

天津市地方计量技术规范

JJF (津) XXXX-2026

稳态阳光温湿度试验箱校准规范

Calibration specification for steady state sunlight temperature
and humidity test chamber

(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

稳态阳光温湿度试验箱 校准规范

JJF(津) XXXX-2026

Calibration specification for steady state
sunlight temperature and humidity test chamber

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：河北工业大学

本规范委托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：

冯 宇 （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）
马新新 （天津市计量监督检测科学研究院）

参加起草人：

翟家强 （天津市计量监督检测科学研究院）
任 晟 （天津市计量监督检测科学研究院）
陈 聪 （河北工业大学）

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.....	(2)
5 计量特性.....	(2)
6 校准条件.....	(3)
7 校准项目和校准方法.....	(4)
7.1 校准项目.....	(4)
7.2 校准前检查.....	(4)
7.3 校准方法.....	(4)
8 校准结果.....	(10)
9 复校时间间隔.....	(11)
附录 A 校准结果内页推荐格式.....	(12)
附录 B 校准原始记录内页推荐格式.....	(14)
附录 C 校准结果不确定度评定示例.....	(17)

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》、JJF 1001《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》为基础性系列规范进行编写。使用本规范时，引用文件的最新版本（包括所有的修改草案）适用于本规范。

本规范为首次发布。

稳态阳光温湿度试验箱校准规范

1 范围

本规范适用于, 光谱分布范围(300~1200)nm, 辐照度(10~1600) W/m²的模拟太阳光源、温度范围(-60~300)℃、湿度范围 10%RH~98%RH 的稳态阳光温湿度试验箱的校准。其他测试条件下稳态阳光温湿度试验箱的校准可参照本规范执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件:

IEC 60904-3 2019 光伏器件 第3部分: 基于标准光谱辐照度数据的地面光伏器件测量原理 (Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data)

凡是注日期的引用文件, 仅注日期的版本适用于该规范。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

下列术语和计量单位适用于本规范:

3.1 光谱匹配度 spectral match

太阳模拟器光源的光谱辐照度与 IEC 60904-3 中规定的 AM1.5G 标准光谱辐照度的偏差。

3.2 辐照度不均匀度 irradiance non-uniformity

在整个有效工作区域内, 模拟太阳光源的辐照度最大值($E_{\max}$)和最小值($E_{\min}$)之间的相对偏差。

辐照度不均匀度 = $(E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}) \times 100\%$ 。

3.3 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, 模拟太阳光源的辐照度最大值($E_{\max}$)和最小值($E_{\min}$)之间的相对偏差。

辐照度不稳定性 = $(E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}) \times 100\%$ 。

3.4 辐照度 irradiance

单位面积上接收到的辐射能量的大小, 单位通常是 W/m²。

3.5 温度偏差 temperature deviation

试验箱稳定状态下, 工作空间各测量点在规定时间内实测最高温度和最低温度与设

定温度的上、下偏差。温度偏差包含温度上偏差和温度下偏差。

3.6 相对湿度偏差 relative humidity deviation

试验箱稳定状态下,工作空间各测量点在规定时间内实测最高相对湿度和最低相对湿度与设定相对湿度的上、下偏差。相对湿度偏差包含相对湿度上偏差和相对湿度下偏差。

3.7 温度波动度 temperature fluctuation

试验箱稳定状态下,在规定时间间隔内,工作空间任意一点温度随时间的变化量。

3.8 相对湿度波动度 relative humidity fluctuation

试验箱稳定状态下,在规定时间间隔内,工作空间任意一点相对湿度随时间的变化量。

3.9 温度均匀度 temperature uniformity

试验箱稳定状态下,工作空间在某一瞬时任意两点温度之间的最大差值。

3.10 相对湿度均匀度 relative humidity uniformity

试验箱稳定状态下,工作空间在某一瞬时任意两点相对湿度之间的最大差值。

4 概述

稳态阳光温湿度试验箱,是模拟自然太阳光谱和辐照度的光源和一种或一种以上温湿度环境条件的设备总称。通常由电源、光源,光学设备、滤光片、温湿度控制箱、以及操作系统组成。

5 计量特性

5.1 辐照度相对示值误差:一般不超过 $\pm 10\%$ 。

5.2 光源光谱匹配度:与标准太阳光光谱辐照度对比,偏差范围在 $[0.75, 1.25)$ 或者 $[1.125, 1.25)$ 之间,为A级;偏差范围在 $[0.6, 0.75)$ 或者 $[1.25, 1.4)$ 之间,为B级;偏差范围在 $[0.4, 0.6)$ 或者 $[1.4, 2.0)$ 之间,为C级。见表1:

表1 光谱匹配等级划分

等级	光谱匹配特性
	有效光谱范围 300nm~1200nm
A	$[0.75, 0.875)$ 或者 $(1.125, 1.25]$
B	$[0.6, 0.75)$ 或者 $(1.25, 1.4]$
C	$[0.4, 0.6)$ 或者 $(1.4, 2.0]$

5.3 光源辐照度不均匀度：小于等于 2%为 A 级；小于等于 5%为 B 级；小于等于 10%为 C 级。

5.4 光源辐照度不稳定性：小于等于 2%为 A 级；小于等于 5%为 B 级；小于等于 10%为 C 级。见表 2：

表 2 太阳模拟器辐照度不均匀度和不稳定度的等级划分

等级	辐照度不均匀度	辐照度不稳定性
		长期不稳定性
A	2%	2%
B	5%	5%
C	10%	10%

5.5 温度、相对湿度技术要求，见表 3：

表 3 温度、相对湿度技术要求

参数名称		温度	湿度
范围		$(-60\sim 300)^{\circ}\text{C}$	10%RH~98%RH
偏差	温度	$\pm 2.0^{\circ}\text{C}$	——
	湿度	——	$\pm 3.0\%\text{RH}$
均匀度	温度	$\pm 2.0^{\circ}\text{C}$	——
	湿度	——	4.0%RH
波动度	温度	$\pm 2.0^{\circ}\text{C}$	——
	湿度	——	$\pm 2.0\%\text{RH}$

注：1) 如果对计量特性另有要求的温度、相对湿度试验设备，按有关技术文件规定的要求进行校准。

2) 以上所有指标要求仅供参考，不适用于合格性判断。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： $(15\sim 35)^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.2 湿度： $\leq 85\%\text{RH}$ 。

6.1.3 其他条件：环境清洁通风，无影响仪器正常工作的电磁场、机械振动等不利因素，应避免其他冷、热源和光照的影响。

6.2 测量标准及要求

6.2.1 光谱仪（光谱辐照度计）：用于测量模拟太阳光源的光谱辐照度分布，工作波长至少覆盖 300nm 到 1200nm 的范围，波长准确度 $\pm 2\text{nm}$ 。

6.2.2 总辐射表： $10\text{W}/\text{m}^2\sim 1600\text{W}/\text{m}^2$ ，不确定度优于： $U_{\text{rel}}=2.0\%$ ， $k=2$ 。

6.2.3 检测器：包括检测器探头和数据采集器，用于测量模拟太阳光辐照度的不均匀度

和不稳定度，不稳定度优于 $\pm 0.2\%$ ，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。检测器尺寸不得超过 $20\text{cm}\times 20\text{cm}$ ，并且不能超过测量区域尺寸的 $1/5$ ，如果测试区域的尺寸某方向小于 10cm ，建议使用光电探测器或带掩膜版的光伏电池。

6.2.4 数据采集卡或数字电压表：用于采集在模拟太阳光的辐射下检测器产生的信号，最大允许误差 $\pm 0.2\%$ 。

6.2.5 温、湿度巡检仪：用于测量试验箱的温度、相对湿度，一般选用多通道温、湿度显示仪表或多路温、湿度测量装置；温度传感器选用四线制铂电阻温度计，通道数一般不少于9个，体积大于2立方米时通道数不少于15个。湿度传感器通道数一般不少于3个，体积大于2立方米时通道数不少于4个。温度范围： $(-60\sim 300)^{\circ}\text{C}$ ，最大允许误差： $\pm (0.15^{\circ}\text{C} + 0.002 |t|)$ 。相对湿度测量范围： $10\%\text{RH}\sim 98\%\text{RH}$ ，最大允许误差： $\pm 2.0\%\text{RH}$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

本规范校准项目为：光源辐照度，光谱匹配度，辐照度不均匀度，辐照度不稳定性，温度偏差，温度波动度，温度均匀度，相对湿度偏差，相对湿度波动度，相对湿度均匀度。

7.2 校准前检查

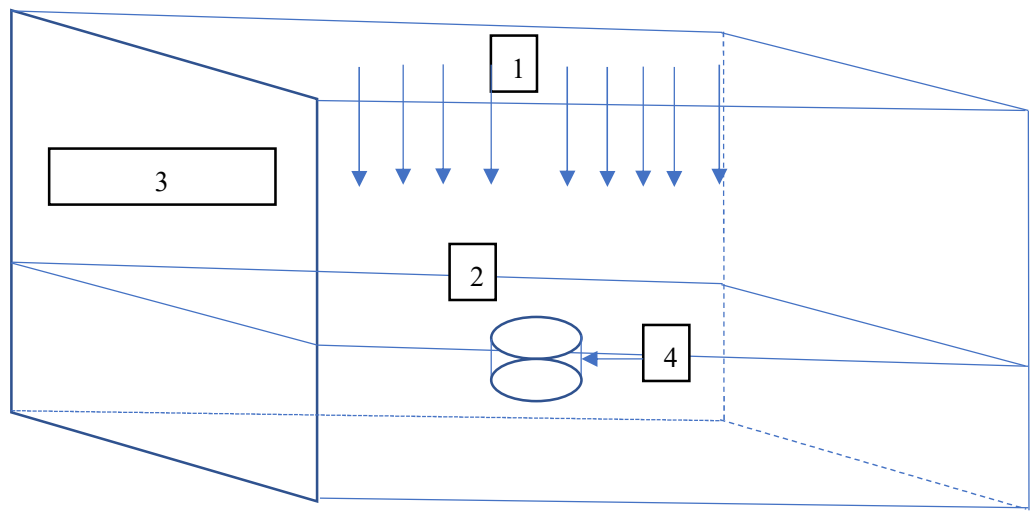
7.2.1 核对检查被校设备的名称、规格型号、生产厂商、出厂编号等。

7.2.2 检查被校设备的外观状况，清洁程度，确认设备的正常使用状态，有效工作面积以及周围环境状况。如发现影响校准数据的问题，应停止校准，和客户沟通之后再行校准。

7.3 校准方法

7.3.1 光源辐照度的校准

将总辐射表垂直放置于工作平面的中心点（如果设备自带外置的传感器探头，需要将总辐射表平行放置在传感器探头旁边，且感光传感器位置一致），如图1所示，测量辐照度，读取标准器示值，同时读取试验箱辐照度的显示值，最后计算辐照度的示值误差作为最后结果。



图中：1. 模拟太阳光源，2. 工作空间，3. 试验箱箱体，4. 总辐射表

图 1 校准辐照度示意图

7.3.2 光谱匹配度的校准

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，与表 4 中标准光谱辐照度分布的百分比之比值为光谱匹配度。

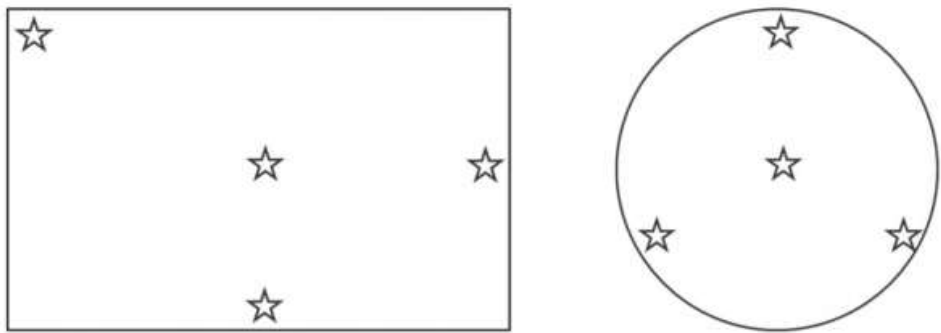


图 2 矩形测试区域（左）和圆形测试区域（右）的光谱辐照度测量位置

表 4 标准光谱辐照度分布

AM1.5G 条件（有效光谱范围 300 nm~1200nm）	
波长范围（nm）	占有有效光谱范围内积分辐照度的百分比（%）
300~470	16.61
470~561	16.74
561~657	16.67
657~772	16.63
772~919	16.66
919~1200	16.69

将各波段的比值与表 2 中数值范围进行比较, 对照 5.2 条款判断级别划分, 由最差的光谱匹配度等级确定模拟太阳光源的光谱匹配度的级别。

7.3.3 辐照度不均匀度校准

校准方法: 将试验箱的有效工作区域均等划分为若干区域, 检测器有效受光面积应大于区域面积的 80%, 检测器每个区域的受光面积不得大于 400cm^2 , 区域个数由试验箱有效工作区域面积决定, 一般不少于 64 个。

用检测器沿着工作区域选定方向移动, 采集其在每个区域的信号, 将数值记录下来。在整个工作区域找出来信号的最大值 ($V_{\max}$ 或 $E_{\max}$) 和最小值 ($V_{\min}$ 或 $E_{\min}$), 有必要的对话可以对最大值和最小值位置的信号复测, 以确定是否因偶然因素导致误判, 然后根据公式 (1)、(2) 进行不均匀度 E_{nu} 计算:

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

$$= (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}) \times 100\% \quad (2)$$

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。

对比 5.3 条款中等级的划分的数值, 得出辐照度不均匀度的等级。

7.3.4 辐照度不稳定度的校准

将检测器放置在工作区域的任意固定位置, 在一定的时间内根据设备的要求, 每隔固定时间测量检测器的信号, 在整个测量时间内, 找出检测信号的最大值 ($V_{\max}$ 或 $E_{\max}$) 和最小值 ($V_{\min}$ 或 $E_{\min}$), 按照公式 (3)、(4) 进行不稳定度 E_{ins} 的计算:

$$E_{\text{ins}} = (V_{\max} - V_{\min}) / (V_{\max} + V_{\min}) \times 100\% \quad (3)$$

$$= (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}) \times 100\% \quad (4)$$

对比 5.4 条款中等级的划分的数值, 得出辐照度不稳定度的等级。

式中:

E_{ins} ——有效辐照面内辐照不稳定度, 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。

7.3.5 温度、相对湿度的校准

7.3.5.1 实验人员应将传感器按照 7.3.5.2 的要求布放在温湿度试验设备的空间位置。而且保证每一个传感器在被校准设备循环风的作用下不应有剧烈晃动。传感器应通过试验设备的过线孔,如设备没有过线孔,也应将传感器排好使设备的门能关好且不能有漏气的现象。实验人员在校准过程中监测传感器的工作状态和被校设备的状态,若出现异常情况应及时妥善处理。

温度、相对湿度的校准点一般根据客户的要求选择常用的温度、相对湿度点,或者选择设备适用范围的上、下限和中间点。

7.3.5.2 温度、相对湿度测量点的位置及数量:传感器应该布置在被校准试验箱的三个不同层面上,称为上、中、下三层,中层为通过工作空间几何中心的平行于地面的校准工作面,各布点位置与设备内壁的距离为各边长的 $1/10$ 。传感器测量点位置也可以根据用户实际工作进行布置。

温度传感器测量点用 1、2、3...数字表示,相对湿度传感器测量点用 A、B、C...字母表示。

试验箱工作室容积不大于 2m^3 时,温度测量点为 9 个,相对湿度测量点为 3 个,位置如图 3:

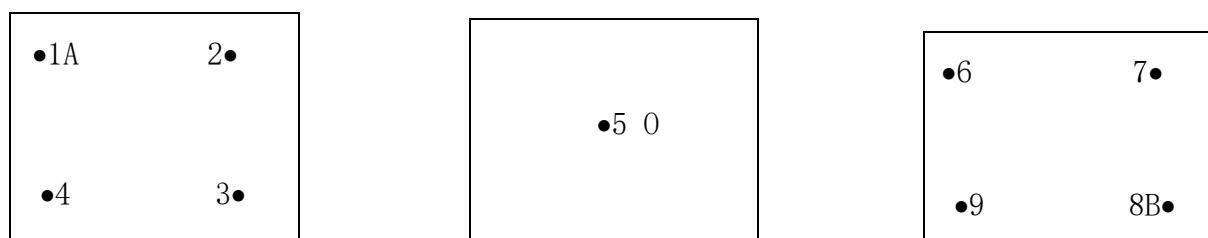


图 3 温度测量点布放位置

测量点 0 位于工作室的几何中心,其他各测量点与试验设备内壁的距离为各自边长的 $1/10$,但不小于 50mm 。工作室容积大于 2m^3 时,温度测量点为 15 个,相对湿度测量点为 4 个,位置如图 4:

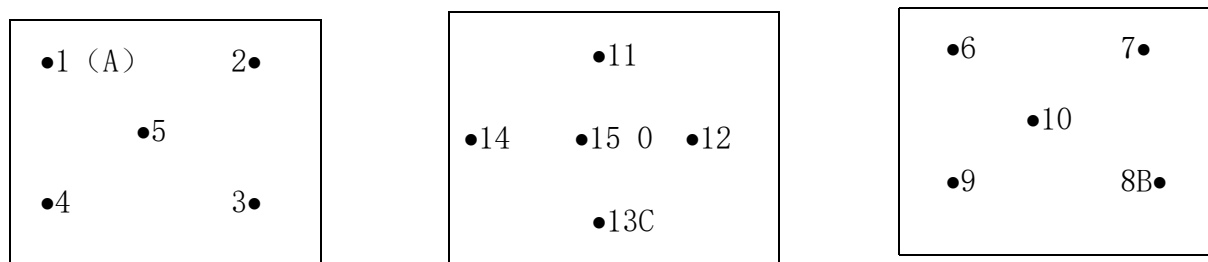


图4 温、湿度测量点布放位置

测量点 5、15 (0)、10 分别位于上、中、下层的几何中心附近，其他各测量点与试验设备内壁的距离为各自边长的 1/10，但不小于 50mm。

当试验设备容积小于 0.05m³ 或大于 50m³ 时，可适当减少或增加测量点。根据试验和校准的需要，可在设备工作空间增加对可疑点的测量。对于其他形状的试验设备，测量点数量和位置可参照上述规定进行。

7.3.5.3 按上述图示要求布放温度、相对湿度传感器，将试验箱的温度、相对湿度控制器设定到所要求的标称温度、相对湿度数值，使设备正常工作。稳定后开始读数，每 2min 记录所有测试点的温度、相对湿度一次，在 30min 内共记录 16 组数据。

温度、相对湿度的稳定时间以说明书为准，说明书没有给出的，温度、相对湿度达到设定值 30min 后可以开始记录数据，如试验箱内温度、相对湿度仍未稳定，可以按照实际情况延长，但是总时间不能超过 60min。如果在规定的稳定时间之前能够提前达到稳定的，也可以提前记录数据。

7.3.5.4 数据处理

温度偏差：

$$\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_s \quad (5)$$

$$\Delta T_{\min} = T_{\min} - T_s \quad (6)$$

式中：

$\Delta T_{\max}$ ——温度上偏差，℃

$\Delta T_{\min}$ ——温度下偏差，℃

$T_{\max}$ ——各测量点规定时间内测量的最高温度，℃

$T_{\min}$ ——各测量点规定时间内测量的最低温度，℃

T_s ——设备设定温度，℃

温度均匀度：试验箱在稳定状态下，工作空间各测量点 30min 内（每 2min 测试一

次) 每次测量中实测最高温度与最低温度之差的算术平均值。

$$\Delta T_u = (\sum (T_{i\max} - T_{i\min})) / n \quad (7)$$

式中:

ΔT_u ——温度均匀度, °C

$T_{i\max}$ ——各测量点在第 i 次测得的最高温度, °C

$T_{i\min}$ ——各测量点在第 i 次测得的最低温度, °C

n——测量次数

温度波动度: 试验箱在稳定状态下, 工作空间各测量点 30min 内 (每 2min 测试一次) 实测最高温度与最低温度之差的一半, 冠以“±”号, 取全部测量点中变化量的最大值作为温度波动度的校准结果。

$$\Delta T_f = \pm \max [(T_{j\max} - T_{j\min}) / 2] \quad (8)$$

式中:

ΔT_f ——温度波动度, °C

$T_{j\max}$ ——测量点 j 在第 n 次测量中的最高温度, °C

$T_{j\min}$ ——测量点 j 在第 n 次测量中的最低温度, °C

相对湿度偏差:

$$\Delta H_{\max} = H_{\max} - H_s \quad (9)$$

$$\Delta H_{\min} = H_{\min} - H_s \quad (10)$$

式中:

$\Delta H_{\max}$ ——相对湿度上偏差, °C

$\Delta H_{\min}$ ——相对湿度下偏差, °C

$H_{\max}$ ——各测量点规定时间内测量的最高相对湿度, °C

$H_{\min}$ ——各测量点规定时间内测量的最低相对湿度, °C

H_s ——设备设定相对湿度, °C

相对湿度均匀度: 试验箱在稳定状态下, 工作空间各测量点 30min 内 (每 2min 测试一次) 每次测量中实测最高相对湿度与最低相对湿度之差的算术平均值。

$$\Delta H_u = (\sum (H_{i\max} - H_{i\min})) / n \quad (11)$$

式中:

ΔH_u ——相对湿度均匀度, °C

$H_{i\max}$ ——各测量点在第 i 次测得的最高相对湿度, °C

$H_{i\min}$ ——各测量点在第 i 次测得的最低相对湿度，℃

n ——测量次数

相对湿度波动度：试验箱在稳定状态下，工作空间各测量点 30min 内（每 2min 测试一次）实测最高相对湿度与最低相对湿度之差的一半，冠以“±”号，取全部测量点中变化量的最大值作为相对湿度波动度的校准结果。

$$\Delta H_r = \pm \max [(H_{j\max} - H_{j\min}) / 2] \quad (12)$$

式中：

ΔH_r ——相对湿度波动度，℃

$H_{j\max}$ ——测量点 j 在 n 次测量中的最高相对湿度，℃

$H_{j\min}$ ——测量点 j 在 n 次测量中的最低相对湿度，℃

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。

校准结果内页格式具体参照附录 A，格式上可依据实际情况做合理改动。被校准试验箱的光源辐照度，光谱匹配度，辐照度不均匀度，辐照度不稳定度，温度偏差，温度波动度，温度均匀度，相对湿度偏差，相对湿度波动度，相对湿度均匀度等参数数据应记入校准原始记录，按附录 B 的格式给出。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年。复校时间间隔由设备的使用情况、使用者、设备质量等因素决定，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

校准结果内页推荐格式

证书编号 *****

校 准 结 果

校准条件说明：温度：_____℃，相对湿度：_____%

一、光谱匹配度校准：

序号	波长范围 (nm)	AM1.5G 条件有效波段内 积分辐照度的百分比 (%)	太阳模拟器有效波段内 积分辐照度的百分比 (%)	各波段光谱辐照度		测量不确定度 $U_{rel}(\%)$ ($k=2$)
				匹配度	等级	
1	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				

二、辐照度不均匀度校准：

	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
测量平面辐照不均匀度 (mV)								

最大值 V_{max} (mV)	最小值 V_{min} (mV)	辐照度不均匀度 (%)	等级	测量不确定度 $U_{rel}(\%)$ ($k=2$)

三、辐照度不稳定性校准：

最大值 V_{max} (mV)	最小值 V_{min} (mV)	辐照度不稳定性 (%)	等级	测量不确定度 $U_{rel}(\%)$ ($k=2$)

四、太阳模拟光源结论：

被校准太阳模拟器光源符合等级：

转下页

证书编号 *****

校 准 结 果

五、辐照度校准：

辐照度 (W/m ²)				测量不确定度 <i>U</i> _{rel} (%) (<i>k</i> =2)
校准点	被校仪器示值	标准器示值	示值误差	

六、温度、湿度校准 光源状态：_____

序号	设定值	温度/相对湿度 上偏差	温度/相对湿度 下偏差	温度/相对湿度 波动度	温度/相对湿度 均匀度
1	℃	℃	℃	℃	℃
	%RH	%RH	%RH	%RH	%RH
2	℃	℃	℃	℃	℃
	%RH	%RH	%RH	%RH	%RH
3	℃	℃	℃	℃	℃
	%RH	%RH	%RH	%RH	%RH
测量不确定度			温度： <i>U</i> = ℃ (<i>k</i> =2)		
			相对湿度： <i>U</i> = %RH (<i>k</i> =2)		

以下空白

附录 B

校准原始记录内页推荐格式

记录编号：*****

稳态阳光温湿度试验箱校准记录

1. 基本信息

客户名称				
器具名称		型号规格		
出厂编号		生产厂家		
客户地址		校准地址		
计量器具名称	测量范围	不确定度/ 准确度等级/最大允许误差	证书编号	证书有效期至
依据技术文件				
校准环境条件	温度：	相对湿度：	校准日期： 年 月 日	
人 员	校准员：	核验员：		

2. 校准数据记录

温度：_____℃，相对湿度：_____%

一、光谱匹配度校准：

序号	波长范围 (nm)	AM1.5G 条件有效波段内 积分辐照度的百分比 (%)	太阳模拟器有效波段内 积分辐照度的百分比 (%)	各波段光谱辐照度		测量不确定度 $U_{rel}(\%) (k=2)$
				匹配度	等级	
1	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				

二、辐照度不均匀度校准：

	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
测量平面辐照不均匀度 (mV)								

最大值 V_{max} (mV)	最小值 V_{min} (mV)	辐照度不均匀度 (%)	等级	测量不确定度 $U_{rel}(\%) (k=2)$

三、辐照度不稳定性校准：

最大值 $V_{\max}$ (mV)	最小值 $V_{\min}$ (mV)	辐照度不稳定性 (%)	等级	测量不确定度 U_{rel} (%) ($k=2$)

四、太阳模拟光源结论：

被校准太阳模拟器光源符合等级：

五、辐照度校准：

辐照度 (W/m^2)										测量不确定度 U_{rel} (%) ($k=2$)
校准点	被校仪器示值			平均值	标准器示值			平均值	示值误差	

六、温度、湿度校准 光源状态：_____

次数	实测温度值 ℃														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
最大值															
最小值															
上偏差					下偏差					均匀度				波动度	
测量不确定度															

次数	实测湿度值 %RH								
	O	A	B	C	---	---	---	---	---
1					---	---	---	---	---
2					---	---	---	---	---
3					---	---	---	---	---
4					---	---	---	---	---
5					---	---	---	---	---
6					---	---	---	---	---
7					---	---	---	---	---
8					---	---	---	---	---
9					---	---	---	---	---
10					---	---	---	---	---
11					---	---	---	---	---
12					---	---	---	---	---
13					---	---	---	---	---
14					---	---	---	---	---
15					---	---	---	---	---
16					---	---	---	---	---
最大值					---	---	---	---	---
最小值					---	---	---	---	---
上偏差			下偏差		均匀度		波动度		
测量不确定度									

附录 C

校准结果不确定度评定示例

C.1 数学模型

$$Y=X$$

C.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 太阳模拟器光谱匹配度校准不确定度的评定

C.3.1 由光谱辐照度计校准引入的不确定度 u_1 的评定

由证书：300nm~1200nm， $U=3.9\%\sim 7.5\%$ ， $k=2$ ，由此可得，

$$u_1=2.0\%\sim 3.8\%;$$

C.3.2 余弦修正后的不确定度 u_2

通过改变光谱辐照度计探头角度，确定由余弦修正带来的误差。角度偏差 15° 以内， $u_2=0.7\%$ ，数据如表 C.1 所示。

表 C.1 光谱匹配度随光谱仪入射角度的变化关系

波长范围		300~470 nm	470~561 nm	561~657 nm	657~772 nm	772~919 nm	919~1200 nm
0°	比值/%	98.8	92.7	92.7	100	118.7	104.3
5°	比值/%	98.8	92.7	92.6	100	119.2	104.1
15°	比值/%	98.7	92.4	92.4	99.7	118.3	105.7
最大偏差/%		0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7

C.3.3 测量重复性引起的不确定度 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.2 所示，不确定度 $u_3=0.6\%$

表 C.2 太阳模拟器光谱匹配度测量重复性

波长范围	300~470nm	470~561nm	561~657nm	657~772nm	772~919nm	919~1200nm
比值/%	89.7	101.1	116.2	106.6	92.4	91.6
比值/%	89.7	101.0	116.2	106.6	92.4	91.9
比值/%	89.9	101.2	116.2	106.5	92.0	91.6
比值/%	89.6	101.0	116.2	106.6	92.4	92.0
比值/%	89.4	100.8	116.2	106.6	92.5	92.2
最大偏差/%	0.6	0.4	0	0.1	0.5	0.6

C.3.4 温度偏差引起的不确定度 u_4

在 10°C 、 25°C 和 30°C 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.3 所示, 不确定度 $u_4 = 0.6\%$ 。

表 C.3 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 (30℃)	M3/M1	M2/M1
300~470	89.3	89.8	89.2	99.9%	100.6%
470~561	95.4	96.0	95.4	100.0%	100.6%
561~657	104.3	105.0	104.4	100.1%	100.7%
657~772	103.9	104.4	103.9	100.0%	100.5%
772~919	108.6	108.2	107.9	99.4%	99.6%
919~1200	102.7	100.3	103.3	100.6%	97.7%

C.3.5 合成不确定度的评定

太阳模拟器光谱匹配度标准不确定度分量一览表如表 C.4

表 C.4 太阳模拟器光谱匹配度标准不确定度分量一览表

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	2.0%~3.8%	1	2.0%~3.8%
余弦修正后的不确定度	u_2	0.7%	1	0.7%
测量重复性引起的不确定度	u_3	0.6%	1	0.6%
温度偏差引起的不确定度	u_4	0.6%	1	0.6%

太阳模拟器光谱匹配度合成不确定度的评定: 由于各输入量之间相互独立或不相关, 则相对合成标准不确定度:

$$u_{\text{crel}} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 2.2\% \sim 4.0\%, (300\text{nm} \sim 1200\text{nm})$$

C.3.6 太阳模拟器光谱匹配度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:

$$U_{\text{rel}} = k u_c = 2 \times 2.2\% \sim 4.0\% = 4.4\% \sim 8.0\%, (300\text{nm} \sim 1200\text{nm})$$

C.4 太阳模拟器辐照度不均匀度校准不确定度评定

C.4.1 检测器不稳定性引入的不确定度 u_5

将检测器放置于高稳定度光源下, 稳定 30min 后, 测量其输出信号, 不稳定性数据如图 C.1 所示。

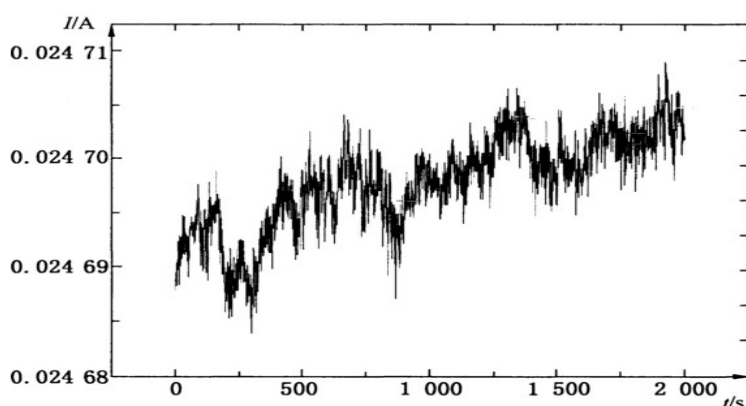


图 C.1 检测器输出信号随采集时间的变化曲线

$$I_{\max}=0.02471\text{A}, I_{\min}=0.02468\text{A}$$

检测器不稳定性计算如下：

$$u_5 = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \times 100\% = 0.06\%$$

C.4.2 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.4.3 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.4.4 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 16 bit， $1/2^{16}=1.5 \times 10^{-5}$ 。由此引起的不确定度可忽略不计。

C.4.5 太阳模拟器辐照度不均匀度校准的相对合成标准不确定度 u_c ：

$$u_c = \sqrt{u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2} = 1.0\%$$

C.4.6 太阳模拟器辐照度不均匀度校准的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：

$$U_{\text{rel}} = k u_c = 2 \times 1.0\% = 2\%$$

C.5 太阳模拟器辐照度不稳定性校准不确定度评定

C.5.1 硅参考太阳电池稳定性（包含仪器读数稳定性）引起的不确定度 u_9

此处同太阳模拟器辐照不均匀度中硅参考太阳电池稳定性，不稳定性 $u_9 = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \times 100\% = 0.06\%$

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

C.5.2 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；对于长脉冲瞬态太阳模拟器，采样取值的起始位置和终点位置对结果有一定的影响，如果脉冲峰值峰形平坦，偏差可以忽略，对于短脉冲尖形瞬态太阳模拟器，则不存在起止位置引起的偏差。

C.5.3 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.5.4 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.5.5 太阳模拟器辐照不稳定度校准的相对合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_9^2 + u_{10}^2 + u_{11}^2 + u_{12}^2} = 1.0\%$$

C.5.6 太阳模拟器辐照度不稳定度校准的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：

$$U_{rel} = k u_c = 2 \times 1.0\% = 2\%$$

C.6 不确定度报告

太阳模拟器光谱匹配度扩展不确定度：

$$U_{rel} = 4.4\% \sim 8.0\%, (300\text{nm} \sim 1200\text{nm})$$

太阳模拟器辐照度不均匀度校准的扩展不确定度： $U_{rel} = 2\%$ 。

太阳模拟器辐照度不稳定度校准的扩展不确定度： $U_{rel} = 2\%$ 。

对应 p 约为 95% 包含概率，取 $k=2$ 。

C.7 环境试验设备温度参数校准结果不确定度分析

C.7.1 温度上偏差测量模型：

$$\Delta t_{\max} = t_{\max} - t_S$$

式中： $\Delta t_{\max}$ —温度上偏差， $^{\circ}\text{C}$

$t_{\max}$ —各测量点规定时间内测量的最高温度， $^{\circ}\text{C}$

t_s —设备设定温度, °C

C.7.2 灵敏系数

环境试验设备的测量结果不确定度主要由、测量重复性引入的不确定度分量 $u(t_1)$ 、标准器显示分辨力引入的不确定度分量 $u(t_2)$ 、标准器修正值引入的不确定度分量 $u(t_3)$ 和标准器稳定性引入的不确定度分量 $u(t_4)$ 组成, 故此合成标准不确定度表示式为:

$$u_c^2(t) = c_1^2 u^2(t_1) + c_2^2 u^2(t_2) + c_3^2 u^2(t_3) + c_4^2 u^2(t_4)$$

灵敏系数为:

$$c_1 = \partial T / \partial t_1 = -1; \quad c_2 = \partial T / \partial t_2 = 1;$$

$$c_3 = \partial T / \partial t_3 = 1; \quad c_4 = \partial T / \partial t_4 = 1;$$

C.7.3 不确定度来源及分析

(1) 由标准器读数重复性引入的标准不确定度 $u(t_1)$

对环境试验设备作 10 次独立重复的测量, 共记录下 10 个读数, 共记为 $t_1, t_2, \dots, t_{10}$, 其测量列如表 C.5 所示。(标称值为 30°C)

表 C.5 测量列

次数	$t_i / ^\circ\text{C}$	次数	$t_i / ^\circ\text{C}$
1	30.61	6	30.66
2	30.58	7	30.68
3	30.51	8	30.62
4	30.52	9	30.55
5	30.54	10	30.51

根据公式
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}}$$

计算平均值试验标准差得 $s = 0.06^\circ\text{C}$ 。然后, 在认可的量程范围的上下限各重复上述的测量。在 -60°C 时, $u(t_1) = 0.06^\circ\text{C}$; 在 300°C 时, $u(t_1) = 0.07^\circ\text{C}$ 。三者相差不大, 所以在整个量程范围内都可以取 $u(t_1) = 0.07^\circ\text{C}$ 。

(2) 由标准器显示分辨力引入的标准不确定度 $u(t_2)$

标准器显示分辨力为 0.01°C , 且服从均匀分布, 故:

$$u(t_2) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003^\circ\text{C}$$

(3) 由标准器引入的标准不确定度 $u(t_3)$

由温湿度巡回检查仪校准证书得知，温湿度巡回检查仪的扩展不确定度 $U=0.04^{\circ}\text{C}$ ， $k=2$ ，故

$$u(t_3) = \frac{0.04}{2} = 0.02^{\circ}\text{C}$$

(4) 由标准器温度稳定性引入不确定度 $u(t_4)$

本标准器相邻两次校准温度修正值最大变化 0.1°C ，估计为服从均匀分布，

$$\text{故 } u(t_4) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.06^{\circ}\text{C}$$

C.7.4 合成标准不确定度（表 C.6）

表 C.6 合成标准不确定度

标准不确定度分量 $u(t_i)$	不确定度来源	标准不确定度值	c_i	$ c_i \cdot u(t_i)$
$u(t_1)$	重复性	0.07°C	-1	0.07°C
$u(t_2)$	标准器显示分辨力	0.003°C	1	0.003°C
$u(t_3)$	标准器引入	0.02°C	1	0.02°C
$u(t_4)$	标准器温度稳定性	0.06°C	1	0.06°C

$$u_c = \sqrt{u(t_1)^2 + u(t_2)^2 + u(t_3)^2 + u(t_4)^2} = 0.10^{\circ}\text{C}$$

C.7.5 扩展不确定度

此四个不确定度分量相互独立，包含概率约为 95% 时， $U = ku_c = 2 \times 0.10^{\circ}\text{C} = 0.2^{\circ}\text{C}$ （ $k=2$ ）

C.8 环境试验设备的相对湿度上偏差校准结果不确定度分析

C.8.1 测量模型：

$$\Delta h_{\max} = h_{\max} - h_s$$

式中：

$\Delta h_{\max}$ —相对湿度上偏差，%RH；

$h_{\max}$ —各测量点规定时间内测量的最高相对湿度，%RH；

h_s —设备设定相对湿度，%RH；

C.8.2 灵敏系数

环境试验设备的测量结果不确定度主要由测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(h_1)$ 、标准器显示分辨力引入的标准不确定度分量 $u(h_2)$ 、温湿度巡回检查仪引入的不确定度分量 $u(h_3)$ 和标准器稳定性引入的不确定度分量 $u(h_4)$ 组成，故此合成标准不确定度表示式为：

$$u_c^2(h) = c_1^2 u^2(h_1) + c_2^2 u^2(h_2) + c_3^2 u^2(h_3) + c_4^2 u^2(h_4)$$

灵敏系数为:

$$c_1 = \partial H / \partial h_1 = -1; \quad c_2 = \partial H / \partial h_2 = 1;$$

$$c_3 = \partial H / \partial h_3 = 1; \quad c_4 = \partial H / \partial h_4 = 1;$$

C.8.3 不确定度来源及分析

(1) 由标准器读数重复性引入的标准不确定度 $u(h_1)$

对环境试验设备作 10 次独立重复的测量, 共记录下 15 个读数, 共记为 $h_1, h_2, \dots, h_{15}$, 其测量列如表 C.7 所示。(标称温度为 30℃, 标称相对湿度为 60%RH)

表 C.7 测量列

次数	$h_i/\%RH$	次数	$h_i/\%RH$
1	60.55	6	60.59
2	60.56	7	60.48
3	60.54	8	60.34
4	60.41	9	60.44
5	60.55	10	60.51

根据公式 $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}}$

计算标准差得 $s=0.08\%RH$ 。则由 10 次独立重复测量引入的标准不确定度分量 $u(h_1) = s = 0.08\%RH$ 。

然后, 在 30℃ 下, 20%RH 时, $u(h_1) = 0.07\%RH$; 在 95%RH 时, $u(h_1) = 0.08\%RH$ 。三者数值相近, 所以在整个湿度范围内都可以取 $u(h_1) = 0.08\%RH$ 。

在其他温度点重复上述测试, 在 30℃ 左右时标准不确定度值最大, 故取 $u(h_1) = 0.08\%RH$ 。

(2) 由仪器显示分辨力引入的标准不确定度 $u(h_2)$

标准器相对湿度显示仪表分辨力最小值为 0.1%RH 且服从均匀分布, 故:

$$u(h_2) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03\%RH$$

(3) 由标准器溯源产生的修正值引入不确定度 $u(h_3)$

由温湿度巡回检查仪校准证书得知, 温湿度巡回检查仪修正值的扩展不确定度 $U=1.2\%RH (k=2)$,

估计为服从正态分布, 故

$$u(h_3) = \frac{1.2}{2} = 0.6\%RH。$$

(4) 由标准器相对湿度稳定性引入不确定度 $u(h_4)$

本标准器相邻两次校准湿度修正值最大变化 0.5%RH，估计为服从均匀分布，

$$\text{故 } u(h_4) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29\%RH。$$

C.8.4 合成标准不确定度（表 C.8）

表 C.8 合成标准不确定度

标准不确定度分量 $u(h_i)$	不确定度来源	标准不确定度值	c_i	$ c_i u(t_i)$
$u(h_1)$	重复性	0.08%RH	-1	0.08%RH
$u(h_2)$	标准器显示分辨力	0.03%RH	1	0.03%RH
$u(h_3)$	标准器引入	0.6%RH	1	0.6%RH
$u(h_4)$	标准器温度稳定性	0.29%RH	1	0.29%RH

(1) 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u(h_1)^2 + u(h_2)^2 + u(h_3)^2 + u(h_4)^2} = 0.7\%RH$$

(2) 扩展不确定度

每个不确定度分量相互独立，包含概率为 95%时，取 $k=2$ ，故 $U = ku_c = 2 \times 0.7\%RH = 1.4\%RH$ ($k=2$)。

C.8.5 不确定度的表达

以上为温湿度的上偏差的评定过程。分析可以得知，温湿度下偏差、温湿度均匀度的评定过程与上述过程完全一致。而温湿度波动性由于数学模型的差别，评定值略小于上面的数值。保险起见，也可以使用上述数值作为评定结果。故而，温度参量、湿度参量可以分别用一个评定结果，具体见下表 C.9：

表 C.9 不确定度评定结果

项目	测量范围	扩展不确定度 U ， $k=2$
温度参数	-60℃～300℃	0.2℃
相对湿度参数	10%RH～95%RH	1.4%RH

C.9 光衰预处理试验箱辐照度校准不确定度的评定

C.9.1 数学模型

$$E = \bar{E} + \delta$$

式中：

E ——被校光衰预处理试验箱辐照度测量结果, W/m^2 ;

$\bar{E}$ ——被校示值 n 次测量的辐照度算术平均值, W/m^2 ;

δ ——辐照度的示值误差, W/m^2 。

C.9.2 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.9.3 各输入量的标准不确定度的分析与评定

影响测量结果不确定度的分量包括：光衰预处理试验箱测量重复性引入的不确定度分量；光衰预处理试验箱辐照不均匀性引入的不确定度分量；杂散辐射引入的不确定度分量；余弦误差引入的不确定度分量；非线性引入的不确定度分量；标准器重复性引入的不确定度分量；标准器溯源引入的不确定度分量；标准器安装与装调引入的不确定度分量。

(1) 光衰预处理试验箱测量重复性引入的不确定度 u_1

测量条件固定，每隔 1min，记录光衰预处理试验箱辐照度显示值，复性进行 10 次测量，测量数据见表 C.10:

表 C.10 10 次测量数据 (W/m^2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
706	710	713	705	702	709	712	707	704	703

十次测量平均值: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} x_i = 707.1 \text{ W}/\text{m}^2$

单次实验标准差:

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} / \bar{x} = 0.54\%$$

经过实际计算，确定该测量点的不确定度为所有测量点中的最大值。则由测量重复性引入的不确定度分量 $u_{1\text{rel}}$ 为:

$$u_{1\text{rel}} = S(x_i) = 0.54\%$$

(2) 光衰预处理试验箱辐照不均匀性引入的不确定度分量 u_2

由于箱体辐照不均匀性带来的测量不确定度 $u_{2\text{rel}} = 1.50\%$

(3) 杂散辐射引入的不确定度分量 u_3

由于光路设置不完善，来自周围环境中的杂散辐射引起的测量不确定度 $u_{3\text{rel}} = 0.50\%$

(4) 余弦误差引入的不确定度分量 u_4

由于测量仪器余弦特性的不完善引起的测量不确定度 $u_{4\text{rel}} = 1.50\%$

(5) 非线性引入的不确定度分量 u_5

由于非线性误差引起的测量不确定度 $u_{5\text{rel}}=1.00\%$

(6) 标准器重复性引入的不确定度分量 u_6

测量条件固定，安装标准器，用标准器复性进行 10 次测量，测量数据见表 C.11:

表 C.11 10 次测量数据 (W/m^2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
705	708	711	716	714	710	706	710	711	713

十次测量平均值: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} x_i = 710.4 \text{ W/m}^2$

单次实验标准差:

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} / \bar{x} = 0.48\%$$

经过实际计算，确定该测量点的不确定度为所有测量点中的最大值。则由测量重复性引入的不确定度分量 $u_{6\text{rel}}$ 为:

$$u_{6\text{rel}} = S(x_i) = 0.48\%$$

(7) 标准器溯源引入的不确定度分量 u_7

根据溯源证书可知 $U_{\text{rel}}=6\%$, $k=2$, 由此可得, 溯源不确定度 $u_{7\text{rel}}=3\%$

(8) 标准器安装与装调引入的不确定度分量 u_8

标准器的安装和装调给测量结果带来的测量不确定度 $u_{8\text{rel}}=1.00\%$

C.9.4 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.12 所示

表 C.12 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)$
$u_{1\text{rel}}$	测量重复性	0.54%	1	0.54%
$u_{2\text{rel}}$	辐照不均匀性	1.50%	1	1.50%
$u_{3\text{rel}}$	杂散辐射	0.50%	1	0.50%
$u_{4\text{rel}}$	余弦误差	1.50%	1	1.50%
$u_{5\text{rel}}$	非线性	1.00%	1	1.00%
$u_{6\text{rel}}$	标准器重复性	0.48%	1	0.48%
$u_{7\text{rel}}$	标准器溯源	3%	1	3%
$u_{8\text{rel}}$	标准器安装与装调	1.00%	1	1.00%

各不确定度分量独立不相关，则合成标准不确定度 u_{crel} 为:

$$u_{\text{crel}} = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_{i\text{rel}}^2} = 3.89\%$$

C.9.5 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:

$$U_{\text{rel}} = k u_{\text{crel}} = 2 \times 3.89\% = 7.78\% \approx 7.8\%$$
