

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1975—2022

光谱辐射计校准规范

Calibration Specification for Spectroradiometers

2022-06-28 发布

2022-12-28 实施

国家市场监督管理总局 发布

光谱辐射计校准规范

Calibration Specification for

Spectroradiometers

JJF 1975—2022

归口单位：全国光学计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：江苏省计量科学研究院

陕西省计量科学研究院

北京师范大学

新疆维吾尔自治区计量测试研究院

本规范委托全国光学计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

吴志峰（中国计量科学研究院）

代彩红（中国计量科学研究院）

参加起草人：

张 帆（江苏省计量科学研究院）

李 奕（陕西省计量科学研究院）

张保洲（北京师范大学）

白 旭（新疆维吾尔自治区计量测试研究院）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 波长示值误差	(2)
5.2 波长重复性	(2)
5.3 光谱辐射照 (亮) 度相对示值误差/相对光谱功率分布示值误差	(2)
5.4 光谱辐射照 (亮) 度示值年变化率/相对光谱功率分布示值年变化率	(2)
5.5 非线性误差	(2)
5.6 杂散光系数	(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	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准方法	(3)
8 校准结果表述	(7)
9 复校时间间隔	(8)
附录 A 光谱辐射计测量不确定度评定示例	(9)
附录 B 光谱辐射计校准原始记录	(12)
附录 C 光谱辐射计校准证书内页推荐格式	(14)

引 言

JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1032《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 JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》共同构成支撑本规范编写的基础性系列规范。

本规范为首次发布。



光谱辐射计校准规范

1 范围

本规范适用于对光源的辐射度参数进行测量的（200 nm~2 550 nm）光谱辐射计的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 384—2002 光谱辐射照度标准灯

JJG 1034—2008 光谱光度计标准滤光器

ASTM G138-12 采用标准辐射照度源校准光谱辐射计的标准试验方法（Standard Test Method for Calibration of a Spectroradiometer Using a Standard Source of Irradiance）

CIE 233—2019 阵列式光谱辐射计的定标和使用（Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers）

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

3.1 长波通滤光片 long pass filter

短波截止、长波通过的光学元件。

4 概述

光谱辐射计是用于测量光谱辐射照度、光谱辐射亮度或相对光谱功率分布的光学仪器。图 1 给出了光谱辐射计的示意图，光谱辐射计应至少包括一组单色仪系统，入射光学系统和光辐射探测系统。单色仪系统可以由一组或多组分光元件组成。入射光学系统可以是积分球、余弦漫射头、光学镜头或光纤头等。光辐射探测系统可以采用阵列式探测器，或采用光电探测器结合光谱扫描。

注：规范的校准方法适用于二极管阵列光谱辐射计，然而使用者必须注意二极管阵列光谱辐射计的杂散光问题和有限的动态采样范围。除非以上问题得到解决，二极管阵列式光谱辐射计不推荐在紫外波段 300 nm 以下使用，参考 ASTM G138-12 要求。

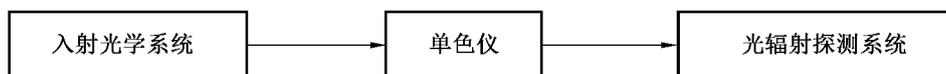


图 1 光谱辐射计示意图

5 计量特性

5.1 波长示值误差

200 nm~1 000 nm：波长示值误差优于±1.0 nm。

1 001 nm~2 550 nm：波长示值误差优于±2.0 nm。

5.2 波长重复性

波长重复性优于 0.5 nm。

5.3 光谱辐射照（亮）度相对示值误差/相对光谱功率分布示值误差

示值误差小于 2.0%。

5.4 光谱辐射照（亮）度示值年变化率/相对光谱功率分布示值年变化率

示值年变化率小于 10%。

5.5 非线性误差

非线性误差小于 1.0%。

5.6 杂散光系数

杂散光系数小于 1.0%。

注：以上指标不适用于合格性判定，仅供参考。初次校准的，不考虑光谱辐射照（亮）度示值年变化率/相对光谱功率分布示值年变化率。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：23℃±5℃。环境相对湿度：小于 70%。校准环境采取遮光措施，屏蔽杂散光干扰。周围环境应无影响光谱辐射计正常工作的机械振动。

注：如不能满足标准器使用的环境要求，在不确定度评定时应予以考虑。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 光谱辐射计测量标准器具应包括波长校准光源或波长标准滤光片，光谱辐射照度标准灯（紫外波段采用氘灯或氙灯标准光源），漫射板或积分球光源，光源供电电源，标准电阻，数字电压表和光谱辐射计信号采集设备（如电脑和光谱辐射计操作软件）。

注：波长校准光源采用汞灯、氙灯等谱线灯或激光。波长标准滤光片采用吸收型波长滤光片或干涉滤光片。光谱辐射照度校准采用光谱辐射照度标准灯；光谱辐射亮度校准采用光谱辐射照度标准灯结合漫射板的方法或采用积分球光源校准。

6.2.2 波长校准光源或波长标准滤光片，根据光谱辐射计校准波长范围确定。波长标准滤光片计量性能指标参照 JJG 1034—2008。

6.2.3 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测量不确定度，技术指标应满足 JJG 384—2002 的要求。

6.2.4 光谱辐射照度标准灯的供电电源采用高稳定度直流电源，电压连续可调，电压随时间的相对漂移： $\leq 5 \times 10^{-5}/h$ 。标准电阻与光谱辐射照度标准灯串联，与数字电压表并联。标准电阻：0.01 级。数字电压表：0.01 级。

6.2.5 积分球光源短期稳定性优于±0.5%/h，长期稳定性优于±2.0%/50h，积分球

口均匀性优于 $\pm 0.5\%$ ；漫射板反射率随角度变化优于 $0.25\%/(\circ)$ ，漫射板表面均匀性优于 0.1% 。

6.2.6 光路中放置光阑和挡屏，减少杂散辐射影响。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

7.1.1 波长示值误差

7.1.2 波长重复性

7.1.3 光谱辐射照（亮）度相对示值误差/相对光谱功率分布示值误差

7.1.4 光谱辐射照（亮）度示值年变化率/相对光谱功率分布示值年变化率

7.1.5 非线性误差

7.1.6 杂散光

7.2 校准方法

7.2.1 外观检查

用目视方法对光谱辐射计进行检查。

7.2.2 波长示值误差

a) 选择波长校准光源或波长标准滤光片，确定特征发射谱线或特征峰值波长 λ_i ($i=1, 2, \dots, n$)；

b) 点燃波长校准光源，按照光谱辐射计操作说明，预热光谱辐射计后重复测量5次，光谱信号的峰值波长（或峰值半高中心波长）记为特征发射谱线测量波长；或点燃光谱辐射照度标准灯或CIE规定的标准A光源，采用光谱辐射计分别采集放置和移除波长标准滤光片时的光谱，计算两次测量光谱比值的峰值波长（或峰值半高中心波长）记为特征峰值测量波长，根据公式（1）和公式（2）计算测量的波长示值误差：

$$\bar{\lambda}'_i = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \lambda'_{ij} \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_i = \bar{\lambda}'_i - \lambda_i \quad (2)$$

式中：

λ_i ——特征发射谱线或波长标准滤光片特征峰值波长 ($i=1, 2, \dots, n$)，nm；

λ'_{ij} —— λ_i 的第 j 次测量波长 ($j=1, 2, \dots, 5$)，nm；

$\bar{\lambda}'_i$ —— λ_i 的测量平均值，nm；

$\Delta\lambda_i$ —— λ_i 测量的波长示值误差，nm。

若光谱辐射计可以进行波长修正，则进行波长修正；否则光谱辐射计校准必须计入波长示值误差带来的测量不确定度。

7.2.3 波长重复性

参照7.2.2执行，采用公式（3）计算波长重复性：

$$\delta\lambda_i = \max \left| \lambda'_{ij} - \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \lambda'_{ij} \right| \quad (3)$$

式中：

$\delta\lambda_i$ ——特征发射谱线或波长标准滤光片特征峰值波长 λ_i 的波长重复性 ($i=1, 2, \dots, n$), nm;

λ'_{ij} —— λ_i 的第 j 次测量波长 ($j=1, 2, \dots, 5$), nm。

7.2.4 光谱辐射照(亮)度相对示值误差/相对光谱功率分布示值误差

7.2.4.1 光谱辐射亮度相对示值误差

图 2 给出了光谱辐射亮度校准的示意图。图 2 (a) 采用光谱辐射照度标准灯和漫射板来校准；图 2 (b) 采用积分球标准光源校准。若用光谱辐射照度标准灯校准，光谱辐射计入射光学系统接收的光谱辐射亮度由公式 (4) 描述。

$$L(\lambda) = \frac{E(\lambda)\rho(\lambda)}{\pi} \quad (4)$$

式中：

$E(\lambda)$ ——光谱辐射照度标准灯在漫射板中心波长 λ 处的光谱辐射照度， $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ；

$\rho(\lambda)$ ——漫射板特定角度下的反射率；

$L(\lambda)$ ——漫射板中心波长 λ 处的光谱辐射亮度， $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

以下光谱辐射照度标准灯和积分球标准光源简称标准灯。操作步骤如下：

a) 按图 2 (a) 或图 2 (b) 所示调节光路。图 2 (a)：保证标准灯灯丝中心和漫射板中心连线垂直于漫射板平面，光谱辐射计入射光学系统中心与漫射板中心等高，标准灯灯丝中心、漫射板中心和光谱辐射计入射光学系统中心成特定角度。标准灯和漫射板的距离应大于标准灯的灯丝尺寸 15 倍以上。根据光谱辐射计的视场角调节漫射板到光谱辐射计入射口的距离，以避免杂散辐射进入光谱辐射计。图 2 (b)：保证积分球光源出光口中心与光谱辐射计入射光学系统中心等高，积分球光源与光谱辐射计入射光学系统同轴。

b) 点燃标准灯，将标准灯电流缓慢地升至工作电流，预热至少 20 min，遵循 JJG 384—2002 的要求。

c) 按照光谱辐射计操作说明，预热光谱辐射计。

d) 采集并记录暗电流数据，扣除暗电流后测量。

e) 采集光谱辐射亮度数据。

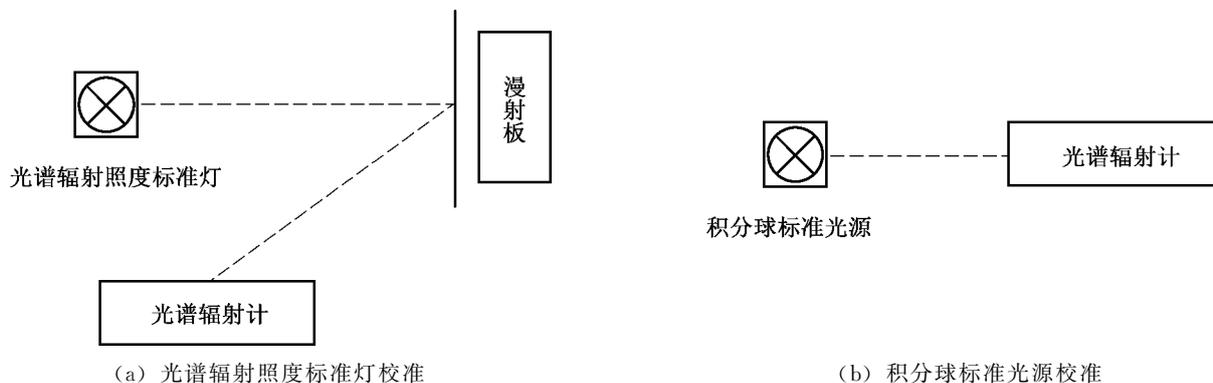


图 2 光谱辐射亮度校准示意图

f) 根据公式 (5) 和公式 (6) 计算光谱辐射亮度相对示值误差和光谱辐射亮度修正因子:

$$\Delta L_{\lambda} = \left[\frac{L_{\text{测量}}(\lambda)}{L_{\text{标准}}(\lambda)} - 1 \right] \times 100\% \quad (5)$$

$$f_{\lambda} = \frac{L_{\text{标准}}(\lambda)}{L_{\text{测量}}(\lambda)} \quad (6)$$

式中:

ΔL_{λ} —— 光谱辐射亮度相对示值误差;

f_{λ} —— 光谱辐射亮度修正因子;

$L_{\text{测量}}(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处测量的光谱辐射亮度值, $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$;

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

7.2.4.2 光谱辐射照度相对示值误差

图 3 给出了光谱辐射照度校准的示意图。校准方法参考 7.2.4.1 进行操作。



图 3 光谱辐射照度校准示意图

根据公式 (7) 和公式 (8) 计算光谱辐射照度相对示值误差和光谱辐射照度修正因子:

$$\Delta E_{\lambda} = \left[\frac{E_{\text{测量}}(\lambda)}{E_{\text{标准}}(\lambda)} - 1 \right] \times 100\% \quad (7)$$

$$f'_{\lambda} = \frac{E_{\text{标准}}(\lambda)}{E_{\text{测量}}(\lambda)} \quad (8)$$

式中:

ΔE_{λ} —— 光谱辐射照度相对示值误差;

f'_{λ} —— 光谱辐射照度修正因子;

$E_{\text{测量}}(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处测量的光谱辐射照度, $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$;

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

7.2.4.3 相对光谱功率分布示值误差

校准方法参考 7.2.4.1 进行操作。根据公式 (9) 和公式 (10) 可以计算相对光谱功率分布示值误差:

$$R'(\lambda) = \frac{m(\lambda)}{M} \quad (9)$$

$$\Delta R_{\lambda} = \left[\frac{R'(\lambda)}{R(\lambda)} - 1 \right] \times 100\% \quad (10)$$

式中:

ΔR_{λ} —— 相对光谱功率分布示值误差;

M —— 光谱辐射计测量的最大值;

$m(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处的测量值；

$R'(\lambda)$ —— 光谱辐射计测量的在波长 λ 处的相对光谱功率分布；

$R(\lambda)$ —— 标准灯在波长 λ 处的相对光谱功率分布。

7.2.5 光谱辐射照（亮）度示值年变化率/相对光谱功率分布示值年变化率

根据公式（11）考查光谱辐射计的示值年变化率：

$$\Delta_{\lambda} = \left[\frac{R_2(\lambda)}{R_1(\lambda)} - 1 \right] \times 100\% \quad (11)$$

式中：

Δ_{λ} —— 示值年变化率；

$R_2(\lambda)$ —— 本年度波长 λ 处的光谱辐射照（亮）度值或相对光谱功率分布值；

$R_1(\lambda)$ —— 上年度波长 λ 处的光谱辐射照（亮）度值或相对光谱功率分布值。

7.2.6 非线性误差

调整标准灯量值大小，记录不同量值下的标准值和光谱辐射计的测量值，根据公式（12）计算非线性误差：

$$D'(\lambda) = \left| \frac{S_{\text{标准-1}}(\lambda)M_2(\lambda)}{S_{\text{标准-2}}(\lambda)M_1(\lambda)} - 1 \right| \times 100\% \quad (12)$$

式中：

$D'(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处的非线性误差；

$M_1(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处接近满量程时的测量值；

$S_{\text{标准-1}}(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处接近满量程时对应的标准值；

$M_2(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处接近满量程 1/10 时的测量值；

$S_{\text{标准-2}}(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处接近满量程 1/10 时对应的标准值。

7.2.7 杂散光

7.2.7.1 杂散光系数

光谱辐射计校准光源为光谱辐射照度标准灯或 CIE 规定的标准 A 光源，采用长波通滤光片截止短波光谱或短波通滤光片截止长波光谱，根据公式（13）计算杂散光系数：

$$\delta(\lambda) = \frac{S'(\lambda)}{S(\lambda)} \times 100\% \quad (13)$$

式中：

$\delta(\lambda)$ —— 杂散光系数；

$S'(\lambda)$ —— 采用滤光片在截止波段波长 λ 处采集的信号；

$S(\lambda)$ —— 未采用滤光片在截止波段波长 λ 采集的信号。

注：参考光谱辐射计校准波段，使用相应的滤光片进行杂散光评价。如校准 300 nm~1 100 nm 光谱辐射计，可采用 450 nm 长波通滤光片或其他长波通滤光片，用于评价通过波长光谱在截止波长的贡献。

7.2.7.2 杂散光指数

光谱辐射计杂散光分为近场杂散光和远场杂散光。近场杂散光处于目标光谱附近，

远场杂散光远离目标光谱。根据两者的不同，参考 CIE 233—2019 可定义两种杂散光指数。

a) 近场杂散光指数

采用波长 λ 的单色光照射光谱辐射计，根据公式 (14) 计算近场杂散光指数：

$$F_{\text{近}} = \frac{\sum_{\lambda-BW}^{\lambda-BW} S(\lambda)\Delta\lambda + \sum_{\lambda+BW}^{\lambda+nBW} S(\lambda)\Delta\lambda}{\sum_{\lambda-BW}^{\lambda+BW} S(\lambda)\Delta\lambda} \quad (14)$$

式中：

$F_{\text{近}}$ ——近场杂散光指数；

BW——光谱辐射计的峰值半高宽，nm；

$S(\lambda)$ ——光谱辐射计在波长 λ 处测量的光谱分布；

$\Delta\lambda$ ——波长间隔，nm。

推荐使用 $n=5$ 。

b) 远场杂散光指数

采用波长 λ 的单色光照射光谱辐射计，根据公式 (15) 计算远场杂散光指数：

$$F_{\text{远}} = \frac{S(\lambda + g_{\lambda}) \times 10^5}{\sum_{\lambda_{\text{ini}}}^{\lambda_{\text{final}}} S(\lambda')\Delta\lambda'} \quad (15)$$

式中：

$F_{\text{远}}$ ——远场杂散光指数；

λ_{ini} ——光谱辐射计响应的下限波长，nm；

λ_{final} ——光谱辐射计响应的上限波长，nm；

$S(\lambda + g_{\lambda})$ ——光谱辐射计在波长 $(\lambda + g_{\lambda})$ 处测得的数值；

$S(\lambda')$ ——光谱辐射计在波长 λ' 处测得的数值；

$\Delta\lambda'$ ——波长间隔，nm。

推荐使用 $g_{\lambda} = 50$ 。

注：杂散光指数评价可仅作参考，不计入计量校准项目。

8 校准结果表述

校准结果以校准证书（或校准报告）的形式给出。校准证书至少应包括以下信息：

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) 证书或报告的唯一性标识（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或应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 对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，以及签发日期；
- 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，不得部分复印证书或报告的声明。

9 复校时间间隔

光谱辐射计的复校时间间隔建议一般不超过 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器自身质量等诸因素所决定的，因此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

光谱辐射计测量不确定度评定示例

本附录对光谱辐射计的光谱辐射照度测量结果进行不确定度评定。光谱辐射亮度或相对光谱功率分布测量可参考本附录。

A.1 光谱辐射计光谱辐射照度的相对示值误差由公式 (A.1) 给出：

$$\Delta E_{\lambda} = [E_{\text{测量}}(\lambda) - E_{\text{标准}}(\lambda)] / E_{\text{标准}}(\lambda) \times 100\% \quad (\text{A.1})$$

式中：

ΔE_{λ} —— 波长 λ 处的光谱辐射照度相对示值误差；

$E_{\text{测量}}(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处测量的光谱辐射照度， $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ；

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

不确定度来源包括：光谱辐射照度标准灯，光谱辐射计波长准确度，光谱辐射计波长重复性，光谱辐射计的测量重复性，光谱辐射计的稳定性，距离，光谱辐射计的非线性，以及其他不确定度来源。

A.2 测量不确定度评定

A.2.1 光谱辐射照度标准灯引入的相对标准不确定度 u_{r1}

该分量各个波长点都不同，以光谱辐射照度标准灯 400 nm 为例，相对标准不确定度 $u_{r1} = 0.90\%$ 。

A.2.2 光谱辐射计波长示值误差引入的相对标准不确定度 u_{r2}

选取低压汞灯校准，光谱辐射计的扫描结果见表 A.1。

表 A.1 光谱辐射计扫描汞灯的谱峰数据

nm

特征谱线	253.65	313.15	365.02	404.66	435.83	546.07	1 013.98
测量峰值	253.68	312.82	365.79	404.94	435.7	546.22	1 013.82
波长误差	0.03	-0.33	0.77	0.28	-0.13	0.15	-0.16

当光谱辐射计无法进行波长示值误差修正，需考虑波长示值误差带来的测量不确定度。光谱辐射计 400 nm 处的波长示值误差可近似认为等于在 404.66 nm 处的波长示值误差。光谱辐射计定标过程中，波长引起的光谱辐射照度测量不确定度与校准光源的光谱分布相关。对于光谱辐射计校准光源，可采用数值曲线拟合光源的光谱。根据校准光源光谱和波长的数值关系，计算出波长示值误差带来的相对标准不确定度 $u_{r2} = 0.60\%$ 。

A.2.3 光谱辐射计波长重复性引入的相对标准不确定度 u_{r3}

以低压汞灯 404.66 nm 谱峰为例，光谱辐射计 5 次的扫描结果见表 A.2。

表 A.2 光谱辐射计波长重复性测量的数据 ($n=5$)

nm

测量次数	1	2	3	4	5
测量结果	404.68	404.68	405.02	404.68	405.02

汞灯谱峰波长的测量平均值 $\bar{\lambda}_p = 404.82 \text{ nm}$ ，波长重复性带来的不确定度 u_λ 由公式 (A.2) 表示：

$$u_\lambda = \max |\lambda_i - \bar{\lambda}_p| / \sqrt{3} = 0.12 \text{ nm} \quad (\text{A.2})$$

根据校准光源光谱和波长的数值关系，计算出波长重复性带来的相对标准不确定度 $u_{r3} = 0.26\%$ 。

A.2.4 光谱辐射计测量重复性引入的相对标准不确定度 u_{r4}

测量条件固定，光谱辐射计采集 10 次数据 $E'_{\lambda i}$ ($i=1, 2, \dots, 10$)，表 A.3 给出了 400 nm 的测量数据。

表 A.3 光谱辐射计重复性的测量数据 ($n=10$) $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$

测量次数	1	2	3	4	5
测量结果	1.745	1.755	1.765	1.743	1.751
测量次数	6	7	8	9	10
测量结果	1.747	1.742	1.749	1.752	1.744

10 次测量的平均值 $\bar{E}'_\lambda = 1.749 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ，根据公式 (A.3) 计算测量重复性带来的相对标准不确定度 u_{r4} 。

$$u_{r4} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (E'_{\lambda i} - \bar{E}'_\lambda)^2}{10-1}} / \bar{E}'_\lambda \times 100\% = 0.40\% \quad (\text{A.3})$$

A.2.5 光谱辐射计稳定性引入的相对标准不确定度 u_{r5}

光谱辐射照度标准灯和光谱辐射计保持不动，间隔一段时间测量（扫描式光谱仪每隔 60 min，阵列式光谱仪每隔 10 min），共测量 3 次，记录 3 次测量的光谱辐射照度 $E_{\lambda i}$ ($i=1, 2, 3$)，光谱辐射计在 400 nm 的测量数据见表 A.4。

表 A.4 光谱辐射计稳定性的测量数据 ($n=3$) $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$

测量次数	1	2	3
测量结果	1.732	1.744	1.766

3 次的平均值 $\bar{E}_\lambda = 1.747 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ，最大值 $E_{\max} = 1.766 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ，最小值 $E_{\min} = 1.732 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ，3 次测量的极差系数 $C = 1.69$ ，根据公式 (A.4) 计算装调带来的相对的标准不确定度 u_{r5} 。

$$u_{r5} = \frac{(E_{\max} - E_{\min})/C}{\bar{E}_\lambda} \times 100\% = 1.15\% \quad (\text{A.4})$$

A.2.6 距离引入的相对标准不确定度 u_{r6}

光谱辐射照度标准灯距离光谱辐射计入射光学系统 500 mm，距离的测量不确定度为 0.3 mm，带来的相对标准不确定度为 $u_{r6} = 0.12\%$ 。

A.2.7 光谱辐射计非线性引入的相对标准不确定度 u_{r7}

当光谱辐射照度标准灯和光谱辐射计间距大于一定距离，光谱辐射照度标准灯光谱

辐射照度遵从平方反比定律。改变标准灯和光谱辐射计距离，根据公式 (A.5) 计算非线性带来的相对标准不确定度。

$$u_{r7} = \frac{|S_{\text{标准-1}}(\lambda)/M_1(\lambda) - S_{\text{标准-2}}(\lambda)/M_2(\lambda)|}{\sqrt{3}[S_{\text{标准-1}}(\lambda)/M_1(\lambda) + S_{\text{标准-2}}(\lambda)/M_2(\lambda)]} \quad (\text{A.5})$$

式中：

- $M_1(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处接近满量程时的测量值， $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ；
 $S_{\text{标准-1}}(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处接近满量程时对应的标准值， $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ；
 $M_2(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处接近满量程 1/10 时的测量值， $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ ；
 $S_{\text{标准-2}}(\lambda)$ —— 光谱辐射计在波长 λ 处接近满量程 1/10 时对应的标准值， $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

光谱辐射照度计非线性带来的相对标准不确定度为 $u_{r7} = 1.03\%$ 。

表 A.5 光谱辐射计测量不确定度一览表

相对标准不确定度	不确定度来源	u_{ri}
u_{r1} (%)	光谱辐射照度标准灯	0.90
u_{r2} (%)	波长准确度	0.60
u_{r3} (%)	波长重复性	0.26
u_{r4} (%)	光谱辐射计测量重复性	0.40
u_{r5} (%)	光谱辐射计稳定性	1.15
u_{r6} (%)	距离	0.12
u_{r7} (%)	非线性	1.03
相对合成标准不确定度 (%)		1.95
相对扩展不确定度 (%) ($k=2$)		3.9

附录 B

光谱辐射计校准原始记录

第 页 / 共 页

原始记录编号：	证书编号：	—
客户名称：	电话：	送检日期：
客户地址：	邮编：	联系人：
制造厂：	型号规格：	出厂编号：
外观检查： <input type="checkbox"/> 正常	<input type="checkbox"/> 有缺陷	<input type="checkbox"/> 其他说明：
所依据的技术文件： <input type="checkbox"/> JJF 1975—2022 光谱辐射计校准规范 <input type="checkbox"/> 其他：		
所使用的主要计量器具：		
波长校准光源：	型号规格：	工作电流（电压）：
光谱校准光源：	型号规格：	工作电流（电压）：
证书编号：	不确定度：	
结论及说明：		
光谱辐射计校准距离：	光谱辐射计预热时间：	测量次数：
光谱辐射计（PMT）工作电压：	光谱辐射计制冷温度：	光谱辐射计积分时间：
实验室环境条件：		
温度： <input type="text"/> °C	相对湿度： <input type="text"/> %	
校准日期：	校准地点：	
校准员：	核验员：	

