

## 高精度辐射热流计的不确定度分析与评价

郑翔远 叶新 罗志涛 王阔传 宋宝奇

### Uncertainty analysis and evaluation of a high-precision radiative heat-flux meter

ZHENG Xiang-yuan, YE Xin, LUO Zhi-tao, WANG Kuo-chuan, SONG Bao-qi

引用本文:

郑翔远, 叶新, 罗志涛, 王阔传, 宋宝奇. 高精度辐射热流计的不确定度分析与评价[J]. *中国光学*, 2022, 15(4): 780–788. doi: 10.37188/CO.2022–0023

ZHENG Xiang-yuan, YE Xin, LUO Zhi-tao, WANG Kuo-chuan, SONG Bao-qi. Uncertainty analysis and evaluation of a high-precision radiative heat-flux meter[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 780–788. doi: 10.37188/CO.2022-0023

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0023>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 太阳辐射计的衍射效应修正

Diffraction effect correction of solar radiometer

中国光学. 2018, 11(5): 851 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0851>

#### 多元热流体激光检测及杂光抑制光路

Optical path of laser detection and stray light suppression for multiple thermal fluids

中国光学. 2019, 12(2): 310 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0310>

#### 基于光谱指数的蜜橘成熟度评价模型研究

Maturity evaluation model of tangerine based on spectral index

中国光学. 2018, 11(1): 83 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0083>

#### 连续激光辐照下的TiO<sub>2</sub>薄膜热传导性质

Heat conduction properties of TiO<sub>2</sub> films irradiated by a continuous laser

中国光学. 2019, 12(3): 628 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0628>

#### 人工触发闪电通道的辐射特性分析

Analysis of radiation evolution characteristics of the artificial triggered lightning channel

中国光学. 2019, 12(3): 670 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0670>

#### 米级口径经纬仪保护窗口镜面变形分析

Analysis of the mirror deformation of one-meter theodolite protective window

中国光学. 2018, 11(4): 654 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0654>

文章编号 2095-1531(2022)04-0780-09

## 高精度辐射热流计的不确定度分析与评价

郑翔远<sup>1,2</sup>, 叶新<sup>1\*</sup>, 罗志涛<sup>1</sup>, 王阔传<sup>3</sup>, 宋宝奇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076)

**摘要:**为满足实验室条件下长时间、高精度的热流密度测量要求,基于电替代测量原理研制了一种新型辐射热流计,该型辐射热流计可通过自校准的方式溯源至国际单位制单位。本文简述了辐射热流计的系统构成,结合辐射热流计的测量原理,分析并计算了辐射热流计自校准过程中 9 项影响量的测量不确定度和合成标准不确定度。通过与中国计量科学院所标定的标准探测器比对,计算了辐射热流计的不确定度,最后根据实验数据及分析结果为该型热流计的优化设计提供了参考。实验结果表明:辐射热流计的相对标准不确定度优于 0.26%,与标准探测器的归一化偏差为 0.60,验证了不确定度评估结果。实验结果将为辐射热流计下一阶段的研制提供有效参考。

**关键词:**辐射热流;热流计;自校准;不确定度;比对

中图分类号:TP394.1;TH691.9

文献标志码:A

doi:10.37188/CO.2022-0023

## Uncertainty analysis and evaluation of a high-precision radiative heat-flux meter

ZHENG Xiang-yuan<sup>1,2</sup>, YE Xin<sup>1\*</sup>, LUO Zhi-tao<sup>1</sup>, WANG Kuo-chuan<sup>3</sup>, SONG Bao-qi<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science,

Changchun 130033, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing Aerospace Institute of Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China)

\* Corresponding author, E-mail: yexin@ciomp.ac.cn

**Abstract:** In order to meet the requirements of long and highly precise heat flux measurement under laboratory conditions, a new radiative heat flux meter was developed based on the principle of electrical substitution measurement. The radiative heat flux meter can be traced to the International System of Units through self-calibration. Firstly, the system structure of the radiative heat flux meter is briefly described. Combining with the measuring principle of the radiative heat-flux meter, the measurement uncertainty of nine uncertainty components and their combined standard uncertainty in the process of radiative heat-flux meter self-calibration are analyzed and calculated. Then, the uncertainty of a radiometric heat-flux meter is verified by

收稿日期:2022-02-08; 修订日期:2022-03-07

基金项目:国家重点研发计划项目资助(No. 2018YFB0504500, No. 2018YFB0504603)

Supported by National Key R & D of China (No. 2018YFB0504500, No. 2018YFB0504603)

direct comparison with a standard detector calibrated by the National Institute of Metrology of China. Finally, according to the experimental data and analysis results, this paper provides a reference for the optimization design of the heat-flux meter. The experimental results show that the relative standard uncertainty of the radiative heat-flux meter is better than 0.26%, and the normalized error is 0.60, which verifies the validity of the uncertainty evaluation results. The experimental results will guide the development of radiative heat flow meters in the next stage and further improve its performance.

**Key words:** radiation heat flux; heat-flux meter; self-calibration; uncertainty; comparison

## 1 引言

热流密度是单位时间内通过单位面积传递的热量,根据热力学第二定律,热量自发地从高温部分传给低温部分。几乎所有的工程领域都会遇到一些特定条件下的传热问题。例如,在评价锅炉、制冷机、换热器等动力装置的设备大小、能力和技术经济指标时,就必须进行详细的传热分析;许多新兴技术装备,如原子反应堆的堆芯、大功率火箭的喷管、集成的电子器件和要求重返地面的航天器等,成功的设计都必须严密控制传热情况,维持合理地预期工作温度;航天地面热试验包括热平衡测试、热真空测试和热循环测试,通过这些测试评价航天器的合理性和可靠性,故需要对大热流密度进行准确地测量。因此辐射热流密度的准确测量是实现上述工作的基础<sup>[1-5]</sup>。热流计是测量热流密度的关键元件,1924年德国的Schmidt利用缠绕线结合电镀形成热电堆的方式制成了世界上首个可实用的热流计,随后在1934年,被Gier和Boelter改进,制成可用于测量辐射热流的热流计,即现在的热阻型热流计(Schmidt-Boelter型热流计)。1953年Gardon提出了圆箔式热流计的概念,研制出测量准确度为3%的圆箔式热流计(Gardon式热流计)。1970年前后,Kendall等人参考了绝对辐射计的研究,研制出一系列量热型辐射热流计,测量精度进一步提高<sup>[6-8]</sup>。自1934年热阻型辐射热流计研制以来,辐射热流测量技术已走过近一个世纪的发展历程,辐射热流计的性能在逐渐提高,已成为测量辐射热流密度的重要手段。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所辐射计量小组为满足辐射热流的精确测量,开展了一种新型辐射热流计的研究工作。该仪器是利

用光辐射热效应工作的热电型探测器,其锥腔型接收器具有高吸收率、测量精度高的特点,目前国内外的辐射热流计基本为涂上高吸收率黑漆的平面接收器,吸收率难以突破0.95,而锥腔型接收器通过圆锥腔内表面的黑漆吸收层将光能量多次吸收,吸收率优于0.99<sup>[9]</sup>。仪器工作原理利用光电等效性,通过可精确测量的电功率复现入射的辐射光功率,电功率的功率值即为辐射光功率的测量值,测量结果可直接溯源至国际单位制。探测器采用测试腔与补偿腔对称的结构设计,并设计水循环管路,可通入温度稳定的循环水冷却热沉的冷端,解决了辐射热流计受环境温度影响的难题,提高了仪器的测量准确度。

辐射定标是研制辐射热流计的关键环节,通过辐射定标可以建立仪器辐射输入量与仪器电子学系统输出之间的数学关系。高精度的辐射基准是提升辐射定标水平的关键。美国国家标准与技术研究院(NIST)及其下属的建筑和火灾研究实验室(BFRL)在理论研究和标定设备制造两方面作了大量工作,提出了很多先进方法。NIST在对薄膜热流计的标定实验中,以标准圆箔式热流计作为二级传递标准,待检热流计的标准不确定度优于3%<sup>[9-11]</sup>。德国航空太空中心(DLR)在对圆箔式热流计和热阻式热流计进行标定试验中,以Kendall MK IX型辐射热流计(量热型)进行校准,校准后的圆箔式热流计和热阻式热流计的标准不确定度优于1%<sup>[12-14]</sup>。由于待测仪器的测量不确定度要优于1%,目前热流测量技术无高精度溯源标准,难以满足辐射热流计的高精度定标。因此必须对量热型辐射热流计进行辐射定标,以保证辐射热流计的测量准确度和长期稳定性<sup>[15-17]</sup>。

针对辐射热流计难以溯源的难题,本文提出基于量热型辐射热流计的可溯源辐射定标链路,通过测量同一单色光源实现标准的传递。为实现

辐射热流密度的测量,研制了辐射热流计样机,开展了探测器研制、热流计结构设计、电替代测量算法、性能评估等关键技术攻关。

本文主要研究用于实验室环境下辐射热流计的不确定度分析与评价。建立了辐射热流测量链路,评估测量不确定度,并与中国计量科学研究院检定过的光陷阱探测器进行直接比对,对辐射热流计高精度标定方法的研究具有重要意义。

## 2 辐射热流计测量系统工作原理

### 2.1 辐射热流计测量系统的构成

图 1 为辐射热流测量系统图。辐射热流系统由快门、探测头部、控制箱、水冷系统组成,并使用 Lab-VIEW 开发了一系列测控软件,实现热流密度测量、数据存储及分析等。

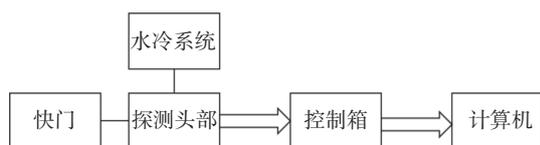


图 1 辐射热流计系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of a radiation heat-flux system

### 2.2 辐射热流测量系统的工作原理

辐射热流计工作原理如图 2 所示,该系统的测量分为两个阶段,首先通过控制单元对缠绕在黑体腔外部的加热丝施加不同的加热功率使主腔升温,从而使主腔探测器与热沉在导热路径上产生温差,以使导热路径上的热电堆两端输出相应的热电信号。通过施加不同功率,获取仪器探测器在响应功率下的热电信号,并按照插值法建立热电功率与热电信号码值之间的数学模型。

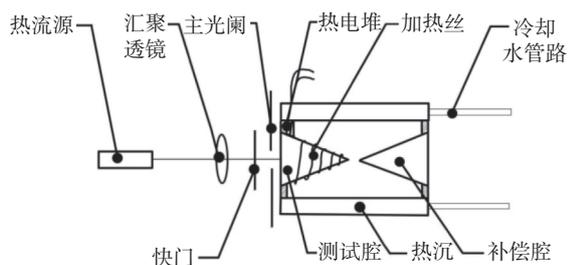


图 2 辐射热流计工作原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the measurement principle of a radiometric heat-flux meter

在测量辐射光源时,入射光通过探测头部的主光阑,入射至黑体腔的内表面,从而使得黑体腔升温,使主腔探测器与热沉在导热路径上产生温差,并使导热路径上的热电堆两端输出相应的热电信号,待热电信号达到平衡后,该信号即为被测光源对应的热电信号。结合第一阶段所得数学模型,即可计算出待测目标的辐射热流密度。

根据电替代原理,辐射热流计通过计算电功率来获取辐射功率,本文以热电码值的形式对热电信号进行采集和处理,最后通过限定通光截面积,实现辐射功率向热流密度的转换,见式(1)~(5)。

$$P = R_s(M_{\text{text}} - M_{\text{state}i}) + P_{\text{state}i} \quad (1)$$

$$R_s = \frac{P_{\text{state}i+1} - P_{\text{state}i}}{M_{\text{state}i+1} - M_{\text{state}i}} \quad (2)$$

$$P_{\text{state}i} = \frac{U_i^2}{R} \quad (3)$$

$$E = f_{\text{di}} \times f_{\text{absor}} \times \frac{P}{A} \quad (4)$$

$$E = f_{\text{di}} \times f_{\text{absor}} \times \frac{1}{A} \left[ \frac{U_{i+1}^2/R - U_i^2/R}{M_{\text{state}i+1} - M_{\text{state}i}} \times (M_{\text{text}} - M_{\text{state}i}) + \frac{U_i^2}{R} \right] \quad (5)$$

式中, $f_{\text{di}}$ 为衍射效应校正因子, $f_{\text{absor}}$ 为黑体腔吸收比校正因子, $P_{\text{state}i}$ 、 $P_{\text{state}i+1}$ 为自校准各阶段施加的电功率, $A$ 为主光阑面积, $R_s$ 为响应度系数, $R$ 为加热丝电阻, $U_{i+1}$ 、 $U_i$ 为被测光源稳定后的加热电压, $M_{\text{text}}$ 为被测光源稳定时的热电读数, $M_{\text{state}i}$ 为自定标阶段平衡的热电读数。

## 3 测量结果评价

### 3.1 测量不确定度分析

对被测量值进行不确定度分析,不确定度越小,所属结果与被测量的真值越接近。当测量结果受多种因素影响形成了若干个不确定分量时,测量结果的标准不确定度用各标准不确定度分量合成后所得的合成标准不确定度来表征。

#### 3.1.1 测量不确定度

为求得合成标准不确定度,首先要分析各种影响因素与测量结果的关系,以便准确评定各种不确定度分量,然后才能进行合成标准不确定度计算。测量结果的不确定度一般包含若干个分

量, 根据其数值评定方法的不同分为 A 类(通过统计分析所作评定的不确定度)和 B 类(由不同于统计分析所作评定的不确定度)。A 类不确定度由实验标准偏差表征, 计算公式为:

$$u(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (6)$$

式中  $x_i$  为被测量,  $\bar{x}$  为被测量的算数平均值,  $n$  为测量次数。

相对标准不确定度为:

$$u(E) = \left[ c^2(F_{\text{absor}})u^2(F_{\text{absor}}) + c^2(F_{\text{di}})u^2(F_{\text{di}}) + c^2(A)u^2(A) + c^2(R)u^2(R) + c^2(M_{\text{text}})u^2(M_{\text{text}}) + c^2(U_{i+1})u^2(U_{i+1}) + c^2(U_i)u^2(U_i) + c^2(M_{\text{state}i+1})u^2(M_{\text{state}i+1}) + c^2(M_{\text{state}i})u^2(M_{\text{state}i}) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

### 3.1.2 各不确定度分量测试

式 (9) 是被测量热流密度 ( $E$ ) 的最终合成标准不确定度同各影响量不确定度的关系。

#### (1) 黑体腔吸收比的不确定度

辐射热流计的探测器属于锥腔型接收器, 其内表面的黑漆涂层对光谱辐射的所有波长响应是中性的。黑体腔吸收比与其形状和涂层的吸收率有关, 吸收比的准确测量将提高测量结果的准确性<sup>[15]</sup>。

搭建如图 3 所示的光路, 通过氦氖激光器、起偏器、功率稳定器获得稳定的出射光源, 经过会聚透镜使光束入射至积分球入射口中心。入射光经过样品区的黑体腔或者标准白板反射, 在积分球出口被硅探测器转化为感应信号, 使用安捷

$$u_i(x) = \frac{u(x)}{\bar{x}}. \quad (7)$$

测量结果的不确定度用合成标准不确定度 ( $u_c$ ) 表示, 计算公式为:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 (u_{x_i})^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq N} \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \rho_{ij} u_{x_i} u_{x_j}}. \quad (8)$$

由式 (5) 可知, 该定标模型共包含 9 个自变量, 各自变量之间相互独立, 将含有若干测量分量的被测合成标准不确定度的公式可表示为:

伦 6 位半数字多用表测量信号电压, 通过控制精度为 0.01 mm 的一维位移导轨移动样品区, 调整零位, 测量黑体腔水平方向和垂直方向  $\pm 3$  mm 内的吸收率。采集系统每 1 s 采样一次, 连续采样 180 s。吸收比测量结果如表 1 所示, 入射位置偏差测量结果如图 4 所示。

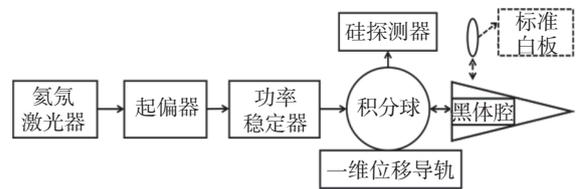


图 3 吸收比测试光路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of optical path for absorbance measurement

表 1 吸收比测量结果

Tab. 1 Measurement results of absorbance

黑体腔信号电压 $U_C/V$		白板信号电压 $U_S/V$		背景信号电压 $U_B/V$		白板反射率 $\rho_S$	
均值	不确定度	均值	不确定度	均值	不确定度	均值	不确定度
0.03753	$4 \times 10^{-5}$	8.87058	$1.284 \times 10^{-4}$	0.02479	$4 \times 10^{-5}$	0.95	0.05

测量数据通过式 (8) 计算黑体腔的吸收比。

$$\alpha = 1 - \frac{U_C - U_B}{U_S - U_B} \times \rho_S, \quad (10)$$

式中  $U_C$  为黑体腔信号电压,  $U_S$  为标准白板信

号电压,  $U_B$  为背景信号电压,  $\rho_S$  为标准白板的反射比。

由式 (8) 和式 (10) 可得, 黑体腔吸收比的合成不确定度为:

$$u(F_{\text{absor}_t}) = \sqrt{\left( \frac{\partial \alpha}{\partial U_C} \right)^2 u^2(U_C) + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial U_S} \right)^2 u^2(U_S) + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial U_B} \right)^2 u^2(U_B) + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial \rho_S} \right)^2 u^2(\rho_S)}. \quad (11)$$

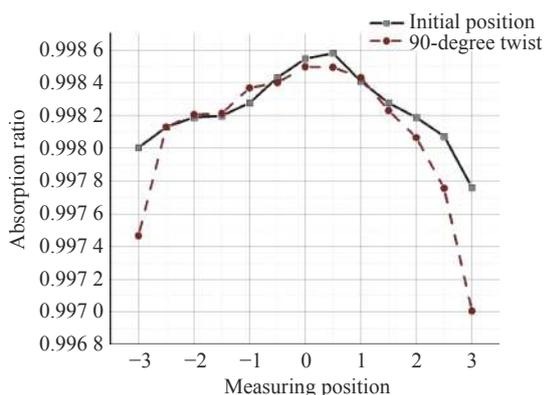


图 4 黑体腔入射位置偏差测量结果

Fig. 4 Results of the black body cavity absorptance measurement

根据不确定度分量和式 (11) 计算得到黑体腔吸收比测量的不确定度  $u(F_{\text{absor}_t})=7.23 \times 10^{-5}$ 。

黑体腔入射位置偏差如图 4 所示。

计算黑体腔入射位置各点的不确定度得到  $u(F_{\text{absor}_s})=0.000344$ 。黑体腔吸收率测量的合成不确定度为:

$$u(F_{\text{absor}}) = \sqrt{u^2(F_{\text{absor}_s}) + u^2(F_{\text{absor}_t})} = 0.000351$$

#### (2) 主光阑面积的不确定度

量热型辐射热流计需要精密光阑实现辐射功率向热流密度的转换, 所以光阑面积量的准确与否直接影响测量结果的准确性。

采用万能工具显微镜对主光阑进行 4 次直径测量, 每次测量对应主光阑一个不同的方向, 计算获得光阑的面积  $A$ 。测量结果如表 2 所示。

由主光阑面积计算公式, 得光阑面积测量不确定度计算公式。

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2, \quad (12)$$

$$u(A_i) = \frac{\pi \cdot D}{2} u(D_i) \quad (13)$$

测量主光阑的直径  $D$  时的不确定度包括: 测量重复性带来的不确定度分量  $u(D_s)$ 、温度稳定性带来的不确定度分量  $u(D_T)$ 、圆度不确定度  $u(D_r)$  和万能工具显微镜的传递不确定度  $u(D_m)$ 。

表 2 光阑直径测量结果

Tab. 2 Measurement results of the aperture's diameter

项目	$D/\text{mm}$
方向1	2.220
方向2	2.221
方向3	2.219
方向4	2.220
均值	2.220

因为各不确定度分量相互独立, 由式 (8) 计算得  $u(A)=9.01 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ , 光阑面积的相对不确定度  $u_r(A)=0.233\%$ 。

#### (3) 加热电压采样值的不确定度

加热电压采样值的相对不确定度  $u(U_i)$  包括 A 类不确定度和 B 类不确定度, 其中 B 类不确定度包括采样变换器 AD676 测量分辨率的不确定度  $u(AD_r)$ , 基准电压测量仪器 34401A 的传递不确定度  $u(Vref_m)$ , 标准电压源芯片 AD586 的稳定度  $u(Verf_r)$ , A 类不确定度包括的加热电压采样值重复性  $u(AD_s)$ , 基准电压测量重复性  $u(Verf_s)$ 。测量结果如表 3 所示。

表 3 加热电压采样值的不确定度

Tab. 3 Uncertainty of the sampling value of the heating voltage

加热电压	$u(AD_r)/\text{V}$	$u(Vref_m)/\text{V}$	$u(Verf_r)/\text{V}$	$u(AD_s)/\text{V}$	$u(Verf_s)/\text{V}$	均值/ $\text{V}$	$u(U)/\text{V}$	$u_r(U)/\text{V}$
第一阶段	0.0001635	$5 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	0.000542	$4.5571 \times 10^{-6}$	0.69	0.000566	0.082%
第二阶段	0.0001635	$5 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	0.000438	$4.5571 \times 10^{-6}$	2.19	0.000468	0.021%

#### (4) 加热电阻阻值的不确定度

采用四线法测量加热电阻阻值, 利用已检定的安捷伦 6 位半数字万用表 34401A 对信号进行采集, 采样结果的平均值作为加热丝电阻阻值。加热丝电阻的测量不确定度  $u(R)$  包括数字表测量分辨率带来的不确定度  $u(R_m)$ , 测量重复性带来

的不确定度  $u(R_s)$ , 测量结果如表 4 所示, 其中,  $u_r(R)$  代表相对不确定度。

表 4 加热丝电阻的不确定度

Tab. 4 Uncertainty of resistance of the heating wire

$u(R_m)/\Omega$	$u(R_s)/\Omega$	均值/ $\Omega$	$u(R)/\Omega$	$u_r(R)/\Omega$
0.000015	0.00314	477.8	0.00314	0.00066%

(5) 热电采样码值的不确定度

$M_{statei}$ 、 $M_{statei+1}$  为自定标阶段平衡的热电读数。其相对不确定度分别取各测量阶段最后稳定值的 16 个热电采样码值, 计算其测量不确定度。 $M_{text}$  为测光源稳定时的热电读数, 采集稳定后热电采样码值。测试结果如表 5 所示。

表 5 热电采样码值的不确定度

Tab. 5 Uncertainty of the thermoelectric sampling code value

	$M_{statei}$	$M_{statei+1}$	$M_{text}$
均值	172.1429	1731.18	513.9392
标准不确定度	0.15498	0.24591	0.0017
相对不确定度	0.09%	0.014%	0.003%

(6) 衍射效应

光学仪器的光阑都使光产生衍射, 光阑孔径越小, 衍射越大, 用实验来测定衍射校正很困难, 故采用理论计算的方法推导出衍射效应<sup>[18]</sup>。

表 6 衍射参数定义

Tab. 6 Diffraction parameter definitions

$r/mm$	$d_s/mm$	$r_d/mm$	$d_d/mm$	$R/mm$	$v_0$	$\sigma$	$u$	$v$	$v_s$	$v_d$
175	100	4	2	1	$\text{Max}(v_s, v_d)$	$\frac{\text{Min}(v_s, v_d)}{\text{Max}(v_s, v_d)}$	$u = \frac{2\pi R^2}{\lambda} \left( \frac{1}{d_d} - \frac{1}{d_s} \right)$	$v_0(1 + \sigma x)$	$\frac{2\pi R r_s}{\lambda d_s}$	$v_d = \frac{2\pi R r_d}{\lambda d_d}$

在测量热流源时, 辐射热流计的主光阑属于限制光阑, 其主光阑会影响光源到探测器的几何传输路径, 其存在会使探测器接收到的辐射通量偏小, 利用渐进积分方法对辐射热流计的衍射效应进行计算。

几何光路被阻碍的条件下的衍射效应计算公式为:

$$\Phi_F = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \left\{ (1-x^2) [(2+\sigma^2) - \sigma^2 x^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \frac{L(u, v_0, (1+\sigma x))}{1+\sigma x} dx, \quad (14)$$

$$\Phi_G = \frac{\pi^2 r_s^2 r_d^2 L(\lambda)}{v_m^2 (d_s + d_d)^2}, \quad (15)$$

总衍射效率即为:

$$F = \frac{\Phi_F}{\Phi_G}. \quad (16)$$

通过 Matlab 编写相应的程序, 输入参数, 计算得衍射效应为 0.99995。

结合式 (9) 将以上 9 项参数的不确定度进行合成, 计算得合成不确定度为 1.99 W/m<sup>2</sup>, 相对合

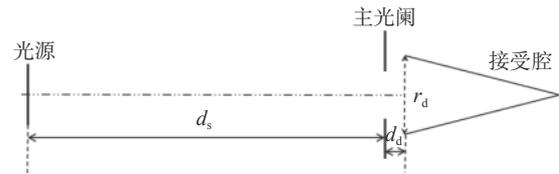


图 5 热流计衍射效应示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the diffraction effect on the heat-flux meter

辐射热流计的衍射效应只与光源 (Source)、光阑 (Aperture)、探测器 (Detector) 这 3 个元素结构有关 (示意图见图 5), 当热流计测量待测热流源时, 将其光源看作朗博扩展光源来计算其衍射效应, 在这三元素结构基础上对衍射效应进行分析, 统称为 SAD 问题。SAD 结构包含 5 个主要参数: 光源半径  $r$ , 光源与光阑的距离  $d_s$ , 探测器的半径  $r_d$ , 探测器与光阑的距离  $d_d$ , 光阑半径  $R$ 。根据光源亮度和 SAD 结构模型中的 5 个参数求解衍射效应。引入 3 个参数, 见表 6, 其中  $v_s$  表示光源对光阑的张角,  $v_d$  表示探测器对光阑的张角。

成不确定度约为 0.26%。

3.2 直接比对

3.2.1 与标准探测器比对

为验证不确定度分析结果的有效性, 将辐射热流计样机与可溯源至中国计量科学院基准的标准探测器进行了比对。辐射热流计与标准探测器进行功率比对, 但辐射热流计的测量目标为热流密度, 需将光阑面积与衍射效应的不确定度在测量结果中进行修正。测试光路图如图 6。

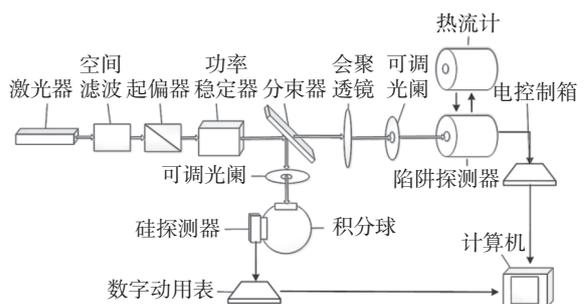


图 6 测试光路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the testing optical path

### 3.2.2 实验结果

标准探测器采用由中国计量科学院检定的陷阱探测器作为溯源基准, 辐射热流计通过与陷阱探测器的直接比对来验证不确定度分析的有效性, 实验流程为:

(1) 使用氦氖激光器发射波长为 632.8 nm 的激光光束, 通过起偏器增强光的偏振度并入射至功率稳定器, 输出稳定的激光光束。

(2) 光束通过分束镜分光, 反射 8% 的光入射积分球被硅探测器接受, 监视光源的稳定性; 透过 92% 光的重复性在 0.03% 以内, 光束经过透镜将光斑直径汇聚至 2 mm 以内, 通过可调光阑来遮挡环境中的杂散光, 使光束完全入射至标准探测器中, 由皮安表采集电流数据。

(3) 将标准探测器替换为热流计, 通过电控制箱对热流计接收到的信号进行采集。

依据《JJF 1117-2010 计量比对》, 用归一化偏差  $E_n$  评定间接比对结果,  $E_n$  为:

$$E_n = \frac{Y_1 - Y_2}{ku} \quad (17)$$

式中  $Y_1$ 、 $Y_2$  分别为标准探测器、待检辐射热流计的功率测量结果,  $k$  为覆盖因子,  $u$  为  $Y_1$ 、 $Y_2$  的合成不确定度。

在 1 mW 功率下, 标准探测器的标准不确定度为 0.0003 mW, 辐射热流计的标准不确定度为 0.0077 mW; 辐射热流计的功率测试结果为 0.9797 mW, 如表 7 所示, 由中国计量科学院所标定的陷阱探测器功率测量结果均值为 0.9889 mW,  $k$  取 2 时, 由式 (17) 计算得  $E_n=0.60$ 。依据《JJF 1117-2010 计量比对》, 归一化偏差的绝对值小于 1, 说明辐射热流计测量不确定度的评估结果是有效的。

表 7 功率测试结果

Tab. 7 Test results of power

测量次数	辐射热流计样机功率 测量结果/mW	标准探测器功率 测量结果/mW
1	0.98081	0.98886
2	0.98070	0.98889
3	0.98012	0.98885
4	0.98006	0.98887
5	0.97908	0.98890
6	0.97942	0.98893

续表 7

测量次数	辐射热流计样机功率 测量结果/mW	标准探测器功率 测量结果/mW
7	0.97931	0.98890
8	0.98024	0.98891
9	0.97977	0.98891
10	0.97884	0.98891
11	0.97931	0.98890
12	0.97832	0.98890
均值	0.97967	0.98889

## 4 讨论

在辐射热流计与标准探测器的比对中, 本文进行的是功率单位的比对。而辐射热流计的测量目标是热流密度, 单位为  $W/m^2$ , 标准探测器的测量目标是功率单位, 辐射热流计的主光阑会影响比对实验的结果。辐射热流计主光阑带来的面积不确定度和衍射效应不确定度在“3.1.2”节中已进行叙述, 相对不确定度分别为 0.147% 和 0.005%, 其影响量级对于最终指标—相对不确定度 0.5% 可忽略不计, 因此比对的测试结果是有效的。

## 5 结论

为满足实验室环境下辐射热流的高精度定标要求, 采用自校准方法确定热流计的性能, 介绍了辐射热流测量系统的构成和工作原理。分析了热流计自校准过程中 9 项影响量的测量不确定度和合成不确定度, 并与标准探测器进行了直接比对。在比对实验中, 辐射热流计的测量目标是热流密度, 单位为  $W/m^2$ , 标准探测器的测量目标是功率单位, 但辐射热流计的主光阑带来的面积误差与衍射效应误差量级较小, 不影响辐射热流计与标准探测器的比对结果, 因此比对测试的结果是有效的。实验结果表明: 该型热流计的相对不确定度优于 0.26%, 与标准探测器的归一化偏差为 0.60, 验证了不确定度评估结果的有效性。在与标准探测器比对中, 存在热流计的测量结果归一化偏差超过 1 的情况, 据分析辐射热流计的接收探测器对环境温度较为敏感, 在优化设计中可加厚热流计的外壳或通入稳定的水冷系统, 从而

降低环境对热流计的影响,可进一步提高其测量准确度。本文对辐射热流计高精度的定标方法进行了具体研究,实验的结果和分析对我国热流测量技术的发展有着重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 孙培杰,王东保,杨帆,等. 运载高空发动机喷流热环境分析及飞行验证[J]. *上海航天*, 2016, 33(S1): 23-28.  
SUN P J, WANG D B, YANG F, *et al.*. Numerical simulation and flight test validation of a launch vehicle altitude engine exhaust plume base heating[J]. *Aerospace Shanghai*, 2016, 33(S1): 23-28. (in Chinese)
- [2] ZHOU K B, LIU N A, ZHANG L H, *et al.*. Thermal radiation from fire whirls: revised solid flame model[J]. *Fire Technology*, 2014, 50(6): 1573-1587.
- [3] 余晓娅,刘立拓,李瑞,等. 高超声速再入试验的辐射光谱定量测量[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 87-94.  
YU X Y, LIU L T, LI R, *et al.*. Measurements of absolute radiative emissions for supersonic reentry[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 87-94. (in Chinese)
- [4] 闫绍江,沈丹,吴彦森,等. 多喷管运载火箭底部热环境研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 2021(1): 105-109,114.  
YAN ZH J, SHEN D, WU Y S, *et al.*. Research on the base heating environment of a multi-nozzle heavy launch vehicle[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2021(1): 105-109,114. (in Chinese)
- [5] 绳春晨,胡芄,程晓舫,等. 保护法瞬态辐射热流计原理及瞬态响应特性[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(4): 1092-1906.  
SHENG CH CH, HU P, CHENG X F, *et al.*. Principle and transient response characteristics of protection transient radiant heat flux meter[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(4): 1092-1906. (in Chinese)
- [6] GIFFORD A R, HUBBLE D O, PULLINS C A, *et al.*. Durable heat flux sensor for extreme temperature and heat flux environments[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2010, 24(1): 69-76.
- [7] 高庆华,郝殿福. 热流测量技术发展综述[J]. *航天器环境工程*, 2020, 37(3): 218-227.  
GAO Q H, QIE D F. The development of heat flux measurement technology[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(3): 218-227. (in Chinese)
- [8] MURTHY A V, TSAI B K, GIBSON C E. Calibration of high heat flux sensors at NIST[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1997, 102(4): 479-488.
- [9] 张磊,谢贤忱,吴勇,等. 激光吸收涂层性能研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 560-565.  
ZHANG L, XIE X CH, WU Y, *et al.*. Performance studies on laser absorbing coating[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 560-565. (in Chinese)
- [10] 田玉坤,何钦华,吴江,等. Gardon式热流传感器测试误差分析[J]. *强度与环境*, 2019, 46(2): 48-55.  
TIAN Y K, HE Q H, WU J, *et al.*. Test error analysis of Gardon heat flux gauges[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2019, 46(2): 48-55. (in Chinese)
- [11] 李建玉,刘庆,徐文清,等. 用于多波段激光大气透过率测量的太阳辐射计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 261-270.  
LI J Y, LIU Q, XU W Q, *et al.*. Solar radiometer for measurement of multi-waveband laser atmospheric transmittance[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 261-270. (in Chinese)
- [12] SHARKOV A V, KORABLEV V A, NEKRASOV A S, *et al.*. A radiometer for measuring high-intensity heat flux density and a method of calibrating it[J]. *Measurement Techniques*, 2012, 54(11): 1276-1279.
- [13] PULLINS C A. *High temperature heat flux measurement: sensor design, calibration, and applications*[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2011.
- [14] 杨滨赫,蔡引娣,文志祥,等. 长距离激光测量中光束漂移的自动补偿[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(11): 2393-2402.  
YANG B H, CAI Y D, WEN ZH X, *et al.*. Automatic compensation method for beam drift in long-distance laser measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(11): 2393-2402. (in Chinese)
- [15] 衣小龙,杨振岭,叶新,等. 低温辐射计斜底腔吸收比测量[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 2733-2739.  
YI X L, YANG ZH L, YE X, *et al.*. Absorptance measurement for sloping bottom cavity of cryogenic radiometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 2733-2739. (in Chinese)
- [16] 衣小龙,方伟,林延东,等. 空间低温绝对辐射初级基准实验特性及测量精度评估[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 10-20.  
YI X L, FANG W, LIN Y D, *et al.*. Experimental characteristics and measurement accuracy evaluation of space

- cryogenic absolute radiometric primary benchmark[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(1): 10-20. (in Chinese)
- [17] 高帅, 李元, 白廷柱, 等. 交叉定标中的不确定度分析及定标系数计算改进[J]. *中国光学*, 2020, 13(3): 568-576.  
GAO SH, LI Y, BAI Y ZH, *et al.*. Uncertainty analysis in cross-calibration and optimization calculation of calibration coefficients[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 568-576. (in Chinese)
- [18] 刘国栋, 方伟, 宋宝奇, 等. 太阳辐射计的衍射效应修正[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 851-859.  
LIU G D, FANG W, SONG B Q, *et al.*. Diffraction effect correction of solar radiometer[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 851-859. (in Chinese)

#### 作者简介:



郑翔远(1998—), 男, 吉林延边人, 硕士研究生, 2016年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事辐射计量等方面的研究。E-mail: 574611745@qq.com



叶新(1979—), 男, 吉林省吉林市人, 研究员, 博士, 2005年于中国科学技术大学获得硕士学位, 2019年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事星上辐射定标、太阳总辐照度测量方面的研究。E-mail: yexin@ciomp.ac.cn