

天津市地方计量技术规范

JJF(津) XXXX—2026

航天太阳能电池组件用太阳模拟器 校准规范

Calibration Specification for Solar Simulators of Aerospace

Solar Cells and Modules

(报批稿)

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

航天太阳电池组件用太阳 模拟器校准规范

Calibration Specification for Solar
Simulators of Aerospace Solar
Cells and Modules

JJF(津) XXXX-2026

归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津市计量监督检测科学研究院

参加起草单位：天津中电新能源研究院有限公司

本规范由天津市计量监督检测科学研究院负责解释

本规范主要起草人：

杨学毫（天津市计量监督检测科学研究院）

柳云秀（天津市计量监督检测科学研究院）

翟家强（天津市计量监督检测科学研究院）

参加起草人：

徐正元（天津中电新能源研究院有限公司）

冯 宇（天津市计量监督检测科学研究院）

目 录

引 言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语及定义.....	(1)
3.1 AM0 条件 AM0 condition.....	(1)
3.2 标准子太阳能电池 standard component solar cell.....	(1)
3.3 有效辐照面 effective irradiation plane	(1)
3.4 光谱匹配度 spectral match	(1)
3.5 辐照度不均匀度 irradiance non-uniformity	(2)
3.6 辐照度不稳定性 irradiance instability.....	(2)
4 概述.....	(2)
5 计量特性.....	(3)
6 校准条件.....	(4)
6.1 环境条件	(4)
6.2 测量标准	(4)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 校准前准备	(4)
7.2 校准项目	(4)
8 校准结果.....	(7)
9 复校时间间隔.....	(8)
附录 A 原始记录参考格式.....	(9)
附录 B 校准证书内页推荐格式.....	(12)
附录 C 校准结果不确定度评定示例	(16)

引 言

本规范依据国家计量技术规范 JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》基础性系列规范进行编写。

本规范为首次发布。

航天太阳电池组件用太阳模拟器校准规范

1 范围

本规范适用于航天太阳电池组件用太阳模拟器的校准。本规范包括光谱匹配度范围350nm~1800nm辐照度不均匀度、辐照度不稳定性等关键参数的计量特性、校准方法、校准结果表述等内容。

2 引用文件

GB/T 6494—2017 航天用太阳电池电性能测试方法

IEC 60904-9: 2020 光伏器件 第9部分：太阳模拟器特性的分级(Photovoltaic devices – Part 9: Classification of solar simulator characteristics)

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡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 术语及定义

3.1 AM0条件 AM0 condition

标定和测试空间用（一个太阳常数，标准辐照度为 $1366.1\text{W}/\text{m}^2$ ）太阳电池组件所规定的太阳辐照度和光谱分布。

3.2 标准子太阳电池 standard component solar cell

用规定的方法制作，具有与被测多结太阳电池中相应子电池相同的相对光谱响应，采用规定的标定方法标定过的，用于多结太阳电池或组件的电性能测试时太阳模拟器相应波段辐照度的设定的太阳电池。

[GB/T 6494- 2017, 3.1]

3.3 有效辐照面 effective irradiation plane

能够将太阳模拟器光谱匹配度、辐照度不均匀度、辐照度不稳定性保持在一定等级的放置测试样品的平面，垂直于光入射方向。

3.4 光谱匹配度 spectral match

太阳模拟器光源的光谱辐照度相对于标准太阳光谱AM0标准光谱辐照度的匹配程度。

3.5 辐照度不均匀度 irradiance non-uniformity

在有效辐照面内，太阳模拟器辐照度的最大值（ $E_{U_{\max}}$ ）和最小值（ $E_{U_{\min}}$ ）之间的相对偏差。

[IEC 60904-9 2020, 3.9]

3.6 辐照度不稳定性 irradiance instability

有效辐照面内任意给定位置上，在规定的时间内，太阳模拟器的辐照度最大值（ $E_{S_{\max}}$ ）和最小值（ $E_{S_{\min}}$ ）之间的相对偏差。

包括短期不稳定性度和长期不稳定性度。

短期不稳定性度与 I-V 测试过程中单组数据（辐照度、电流、电压）的采集时间有关，I-V 曲线上不同数据组的不稳定性度不同，短期不稳定性度由最差情况确定。

长期不稳定性度与所关注的时间周期有关，分为三种情况：

1)对于三通道（辐照度、电流、电压）I-V 测试用瞬态太阳模拟器或稳态太阳模拟器，其长期不稳定性度是指在 I-V 曲线采集时间内辐照度的变化。

2)对于双通道（电流、电压）I-V 测试用瞬态太阳模拟器或稳态太阳模拟器，在 IV 测量前后分别测量辐照度，依据两个辐照度值计算长期不稳定性度，辐照度采集的最大时间间隔与 I-V 数据点间的时间间隔一致。

3)对于曝晒用稳态太阳模拟器，其长期不稳定性度采集时间的选取与所需曝晒时间有关。

[IEC 60904-9 2020, 3.10]

4 概述

航天太阳能电池组件用太阳模拟器是模拟空间中太阳光谱和辐照度的一种光源测试装置，利用标准电池校调太阳模拟器辐照度和光谱分布，具有光谱调节装置达到匹配标定电池的等效空间 AMO 光照条件。太阳模拟器通常由光源和电源、光学部件和滤光片、以及控制操作系统组成，如图 1 所示。衡量太阳模拟器优劣的技术指标主要包括三方面，光谱匹配度、辐照度不均匀度和辐照度不稳定性度。

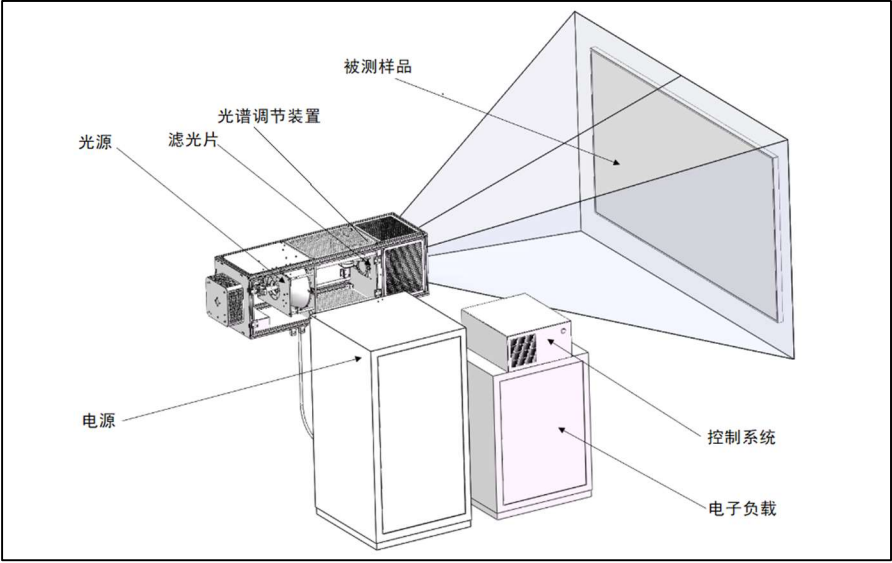


图1 典型太阳模拟器结构示意图

5 计量特性

5.1光谱匹配度:0.5~1.5。

5.2辐照度不均匀度：0~10%

5.3辐照度不稳定性：0~10%

太阳模拟器的等级划分标准如表1所示：

表 1 太阳模拟器等级划分

特性	光谱区间 (nm)	占总辐照度的 百分比(350nm ~1800nm,120 3W/m²)%	光谱区间nm	占总辐照度的 百分比(350nm ~1100nm ,959 .8W/m²)%	A级	B级	C级
光谱匹 配度	350~500	19.9	350~500	25	≤± 25%	≤± 35%	≤± 50%
	500~600	15.4	500~600	19.3			
	600~700	13.3	600~700	16.6			
	700~800	10.5	700~800	13.2			
	800~900	8.5	800~900	10.6			
	900~1000	6.7	900~1000	8.3			
	1000~1200	10.1	1000~1100	7.0			
	1200~1400	7.1	—	—			
	1400~1600	5.0	—	—			
	1600~1800	3.5	—	—			
辐照不 均匀度	—				≤2%	≤5%	≤10%
辐照不 稳定度	短期不稳定性				≤0.5%	≤2%	≤10%
	长期不稳定性				≤3%	≤5%	≤10%

注：具体计量特性，可参照被校测试系统的技术要求。以上要求不适用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 温度： $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$ ；

6.1.2 相对湿度： $\leq 80\%$ ；

6.1.3 电源：根据设备要求匹配供电电压和供电频率；

6.1.4 其他条件：周围无影响校准工作的机械振动和电磁干扰，并具有良好的接地；无腐蚀性、易燃、易爆气体。具备光学暗室条件。

6.2 测量设备

6.2.1 光谱辐照度计：波长范围需覆盖 $350\text{nm} \sim 1800\text{nm}$ ，波长分辨率在波段范围 $350\text{nm} \sim 1100\text{nm}$ 不大于 5nm ，在波段范围 $1100\text{nm} \sim 1800\text{nm}$ 波长分辨率应不大于 15nm 。光谱辐照度计采样间隔应不大于波长分辨率。建议根据设备使用条件定期进行期间核查。

6.2.2 检测器：包括检测器探头和数据采集器，用于测量太阳模拟器的辐照度不均匀度和辐照度不稳定性，不稳定性优于 0.2% ，与辐照度线性优于 0.2% 。检测器探头可采用封装的硅光电探测器或单晶硅光伏电池。对于光伏组件用太阳模拟器，检测器探头的最大尺寸为 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 。对于光伏电池用太阳模拟器，检测器探头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 10cm ，则建议使用光电探测器或带掩膜板的光伏电池。如数据采集器采集电压信号，检测器需配备 IV 转换器，用于将检测器探头在太阳模拟器辐照下产生的电流信号转化为电压信号，响应时间应小于采样时间。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准前准备

7.1.1 核查被校太阳模拟器的名称、规格型号、生产厂商、出厂编号等，记录太阳模拟器调节波段范围及能力。

7.1.2 确认被校太阳模拟器的正常工作状态，有效辐照面积以及周围环境状况，在太阳模拟器的有效辐照面上依次放置标准子太阳电池，反复调节光源的光谱分布和辐照度，使得所有标准子太阳电池的短路电流测量值与标定值之间的相对偏差在 $\pm 1\%$ 以内，预热设备。

7.2 校准项目

包括光谱匹配度、辐照度不均匀度和辐照度不稳定性。

7.2.1 光谱匹配度校准

用光谱辐照度计，测试太阳模拟器测试区域 4 个采样点位置处的光谱辐照度分布，采样点位置如图 2 所示。对于矩形测试区域，采样点取为中心位置、左上角边缘位置、右边线中心边缘位置和下边线中心边缘位置；对于圆形测试区域，采样点取为中心位置、圆形边缘三等分位置。在有效波段范围内计算其积分辐照度。

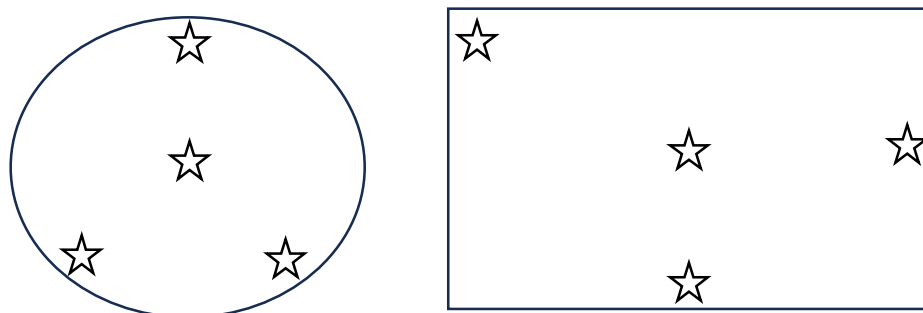


图 2 有效辐照面圆形（左）有效辐照面方形（右）光谱匹配度测量位置

计算各波长间隔内的光谱辐照度分布（即占积分辐照度的百分比），与表1中AM0标准光谱辐照度分布的百分比的比值作为光谱匹配度。由各采样点、各波长范围最差的光谱匹配度等级确定太阳模拟器的光谱匹配级别。

7.2.2 辐照度不均匀度校准

7.2.2.1 校准原理和示意图

根据检测器短路电流与辐照度成正比的关系，用数据采集器采集太阳模拟器下检测器的短路电流经 I-V 转换后的信号，以等效于采集辐照度。辐照度不均匀度的校准示意图如图 3 所示。

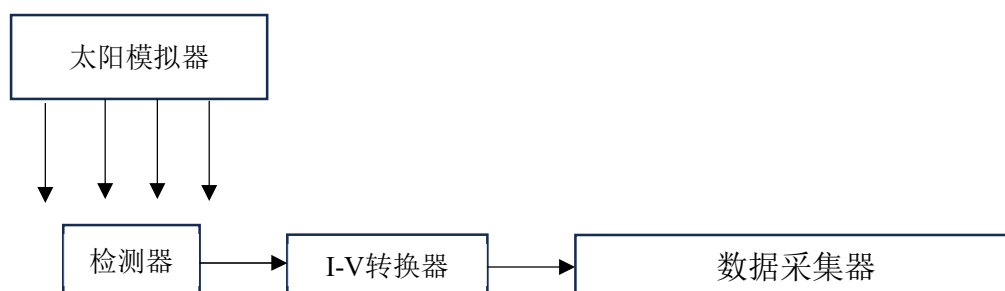


图 3 辐照度不均匀度的校准示意图

7.2.2.2 校准方法和步骤

(1) 将太阳模拟器的有效辐照面均等划分若干个区域，检测器测量面积与有效辐照面面积之比应大于 80%，区域的个数由太阳模拟器总的有效工作面积所决定。

(2) 将指定测试区域的一个角作为参考点, 并将其作为检测器探头的起始位置, 使检测器探头的边缘与参考点重合。按照划分区域放置检测器, 采集其在每个区域的信号。

(3) 在整个有效辐照面内, 找出检测器的最大值 ($V_{\max}$) 和最小值 ($V_{\min}$), 辐照度不均匀度 E_{nu} 按公式(1)计算。

$$E_{\text{nu}} = (E_{\text{u}_{\max}} - E_{\text{u}_{\min}}) / (E_{\text{u}_{\max}} + E_{\text{u}_{\min}}) \times 100\% = (V_{\max} - V_{\min}) / (V_{\max} + V_{\min}) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

E_{nu} ——有效辐照面内辐照度不均匀度, 无量纲;

$V_{\max}$ ——有效辐照面内检测器最大值, mV;

$V_{\min}$ ——有效辐照面内检测器最小值, mV。

(4) E_{nu} 对比表 1 等级划分的数值, 得出太阳模拟器辐照度不均匀度的等级。

7.2.3 辐照度不稳定性

7.2.3.1 短期不稳定性测量

1) 如果 I-V 测试用太阳模拟器可同时采集辐照度, 电压和电流信号, 则无需进行测量, 即可判定其短期不稳定性为 A 级;

注: 同时采集定义为三个信号测试时间延迟小于 10 ns。

2) 如果 I-V 测试用太阳模拟器是非同时采集辐照度、电压和电流信号, 分别测量 IV 曲线上每个数据所对应三个信号采集时间间隔内检测器信号的变化, 取其中变化最大的一组信号用于评定其短期不稳定性。

3) 对于在 I-V 测试用太阳模拟器, 在测量过程中如果没有辐照度监测, 则不进行短期不稳定性评定。

4) 对于非 I-V 测试用稳态太阳模拟器, 不进行短期不稳定性评定。

7.2.3.2 长期不稳定性测量

1) 对于三通道 (辐照度、电流、电压) I-V 测试用瞬态太阳模拟器或稳态太阳模拟器, 其长期不稳定性是指在 I-V 曲线采集时间内辐照度的变化。

2) 对于双通道 (电流、电压) I-V 测试用瞬态太阳模拟器或稳态太阳模拟器, 在 I-V 测量前后分别测量辐照度, 依据两个辐照度值计算长期不稳定性, 辐照度采集的最大时间间隔与 I-V 数据点间的时间间隔一致。

3) 对于曝晒用稳态太阳模拟器, 其长期不稳定性采集时间的选取与所需曝晒时间

有关，建议采集时间取为20分钟。

测量在这个时间范围内检测器信号。找出检测器的最大值 ($V_{\max}$) 和最小值 ($V_{\min}$)，辐照度不稳定性 E_{ins} 按公式 (2) 计算。

$$E_{\text{ins}} = (E_{\text{Smax}} - E_{\text{Smin}}) / (E_{\text{Smax}} + E_{\text{Smin}}) \times 100\% = (V_{\max} - V_{\min}) / (V_{\max} + V_{\min}) \times 100\% \quad (2)$$

式中：

E_{ins} ——有效辐照面内辐照不稳定性，无量纲；

$V_{\max}$ ——测试时间内检测器最大值，mV；

$V_{\min}$ ——测试时间内检测器最小值，mV。

将 E_{ins} 对比表 1 或表 2 中等级划分的数值，得出太阳模拟器辐照度不稳定度的等级。

8 校准结果

校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包含以下信息：

- 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) 客户的地址和名称；
- 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相关时，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声明；
- 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

建议复校时间间隔为 1 年。复校时间间隔由仪器的使用情况、使用者、仪器质量等因素决定，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

原始记录参考格式

证书编号: _____	原始记录编号: _____
客户名称: _____	客户地址: _____
仪器名称: _____	型号规格: _____
制造厂: _____	出厂编号: _____
校准地点: _____	
校准依据: _____	
环境条件: 温度: _____ 相对湿度: _____	校准日期: _____
校准员: _____	核验员: _____

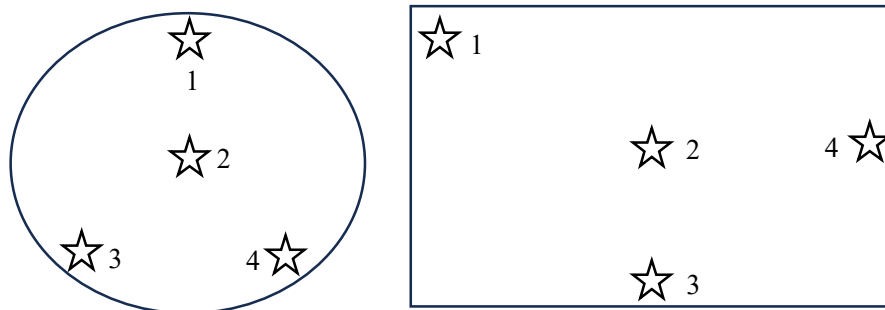
标准器名称	编号	不确定度或准确度等级 或最大允许误差	证书编号	证书有效期	溯源机构名称

1. 检查

光谱调节波段: _____ nm ~ _____ nm, 调节能力: _____ %

2 太阳模拟器光谱匹配度

校准方法: 将光谱仪的传感器垂直于有效辐照面内进行光谱辐照度分布测量, 计算 (350~1800) nm 内各波段的积分辐照度及其与总辐射度的百分比。测试位置如下:



测试位置示意图

2.1 位置1

2.1.1 测量数据

序号	波长范围(nm)	AM0各波段辐照度占波长350nm~1800nm总辐照度的百分比(%)	太阳模拟器各波段辐照度占波长350nm~1800nm范围总辐照度的百分比(%)	各波段光谱辐照度		测量不确定度 $U_{rel}(\%)(k=2)$
				匹配度	等级	
1						
2						
3						
...						
...						

2.1.2 太阳模拟器与 AM0 的光谱辐照度分布图

2.2 位置2

2.2.1 测量数据

序号	波长范围(nm)	AM0各波段辐照度占波长350nm~1800nm总辐照度的百分比(%)	太阳模拟器各波段辐照度占波长350nm~1800nm范围总辐照度的百分比(%)	各波段光谱辐照度		测量不确定度 $U_{rel}(\%)(k=2)$
				匹配度	等级	
1						
2						
3						
...						
...						

2.2.2 太阳模拟器与 AM0 的光谱辐照度分布图

2.3 位置3

2.3.1 测量数据

序号	波长范围(nm)	AM0各波段辐照度占波长350nm~1800nm总辐照度的百分比(%)	太阳模拟器各波段辐照度占波长350nm~1800nm范围总辐照度的百分比(%)	各波段光谱辐照度		测量不确定度 $U_{rel}(\%)(k=2)$
				匹配度	等级	
1						
2						
3						
...						
...						

2.3.2 太阳模拟器与 AM0 的光谱辐照度分布图

2.4 位置4

2.4.1 测量数据

序号	波长范围(nm)	AM0各波段辐照度占波长350nm~1800nm总辐照度的百分比(%)	太阳模拟器各波段辐照度占波长350nm~1800nm范围总辐照度的百分比(%)	各波段光谱辐照度		测量不确定度 $U_{rel}(\%)(k=2)$
				匹配度	等级	
1						
2						
3						
...						
...						

2.4.2 太阳模拟器与 AM0 的光谱辐照度分布图

3. 太阳模拟器辐照不均匀度

将太阳模拟器的辐照面(×) 均分成 XXX 个测量区域, 横向 XXX, 纵向为 XX, 记录数据。

	1	2	• • • • •
A			
B			
• • • • •			

4. 太阳模拟器辐照不稳定性

记录同一位置校准时间范围内检测器信号的数据。

不稳定性曲线图:

附录 B

校准证书内页推荐格式

证 书 编 号： XXXXXX-XXXX

校准机构授权说明					
校准所依据的技术文件（代号、名称）：					
校准所使用的主要计量器具：					
名称	编号	准确度等级/最大允许 误差/不确定度	证书编号	证书有效期至	溯源机构
校准地点及其环境条件： 地点： 温度： 相对湿度： 其他：					

证书编号: XXXXXX-XXXX

校准结果

1. 检查

光谱调节波段: nm~ nm, 调节能力: %

2. 太阳模拟器光谱匹配度

校准方法: 将光谱仪的传感器垂直于有效辐照面内进行光谱辐照度分布测量, 计算350nm~1800nm内各波段的积分辐照度及其与总辐射度的百分比。测试位置如下:

测试位置示意图

2.1 测量数据

序号	波长范围(nm)	AM0各波段辐照度占 波长350nm~1800nm 总辐照度的百分比(%)	太阳模拟器各波段辐照度 占波长350nm~1800nm范 围总辐照度的百分比(%)	各波段光谱辐照度		测量不确定 度 $U_{rel}(\%)(k=$ $2)$
				匹配度	等级	
1						
2						
3						
.....						

2.2 太阳模拟器与AM0的光谱辐照度分布图

2.3 光谱匹配度等级判定: X级

校准结果

3. 太阳模拟器辐照不均匀度

校准方法：将太阳模拟器的辐照面（ × ）均分成 XXX 个测量区域，横向 XXX，纵向为 XX，用检测器测量各个区域辐照度对应的等效电压信号（单位：mV），从而得出太阳模拟器辐照度的不均匀度分布。

3.1 有效辐照面不均匀度分布图

	1	2	• • • • •
A			
B			
• • • • •			

3.2 辐照度不均匀度计算

最大值（mV）	最小值（mV）	辐照度不均匀度(%)

计算方法：辐照度不均匀度 (%) = $[(V_{\max} - V_{\min}) / (V_{\max} + V_{\min})] \times 100\%$

3.3 辐照度不均匀度等级判定：X级

4. 太阳模拟器辐照不稳定度

校准方法：将检测器置于太阳模拟器有效辐照面内，用数据采集卡和数字电压表采集其短路电流变化（经 I-V 转化器转化为辐照度对应的等效电压信号，单位为 mV），从而得到太阳模拟器的辐照度变化。

第 × 页 共 × 页

校准员：_____

核验员：_____

校准结果

4.1 不稳定性曲线图

4.2 辐照度不稳定性计算

最大值 $V_{\max}$ (mV)	$V_{\min}$ 最小值 (mV)	辐照度不均匀度(%)

计算方法：辐照度不稳定性 (%) = $[(V_{\max} - V_{\min}) / (V_{\max} + V_{\min})] \times 100\%$

4.3 辐照度不稳定性等级判定：X级

5. 结论

太阳模拟器等级为：XXX级

等级	光谱匹配度			辐照度不均匀度	辐照度不稳定性
XXX级				(XX cm× XX cm)辐照面内不均匀度为XX%	辐照度不稳定性(X级)
等级：X级			等级：X级	等级：X级	

校准员：_____ 核验员：_____

附录 C

校准结果不确定度评定示例

C.1 太阳模拟器光谱匹配度校准不确定度评定

C.1.1 测量标准

光谱辐照度计

C.1.2 灵敏系数

模型中各输入量对输出量的灵敏系数绝对值均为1。

C.1.3 各输入量的标准不确定度的分析与评定

不确定度主要来源：光谱辐照度计计量引入的不确定度 u_1 ；入射角度引入的不确定度 u_2 ；测量重复性引入的不确定度分量 u_3 ；温度偏差引起的不确定度 u_4 。

C.1.3.1 光谱辐照度计计量引入的不确定度 u_1

由证书：350nm~1800nm，U=6%， $k=2$ ，由此可得， $u_1=3\%$ ；

C.1.3.2 余弦修正后的入射角度引入的不确定度 u_2

校准用光谱辐照度计采用积分球作为入射光接收器，由于光谱辐照度计安装角度引入的不确定度 u_2 可以忽略。

C.1.3.3 测量重复性引入的不确定度 u_3

同等条件下重复测量同一太阳模拟器的光谱辐照度分布，其测量偏差如表C.1所示。

表C.1太阳模拟器光谱匹配度测量重复性

波长范围	(350~500) nm	(500~600) nm	(600~700) nm	(700~800) nm	(800~900) nm	(900~1000) nm	(1000~1200) nm	(1200~1400) nm	(1400~1600) nm	(1600~1800) nm
1	0.897	1.011	1.162	1.066	0.924	0.916	0.938	1.125	0.943	1.068
2	0.897	1.010	1.162	1.066	0.924	0.919	0.938	1.123	0.940	1.069
3	0.899	1.012	1.162	1.065	0.920	0.915	0.944	1.124	0.939	1.065
4	0.896	1.010	1.162	1.066	0.924	0.920	0.943	1.118	0.938	1.064
5	0.894	1.008	1.162	1.066	0.925	0.920	0.941	1.119	0.942	1.064
相对标准差 S	0.182	0.148	0.000	0.045	0.195	0.235	0.277	0.311	0.207	0.235

通常以单次测量作为最终校准结果， $n=1$ 。

取重复性偏差最大波段对应重复性数据作为太阳模拟器光谱匹配度重复性测量数据。

重复性引入的不确定度 $u_{1.1} = \frac{S}{\sqrt{n}} = 0.31\%$ 。

C.1.3.4 温度偏差引起的不确定度 u_4

光谱仪校准温度为25℃，考虑实际应用环境条件，光谱匹配度测试过程中，光谱辐照度计使用温度范围为（25±15）℃，在10℃、25℃和40℃条件下分别测量同一太阳模拟器的光谱辐照度分布（M1、M2、M3），其测量偏差如表C.2所示。

表C.2 太阳模拟器光谱匹配度测量值随光谱仪温度变化关系

波长 nm	M1 (10℃)	M2 (25℃)	M3 (40℃)	M3/M2	M1/M2
350~500	89.3	89.8	89.2	99.3%	99.4%
500~600	95.4	96.0	95.4	99.4%	99.4%
600~700	104.3	105.0	104.4	99.4%	99.3%
700~800	103.9	104.4	103.9	99.5%	99.5%
800~900	108.6	108.2	107.9	99.7%	100.4%
900~1000	102.7	100.3	103.3	103.0%	102.4%
1000~1200	89.3	89.8	89.2	99.3%	99.4%
1200~1400	95.4	96.0	95.4	99.4%	99.4%
1400~1600	104.3	105.0	104.4	99.4%	99.3%
1600~1800	103.9	104.4	103.9	99.5%	99.5%

采用最大偏差波段范围对应数据作为太阳模拟器光谱失配影响分析数据，温度分布判定为正态分布，利用最大相对偏差计算温度偏离引入不确定度，不确定度 $u_4=3.0\%$

C.1.4 合成标准不确定度的评定

主要标准不确定度汇总表如表C.3所示

表C.3 标准不确定度一览表

不确定度来源	相对标准不确定度		灵敏系数	输出量标准不确定度分量
	符号	数值		
由光谱辐照度计校准引入的不确定度	u_1	3%	1	3%
余弦修正后的不确定度	u_2	/	1	/
测量重复性引起的不确定度	u_3	0.31%	1	0.31%
温度偏差引起的不确定度	u_4	3.0%	1	3.0%

各不确定度分量独立不相关，则合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 4.3$$

C.1.5 扩展不确定度的评定

对应 p 约为95%包含概率，取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U=ku_c=2\times 4.3=8.6$$

换算至相对扩展不确定度为： $U_{rel}=8.6\%$ ， $k=2$ 。

C.2 太阳模拟器辐照不均匀度扩展不确定度的评定

C.2.1 测量标准

检测器、I-V转换电阻、数据采集卡和数字电压表

C.2.2 灵敏系数

模型中各输入量对输出量的灵敏系数绝对值均为1。

C.2.3 各输入量的标准不确定度的分析与评定

不确定度主要来源：检测器不稳定性引入的不确定度 u_5 ；位置重复性引入的不确定度 u_6 ；太阳模拟器重复性引起的不确定度 u_7 ；仪器读数有效位数引起的不确定度 u_8 。

C.2.3.1 检测器不稳定性引入的不确定度 u_5

检测器不稳定性小于0.2%，满足三角分布， $u_5=0.12\%$

C.2.3.2 位置重复性引起的不确定度 u_6

由于划分区域与检测器几何尺寸不一致，因放置位置不同引入的不确定度，由经验推测， $u_6=0.8\%$

C.2.3.3 太阳模拟器重复性引起的不确定度 u_7

以某一瞬态太阳模拟器为例，在30min内，同一区域重复测量，其辐照度的重复性引入的不确定度： $u_7=0.8\%$ 。

C.2.3.4 仪器读数有效位数引起的不确定度 u_8

使用的采集系统测量电压信号，最低挡位为200mV，分辨力为16bit， $1/2^{16}=1.5\times 10^{-5}$ 。由此引起的不确定度可忽略不计。

C.2.4 合成标准不确定度的评定

主要标准不确定度汇总表如表C.4所示

表C.4 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$ c_i $	$ c_i u(x_i)$
u_5	检测器不稳定性	0.12	1	0.12
u_6	位置重复性	0.8	1	0.8
u_7	太阳模拟器重复性	0.8	1	0.8
u_8	仪器读数有效位数	0	1	0

各不确定度分量独立不相关，则合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c = \sqrt{u_5^2 + u_6^2 + u_7^2} = 1.20\%$$

C.2.5 扩展不确定度的评定

对应 p 约为95%包含概率，取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 2 \times 1.28 = 2.4\%$$

C.3 太阳模拟器辐照度不稳定性校准不确定度评定

C.3.1 测量标准

检测器、I-V转换电阻、数据采集卡和数字电压表

C.3.2 灵敏系数

模型中各输入量对输出量的灵敏系数绝对值均为1。

C.3.3 各输入量的标准不确定度的分析与评定

不确定度主要来源：检测器稳定性（包含仪器读数稳定性）引入的不确定度分量 u_9 ；长期稳定性划分的起止时间偏差引入的不确定度分量 u_{10} ；太阳模拟器重复性引起的不确定度 u_{11} ；仪器读数有效位数引起的不确定度 u_{12} 。

C.3.3.1 检测器稳定性（包含仪器读数稳定性）引入的不确定度分量 u_9

此处同太阳模拟器辐照不均匀度中检测器稳定性，不稳定性 $u_9=0.12\%$

目前选用作为检测器的参考电池的不稳定性最高为0.1%，从而对等级判定结果的影响可以忽略。

C.3.3.2 长期稳定性划分的起止时间偏差引起的不确定度 u_{10}

对于稳态太阳模拟器，起止时间引起的偏差极小，可以忽略。

C.3.3.3 太阳模拟器重复性引起的不确定度 u_{11}

不同的太阳模拟器的重复性不一样，性能优者重复性好。对于瞬态太阳模拟器，是其每次脉冲闪光的重复性；而对于稳态模拟器指测量周期内的稳定性。以某一瞬态太阳模拟器为例，在30min内，同一区域重复测量，其辐照度的重复性为不确定度为： $u_{11}=0.8\%$ 。

C.3.3.4 仪器读数有效位数引起的不确定度 u_{12}

使用快速采集卡系统采集电压信号，最低挡位为200mV，分辨力为16bit。由此引

起的误差可忽略不计。

C. 3. 4 合成标准不确定度的评定

主要标准不确定度汇总表如表 C. 5 所示。

表C. 5 标准不确定度一览表

标准不确定 度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$ ci $	$ ci \cdot u(xi)$
u_9	检测器稳定性（包含仪 器读数稳定性）	0.12	1	0.12
u_{10}	长期稳定性划分的起止 时间偏差	0	1	0
u_{11}	太阳模拟器重复性	0.8	1	0.8
u_{12}	仪器读数有效位数	0	1	0

各不确定度分量独立不相关，则合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c=\sqrt{u^2_9 + u^2_{10} + u^2_{11} + u^2_{12}}=0.81\%$$

C. 3. 5 扩展不确定度的评定

对应 p 约为 95%包含概率，取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U=ku_c=2\times 0.89\%=1.62\%$$

