

《辐射型热流计校准规范》

实验报告

《辐射型热流计校准规范》起草小组

2024年11月

实验报告（一）

一、 实验目的

通过实验，验证《辐射型热流计校准规范》中各参数校准方法的可行性，核查指标是否能够完全覆盖校准规范中的规定，并对测量不确定度评定的合理性和准确性进行分析。

二、 实验地点及时间

实验地点：中国计量科学研究院13#216实验室；

实验时间：2024年03月26日。

三、 环境条件

实验室环境条件	测量开始时	测量结束时
温度/°C:	19	19
相对湿度 (%) :	10	10
其他特殊条件:	无	无
样品状况:	正常	正常

四、 校准用设备

名称/型号	编号	证书编号/有效期限	测量范围/准确度等级或最大允许误差或不确定度
绝对辐射计/ JF-X	23-02	GXjg2024-04595/ 2025.02.07	(0.01~50) kW/m ² / $U_{rel}=0.4\%$ ($k=2$)
数字多用表/ 34470A	MY57700752	DCsy2023-01865/ 2024.07.14	0.1 mV~10 V/ $U_{rel}=5\times 10^{-5}$ ($k=2$)
宽光谱辐射源/ RLS-300	1801	GXjg2024-04598/ 2025.02.08	(0.01~40) kW/m ² / 稳定性: 0.1%

五、 校准人员：

李超辰、邓玉强

六、 被校样品信息：

名称	型号	编号	生产厂商
辐射热流计	SBG01/LI-19	13143/16110917	Hukseflux

七、 校准方法及结果：

（一）校准方法

1、辐照度示值

（1）调整宽光谱辐射源和标准辐射计、被校辐射型热流传感器接收面，将标准辐射计和被校辐射型热流传感器接收面调整处于同一平面，并使宽光谱辐射源垂直入射到接收面。

（2）开启电测仪表和宽光谱辐射源，按要求预热，待宽光谱辐射源稳定后开始校准。如标准辐射计、宽光谱辐射源、被校辐射型热流计、小孔光阑（必要时）等需要水冷装置保护的，按使用要求开启冷却循环水开关，水冷装置的水流量和温度应稳定并符合相关技术说明书的要求。

（3）在校准量程范围内按高、中、低均匀分布校准3点标准辐射计和被校辐射型热流传感器交替分别测量3次，对于具有显示仪表，可直接测量读取辐射热流计值的仪器，直接读取辐射型热流传感器的示值，将测量结果记录到原始记录中，取各自3次测量值的算术平均值分别作为标准辐射计的标准值 \bar{E}_s 和被校辐射型热流计的示值 \bar{E}_{DUT} ，并按公式（1）和（2）分别计算出相对示值误差 δ 和修正因子 C 。

相对示值误差 δ ：

$$\delta = \frac{\bar{E}_{DUT} - \bar{E}_s}{\bar{E}_s} \times 100\% \quad (1)$$

修正因子 C ：

$$C = \frac{\bar{E}_s}{\bar{E}_{DUT}} \quad (2)$$

式中：

\bar{E}_{DUT} ——被校辐射型热流计3次测量值的算术平均值，kW/m²；

\bar{E}_s ——标准辐射计3次测量值的算术平均值，kW/m²。

(二) 校准结果：

1、辐照度相对示值误差与修正因子

标准值 kW/m ²	均值 kW/m ²	示值 kW/m ²	均值 kW/m ²	相对示 值误差	修正因 子
31.8	31.8	32.5	32.6	2.5%	0.98
31.8		32.6			
31.8		32.7			
4.99	4.99	5.07	5.08	1.8%	0.98
4.99		5.08			
4.99		5.09			
0.998	0.998	1.03	1.03	3.2%	0.97
0.998		1.03			
0.999		1.03			

八、 校准结果的不确定度评定

1、测量模型

$$C = \frac{\bar{E}_s}{\bar{E}_{DUT}}$$

式中：

C ——被校辐射型热流计的修正因子；

\bar{E}_{DUT} ——被校辐射型热流计3次测量值的算术平均值；

\bar{E}_s ——标准辐射计3次测量值的算术平均值。

2、辐射型热流计辐照度示值修正因子测量结果的不确定度评定

辐射型热流计辐照度示值修正因子测量结果的不确定度主要包括以下方面：

(1) 被校辐射型热流计测量重复性所引入的标准不确定度分量 u_1 。

对一台辐射型热流计，在辐照度 5 kW/m^2 附近连续重复测量3次，得到测量列：5.07、5.08、5.09、5.08、5.07、5.07、5.09、5.08、5.09、5.06，单位为 kW/m^2 ，采用A类评定方法。

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = 5.078 \text{ kW/m}^2$$

单次相对实验标准差为：

$$= 0.20\% S = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (E_i - \bar{E})^2}{n-1}}}{\bar{E}} = 0.20\%$$

实际测量时，在重复性条件下连续测量3次，以3次测量算术平均值为测量结果，则可得到：

$$u_1 = S / \sqrt{3} = 0.12\%$$

(2) 标准辐射计上级量传所引入的标准不确定度分量 u_2 。

标准辐射计上级量传的不确定度为 $U_{\text{rel}}=0.40\%$ ($k=2$)，采用B类评定方法进行评定。

$$u_2 = \frac{a}{k} = \frac{0.4\%}{2} = 0.20\%$$

(3) 宽光谱辐射源工作距离处辐照不均匀度所引入的标准不确定度分量 u_3 。

宽光谱辐射源工作距离处辐照不均匀度优于1%，根据不均匀度的定义和计算公式，其区间的半宽度为1%，在此区间内认为服从均匀分布，采用B类评定方法进行评定。

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.58\%$$

(4) 宽光谱辐射源辐照不稳定性所引入的标准不确定度分量 u_4 。

宽光谱辐射源的辐照不稳定性优于0.1%，根据不稳定度的定义和计算公式，

其区间的半宽度为0.1%，在此区间内认为服从均匀分布，采用B类评定方法进行评定。

$$u_4 = \frac{a}{k} = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.06\%$$

(5) 标准不确定度汇总表

输入量的标准不确定度汇总于表1。

表1 标准不确定度汇总表

标准不确定度 u_i	不确定度来源	标准不确定度值
u_1	被校辐射型热流计的测量重复性	0.12%
u_2	标准辐射计上级量传	0.20%
u_3	宽光谱辐射源的辐照不均匀度	0.58%
u_4	宽光谱辐射源的辐照不稳定性	0.06%

(6) 相对合成标准不确定度的计算

上述各标准不确定度分量彼此独立不相关，所以相对合成标准不确定度可按下式得到：

$$u_{\text{crel}}(C) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.62\%$$

(7) 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}}(C) = 2 \times u_{\text{crel}}(C) = 2 \times 0.62\% = 1.24\% \approx 1.3\%$$

九、 实验结论

本实验严格按照校准规范中的校准方法执行，未出现有分歧性或模糊性的操作，具有可操作性；实验数据可靠。因此，本实验很好地验证了校准规范的可操作性和参数指标的合理性。

实验报告（二）

一、 实验目的

通过实验，验证《辐射型热流计校准规范》中各参数校准方法的可行性，核查指标是否能够完全覆盖校准规范中的规定，并对测量不确定度评定的合理性和准确性进行分析。

二、 实验地点及时间

实验地点：中国计量科学研究院13#216实验室；

实验时间：2024年03月08日。

三、 环境条件

实验室环境条件	测量开始时	测量结束时
温度/°C:	20	20
相对湿度 (%) :	10	10
其他特殊条件:	无	无
样品状况:	正常	正常

四、 校准用设备

名称/型号	编号	证书编号/有效期限	测量范围/准确度等级或最大允许误差或不确定度
绝对辐射计/ JF-X	23-02	GXjg2024-04595/ 2025.02.07	(0.01~50) kW/m ² / $U_{rel}=0.4\%$ ($k=2$)
数字多用表/ 34470A	MY57700752	DCsy2023-01865/ 2024.07.14	0.1 mV~10 V/ $U_{rel}=5\times 10^{-5}$ ($k=2$)
宽光谱辐射源/ RLS-300	1801	GXjg2024-04598/ 2025.02.08	(0.01~40) kW/m ² / 稳定性: 0.1%

五、 校准人员：

李超辰、邓玉强

六、 被校样品信息：

名称	型号	编号	生产厂商
辐射热流计	64-5-20	29521-06	/

七、 校准方法及结果：

（一）校准方法

1、响应度校准

（1）调整宽光谱辐射源和标准辐射计、被校辐射型热流传感器接收面，将标准辐射计和被校辐射型热流传感器接收面调整处于同一平面，并使宽光谱辐射源垂直入射到接收面。

（2）开启电测仪表和宽光谱辐射源，按要求预热，待宽光谱辐射源稳定后开始校准。如标准辐射计、宽光谱辐射源、被校辐射型热流计、小孔光阑（必要时）等需要水冷装置保护的，按使用要求开启冷却循环水开关，水冷装置的水流量和温度应稳定并符合相关技术说明书的要求。

（3）在校准量程范围内用标准辐射计和被校辐射型热流传感器交替分别测量3次，辐射型热流传感器的响应值一般为电压值，将测量结果记录到原始记录中，取各自3次测量值的算术平均值分别作为标准辐射计的标准值 \bar{E}_s 和被校辐射型热流计的响应值 \bar{U}_{DUT} ，并按公式（1）计算出响应度。

响应度 s ：

$$s = \frac{\bar{U}_{DUT}}{\bar{E}_s} \quad (2)$$

式中：

\bar{U}_{DUT} ——被校辐射型热流计3次测量值的算术平均值，mV；

\bar{E}_s ——标准辐射计3次测量值的算术平均值，kW/m²。

(二) 校准结果:

1、辐照度响应度

标准值 kW/m ²	均值 kW/m ²	响应电压 mV	均值 mV	响应度 μV·W ⁻¹ ·m ²
9.99	9.99	4.58	4.57	0.457
9.99		4.56		
9.99		4.57		

八、 校准结果的不确定度评定

1、测量模型

$$s = \frac{\overline{U}_{DUT}}{\overline{E}_s}$$

式中:

s ——被校辐射型热流计的响应度;

\overline{E}_{DUT} ——被校辐射型热流计3次测量值的算术平均值;

\overline{E}_s ——标准辐射计3次测量值的算术平均值。

2、辐射型热流计辐照度示值修正因子测量结果的不确定度评定

辐射型热流计辐照度示值修正因子测量结果的不确定度主要包括以下方面:

(1) 被校辐射型热流计测量重复性所引入的标准不确定度分量 u_1 。

对一台辐射型热流计, 在辐照度10 kW/m²附近连续重复测量3次, 得到测量列: 4.58、4.56、4.57、4.55、4.57、4.59、4.58、4.59、4.58、4.58, 单位为mV, 采用A类评定方法。

$$\overline{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i = 4.575 \text{ mV}$$

单次相对实验标准差为:

$$S = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (U_i - \overline{U})^2}{n-1}}}{\overline{U}} = 0.28\%$$

实际测量时, 在重复性条件下连续测量3次, 以3次测量算术平均值为测量结

果，则可得到：

$$u_1 = S / \sqrt{3} = 0.16\%$$

(2) 标准辐射计上级量传所引入的标准不确定度分量 u_2 。

标准辐射计上级量传的不确定度为 $U_{\text{rel}}=0.4\%$ ($k=2$)，采用B类评定方法进行评定。

$$u_2 = \frac{a}{k} = \frac{0.4\%}{2} = 0.2\%$$

(3) 宽光谱辐射源工作距离处辐照不均匀度所引入的标准不确定度分量 u_3 。

宽光谱辐射源工作距离处辐照不均匀度优于1%，根据不均匀度的定义和计算公式，其区间的半宽度为1%，在此区间内认为服从均匀分布，采用B类评定方法进行评定。

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.58\%$$

(4) 宽光谱辐射源辐照不稳定性所引入的标准不确定度分量 u_4 。

宽光谱辐射源的辐照不稳定性优于0.1%，根据不稳定度的定义和计算公式，其区间的半宽度为0.1%，在此区间内认为服从均匀分布，采用B类评定方法进行评定。

$$u_4 = \frac{a}{k} = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.06\%$$

(5) 标准不确定度汇总表

输入量的标准不确定度汇总于表1。

表1 标准不确定度汇总表

标准不确定度 u_i	不确定度来源	标准不确定度值
u_1	被校辐射型热流计的测量重复性	0.16%
u_2	标准辐射计上级量传	0.2%
u_3	宽光谱辐射源的辐照不均匀度	0.58%
u_4	宽光谱辐射源的辐照不稳定性	0.06%

(6) 相对合成标准不确定度的计算

上述各标准不确定度分量彼此独立不相关，所以相对合成标准不确定度可按下列式得到：

$$u_{\text{crel}}(s) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.63\%$$

(7) 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}}(s) = 2 \times u_{\text{crel}}(s) = 2 \times 0.63\% = 1.26\% \approx 1.3\%$$

九、 实验结论

本实验严格按照校准规范中的校准方法执行，未出现有分歧性或模糊性的操作，具有可操作性；实验数据可靠。因此，本实验很好地验证了校准规范的可操作性和参数指标的合理性。
