

塔式太阳能热发电系统聚焦光斑能流密度的检测方法

肖 君^{1,2} 魏 素^{1,2} 魏秀东^{1*} 任兰旭^{1,2} 卢振武¹

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

摘要 提出了一种新型的基于间接测量原理的塔式太阳能热发电系统聚焦光斑能流密度的检测方法。该方法不需要使用量热计或能流密度探测器,使测量过程得以简化。利用同一部相机,在完全相同的相机参数设置下,拍摄太阳和聚焦光斑的图像,根据当前的太阳直射辐射值,标定相机的像素灰度值与聚焦光斑能流密度值的比例因子,进而得出聚焦光斑的能流密度分布。详细阐述了该方法的测量原理,搭建了实验平台,并测量了一面小定日镜聚焦光斑的能流密度分布,验证了该方法的正确性和可行性。实验结果表明,该方法测得的峰值能流的相对误差小于5%,而系统的重复性误差约为1%。

关键词 测量;太阳能;太阳能热发电;聚焦光斑;能流密度测量;间接测量法

中图分类号 TK513.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0112003

Solar Flux Measurement Method for Concentrated Solar Irradiance in Solar Thermal Power Tower System

Xiao Jun^{1,2} Wei Su^{1,2} Wei Xiudong¹ Ren Lanxu^{1,2} Lu Zhenwu¹

¹*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract A solar flux measurement method for the concentrated solar irradiance based on indirect measurement principle is proposed. This method does not require additional thermal flux meters or energy sensors to calibrate the camera, which simplifies the measurement process. It takes images of the sun and the concentrated solar irradiance beam by using the same camera and the same camera settings. Combining with the direct normal irradiance of the sun, it can figure out the scale factor between the pixel grey values of the camera and the flux density. And then, it obtains the flux distribution of the beam. The measurement principle of this technique is introduced in detail, and a testing platform is built. The flux map of a piece of small heliostat is measured, and the feasibility and correctness of this method are verified. The experimental results indicate that the relative error of the peak flux measured by this method is less than 5%, and the repeatability error is about 1%.

Key words measurement; solar energy; solar thermal power; concentrated solar irradiance; solar flux measurement; indirect method

OCIS codes 120.4630; 110.2960; 100.2000

1 引 言

在塔式太阳能热发电系统中,聚光光斑能流密度的测量是十分重要的工作,它不仅是评价吸热器和镜

收稿日期: 2014-06-25; 收到修改稿日期: 2014-08-14

基金项目: 国家973计划(2010CB227101)、国家863计划(2012AA050602)、国家自然科学基金(11174275)

作者简介: 肖 君(1986—),男,博士研究生,主要从事太阳能聚光方面的研究。E-mail: xiaojun_nk@163.com

导师简介: 卢振武(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事波动光学、太阳能应用、新型光学系统及其在空间的应用等方面的研究。E-mail: luzw@ciomp.an.cn

场性能的关键参数,而且是镜场优化和镜场控制的重要指标。由于在塔式热发电系统中,定日镜场聚光光斑的尺寸会达数米,能流峰值达几兆瓦到十几兆瓦,最高温度可超过 1000 °C^[1],而且吸热器可能放置在高达 100 多米的塔顶^[2],因此传统的能流密度测量方法会遇到很多挑战。到目前为止,在太阳能塔式热发电系统中存在两类基本的吸热器:外置式吸热器和腔体式吸热器。外置式吸热器是一种开放式吸热腔,吸热器的口径就等于吸收面,因此吸收面可以用来作为测量光斑能流时的靶平面。而腔体式吸热器,吸热面位于接受腔的内部,因此吸热器口径与吸收面并不相等。不同的吸热器需要不同的能流密度测量方法。

在过去的 20 年中,人们提出了很多有效的测量塔式太阳能聚焦光斑能流密度的方法。如果不考虑数值模拟方法,这些方法可以分为两大类:直接法和间接法。直接法和间接法最大的区别在于是否运用 CCD 相机。直接法是直接运用能流探测器测量接受面的太阳辐射,而间接法则运用 CCD 相机拍摄接受靶上光斑的亮度,再通过标定图像亮度和反射辐射之间的关系,从而得到接收靶上的能流分布。

最常见的直接法是移动杆直接测量法^[3-6],它运用一根可绕轴转动的长杆,在杆上安装许多微型热流探测器。测量时,移动杆由电机驱动沿着接受面平行扫描,微型热流探测器会实时记录每个测量点的能流值,整个接受面的能流分布就可以通过插值法求得。这种方法在测量点处的精度很高,但若要做到高精度的能流分布则需要数量庞大的探测器,而且这种方法引入了移动杆,增加了系统的机械复杂性。

间接法又可以分为移动杆间接测量法^[7-10]、无需接收靶的间接测量法^[11]、摄影能流测量(PHLUX)法^[12-14]以及红外相机法^[15]。移动杆间接测量法用到一块朗伯特性的标准漫反射长条形接收靶,测量时该接收靶扫描接受面,CCD 相机拍摄接收靶的图像,在接受面表面会安装一个或几个量热计来标定像素灰度值与接受面能流值的比例因子。这样由接收靶图像的灰度就可以得到接收靶上的能流分布。与直接法相比,间接法需要的探测器数量少。但增加了由于相机和反射面特性引起的误差。无需接收靶的间接测量法直接将吸热器的表面作为接受面,无需额外的接收靶,这种方法结构简单,支持持续测量,不影响电站运行,但只适合于开放式的塔式吸热器,且要求接受面有漫反射特性。PHLUX 方法是近两年才提出来的,它与以前的间接测量法的最大区别在于不需要额外的量热计或者能量探测器去标定相机。而是利用同一部相机,完全相同的相机参数正对太阳拍摄太阳的图像,根据太阳图像的灰度并结合当时的太阳直射辐射值(DNI)来标定相机像素灰度值与能流密度值的比例因子。这种方法结构简单,但需要对接接收靶反射率和衰减片的衰减因子进行精确测量。红外相机法是运用红外相机直接拍摄接收器的表面图像,经过图像处理得到接收器表面的温度分布。然后由此温度分布推断接收器能流分布,该方法的精度取决于所构建的热力学模型的准确性和输入参数的准确性,环境因素对测量不确定度的影响较大。

我国太阳能热发电技术还在商业化起步阶段,对太阳能热发电系统中能流密度的检测有一些研究。刘颖等^[16-17]利用有限元法和蒙特卡罗法计算了碟式聚光器的光斑能流密度分布;赵金龙等^[18]对线性菲涅耳系统光斑能流密度分布进行了理论研究;戴景民等^[19-20]运用 CCD 相机和朗伯靶的间接法测量了碟式系统的能流密度分布。本文基于 PHLUX 方法提出一种应用于塔式太阳能热发电系统聚光光斑能流密度检测的新方法,该方法是一种间接法,不需要安装额外的能流探测器去标定相机,结构简单,易于操作。该方法还适合于槽式、碟式和其它形式的大面积的聚焦光斑的能流密度的测量。

2 基本理论

2.1 系统方案

系统方案如图 1 所示。太阳光经定日镜反射后聚焦在白色的漫反射接收靶上,用 CCD 相机拍摄接收靶上的光斑图像。由于相机对光斑亮度的响应是线性的,而光斑亮度与入射到接收靶上的能流成正比,所以只要知道相机像素灰度值与能流密度值的变换因子,就可以由光斑亮度图像计算得到接收靶上的能流分布。利用同一部相机,完全相同的相机参数(相同的焦距、光圈、曝光时间等)正对太阳拍摄太阳的图像,根据太阳图像的灰度并结合当时的太阳直射辐射值(DNI)来标定相机像素灰度值与能流密度值的比例因子,从而由光斑图像得到光斑的能流密度分布。对于同一部相机,只要不改变相机的焦距、光圈、对焦和曝光时间,这种标定只需要进行一次。

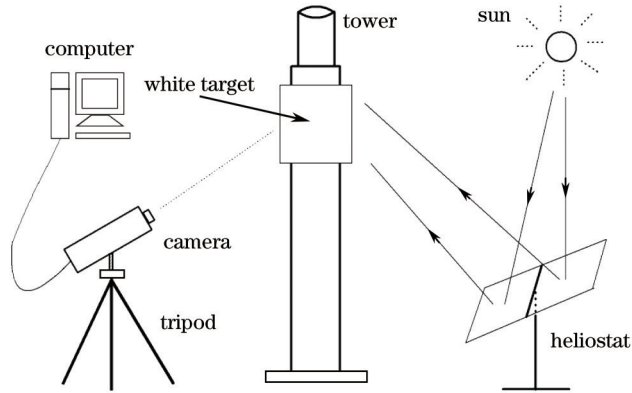


图 1 塔式聚光系统光斑能流密度检测方案图

Fig.1 Schematic of solar flux measurement for concentrated solar tower system

2.2 实验原理

如图 2 所示,太阳光经定日镜反射后聚焦在接收靶上,用相机拍摄接收靶上的光斑图像,其中, A_i 是相机光圈的面积。对于 CCD 相机像素面上的任意一个像元 i , 假设该像元与接收靶上的小面积元 $A_{R,i}$ (单位为 m^2) 对应, 而且小面积元 $A_{R,i}$ 从定日镜场接受到的辐照度(辐射照射面单位受照面积上接受的辐通量)为 $E_{R,i}$ (单位为 W/m^2)。那么只要将像元 i 记录的像素灰度值 $P_{CCD,i}$ 变换成接收靶上小面积元 $A_{R,i}$ 所处位置从镜场接受到的辐照度 $E_{R,i}$, 就可以得到接收靶上的能流分布。

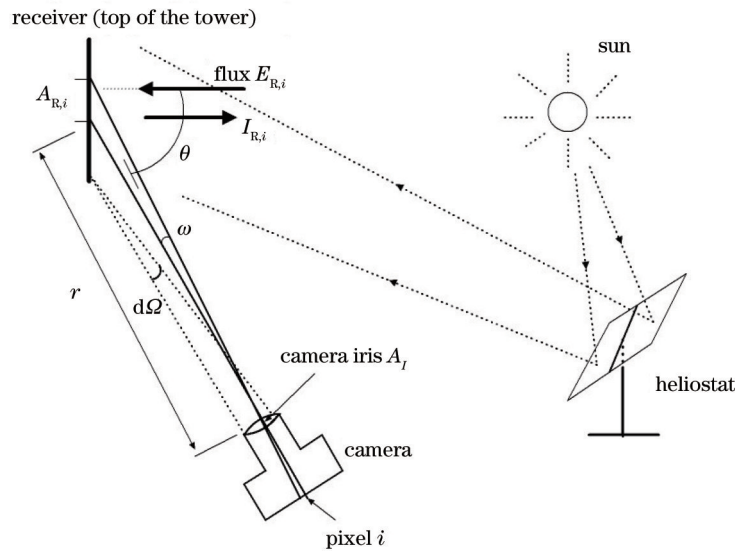


图 2 基本测量原理

Fig.2 Basic measurement principle

基于 PHLUX 方法^[12-14], 面积元 $A_{R,i}$ 处的辐照度 $E_{R,i}$ 为

$$E_{R,i} = \frac{(P_{CCD,i} - P_{CCD_ambient,i})E_{DNI}}{\rho_{R,i} \tan^2(\delta_{sun}/2)} \frac{\pi n_{sun_pixels}^2 f_{receiver}}{\sum_i P_{CCD_sun,i} f_{sun}}, \quad (1)$$

式中 $P_{CCD,i}$ 和 $P_{CCD_sun,i}$ 分别是光斑图像和太阳图像上像元 i 处的像素灰度值, $P_{CCD_ambient,i}$ 是只有环境光时接收靶图像上像元 i 处的像素灰度值, E_{DNI} (单位为 W/m^2) 是拍摄太阳图像时太阳直射辐照度, n_{sun_pixels} 是太阳图像的半径所对应的像素个数, $\rho_{R,i}$ 为漫反射靶的反射率, δ_{sun} 是太阳的发散角(约为 9.3 mrad), $f_{receiver}$ 和 f_{sun} 分别是拍摄接收靶图像和太阳图像时所用到的滤光片的衰减因子。注意到:

$$\frac{\sum_i P_{\text{CCD_sun},i}}{\pi n_{\text{sun_pixels}}^2} = \frac{\sum_i P_{\text{CCD_sun},i}}{\sum_i i}, \quad (2)$$

它实际代表的是太阳图像上的平均像素灰度值,对于同一部相机且相同的相机设置,这个参数只需要测量一次。

2.3 衰减比的计算

为了保证相机在拍摄太阳图像和光斑图像时 CCD 探测器不发生饱和,需要在镜头前加上合适的中性密度滤光片。滤光片的最佳衰减比是使拍摄时刚好接近饱和,这时拍摄的图像既没有饱和,而且层次分明,效果最好。由于两次拍摄运用的是同一部相机,而且是完全相同的相机参数,所以要得到最佳的衰减比即是要计算相机拍摄太阳图像时 CCD 像元接收到的辐照度 $E_{\text{sun},i}$ (单位为 W/m^2) 与拍摄接收靶光斑时像元接收到的辐照度 $E_{\text{CCD},i}$ (单位为 W/m^2) 的比值

$$f = \frac{f_{\text{sun}}}{f_{\text{receiver}}} = \frac{E_{\text{sun},i}}{E_{\text{CCD},i}}, \quad (3)$$

式中 f_{sun} 和 f_{receiver} 分别是拍摄太阳图像和接收靶图像时所用到的中性滤光片的衰减因子。相机拍摄太阳图像时像元 i 接收到的辐照度为

$$E_{\text{sun},i} = \frac{E_{\text{DN1}} A_1}{\pi n_{\text{sun_pixels}}^2 r_{\text{pixel}}^2}, \quad (4)$$

式中 E_{DN1} (单位为 W/m^2) 是拍摄太阳图像时太阳直射辐照度, A_1 (单位为 m^2) 是相机光圈的面积, $n_{\text{sun_pixels}}$ 是太阳图像的半径所对应的像素个数, r_{pixel} 是像元尺寸。而相机拍摄接收靶光斑时单个像元接收到的辐照度为

$$E_{\text{CCD},i} = \frac{\rho_{R,i} E_{R,i} A_{R,i} \cos \theta A_1}{\pi r^2 r_{\text{pixel}}^2}, \quad (5)$$

式中 $\rho_{R,i}$ 为接收靶反射率, $A_{R,i}$ (单位为 m^2) 为与像元 i 对应的接收靶上的小面积元, $E_{R,i}$ (单位为 W/m^2) 为小面积元 $A_{R,i}$ 从定日镜场接受到的辐照度, θ 是相机光轴(出射方向)与靶面法向的夹角, r 是接收靶到相机的距离。如图 2 所示,像元 i 对应的接收靶上的小面积元 $A_{R,i}$ 的值可表示为

$$A_{R,i} \cos \theta = 4r^2 \tan^2(\omega/2), \quad (6)$$

式中 ω 是小面积元 $A_{R,i}$ 相对于相机入瞳的张角,也是像元 i 相对于相机入瞳的张角。如图 3 所示,可以通过所拍摄太阳的图像来表示 ω 的值。

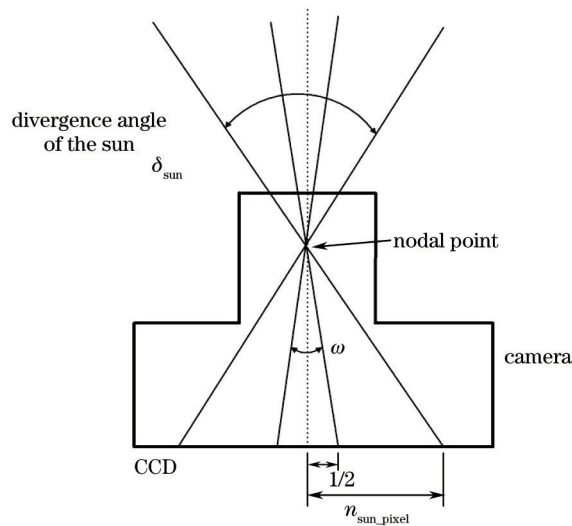


图 3 相机示意图

Fig.3 Schematic of the CCD camera

$$\frac{\tan(\omega/2)}{1/2} = \frac{\tan(\delta_{\text{sun}}/2)}{n_{\text{sun_pixels}}} \quad (7)$$

式中 δ_{sun} 是太阳的发散角。结合(5)式、(6)式和(7)式,相机拍摄接收靶光斑时单个像元接收到的辐照度为

$$E_{\text{CCD},i} = \frac{\rho_{\text{R},i} E_{\text{R},i} A_{\text{T}} \tan^2(\delta_{\text{sun}}/2)}{\pi n_{\text{sun_pixels}}^2 r_{\text{pixel}}^2} \quad (8)$$

由(3)式、(4)式和(8)式计算得到衰减比为

$$f = \frac{E_{\text{sun},i}}{E_{\text{CCD},i}} = \frac{E_{\text{DNI}}}{\rho_{\text{R},i} E_{\text{R},i} \tan^2(\delta_{\text{sun}}/2)} \quad (9)$$

式中 $\frac{E_{\text{R},i}}{E_{\text{DNI}}} = k_{\text{con}}$ 是聚光光斑的聚光比(无量纲量,指光学系统聚集辐射能时,每单位面积被聚集的辐射能密度与其入射的能量密度的比值)。令太阳的发散角 $\delta_{\text{sun}} = 9.3 \text{ mrad}$,则理论上最佳的衰减比为

$$f = \frac{1}{\rho_{\text{R},i} k_{\text{con}} \tan^2(\delta_{\text{sun}}/2)} = \frac{46297}{\rho_{\text{R},i} k_{\text{con}}} \quad (10)$$

由(10)式可以看出,衰减比只与接收靶反射率 $\rho_{\text{R},i}$ 以及接收靶上光斑的聚光比 k_{con} 有关。

3 实 验

3.1 实验装置

实验是在一幢楼顶进行的,如图4所示。测试光斑是由一面焦距为 15 m,尺寸为 35 cm×35 cm 的球面小定日镜聚焦而成(聚光比约为 4)。测试光斑打在放置在背光处的接收靶上,接收靶是由上海蓝菲光学仪器有限公司生产的标准漫反射白板,其尺寸为 20 cm×20 cm,在 350~850 nm 范围反射率达到 96%。CCD 相机安装在带有云台的三脚架上,放置在接收靶前约 6.6 m 的地方。实验中所用的中性密度滤光片由沈阳仪表科学研究所有限公司生产,衰减比经过严格标定。标定相机时需要拍摄太阳图像,并且需要知道拍摄时的 DNI, DNI 值的准确性直接影响到相机像素灰度值与能流密度值的变换因子的标定精度,进而影响到测量结果。实验过程中的太阳直射辐射值由 Kipp&Zonen 公司生产的太阳辐射仪测定,其灵敏度为 $8.08 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ 。实验的详细参数如表 1 所示。



图4 实验装置图

Fig.4 Experimental setup

3.2 实验结果

图 5 显示的是实验中拍摄的测试图片,左图为标定相机时所拍摄的阳光图像,右图为拍摄的光斑图像。拍摄两幅图像时相机参数(包括焦距、光圈、增益、曝光时间等等)完全相同,拍摄太阳图像时运用了衰减比为 19953 的中性滤光片,拍摄光斑图像时没有用到滤光片。

图 6 是计算得到的接收靶上光斑的能流密度分布图,图中黑色十字线表示峰值能流点。由图可以看出光斑直径大约为 15 cm,计算得到的接收靶上能流密度的峰值为 $2182.75 \text{ W}/\text{m}^2$,入射到接收靶上的总的能流为 0.022468 kW 。图 7 显示的是光斑中心(能流密度峰值点)水平和垂直截面上的能流密度分布情况。红色

实线表示的是水平截面上的能流密度分布,蓝色虚线表示的是垂直截面上的能流密度分布,由图可以直观地看出接收靶上能流的变化趋势。

表1 实验条件和实验参数概述

Table 1 Summary of test conditions and parameters

Test conditions and parameters	Value
Location	Changchun, China
Date	21-Mar-2014
Time	11:09 am
DNI/(W/m ²)	632.3
Reflectivity of receive target	0.96
Distance between camera and receive target /m	6.6
Focal length of camera /mm	135
Pixel size of the CCD / μm	4.65 \times 4.65
Attenuation factor of the neutral density filter for beam image	1
Attenuation factor of the neutral density filter for sun image	19953

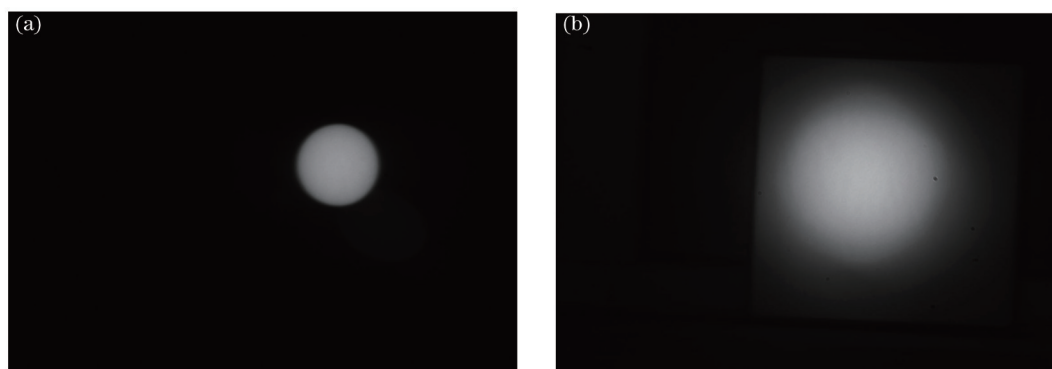


图5 实验中拍摄的测量图像。(a)太阳的图像;(b)光斑图像

Fig.5 Images captured in the experiment process. (a) Sun image; (b) beam image

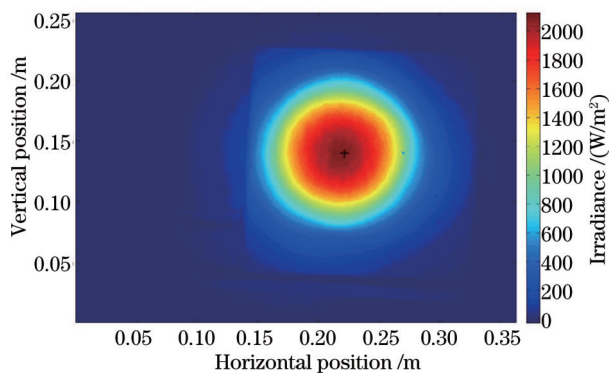


图6 接收靶上能流密度分布

Fig.6 Flux density distribution on receiver surface

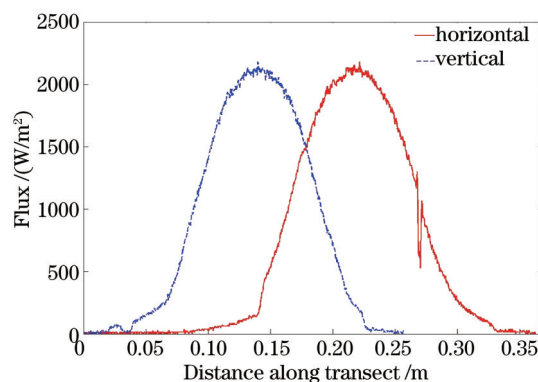


图7 光斑中心水平和垂直截面上的能流分布

Fig.7 Flux distribution along horizontal and vertical transects at the peak flux point

3.3 实验验证

如图8所示,为了验证实验结果,采用ITI公司生产的HT50热流计直接测量接收靶上光斑中心的能流密度值。测量应在拍摄完光斑图像后立即进行,以确保太阳的DNI值在直接测量时和拍摄光斑图像时变化不大。经过多次测量,光斑中心能流密度的最大值为2080.9 W/m²。表2给出了用本文所述方法和采用HT50热流计直接测量得到的能流密度峰值的情况,二者的相对误差为4.9%。



图8 运用热流计直接测量光斑能流

Fig.8 Measuring the solar flux directly by using a thermal flux meter

表2 不同方法测得的能流密度峰值的比较

Table 2 Comparison of the peak flux measured by different methods

Measurement methods	Value
Method introduced in this paper	2182.7 W/m ²
Thermal flux meter HT50	2080.9 W/m ²
Relative error	4.9 %

由上述实验结果可以看出所提出的基于 PHLUX 间接测量法的塔式太阳能热发电系统聚焦光斑能流密度检测方法能快速定量地给出接收靶上光斑的能流密度分布,结果与用直接法测量的结果吻合得很好,验证了该方法的正确性和可行性。由(1)式可以看出漫反射靶反射率的标定,以及中性滤光片衰减比的测定是决定测量精度的关键因素,而如果漫反射靶的反射率不均匀,则需要标定出漫反射靶上每个点的反射率,即需要得到接受靶的反射分布。在验证性实验中由于接受靶的尺寸较小,标定相对容易,但在实际的应用中,会遇到很多挑战。比如在实际的塔式镜场中,由于实际的光斑直径达几米,能流达到几兆瓦每平方米,所以需要大面积耐高温的漫反射靶,而这样的漫反射靶的制作是实际应用中的最大的难题。

3.4 系统重复性

为了评价该测量方法的重复性精度,用相同的实验设备对小定日镜的聚焦光斑进行了 20 次重复测量。为了减小测量时太阳 DNI 值的变化带来的影响,每次采图的时间间隔为 2 s。进行相机标定时太阳 DNI 值为 864.43 W/m²。测量得到的能流密度峰值如表 3 所示。

表3 重复性实验结果

Table 3 Results of the repeatability measurement

Number of measurements <i>i</i>	Flux peak value $E_i/(W/m^2)$
1	2720.6
2	2679.4
3	2685.7
4	2650.8
5	2662.5
6	2709.0
7	2685.7
8	2674.1
9	2639.2
10	2662.5
11	2674.1
12	2662.4
13	2673.1
14	2650.9
15	2650.8
16	2616.0
17	2639.2
18	2639.2
19	2615.9
20	2627.6

由表3可以计算得到20次重复测量的能流峰值的平均值为 $\bar{E} = 2660.94 \text{ W/m}^2$, 实验标准偏差为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{20} (E_i - \bar{E})^2}{19}} = 27.93 \text{ W/m}^2, \quad (11)$$

则相对重复性误差为

$$R = \left| \frac{s}{\bar{E}} \right| \times 100\% = 1.05\%, \quad (12)$$

由(12)式可以看出系统的重复性约为1%, 考虑到太阳的DNI值在重复性测量的过程中会发生变化, 所以系统实际的重复性精度应该更高。

4 结 论

基于能流密度的间接测量原理, 提出了一种应用于太阳能热发电站聚焦光斑能流密度的检测方法。该方法可对聚光镜场聚焦到接受靶上的光斑能流进行实时的快速的测量, 并且不需要额外的量热计或者能量探测器去标定相机。详细阐述了该方法的测量原理, 搭建了相应的实验平台, 测量了一面小定日镜的光斑能流分布, 验证了该方法的正确性和可行性。实验结果表明, 在漫反射靶反射率以及中性滤光片衰减比精确标定的前提下, 该方法测得的峰值能流与直接测量法相比相对误差小于5%, 系统的重复性误差约为1%。这种方法结构简单, 易于操作, 不仅适合于塔式热发电系统, 还适合于槽式、碟式和其他形式的大面积的聚焦光斑的能流密度的测量, 具有良好的应用前景。在实际的应用中, 合适的漫反射靶的制作是应用中的难点。

参 考 文 献

- 1 A Imenes, W Stein, J Hinkley, *et al.*. Ray tracing and flux mapping as a design and research tool at the National Solar Energy Centre [C]. ANZSES Conference, 2006, S06-81: 1-10.
- 2 J Lata, S Alcalde, D Fernández, *et al.*. First surrounding field of heliostats in the world for commercial solar power plants-GEMASOLAR [C]. Proceedings of the SolarPACES 2010, 2010.
- 3 J Ballestrín, R Monterreal. Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation [J]. Energy, 2004, 29(5-6): 915-924.
- 4 J Ballestrín. A non-water-cooled heat flux measurement system under concentrated solar radiation conditions [J]. Solar Energy, 2002, 73(3): 159-168.
- 5 J Ballestrín. Heat flux measurement on CSP [C]. 4th SFERA Summer School, 2013.
- 6 J Ballestrín, J Valero, G García. One-click heat flux measurement device [C]. Proceedings of the SolarPACES, 2010.
- 7 A Kröger-Vodde, A Hollander. A CCD flux measurement system PROHERMES [J]. Journal DE Physique IV, 1999, 9(3): 649-654.
- 8 E Lüpfer, P Heller, S Ulmer, *et al.*. Concentrated solar radiation measurement with video image processing and online fluxgauge calibration [C]. Solar Thermal 2000 International Conference, 2000.
- 9 R Buck, E Lüpfer, F Tellez. Receiver for solar hybrid gas turbine and CC systems (REFOS) [C]. Solar Thermal 2000 International Conference, 2000. 95-100.
- 10 S Ulmer, E Lüpfer, M Pfänder, *et al.*. Calibration corrections of solar tower flux density measurements [J]. Energy 2004, 29(5-6): 925-933.
- 11 F Göhring, O Bender, M Röger, *et al.*. Flux density measurement on open volumetric receivers [C]. Proceedings of SolarPACES, 2011.
- 12 C K Ho, S S Khalsa. A flux mapping method for central receiver systems [C]. Proceedings of the 2011 ASME Energy Sustainability Conference, 2011.
- 13 C K Ho, S S Khalsa. A photographic flux mapping method for concentrating solar collectors and receivers [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2012, 134(4): 041004.
- 14 C K Ho, S S Khalsa, D D Gill, *et al.*. Evaluation of a new tool for heliostat field flux mapping [C]. Proceedings of SolarPACES, 2011.
- 15 G Naor, G Goldwine, R Hayut, *et al.*. Flux measurement system using IR camera [C]. Proceedings of the SolarPACES, 2010.
- 16 Liu Ying, Dai Jingmin, Lang Zhiguo, *et al.*. Finite-element analysis for flux distribution on the focal plane of rotating parabolic

- concentrators [J]. *Acta Optica sinica*, 2007, 27(10): 1775–1778.
- 刘 颖, 戴景民, 郎治国, 等. 旋转抛物面聚光器焦面能流密度分布的有限元分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1775–1778.
- 17 Liu Ying, Dai Jingmin, Sun Xiaogang, *et al.*. Calculation method of flux distribution on focal plane in parabolic concentrators [J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2007, 28(10): 1049–1054.
- 刘 颖, 戴景民, 孙晓刚, 等. 抛物面型聚光器聚焦光斑能流密度分布的计算[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(10): 1049–1054.
- 18 Zhao Jinlong, Li Lin, Cui Zhengjun, *et al.*. Calculation of flux density distribution on focal plane in linear Fresnel reflector [J]. *Acta Optica sinica*, 2012, 32(12): 1208001.
- 赵金龙, 李 林, 崔正军, 等. 线性菲涅耳反射聚光器聚焦光斑能流密度分布的计算 [J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1208001.
- 19 Dai Jingmin, Liu Ying. Measurement and analysis of flux density distribution for spot focused by concentrator [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(6): 917–920.
- 戴景民, 刘 颖. 聚光器聚焦光斑能流密度分布的测量与分析[J]. *应用光学*, 2008, 29(6): 917–920.
- 20 Dai Jingmin, Liu Ying, Yu Tianhe. Development of flux density distribution measurement system based on CCD [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2008, 19(11): 1507–1511.
- 戴景民, 刘 颖, 于天河. 基于 CCD 的聚焦光斑能流密度分布测量系统的研制[J]. *光电子·激光*, 2008, 19(11): 1507–1511.

栏目编辑: 韩 峰