



中华人民共和国国家计量校准规范

JJF XXXX-XXXX

太阳能电池量子效率测试仪校准规范

Calibration Specification for Solar Cell Quantum Efficiency

Measurement Instruments

(征求意见稿)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

国家市场监督管理总局发布

太阳能电池量子效率测试仪校准 规范

JJF XXXX—XXXX

Calibration Specification for Solar Cell

Quantum Efficiency Measurement Instruments

归口单位：全国光伏专用计量器具计量技术委员会

主要起草单位：福建省计量科学研究院

中国计量科学研究院

中国测试技术研究院

参与起草单位：上海市计量测试技术研究院

中国科学院电工研究所

本规范委托全国光伏专用计量器具计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

罗海燕（福建省计量科学研究院）

张俊超（中国计量科学研究院）

康张李（中国测试技术研究院）

参加起草人：

杨爱军（福建省计量科学研究院）

何翔（福建省计量科学研究院）

黄必勇（上海市计量测试技术研究院）

姜飞飞（中国科学院电工研究所）

目 录

1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语和计量单位.....	1
4 概述.....	2
5 计量特性.....	2
6 校准条件.....	3
7 校准项目和校准方法.....	4
8 校准结果表达.....	8
9 复校时间间隔.....	8
附录 A 太阳能电池量子效率测试仪单色光和偏置光辐照度不均匀性测量结果不确定度评定示例.....	9
附录 B 太阳能电池量子效率测试仪相对光谱响应示值误差测量结果的不确定度评定示例..	15
附录 C 太阳能电池量子效率测试仪短路电流示值误差测量结果的不确定度评定示例.....	18
附录 D 太阳能电池量子效率测试仪反射率示值误差测量结果的不确定度评定示例.....	21
附录 E 太阳能电池量子效率测试仪波长示值误差测量结果的不确定度评定示例.....	24
附录 F 太阳能电池量子效率测试仪校准原始记录格式.....	26

引 言

JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》和 JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》共同构成支撑本规范编写的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

太阳能电池量子效率测试仪校准规范

1 范围

本规范适用于波长范围为（280~1600）nm 的太阳能电池量子效率测试仪的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1150-2006 光电探测器相对光谱响应度校准规范

GB/T 2297-1989 太阳光伏能源系统术语

GB/T 6495.8-2002 光伏器件 第8部分：光伏器件光谱响应的测量

IEC 60904-2 光伏器件 第2部分：标准太阳能电池的要求(Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for photovoltaic reference devices)

IEC 60904-8: 2014 光伏器件 第8部分：光伏器件光谱响应的测量 (Photovoltaic devices-Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device)

IEC 61215-2:2016 地面光伏组件 设计鉴定和定型 第2部分：试验程序(Terrestrial photovoltaic(PV) modules-Design qualification and type approval-Part2:Test procedures)

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 术语和计量单位

GB/T 2297-1989 界定的及以下术语适用于本规范。

3.1 太阳能电池量子效率 quantum efficiency of photovoltaic cells

某个波长的光子入射到太阳能电池后产生的电子-空穴对的几率。

[来源：GB/T 2297—1989，3.3，有修改]

3.2 光谱响应（光谱灵敏度）Spectral Response (Spectral Sensitivity)

各个波长上，单位辐照度所产生的短路电流密度与波长的函数关系。某个波长下光伏电池的光谱响应与量子效率的换算关系如附录A所示。

[来源：GB/T 2297—1989，3.27]

3.3 相对光谱响应（相对光谱灵敏度）Relative Spectral Response (Relative Spectral

Sensitivity)

以某一特定的波长（通常是以光谱响应的最大值）进行归一化的光谱响应。

[来源：GB/T 2297—1989，3.29]

3.4 小光斑测试仪 Small spot tester

单色光光斑的有效测试尺寸小于（2 cm×2 cm），边长小于 2 cm，主要用于分析太阳能电池精细结构性能的量子效率测试仪。

3.5 大光斑测试仪 Large spot tester

单色光光斑的有效测试尺寸大于等于（2 cm×2 cm），边长大于等于 2 cm，根据面积大小不同，分别应用于测试标准太阳电池、单晶或多晶电池片和多结太阳电池的量子效率测试仪。

4 概述

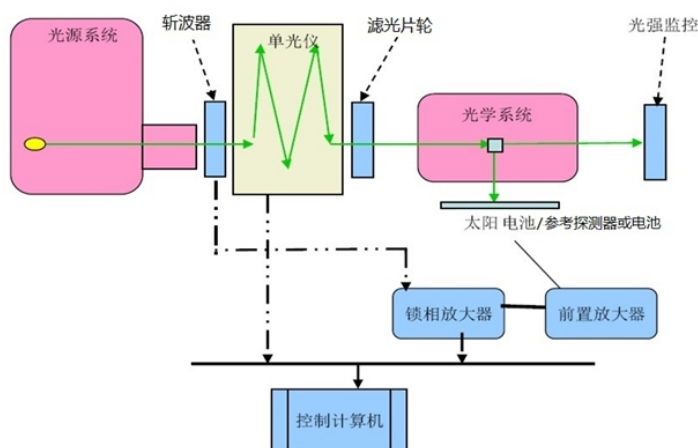


图1 太阳电池量子效率测试仪主要结构示意图

太阳电池量子效率测试仪是用于测量各种太阳电池的光谱响应、量子效率、反射率、短路电流等指标的仪器，是太阳电池结构分析和电性能参数校准的重要测试设备。其主要结构如图1所示，包括：单色光光源系统、斩波器、单色仪、滤光片轮、光强监控探测器、偏置光光源系统、锁相放大器、前置放大器、控制系统、数据记录和处理软件等。其主要测量原理是通过强度可调的偏置光照射太阳电池，模拟其不同的工作状态，同时测量太阳电池在不同波长的单色光照射下产生的短路电流，从而得到太阳电池的光谱响应。

5 计量特性

太阳电池量子效率测试仪的计量特性包括：单色光辐照度不均匀性、偏置光辐照度不均匀性、相对光谱响应测量相对示值误差、短路电流测量相对示值误差、反射率测量示值

误差、波长示值误差等。各项计量特性技术指标见表 1。

表 1 太阳能电池量子效率测试仪主要技术指标

序号	校准项目	技术指标	
		小光斑测试仪	大光斑测试仪
1	单色光辐照度不均匀性	—	应 \leq 10%
2	偏置光辐照度不均匀性	—	应 $<$ 15%
3	相对光谱响应测量相对示值误差	(400~1000) nm: 应不超过 \pm 1% 其它波段: 应不超过 \pm 3%	
4	短路电流测量相对示值误差*	—	应不超过 \pm 1%
5	反射率测量示值误差	应不超过 \pm 2%	
6	波长示值误差	应不超过 \pm 2 nm	

注：以上指标不适用于合格性判别，仅供参考；

*短路电流测量示值误差需在同一溯源体系中进行校准，仅针对高等级的量子效率测试仪。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(20~40) °C。

6.1.2 相对湿度：(20~80) %RH。

6.1.2 电源：(220 \pm 22) V，频率：(50 \pm 0.5) Hz；

6.1.3 无明显机械振动，无电磁干扰，无易燃易爆和腐蚀性气体，无影响辐照度和光谱测量的杂散光。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 WPVS (World Photovoltaic Scale) 标准太阳电池

应满足 IEC 60904-2 中规定的二级标准太阳电池的要求，为稳定的晶硅太阳电池。其光谱响应范围通常应覆盖 (300~1200) nm，填充因子大于 65%，参考 WPVS (World Photovoltaic Scale) [1] 太阳电池的规格，电池本体包含一个电流信号输出口与一个温度信号输出口，两个信号输出口均采用四线法引出信号。内部电池片尺寸为 (20 mm \times 20 mm)。

6.2.2 直流数字电压表

6 位半以上直流数字源表，准确度等级应不低于 0.01 级。

[1]C. R. Osterwald, S. Anevsky, K. Bücher, et al, The world photovoltaic scale an international reference cell calibration program, Progress in Photovoltaics Research and Applications, vol. 7, pp. 287-297, 1999.

6.2.3 I/V 变换器

变换器的负载阻值大小与短路电流的乘积应小于开路电压值的 3%，并满足响应时间要求。

6.2.4 标准探测器

已知绝对或相对光谱响应的光电探测器，测量波长范围内应有足够高的绝对光谱响应度，较低的暗噪声，符合 JJF 1150-2006 中 6.2.1 的要求。参考 IEC 60904-8: 2014 中 6.8 建议采用硅 (Si)、锗 (Ge) 或铟镓砷 (InGaAs) 光电探测器，不同的波长范围采用覆盖该波段的探测器或探测器组合进行校准。

6.2.5 参考电池片

应为稳定的晶硅太阳能电池片，依据 IEC 61215-2:2016 中 4.19 进行短路电流变化率测试，其短路电流变化率应不超过 $\pm 1\%$ 。

6.2.6 标准白板或标准灰板

标准白板和标准灰板反射率年变化率不超过 $\pm 1.0\%$ ，直径 d 应不小于 25 mm，应至少能覆盖积分球的出光口。

6.2.7 窄带宽标准滤光片。

建议峰值波长为 (632.8 ± 2.0) nm， (1330.0 ± 2.0) nm 的滤光片或相应波长范围内的窄带标准滤光片， $U \leq 0.6$ nm ($k=2$)。

6.2.8 标准线光谱光源

建议特征波长为 253.652 nm、365.016 nm、435.833 nm、546.075 nm、696.543 nm 和 912.297 nm 的汞-氙灯或相应波长范围内的标准线光谱光源。

7 校准项目和校准方法

7.1 单色光辐照度不均匀性

若被校仪器的单色光斑面积大于等于 $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ ，选取单色光辐照度测试有效区域的上中下和左中右 9 个测试位置（典型示意图如图 2 所示），主要采用 WPVS 标准太阳能电池作为光检测器，在每个测试位置测量单色光辐照度，产生与辐照度成正比的短路电流，用精密数字电压表记录经 I-V 转化器放大后的与辐照度等效的电压信号 V_{Mn} (n 为是测试点编号)，找出最大值 V_{Mnmax} 和最小值 V_{Mnmin} ，根据公式 (2) 计算单色光辐照度的不均匀性 J_{MP} ：

$$J_{MW} = \frac{V_{MW \max} - V_{MW \min}}{V_{MW \max} + V_{MW \min}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

J_{MW} ——单色光辐照度的不均匀性，单位为百分率（%）；

$V_{MW \max}$ ——测试点中单色光电压信号最大值，单位为毫伏（mV）；

$V_{MW \min}$ ——测试点中单色光电压信号最小值，单位为毫伏（mV）；

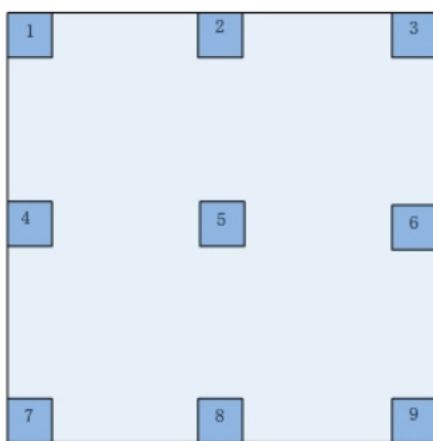


图2 光斑测试区域内9个测试位置示意图

其中作为检测器的 WPVS 硅太阳能电池也可以替换成其他符合要求的检测器。典型的单色光评估波长为 400 nm、532 nm、650 nm 和 900 nm。可根据校准需求选择校准其他波长。

若被校仪器的单色光斑面积小于 $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ ，则推荐采用有效感光面的边长为待评估光斑短边边长的八分之一的检测器，可采用光阑对检测器的尺寸进行调节。

不均匀性校准采用的点数，也可在上述要求的基础上根据校准需求增加测量点进行校准，推荐的校准点分布如附录 B 所示。

7.2 偏置光辐照度不均匀性

偏置光辐照度的不均匀性采用类似前述单色光辐照度的不均匀性校准方法进行校准。将偏置光辐照度测试有效区域划分成 9 个测量位置，主要采用 WPVS 标准太阳电池作为检测器，在每个测试位置测量辐照度，产生与辐照度成正比的短路电流，用精密数字电压表记录短路电流经 I-V 转化器放大后的与辐照度等效的电压信号 V_{BWn} （n 为测试点编号），找出最大值 $V_{BW \max}$ 和最小值 $V_{BW \min}$ ，根据公式（3）计算偏置光辐照度的不均匀性 J_{BW} ：

$$J_{BW} = \frac{V_{BW \max} - V_{BW \min}}{V_{BW \max} + V_{BW \min}} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

- J_{BW} ——偏置光辐照度的不均匀性，单位为百分率（%）；
 V_{BWmax} ——测试点中偏置光电压信号最大值，单位为毫伏（mV）；
 V_{BWmin} ——测试点中偏置光电压信号最小值，单位为毫伏（mV）；

不均匀性校准采用的点数，也可在上述要求的基础上根据校准需求增加测量点进行校准，需记录校准区域的分布情况和校准的位置。

7.3 相对光谱响应测量示值误差

对于只能产生小光斑单色光的仪器或工作在产生小光斑单色光状态的仪器，在其样品台放置标准光电探测器进行相对光谱响应测量。(280~1000)nm 波段通常采用标准 Si 光电探测器，(1000~1700)nm 波段通常采用标准 Ge 光电探测器或 InGaAs 光电探测器。在无偏置光照射的情况下，重复测量 3 次，记录以光谱响应的最大值进行归一化的相对光谱响应值，取其算术平均值作为仪器的相对光谱响应的校准值，按式(3)计算仪器的相对光谱响应相对示值误差，取绝对值最大的示值误差为示值误差结果。

$$\delta_{SR} = \frac{\overline{SR} - SR_s}{SR_s} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

- δ_{SR} ——相对光谱响应测量示值误差，单位为百分率（%）；
 \overline{SR} ——仪器 3 次相对光谱响应测量值的平均值，单位为百分率（%）；
 SR_s ——标准探测器的相对光谱响应校准值，单位为百分率（%）。

对于大光斑的仪器，采用光谱响应测量模式，在其样品台放置 WPVS 标准太阳电池进行相对光谱响应测量，在无偏置光照射的情况下，重复测量 3 次，记录以光谱响应的最大值进行归一化的相对光谱响应值，取其算术平均值作为仪器的相对光谱响应的校准值，按式(3)计算仪器的相对光谱响应相对示值误差 δ_{SR} ，取绝对值最大的示值误差为示值误差结果。

也可以采用已知光谱响应的参考电池片进行大光斑的相对光谱响应示值误差的校准。

7.4 短路电流测量示值误差

采用短路电流测量模式，在其样品台放置标准太阳电池或者参考电池片进行测量，重复校准3次，取其算术平均值作为仪器的短路电流的校准值，按式(4)计算仪器的短路电流相对示值误差 $\delta_{I_{sc}}$ ，取绝对值最大的示值误差为示值误差结果。

$$\delta_{I_{sc}} = \frac{\overline{I_{sc}} - I_{scs}}{I_{scs}} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

$\delta_{I_{sc}}$ ——短路电流测量示值误差，单位为百分率（%）；

$\overline{I_{sc}}$ ——仪器 3 次测量值的平均值，单位为安培（A）；

I_{scs} ——标准太阳电池或者参考电池片的短路电流标准值，单位为安培（A）。

7.5 反射率测量示值误差

经自校后的仪器，采用反射率测量模式，在其样品台放置标准白板或灰板进行反射率示值误差测量，重复测量 3 次，取算术平均值作为仪器的反射率测量值，按式(5)计算仪器的反射率示值误差。

$$\delta_R = \overline{R} - R_s \quad (5)$$

式中：

δ_R ——反射率测量示值误差，单位为百分率（%）；

\overline{R} ——仪器 3 次反射率测量值的平均值，单位为百分率（%）；

R_s ——标准白板或灰板反射率校准值，单位为百分率（%）。

7.6 波长示值误差

经自校后的仪器，采用透射率测量模式，根据波长测量范围在其样品台放置中心波长约为 632.8 nm 或 1330.0 nm 的窄带标准滤光片进行波长示值误差测量，重复测量 3 次，取测得波峰的中心波长算术平均值作为仪器的波长测量值，按式(6)计算仪器的波长示值误差 δ_λ 。

$$\delta_\lambda = \overline{\lambda} - \lambda_s \quad (6)$$

式中：

δ_λ ——波长示值误差，单位为纳米（nm）；

$\overline{\lambda}$ ——仪器 3 次波长测量值的平均值，单位为纳米（nm）；

λ_s ——标准滤光片中心波长标准值，单位为纳米（nm）。

波长示值误差也可采用标准线光谱灯源进行校准。将标准线光谱灯灯源对准仪器的探测器接收口，采用透射率测量模式，记录仪器显示的中心波长示值，重复测量 3 次，根据平均值计算波长示值误差。

8 校准结果表达

根据被检仪器校准结果出具校准证书，校准证书应至少应包含以下信息：

- 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) 客户的名称和地址；
- 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收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校准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) 校准结果仅对被校准对象的有效性说明；
- 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

复校时间间隔由仪器使用情况、使用者、仪器本身质量等因素决定，送检单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。建议仪器复校时间间隔最长不超过 12 个月。

附录 A

量子效率与光谱响应的换算关系

某个波长下量子效率 $EQE(\lambda)$ 与光谱响应 $SR(\lambda)$ 的换算关系如下式所示：

$$EQE(\lambda) = \left(\frac{hc}{e} \right) \times \left(\frac{SR(\lambda)}{\lambda} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (A1)$$

式中：

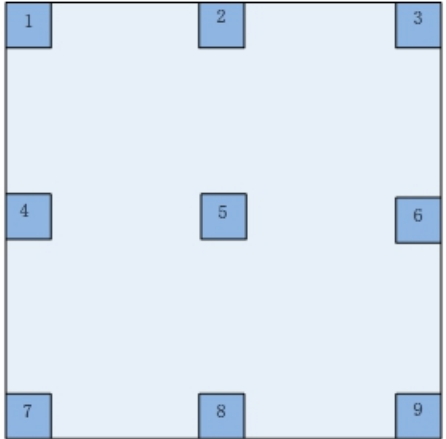
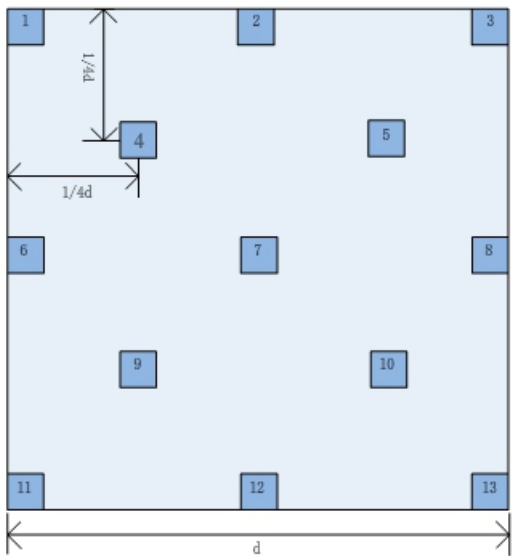
- λ ——单色光波长，单位为米（m）；
- h ——普朗克常数，单位为焦耳秒（J·s）， 6.626×10^{-34} J·s；
- c ——光速，单位为米每秒（m/s）， 3.0×10^8 m/s；
- e ——基本电荷，单位为库伦（C）， 1.6×10^{-19} C。

附录 B

测试点分布

太阳能电池量子效率测试仪的单色光和偏置光辐照度不均匀性测试根据测试面积的不同选取不同的测试点，推荐的测试点分布如表 B.1 所示。

表 B.1 测试点分布

序号	单色光斑尺寸 (方形)	测试点分布
1	$d < 20 \text{ mm}$	—
2	$20 \text{ mm} \leq d < 210 \text{ mm}$	
3	$210 \text{ mm} \leq d$	

附录 C

太阳电池量子效率测试仪单色光和偏置光辐照度不均匀性测量结果不确定度 评定示例

C.1 太阳电池量子效率测试仪单色光辐照度不均匀性测量结果不确定度评定

C.1.1 测量模型

太阳电池量子效率测试仪单色光辐照度不均匀性 J_{MW} 按下式计算：

$$J_{MW} = \frac{V_{MW\max} - V_{MW\min}}{V_{MW\max} + V_{MW\min}} \times 100\%$$

式中：

$V_{MW\max}$ ——用精密数字电压表记录 WPVS 参考太阳电池检测器短路电流经 I-V 转化器放大后的与辐照度等效的电压信号的最大值，mV；

$V_{MW\min}$ ——用精密数字电压表记录 WPVS 参考太阳电池检测器短路电流经 I-V 转化器放大后的与辐照度等效的电压信号的最小值，mV。

C.1.2 标准不确定度分量的评定

C.1.2.1 WPVS 标准太阳电池检测器不稳定性引入的不确定度 u_1

将检测器放置于高稳定度光源下，稳定 30 分钟后，通过电阻变换后测量其 10min 内输出电压信号 10 次： $I_{\max} = 19.3584$ mV， $I_{\min} = 19.3342$ mV。检测器不稳定性引入的不确定度 u_1 计算如下：

$$u_1 = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \times 100\% = 0.063\%$$

序号	检测器电压信号/mV
1	19.3584
2	19.3447
3	19.3556
4	19.3462
5	19.3443
6	19.3355
7	19.3446
8	19.3438
9	19.3426
10	19.3342

C.1.2.2 位置重复性引起的不确定度 u_2

参考 JJF 1615-2017，由于划分区域与检测器对位有一定差异，因放置位置不同引入

的不确定度估算为 $u_2=0.5\%$ 。

C.1.2.3 单色光源重复性引起的不确定度 u_3

在 10min 内，在光斑同一区域内重复测量 10 次，其辐照度重复性引入的不确定度估算为 $u_3=0.46\%$ 。

序号	检测器电压信号/mV
1	0.532
2	0.535
3	0.533
4	0.529
5	0.531
6	0.529
7	0.528
8	0.528
9	0.529
10	0.528

C.1.2.4 信号采集装置引入不确定度 u_4, u_5

信号采集装置中的数表和放大器根据上级溯源校准结果计算引入的不确定度分别为 $u_4=0.001\%$ 和 $u_5=0.025\%$ 。

C.1.2.5 信号采集装置读数有效位数引起的不确定度 u_6

使用的信号采集装置中的数表为七位半分辨率，由其读数有效位数引起的不确定度 u_6 可忽略不计。

C.1.2.6 温度变化引入的不确定度 u_7

在光源照射条件下，检测器受热温度变化，可能导致结果变化，探头的温度系数在 0.05%左右，温度变化在 1℃内，变化为均匀分布，产生的不确定度约为 $u_7=0.05\%/\sqrt{3}=0.03\%$ 。

C.1.2.7 单色光辐照度不均匀性校准的合成不确定度计算

由于各影响量彼此独立不相关，因此合成标准不确定度为：

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2} = 0.68\%$$

相对扩展不确定度为：

$$U_{rel}=1.4\% (k=2)$$

C.2 太阳电池量子效率测试仪偏置光辐照度不均匀性测量结果不确定度评定

C.2.1 测量模型

太阳能电池量子效率测试仪单色光辐照度不均匀性 J_{BW} 按下式计算：

$$J_{BW} = \frac{V_{BW\max} - V_{BW\min}}{V_{BW\max} + V_{BW\min}} \times 100\%$$

式中：

$V_{BW\max}$ ——用精密数字电压表记录 WPVS 参考太阳能电池检测器短路电流经 I-V 转化器放大后的与辐照度等效的电压信号的最大值，mV；

$V_{BW\min}$ ——用精密数字电压表记录 WPVS 参考太阳能电池检测器短路电流经 I-V 转化器放大后的与辐照度等效的电压信号的最小值，mV。

C.2.2 标准不确定度分量的评定

C.2.2.1 WPVS 标准太阳能电池检测器不稳定性引入的不确定度 u_8

稳定 30 分钟后，测量其 10min 内输出信号 10 次： $I_{\max} = 19.3584$ mV， $I_{\min} = 19.3342$ mV。检测器不稳定性引入的不确定度 u_8 计算如下：

$$u_7 = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \times 100\% = 0.063\%$$

C.2.2.2 位置重复性引起的不确定度 u_9

参考 JJF 1615-2017，由于划分区域与检测器定位有一定差异，因放置位置不同引入的不确定度 $u_9 = 0.5\%$ 。

C.2.2.3 偏置光光源重复性引起的不确定度 u_{10}

在 10min 内，在偏置光同一区域重复测量 10 次，其辐照度的重复性引入的不确定度 $u_{10} = 0.36\%$ 。

序号	检测器电压信号 mV
1	21.69
2	21.70
3	21.58
4	21.60
5	21.58
6	21.62
7	21.42
8	21.56
9	21.56
10	21.50

C.2.2.4 标准器引入不确定度 u_{11}, u_{12}

信号采集装置中的数表和放大器根据上级溯源校准结果计算引入的不确定度分别为 $u_{11}=0.001\%$ 和 $u_{12}=0.025\%$ 。

C.2.2.5 信号采集装置读数有效位数引起的不确定度 u_{13}

使用的信号采集装置中的数表为七位半分辨率，由其读数有效位数引起的不确定度 u_{12} 可忽略不计。

C.2.2.6 温度变化引入的不确定度 u_{14}

在光源照射条件下，检测器受热温度变化，可能导致结果变化，探头的温度系数在 0.05% 左右，温度变化在 1°C 内，变化为均匀分布，产生的不确定度约为 $u_{14}=0.05\%/\sqrt{3} = 0.03\%$ 。

C.2.2.7 偏置光辐照度辐照度不均匀性校准的合成不确定度计算

由于各影响量彼此独立不相关，因此合成标准不确定度为：

$$u = \sqrt{u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2 + u_{11}^2 + u_{12}^2 + u_{13}^2 + u_{14}^2} = 0.62\%$$

相对扩展不确定度为：

$$U_{rel}=1.3\% (k=2)$$

附录 D

太阳电池量子效率测试仪相对光谱响应示值误差测量结果的不确定度评定示例

D.1 测量模型

$$\delta_{SR} = \frac{\overline{SR} - SR_s}{SR_s} \times 100\%$$

式中：

δ_{SR} ——相对光谱响应示值误差；

\overline{SR} ——仪器 3 次相对光谱响应校准值的平均值；

SR_s ——标准光电探测器的相对光谱响应标准值。

D.2 标准不确定度分量的评定

D.2.1 以标准光电探测器为标准器举例评定，其相对光谱响应度测量 10 次重复性引起的相对标准不确定度分量 u_1 ：

$$(300\sim 400) \text{ nm: } u_1 = 0.58\%;$$

$$(400\sim 1100) \text{ nm: } u_1 = 0.25\%;$$

$$(1100\sim 1600) \text{ nm: } u_1 = 0.35\%;$$

D.2.2 标准光电探测器的光谱响应度校准结果引起的标准不确定度分量 u_2

标准光电探测器的光谱响应度校准结果的相对扩展不确定度为 $U_{rel}(Ref) = (1.2\% \sim 2.0\%)$ ($k=2$)。因此，由于标准探测器的光谱响应度引起的标准不确定度分量 u_2 为：

$$u_2 = \frac{U_{rel}(Ref)}{k}$$

$$(300\sim 400) \text{ nm: } u_2 = 0.9\%;$$

$$(400\sim 1100) \text{ nm: } u_2 = 0.85\%;$$

$$(1100\sim 1600) \text{ nm: } u_2 = 1.0\%;$$

D.2.3 单色仪带宽误差引入的不确定度分量 u_3

当标准光电探测器和被检仪器自带参考光电探测器的光谱响应的斜率不同时，单色仪带宽会引进误差。参考 JJF1150-2006，此项不确定度约为： $u_3 = 0.0004\%$ 。

D.2.4 光电测量部分的非线性引入的不确定度分量 u_4

当测量装置通过对辐射源进行调制，并用锁相放大器进行测量，可以减小杂散光的影响，提高测量准确度。但锁相放大器有可能引进非线性误差。可用双孔径法对带光电二极管的锁相放大器进行非线性测量，其非线性 $<0.1\%$ 。估算 $u_4=0.1\%$ 。

D. 2. 5 波长误差引入的不确定度分量 u_5

采用特征谱线灯对单色仪的波长偏差进行标定，最大偏差 0.2nm 。此项不确定度为： $u_5=0.2\%$ 。

D. 2. 6 杂散辐射带来的不确定度分量 u_6

单色仪的杂数辐射为 10^{-10} ，用截止滤光片测量单色仪的杂数辐射，在 460nm 测量，大于此波长的杂数辐射应该更小，该项误差可忽略。通带外的杂散辐射，因采用了调制锁相方法测量，影响也很小，误差可忽略。因此， $u_6 = 0$ 。

D. 2. 7 辐射源和探测器表面均匀性影响引入的不确定度 u_7

因为每次装调探测器的位置不同，引入误差，实际中使用重复装调的方法验证该误差。参考 JJF1150-2006，Si 光电探测器均匀性影响约为 0.2% ，此项不确定度取： $u_7=0.2\%$ 。

D. 2. 8 标准光电探测器吸收系数引起的不确定度 u_8

(300~400) nm: $u_8=0.3\%$;

(400~1100) nm: $u_8=0.2\%$;

(1100~1600) nm: $u_8=0.3\%$ 。

量子效率测试仪相对光谱响应度测量的标准不确定度分量汇总见表 C1:

表 D1 量子效率测试仪相对光谱响应度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 (%)
1	相对光谱响应度测量重复性	u_1	0.58; 0.25; 0.35
2	标准光电探测器的光谱响应度校准引起的标准不确定度	u_2	0.9; 0.85; 1.0
3	单色仪带宽误差	u_3	0.0004
4	光电测量部分的非线性	u_4	0.1
5	波长误差	u_5	0.2
6	杂散辐射带来的误差	u_6	0
7	辐射源和参考光电探测器表面均匀性影响	u_7	0.2
8	标准光电探测器吸收系数引起的误差	u_8	0.3; 0.2; 0.3

D.3 太阳电池量子效率测试仪相对光谱响应度的合成标准不确定度计算

由于各影响量彼此独立不相关，因此合成标准不确定度为：

$$u_c(R) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2}$$

D.3.1 扩展不确定度

$$U = k \times u_c(R)$$

波长（300~400）nm： $U_{\text{rel}} = 2.3\% (k=2)$ ；

波长（400~1100）nm： $U_{\text{rel}} = 1.9\% (k=2)$ ；

波长（1100~1200）nm： $U_{\text{rel}} = 2.3\% (k=2)$ 。

附录 E

太阳电池量子效率测试仪短路电流示值误差测量结果的不确定度评定示例

E.1 测量模型

$$\delta_{I_{sc}} = \frac{\overline{I_{sc}} - I_{scs}}{I_{scs}} \times 100\%$$

式中：

$\overline{I_{sc}}$ ——仪器 3 次测量值的平均值；

I_{scs} ——太阳电池的短路电流校准值。

E.2 标准不确定度分量的评定（以 WPVS 标准太阳电池为标准器）

E.2.1 短路电流测量重复性引起的标准不确定度分量 u_1

此项为 A 类不确定度，以 WPVS 标准太阳电池为标准器举例，测量 WPVS 标准太阳电池短路电流 6 次，数据见表 E1。通过计算太阳电池量子效率测试仪短路电流实验标准偏差作为短路电流测量重复性引起的标准不确定度分量 u_1 。

表 E1 WPVS 电池短路电流重复测量 6 次的的数据

序号	短路电流(mA)
1	150.50
2	150.44
3	150.40
4	150.39
5	150.52
6	150.51
平均值 (mA)	150.46
$S(I)$ (%)	0.06

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 $u_2(r)$ 为：

$$u_1 = \frac{S(I)}{\sqrt{3}} = 0.0231\%$$

E.2.2 WPVS 标准太阳电池校准引入的不确定度分量 u_2

此项为 B 类不确定度。WPVS 标准太阳电池证书中的扩展不确定度为 $U_{rel}=0.40\%$ ， $k=2$ ，因此由 WPVS 标准太阳电池校准引入的不确定度分量 $u_2=0.40/2=0.20\%$ 。

E.2.3 单光仪波长准确性造成标准器测量的偏差引起的不确定度 u_4

根据单光仪的性能指标，其分光准确度为 0.2nm，因此需要评估单光仪波长准确性引起的不确定度。以 5nm 为步进，每一个波长往前和往后偏移 0.2nm 引起的误差，取两者的最大值进行评估。该项不确定度分量按均匀分布评估，该因素对 WPVS 短路电流测量引起的相对不确定度分量估算为 $u_4=0.2\%$ 。

E.3 合成标准不确定度

合成标准不确定度 u 采用下式计算：

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.284\%$$

E.4 扩展不确定度

短路电流示值误差扩展不确定度 $U(I_{sc})$ 采用下式计算：

$$U_{rel}(I_{sc}) = u \times k = 0.6\%, \quad k=2。$$

E.5 标准不确定度分量的评定（以参考电池片为标准器）

E.5.1 短路电流测量重复性引起的标准不确定度分量 u_1

此项为 A 类不确定度，以参考电池片为标准器举例，测量以参考电池片短路电流 6 次，数据见表 E2。通过计算太阳能电池量子效率测试仪短路电流实验标准偏差作为短路电流测量重复性引起的标准不确定度分量 u_1 。

表 E2 参考电池片短路电流重复测量 6 次的的数据

序号	短路电流(mA)
1	9.8702
2	9.8813
3	9.8831
4	9.8804
5	9.8845
6	9.8813
平均值 (mA)	9.880
$S(I)$ (%)	0.005

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 $u_2(r)$ 为：

$$u_1 = \frac{S(I)}{\sqrt{3}} = 0.0294\%$$

E.5.2 参考电池片校准引入的不确定度分量 u_2

此项为 B 类不确定度。参考电池片证书中的扩展不确定度为 $U_{\text{rel}}=1.4\%$ ， $k=2$ ，因此由参考电池片校准引入的不确定度分量 $u_2=1.4/2=0.7\%$ 。

E.5.3 单光仪波长准确性造成标准器测量的偏差引起的不确定度 u_4

根据单光仪的性能指标，其分光准确度为 0.2nm，因此需要评估单光仪波长准确性引起的不确定度。以 5nm 为步进，每一个波长往前和往后偏移 0.2nm 引起的误差，取两者的最大值进行评估。该项不确定度分量按均匀分布评估，该因素对参考电池片短路电流测量引起的相对不确定度分量估算为 $u_4=0.2\%$ 。

E.6 合成标准不确定度

合成标准不确定度 u 采用下式计算：

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.729\%$$

E.7 扩展不确定度

短路电流示值误差扩展不确定度 $U(I_{\text{sc}})$ 采用下式计算：

$$U_{\text{rel}}(I_{\text{sc}}) = u \times k = 1.5\%, \quad k=2。$$

附录 F

太阳能电池量子效率测试仪反射率测量示值误差测量结果的不确定度评定示例

F.1 测量模型

$$\delta_R = \bar{R} - R_s$$

式中：

δ_R ——反射率测量示值误差；

\bar{R} ——白板标准物质在被检仪器上 3 次反射率测量值的平均值；

R_s ——白板标准物质反射率标准值。

F.2 方差与灵敏系数

\bar{R} 、 R_s 是非相关量，因此不确定度传播律为：

$$u_c(\delta_R) = \sqrt{c_1^2 u_1^2(\bar{R}) + c_2^2 u_2^2(R_s)}$$

$$\text{其中， } c_1 = \frac{\partial \delta_R}{\partial \bar{R}} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \delta_R}{\partial R_s} = -1$$

F.3 标准不确定度分量的评定

F.3.1 反射率测量重复性引起的标准不确定度分量 $u(R_1)$

此项为 A 类不确定度，测量白板标准物质在（300~1600）nm 波长范围内反射率 6 次，测量结果的实验标准偏差如表 E1 所示。

表 E1 不同波长范围内反射率实验标准差

波长 (nm)	$s(R)$ (%)
300~400	1.414
400~1100	1.202
1100~1600	1.496

通过下式计算该反射率测试仪的反射率测量重复性引起的标准不确定度分量 $u(R_1)$ 。

$$u(R_1) = \frac{S(R)}{\sqrt{3}}$$

式中， $S(R)$ 为实验标准偏差。

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 $u(R_1)$ 采用式（3）计算，结果如表 E2：

表 E2 不同波长范围内反射率标准不确定度分量

波长 (nm)	$u(R_1)$ (%)
300~400	0.816
400~1100	0.694
1100~1600	0.864

F.3.2 标准器白板标准物质的反射率校准结果引起的标准不确定度分量 $u(R_2)$

此项为B类不确定度。标准器白板标准物质的反射率校准结果的扩展不确定度为 $U=1.0\%$ ($k=2$)。校准时直接采用标准器白板标准物质的反射率作为太阳电池量子效率测试仪的调整参考，因此，由于标准器白板标准物质的反射率引起的标准不确定度分量 $u(R_2)$ 为：

$$u(R_2) = \frac{U}{k} = 0.5\%$$

F.3.3 标准白板的年变化量带来的标准不确定度分量 $u(R_3)$

此项为B类不确定度分量。按 JJG 453-2003《标准色板检定规程》中一级色板的要求，年变差应小于 0.5%，按均匀分布处理，其标准不确定度为：

$$u(R_3) = \frac{U}{k} = 0.5\%/\sqrt{3} = 0.29\%$$

反射率测量的标准不确定度分量汇总见表 E3：

表 E3 反射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 (%)
1	反射率测量重复性	$u(R_1)$	(300~400) nm: 0.816 (400~1100) nm: 0.694 (1100~1600) nm: 0.864
2	标准器白板标准物质的校准	$u(R_2)$	0.5
3	标准白板年变化量	$u(R_3)$	0.29

F.4 合成标准不确定度

合成标准不确定度 $u(R)$ 采用式 (6) 计算，结果如表 E4：

$$u(R) = \sqrt{u(R_1)^2 + u(R_2)^2 + u(R_3)^2}$$

表 E4 不同波长范围内反射率合成标准不确定度分量

波长 (nm)	$u(R)$ (%)
300~400	1.00
400~1100	0.90
1100~1600	1.04

F.5 扩展不确定度

扩展不确定度 $U(R)$ 采用下式计算，结果如表 E5：

$$U(R) = u(R) \times k$$

表 E5 不同波长范围内反射率扩展不确定度分量

波长 (nm)	$U(R)$ (%)
300~400	2.0
400~1100	1.8
1100~1600	2.1

附录 G

太阳能电池量子效率测试仪波长示值误差校准结果的不确定度评定示例

G.1 测量模型

$$\delta_{\lambda} = \bar{\lambda} - \lambda_s$$

式中：

δ_{λ} ——波长示值误差；

$\bar{\lambda}$ ——仪器 3 次波长测量值的平均值；

λ_s ——标准滤光片中心波长标准值。

G.2 方差与灵敏系数

$\bar{\lambda}$ 、 λ_s 是非相关量，因此不确定度传播律为：

$$u_c(\delta_{\lambda}) = \sqrt{c_1^2 u_1^2(\bar{\lambda}) + c_2^2 u_2^2(\lambda_s)}$$

其中 $c_1 = \frac{\partial \delta_{\lambda}}{\partial \bar{\lambda}} = 1$ ， $c_2 = \frac{\partial \delta_{\lambda}}{\partial \lambda_s} = 1$ 。

G.3 标准不确定度分量的评定

G.3.1 波长测量重复性引起的标准不确定度分量 u_1

此项为 A 类不确定度，测量滤光片波长 6 次，测量结果如表 F1 所示，通过下式计算太阳能电池量子效率测试仪波长测量重复性引起的标准不确定度分量 u_1 。

表 F1 波长重复测量 6 次数据

标准值 (nm)	测量值(nm)						均值(nm)	S(λ) (nm)
	1	2	3	4	5	6		
632.7	631.6	631.8	632.2	631.6	631.5	631.5	631.7	0.27

$$u_1 = \frac{S(\lambda)}{\sqrt{3}} = 0.15 \text{ nm}$$

G.3.2 滤光片校准引入的不确定度分量 u_2

此项为 B 类不确定度。滤光片校准证书中的扩展不确定度为 $U_{\text{rel}}=0.5 \text{ nm}$ ， $k=2$ ，因此由滤光片校准引入的不确定度分量 $u_2=0.5 \text{ nm} / 2=0.25 \text{ nm}$ 。

G.4 合成标准不确定度

合成标准不确定度 u 采用下计算：

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.29 \text{ nm}$$

G.5 扩展不确定度

波长示值误差扩展不确定度 $U(\text{SR})$ 采用下式计算：

$$U_{\text{rel}}(\text{I}) = u \times k = 0.29 \text{ nm} \times 2 = 0.58 \text{ nm} \approx 0.6 \text{ nm}, \quad k=2$$

附录 H

太阳能电池量子效率测试仪校准原始记录格式

证书编号_____ 记录编号_____

委托单位_____ 委托单位地址_____

仪器型号 / 规格_____ 出厂编号_____

光源类型_____ 制造厂_____

校准地点_____

校准依据_____

校准环境条件：温度_____℃ 相对湿度_____ %RH

表 H1 校准使用主要设备

序号	主标准器名称	型号规格	编号	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

H.1 外观检查：

H.2 单色光辐照度不均匀性：_____

信号 (mV)

H.3 偏置光辐照度不均匀性：_____

信号 (mV)

H.4 相对光谱响应示值误差：

波长 (nm)	标准器光谱响应校准值(A/W)	标准器相对光谱响应值 (%)	被检仪器相对光谱响应测量值 (%)				相对示值误差 (%)
			1	2	3	平均值	

H.5 短路电流示值误差：

标准器编号	标准器校准值 (A)	被检仪器短路电流测量值 (A)				示值误差 (A)	相对示值误差 (%)
		1	2	3	平均值		
被检仪器短路电流测量相对示值误差 (%)							

H.6 反射率示值误差：

波长 (nm)	标准值 (%)	测量值 (%)				示值误差 (%)
		1	2	3	平均值	

H.8

H.7 波长示值误差：

波长校准值 (nm)	被检仪器波长测量值 (nm)				示值误差 (nm)
	1	2	3	平均值	
被检仪器波长测量示值误差 (nm)					

校准结果不确定度：

校准员_____ 核验员_____ 校准日期_____