1. **实验目的**

采用标准黑体辐射源、傅里叶变换红外光谱仪（FTIR）、中继光路、红外辐射温度计等，对被测红外光谱辐射亮度标准源的光谱辐射亮度、稳定性、重复性和均匀性等进行校准。

1. **实验地点**

北京市昌平区昌赤路18号中国计量院14号楼1014房间

1. **环境条件**

实验室温度：19.7℃ 相对湿度：38% 暗室

1. **校准设备**

表1 校准设备表

|  |
| --- |
| 校准使用的标准器 |
| 名 称 | 测量范围 | 不确定度/准确度等级/最大允许误差 | 检定/校准证书编号 | 有效期至 |
| 傅里叶变换红外光谱仪 | 4000 cm-1 ~ 400 cm-1 | *U* = 0.10 cm-1 (*k*=2) | GXcl2023-00333 | 2024.01.08 |
| 红外辐射温度计 | 200℃~1100℃  | *U* =（0.4 ~ 0.2）K (*k*=2) | RGfs2022-20073 | 2024.10.18 |
| 黑体辐射源 | 200℃~1050℃ | *U* = 1.0 K (*k*=2) | GXfs2023-04450 | 2025.07.03 |

1. **校准人**

贺书芳，王彦飞

1. **被校样品信息**

黑体辐射源，型号：R976

1. **校准方法及结果**
2. 光谱辐射亮度

校准方法：将标准黑体辐射源和被测红外标准源的温度都设置在923 K，待温度稳定后使用红外辐射温度计测量标准黑体辐射源的温度*T*s，并计算得到$L\_{S}(λ, T\_{s})$；之后，分别使用FTIR对标准黑体辐射源和被测红外标准源进行5次测量并计算平均值，分别得到$\overbar{V}\_{S}(λ, T\_{s})$和$\overbar{V}\_{m}(λ, T\_{m})$；最后，代入$L\_{m}(λ, T\_{m})=\frac{\overbar{V}\_{m}(λ, T\_{m})}{\overbar{V}\_{S}(λ, T\_{s})}∙L\_{S}(λ, T\_{s}) $计算得到被测红外标准源的光谱辐射亮度值$L\_{m}(λ, T\_{m})$，表2为几个典型波长条件下的被测标准源的光谱辐射亮度值。

表2 被测标准源光谱辐射亮度校准结果

|  |  |
| --- | --- |
| 波长(μm) | 光谱辐射亮度(µW·cm-2·nm-1·sr-1) |
| 2.0 | 1.60E+04 |
| 2.5 | 2.47E+04 |
| 5.0 | 1.81E+04 |
| 8.0 | 6.15E+03 |
| 10.0 | 3.21E+03 |
| 12.0 | 1.81E+03 |
| 14.0 | 1.09E+03 |

1. 被测标准源的稳定性

校准方法：使用定标后的红外光谱辐射亮度测量系统对被测红外标准源进行测量。在10分钟内，每隔2分钟使用红外光谱辐射亮度测量装置对被测辐射源进行一次测量，得到最大值为$L\_{max}(λ)$，最小值为$L\_{min}(λ)$，平均值为$L\_{avg}(λ)$。代入式$S(λ) = \frac{(L\_{max}(λ)−L\_{min}(λ)) }{L\_{avg}(λ)} ×100\%$计算被测标准源的相对不稳定度，结果见表3。

表3 被测标准源的不稳定度

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 波长(μm) | 最大值(µW·cm-2·nm-1·sr-1) | 最小值(µW·cm-2·nm-1·sr-1) | 平均值(µW·cm-2·nm-1·sr-1) | 相对不稳定度(%) |
| 2.0 | 16002 | 15954 | 15980 | 0.302 |
| 2.5 | 24692 | 24634 | 24664 | 0.237 |
| 5.0 | 18143 | 18134 | 18139 | 0.051 |
| 8.0 | 6145.6 | 6144.8 | 6145.4 | 0.013 |
| 10.0 | 3210.8 | 3209.6 | 3210.2 | 0.037 |
| 12.0 | 1811.8 | 1811.0 | 1811.4 | 0.043 |
| 14.0 | 1091.9 | 1091.6 | 1091.7 | 0.034 |

1. 被测标准源的重复性

校准方法：使用定标后的红外光谱辐射亮度测量装置在短时间内对被测红外标准源进行测量10次测量，根据贝塞尔公式计算测量数据的相对偏差，结果见表4。

表4 被测标准源的重复性

|  |  |
| --- | --- |
| 波长(μm) | 重复性(%) |
| 2.0 | 0.035 |
| 2.5 | 0.022 |
| 5.0 | 0.005 |
| 8.0 | 0.003 |
| 10.0 | 0.003 |
| 12.0 | 0.003 |
| 14.0 | 0.003 |

1. 被测标准源的均匀性

校准方法：使用定标后的红外光谱辐射亮度测量装置测量被测标准源的左上、左下、右上、右下四个区域的光谱辐射亮度值，并$根据u\_{uni} (λ)=\frac{ L\_{max}(λ)− L\_{min}(λ)}{\overbar{L(λ)}}×100\%$计算被测标准源光谱辐射亮度的不均匀性，结果见表5。

表5 被测标准源的不均匀性

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 波长(μm) | 最大值(µW·cm-2·nm-1·sr-1) | 最小值(µW·cm-2·nm-1·sr-1) | 平均值(µW·cm-2·nm-1·sr-1) | 相对不均匀性(%) |
| 2.0 | 15864 | 15730 | 15782 | 0.847 |
| 2.5 | 24550 | 24397 | 24452 | 0.623 |
| 5.0 | 18131 | 18079 | 18099 | 0.286 |
| 8.0 | 6148.5 | 6142.7 | 6144.4 | 0.094 |
| 10.0 | 3211.8 | 3209.8 | 3210.4 | 0.064 |
| 12.0 | 1812.0 | 1811.3 | 1811.6 | 0.038 |
| 14.0 | 1092.0 | 1091.6 | 1091.8 | 0.036 |

1. **校准结果的不确定度评定**

8.1 测量重复性的评定

通过贝塞尔公式（C2）计算系统测量的重复性。其中，$R\_{i}(λ)$表示第*i*次被测辐射源信号$V\_{m}(λ, T\_{m})$与标准辐射源信号$V\_{S}(λ, T\_{m})$之比，i = 1， 2，……*n*；$\overbar{R(λ)}$表示*n*次被测辐射源信号与标准辐射源信号之比的平均值；*n*为测试次数。

$u\_{1}(λ)= \frac{1}{\overbar{R(λ)}}\sqrt{\frac{\sum\_{i=1}^{n}(R\_{i}(λ)−\overbar{R(λ)})^{2} }{(n−1)}}$ (C2)

经过计算，在10 µm，923 K条件下，系统测量的重复性引入的不确定度为$u\_{1}$ = 0.003%。

8.2 测量的复现性

测量的复现性为在不同时间（天），将被测标准源设置为相同温度值，通过光谱辐射亮度测量装置测量被测标准源的光谱辐射亮度值，采用极差法计算不同时间（天）系统测量偏差的变化情况。经过计算，在10 µm，923 K条件下，系统测量的复现性引入的不确定度为$u\_{2}$ = 0.248%。

8.3 标准黑体的温度测量

标准黑体温度测量的不确定度主要由红外辐射温度计的校准不确定度等因素引起。标准黑体温度测量的不确定度会直接影响标准光谱辐射亮度值；经过计算，在10 µm，923 K条件下，标准黑体的温度测量引入的不确定度为$u\_{3}$ = 0.100%。

8.4 标准黑体的不稳定性

测量10分钟内标准黑体光谱辐射亮度值的偏移，并计算相对不确定度。经过计算，在10 µm，923 K条件下，由标准黑体的不稳定性测量引入的不确定度为$u\_{4}$ = 0.052%。

8.5 标准黑体的不均匀性

测量标准黑体腔口不同位置的光谱辐射亮度分布，并计算相对不确定度。经过计算，在10 µm，923 K条件下，标准黑体的不均匀性引入的不确定度为$u\_{5}$ = 0.159%。

8.6 被测标准源的温度不稳定性和不均匀性

分别采用与C2.4和C2.5相同的方法，计算被测标准源的温度不稳定性和不均匀性。经过计算，在10 µm，923 K条件下，被测标准源的温度不稳定性和不均匀性引入的相对不确定度分别为$u\_{6}$ = 0.037%和$u\_{7}$ = 0.064%。

8.7 测量系统的波长误差

参照JJF 1319-2011校准规范7.1中方法，计算波数示值误差；之后计算该波长误差对光谱辐射亮度引入的相对不确定度。经过计算，在10 µm，923 K条件下，测量系统波长误差引入的不确定度为$u\_{8}$ = 0.082%。

8.8 测量系统的非线性

测量系统的非线性可通过非线性测量装置测量。根据实验结果，在10 µm，923 K条件下，测量系统的非线性导致的光谱辐射亮度的相对不标准不确定度不超过$u\_{9}$ = 0.100%。

8.9 测量系统的源尺寸效应和环境杂散辐射

测量系统的源尺寸效应和环境杂散辐射可通过搭建相关测量装置进行测量。根据实验结果，在10 µm，923 K条件下，测量系统的源尺寸效应和环境杂散辐射导致的光谱辐射亮度的相对不标准不确定度不超过$u\_{10}$ = 0.200%。

8.10. 不确定度计算

在10 µm，923 K条件下，上述各个分量的合成不确定度为：

$u\_{c}= \sqrt{u\_{1}^{2}+ u\_{2}^{2}+ ……+ u\_{10}^{2}}=0.40\%$ (C3)

相对扩展不确定度为*U*rel = 2 ·$u\_{c}$ = 0.80% (*k* = 2)。

同理，可以分析923 K不同波长条件下的辐射源红外光谱辐射亮度校准的不确定度，如下表。



1. **实验结论**

被校标准源在温度设置为923 K时的几个典型波段下的光谱辐射亮度值如下表：

|  |  |
| --- | --- |
| 波长(μm) | 光谱辐射亮度(µW·cm-2·nm-1·sr-1) |
| 2.0 | 1.60E+04 |
| 2.5 | 2.47E+04 |
| 5.0 | 1.81E+04 |
| 8.0 | 6.15E+03 |
| 10.0 | 3.21E+03 |
| 12.0 | 1.81E+03 |
| 14.0 | 1.09E+03 |

通过本实验，证明《红外光谱辐射亮度标准源校准规范》中的计量特性和校准方法是科学、合理，能够满足当前各领域的校准需求。