

高倍汇聚辐射光斑能流分布测量方法研究

魏秀东 赵宇航 张亚南 许英朝

A flux measurement for high-magnification convergent radiation spots

WEI Xiu-dong, ZHAO Yu-hang, ZHANG Ya-nan, XU Ying-chao

引用本文:

魏秀东, 赵宇航, 张亚南, 许英朝. 高倍汇聚辐射光斑能流分布测量方法研究[J]. *中国光学*, 2023, 16(3): 620–626. doi: 10.37188/CO.2022–0139

WEI Xiu-dong, ZHAO Yu-hang, ZHANG Ya-nan, XU Ying-chao. A flux measurement for high-magnification convergent radiation spots[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 620-626. doi: 10.37188/CO.2022-0139

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0139>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于红外辐射特性系统实现对面目标测量

Opposite target measurement based on infrared radiation characteristic system

中国光学 (中英文). 2018, 11(5): 804 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0804>

紫铜粗糙表面的光谱双向反射分布函数测量研究

A study on the spectral BRDF measurement of red copper rough surfaces

中国光学 (中英文). 2019, 12(6): 1385 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1385>

TDLAS直接吸收法测量CO₂的基线选择方法

Selection of baseline method in TDLAS direct absorption CO₂ measurement

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 455 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0455>

太赫兹偏振测量系统及其应用

Polarization sensitive terahertz measurements and applications

中国光学 (中英文). 2017, 10(1): 98 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0098>

亚微牛级推力测量系统设计及实验研究

Design and experimental study of sub-micro-scale thrust measurement systems

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 526 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0526>

基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统

Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating

中国光学 (中英文). 2017, 10(1): 39 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0039>

文章编号 2097-1842(2023)03-0620-07

高倍汇聚辐射光斑能流分布测量方法研究

魏秀东^{1*}, 赵宇航¹, 张亚南², 许英朝³

- (1. 长春理工大学 空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022;
2. 中国广核新能源控股有限公司, 北京 100000;
3. 厦门理工学院 光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要:本文提出了一种高倍汇聚辐射光斑能流分布测量新方法,采用辐射能流传感器测量光斑不同位置的能流密度,通过多项式拟合光斑不同位置的灰度与能流密度标定曲线,最终获得辐射光斑的能流分布,并详细阐述了辐射光斑能流分布的测量原理。为了验证测量方法的准确性和可行性,进行了高倍汇聚辐射光斑能流分布测量实验,并与辐射能流传感器测量结果进行比较。结果表明:该测量方法的测量结果与辐射能流传感器的直接测量结果一致,测量偏差小于0.54%,通过分析得出该测量方法的测量不确定度为4.35%,测量准确度较传统测量方法有所提高,满足实际应用需求。

关键词:测量系统;辐射光斑;能流分布;摄影测量法;能流密度

中图分类号:TK313;TK519

文献标志码:A

doi:10.37188/CO.2022-0139

A flux measurement for high-magnification convergent radiation spots

WEI Xiu-dong^{1*}, ZHAO Yu-hang¹, ZHANG Ya-nan², XU Ying-chao³

- (1. *Institute of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*
2. *CGN New Energy Holdings Co., Ltd., Beijing 100000, China;*
3. *School of Optoelectronics and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China*)

* *Corresponding author, E-mail: weixiudong211@163.com*

Abstract: A new method for measuring the flux distribution of a high-magnification convergent radiation spot is proposed. A radiation flux sensor is used to measure the flux density at different positions of the spot, and the calibration curve of the grayscale and flux density at different positions of the spot is fitted by a polynomial, and finally the flux distribution of the radiation spot is obtained and its principle is also elaborated. In order to verify the accuracy and feasibility of the measurement method, a high-magnification convergent radiation spot flux distribution measurement experiment is carried out, and the results are compared with the direct measurement results from the radiant flux sensor. The results show that the measurement results of the proposed method are consistent with the direct measurement results, and the average deviation is less than

收稿日期:2022-06-21; 修订日期:2022-07-05

基金项目:福建省自然科学基金面上项目(No. 2019J01876)

Supported by Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2019J01876)

0.54%。Through analysis, the measurement uncertainty of this measurement method is 4.35%, and the measurement accuracy is higher than the traditional measurement method. The experimental results indicate that the proposed method can meet the needs of practical applications.

Key words: measurement system; radiation spot; flux distribution; photogrammetry; flux density

1 引言

在太阳能热发电、热化学等研究领域,通常需要利用高倍汇聚的太阳辐射光斑作为高温热源。聚焦太阳能模拟器^[1-5]可以提供稳定的、辐射功率和能流密度均可调的聚焦太阳光斑,因此广泛应用于太阳能热利用等相关实验研究。聚焦太阳能模拟器通过椭球面聚光镜将位于第一焦点处的光源发出的光,汇聚到第二焦点所在的焦平面上,从而产生聚焦的太阳模拟光斑。为了获得模拟聚焦太阳光斑的光学特性,需要对高倍汇聚辐射光斑能流分布进行测量。

聚焦光斑辐射能流分布测量方法主要分为直接测量法和间接测量法^[6-14]。直接测量法是直接使用能流传感器测量光斑不同位置的辐射能流密度,通过数据拟合获得光斑的辐射能流分布、辐射功率以及光斑均匀性等参数。例如 Kuhn 等人^[11]采用直接测量方法测量一台 20 kW 的太阳模拟器,测得辐射能流峰值达到 16 000 kW/m², 70 mm 光斑直径内的辐射功率达到 3 kW; Zhu 等人^[9]使用辐射能流传感器测量了一台 130 kW 的太阳模拟器的辐射能流分布,在直径 200 mm 内的平均辐射能流密度为 1.054 MW/m²,辐射能流密度峰值为 11.267 MW/m²; Du 等人^[14]测量了一台 42 kW 的太阳模拟器,在光斑直径为 50 mm 的光斑内达到了 2 500 kW/m² 的峰值通量和 3.75 kW 的辐射功率。直接测量法的测量结果主要取决于辐射能流传感器的测量精度^[15],目前辐射能流传感器的测量不确定度可以达到 3%^[13],因此采用直接测量法测量结果比较准确,但直接测量法的缺点是:辐射光斑的能流分布测量结果取决于采点数量,为了提高测量准确度,需要增加测量点的数量,导致测量效率较低。

间接测量法是采用相机拍照的方法对光斑辐射能流分布进行测量,先将被测光斑投射到朗伯靶上,用相机对光斑进行拍照,获得光斑的灰度分布,然后对光斑灰度与辐射能流密度的关系进行

标定,最终获得光斑的能流分布。Xiao J^[16]等人采用间接测量法对 42 kW 的聚焦太阳模拟器光斑进行测量,通过确定采样点的辐射能流密度与光斑灰度值的对应关系,获得单一的标定因子,并对整个光斑的灰度值进行标定,得到光斑灰度值对应的辐射能流密度值,最终获得光斑的辐射能流分布。测得光斑的辐射能流峰值可达到 (2.51±0.2) MW/m²,辐射功率可达到 (10.53±0.9) kW,通过不确定度分析得出辐射能流密度的测量不确定度为 8.1%,辐射功率的测量不确定度为 8.5%。Li Q^[17]等人提出采用单个水冷朗伯靶的间接测量方法,通过移动朗伯靶,使能流传感器处于光斑的中心位置,通过改变光斑的能流密度值,获得光斑不同能流分布下的能流密度值与灰度的对应关系,并通过最小二乘法得到光斑灰度与能流密度的标定因子,使用该标定因子对光斑灰度进行标定,最终获得光斑的辐射能流密度分布。该方法获得的标定因子是在不同光斑的能流密度下的平均值,有利于提高测量准确性。Li Q 等人使用该方法对一台聚焦太阳模拟器光斑进行测量,测得光斑的辐射能流峰值达到 7 833.4 kW/m²,辐射功率达到 7.84 kW,通过分析不确定度发现辐射能流密度的不确定度为 7.94%,辐射功率的不确定度为 7.96%^[7]。间接测量法可以有效提高光斑能流分布测量的空间分辨率,并能够提高测量效率,但在现有间接测量方法中,标定因子均为定值,通过确定单一的标定因子对整个光斑的灰度与能流密度进行标定,无法消除因 CCD 相机的非线性响应、朗伯靶表面反射率分布的非均匀性等因素造成的测量不确定度,因此测量不确定度较直接测量法要大。

本文提出了一种高倍汇聚辐射光斑能流分布测量的新方法,采用能流传感器测量光斑多个不同位置的能流密度值,通过多项式拟合获得光斑不同位置的灰度值与辐射能流密度的标定因子曲线,使用随光斑能流变化的标定因子对光斑灰度分布进行标定,最终获得光斑的辐射能流分布。该测量方法有利于减小因辐射能流密度分布及朗

伯靶表面温度分布不均匀造成的测量不确定度,从而提高了测量准确度。为了验证该测量方法的准确性和可行性,使用氙灯聚光系统搭建了实验测量平台,实验结果表明采用该测量法测量高倍汇聚的辐射光斑能流分布是完全可行的。

2 测量方法介绍

高倍汇聚辐射光斑能流分布测量系统主要由水冷朗伯靶、辐射能流传感器(戈登型)、CCD 相机、数据采集器、水冷系统、电动滑台、电机驱动控制器和计算机组成,如图 1 所示。

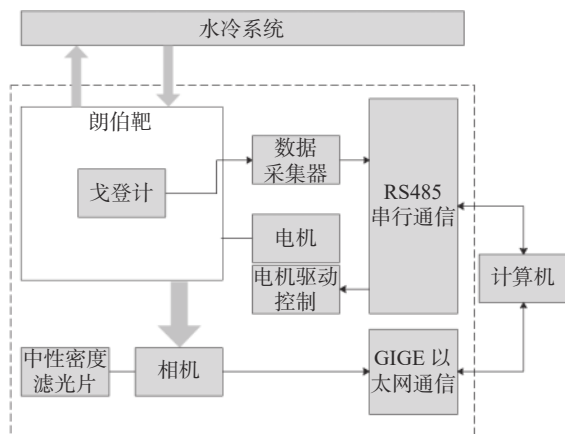


图 1 辐射光斑能流分布测量系统原理

Fig. 1 Measurement principle of radiation spot heat flux distribution

水冷朗伯靶表面喷涂耐高温的氧化铝涂层^[18],内部通过水冷来降低朗伯靶的温度,可接收能流密度高达 3 MW/m^2 以上的辐射光斑。水冷朗伯靶安装在电动滑台上,通过计算机远程控制电动滑台移动,实现朗伯靶的水平移动。能流传感器(辐射能流传感器)安装在水冷朗伯靶上,可测量的辐射能流密度达到 3 MW/m^2 ,测量不确定度为 3%^[19]。数据采集器用于采集辐射能流传感器输出的电压信号。CCD 相机用于拍摄光斑灰度,为了防止拍摄的光斑图像饱和,在相机镜头前安装中性衰减片。

高倍汇聚辐射光斑能流分布测量系统的测量过程如下:第一,在没有光斑投射的状态下,使用相机拍摄朗伯靶和环境光图像,获得因环境光及相机暗电流对光斑灰度的影响值 $P_{\text{dark},j}$,同时对朗伯靶的空间位置进行标定;第二,将聚焦辐射光斑投射到水冷朗伯靶上,使用相机拍摄朗伯靶上的

光斑图像;第三,控制电动滑台带动朗伯靶水平移动,使朗伯靶上安装的能流传感器扫描光斑,采集光斑上多个位置的能流密度值;第四,通过多项式拟合获得光斑不同位置灰度与辐射能流密度标定曲线,对光斑灰度分布进行标定,最终获得光斑的辐射能流分布。

在测量过程中,对光斑不同位置的灰度与辐射能流密度对应关系的标定尤为关键,直接影响测量准确性。本文通过测量光斑多个位置的辐射能流密度数据,对光斑不同位置的灰度进行标定,通过多项式拟合确定辐射能流密度与灰度值的标定曲线。测量光斑多个位置辐射能流密度的示意图如图 2 所示。

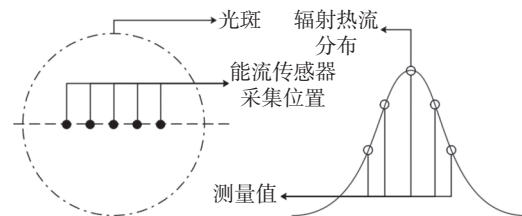


图 2 光斑多个位置辐射能流密度测量原理

Fig. 2 Measurement principle of radiation flux distribution of spot at different positions

采用辐射能流传感器测量光斑不同位置的辐射能流密度,因辐射能流传感器的测量范围为圆形区域,所测量的值是圆形区域内平均能流密度值,根据 Xiao J^[15]的计算方法,辐射能流传感器测量范围内对应的光斑平均灰度值 \bar{P}_i 可由下式计算:

$$\bar{P}_i = \sum_{j=1}^N (P_{\text{detector},j} - P_{\text{dark},j}) / N \quad (1)$$

式中, $P_{\text{detector},j}$ 为辐射能流传感器对应测量范围的灰度值, $P_{\text{dark},j}$ 为环境光的灰度值, N 为辐射能流传感器对应光斑位置的像素个数。分别测量光斑中 i 个位置的能流密度和灰度值,辐射能流密度与灰度值的比值为标定因子 k_i ,根据多个位置的标定因子拟合能流密度与灰度值的关系,计算公式如下:

$$\begin{cases} k_i = \frac{E_{\text{detector},i}}{\bar{P}_i} \\ K = a_n \times G^n + a_{n-1} \times G^{n-1} + \dots + a_0 \times G^0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $E_{\text{detector},i}$ 为辐射能流传感器的测量值, G 为

光斑的灰度值, a_n 为多项式拟合的参数, n 为拟合多项式的次数, K 为标定因子 k_i 的拟合多项式。

根据标定多项式 K 和光斑的灰度值, 计算光斑图像中每一个像素对应的辐射能流密度:

$$E_i = K \times G_i, \quad (3)$$

式中, E_i 为第 i 位置辐射能流密度值, G_i 为第 i 位置光斑的灰度值。

3 测量方法验证

为了验证高倍汇聚辐射光斑能流分布测量方法的准确性和可行性, 采用氙灯聚光系统搭建了实验测试平台, 如图3所示。氙灯聚光系统由非共轴椭球面聚光镜^[20]和球形短弧氙灯组成, 氙灯的电功率调节范围为 2.5~6 kW。氙灯的发光点位于聚光镜的第一焦点处, 氙灯发射的光通过聚光镜汇聚到第二焦点所在的焦平面处, 形成直径约 60 mm 的光斑。水冷朗伯靶安装于氙灯聚光系统的焦平面处, 辐射能流传感器安装在水冷朗伯靶中心位置, CCD 相机架设于氙灯聚光系统的上方, 镜头正对水冷朗伯靶。

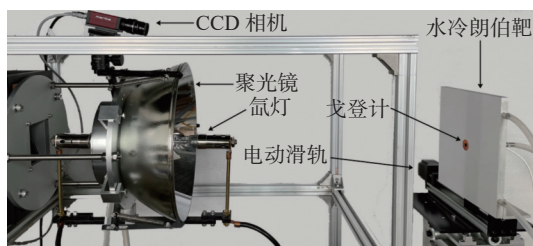


图3 6kW 氙灯聚光实验测试平台

Fig. 3 6kW xenon lamp spotlight experiment test platform

根据上文所述的测量步骤, 对氙灯聚光系统的光斑进行实验测量。第一步, 在氙灯关闭状态下拍摄朗伯靶图像, 以消除环境光及 CCD 相机暗电流对测量结果的影响; 第二步, 移动朗伯靶, 点亮氙灯, 将光斑投射在朗伯靶的空白位置, 并拍摄光斑灰度图像; 第三步, 移动朗伯靶, 使能流传感器扫描整个光斑, 使用数据采集器记录不同位置的能流密度值, 获得光斑 5 个不同位置的辐射能流密度; 第四步, 建立光斑灰度与能流密度的对应关系, 对光斑灰度进行标定, 获得光斑的能流分布。采用相机拍摄氙灯聚焦光斑的灰度图像如图4所示。

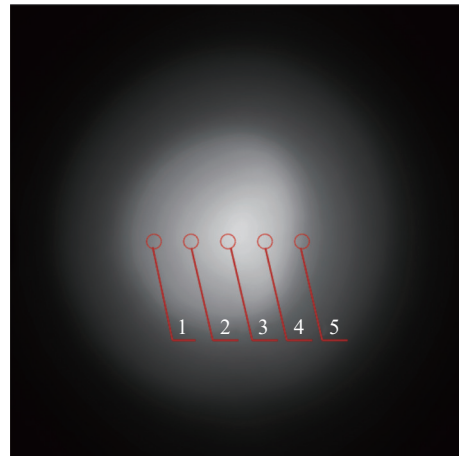


图4 氙灯聚集光斑的灰度图像

Fig. 4 Grayscale image of focused spot of xenon lamp

由于氙灯的位置偏离椭球面聚光镜的第一焦点, 导致光斑形状不是中心对称的。通过标定空间尺寸和像素个数的关系, 测量光斑的直径为 60 mm, 光斑直径 40 mm 内的能量占总能量的 80%, 根据不均匀度计算方法:

$$R(\%) = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{g_{\max} + g_{\min}} \times 100, \quad (4)$$

公式(4)中 R 为光斑的不均匀度, g_{\max} 为最大灰度值, g_{\min} 为最小灰度值, 直径 40 mm 内的不均匀度为 65.50%。采用辐射能流传感器测量光斑主要能量区域的辐射能流密度, 光斑图像中 5 个圆形区域为传感器测量区域, 5 个位置的平均辐射能流密度分别为 1 300.46、2 108.74、2 171.49、1 853.10、1 268.28 kW/m²。

为了与传统间接测量方法进行比较, 首先采用传统间接测量方法对光斑进行处理。在传统间接测量方法中, 标定因子为常数, 利用最小二乘法获得光斑灰度的标定因子 K , 计算方法如下:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{\text{detector},i} - \bar{E}_{\text{detector}})(\bar{P}_i - \bar{P})}{\sum_{i=1}^N (\bar{P}_i - \bar{P})^2}, \quad (5)$$

式中: N 、 \bar{P} 、 $\bar{E}_{\text{detector}}$ 分别是采样点个数、平均灰度值和平均能流密度, 由上可得, 光斑灰度的标定因子 $K=10.97$ (kW/m²), 采用该标定因子对光斑灰度分布进行标定, 获得辐射能流密度分布, 将该测量结果与辐射能流传感器的直接测量结果进行比较, 如图5所示。

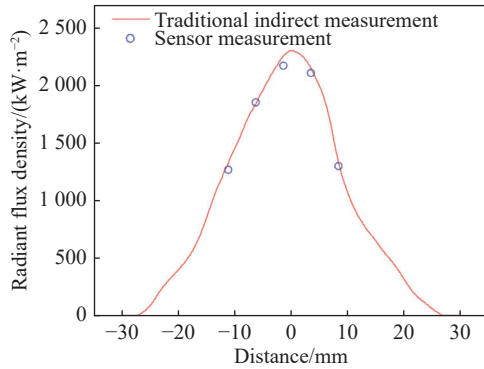


图 5 辐射能流传感器测量结果与传统间接测量结果比较
Fig. 5 Comparison of measurement results of radiant flux sensor with traditional indirect measurement results

由图 5 可见,采用传统间接测量方法与采用辐射能流传感器的直接测量方法的测量结果的相对偏差约为 3.27%。

根据式(2),对光斑 5 个不同位置的辐射能流密度及灰度进行标定因子计算,采用多项式拟合方法,对 5 个标定因子值进行多项式拟合,获得标定因子多项式 $K = -2.7534 \times 10^{-4}G^2 + 9.946 \times 10^{-2}G + 1.5524$ (kW/m²), 绘制标定因子多项式曲线,如图 6 所示。

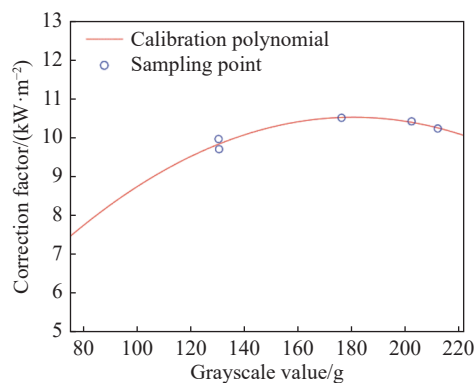


图 6 灰度值与标定因子的关系
Fig. 6 Relationship between gray and calibration factor

采用标定因子多项式对光斑灰度进行标定,最终获得光斑的辐射能流分布。将本文测量方法获得的测量结果与传统间接测量法及辐射能流传感器直接测量法的测量结果进行比较,如图 7、图 8(彩图见期刊电子版)所示。可见本文测量方法的测量结果与辐射能流传感器的直接测量结果更吻合,测量结果的相对偏差在 0.54% 以内。采用辐射能流传感器的直接测量方法的测量准确性最高,新测量方法较传统间接测量方法的测量准确性更高。

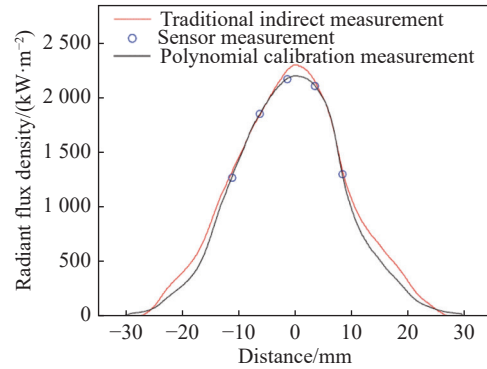


图 7 传统间接测量结果、辐射能流传感器直接测量结果和多项式标定测量结果比较
Fig. 7 Comparison of traditional indirect measurement, direct measurement and polynomial calibration measurement results

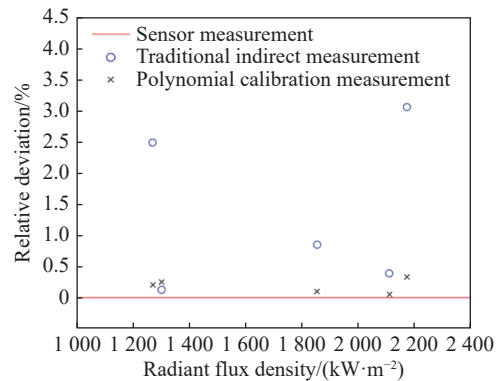


图 8 测量结果相对偏差
Fig. 8 Relative deviation of measurement results

4 不确定度分析

高倍汇聚辐射光斑能流分布测量新方法的测量不确定度主要由图像灰度不确定度、辐射能流传感器测量不确定度、标定因子不确定度、像素不确定度等^[21-22]决定。图像灰度不确定度是指光斑能流分布与相机拍摄图像的灰度分布的线性对应关系,主要受 CCD 相机的非线性、朗伯靶漫反射率的不均匀性影响,根据 Li Q 等人^[17]的计算方法,图像灰度不确定度 δ_g 为 2.4%。在本文测量方法中,图形灰度不确定度得到有效抑制。

采用黑体炉作为标准能流对辐射能流传感器进行校准^[23],校准后辐射能流传感器的测量不确定度 δ_{Gardon} 为 3%^[13],辐射能流传感器的输出电压与能流密度具有良好的线性关系,图 9 为戈登型辐射能流传感器的校准结果。

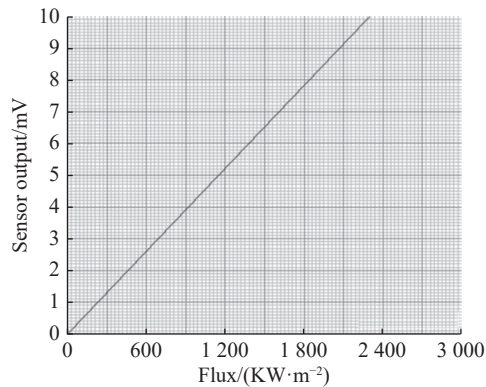


图9 辐射能流传感器校准结果

Fig. 9 Calibration results of radiation flux sensor

在图像处理过程中,在获取辐射能流传感器图像边缘和光斑图像边缘时,存在一定的像素不确定度,导致辐射能流传感器探测面积计算存在不确定度。对朗伯靶图像进行图像处理,获得辐射能流传感器的像素个数为 842 ± 25 , 不确定度 δ_N 为 2.97%。

通过公式(2)计算灰度值与辐射能流密度的标定多项式 K 。标定因子不确定度 δ_k 由图形采集灰度不确定度 δ_g 、辐射能流传感器的测量不确定度 δ_{Gardon} 和辐射能流传感器的图像处理不确定度 δ_N 引起的,通过最小二乘法将光斑的灰度值拟合为辐射能流密度,5次采样点的拟合辐射能流密度为 2 171.49、2 241.70、2 221.40、2 205.10、2 153.60 kW/m², 不确定度计算方法:

$$\delta_g = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 / (n(n-1))} \quad (6)$$

式中 n 为测量次数, E_i 为辐射能流密度值, \bar{E} 为平均能流密度值, 因此灰度不确定度 δ_g 为 0.73%, 因为各不确定度之间不相关, 标定因子不确定度

参考文献:

- [1] SARWAR J, GEORGAKIS G, LACHANCE R, *et al.*. Description and characterization of an adjustable flux solar simulator for solar thermal, thermochemical and photovoltaic applications[J]. *Solar Energy*, 2014, 100: 179-194.
- [2] ERICKSON B M. *Characterization of the University of Florida solar simulator and an inverse solution for identifying intensity distributions from multiple flux maps in concentrating solar applications*[D]. Gainesville: University of Florida, 2012.
- [3] KRUEGER K R, LIPÍŃSKI W, DAVIDSON J H. Operational performance of the University of Minnesota 45 kW_e high-flux solar simulator[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2013, 135(4): 044501.
- [4] KRUEGER K R. *Design and characterization of a concentrating solar simulator*[D]. Minnesota: The University of Minnesota, 2012.
- [5] LI J, GONZALEZ-AGUILAR J, PÉREZ-RÁBAGO C, *et al.*. Optical analysis of a hexagonal 42kW_e high-flux solar simulator[J]. *Energy Procedia*, 2014, 57: 590-596.

计算公式如下:

$$\delta_k = \sqrt{\delta_g^2 + \delta_{\text{Gardon}}^2 + \delta_N^2} \quad (7)$$

由式(7)计算的标定因子不确定度 δ_k 为 4.28%。根据公式(3)计算光斑的辐射能流密度, 辐射能流密度的不确定度包括标定因子不确定度 δ_k 与图像采集灰度值不确定度 δ_g , 因此辐射能流密度测量不确定度 δ_q 的计算公式如下:

$$\delta_q = \sqrt{\delta_k^2 + \delta_g^2} \quad (8)$$

通过多项式标定, 间接测量的辐射能流密度与辐射能流传感器测量的辐射能流密度保持一致, 影响辐射能流密度测量的图像灰度不确定度 δ_g 已通过多项式标定的方法进行校正, 因此辐射能流密度的测量不确定度为 4.35%。

5 结 论

本文提出了一种高倍汇聚辐射光斑能流分布测量的新方法, 该方法采用辐射能流传感器测量光斑多个不同位置的能流密度值, 计算得到多个灰度与能流密度标定因子, 再利用多项式拟合方法获得变化的标定因子曲线, 使用变化的标定因子对光斑灰度分布进行标定, 最终获得光斑的辐射能流分布。搭建了氙灯聚光系统实验平台, 对该方法的测量准确性和可行性进行了验证, 对该方法的测量不确定度进行了分析, 结果表明: 采用多项式拟合标定因子的测量方法与辐射能流传感器直接测量方法的测量结果相对偏差在 0.54% 以内, 经过理论不确定度分析得出, 测量光斑能流密度的不确定度为 4.35%, 与传统间接测量方法相比, 有效提高了测量的准确度。

- [6] GILL R, BUSH E, HAUETER P, *et al.*. Characterization of a 6 kW high-flux solar simulator with an array of xenon arc lamps capable of concentrations of nearly 5000 suns[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(12): 125107.
- [7] XU J L, TANG CH, CHENG Y P, *et al.*. Design, construction, and characterization of an adjustable 70 kW high-flux solar simulator[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2016, 138(4): 041010.
- [8] LI X, CHEN J L, LIPÍŃSKI W, *et al.*. A 28 kW_e multi-source high-flux solar simulator: design, characterization, and modeling[J]. *Solar Energy*, 2020, 211: 569-583.
- [9] ZHU Q B, XUAN Y M, LIU X L, *et al.*. A 130 kW_e solar simulator with tunable ultra-high flux and characterization using direct multiple lamps mapping[J]. *Applied Energy*, 2020, 270: 115165.
- [10] LEVÊQUE G, BADER R, LIPÍŃSKI W, *et al.*. Experimental and numerical characterization of a new 45 kW_e multisource high-flux solar simulator[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): A1360-A1373.
- [11] KUHN P, HUNT A. A new solar simulator to study high temperature solid-state reactions with highly concentrated radiation[J]. *Solar Energy Materials*, 1991, 24(1-2): 742-750.
- [12] WANG W J, AICHMAYER L, GARRIDO J, *et al.*. Development of a Fresnel lens based high-flux solar simulator[J]. *Solar Energy*, 2017, 144: 436-444.
- [13] ABUSEADA M, OPHOFF C, OZALP N. Characterization of a new 10 kW_e high flux solar simulator via indirect radiation mapping technique[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2019, 141(2): 021005.
- [14] DU SH, XIA T, HE Y L, *et al.*. Experiment and optimization study on the radial graded porous volumetric solar receiver matching non-uniform solar flux distribution[J]. *Applied Energy*, 2020, 275: 115343.
- [15] 郑翔远, 叶新, 罗志涛, 等. 高精度辐射热流计的不确定度分析与评价[J]. *中国光学 (中英文)*, 2022, 15(4): 780-788. ZHENG X Y, YE X, LUO ZH T, *et al.*. Uncertainty analysis and evaluation of a high-precision radiative heat-flux meter[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 780-788. (in Chinese)
- [16] XIAO J, YANG H Q, WEI X D, *et al.*. A novel flux mapping system for high-flux solar simulators based on the indirect method[J]. *Solar Energy*, 2019, 179: 89-98.
- [17] LI Q, WANG J K, QIU Y, *et al.*. A modified indirect flux mapping system for high-flux solar simulators[J]. *Energy*, 2021, 235: 121311.
- [18] 朱锦鹏, 马壮, 高丽红, 等. 基于等离子喷涂的反射型激光防护涂层研究[J]. *中国光学*, 2017, 10(5): 578-587. ZHU J P, MA ZH, GAO L H, *et al.*. Reflective laser protective coating based on plasma spraying[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 578-587. (in Chinese)
- [19] BALLESTRÍN J, ESTRADA C A, RODRÍGUEZ-ALONSO M, *et al.*. Heat flux sensors: calorimeters or radiometers?[J]. *Solar Energy*, 2006, 80(10): 1314-1320.
- [20] 任兰旭, 魏秀东, 牛文达, 等. 非共轴椭球面聚光阵列式高焦比太阳模拟器[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1022002. REN L X, WEI X D, NIU W D, *et al.*. A high flux solar simulator based on an array of non-coaxial ellipsoidal reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022002. (in Chinese)
- [21] 魏素, 肖君, 魏秀东, 等. 太阳能聚焦光斑能流密度测量方法评估[J]. *中国光学*, 2016, 9(2): 255-262. WEI S, XIAO J, WEI X D, *et al.*. Evaluation of flux density measurement method for concentrated solar irradiance[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 255-262. (in Chinese)
- [22] DAI SH M, CHANG ZH SH, MA T Z, *et al.*. Experimental study on flux mapping for a novel 84 kW_e high flux solar simulator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114319.
- [23] 高庆华, 郑殿福. 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, ZHENG D F. The development of heat flux measurement technology[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(3): 218-227. (in Chinese)

作者简介:



魏秀东 (1979—), 男, 河北河间人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 2004 年 7 月于吉林大学通信工程学院光信息科学与技术专业获得工学学士学位; 2009 年 7 月于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得光学博士学位, 主要从事太阳能光热发电聚光系统设计及光学性能检测技术的研究。
E-mail: weixiudong211@163.com



赵宇航 (1998—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 2020 年 6 月于文华学院信息科学与技术学部光电信息科学与工程专业获得学士学位, 主要从事聚焦光斑辐射热流测量等方面研究。
E-mail: 752165854@qq.com