件下，该值为 $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

C.4.2 标准不确定度分量的评定

C.4.2.1 由太阳电池最大功率测量结果引起的相对标准不确定度分量 $u_{\text{rel}}(P_m)$

由 C.3.3 中太阳电池最大功率的合成标准不确定度 $u_c(P_m)=0.087 \text{ W}$ 可得，

$$u_{\text{rel}}(P_m) = \frac{u_c(P_m)}{P_m} = 0.985\% \quad (\text{C31})$$

C.4.2.2 由太阳电池面积影像测量仪引起的相对标准不确定度分量 $u_{\text{rel}}(A)$

太阳电池面积影像测量仪的最大允许误差 MPE 不超过 $\pm (2.5+L/300) \mu\text{m}$ ，其中 L 为被测太阳电池的边长。针对 182 尺寸的太阳电池片，假设服从均匀分布，包含因子 $k=3$ ，单边长度 L 的标准不确定度为 $u(L) = \frac{\text{MPE}}{\sqrt{3}} = 1.794 \mu\text{m} = 0.001794 \text{ mm}$ 。由于 $A=L^2$ ，根据面积的不确定度传播规律，可得

$$u(A) = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial L} \cdot u(L)\right)^2} = \sqrt{(2L \cdot u(L))^2} = 2 \times 182 \times 0.001794 \approx 0.654 \text{ mm}^2,$$

由上述可得,

$$u_{\text{rel}}(A) = \frac{u(A)}{A} = 0.002\% \quad (\text{C32})$$

转换效率测量的相对标准不确定度分量汇总见表 C7:

表 C7 转换效率测量的相对标准不确定度分量汇总表

序号	测量相对不确定度来源	标准不确定度符号	数值 (%)
1	太阳能电池最大功率测量结果	$u_{\text{rel}}(P_m)$	0.985
2	太阳能电池面积影像测量仪	$u_{\text{rel}}(A)$	0.002

C.4.3 相对合成标准不确定度

由于各影响量彼此独立不相关, 因此转换效率测量结果的相对合成标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\eta)$ 为:

$$u_{\text{rel}}(\eta) = \sqrt{u_{\text{rel}}(P_m)^2 + u_{\text{rel}}(A)^2} = 0.99\% \quad (\text{C33})$$

C.4.4 相对扩展不确定度

$$u_{\text{rel}}(\eta) = u_{\text{rel}}(\eta) \times k = 2.0\%, k=2 \quad (\text{C34})$$