



中华人民共和国工业和信息化部
电子计量技术规范

JJF(电子)XXXX—20XX

光伏电池测试仪校准规范

Calibration Specification for Photovoltaic Cell Testers

(报批稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

光伏电池测试仪 校准规范

Calibration Specification for
Photovoltaic Cell Testers

JJF (电子) XXXX—20XX

归口单位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：广电计量检测（无锡）有限公司

中国电子技术标准化研究院

广电计量检测集团股份有限公司

参加起草单位：广电计量检测（江西）有限公司

晶科能源股份有限公司

陕西众森电能科技有限公司

德雷射科(廊坊)科技有限公司

本规范技术条文委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：

龙阳（广电计量检测(无锡)有限公司）
庄奕（广电计量检测集团股份有限公司）
赵昭（中国电子技术标准化研究院）
赖文强（广电计量检测集团股份有限公司）
黄义尧（广电计量检测集团股份有限公司）

参加起草人：

李鑫（广电计量检测集团股份有限公司）
吴文政（广电计量检测(江西)有限公司）
汤亚泥（广电计量检测集团股份有限公司）
田怡馨（广电计量检测集团股份有限公司）
杨燕华（广电计量检测集团股份有限公司）
沈兴继（晶科能源股份有限公司）
王水威（陕西众森电能科技有限公司）
黄佳（德雷射科（廊坊）科技有限公司）

目 录

引 言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和计量单位	1
4 概述	3
5 计量特性	4
6 校准条件	5
6.1 环境条件	5
6.2 测量标准及其他设备	5
7 校准项目和校准方法	7
7.1 校准项目	7
7.2 校准方法	7
7.2.1 校准前准备	7
7.2.2 光谱匹配度	7
7.2.3 光谱范围	9
7.2.4 光谱偏差	10
7.2.5 辐照空间不均匀度	10
7.2.6 辐照不稳定性	12
7.2.7 温度	14
7.2.8 伏安特性曲线	15
8 校准结果表达	18
9 复校时间间隔	18
附录 A 校准原始记录内页推荐格式	19
附录 B 校准证书内页推荐格式	24
附录 C 校准结果不确定度评定示例	28

引 言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

光伏电池测试仪校准规范

1 范围

本规范适用于光伏电池测试仪的校准。

2 引用文件

JJG 856 工作用辐射温度计检定规程

JJF 1462 直流电子负载校准规范

JJF 1615 太阳模拟器校准规范

GB/T 2297-2025 太阳光伏能源系统术语

GB/T 6495.1-2025 光伏器件 第1部分：光伏电流-电压特性的测量

GB/T 6495.9-2025 光伏器件 第9部分：太阳模拟器特性分级

注：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

以下术语和定义适用于本校准规范：

3.1 AM1.5 条件 AM1.5 condition

太阳辐射通过大气的实际路径与在天顶时通过大气到达观测点的路径之比为1.5时的状态。

[GB/T 2297-2025，测量和试验 7.6]

3.2 光谱匹配度 spectral match

太阳模拟器的光谱匹配度，指与 IEC 60904-3 中规定的 AM1.5 标准光谱辐照度的偏差。

[GB/T 6495.9-2025，术语和定义 3.8]

3.3 AM1.5 光谱范围 AM1.5 spectral coverage

SPC

SPC 参数确定了太阳模拟器光谱辐照度大于 IEC 60904-3 中规定的 AM1.5 标准光谱辐照度 10% 的波长范围。将所有满足该条件的数据点相应的 AM1.5 标准光谱辐照度进行积分，SPC 是所得值与 300 nm 至 1200 nm 范围内 AM1.5 太阳总辐照度的比值。

$$\text{SPC} = \left[\sum_{E_{\text{SIM}}(\lambda) > 0.1 \times E_{\text{AM1.5}}(\lambda)} E_{\text{AM1.5}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda / \sum_{300 \text{ nm}}^{1200 \text{ nm}} E_{\text{AM1.5}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \right] \cdot 100\% \quad (1)$$

[GB/T 6495.9-2025, 术语和定义 3.12]

3.4 AM1.5 光谱偏差 AM1.5 spectral deviation

SPD

在 IEC 60904-3 定义的 300 nm 至 1200 nm 的区间波长范围内, 光谱辐照度值可能高于或低于 IEC 60904-3 中规定的 AM1.5 标准光谱辐照度。光谱匹配度无法检测到这些偏差。SPD 参数代表两条曲线之间的总偏差, 这表征了太阳模拟器光谱辐照度与 AM1.5 光谱辐照度的匹配程度。

$$\text{SPD} = \sum_{300 \text{ nm}}^{1200 \text{ nm}} |E_{\text{SIM}}(\lambda) - E_{\text{AM1.5}}(\lambda)| \cdot \Delta\lambda / \sum_{300 \text{ nm}}^{1200 \text{ nm}} E_{\text{AM1.5}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot 100\% \quad (2)$$

[GB/T 6495.9-2025, 术语和定义 3.13]

3.5 辐照空间不均匀度 non-uniformity of irradiance

$$\text{不均匀度}(\%) = \left[\frac{\text{最大辐照度} - \text{最小辐照度}}{\text{最大辐照度} + \text{最小辐照度}} \right] \times 100\% \quad (3)$$

式中, 最大辐照度和最小辐照度指在指定测试区域用探测器测得的辐照度最大值和最小值。

[GB/T 6495.9-2025, 术语和定义 3.9]

3.6 辐照不稳定性 temporal instability of irradiance

$$\text{不稳定性}(\%) = \left[\frac{\text{最大辐照度} - \text{最小辐照度}}{\text{最大辐照度} + \text{最小辐照度}} \right] \times 100\% \quad (4)$$

式中, 最大辐照度和最小辐照度指在相应的时间间隔内所测得的最大值和最小值。

辐照不稳定性包括短期不稳定性 (Short term instability, 简称 STI) 和长期不稳定性 (Long term instability, 简称 LTI)。

[GB/T 6495.9-2025, 术语和定义 3.10]

3.7 伏安特性曲线 I-V characteristic curve

I-V 曲线 I-V curve

特定温度和辐照度下光伏器件输出电流与输出电压的关系曲线。

主要体现在如下参数: 最大功率 P_{max} , 开路电压 V_{OC} , 短路电流 I_{SC} , 填充因子 FF

等。

[GB/T 2297-2025, 光伏电池及组件 4.38]

3.8 最大功率 maximum power

最大输出功率 maximum output power

$$P_{\max}, P_{\text{mpp}}$$

伏安特性曲线上, 电流与电压乘积的最大值。

[GB/T 2297-2025, 光伏电池及组件 4.39]

3.9 开路电压 open-circuit voltage

$$V_{\text{oc}}$$

特定温度和辐照度下, 光伏器件输出电流为零 (开路) 时的端电压。

[GB/T 2297-2025, 光伏电池及组件 4.43]

3.10 短路电流 short-circuit current

$$I_{\text{sc}}$$

特定温度和辐照度下, 光伏器件在端电压为零 (短路) 时的输出电流。

[GB/T 2297-2025, 光伏电池及组件 4.44]

4 概述

光伏电池测试仪的结构如图 1 所示, 主要由太阳模拟器 (含辐照度传感器)、红外温度探头以及电子负载 (含控制操作系统、I-V 特性曲线测试仪) 等组成。光伏电池测试仪的测量原理是在已知温度下把光伏电池曝露在稳定的自然或模拟阳光下, 测量其电流-电压 (I-V) 特性曲线, 同时也测量入射光辐照度和光伏电池的温度, 用于评估光伏电池的关键性能参数特性。

光伏电池测试仪根据仪器用途的不同可分为: I-V 测试用光伏电池测试仪和非 I-V 测试用光伏电池测试仪。根据模拟光源发光时间特性的不同可分为: 瞬态光伏电池测试仪和稳态光伏电池测试仪, 而瞬态光伏电池测试仪根据模拟光源脉冲时间长短的不同又可分为: 长脉冲瞬态光伏电池测试仪和短脉冲瞬态光伏电池测试仪。

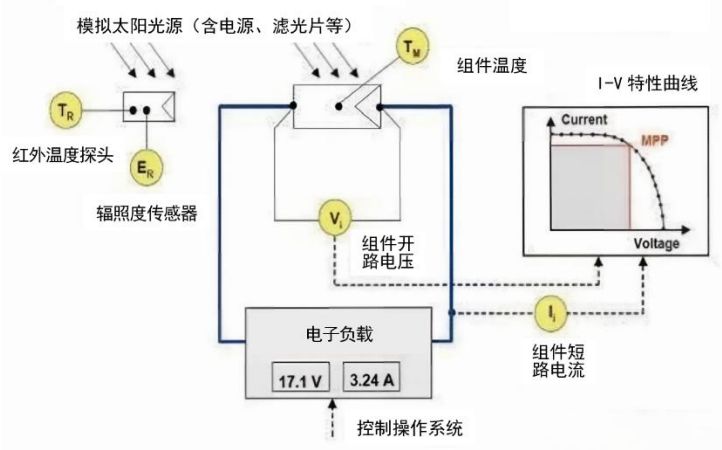


图 1 光伏电池测试仪结构示意图

5 计量特性

5.1 光谱匹配度

范围：0.4~2.0。

5.2 辐照空间不均匀度

≤（1%~10%）。

5.3 辐照不稳定性

5.3.1 短期不稳定性

≤（0.25%~10%）。

5.3.2 长期不稳定性

≤（1%~10%）。

注：不同等级技术指标要求见表 1 所示。

表 1 太阳模拟器等级的定义

等级	光谱匹配度	辐照空间不均匀度 %	辐照不稳定性	
			短期不稳定性 STI %	长期不稳定性 LTI %
A+	0.875~1.125	1	0.25	1
A	0.75~1.25	2	0.5	2
B	0.6~1.4	5	2	5
C	0.4~2.0	10	10	10

5.4 光谱范围

0%~100%。

5.5 光谱偏差

0%~100%。

5.6 温度

测量范围：(15~75)℃；不确定度：≤1℃， $k=2$ 。

5.7 伏安特性曲线

5.7.1 开路电压 V_{oc}

测量范围：10 mV~300 V；不确定度：≤0.2%， $k=2$ 。

5.7.2 短路电流 I_{sc}

测量范围：0.1 mA~20 A；不确定度：≤0.2%， $k=2$ 。

5.7.3 最大功率 P_{max}

测量范围：60 mW~1000 W。

注：

A+等级仅限于在 300 nm~1200 nm 的扩展波长范围内评估设备等级；

原则上，高光谱范围（SPC）值比低光谱范围（SPC）值更理想。本规范不对该参数做出要求；

低光谱偏差（SPD）值比高光谱偏差（SPD）值更理想。光谱偏差（SPD）值可超过 100%。本规范不对该参数做出要求；

以上技术指标仅供参考，不作为符合性判断依据。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(23±5)℃；

6.1.2 相对湿度：≤80%；

6.1.3 电源电压：(220±22) V 或 (380±38) V，频率 (50±1) Hz；

6.1.4 其他条件：环境清洁通风，无影响仪器正常工作的电磁场、机械振动，光学暗室条件。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 光谱辐照度计

波长范围：300 nm~1200 nm，最大允许误差：±2 nm。

6.2.2 辐照度检测器

不稳定性优于 0.2%。

注：对于在线光伏电池测试仪，辐照度检测器的最大尺寸为 20 cm×20 cm。对于实验室光伏电池测试仪，辐照度检测器尺寸不应大于测试区域尺寸的 1/5；如果测试区域的某方向尺寸小于 10 cm，则建议使用光电探测器或带掩膜板的太阳电池。

6.2.3 I-V 转换器

响应时间应小于采样时间，转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%。

注：如辐照度检测器已集成 I-V 转换器模块，则不需要单独配备独立的 I-V 转换器。

6.2.4 参考温度计

测量范围：(15~75) °C；

参考辐射温度计不确定度：0.3 °C， $k=2$ ；

参考接触式温度计不确定度：0.2 °C， $k=2$ 。

6.2.5 辐射源

温度范围：(15~75) °C，具体技术指标见表 2 所示。

表 2 辐射源技术要求

类别	稳定性	均匀性	发射率
黑体辐射源	不大于 (0.1 °C 或 0.1% t 的大者)	不大于 (0.15 °C 或 0.15% t 的大者)	1 ± 0.002 或 1 ± 0.005 1 ± 0.01
面辐射源	不大于 (0.15 °C 或 0.15% t 的大者)	不大于 (0.2 °C 或 0.2% t 的大者)	≥ 0.95

注：

t 为黑体辐射源温度或亮度温度，或面辐射源亮度温度；

本规范主要描述使用参考温度计与辐射源的组合形式进行校准的情况，在具备条件情况下亦可采用满足 JJG 856 要求的参考辐射源形式进行校准。

6.2.6 数据采集仪或数字电压表

测量范围：10 mV~300 V，最大允许误差：±0.1%。

6.2.7 电流传感器

测量范围：0.1 mA~20 A，最大允许误差：±0.1%。

6.2.8 直流标准电压源

范围：10 mV～300 V，最大允许误差：±0.05%。

6.2.9 直流标准电流源

范围：0.1 mA～20 A，最大允许误差：±0.05%。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 3 所示。

表 3 校准项目

序号	校准项目	校准方法
1	光谱匹配度	7.2.2
2	光谱范围	7.2.3
3	光谱偏差	7.2.4
4	辐照空间不均匀度	7.2.5
5	辐照不稳定性	7.2.6
6	温度	7.2.7
7	伏安特性曲线	7.2.8

7.2 校准方法

7.2.1 校准前准备

7.2.1.1 光伏电池测试仪的外形结构应完好。开关、按键、旋钮操作灵活可靠，外露件不应有影响正常工作的松动和机械损伤。

7.2.1.2 被校光伏电池测试仪应正常工作，确认被校设备有效工作面积区域。

7.2.1.3 校准前打开辐照光源并恒温三十分钟以上，若为瞬态光源可根据实际环境温度情况调整缩短恒温时间。

7.2.2 光谱匹配度

7.2.2.1 按图 2 所示连接测试系统。将光谱辐照度计探头按图 3 所示测量点位置放置，在有效波段范围内至少每隔 10 nm 测量光伏电池测试仪有效辐照区域内各个测量位置处的光谱辐照度。对于多灯光伏电池测试仪的矩形有效辐照区域，如果单个灯仅照射辐照区域的一部分，则需要更多数量的测量位置。

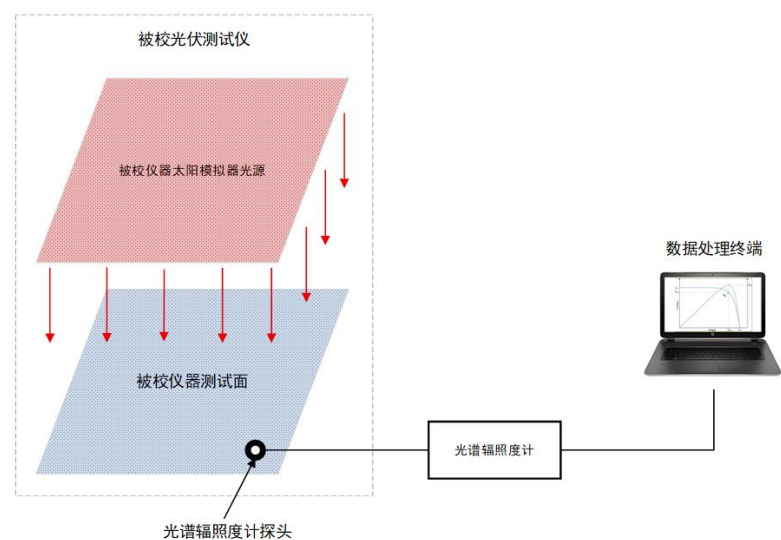


图 2 光谱匹配度、光谱范围和光谱偏差校准接线图

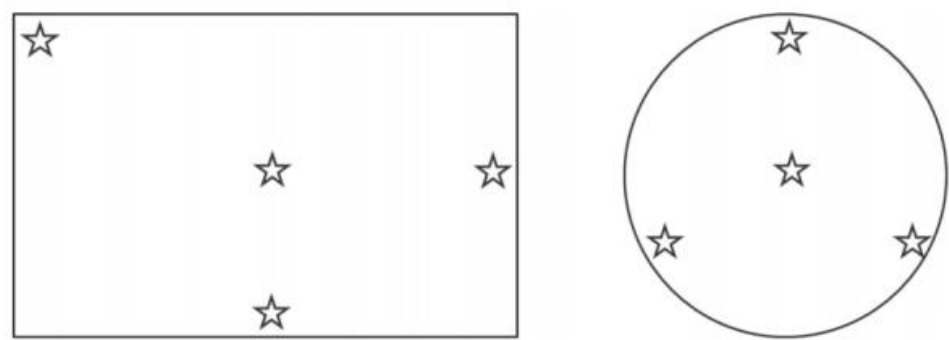


图 3 矩形测试区域（左）和圆形测试区域（右）的光谱辐照度测量位置

7.2.2.2 根据被校仪器的光谱范围，选择（400 nm～1100 nm）或者（300 nm～1200 nm）作为有效光谱范围，按公式（5）分别计算各个测量位置采集的光谱辐照度数据在有效波段范围内的总辐照度在各波长间隔内的光谱辐照度分布（即占总辐照度的百分比），记录于附录 A.1 中。

表 4 （400 nm～1100 nm）波长范围内 AM1.5 标准光谱辐照度分布

序号	波长范围/nm	占有有效波段内总辐照度的百分比
1	400～500	18.4%
2	500～600	19.9%
3	600～700	18.4%
4	700～800	14.9%
5	800～900	12.5%
6	900～1100	15.9%

表 5 (300 nm~1200 nm) 波长范围内 AM1.5 标准光谱辐照度分布

序号	波长范围/nm	占有效波段内总辐照度的百分比
1	300~470	16.61%
2	470~561	16.74%
3	561~657	16.67%
4	657~772	16.63%
5	772~919	16.66%
6	919~1200	16.69%

$$SPR_{\lambda} = \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} d\lambda / \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} E_{\lambda} d\lambda \right] \times 100\% \quad (5)$$

式中:

SPR_{λ} ——表 4 或表 5 中定义的波长范围内光谱辐照度占有效波段范围内总辐照度的百分比;

E_{λ} ——在有效辐照区域内测得的光谱辐照度, $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$;

λ_1 ——表 4 或表 5 中定义的波长范围下限值, nm;

λ_2 ——表 4 或表 5 中定义的波长范围上限值, nm;

$\lambda_{\min}$ ——有效波段的波长下限值, nm;

$\lambda_{\max}$ ——有效波段的波长上限值, nm。

7.2.2.3 按公式 (6) 计算各个测量位置各波长区间的光谱匹配度, 记录于附录 A.1 中。

$$SPM = (SPR_{\lambda} / SPR_{AM1.5}) \times 100\% \quad (6)$$

式中:

SPM ——光谱匹配度;

$SPR_{AM1.5}$ ——表 4 或表 5 中定义的波长范围内 AM1.5 标准太阳光谱辐照度占有效波段范围内总辐照度的百分比。

7.2.2.4 对比表 1 等级划分的数值, 确定光谱匹配度的等级。光伏电池测试仪的光谱匹配度分级由最差的测量位置及各波长范围最差的光谱匹配度等级决定。

7.2.3 光谱范围

7.2.3.1 按图 2 所示连接测试系统。

7.2.3.2 在 300 nm~1200 nm 范围内对 AM1.5 标准太阳光谱和光伏电池测试仪光谱辐

照度进行归一化, 使得总积分辐照度为 1。

7.2.3.3 计算低光谱辐照度阈值 $10\% \times E_{AM1.5}(\lambda)$ 。

7.2.3.4 计算所有满足 $E_{SIM}(\lambda) > 0.1 \times E_{AM1.5}(\lambda)$ 条件的光谱辐照度数据点的 AM1.5 光谱积分辐照度。

7.2.3.5 使用 7.2.2.1 测量的光谱辐照度数据, 按公式 (7) 计算各测量位置点的光谱范围, 取各测量位置点光谱范围的最小值作为光伏电池测试仪光谱范围的最终结果, 记录于附录 A.2 中。

$$SPC = \left[\sum_{E_{SIM}(\lambda) > 0.1 \times E_{AM1.5}(\lambda)} E_{AM1.5}(\lambda) \cdot \Delta\lambda / \sum_{300 \text{ nm}}^{1200 \text{ nm}} E_{AM1.5}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \right] \cdot 100\% \quad (7)$$

式中:

$E_{SIM}(\lambda)$ ——经归一化处理的光伏电池测试仪光谱辐照度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$;

$E_{AM1.5}(\lambda)$ ——经归一化处理的标准太阳光谱辐照度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$;

$\Delta\lambda$ ——波长间隔, nm。

7.2.4 光谱偏差

7.2.4.1 按图 2 所示连接测试系统。

7.2.4.2 在 300 nm~1200 nm 范围内对 AM1.5 标准太阳光谱和光伏电池测试仪光谱辐照度进行归一化, 使得总积分辐照度为 1。

7.2.4.3 计算每个波长的 $|E_{SIM}(\lambda) - E_{AM1.5}(\lambda)|$ 。

7.2.4.4 使用 7.2.2.1 测量的光谱辐照度数据, 按公式 (8) 计算各测量位置点的光谱偏差, 取各测量位置点光谱偏差的最大值作为光伏电池测试仪光谱偏差的最终结果, 记录于附录 A.3 中。

$$SPD = \sum_{300 \text{ nm}}^{1200 \text{ nm}} |E_{SIM}(\lambda) - E_{AM1.5}(\lambda)| \cdot \Delta\lambda / \sum_{300 \text{ nm}}^{1200 \text{ nm}} E_{AM1.5}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot 100\% \quad (8)$$

7.2.5 辐照空间不均匀度

7.2.5.1 按图 4 所示连接测试系统, 按图 5 所示放置辐照度检测器。将光伏电池测试仪有效辐照区域的边角确定为参考点, 并作为辐照度检测器的起始位置, 使辐照度检测器的边缘与参考点重合 (如测试点 A1)。将有效辐照面均等划分为若干个测试区域, 测试区域的测量面积总和应大于有效辐照面面积的 80%。区域的个数由光伏电池测试仪总的有效辐射区域面积所决定。

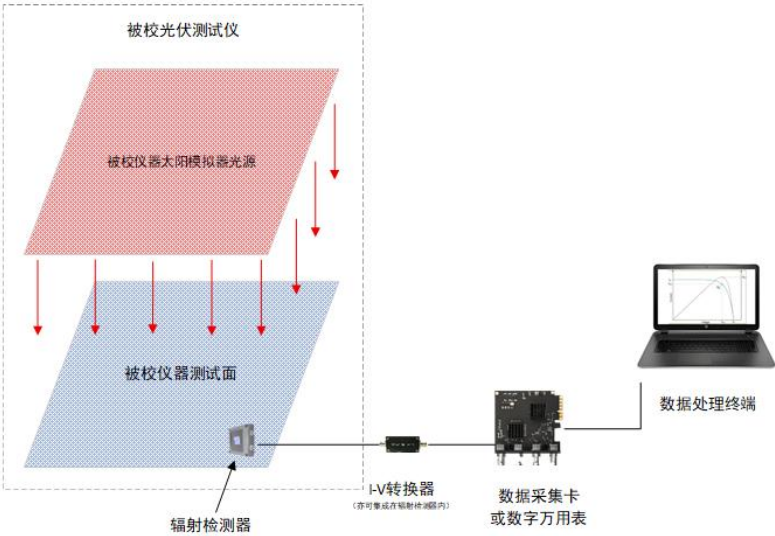


图 4 辐照空间不均匀度和辐照不稳定性校准接线图

测试点A1	测试点B1	测试点C1	测试点D1		测试点N1
测试点A2	测试点B2	测试点C2	测试点D2		测试点N2
.....					
测试点An	测试点Bn	测试点Cn	测试点Dn		测试点Nn

图 5 辐照空间不均匀度校准测量位置

7.2.5.2 对于稳态的光伏电池测试仪，用辐照度检测器沿着有效辐照面内选定的方向在划定的测试区域内移动，采集其在每个区域的信号。对于实验室光伏电池测试仪，移动辐照度检测器的步宽最大应为测试区域最小尺寸的 1/5，如果测试区域的某方向尺寸小于 10 cm，则建议使用光电探测器或带掩模板的太阳电池。

7.2.5.3 对于瞬态的光伏电池测试仪，其辐照度检测器移动测量过程同稳态的光伏电池测试仪。由于单次闪光脉冲辐照度检测器只能测量到一个区域的辐照度，因此整个测量过程需要多次闪光脉冲才能完成。为了避免多次闪光脉冲重复性影响不均匀度的计量结果，需要在有效辐照面内的固定位置放置另一个辐照度检测器，以监测修正多次闪光脉冲辐照度的变化。

7.2.5.4 在整个有效辐照面的各测试区域内，用数据采集仪或数字万用表采集辐照度检

测器的输出信号，记录于附录 A.4 中。按公式 (9) 计算辐照空间不均匀度，记录于附录 A.4 中。

$$\text{辐照空间不均匀度}(\%) = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{(V_{\max} + V_{\min})} \times 100\% \quad (9)$$

式中：

$V_{\max}$ ——在有效辐照面用辐照度检测器测得的信号最大值，mV；

$V_{\min}$ ——在有效辐照面用辐照度检测器测得的信号最小值，mV。

7.2.5.5 对比表 1 等级划分的数值，确定光伏电池测试仪辐照空间不均匀度的等级。

7.2.6 辐照不稳定性

7.2.6.1 按图 4 所示连接测试系统。

7.2.6.2 短期不稳定性 (STI)

1) 将辐照度检测器放置在有效辐照面内任意固定位置。

2) 对于 I-V 测试用光伏电池测试仪：

若光伏电池测试仪可以同时采集辐照度、电流和电压数值，则短期不稳定性等级为 A 级 (如波长范围在 400 nm~1100 nm 进行光谱分级) 或 A+级 (如波长范围在 300 nm~1200 nm 进行光谱分级)。

若光伏电池测试仪无法同时采集辐照度、电流和电压数值，则分别测量 I-V 曲线上每个数据所对应的上述三个信号采集时间间隔内辐照度检测器信号的变化，如图 6、图 7 所示。取其中变化最大的一组信号用于评定其短期不稳定性。

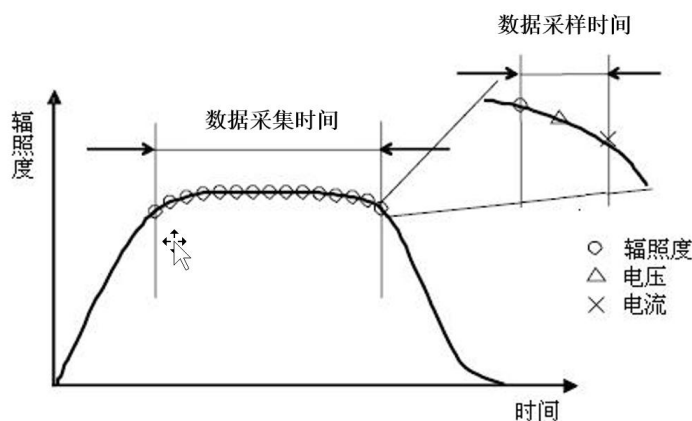


图 6 长脉冲光伏电池测试仪的辐照不稳定性评估

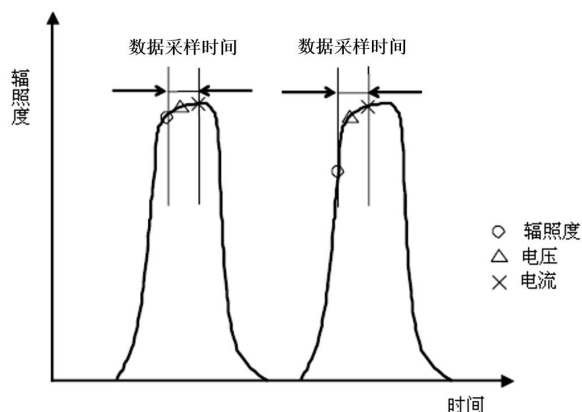


图7 短脉冲光伏电池测试仪的辐照不稳定度评估

若光伏电池测试仪在测量过程中没有辐照度监测的光伏电池组件的测量,则不进行短期不稳定度评级。

- 3) 对于非 I-V 测试用光伏电池测试仪, 不进行短期不稳定度评级。
- 4) 用数据采集仪或数字万用表采集辐照度检测器的输出信号, 找出辐照度检测器信号的最大值和最小值, 按公式 (10) 进行计算短期不稳定度 STI, 记录于附录 A.5 中。

$$STI = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{(V_{\max} + V_{\min})} \times 100\% \quad (10)$$

式中:

$V_{\max}$ ——在有效辐照面用辐照度检测器测得的信号最大值, mV;

$V_{\min}$ ——在有效辐照面用辐照度检测器测得的信号最小值, mV。

- 5) 对比表 1 等级划分的数值, 确定光伏电池测试仪短期不稳定度的等级。

7.2.6.3 长期不稳定度 (LTI)

1) 瞬态光伏电池测试仪长期不稳定度 (LTI):

对于长脉冲的瞬态光伏电池测试仪, 其长期不稳定度是指在单个脉冲数据采集时间内的辐照度变化, 如图 6 所示。将辐照度检测器置于有效辐照面内选定位置, 并确定脉冲数据采集时间范围, 测量在这个时间范围内辐照度检测器信号。

对于短脉冲的瞬态光伏电池测试仪, 其长期不稳定度是指在测试整条 I-V 曲线过程中所需的多个单脉冲中数据采集时间内的最大辐照度变化, 如图 7 所示。方法同长脉冲瞬态光伏电池测试仪。

2) 稳态光伏电池测试仪长期不稳定度 (LTI):

将辐照度检测器置于有效辐照面内选定位置, 在一定总时间内, 根据设备要求每隔固定时间用数据采集仪或数字万用表采集辐照度检测器的输出信号。

3) 找出辐照度检测器信号的最大值和最小值,按公式(11)进行计算长期不稳定性 LTI,记录于附录 A.5 中。

$$LTI = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{(V_{\max} + V_{\min})} \times 100\% \quad (11)$$

式中:

$V_{\max}$ ——在有效辐照面用辐照度检测器测得的信号最大值, mV;

$V_{\min}$ ——在有效辐照面用辐照度检测器测得的信号最小值, mV。

4) 对比表 1 等级划分的数值,确定光伏电池测试仪长期不稳定性等级。

7.2.7 温度

7.2.7.1 按图 8 所示连接设备。将光伏电池测试仪的温度探头安装在黑体辐射源空腔或黑体面前方轴线延长线上,瞄准辐射源中心,读取参考温度计标准值与被校设备的温度显示值,计算校准结果。

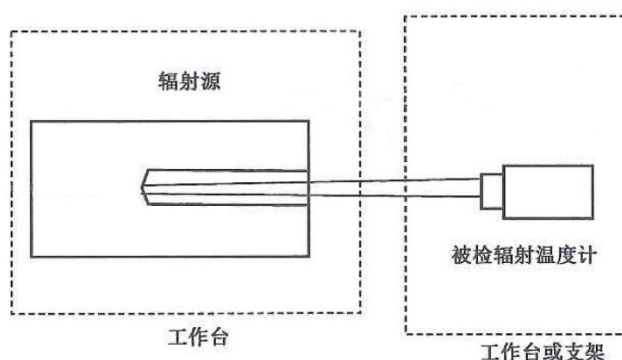


图 8 温度校准连接图

7.2.7.2 调整辐射源设定值,使稳定后的辐射源量值与校准点偏差不超过被校红外温度传感器最大允许误差的 2 倍。按照“标准 → 被检 → 被检 → 标准”的顺序记录两次测量数据,记录于附录 A.6 中。

7.2.7.3 按公式(12)计算辐射源实际亮度温度与校准点 t_N 的差 Δt_S :

$$\Delta t_S = t_{SC} - t_N + (t_{SI} - t_{SIC}) \quad (12)$$

式中:

t_{SC} ——由参考辐射源证书确定的对应于校准点 t_N 的亮度温度值, °C;

t_{SI} ——参考辐射源指示温度两次实际值的平均值, °C;

t_{SIC} ——由参考辐射源证书确定的对应于校准点 t_N 的指示温度, °C。

7.2.7.4 按公式(13)计算被校温度探头实际示值与校准点 t_N 的差 Δt_T :

$$\Delta t_T = t_T - t_N \quad (13)$$

式中:

t_T ——被校温度探头两次示值的平均值, °C。

7.2.7.5 按公式 (14) 计算被校温度探头的固有误差, 记录于附录 A.6 中:

$$\Delta t = (\Delta t_T - \Delta t_S) - \Delta t_{V_\varepsilon} - \Delta t_W \quad (14)$$

式中:

Δt ——被校温度探头在校准点 t_N 处的固有误差, °C;

Δt_{V_ε} ——辐射源发射率偏离 1 对固有误差的影响, °C;

Δt_W ——高温黑体辐射源窗口引入的固有误差的窗口误差, °C。

7.2.8 伏安特性曲线

7.2.8.1 方法一: 光伏电池组件法

1) 按图 9 所示连接设备。

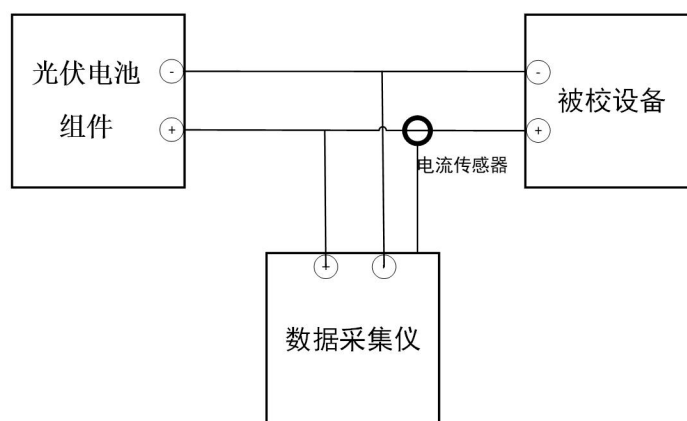


图 9 伏安特性曲线校准接线图 (光伏电池组件法)

2) 根据被校光伏电池测试仪的测试量程, 选择合适的光伏电池组件 (标准光伏电池、光伏电池片或光伏组件)。将光伏电池组件放置于光源辐照面内。数据采集仪电流端口连接电流传感器, 数据采集仪电压采集端口与光伏电池组件输出端连接, 测量数据采集仪电压采集通道所输出零点电压值 V_{sv0} 和电流传感器输出零点电压值 V_{si0} 。

3) 利用被校设备测量并记录光伏电池组件实际输出 I-V 曲线各关键参数 (短路电流 I_{scm} 、开路电压 V_{ocm} 和最大功率 P_{mm}) 测量值, 同时利用数据采集仪测量光伏电池组件电流和电压输出信号, 得到光伏电池组件输出电压 V_{sv1} 和电流传感器输出电压 V_{si1} 随时间的变化曲线 1。

4) 按公式 (15) ~ (17) 分别计算电流 I_s 、电压 V_s 和功率 P_s , 得到光伏电池组件输出电流 (电流传感器原边输入电流) I_s 、输出电压 V_s 、输出功率 P_s 随采样时间的变化曲线 2。

$$I_s = (V_{si1} - V_{si0})/KH \quad (15)$$

$$V_s = V_{sv1} - V_{sv0} \quad (16)$$

$$P_s = I_s \cdot V_s \quad (17)$$

式中:

KH ——传感器灵敏度系数。

5) 从上述的变化曲线 2 中读取并记录输出电流 $I_s = 0$ 时所对应的电压值为开路电压标准值 V_{ocs} , 取输出电压 $V_s = 0$ 时对应的电流值为短路电流标准值 I_{scs} , 取功率 P_s 最大值为最大功率标准值 P_{ms} , 记录于附录 A.7 中。

6) 按公式 (18) ~ (20) 分别计算短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 和最大功率 P_{max} 的标准值与测量值的比值, 得到被校设备伏安特性曲线各参数的修正系数, 记录于附录 A.7 中。

$$f_{I_{sc}} = I_{scs}/I_{scm} \quad (18)$$

$$f_{V_{oc}} = V_{ocs}/V_{ocm} \quad (19)$$

$$f_{P_{max}} = P_{ms}/P_{mm} \quad (20)$$

式中:

$f_{I_{sc}}$ ——伏安特性曲线短路电流 I_{sc} 的修正系数;

$f_{V_{oc}}$ ——伏安特性曲线开路电压 V_{oc} 的修正系数;

$f_{P_{max}}$ ——伏安特性曲线最大功率 P_{max} 的修正系数。

7.2.8.2 方法二: 标准源法

标准源法仅适用于具有静态电压、静态电流采集功能的光伏电池测试仪。

1) 按图 10 所示用直流标准电压源连接设备。

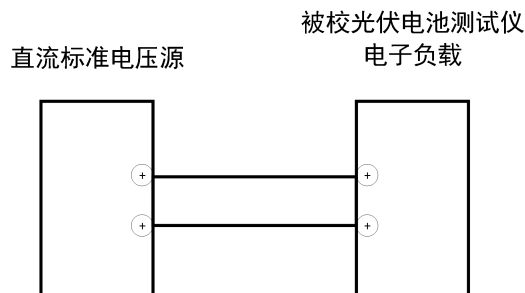


图 10 伏安特性曲线校准接线图（标准源法 - 标准电压源）

- 2) 根据校准点设定直流标准电压源的电压输出值 V_s ，记录被校仪器电子负载的电压显示值 V_x ，按公式 (21) 计算电压修正系数，记录于附录 A.7 中。

$$f_V = \frac{V_s}{V_x} \quad (21)$$

式中：

f_V ——电压修正系数。

- 3) 将光伏电池测试仪置于恒定电流模式，按照图 11 所示用直流标准电流源连接被校设备。

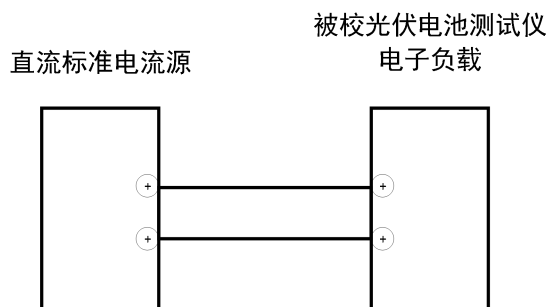


图 11 伏安特性曲线校准原理图（标准源法 - 标准电流源）

- 4) 根据校准点设定直流标准电流源的电流输出值 I_s ，记录被校设备电子负载的电流显示值 I_x ，按公式 (22) 计算电流修正系数，记录于附录 A.7 中。

$$f_I = \frac{I_s}{I_x} \quad (22)$$

式中：

f_I ——电流修正系数。

- 5) 设置直流电子负载为恒定功率模式，按图 7 连接直流标准源和被校设备。调整直流标准源的电压为被校设备预期使用的电压或电压量程的 90%。测得输入到被校设备端口的功率标准值 P_s 和被校仪器功率显示值 P_x ，按公式 (23) 计算功率修正系数，记录于附

录 A.7 中。

$$f_P = \frac{P_s}{P_x} \quad (23)$$

式中：

f_P ——功率修正系数。

8 校准结果表达

光伏电池测试仪校准后，出具校准证书，校准证书应包括以下信息：

- 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有效的说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定，但推荐为 1 年。

附录 A

校准原始记录内页推荐格式

A.1 光谱匹配度



图 A.1 光谱辐照度测量位置

A.1.1 1#测量位置点光谱匹配度



图 A.2 1#测量位置点光谱分布图

	波长范围 (nm)	AM1.5 条件有效波段内积 分辐照度的百分比	光伏电池测试仪有效波段 内积分辐照度的百分比	光谱匹配度
1	300~470	16.61		
2	470~561	16.74		
3	561~657	16.67		
4	657~772	16.63		
5	772~919	16.66		
6	919~1200	16.69		

A.1.2 2#测量位置点光谱匹配度

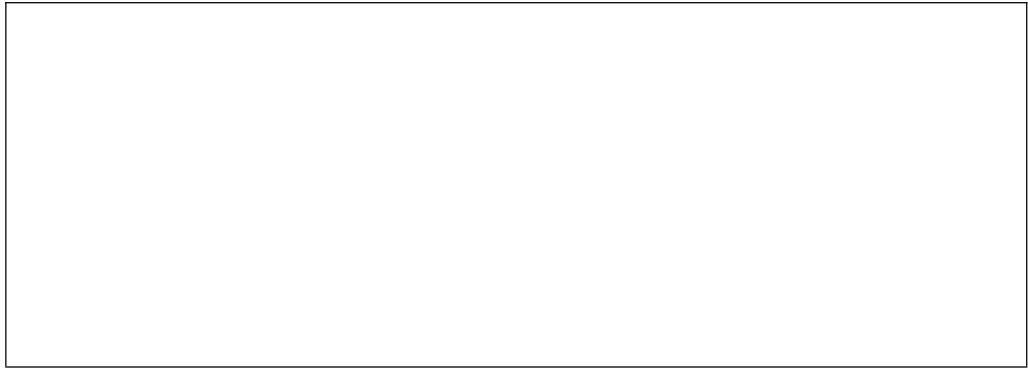


图 A.3 2#测量位置点光谱分布图

	波长范围 (nm)	AM1.5 条件有效波段内积分辐照度的百分比	光伏电池测试仪有效波段内积分辐照度的百分比	光谱匹配度
1	300~470	16.61		
2	470~561	16.74		
3	561~657	16.67		
4	657~772	16.63		
5	772~919	16.66		
6	919~1200	16.69		

A.1.3 3#测量位置点光谱匹配度



图 A.4 3#测量位置点光谱分布图

	波长范围 (nm)	AM1.5 条件有效波段内积分辐照度的百分比	光伏电池测试仪有效波段内积分辐照度的百分比	光谱匹配度
1	300~470	16.61		
2	470~561	16.74		
3	561~657	16.67		
4	657~772	16.63		

5	772~919	16.66		
6	919~1200	16.69		

A.1.4 4#测量位置点光谱匹配度

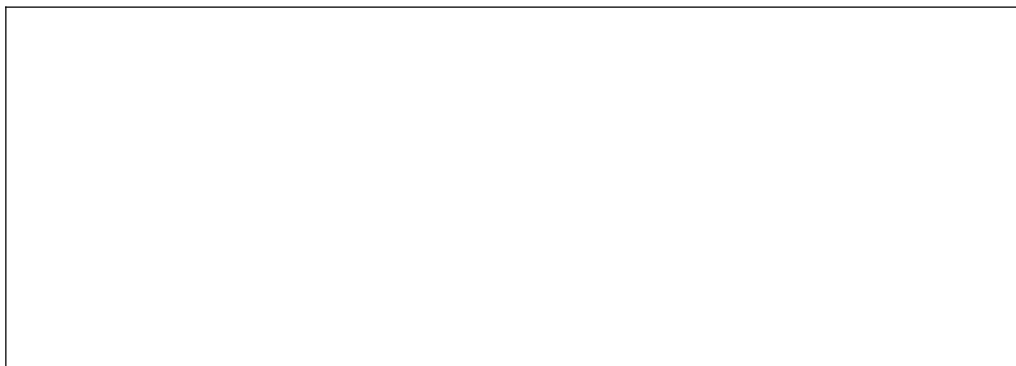


图 A.5 4#测量位置点光谱分布图

	波长范围 (nm)	AM1.5 条件有效波段内积 分辐照度的百分比	光伏电池测试仪有效波段 内积分辐照度的百分比	光谱匹配度
1	300~470	16.61		
2	470~561	16.74		
3	561~657	16.67		
4	657~772	16.63		
5	772~919	16.66		
6	919~1200	16.69		

A.2 光谱范围

位置	1#	2#	3#	4#	SPI
光谱范围/%					

A.3 光谱偏差

位置	1#	2#	3#	4#	SPD
光谱范围/%					

A.4 辐照空间不均匀度



图 A.6 辐照空间不均匀度校准区域划分示意图

	1	2	3	4	5	6
A						
B						
C						
D						
E						
F						
...						

	7	8	9	10	11	...
A						
B						
C						
D						
E						
F						
...						

辐照空间不均匀度 (%): _____

A.5 辐照不稳定性

短期不稳定性 (%): _____

长期不稳定性 (%): _____

A.6 温度

校准点 /°C	标准器示值/°C				被检示值/°C			固有误差 /°C
	1	2	平均值	修正值	1	2	平均值	

A.7 伏安特性曲线

	标准器示值			被校电子负载示值		
	短路电流 I_{sc}/A	开路电压 V_{oc}/V	最大功率 P_{max}/W	短路电流 I_{sc}/A	开路电压 V_{oc}/V	最大功率 P_{max}/W
1						
2						
3						
平均值						

光伏电池测试仪 I-V 曲线各关键参数修正系数如下：

	短路电流 I_{sc}	开路电压 V_{oc}	最大功率 P_{max}
修正系数			

A.8 不确定度描述：

A.8.1 光谱匹配度： $U_{rel}= \quad (k=2)$ ；

A.8.2 光谱范围： $U_{rel}= \quad (k=2)$ ；

A.8.3 光谱偏差： $U_{rel}= \quad (k=2)$ ；

A.8.4 辐照空间不均匀度： $U_{rel}= \quad (k=2)$ ；

A.8.5 辐照不稳定性： $U_{rel}= \quad (k=2)$ ；

A.8.6 温度： $U= \quad (k=2)$ ；

A.8.7 伏安特性曲线：

短路电流： $U_{rel}= \quad (k=2)$ ；

开路电压： $U_{rel}= \quad (k=2)$ ；

最大功率： $U_{rel}= \quad (k=2)$ 。

附录 B

校准证书内页推荐格式

证书编号：XXXX

校 准 结 果

B.1 光谱匹配度

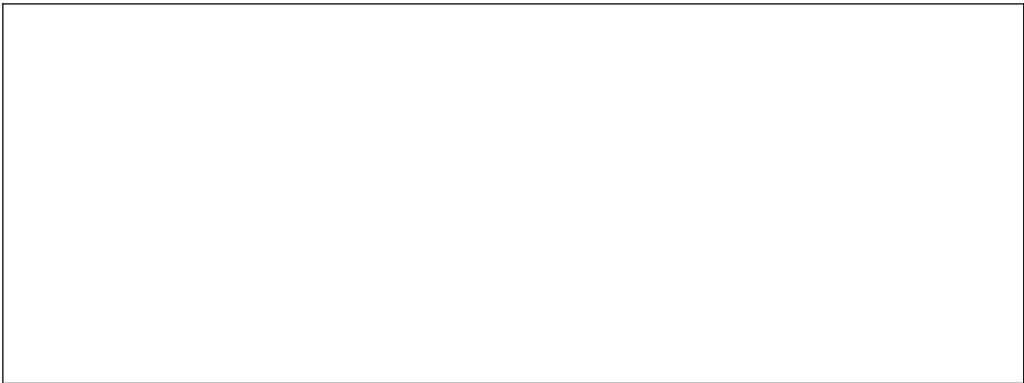


图 B.1 光伏电池测试仪与 AM1.5 光谱辐照度分布图

	波长范围 (nm)	AM1.5 条件有效波段内积 分辐照度的百分比	光伏电池测试仪有效波段 内积分辐照度的百分比	光谱匹配度
1	300~470	16.61		
2	470~561	16.74		
3	561~657	16.67		
4	657~772	16.63		
5	772~919	16.66		
6	919~1200	16.69		

B.2 光谱范围

光伏电池测试仪光谱范围为：SPC =

B.3 光谱偏差

光伏电池测试仪光谱偏差为：SPD =

证书编号：XXXX

校准结果

B.4 辐照空间不均匀度

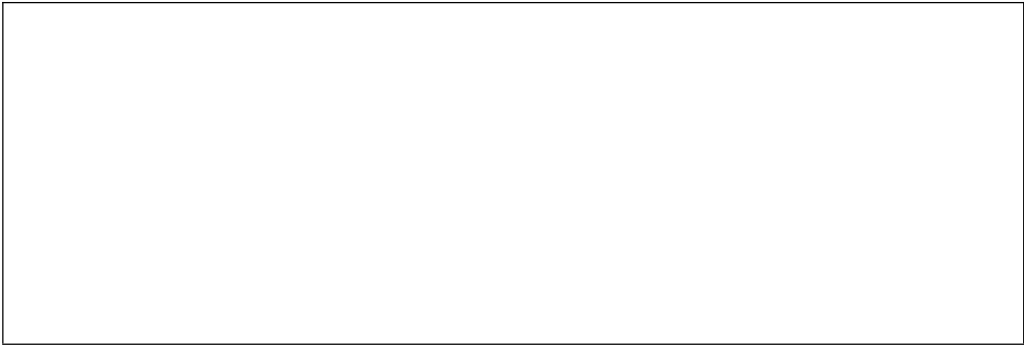


图 B.2 辐照空间不均匀度校准区域划分示意图

	1	2	3	4	5	6
A						
B						
C						
D						
E						
F						
...						

	7	8	9	10	11	...
A						
B						
C						
D						
E						
F						
...						

辐照空间不均匀性（%）：_____

证书编号：XXXX

校准结果

B.5 辐照不稳定度

短期不稳定性（%）：_____

长期不稳定性（%）：_____

光伏电池测试仪的等级为：

光谱匹配度	辐照空间不均匀度	辐照不稳定度
在 300 nm～470 nm 范围内（ ） 在 470 nm～561 nm 范围内（ ） 在 561 nm～657 nm 范围内（ ） 在 657 nm～772 nm 范围内（ ） 在 772 nm～919 nm 范围内（ ） 在 919 nm～1200 nm 范围内（ ）	在* m×* m 的测试面内辐照 空间不均匀度为（ ）	短期不稳定度（ ）
		长期不稳定度（ ）
等级（ ）	等级（ ）	等级（ ）

B.6 温度

校准点/℃	标准器示值/℃	仪器示值/℃	固有误差/℃

证书编号: XXXX

校准结果

B.7 伏安特性曲线

	短路电流 I_{sc}/A	开路电压 V_{oc}/V	最大功率 P_{max}/W
标准器			
被校准设备			

光伏电池测试仪 I-V 曲线各关键参数修正系数如下:

	短路电流 I_{sc}	开路电压 V_{oc}	最大功率 P_{max}
修正系数			

B.8 不确定度描述:

B.8.1 光谱匹配度: $U_{rel} = \quad (k=2);$ B.8.2 光谱范围: $U_{rel} = \quad (k=2);$ B.8.3 光谱偏差: $U_{rel} = \quad (k=2);$ B.8.4 辐照空间不均匀度: $U_{rel} = \quad (k=2);$ B.8.5 辐照不稳定性: $U_{rel} = \quad (k=2);$ B.8.6 温度: $U = \quad (k=2);$

B.8.7 伏安特性曲线:

短路电流: $U_{rel} = \quad (k=2);$ 开路电压: $U_{rel} = \quad (k=2);$ 最大功率: $U_{rel} = \quad (k=2)。$

附录 C

校准结果不确定度评定示例

C.1 光伏电池测试仪光谱匹配度校准不确定度的评定

C.1.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{r1}

同等条件下重复测量同一光伏电池测试仪的光谱，其光谱匹配度数据如表 C.1 所示。

表 C.1 光谱匹配度重复测量数据

测量序次	300 nm～ 470 nm	470 nm～ 561 nm	561 nm～ 657 nm	657 nm～ 772 nm	772 nm～ 919 nm	919 nm～ 1200 nm
1	90.7	100.6	115.8	106.5	92.7	91.6
2	90.4	100.5	115.4	106.8	92.5	91.6
3	90.9	100.4	115.4	106.4	92.2	91.6
4	90.3	100.5	115.6	107.0	92.4	91.2
5	90.5	100.4	115.8	106.4	92.4	91.6
6	90.8	100.4	115.5	106.9	92.4	91.8
7	90.7	100.4	115.3	106.9	92.8	91.1
8	90.6	100.4	115.8	106.6	92.6	91.2
9	90.9	100.4	115.5	106.6	92.8	91.6
10	90.9	100.6	115.4	106.8	92.6	91.3
相对实验 标准偏差 S	0.24%	0.08%	0.16%	0.20%	0.21%	0.26%

取重复性偏差最大波段对应重复性数据作为光伏电池测试仪光谱匹配度重复性测量数据。则测量重复性引入的不确定度分量为

$$u_{r1} = s = 0.26\%$$

C.1.2 由光谱辐照计不准引入的不确定度分量 u_{r2}

由光谱辐照计的溯源证书知，在（300～1200）nm 内，扩展不确定度如表 C.2 所示， $k = 2$ ，按 $u_{r2} = U_{\text{rel}}/k$ 计算由光谱辐照计校准引入的不确定度分量 u_{r2} 。

表 C.2 光谱辐照计不准引入的不确定度

波长/nm	U_{rel}	u_{r2}	波长/nm	U_{rel}	u_{r2}
300	7.0%	3.50%	390	5.0%	2.50%
310	6.8%	3.40%	400	4.4%	2.20%

320	6.5%	3.25%	410	4.3%	2.15%
330	6.2%	3.10%	420	4.2%	2.10%
340	6.0%	3.00%	430	4.1%	2.05%
350	5.8%	2.90%	440	4.0%	2.00%
360	5.6%	2.80%	450~1050	3.9%	1.95%
370	5.3%	2.65%	1100~1200	4.0%	2.00%
380	5.1%	2.55%			

C.1.3 入射角度引入的不确定度分量 u_{r3}

通过改变光谱辐照计探头角度，确定由余弦修正带来的误差，数据如表 C.3 所示。

表 C.3 不同入射角度的光谱匹配度测量数据

波长范围/nm		300~470	470~561	561~657	657~772	772~919	919~1200
0°	比值/%	95.8	92.7	92.7	100.0	118.3	104.3
5°	比值/%	95.6	92.7	92.6	100.0	118.2	104.2
15°	比值/%	95.4	92.4	92.4	99.6	117.8	103.8
最大偏差		0.42%	0.32%	0.32%	0.40%	0.42%	0.48%

采用最大偏差波段范围对应数据作为光伏电池测试仪入射角度影响的分析数据，视为均匀分布，则：

$$u_{r3} = 0.28\%$$

C.1.4 温度偏差引起的不确定度分量 u_{r4}

光谱匹配度测试过程中，光谱辐照计使用温度范围为 $(25 \pm 15)^\circ\text{C}$ ，在 10°C 、 25°C 和 40°C 条件下分别测量同一光伏电池测试仪的光谱辐照度分布，测量光谱匹配度数据如表 C.4 所示。

表 C.4 不同温度下的光谱匹配度测量数据

波长/nm	M_1 (10°C)	M_2 (25°C)	M_3 (40°C)	温度偏差 -15°C	温度偏差 $+15^\circ\text{C}$
300~470	90.6	90.5	90.1	0.11%	-0.44%
470~561	100.3	100.4	100.1	-0.10%	-0.30%
561~657	116.0	115.8	115.5	0.17%	-0.26%
657~772	106.6	106.4	106.2	0.19%	-0.19%
772~919	92.7	92.4	92.8	0.32%	0.43%
919~1200	91.2	91.6	92.4	-0.44%	0.87%

采用最大偏差波段范围对应数据作为光伏电池测试仪温度影响的分析数据，视为正态分布， $k = 2$ ，则：

$$u_{r4} = 0.44\%$$

C.1.5 合成标准不确定度及扩展不确定度

各不确定度分量不相关，计算合成标准不确定度，取包含因子 $k=2$ ，计算扩展不确定度，计算结果如表 C.5 所示。

表 C.5 合成标准不确定度及相对扩展不确定度

波长/nm	合成标准不确定度 $u_{cr}(SM)$	扩展不确定度 $U_r(SM)$ ($k=2$)	波长/nm	合成标准不确定度 $u_{cr}(SM)$	扩展不确定度 $U_r(SM)$ ($k=2$)
300	3.55%	7.1%	390	2.57%	5.2%
310	3.45%	6.9%	400	2.28%	4.6%
320	3.31%	6.7%	410	2.23%	4.5%
330	3.16%	6.4%	420	2.18%	4.4%
340	3.06%	6.2%	430	2.14%	4.3%
350	2.96%	6.0%	440	2.09%	4.2%
360	2.86%	5.8%	450~1050	2.04%	4.1%
370	2.72%	5.5%	1100~1200	2.09%	4.2%
380	2.62%	5.3%			

C.2 光伏电池测试仪光谱范围校准不确定度的评定

C.2.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{r1}

同等条件下重复测量同一光伏电池测试仪的光谱，其光谱范围数据如表 C.6 所示。

表 C.6 光谱范围重复测量数据

测量序次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
光谱范围	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

取重复性偏差最大波段对应重复性数据作为光伏电池测试仪光谱范围重复性测量数据。则测量重复性引入的不确定度为

$$u_{r1} = s = 0.0\%$$

C.2.2 由光谱辐照计不准引入的不确定度分量 u_{r2}

由光谱辐照计的溯源证书知，在 (300~1200) nm 内，扩展不确定度如表 C.7 所示， $k=2$ ，按 $u_{r2} = U_{rel}/k$ 计算由光谱辐照计校准引入的不确定度 u_{r2} 。

表 C.7 光谱辐照计不准引入的不确定度

波长/nm	U_{rel}	u_{r2}	波长/nm	U_{rel}	u_{r2}
300	7.0%	3.50%	390	5.0%	2.50%
310	6.8%	3.40%	400	4.4%	2.20%
320	6.5%	3.25%	410	4.3%	2.15%
330	6.2%	3.10%	420	4.2%	2.10%
340	6.0%	3.00%	430	4.1%	2.05%
350	5.8%	2.90%	440	4.0%	2.00%
360	5.6%	2.80%	450~1050	3.9%	1.95%
370	5.3%	2.65%	1100~1200	4.0%	2.00%
380	5.1%	2.55%			

C.2.3 入射角度引入的不确定度分量 u_{r3}

通过改变光谱辐照计探头角度，确定由余弦修正带来的误差，数据如表 C.8 所示。

表 C.8 不同入射角度的光谱范围测量数据

入射角度	0°	5°	15°	最大偏差
光谱范围	100.0%	100.0%	99.9%	0.10%

采用最大偏差作为光伏电池测试仪入射角度影响的分析数据，视为均匀分布，有

$$u_{\text{r3}} = 0.06\%$$

C.2.4 温度偏差引起的不确定度分量 u_{r4}

光谱范围测试过程中，光谱辐照计使用温度范围为 $(25 \pm 15)^\circ\text{C}$ ，在 10°C 、 25°C 和 40°C 条件下分别测量同一光伏电池测试仪的光谱辐照度分布，测量光谱范围数据如表 C.9 所示。

表 C.9 不同温度下的光谱范围测量数据

温度/ $^\circ\text{C}$	10	25	40	温度偏差-15 $^\circ\text{C}$	温度偏差+15 $^\circ\text{C}$
光谱范围	99.9%	100.0%	99.9%	-0.10%	0.10%

采用最大偏差作为光伏电池测试仪温度影响的分析数据，视为正态分布， $k = 2$ ，有

$$u_{\text{r4}} = 0.05\%$$

C.2.5 合成标准不确定度及扩展不确定度

各不确定度分量不相关，计算合成标准不确定度，取包含因子 $k=2$ ，计算扩展不确定度，计算结果如表 C.10 所示。

表 C.10 合成标准不确定度及相对扩展不确定度

波长/nm	合成标准不确定度 $u_{cr}(SPC)$	扩展不确定度 $U_r(SPC)$	波长/nm	合成标准不确定度 $u_{cr}(SPC)$	扩展不确定度 $U_r(SPC)$
300	3.51%	7.1%	390	2.51%	5.1%
310	3.41%	6.9%	400	2.21%	4.5%
320	3.26%	6.6%	410	2.16%	4.4%
330	3.11%	6.3%	420	2.11%	4.3%
340	3.01%	6.1%	430	2.06%	4.2%
350	2.91%	5.9%	440	2.01%	4.1%
360	2.81%	5.7%	450~1050	1.96%	4.0%
370	2.66%	5.4%	1100~1200	2.01%	4.1%
380	2.56%	5.2%			

C.3 光伏电池测试仪光谱偏差校准不确定度的评定

C.3.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{r1}

同等条件下重复测量同一光伏电池测试仪的光谱，其光谱偏差数据如表 C.11 所示。

表 C.11 光谱偏差重复测量数据

测量序次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
光谱范围	11.89%	11.92%	11.88%	11.91%	11.89%	11.88%	11.91%	11.92%	11.93%	11.90%

取重复性偏差最大波段对应重复性数据作为光伏电池测试仪光谱偏差重复性测量数据。则测量重复性引入的不确定度为

$$u_{r1} = s = 0.15\%$$

C.3.2 由光谱辐照计不准引入的不确定度分量 u_{r2}

由光谱辐照计的溯源证书知，在（300~1200）nm 内，扩展不确定度如表 C.12 所示， $k = 2$ ，按 $u_{r2} = U_{rel}/k$ 计算由光谱辐照计校准引入的不确定度 u_{r2} 。

表 C.12 光谱辐照计不准引入的不确定度

波长/nm	U_{rel}	u_{r2}	波长/nm	U_{rel}	u_{r2}
300	7.0%	3.50%	390	5.0%	2.50%
310	6.8%	3.40%	400	4.4%	2.20%
320	6.5%	3.25%	410	4.3%	2.15%
330	6.2%	3.10%	420	4.2%	2.10%

340	6.0%	3.00%	430	4.1%	2.05%
350	5.8%	2.90%	440	4.0%	2.00%
360	5.6%	2.80%	450~1050	3.9%	1.95%
370	5.3%	2.65%	1100~1200	4.0%	2.00%
380	5.1%	2.55%			

C.3.3 入射角度引入的不确定度分量 u_{r3}

通过改变光谱辐照计探头角度，确定由余弦修正带来的误差，数据如表 C.13 所示。

表 C. 13 不同入射角度的光谱偏差测量数据

入射角度	0°	5°	15°	最大偏差
光谱偏差	11.92%	11.90%	11.90%	0.17%

采用最大偏差作为光伏电池测试仪入射角度影响的分析数据，视为均匀分布，有

$$u_{r3} = 0.10\%$$

C.3.4 温度偏差引起的不确定度分量 u_{r4}

光谱偏差测试过程中，光谱辐照计使用温度范围为 $(25 \pm 15)^\circ\text{C}$ ，在 10°C 、 25°C 和 40°C 条件下分别测量同一光伏电池测试仪的光谱辐照度分布，测量光谱偏差数据如表 C.14 所示。

表 C. 14 不同温度下的光谱偏差测量数据

温度/ $^\circ\text{C}$	10	25	40	温度偏差-15 $^\circ\text{C}$	温度偏差+15 $^\circ\text{C}$
光谱偏差	11.90%	11.92%	11.88%	-0.02%	0.04%

采用最大偏差作为光伏电池测试仪温度影响的分析数据，视为正态分布， $k = 2$ ，有

$$u_{r4} = 0.02\%$$

C.3.5 合成标准不确定度及扩展不确定度

各不确定度分量不相关，计算合成标准不确定度，取包含因子 $k=2$ ，计算扩展不确定度，计算结果如表 C.15 所示。

表 C. 15 合成标准不确定度及相对扩展不确定度

波长/nm	合成标准不确定度 $u_{cr}(\text{SPD})$	扩展不确定度 $U_r(\text{SPD})$	波长/nm	合成标准不确定度 $u_{cr}(\text{SPD})$	扩展不确定度 $U_r(\text{SPD})$
300	3.51%	7.1%	390	2.51%	5.1%
310	3.41%	6.9%	400	2.21%	4.5%
320	3.26%	6.6%	410	2.16%	4.4%

330	3.11%	6.3%	420	2.11%	4.3%
340	3.01%	6.1%	430	2.06%	4.2%
350	2.91%	5.9%	440	2.01%	4.1%
360	2.81%	5.7%	450~1050	1.96%	4.0%
370	2.66%	5.4%	1100~1200	2.01%	4.1%
380	2.56%	5.2%			

C.4 光伏电池测试仪辐照空间不均匀度校准不确定度评定

C.4.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{r1}

对光伏电池测试仪某部分测试区域均匀性进行 10 次重复测试，其辐照空间不均匀度数据如表 C.16 所示。

表 C.16 辐照空间不均匀度重复测量数据

测量 序次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
不均 匀度	0.99%	0.97%	1.02%	1.01%	0.96%	0.98%	1.03%	1.00%	0.99%	1.02%

由贝塞尔公式计算测量重复性引入的不确定度：

$$u_{r1} = 0.02\%$$

C.4.2 带 I-V 转换器的太阳电池和数据采集仪不稳定性引入的不确定度分量 u_{r2}

考虑选用作为辐照度检测器的太阳电池不稳定性最高为 0.2%。由此引入的不确定度取为：

$$u_{r2} = 0.2\%$$

C.4.3 仪器读数分辨率引入的不确定度分量 u_{r3}

使用数据采集仪采集电压信号，最低档位为 2000 mV，分辨率为 16 bit， $1/2^{16} = 1.5 \times 10^{-5}$ 。由此引起的不确定度 u_{r3} 可忽略不计。

C.4.4 带 I-V 转换器的太阳电池温度变化引入的不确定度分量 u_{r4}

所用的带 I-V 转换器的太阳电池温度系数为 2.90 mV/℃。测试过程温度最大变化为 3℃。所用标准器在标准辐照度条件（1000 W/m²）下输出量值在 640 mV 左右，判定温度分布满足正态分布，温度变化引入不确定度：

$$u_{r4} = \frac{2.90 \times 3}{2 \times 640} = 0.68\%$$

C.4.5 位置偏差引入的不确定度分量 u_{r5}

将 156 mm×156 mm 的太阳电池分别置于光伏电池测试仪有效辐照面内 400 cm² 区域内的四个边角及中央 5 个不同位置, 测量数据如表 C.17 所示 (mV):

表 C.17 不同测量位置测量数据

269.78		269.46
	269.38	
269.93		269.50

太阳电池放置位置引入的辐照空间不均匀度最大偏差为±0.05%, 考虑均匀分布, 由太阳电池放置位置重复性引入的不确定度为:

$$u_{r5} = 0.03\%$$

C.4.6 光伏电池测试仪辐照不稳定性引入的不确定度分量 u_{r6}

将太阳电池置于光伏电池测试仪测试面内的固定位置, 连续闪光 40 次, 测量光伏电池测试仪辐照度的变化。数据如表 C.18 所示 (mV):

表 C.18 辐照不稳定性测量数据

269.88	270.50	270.00	270.32	269.46	270.12	270.43
269.95	269.64	269.78	270.42	269.42	270.18	270.01
270.42	270.40	269.38	269.38	269.37	270.49	269.39
269.79	270.23	269.93	269.61	270.19	270.32	270.47
269.71	270.06	270.39	270.08	269.50	269.71	270.37
270.11	270.20	269.71	269.80	269.64		

光伏电池测试仪辐照不稳定性引入不均匀度测量最大偏差为±0.10%, 考虑均匀分布, 光伏电池测试仪辐照不稳定性引入的不确定度为:

$$u_{r6} = 0.06\%$$

C.4.7 合成标准不确定度及扩展不确定度

各不确定度分量不相关, 合成标准不确定度为:

$$u_{cr}(NU) = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r2}^2 + u_{r3}^2 + u_{r4}^2 + u_{r5}^2 + u_{r6}^2} = 0.72\%$$

取 $k=2$, 扩展不确定度为:

$$U_r(NU) = 1.5\%$$

C.5 光伏电池测试仪辐照不稳定性校准不确定度评定

C.5.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{r1}

对光伏电池测试仪稳定性进行 10 次重复测试,其辐照不稳定性数据如表 C.19 所示。

表 C.19 辐照不稳定性重复测量数据

测量 序次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
不稳定性	0.11%	0.14%	0.13%	0.12%	0.11%	0.15%	0.12%	0.13%	0.14%	0.12%

由贝塞尔公式计算测量重复性引入的不确定度:

$$u_{r1} = 0.01\%$$

C.5.2 带 I-V 转换器的太阳电池和数据采集仪不稳定性引入的不确定度分量 u_{r2}

考虑选用作为辐照度检测器的太阳电池不稳定性最高为 0.2%。由此引入的不确定度取为:

$$u_{r2} = 0.2\%$$

C.5.3 长期稳定性划分的起止时间偏差引入的不确定度分量 u_{r3}

测量光伏电池测试仪 40 ms 内的长期不稳定性,分别由脉冲开始后的 4 ms 和 8 ms 开始采样,测得不稳定性分别为 0.3%, 0.2%, 由此引入的不确定度为:

$$u_{r3} = 0.1\%$$

C.5.4 仪器读数分辨率引入的不确定度分量 u_{r4}

使用数据采集仪采集电压信号,最低档位为 2000 mV,分辨率为 16 bit, $1/2^{16} = 1.5 \times 10^{-5}$ 。由此引起的不确定度 u_{r4} 可忽略不计。

C.5.5 带 I-V 转换器的太阳电池温度变化引入的不确定度分量 u_{r5}

所用的带 I-V 转换器的太阳电池温度系数为 2.90 mV/℃。测试过程温度最大变化为 3℃。所用标准器在标准辐照度条件 (1000 W/m²) 下输出量值在 640 mV 左右,判定温度分布满足正态分布,温度变化引入不确定度:

$$u_{r5} = \frac{2.90 \times 3}{2 \times 640} = 0.68\%$$

C.5.6 合成标准不确定度及扩展不确定度

各不确定度分量不相关,合成标准不确定度为:

$$u_{cr}(NS) = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r2}^2 + u_{r3}^2 + u_{r4}^2 + u_{r5}^2} = 0.72\%$$

取 $k=2$, 相对扩展不确定度为:

$$U_r(NS) = 1.5\%$$

C.6 温度校准不确定度评定

C.6.1 黑体辐射源引入的不确定度

黑体辐射源引入的不确定度来源主要有测量重复性、分辨力、辐射源短期稳定性、辐射源亮度温度、辐射源在校准周期内稳定性和辐射源均匀性。

C.6.1.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

调整黑体辐射源的设定温度为 25℃，读取黑体辐射源示值 10 次，其温度重复测量数据如表 C.20 所示。

表 C.20 温度重复测量数据

测量序次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
温度/℃	25.0	24.9	25.0	25.1	24.9	24.9	25.0	24.9	24.9	25.0

采用贝塞尔公式计算标准偏差， $S = 0.07^\circ\text{C}$ 。

校准取 2 次测量的平均值作为最终结果，故由重复性引入的不确定度为：

$$u_1 = \frac{S}{\sqrt{n}} = 0.05^\circ\text{C}$$

C.6.1.2 分辨力引入的不确定度分量 u_2

黑体辐射源的分辨力为 0.1°C ，视为均匀分布，由此引入的不确定度为：

$$u_2 = \frac{S}{\sqrt{n}} = 0.03^\circ\text{C}$$

由于测量重复性和分辨力引入的不确定度分量是相互关联的，所以在计算标准不确定度时取二者中数值大者，则分辨力引入的不确定度可忽略不计。

C.6.1.3 辐射源短期稳定性引入的不确定度分量 u_3

查阅说明书可知，辐射源温度的短期稳定性为 $0.1^\circ\text{C}/10\text{ min}$ ，视为均匀分布，由此引入的不确定度为：

$$u_3 = 0.06^\circ\text{C}$$

C.6.1.4 辐射源亮度温度不准引入的不确定度分量 u_4

在 25°C 时，溯源证书给出亮度温度的扩展不确定度为 0.6°C ， $k=2$ ，由此引入的不确定度为：

$$u_4 = 0.3^\circ\text{C}$$

C.6.1.5 辐射源在校准周期内稳定性引入的不确定度分量 u_5

依据黑体辐射源的溯源证书，得出其年稳定性为 0.1°C ，视为均匀分布，由此引入的不确定度为：

$$u_5 = 0.06^\circ\text{C}$$

C.6.1.6 辐射源均匀性引入的不确定度分量 u_6

被检温度探头瞄准区域与黑体辐射源测温区域之间的温度差,可理解成黑体辐射源均匀性对瞄准的影响引入的不确定度。由溯源证书,得其在 25℃时均匀性为 0.1℃,视为均匀分布,由此引入的不确定度为:

$$u_6 = 0.06^\circ\text{C}$$

C.6.2 光伏电池测试仪温度探头引入的不确定度

光伏电池测试仪温度探头引入的不确定度来源主要有测量重复性和仪表分辨力。

C.6.2.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_7

调整黑体辐射源的设定温度为 25℃,重复测量 10 次,其温度重复测量数据如表 C.21 所示。

表 C.21 温度重复测量数据

测量 序次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
温度 /℃	24.9	24.8	24.7	24.9	24.8	24.8	24.7	24.9	24.8	24.7

采用贝塞尔公式计算标准偏差, $S = 0.08^\circ\text{C}$ 。

校准取 2 次测量的平均值作为最终结果,故由重复性引入的不确定度为:

$$u_7 = \frac{S}{\sqrt{n}} = 0.06^\circ\text{C}$$

C.6.2.2 分辨力引入的不确定度分量 u_8

由于被检温度探头分辨力为 0.1℃,视为均匀分布,由此引入的不确定度为:

$$u_8 = \frac{S}{\sqrt{n}} = 0.03^\circ\text{C}$$

由于测量重复性和分辨力引入的不确定度分量是相互关联的,所以在计算标准不确定度时取二者中数值大者,则分辨力引入的不确定度可忽略不计。

C.6.3 操作过程引入的不确定度分量 u_9

温度校准过程引入的不确定度主要来源于数据修约。由经验知,数据修约带来的误差为 0.05℃,视为均匀分布,由此引入的不确定度为:

$$u_9 = 0.03^\circ\text{C}$$

C.6.4 合成标准不确定度及扩展不确定度

各不确定度分量不相关,合成标准不确定度为:

$$u_c(t) = \sqrt{u_1^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_9^2} = 0.33^\circ\text{C}$$

取 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U(t) = 0.7^\circ\text{C}$$

C.7 伏安特性曲线校准不确定度评定

C.7.1 短路电流校准不确定度的评定

C.7.1.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{r1}

对光伏电池测试仪 I-V 曲线短路电流修正系数进行重复测量，测试数据如表 C.22 所示。

表 C.22 短路电流重复测量数据

测量序次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
校准测量值/A	3.090	3.089	3.079	3.085	3.093	3.092	3.090	3.089	3.090	3.089
被测显示值/A	3.080	3.077	3.070	3.076	3.085	3.081	3.081	3.079	3.079	3.080
修正系数	1.0032	1.0039	1.0029	1.0029	1.0026	1.0036	1.0029	1.0032	1.0036	1.0029

采用贝塞尔公式计算标准偏差， $S = 0.04\%$ 。

校准取 3 次测量的平均值作为最终结果，故由重复性引入的不确定度为：

$$u_{r1} = \frac{S}{\sqrt{n}} = 0.02\%$$

C.7.1.2 电流传感器不准引入的不确定度分量 u_{r2}

电流传感器经校准，校准不确定度为：0.02% ($k=2$)，故由此引入的不确定度为：

$$u_{r2} = 0.01\%$$

C.7.1.3 电流传感器测量非线性引入的不确定度分量 u_{r3}

实际校准过程中电流受所用的光伏电池组件和光伏电池测试仪辐照度的影响，通过对电流传感器在 (8~20) A 不同电流量程下灵敏系数的校准，最大值为 4.993，最小值为 4.989，考虑均匀分布，此项引入的不确定度：

$$u_{r3} = 0.05\%$$

C.7.1.4 数据采集仪不准引入的不确定度分量 u_{r4}

数据采集仪经校准，校准不确定度为：0.05% ($k=2$)。故由此引入的不确定度为：

$$u_{r4} = 0.025\%$$

C.7.1.5 短路电流取值（电压零点漂移及选取）引入的不确定度分量 u_{r5}

为减小单点测量的随机误差,通常选取短路电流处两端较小电压变化范围内的电流平均值为短路电流值,最大值为 3.092 A,最小值为 3.089 A,考虑均匀分布,由此引入的不确定度为:

$$u_{r5} = 0.06\%$$

C.7.1.6 合成标准不确定度及扩展不确定度

各不确定度分量不相关,合成标准不确定度为:

$$u_{cr}(I_{sc}) = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r2}^2 + u_{r3}^2 + u_{r4}^2 + u_{r5}^2} = 0.10\%$$

取 $k=2$, 扩展不确定度

$$U_r(I_{sc}) = 0.2\%$$

C.7.2 开路电压校准不确定度的评定

C.7.2.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{r1}

对光伏电池测试仪 I-V 曲线开路电压修正系数进行重复测量,测试数据如表 C.23 所示。

表 C.23 开路电压重复测量数据

测量序次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
校准测量值/V	35.61	35.59	35.58	35.60	35.62	35.61	35.59	35.58	35.59	35.61
被测显示值/V	35.68	35.68	35.65	35.67	35.69	35.68	35.67	35.69	35.68	35.67
修正系数	0.9980	0.9975	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980	0.9978	0.9969	0.9975	0.9983

采用贝塞尔公式计算标准偏差, $S = 0.04\%$ 。

校准取 3 次测量的平均值作为最终结果,故由重复性引入的不确定度为:

$$u_{r1} = \frac{S}{\sqrt{n}} = 0.02\%$$

C.7.2.2 数据采集仪不准引入的不确定度分量 u_{r2}

数据采集仪经校准,校准不确定度为: 0.05% ($k=2$)。故由此引入的不确定度为:

$$u_{r2} = 0.025\%$$

C.7.2.3 数据采集仪测量非线性引入的不确定度分量 u_{r3}

数据采集仪校准电压量程为 80 V, 实际校准过程中电压受所用的光伏电池组件和光伏电池温度的影响,通过对数据采集仪在 (30~50) V 不同量程下修正系数的校准,最大值为 1.0020,最小值为 1.0012,考虑均匀分布,故由此引入的不确定度为:

$$u_{r3} = 0.05\%$$

C.7.2.4 开路电压取值（电流零点漂移及选取）引入的不确定度分量 u_{r4}

为减小单点测量的随机误差，通常选取开路电压处两端较小电流变化范围内的电压平均值为开路电压值，最大值为 35.65 V，最小值为 35.60 V，考虑均匀分布，由此引入的不确定度为：

$$u_{r4} = 0.08\%$$

C.7.2.5 合成标准不确定度及扩展不确定度

各不确定度分量不相关，合成标准不确定度为：

$$u_{cr}(V_{oc}) = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r2}^2 + u_{r3}^2 + u_{r4}^2} = 0.10\%$$

取 $k=2$ ，扩展不确定度

$$U_r(V_{oc}) = 0.2\%$$

C.7.3 最大功率校准不确定度的评定

C.7.3.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{r1}

对光伏电池测试仪 I-V 曲线最大功率修正系数进行重复测量，测试数据如表 C.24 所示。

表 C.24 最大功率重复测量数据

测量序次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
校准测量值/W	85.24	85.25	85.23	85.22	85.25	85.18	85.24	85.22	85.19	85.25
被测显示值/W	85.15	85.17	85.11	85.10	85.15	85.09	85.15	85.13	85.10	85.13
修正系数	1.0011	1.0009	1.0014	1.0014	1.0012	1.0011	1.0011	1.0011	1.0011	1.0014

采用贝塞尔公式计算标准偏差， $S = 0.02\%$ 。

校准取 3 次测量的平均值作为最终结果，故由重复性引入的不确定度为：

$$u_{r1} = \frac{S}{\sqrt{n}} = 0.01\%$$

C.7.3.2 电流传感器不准引入的不确定度分量 u_{r2}

电流传感器经校准，校准不确定度为：0.02% ($k=2$)，故由此引入的不确定度为：

$$u_{r2} = 0.01\%$$

C.7.3.3 数据采集仪不准引入的不确定度分量 u_{r3}

数据采集仪经校准，校准不确定度为：0.05% ($k=2$)。故由此引入的不确定度为：

$$u_{r3} = 0.025\%$$

C.7.3.4 电流传感器测量非线性引入的不确定度分量 u_{r4}

实际校准过程中电流受所用的光伏电池组件和光伏电池测试仪辐照度的影响,通过对电流传感器在(8~20) A 不同电流量程下灵敏系数的校准,最大值为 4.993,最小值为 4.989,考虑均匀分布,此项引入的不确定度:

$$u_{r4} = 0.05\%$$

C.7.3.5 数据采集仪测量非线性引入的不确定度分量 u_{r5}

数据采集仪校准电压量程为 80 V,实际校准过程中电压受所用的光伏电池组件和光伏电池温度的影响,通过对数据采集仪在(30~50) V 不同量程下修正系数的校准,最大值为 1.0020,最小值为 1.0012,考虑均匀分布,故由此引入的不确定度为:

$$u_{r5} = 0.05\%$$

C.7.3.6 最大功率点取值引入的不确定度分量 u_{r6}

因校准过程中采用的数据采集仪和光伏电池测试仪电子负载的采样频率存在差异,导致最大功率取值存在差异。在其最大功率点左右各选取两个功率值,分别为: 85.09 W、85.13 W、85.17 W、85.23 W、85.25 W。在 5 个功率值中,最大功率值 85.25 W,最小功率值 85.09 W,考虑均匀分布,由最大功率点取值差异引入不确定度为:

$$u_{r6} = 0.11\%$$

C.7.3.7 合成标准不确定度及扩展不确定度

各不确定度分量不相关,合成标准不确定度为:

$$u_{cr}(P_{\max}) = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r2}^2 + u_{r3}^2 + u_{r4}^2 + u_{r5}^2 + u_{r6}^2} = 0.15\%$$

取 $k=2$, 相对扩展不确定度为

$$U_r(P_{\max}) = 0.3\%$$
