

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1329—2011

瞬态光谱仪校准规范

Calibration Specification for Instantaneous Spectral Instruments

2011-12-28 发布

2012-03-28 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

瞬态光谱仪校准规范

Calibration Specification for Instantaneous
Spectral Instruments

JJF 1329—2011

本规范经国家质量监督检验检疫总局于 2011 年 12 月 28 日批准，并自 2012 年 3 月 28 日起施行。

归口单位：全国光学计量技术委员会

主要起草单位：中国兵器工业第二〇五研究所

参加起草单位：中国测试技术研究院

中国航天科工集团第三研究院第八三五八研究所

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：

吴宝宁（中国兵器工业第二〇五研究所）

范纪红（中国兵器工业第二〇五研究所）

参加起草人：

曹远生（中国测试技术研究院）

王建成（中国航天科工集团第三研究院第八三五八研究所）

俞 兵（中国兵器工业第二〇五研究所）



目 录

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 紫外瞬态光谱仪	(2)
5.2 可见光瞬态光谱仪	(2)
5.3 近红外瞬态光谱仪	(2)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 测量标准及设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 校准项目	(4)
7.2 校准方法	(4)
8 复校时间间隔	(7)
附录 A 校准证书内页格式	(8)
附录 B 校准原始记录格式	(9)
附录 C 测量不确定度评定	(10)

瞬态光谱仪校准规范

1 范围

本规范适用于波长范围为 250 nm~1 750 nm、所测光源的闪光时间 $\geq 1 \times 10^{-4}$ s 的瞬态光谱仪的校准。其他型式的瞬态光谱仪可参照本规范进行校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJG 383—2002 光谱辐射亮度标准灯

JJG 768—2005 发射光谱仪

JJF 1032—2005 光学辐射计量名词术语及定义

CIE 105: 1993 脉冲光辐射源光谱辐射测定 (Spectroradiometry of Pulsed Optical Radiation Sources)

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 瞬态光谱 instantaneous spectrum

具有瞬时特征的按波长或频率次序排列的电磁波序列。

3.2 闪光时间 flashing time

一次间歇发光所持续的时间。

4 概述

瞬态光谱仪是用于测量闪光时间 $\geq 1 \times 10^{-4}$ s 的瞬态光源光谱特性的仪器，其核心技术是瞬态光电摄谱技术和杂散次级光谱滤除技术。根据波长划分，瞬态光谱仪分为紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪、近红外瞬态光谱仪。

瞬态光谱仪的组成如图 1 所示。入射狭缝 1 接收被测光源的入射光，入射光经平面反射镜 2 反射后，被第一球面反射镜 3 准直成平行光，然后被平面闪耀光栅 4 分光成一束平直光谱线，再经过第二球面反射镜 5 把紫外、可见或近红外线光谱经滤光片滤除后准确地成像在线阵 CCD 探测器 6 的光敏面上，经过线阵 CCD 探测器 6 转化为电信号，由 CCD 驱动放大电路 7 和高速数据采集存储系统 8 处理信号，经计算机 9 对数据处理和标定后显示所测光谱等参数。

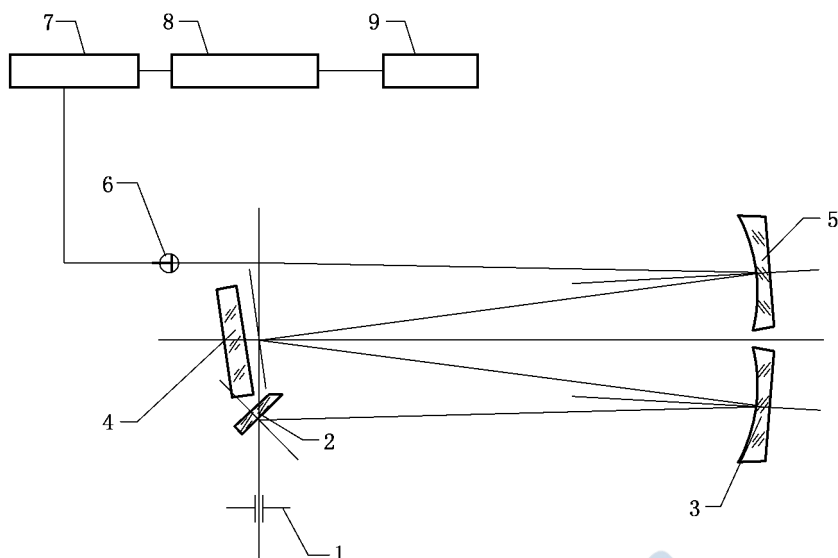


图1 瞬态光谱仪组成示意图

1—入射狭缝；2—平面反射镜；3—第一球面反射镜；4—平面闪耀光栅；5—第二球面反射镜；
6—线阵 CCD 探测器；7—CCD 驱动放大电路；8—高速数据采集存储系统；9—计算机

5 计量特性

5.1 紫外瞬态光谱仪

波长范围：250 nm～380 nm；

波长最大允许误差： ± 0.5 nm；

响应时间： < 1 s；

积分时间线性： $> 90\%$ ；

光谱辐亮度测量扩展不确定度： $U = 8\%$ ($k = 2$)；

相对光谱功率测量扩展不确定度： $U = 5\%$ ($k = 2$)。

5.2 可见光瞬态光谱仪

波长范围：380 nm～780 nm；

波长最大允许误差： ± 1.0 nm；

响应时间： < 1 s；

积分时间线性： $> 90\%$ ；

光谱辐亮度测量扩展不确定度： $U = 5\%$ ($k = 2$)；

相对光谱功率测量扩展不确定度： $U = 3\%$ ($k = 2$)；

色温最大允许误差： ± 20 K；

色品坐标最大允许误差 ($\Delta x, \Delta y$)： ± 0.008 。

5.3 近红外瞬态光谱仪

波长范围：780 nm～1 750 nm；

波长最大允许误差： ± 2.0 nm；

响应时间： < 1 s；

积分时间线性： $>90\%$ ；

光谱辐亮度测量扩展不确定度： $U=8\%$ ($k=2$)；

相对光谱功率测量扩展不确定度： $U=5\%$ ($k=2$)。

注：以上指标不是用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： $(20\pm5)^\circ\text{C}$ ，相对湿度： $\leq 85\%$ 。

6.1.2 电源供电要求： $(220\pm10)\text{V}$ 。

6.1.3 环境应清洁，无腐蚀性气体，周围无影响仪器正常工作的振动和电场、磁场的干扰。

6.1.4 要求测量环境为光暗室。

6.2 测量标准及设备

6.2.1 校准装置

校准装置包括标准光源系统、入射光路两部分，见图 2。

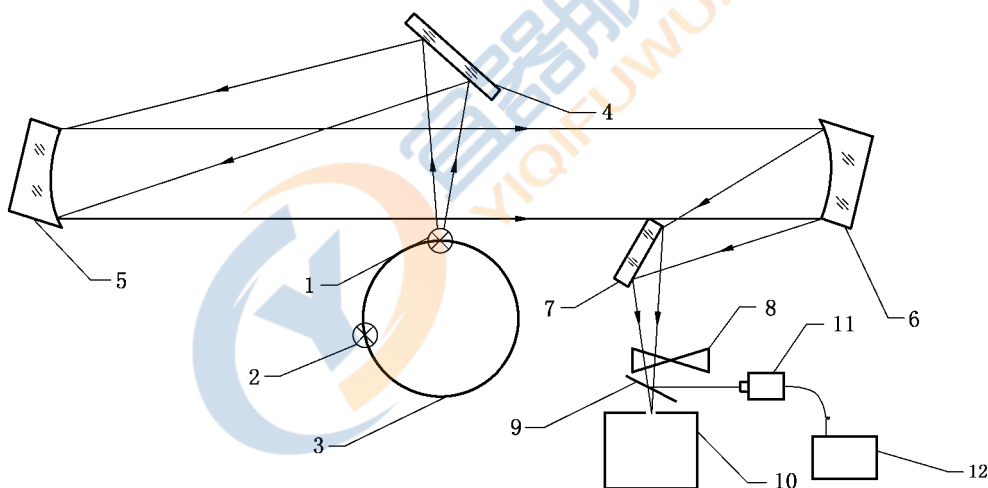


图 2 瞬态光谱仪校准装置示意图

1—标准钨带灯；2—汞灯；3—精密转盘；4—第一平面反射镜；5—第一离轴抛物面镜；6—第二离轴抛物面镜；

7—第二平面反射镜；8—斩波器；9—分束器；10—被校瞬态光谱仪；11—探测器；12—示波器

标准光源系统：由汞灯、标准钨带灯、灯架及精密转盘等组成。高压汞灯和低压汞灯各一只。采用光谱辐亮度已标定的标准钨带灯，其色温为 $2\,856\text{ K}$ 。

入射光路：由平面反射镜、离轴抛物面镜、斩波器、分束器和示波器组成。斩波器频率连续可调，示波器采样带宽为 300 MHz 。整个光路要用漫反射比低的屏蔽箱罩住，以屏蔽杂散光。

6.2.2 供电设备

标准钨带灯采用直流稳流电源供电，电流连续可调， 10 min 内输出电流变化应不大于 0.02% 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

瞬态光谱仪的校准项目见表 1。

表 1 校准项目一览表

序号	校准项目
1	波长示值误差
2	响应时间
3	积分时间线性
4	光谱辐亮度示值
5	相对光谱功率示值
6	色温示值误差
7	色品坐标示值误差

7.2 校准方法

7.2.1 波长示值误差

波长示值误差由式 (1) 表示：

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_s \quad (1)$$

式中： λ ——被校瞬态光谱仪对汞灯波长 6 次测量的算术平均值，nm；

λ_s ——汞灯标准峰值波长值，nm。

瞬态光谱仪波长示值误差校准步骤如下：

- 1) 启动计算机到工作状态，根据被校光谱仪的波长范围选择低压汞灯或高压汞灯作为波长标准。打开伺服电机开关，计算机控制伺服电机转动精密转盘，将所选低压汞灯或高压汞灯移入光路，打开汞灯的电源开关；
- 2) 把被校瞬态光谱仪放置在如图 2 所示的位置，调节光路，保证汞灯入射光被准确地会聚到被校瞬态光谱仪的狭缝位置，打开瞬态光谱仪的电源开关；
- 3) 打开操作软件，设置被测参数为相对光谱功率，计算机控制被校瞬态光谱仪进行汞灯相对光谱功率测量，取 6 次测量平均值作为最终结果，给出波长示值误差；
- 4) 关闭汞灯电源开关和瞬态光谱仪电源开关；
- 5) 关闭计算机和伺服电机控制器电源开关。

7.2.2 响应时间

响应时间的校准是在如图 2 所示的瞬态光谱仪校准装置上进行的。根据被校瞬态光谱仪的响应时间和积分时间，选择占空比符合要求的斩波器叶片，并设置斩波器频率，保证在被校瞬态光谱仪一个积分周期内仅接收到一次脉冲光。逐渐减小脉冲光的脉冲宽度，用被校瞬态光谱仪测量标准钨带灯的相对光谱功率，被校瞬态光谱仪能够测量到与标准相对光谱功率分布曲线相一致的曲线所对应的最小脉冲宽度就是被校瞬态光谱仪的响应时间。脉冲宽度由探测器和示波器进行测量，示波器所测波形的半带宽即为瞬态光

源的脉冲宽度。

瞬态光谱仪响应时间校准步骤如下：

- 1) 启动计算机到工作状态，打开伺服电机开关，计算机控制伺服电机转动精密转盘，将标准钨带灯移入光路，打开标准钨带灯电源开关，旋转标准钨带灯电源的电流旋钮，将其电流值慢慢增加到标准电流值，预热 30 min；
- 2) 把被校瞬态光谱仪放置在如图 2 所示的位置，调节光路，保证标准钨带灯入射光有效地进入被校瞬态光谱仪，打开瞬态光谱仪、斩波器和示波器的电源开关；
- 3) 打开操作软件，设置被测参数为相对光谱功率，按照上述响应时间的测量方法，进行被校瞬态光谱仪响应时间的校准，最终给出响应时间的校准结果；
- 4) 旋转标准钨带灯电源的电流旋钮，将其电流值慢慢减小到零，关闭标准钨带灯、瞬态光谱仪和斩波器的电源开关；
- 5) 关闭计算机和伺服电机电源开关。

7.2.3 积分时间线性

积分时间线性的校准是在如图 2 所示的瞬态光谱仪校准装置上进行的。改变被校瞬态光谱仪的积分时间值，在不同的积分时间下用被校瞬态光谱仪测量标准钨带灯的光谱辐亮度，不同积分时间下的线性因子 L 等于标准钨带灯光谱辐亮度标准值与测量值的比值。对于紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪、近红外瞬态光谱仪，不同积分时间下光谱辐亮度测量的波长可以分别选择在 300 nm，600 nm，1 200 nm。

瞬态光谱仪积分时间线性校准步骤如下：

- 1) 重复 7.2.2 的步骤 1)；
- 2) 把被校瞬态光谱仪放置在如图 2 所示的位置，调节光路，保证标准钨带灯入射光有效地进入被校瞬态光谱仪，打开瞬态光谱仪的电源开关；
- 3) 打开操作软件，设置被测参数为光谱辐亮度，设定被校瞬态光谱仪的最大积分时间（不能饱和），计算机控制被校瞬态光谱仪测量标准钨带灯的光谱辐射亮度值。保持光源条件不变，减小积分时间，分别进行标准钨带灯光谱辐亮度测量。动态范围不够时可改变光源的辐射强度或通过减光的方法实现被校瞬态光谱仪积分时间的范围；
- 4) 给出瞬态光谱仪指定波长处的不同积分时间下的线性因子；
- 5) 旋转标准钨带灯的电源的电流旋钮，将其电流值慢慢减小到零，关闭标准钨带灯和瞬态光谱仪电源开关；
- 6) 关闭计算机和伺服电机电源开关。

7.2.4 光谱辐亮度示值

光谱辐亮度示值的校准是在如图 2 所示的瞬态光谱仪校准装置上进行的。用被校瞬态光谱仪测量标准钨带灯的光谱辐亮度，取 6 次测量的平均值作为光谱辐亮度示值最终结果。对于紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪、近红外瞬态光谱仪光谱辐亮度测量的波长可以选择在 250 nm，300 nm，350 nm，400 nm，500 nm，600 nm，700 nm，900 nm，1 050 nm，1 200 nm，1 550 nm，1 700 nm。

瞬态光谱仪光谱辐亮度校准步骤如下：

- 1) 重复 7.2.3 的步骤 1) 和 2)；

2) 打开操作软件, 设置被测参数为光谱辐亮度, 计算机控制被校瞬态光谱仪进行标准钨带灯光谱辐亮度测量, 取 6 次测量平均值作为最终结果;

3) 把标准钨带灯指定波长处光谱辐亮度的测量结果与上一级计量机构对该标准钨带灯对应波长处的光谱辐亮度的检定结果相比较, 给出对应波长处光谱辐亮度标准值与测量值的比值作为修正因子;

4) 重复 7.2.3 的步骤 5) 和 6)。

7.2.5 相对光谱功率示值

相对光谱功率示值的校准是在如图 2 所示的瞬态光谱仪校准装置图上进行的。用被校瞬态光谱仪测量标准钨带灯的相对光谱功率分布, 取 6 次测量的平均值作为相对光谱功率示值最终结果。波长的选择与 7.2.4 相同。

瞬态光谱仪相对光谱功率校准步骤如下:

1) 重复 7.2.3 的步骤 1) 和 2);

2) 打开操作软件, 设置被测参数为相对光谱功率, 计算机控制被校瞬态光谱仪进行标准钨带灯相对光谱功率测量, 取 6 次测量平均值作为最终结果;

3) 把标准钨带灯指定波长处相对光谱功率的测量结果与其标准值相比较, 给出对应波长处相对光谱功率标准值与测量值的比值作为修正因子;

4) 重复 7.2.3 的步骤 5) 和 6)。

7.2.6 色温示值误差

色温示值误差由式 (2) 表示:

$$\Delta T = T - T_s \quad (2)$$

式中: T ——被校瞬态光谱仪对标准钨带灯色温 6 次测量的算术平均值, K;

T_s ——标准钨带灯标准色温值, K。

瞬态光谱仪色温示值误差校准步骤如下:

1) 重复 7.2.3 的步骤 1) 和 2);

2) 打开操作软件, 设置被测参数为色温, 计算机控制被校瞬态光谱仪进行标准钨带灯色温测量, 并给出测量结果。取 6 次测量平均值作为色温的最终结果, 给出色温示值误差;

3) 重复 7.2.3 的步骤 5) 和 6)。

7.2.7 色品坐标示值误差

色品坐标示值误差由式 (3)、(4) 表示:

$$\Delta x = x - x_s \quad (3)$$

$$\Delta y = y - y_s \quad (4)$$

式中: x, y ——被校瞬态光谱仪对标准钨带灯色品坐标 6 次测量的算术平均值;

x_s, y_s ——标准钨带灯标准色品坐标值。

瞬态光谱仪色品坐标示值误差校准步骤如下:

1) 重复 7.2.3 的步骤 1) 和 2);

2) 打开操作软件, 设置被测参数为色品坐标, 计算机控制被校瞬态光谱仪进行标准钨带灯色品坐标测量, 并给出测量结果。取 6 次测量平均值作为色品坐标的最终结

果，给出色品坐标示值误差；

3) 重复 7.2.3 的步骤 5) 和 6)。

8 复校时间间隔

瞬态光谱仪的复校时间间隔建议为 1 年。使用特别频繁时应适当缩短，如果发现测量结果异常时，应随时进行校准。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

校准证书内页格式

证书编号：

Certificate No.

校准结果

Results of Calibration

一、波长示值误差		
二、响应时间		
测量结果不确定度		
三、积分时间线性		
波长	积分时间	线性因子
测量结果不确定度		
四、光谱辐亮度示值		
标准值	示值	修正因子
测量结果不确定度		
五、相对光谱功率示值		
标准值	示值	修正因子
测量结果不确定度		
六、色温示值误差		
测量结果不确定度		
七、色品坐标示值误差		
测量结果不确定度		
以下空白		

校准员：

Operator

核验员：

Inspector

附录 B

校准原始记录格式

客 户 名 称		所用计量标准		环境条件	
被 校 件		型 号/规 格		温 度	
型 号/规 格		证 书 编 号		相对湿度	
编 号		最大允差/准确		其 他	
制 造 商		度等级/不确定度		校准日期	
证书号		依据的技术文件			

一、波长示值误差

标准波长 /nm	波长示值/nm							示值误差 /nm
	1	2	3	4	5	6	平均值	

二、响应时间
被校瞬态光谱仪响应时间：

三、积分时间线性

波长	积分时间/ms	光谱辐亮度示值/[W/(m ³ ·sr)]	线性因子

四、光谱辐亮度示值

波长/nm	标准光谱辐亮度 /[W/(m ³ ·sr)]	光谱辐亮度示值/[W/(m ³ ·sr)]							修正因子
		1	2	3	4	5	6	平均值	

五、相对光谱功率示值

波长/nm	标准相对光谱 功率	相对光谱功率示值							修正因子
		1	2	3	4	5	6	平均值	

六、色温示值误差

标准色温	色温示值/K							示值误差 /K
	1	2	3	4	5	6	平均值	

七、色品坐标示值误差

标准色品坐标	色品坐标示值							示值误差
	1	2	3	4	5	6	平均值	
<i>x</i>								
<i>y</i>								

测量结果不确定度：(分项列出)	备注
-----------------	----

校准员_____

核验员_____

附录 C

测量不确定度评定

C.1 瞬态光谱仪光谱辐亮度测量不确定度分析

C.1.1 校准的数学模型

瞬态光谱仪光谱辐亮度校准的数学模型为：

$$L_{\lambda} = C_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \quad (\text{C.1})$$

式中： L_{λ} ——被校瞬态光谱仪光谱辐亮度测量值；

C_{λ} ——被校瞬态光谱仪的光谱辐亮度修正系数；

S_{λ} ——被校瞬态光谱仪接收标准钨带灯的信号值。

C.1.2 校准不确定度评定

对瞬态光谱仪校准结果不确定度有影响的输入量是被校瞬态光谱仪的光谱辐亮度修正系数和被校瞬态光谱仪接收标准钨带灯的信号值。这两个输入量彼此独立，瞬态光谱仪光谱辐亮度校准合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c = \sqrt{u^2(C_{\lambda}) + u^2(S_{\lambda})} \quad (\text{C.2})$$

式中： $u(C_{\lambda})$ ——输入量 C_{λ} 的标准不确定度；

$u(S_{\lambda})$ ——输入量 S_{λ} 的标准不确定度。

C.1.2.1 各输入量标准不确定度评定

C.1.2.1.1 输入量 C_{λ} 的标准不确定度 $u(C_{\lambda})$ a) 光谱辐亮度标准值引入的不确定度分量 u_1

用标准钨带灯对被校瞬态光谱仪进行光谱辐亮度修正，根据检定证书，标准钨带灯光谱辐亮度测量不确定度紫外波段为 4.0% ($k=2$)，可见光波段为 2.0% ($k=2$)，近红外波段为 4.0% ($k=2$)，其标准不确定度分量 u_1 分别为 2.0%，1.0%，2.0%。

b) 波长不准确引入的不确定度分量 u_2

根据使用说明书和实验，波长不准确引入的相对标准不确定度分量 $u_2 = 0.03\%$ 。

c) 辐射源不稳定引入的不确定度分量 u_3

根据使用说明书，辐射源不稳定性为 0.2%，假设均匀分布，其标准不确定度分量 $u_3 = 0.12\%$ 。

则输入量 C_{λ} 的标准不确定度 $u(C_{\lambda})$ 为

$$u(C_{\lambda}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (\text{C.3})$$

C.1.2.1.2 输入量 S_{λ} 的标准不确定度 $u(S_{\lambda})$

$u(S_{\lambda})$ 的来源主要是被校瞬态光谱仪的测量重复性。在瞬态光谱辐射量标准装置上，用瞬态光谱仪测量标准钨带灯的光谱辐亮度，重复测量 6 次，紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪分别选择 250 nm，700 nm，1 550 nm 波长处，紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪的光谱辐亮度测量平均值的相对标准不确定度分量 $u(S_{\lambda})$ 分别为：0.48%，0.24%，0.35%。表 C.1 给出紫外瞬态光

谱仪在 250 nm 处光谱辐亮度的测量结果。

表 C.1 光谱辐亮度测量结果

波长/nm	250					
光谱辐亮度测量值/[MW/(m ³ ·sr)]	4.766	4.909	4.858	4.866	4.879	4.932
平均值/[MW/(m ³ ·sr)]	4.868					
实验标准偏差/[MW/(m ³ ·sr)]	0.057					
相对标准不确定度	0.48%					

C.1.2.2 合成标准不确定度 u_c

合成标准不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u^2(S_\lambda)} \quad (\text{C.4})$$

对于紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪合成标准不确定度 u_c 分别为：2.1%，1.1%，2.1%。

C.1.2.3 扩展不确定度 U

扩展不确定度 U 按式 (C.5) 计算：

$$U = k u_c \quad (\text{C.5})$$

取 $k=2$ ，对于紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪，扩展不确定度 U 分别为：4.2%，2.2%，4.2%。

C.2 瞬态光谱仪相对光谱功率测量不确定度分析

C.2.1 校准的数学模型

瞬态光谱仪相对光谱功率校准的数学模型为：

$$P_\lambda = C'_\lambda \cdot S_\lambda \quad (\text{C.6})$$

式中： P_λ ——被校瞬态光谱仪光谱辐亮度测量值；

C'_λ ——被校瞬态光谱仪的相对光谱功率修正系数；

S_λ ——被校瞬态光谱仪接收标准钨带灯的信号值。

C.2.2 校准不确定度评定

对瞬态光谱仪校准结果不确定度有影响的输入量是被校瞬态光谱仪的相对光谱功率修正系数和被校瞬态光谱仪接收标准钨带灯的信号值。这两个输入量彼此独立，瞬态光谱仪相对光谱功率校准合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c = \sqrt{u^2(C'_\lambda) + u^2(S_\lambda)} \quad (\text{C.7})$$

式中： $u(C'_\lambda)$ ——输入量 C'_λ 的标准不确定度；

$u(S_\lambda)$ ——输入量 S_λ 的标准不确定度。

C.2.2.1 各输入量标准不确定度评定

C.2.2.1.1 输入量 C'_λ 的标准不确定度 $u(C'_\lambda)$

a) 光谱修正引入的不确定度分量 u_1

用标准钨带灯对被校瞬态光谱仪进行光谱修正，根据证书，标准钨带灯相对光谱功

率测量不确定度紫外波段为 2.0% ($k=2$), 可见光波段为 1.0% ($k=2$), 近红外波段为 2.0% ($k=2$), 其标准不确定度分量 u_1 分别为 1.0%, 0.5%, 1.0%。

b) 波长不准确引入的不确定度分量 u_2

根据使用说明书和实验, 波长不准确引入的相对标准不确定度分量 $u_2=0.03\%$ 。

c) 辐射源不稳定引入的不确定度分量 u_3

根据使用说明书, 辐射源不稳定性为 0.2%, 假设均匀分布, 其标准不确定度分量 $u_3=0.12\%$ 。

则输入量 C'_λ 的标准不确定度 $u(C'_\lambda)$ 为

$$u(C'_\lambda) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (\text{C.8})$$

C.2.2.1.2 输入量 S_λ 的标准不确定度 $u(S_\lambda)$

$u(S_\lambda)$ 的来源主要是被校瞬态光谱仪的测量重复性。在瞬态光谱辐射量标准装置上, 用瞬态光谱仪测量标准钨带灯的相对光谱功率, 重复测量 6 次, 紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪分别选择 250 nm, 700 nm, 1 550 nm 波长处, 紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪的相对光谱功率测量平均值的相对标准不确定度分量 $u(S_\lambda)$ 分别为: 0.38%, 0.13%, 0.41%。表 C.2 给出紫外瞬态光谱仪在 250 nm 处相对光谱功率的测量结果:

表 C.2 相对光谱功率测量结果

波长/nm	250					
相对光谱功率测量值/($\times 10^{-4}$)	2.712	2.699	2.745	2.698	2.691	2.749
平均值/($\times 10^{-4}$)	2.716					
实验标准偏差/($\times 10^{-4}$)	0.025					
相对标准不确定度	0.38%					

C.2.2.2 合成标准不确定度 u_c

合成标准不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u^2(S_\lambda)} \quad (\text{C.9})$$

对于紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪, 合成标准不确定度 u_c 分别为: 1.1%, 0.53%, 1.1%。

C.2.2.3 扩展不确定度 U

按式 (C.5) 计算扩展不确定度 U 。取 $k=2$, 对于紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪, 扩展不确定度 U 分别为: 2.2%, 1.1%, 2.2%。

C.3 瞬态光谱仪色温示值误差测量不确定度分析

C.3.1 校准的数学模型

瞬态光谱仪色温示值误差的校准是采用标准钨带灯在瞬态光谱辐射量标准装置上进行。瞬态光谱仪色温示值误差校准的数学模型为:

$$\Delta T = T - T_s \quad (\text{C.10})$$

式中: ΔT ——被校瞬态光谱仪色温示值误差;

T ——被校瞬态光谱仪色温示值；

T_s ——标准钨带灯标准色温值。

C.3.2 校准不确定度评定

对瞬态光谱仪校准结果不确定度有影响的输入量为被校瞬态光谱仪色温示值和标准钨带灯标准色温。这两个输入量彼此独立，瞬态光谱仪色温示值误差合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c = \sqrt{u^2(T) + u^2(T_s)} \quad (\text{C.11})$$

式中： $u(T)$ ——输入量 T 的标准不确定度；

$u(T_s)$ ——输入量 T_s 的标准不确定度。

C.3.2.1 各输入量标准不确定度评定

C.3.2.1.1 输入量 T 的标准不确定度 $u(T)$

a) 瞬态光谱仪色温测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

在瞬态光谱辐射量标准装置上，用瞬态光谱仪测量标准钨带灯的色温，重复测量 6 次，测量结果如表 C.3 所示，平均值的相对标准不确定度分量 $u_1 = 0.031\%$ 。

表 C.3 色温测量结果

色温测量值/K	2 856	2 852	2 858	2 854	2 855	2 857
平均值/K	2 855					
实验标准偏差/K	2.16					
相对标准不确定度	0.031%					

b) 波长不准确引入的不确定度分量 u_2

根据使用说明书和实验，波长不准确引入的相对标准不确定度分量 $u_2 = 0.03\%$ 。

c) 辐射源不稳定引入的不确定度分量 u_3

根据使用说明书，标准钨带灯不稳定性为 0.2%，假设均匀分布，其标准不确定度分量 $u_3 = 0.12\%$ 。

d) 光谱修正引入的不确定度分量 u_4

根据实验，光谱修正引入的标准不确定度分量 $u_4 = 0.125\%$ 。

则输入量 T 的标准不确定度 $u(T)$ 为

$$u(T) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.18\% \quad (\text{C.12})$$

C.3.2.1.2 输入量 T_s 的标准不确定度 $u(T_s)$

根据检定证书，标准钨带灯色温测量不确定度为 8 K ($k=2$)，其相对标准不确定度 $u(T_s) = 0.14\%$ 。

C.3.2.2 合成标准不确定度

根据式 (C.11)，色温示值误差的合成标准不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{u^2(T) + u^2(T_s)} = 0.23\% \quad (\text{C.13})$$

C.3.2.3 扩展不确定度 U

按式 (C.5) 计算扩展不确定度 U 。取 $k=2$ ，则 $U = 0.5\%$ 。

C.4 瞬态光谱仪色品坐标示值误差测量不确定度分析

C.4.1 校准的数学模型

瞬态光谱仪色品坐标示值误差的校准是采用标准钨带灯在瞬态光谱辐射量标准装置上进行。瞬态光谱仪色品坐标示值误差校准的数学模型为：

$$\begin{cases} \Delta x = x - x_s \\ \Delta y = y - y_s \end{cases} \quad (\text{C.14})$$

式中： $\Delta x, \Delta y$ ——被校瞬态光谱仪色品坐标示值误差；

x, y ——被校瞬态光谱仪色品坐标示值；

x_s, y_s ——标准钨带灯色品坐标标准值。

C.4.2 校准不确定度评定

对瞬态光谱仪校准结果不确定度有影响的输入量为被校瞬态光谱仪色品坐标示值和标准钨带灯色品坐标标准值。这两个输入量彼此独立，瞬态光谱仪色品坐标示值误差合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c = \sqrt{u^2(x, y) + u^2(x_s, y_s)} \quad (\text{C.15})$$

式中： $u(x, y)$ ——输入量 (x, y) 的标准不确定度；

$u(x_s, y_s)$ ——输入量 (x_s, y_s) 的标准不确定度。

C.4.2.1 各输入量标准不确定度评定

C.4.2.1.1 输入量 T 的标准不确定度 $u(x, y)$ a) 瞬态光谱仪色品坐标测量重复性引入的相对标准不确定度分量 u_1

在瞬态光谱辐射量标准装置上，用瞬态光谱仪测量标准钨带灯的色品坐标，重复测量 6 次，测量结果如表 C.4 所示，平均值的相对标准不确定度分量 $u_1 = 0.02\%$ 。

表 C.4 色品坐标测量结果

色品坐标	色品坐标测量值					
x	0.448 5	0.448 0	0.448 0	0.448 3	0.448 0	0.448 1
y	0.408 1	0.407 8	0.407 7	0.407 7	0.407 4	0.407 5
平均值	$x = 0.448\ 1, y = 0.407\ 7$					
实验标准偏差	$x: 0.000\ 22, y: 0.000\ 25$					
相对标准不确定度	$x: 0.02\%, y: 0.02\%$					

b) 波长不准确引入的不确定度分量 u_2

根据使用说明书和实验，波长不准确引入的相对标准不确定度分量 $u_2 = 0.03\%$ 。

c) 辐射源不稳定引入的不确定度分量 u_3

根据使用说明书，标准钨带灯不稳定性为 0.2% ，假设均匀分布，其标准不确定度分量 $u_3 = 0.12\%$ 。

d) 光谱修正引入的不确定度分量 u_4

根据实验，光谱修正引入的标准不确定度分量 $u_4 = 0.125\%$ 。

则输入量 (x, y) 的标准不确定度 $u(x, y)$ 为

$$u(x, y) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.18\% \quad (\text{C.16})$$

C.4.2.1.2 输入量 (x_s, y_s) 的标准不确定度 $u(x_s, y_s)$

根据检定证书, 标准钨带灯色品坐标测量相对标准不确定度 $u(x_s, y_s) = 0.14\%$ 。

C.4.2.2 合成标准不确定度

根据式 (C.11), 色温示值误差的合成标准不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{u^2(x, y) + u^2(x_s, y_s)} = 0.23\% \quad (\text{C.17})$$

C.4.2.3 扩展不确定度 U

按式 (C.5) 计算扩展不确定度 U 。取 $k=2$, 则 $U=0.5\%$ 。

C.5 瞬态光谱仪响应时间测量不确定度分析

C.5.1 各输入量标准不确定度评定

a) 瞬态光谱仪相对光谱功率测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

在瞬态光谱辐射量标准装置上, 用瞬态光谱仪测量标准钨带灯的相对光谱功率, 重复测量 6 次, 紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪分别选择 250 nm, 700 nm, 1 550 nm 波长处, 紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪的相对光谱功率测量平均值的相对标准不确定度分量 u_1 分别为: 0.38%, 0.13%, 0.41%。

b) 波长不准确引入的不确定度分量 u_2

根据使用说明书和实验, 波长不准确引入的相对标准不确定度分量 $u_2 = 0.03\%$ 。

c) 辐射源不稳定引入的不确定度分量 u_3

根据使用说明书, 辐射源不稳定性为 0.2%, 假设均匀分布, 其标准不确定度分量 $u_3 = 0.12\%$ 。

d) 光谱修正引入的不确定度分量 u_4

用标准钨带灯对被校瞬态光谱仪进行光谱修正, 根据证书, 标准钨带灯相对光谱功率测量不确定度紫外波段为 2.0% ($k=2$), 可见光波段为 1.0% ($k=2$), 近红外波段为 2.0% ($k=2$), 其标准不确定度分量 u_4 分别为 1.0%, 0.5%, 1.0%。

e) 瞬态光源脉冲宽度校准引入的不确定度分量 u_5

瞬态光源脉冲宽度的校准是瞬态光源的光信号经探测器由示波器进行脉冲宽度的输出。根据检定证书, 示波器时间测量不确定度为 10^{-5} ($k=2$), 其标准不确定度分量 $u_5 = 5 \times 10^{-4}$ 。

f) 斩波器不稳定引入的不确定度分量 u_6

根据使用说明书, 斩波器频率不稳定性为 1.0%, 假设均匀分布, 其标准不确定度分量 $u_6 = 0.5\%$ 。

C.5.2 合成标准不确定度 u_c

合成标准不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} \quad (\text{C.18})$$

对于紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪合成标准不确定度 u_c 分别为: 1.2%, 0.73%, 1.2%。

C.5.3 扩展不确定度 U

按式 (C.5) 计算扩展不确定度 U 。取 $k=2$ ，对于紫外瞬态光谱仪、可见光瞬态光谱仪和近红外瞬态光谱仪，扩展不确定度 U 分别为：2.4%，1.6%，2.4%。

