

JJF(闽)1154—2024



福建省地方计量技术规范

JJF(闽)1154—2024

光生物安全测试系统校准规范

Calibration Specification for Measuremental System
of Photobiological Safety

2024 – 05 – 30 发布

2024 – 08 – 30 实施

福建省市场监督管理局 发布

光生物安全测试系统校准规范

Calibration Specification for Measuremental
System of Photobiological Safety

JJF (闽) 1154—2024

归口单位：福建省市场监督管理局

主要起草单位：厦门市计量检定测试院

福建省计量科学研究院

参加起草单位：宸鸿科技（厦门）有限公司

本规范委托福建省计量规范技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

阮育娇（厦门市计量检定测试院）

黄艺滨（厦门市计量检定测试院）

廖小华（福建省计量科学研究院）

参加起草人：

邓水发（厦门市计量检定测试院）

陈 玲（福建省计量科学研究院）

张哲嘉〔宸鸿科技（厦门）有限公司〕

福建省计量规范技术委员会

目 录

引言..... (Ⅱ)

1 范围 (1)

2 引用文件 (1)

3 术语和计量单位 (1)

4 概述 (1)

5 计量特性 (2)

6 校准条件 (2)

6.1 环境条件..... (2)

6.2 测量标准及其他设备..... (2)

7 校准项目和校准方法 (4)

7.1 校准前准备..... (4)

7.2 校准项目和方法..... (4)

8 校准结果表达 (8)

9 复校时间间隔 (8)

附录 A 光生物安全测试系统校准原始记录参考格式 (9)

附录 B 光生物安全测试系统校准证书（内页）参考格式 (11)

附录 C 测量不确定度评定示例 (13)

引 言

JJF 1001《通用计量名词术语与定义》、JJF1032《光学辐射计量名词术语及定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》和 JJF1071《国家计量校准规范编写规则》共同构成支撑本规范制定的基础性系列规范。

本规范主要参考 IEC 62471《灯和灯系统的光生物安全》（Photobiological safety of lamps and lamp systems）等技术文件。

本规范为首次制定。

福建省计量规范技术委员会

光生物安全测试系统校准规范

1 范围

本规范适用于光生物安全测试系统的校准, 校准波长范围为 250 nm ~ 2500 nm。

2 引用文件

本规范引用了下列文件:

JJG 211-2021 亮度计检定规程

JJG 245-2005 光照度计检定规程

JJG 384-2002 光谱辐射照度标准灯检定规程

JJF 1975-2022 光谱辐射计校准规范

JJF 1989-2022 光谱照度计校准规范

JJF 1990-2022 积分球式标准光源校准规范

IEC 62471 灯和灯系统的光生物安全 (Photobiological safety of lamps and lamp systems)

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规范。

3.1 光谱辐射照度 Spectral Irradiance

在包含波长 λ 的单位波长间隔内, 被光辐射照射的表面上单位面积内接收的辐射通量。该量的符号为 $E(\lambda)$, 单位为 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

3.2 光谱辐射亮度 Spectral Radiance

辐射源在波长 λ 处, 在某一方向, 单位投影表面、单位立体角内的辐射通量。该量的符号为 $L(\lambda)$, 单位为 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

3.3 测量视场角 Measuremental Field Angle

光谱辐射亮度 / 亮度测试时, 样品测量视场边缘与测试系统光接收位置构成的两条线之间的夹角。该量的符号为 α , 单位为 mrad。

4 概述

光生物安全测试系统主要用于测试评价光辐射对人体眼睛和皮肤的辐射危害性, 通过在特定条件下对光谱辐射照度和光谱辐射亮度的测试, 进而对各类光辐射危害进行评估, 主要包含皮肤和眼睛的光化学紫外危害、眼睛的近紫外危害、视网膜蓝光危害、

视网膜热危害、眼睛的红外辐射危害及皮肤热危害。图 1 为光生物安全测试系统的示意图，光生物安全测试系统至少包括单色仪系统，入射光学系统和光辐射探测系统。单色仪系统一般采用双单色仪，由两组分光元件组成。入射光学系统可以是不同入射孔径的余弦漫射头或积分球，光学镜头组件等。光辐射探测系统可以采用阵列式探测器或采用光电探测器进行光谱扫描。

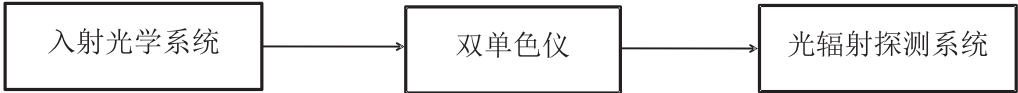


图 1 光生物安全测试系统示意图

5 计量特性

光生物安全测试系统的计量特性包括：波长示值误差、光谱辐射照度、光谱辐射亮度、照度、亮度、测量视场角相对示值误差。各项指标见表 1。

表 1 光生物安全测试系统各项指标技术要求

序号	校准参数	示 值 误 差
1	波长	250 nm~1000 nm：不超过 ± 1.0 nm 1001 nm~2500 nm：不超过 ± 2.0 nm
2	光谱辐射照度	250 nm~400 nm：不超过 $\pm 10\%$ 401 nm~2500 nm：不超过 $\pm 8\%$
3	照度	不超过 $\pm 8\%$
4	光谱辐射亮度	250 nm~400 nm：不超过 $\pm 12\%$ 401 nm~2500 nm：不超过 $\pm 10\%$
5	亮度	不超过 $\pm 10\%$
6	测量视场角	不超过 $\pm 8\%$
注：以上指标不适用于合格性判定，仅供参考。		

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 实验室环境温度 (23 ± 5) °C，相对湿度 25% ~ 85%，气压 86 kPa ~ 106 kPa。

6.1.2 实验室应为光学暗室。

6.1.3 环境条件要求无影响仪器正常工作的电磁干扰。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 波长标准灯，可采用汞灯、氖灯、氩灯或激光，光源谱线需尽可能覆盖光生物安全测试系统校准波长范围。

6.2.2 光谱辐射照度标准灯必须提供特定电流下的光谱辐射照度值和相应的光谱辐射照度不确定度,标准灯预热后 2h 内光谱辐射照度值的相对变化 (见公式 (1)) 不超过 1%,光谱辐射照度量值的不确定度见表 2。

$$\Delta E = \left(\frac{E_{\max}}{E_{\min}} - 1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

ΔE ——波长 500nm 处的光谱辐射照度相对变化值, %;

$E_{\max}$ ——波长 500nm 处的光谱辐射照度最大值, $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$;

$E_{\min}$ ——波长 500nm 处的光谱辐射照度最小值, $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

表 2 标准灯光谱辐射照度量值的不确定度

波段范围	不确定度 % ($k=1$)
250 nm~400 nm	1.45
400 nm~750 nm	0.88
750 nm~2500 nm	1.34

6.2.3 积分球标准光源光谱辐射信号 1h 内短期稳定性优于 0.5%,积分球出光口面积 80% 的面均匀性优于 98%,积分球标准光源必须提供特定电流或亮度下的光谱辐射亮度值和相应的光谱辐射亮度不确定度,光谱辐射亮度量值的不确定度见表 3。

表 3 积分球标准光源光谱辐射亮度量值的不确定度

波段范围	不确定度 % ($k=2$)
250 nm~400 nm	9.8
400 nm~750 nm	5.6
750 nm~2500 nm	7.5

6.2.4 发光强度标准灯色温为 2856 K,发光强度量值扩展不确定度 $U_{\text{rel}}=1.2\%$ ($k=2$)。

6.2.5 标准照度计的级别为标准级,相对示值误差不超过 $\pm 1.0\%$ 。

6.2.6 供电电源,满足标准灯及标准光源工作电压电流范围要求的直流电源 (稳流、稳压),输出电压连续可调,10 min 内输出电压相对变化 (见公式 (2)) 应不大于 0.02%。

$$\Delta V = \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

ΔV ——输出电压相对变化值, %;

$V_{\max}$ ——输出电压最大值, V;

$V_{\min}$ ——输出电压最小值, V。

6.2.7 钢卷尺, 毫米分度示值最大允许误差为 ± 0.2 mm。

6.2.8 标准尺寸板示意图如图 2 所示, 最小分度值为 0.1 mm。

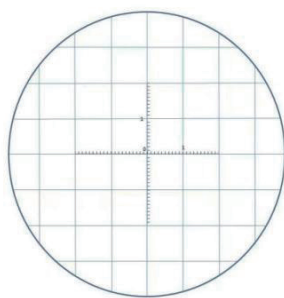


图 2 标准尺寸板示意图

7 校准项目和校准方法

7.1 校准前准备

光生物安全测试系统外观及工作正常性检查:

- a) 仪器应有名称、规格型号、编号、制造厂名等标记。
- b) 仪器不应有影响其电气和光学性能的机械损伤, 调节旋钮、按键、开关等均应工作正常, 无松动现象。
- c) 仪器通电后能正常工作。

7.2 校准项目及方法

7.2.1 波长示值误差

根据测试系统的波长范围选择适宜的波长标准灯, 将波长标准灯对准测试系统入光口并点亮, 用测试系统扫描标准灯光谱信号, 分别读取不同特征波长 (如 253.64 nm、404.65 nm、435.81 nm、546.05 nm、1013.96 nm) 的测量值, 每个波长重复测量两次, 取平均值, 作为波长测量值, 根据公式 (3) 计算各波长点的示值误差。

$$\Delta \lambda = \lambda_t - \lambda_s \quad (3)$$

式中:

$\Delta \lambda$ —— 波长示值误差, nm;

λ_t —— 波长测量值, nm;

λ_s —— 特征波长标准值, nm。

7.2.2 光谱辐射照度相对示值误差

a) 图 3 给出了测试系统光谱辐射照度校准的示意图, 调节光路, 使光谱辐射照度标准灯灯丝中心和测试系统辐照度探头接收面中心等高且同轴, 并调节两者之间的距离为光谱辐射照度标准灯工作距离。

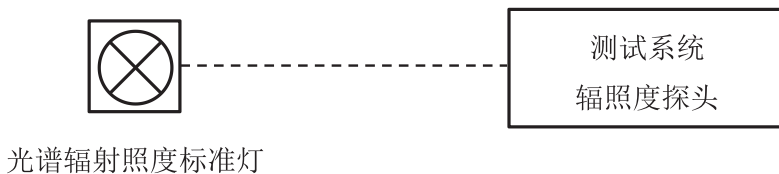


图 3 光谱辐射照度校准示意图

b) 将标准灯电流缓慢地升至工作电流进行预热, 用测试系统测得标准灯的光谱辐射照度, 重复测两次, 取平均值作为最终测量结果。

c) 根据公式 (4) 计算光谱辐射照度相对示值误差。

$$\Delta E(\lambda) = \frac{E_t(\lambda) - E_s(\lambda)}{E_s(\lambda)} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

$\Delta E(\lambda)$ —— 光谱辐射照度相对示值误差, %;

$E_t(\lambda)$ —— 波长 λ 处的光谱辐射照度测量值, $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$;

$E_s(\lambda)$ —— 波长 λ 处的光谱辐射照度标准值, $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

7.2.3 光谱辐射亮度相对示值误差

a) 图 4 给出了测试系统光谱辐射亮度校准的示意图, 调节光路, 使积分球标准光源出光口中心与测试系统辐亮度入射口中心等高且同轴, 测试系统测光轴线与出光面垂直, 并调焦使标准光源出光面成像清晰。

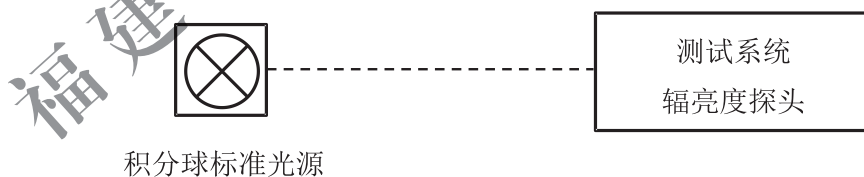


图 4 光谱辐射亮度校准示意图

b) 点亮积分球标准光源, 将电流缓慢地升至工作电流进行预热, 用测试系统测得标准灯的光谱辐射亮度, 重复测两次, 取平均值作为最终测量结果。

c) 根据公式 (5) 计算光谱辐射亮度相对示值误差。

$$\Delta L(\lambda) = \frac{L_t(\lambda) - L_s(\lambda)}{L_s(\lambda)} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

$\Delta L(\lambda)$ —— 光谱辐射亮度相对示值误差, %;

$L_t(\lambda)$ —— 波长 λ 处的光谱辐射亮度测量值, $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$;

$L_s(\lambda)$ —— 波长 λ 处的光谱辐射亮度标准值, $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

7.2.4 照度相对示值误差

a) 图 5 给出了测试系统照度校准的示意图, 发光强度标准灯灯丝中心和标准照度计探头接收面中心等高且同轴。

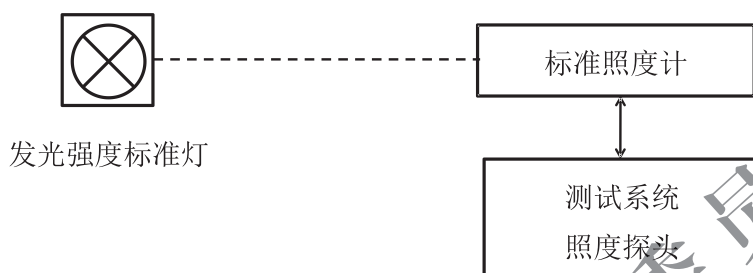


图 5 照度校准示意图

b) 将标准灯电流缓慢地升至工作电流进行预热, 调整标准灯和标准照度计探头的距离, 测得不同距离的照度值, 重复测量两次, 取平均值作为照度标准值。

c) 按上述步骤对测试系统照度探头进行安装、调整, 在同样距离下读取照度测量值, 重复测量两次, 取平均值作为最终测量结果。

d) 根据公式 (6) 计算照度相对示值误差。

$$\Delta E = \frac{E_t - E_s}{E_s} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

ΔE —— 照度相对示值误差, %;

E_t —— 照度测量值, lx;

E_s —— 照度标准值, lx。

7.2.5 亮度相对示值误差

a) 图 6 给出了测试系统亮度校准的示意图, 调节光路, 使积分球标准光源出光口中心与测试系统辐亮度入射口中心等高且同轴, 测试系统测光轴线与出光面垂直, 并调焦使标准光源出光面成像清晰。

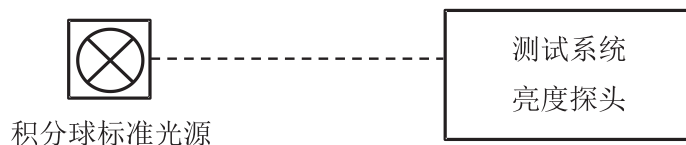


图 6 亮度校准示意图

b) 点亮积分球标准光源, 将电流缓慢地升至工作电流进行预热, 调整亮度源衰减器, 用测试系统测得对应的亮度值, 重复测量两次, 取平均值作为最终测量结果。

c) 根据公式 (7) 计算亮度相对示值误差。

$$\Delta L = \frac{L_t - L_s}{L_s} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

ΔL —— 亮度相对示值误差, %;

L_t —— 亮度测量值, $\text{cd} \cdot \text{cm}^{-2}$;

L_s —— 亮度标准值, $\text{cd} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

7.2.6 测量视场角

a) 图 7 给出了测试系统测量视场角校准的示意图, 将标准尺寸板置于积分球光源出光口处, 与测试系统辐亮度探头垂直放置, 并保持一定距离。

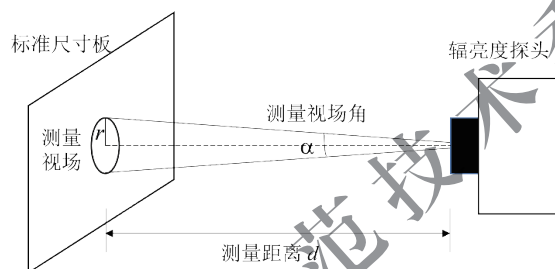


图 7 测量视场角校准示意图

b) 设置测试系统辐亮度测量视场角, 该值为测量视场角示值。

c) 点亮积分球光源, 调整测试系统焦距, 使得标准尺寸板在测量视场内成像清晰, 读取测量视场对应的尺寸板上的刻度值, 重复测量两次, 取平均值作为测量视场角标准值。

d) 根据公式 (8) 计算测量视场角标准值。

$$\alpha = 2 \arctan \left(\frac{r}{d} \right) \times 10^3 \quad (8)$$

式中:

α —— 测量视场角, mrad;

r —— 测量视场半径, mm;

d —— 测量距离, mm。

e) 根据公式 (9) 计算测量视场角相对示值误差。

$$\Delta \alpha = \frac{\alpha_{\text{示值}} - \alpha}{\alpha} \times 100\% \quad (9)$$

式中:

$\Delta \alpha$ —— 测量视场角相对示值误差, %;

$\alpha_{\text{示值}}$ —— 测量视场角示值, mrad;

α ——测量视场角标准值, mrad。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书或校准报告上反映;校准证书至少应包括以下信息:

- a) 标题:“校准证书”;
 - b) 实验室的名称和地址;
 - 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和应用有关时,应对被校样品的抽样程序进行说明;
 - i) 校准所依据的技术规范的标识,包括名称及代号;
 - j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
 - k) 校准环境的描述;
 - l) 校准结果及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) 校准结果仅对校准对象有效的声明;
 - p) 未经校准实验室书面批准,不得部分复制校准证书的声明。
- 校准记录参考格式见附录 A,校准结果参考格式见附录 B。

9 复校时间间隔

复校时间间隔根据使用的具体情况,由使用单位自主决定,建议一般不超过 1 年。

三、光谱辐射亮度：

波长 (nm)	光谱辐射亮度标准值 ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$)	光谱辐射亮度测量值 ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$)	相对示值误差 (%)

四、照度：

标准值 (lx)	测量值 (lx)	相对示值误差 (%)

五、亮度：

标准值 ($\text{cd}\cdot\text{cm}^{-2}$)	测量值 ($\text{cd}\cdot\text{cm}^{-2}$)	相对示值误差 (%)

六、测量视场角：

示值 (mrad)	标准值 (mrad)	相对示值误差 (%)

附录 B

光生物安全测试系统校准证书（内页）参考格式

校准结果：

一、波长（单位：nm）：

特征波长标准值							
测量值							
波长误差							

二、光谱辐射照度：

波 长 (nm)	光谱辐射照度标准值 ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)	光谱辐射照度测量值 ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)	相对示值误差 (%)	测量不确定度 ($k=2$)

三、光谱辐射亮度：

波 长 (nm)	光谱辐射亮度标准值 ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$)	光谱辐射亮度测量值 ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$)	相对示值误差 (%)	测量不确定度 ($k=2$)

四、照度：

标 准 值 (lx)	测 量 值 (lx)	相对示值误差 (%)	测量不确定度 ($k=2$)

五、亮度：

标 准 值 ($\text{cd}\cdot\text{cm}^{-2}$)	测 量 值 ($\text{cd}\cdot\text{cm}^{-2}$)	相对示值误差 (%)	测量不确定度 ($k=2$)

六、测量视场角：

示 值 (mrad)	标 准 值 (mrad)	相对示值误差 (%)	测量不确定度 ($k=2$)

附录 C

测量不确定度评定示例

本附录对光生物安全测试系统波长、光谱辐射照度、光谱辐射亮度、照度、亮度、测量视场角的校准结果进行不确定度评定示例分析。

C.1 波长测量不确定度评定

C.1.1 测量模型

波长示值误差用公式 (C.1) 表示。

$$\Delta\lambda = \lambda_t - \lambda_s \quad (\text{C.1})$$

式中：

$\Delta\lambda$ —— 波长示值误差，nm；

λ_t —— 波长测量值，nm；

λ_s —— 特征波长标准值，nm。

波长示值误差的合成标准不确定度为：

$$u_c^2(\lambda) = c_1^2 u^2(\lambda_t) + c_2^2 u^2(\lambda_s) = u^2(\lambda_t) + u^2(\lambda_s) \quad (\text{C.2})$$

式中：灵敏系数 $c_1 = 1$ ， $c_2 = -1$ 。

C.1.2 不确定度分量评定

不确定度来源主要包括：波长标准灯上级溯源引入的不确定度，波长测量重复性引入的不确定度。

C.1.2.1 波长标准灯不确定度引入的标准不确定度分量 u_1

根据波长标准灯的计量校准证书中得到，波长校准结果的扩展不确定度 $U=0.02$ nm， $k=2$ ，则不确定度分量 $u_1=0.02/2\text{nm}=0.01\text{nm}$ 。

C.1.2.2 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2

用被校光生物安全测试系统对波长标准灯进行 10 次独立重复测量，以校准点 404.65 nm 为例，测量数据如表 C.1 所示。根据贝塞尔公式计算单次测得值的实验标准偏差 $s=0.06$ nm。测量两次取平均值，则测量重复性引入的不确定度分量 $u_2=0.06/\sqrt{2}\text{ nm}=0.043\text{ nm}$ 。

表 C.1 测量重复性实验结果（单位：nm）

校准点	测 量 值					平均值	标准偏差
404.65	404.6	404.7	404.6	404.6	404.6	404.64	0.06
	404.7	404.7	404.7	404.6	404.6		

C.1.3 合成标准不确定度的评定

表 C.2 测量不确定度分量来源一览表

不确定度来源	评定方法	分量
波长标准灯不确定度	B 类	0.1 nm
测量重复性	A 类	0.043 nm

由于各标准不确定度分量不相关，故合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.043^2} = 0.05 \text{ nm}$$

C.1.4 扩展不确定度的评定

取 $k=2$ ，则波长示值误差的扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 0.1 \text{ nm}$$

C.2 光谱辐射照度测量不确定度评定

C.2.1 测量模型

光谱辐射照度的相对示值误差由公式 (C.3) 给出：

$$\Delta E(\lambda) = \frac{E_t(\lambda) - E_s(\lambda)}{E_s(\lambda)} \times 100\% \quad (\text{C.3})$$

式中：

$\Delta E(\lambda)$ —— 光谱辐射照度相对示值误差，%；

$E_t(\lambda)$ —— 波长 λ 处的光谱辐射照度测量值， $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ；

$E_s(\lambda)$ —— 波长 λ 处的光谱辐射照度标准值， $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

合成标准不确定度为：

$$u_c^2(\Delta E(\lambda)) = c_1^2 u^2(E_t(\lambda)) + c_2^2 u^2(E_s(\lambda)) \quad (\text{C.4})$$

$$\text{灵敏系数: } c_1 = \frac{1}{E_s(\lambda)}, c_2 = -\frac{E_t(\lambda)}{E_s^2(\lambda)}。$$

C.2.2 不确定度分量评定

输入量 $E_t(\lambda)$ 引入的标准不确定度 $u(E_t(\lambda))$ ，其来源主要是测量重复性、系统非线性、系统波长示值误差；输入量 $E_s(\lambda)$ 引入的标准不确定度 $u(E_s(\lambda))$ ，其来源主要是光谱辐射照度标准灯量值溯源的不确定度。

C.2.2.1 输入量 $E_t(\lambda)$ 引入的标准不确定度 $u(E_t(\lambda))$

C.2.2.1.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

采用 A 类方法进行评定，固定标准灯的灯丝平面到测试系统辐照度探头表面的距离为 500 mm，读取系统 400 nm 的光谱辐射照度测试值，10 次测量结果如表 C.3 所示，平均值为 $1.9341 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。利用贝塞尔公式计算得到，实验标准偏差 $s=0.0051$

$\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。测量两次取平均值则测量重复性引入的不确定度分量 $u_1 = 0.0051 / \sqrt{2} = 0.0037 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

表 C.3 系统光谱辐射照度测量重复性的测量数据 ($n=10$, 单位: $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$)

1.933	1.926	1.942	1.941	1.937
1.932	1.928	1.935	1.934	1.933

C.2.2.1.2 系统非线性引入的标准不确定度分量 u_2

根据 JJF 1975-2022 光谱辐射计校准规范, 辐照度非线性误差应小于1%, 则在 400 nm 处的非线性误差为 $0.01937 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$, 此项服从均匀分布, 计算得到系统非线性引入的标准不确定度 u_2 为:

$$u_2 = \frac{0.01937}{\sqrt{3}} = 0.012 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$$

C.2.2.1.3 系统波长示值误差引入的标准不确定度分量 u_3

测试系统波长示值误差在 400 nm 处不超过 1.0 nm, 波长示值误差引起的辐照度误差不超过 $0.033 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$, 认为该项服从均匀分布, 则由波长示值误差引入的标准不确定度 u_4 为:

$$u_3 = \frac{0.033}{\sqrt{3}} = 0.019 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$$

C.2.2.2 输入量 $E_s(\lambda)$ 引入的标准不确定度 $u(E_s(\lambda))$

该分量各个波长点都不同, 以 400 nm 为例, 根据光谱辐射照度标准灯的计量校准证书中得到, 400 nm 处的光谱辐射照度校准结果为 $1.937 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$, 扩展不确定度 $U=1.7\%$, $k=2$, 则 $u(E_s(\lambda)) = 1.937 \cdot 1.7\% / 2 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} = 0.017 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

C.2.3 合成标准不确定度的评定

表 C.4 测量不确定度分量来源一览表

不确定度来源	评定方法	分量 ($\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$)	灵敏系数 c_i ($1/(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1})$)
测量重复性	A 类	0.0037	0.52
非线性	B 类	0.012	0.52
波长示值误差	B 类	0.019	0.52
光谱辐射照度标准灯不确定度	B 类	0.017	-0.52

由于各标准不确定度分量不相关, 故合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^4 c_i^2 u_i^2} = 1.5 \%$$

C.2.4 扩展不确定度的评定

取 $k=2$ ，则光谱辐射照度示值误差的扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 3.0\%$$

C.3 光谱辐射亮度测量不确定度评定

C.3.1 测量模型

光谱辐射亮度的相对示值误差由公式 (C.5) 给出：

$$\Delta L(\lambda) = \frac{L_t(\lambda) - L_s(\lambda)}{L_s(\lambda)} \times 100\% \quad (\text{C.5})$$

式中：

$\Delta L(\lambda)$ —— 光谱辐射亮度相对示值误差，%；

$L_t(\lambda)$ —— 波长 λ 处的光谱辐射亮度测量值， $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ；

$L_s(\lambda)$ —— 波长 λ 处的光谱辐射亮度标准值， $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

合成标准不确定度为：

$$u_c^2(\Delta L(\lambda)) = c_1^2 u^2(L_t(\lambda)) + c_2^2 u^2(L_s(\lambda)) \quad (\text{C.6})$$

$$\text{灵敏系数: } c_1 = \frac{1}{L_s(\lambda)}, c_2 = -\frac{L_t(\lambda)}{L_s^2(\lambda)}$$

C.3.2 不确定度分量评定

输入量 $L_t(\lambda)$ 引入的标准不确定度 $u(L_t(\lambda))$ ，其来源主要是测量重复性、系统非线性、系统波长示值误差；输入量 $L_s(\lambda)$ 引入的标准不确定度 $u(L_s(\lambda))$ ，其来源主要是积分球标准光源量值溯源的不确定度。

C.3.2.1 输入量 $L_t(\lambda)$ 引入的标准不确定度 $u(L_t(\lambda))$ C.3.2.1.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

采用 A 类方法进行评定，积分球标准光源出光口中心与测试系统辐亮度入射口中心等高且同轴，测试系统测光轴线与出光面垂直，并调焦使标准光源出光面成像清晰，读取系统 400 nm 的光谱辐射亮度测试值，10 次测量结果如表 C.5 所示，平均值为 $0.13697 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。利用贝塞尔公式计算得到，实验标准偏差 $s=0.0029 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。测量两次取平均值则测量重复性引入的不确定度分量 $u_1 = 0.0029 / \sqrt{2} = 0.0021 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

表 C.5 系统光谱辐射亮度测量重复性的测量数据 (n=10, 单位: $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)

0.1353	0.1392	0.1378	0.1342	0.1413
0.1363	0.1357	0.1369	0.1407	0.1323

C.3.2.1.2 系统非线性引入的标准不确定度分量 u_2

根据 JJF 1975-2022 光谱辐射计校准规范, 辐亮度非线性误差应小于 1%, 则在 400 nm 处的非线性误差为 $0.001352 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, 此项服从均匀分布, 计算得到系统非线性引入的标准不确定度 u_2 为:

$$u_2 = \frac{0.001352}{\sqrt{3}} \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} = 0.0008 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$$

C.3.2.1.3 系统波长示值误差引入的标准不确定度分量 u_3

测试系统波长示值误差在 400 nm 处不超过 1.0 nm, 波长示值误差引起的辐亮度误差不超过 $0.0041 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, 认为该项服从均匀分布, 则由波长示值误差引入的标准不确定度 u_3 为:

$$u_3 = \frac{0.0041}{\sqrt{3}} \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} = 0.0024 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$$

C.3.2.2 输入量 $L_s(\lambda)$ 引入的标准不确定度 $u(L_s(\lambda))$

该分量各个波长点都不同, 以 400 nm 为例, 400 nm 处的光谱辐射亮度值为 $0.1352 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, 扩展不确定度 $U=3.7\%$, $k=2$, 则 $u(L_s(\lambda)) = 0.0026 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

C.3.3 合成标准不确定度的评定

表 C.6 测量不确定度分量来源一览表

不确定度来源	评定方法	分量 ($\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)	灵敏系数 c_i ($1/(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$)
测量重复性	A 类	0.0021	7.40
非线性	B 类	0.0008	7.40
波长示值误差	B 类	0.0024	7.40
积分球标准光源 不确定度	B 类	0.0026	-7.49

由于各标准不确定度分量不相关, 故合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^4 c_i^2 u_i^2} = 3.2 \%$$

C.3.4 扩展不确定度的评定

取 $k=2$, 则光谱辐射亮度示值误差的扩展不确定度为:

$$U = k u_c = 6.4\%$$

C.4 照度测量不确定度评定

C.4.1 测量模型

照度的相对示值误差由公式 (C.7) 给出:

$$\Delta E = \frac{E_t - E_s}{E_s} \times 100\% \quad (\text{C.7})$$

式中:

ΔE —— 照度相对示值误差, %;

E_t —— 照度测量值, lx;

E_s —— 照度标准值, lx。

合成标准不确定度为:

$$u_c^2(\Delta E) = c_1^2 u^2(E_t) + c_2^2 u^2(E_s) \quad (\text{C.8})$$

$$\text{灵敏系数: } c_1 = \frac{1}{E_s}, c_2 = -\frac{E_t}{E_s^2}。$$

C.4.2 不确定度分量评定

输入量 E_t 引入的标准不确定度 $u(E_t)$, 其来源主要是测量重复性、系统非线性; 输入量 E_s 引入的标准不确定度 $u(E_s)$, 其来源主要是标准照度计量值溯源的不确定度。

C.4.2.1 输入量 E_t 引入的标准不确定度 $u(E_t)$

C.4.2.1.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

采用 A 类方法进行评定, 调整标准灯的灯丝平面到测试系统照度探头表面的距离, 使得标准照度计的读数为 100 lx, 在同样距离下读取系统的照度测试值, 10 次测量结果如表 C.7 所示, 平均值为 100.4 lx。利用贝塞尔公式计算得到, 实验标准偏差 $s=0.51$ lx。测量两次取平均值则测量重复性引入的不确定度分量 $u_1 = 0.51 / \sqrt{2}$ lx = 0.37 lx。

表 C.7 系统照度测量重复性的测量数据 (n=10, 单位: lx)

100.3	100.5	100.1	99.8	100.5
100.7	101.2	100.9	100.5	99.5

C.4.2.1.2 系统非线性引入的标准不确定度分量 u_2

根据 JJG 245-2005 光照度计检定规程, 照度非线性误差不超过 2.5%, 则在 100 lx 处的非线性误差为 2.5 lx, 此项服从均匀分布, 计算得到系统非线性引入的标准不确定度 u_2 为:

$$u_2 = \frac{2.5}{\sqrt{3}} \text{ lx} = 1.45 \text{ lx}$$

C.4.2.2 输入量 E_s 引入的标准不确定度 $u(E_s)$

根据标准照度计的计量校准证书中得到, 照度校准结果的扩展不确定度 $U=1.0\%$, $k=2$, 则在 100 lx 处的不确定度分量 $u(E_s) = 100 \cdot 1.0\% / 2$ lx = 0.50 lx。

C.4.3 合成标准不确定度的评定

表 C.8 测量不确定度分量来源一览表

不确定度来源	评定方法	分量 (lx)	灵敏系数 c_i (lx^{-1})
测量重复性	A 类	0.37	0.01
非线性	B 类	1.45	0.01
标准照度计不确定度	B 类	0.50	-0.01

由于各标准不确定度分量不相关，故合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^3 c_i^2 u_i^2} = 1.6 \%$$

C.4.4 扩展不确定度的评定

取 $k=2$ ，则照度示值误差的扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 3.2\%$$

C.5 亮度测量不确定度评定

C.5.1 测量模型

亮度的相对示值误差由公式 (C.9) 给出：

$$\Delta L = \frac{L_t - L_s}{L_s} \times 100\% \quad (\text{C.9})$$

式中：

ΔL —— 亮度相对示值误差，%；

L_t —— 亮度测量值， cd/m^2 ；

L_s —— 亮度标准值， cd/m^2 。

合成标准不确定度为：

$$u_c^2(\Delta L) = c_1^2 u^2(L_t) + c_2^2 u^2(L_s) \quad (\text{C.10})$$

灵敏系数： $c_1 = \frac{1}{L_s}$, $c_2 = -\frac{L_t}{L_s^2}$ 。

C.5.2 不确定度分量评定

输入量 L_t 引入的标准不确定度 $u(L_t)$ ，其来源主要是测量重复性、积分球标准光源不均匀性、积分球标准光源非线性、积分球标准光源稳定性；输入量 L_s 引入的标准不确定度 $u(L_s)$ ，其来源主要是积分球标准光源量值溯源的不确定度。

C.5.2.1 输入量 L_t 引入的标准不确定度 $u(L_t)$

C.5.2.1.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

采用 A 类方法进行评定，调节光路，使积分球标准光源出光口中心与测试系统辐亮度入射口中心等高且同轴，测试系统测光轴线与出光面垂直，并调焦使标准光源出光面成像清晰，调节光源亮度值为 1000 cd/m^2 ，读取系统的亮度测试值，

10 次测量结果如表 C.9 所示, 平均值为 1008.7 cd/m^2 。利用贝塞尔公式计算得到, 实验标准偏差 $s=6.04 \text{ cd/m}^2$ 。测量两次取平均值则测量重复性引入的不确定度分量 $u_1 = 6.04 / \sqrt{2} \text{ cd/m}^2 = 4.28 \text{ cd/m}^2$ 。

表 C.9 系统亮度测量重复性的测量数据 (n=10, 单位: cd/m^2)

1003	1011	1004	1013	1015
1008	998	1005	1014	1016

C.5.2.1.2 积分球标准光源不均匀性引入的标准不确定度分量 u_2

根据积分球标准光源溯源证书, 光源不均匀性不超过 1%, 则在 1000 cd/m^2 处不均匀性为 10 cd/m^2 , 此项服从均匀分布, 计算得到光源不均匀性引入的不确定度分量 u_2 为:

$$u_2 = \frac{1.0}{\sqrt{3}} \text{ cd/m}^2 = 5.78 \text{ cd/m}^2$$

C.5.2.1.3 积分球标准光源线性引入的标准不确定度分量 u_3

根据积分球标准光源溯源证书, 光源线性为 0.76%, 则在 1000 cd/m^2 处线性为 7.6 cd/m^2 , 此项服从均匀分布, 计算得到光源线性引入的相对标准不确定度 u_4 为:

$$u_3 = \frac{7.6}{\sqrt{3}} \text{ cd/m}^2 = 4.39 \text{ cd/m}^2$$

C.5.2.1.4 积分球标准光源稳定性引入的标准不确定度分量 u_4

根据积分球标准光源溯源证书, 光源稳定性为 0.19%, 则在 1000 cd/m^2 处稳定性为 1.9 cd/m^2 , 此项服从均匀分布, 计算得到光源稳定性引入的相对标准不确定度 u_4 为:

$$u_4 = \frac{1.9}{\sqrt{3}} \text{ cd/m}^2 = 1.10 \text{ cd/m}^2$$

C.5.2.2 输入量 L_s 引入的标准不确定度 $u(L_s)$

根据积分球标准光源的计量校准证书中得到, 亮度校准结果的扩展不确定度 $U=3.0\%$, $k=2$, 则在 1000 cd/m^2 处的不确定度分量 $u(L_s)=1000 \cdot 3.0\%/2 \text{ cd/m}^2=15 \text{ cd/m}^2$ 。

C.5.3 合成标准不确定度的评定

表 C.10 测量不确定度分量来源一览表

不确定度来源	评定方法	分量 (cd/m^2)	灵敏系数 c_i (m^2/cd)
测量重复性	A 类	4.28	0.001
光源不均匀性	B 类	5.78	0.001
光源线性	B 类	4.39	0.001
光源稳定性	B 类	1.10	0.001
积分球标准光源不确定度	B 类	15	-0.001

由于各标准不确定度分量不相关，故合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^5 c_i^2 u_i^2} = 1.8 \%$$

C.5.4 扩展不确定度的评定

取 $k=2$ ，则亮度示值误差的扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 3.6 \%$$

C.6 测量视场角测量不确定度评定

C.6.1 测量模型

测量视场角示值误差由公式 (C.11) 给出：

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \alpha_{\text{示值}} - \alpha \\ \alpha &= 2 \arctan\left(\frac{r}{d}\right) \times 10^3 \end{aligned} \quad (\text{C.11})$$

式中：

$\Delta\alpha$ ——测量视场角示值误差，mrad；

$\alpha_{\text{示值}}$ ——测量视场角示值，mrad；

α ——测量视场角标准值，mrad；

r ——测量视场半径测试值，mm；

d ——测量距离，mm。

测量视场角示值误差的合成标准不确定度为：

$$u_c^2(\Delta\alpha) = c_1^2 u^2(r) + c_2^2 u^2(d) = \frac{2000^2 d^2}{(r^2 + d^2)^2} u^2(r) + \frac{2000^2 r^2}{(r^2 + d^2)^2} u^2(d) \quad (\text{C.12})$$

式中：灵敏系数 $c_1 = \frac{2000d}{r^2 + d^2}$ ， $c_2 = \frac{2000r}{r^2 + d^2}$ 。

C.6.2 测量不确定度评定

不确定度来源包括：标准尺寸板，测量重复性，测量距离。

C.6.2.1 标准尺寸板引入的标准不确定度分量 u_1

分度值为 0.1mm 的标准尺寸板 MPE: $\pm 10 \mu\text{m}$ ，按均匀分布，则标准尺寸板引入的测量不确定度 $u_3 = 10 / \sqrt{3} \mu\text{m} = 5.8 \mu\text{m}$ 。

C.6.2.2 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2

采用 A 类方法进行评定，将标准尺寸板与测试系统辐亮度探头垂直放置，距离为 500 mm，测试视场角设置为 11mrad，调整测试系统焦距，使得标准尺寸板在测量视场内成像清晰，读取测量视场对应的尺寸板上的刻度值，得到测量视场半径的 10 次测量结果如表 C.11 所示，单位：mm。利用贝塞尔公式计算得到实验标准偏差 $s=0.01 \text{ mm}$ ，测量两次取平均值则测量重复性引入的不确定度分量 $u_2 = 0.01 / \sqrt{2} \text{ mm} = 8 \mu\text{m}$ 。

表 C.11 测量重复性的测量数据 (n=10)

2.83	2.83	2.81	2.82	2.81
2.83	2.84	2.82	2.83	2.82

C.6.2.3 距离测量引入的标准不确定度分量 u_3

距离测量用 II 级钢卷尺, 500 mm 的最大允许误差为 ± 0.3 mm, 按均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 则标准钢卷尺引入的测量不确定度 $u_3 = 0.3 / \sqrt{3}$ mm = 0.18 mm。

C.6.3 合成标准不确定度 u_c

$$u(r) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 10 \mu\text{m}$$

$$u(d) = u_3 = 0.18 \text{ mm}$$

根据不确定度计算公式, 得到:

$$u_c(\Delta\alpha) = \sqrt{\frac{2000^2 d^2}{(r^2 + d^2)^2} u^2(r) + \frac{2000^2 r^2}{(r^2 + d^2)^2} u^2(d)} = 0.06 \text{ mrad}$$

C.6.4 扩展不确定度的评定

取 $k=2$, 则测量视场角示值误差的扩展不确定度为:

$$U = k u_c = 0.12 \text{ mrad}$$