

太阳能聚焦光斑能流密度测量方法评估

魏素,肖君*,魏秀东,卢振武,王肖

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春130033)

摘要:为了确定一种新型间接测量太阳能热发电系统聚焦光斑能流密度分布方法的测量误差范围,对其进行了进一步研究。从理论公式出发,分析了该测量方法的误差源;使用球面小定日镜、CCD相机、漫反射板、中性密度滤光片等设备进行了能流密度测量的实验,使用MATLAB软件对实验数据进行处理,得到了漫反射板上聚焦光斑的能流密度分布和总能量;实验时借助全站仪测量并计算了定日镜中心的光线入射角,根据定日镜的面积和反射率、太阳直射辐射值、余弦效率等计算了光斑能量的理论值,并与测量得到的聚焦光斑总能量比较,得出了实验条件下该方法测量光斑总能量以及能流密度的相对误差为3.5%。该测量误差在允许范围内,进一步证实了该能流密度测量方法的正确性和可行性。

关键词:测量误差;能流密度测量;聚焦光斑;太阳能热发电

中图分类号:TK513.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20160902.0255

Evaluation of flux density measurement method for concentrated solar irradiance

WEI Su, XIAO Jun*, WEI Xiu-dong, LU Zhen-wu, WANG Xiao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

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

Abstract: In order to estimate its measurement error range when indirectly measuring the flux distribution on receivers of solar thermal power systems, a new method is studied. The error sources of this method are analyzed based on the theoretical equation. An experiment to measure the flux density distribution of a concentrated beam is implemented with a spherical heliostat, a CCD camera, a diffuse reflector, neutral density filters and other devices. The flux density distribution and total energy of the concentrated solar irradiance on the reflector is calculated with a MATLAB program. The incident angle of rays on the center of the heliostat is measured with a total station. The theoretical value of the beam energy is calculated according to area and reflectivity of the heliostat, the direct normal irradiance and cosine efficiency. By comparing the theoretical value of the beam energy with the measured total energy, the relative error of the total energy and the flux density measured by this method is obtained. The measured relative error is 3.5%. This error is within permission,

收稿日期:2015-12-10;修订日期:2016-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11174275)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 11174275)

which further verifies the correctness and feasibility of this new method.

Key words: measurement error; flux density measurement; concentrated solar irradiance; solar thermal power plant

1 引言

塔式太阳能热发电聚光系统的关键在于低成本高精度的定日镜加工及跟踪控制^[1]。吸热器上聚焦光斑能流密度分布的测量对评价定日镜跟踪精度和吸热器性能及提高系统光热效率有着重要意义。由于在太阳能聚光发电中,接收器表面最高温度可超过 1 000 ℃^[2],因此,焦斑处的能流密度测量十分困难。传统的测量方法主要有在接收面或接收靶安装探测器直接测量入射光强度^[3-6]和通过使用 CCD 相机对 Lambertian 材料板材的反射光进行拍照从而间接测量能流密度^[7-13]以及红外相机法^[14-15]。直接测量法测量时间长、空间分辨率低。间接测量法需要在接收面安装一个或多个能流探测器来测量能流密度值,从而确定图像像素灰度值与能流密度值的比例因子,能流探测器的标定和测量会造成很大的不确定性和误差。而用红外相机法测得的能流密度受不确定因素(比如传热流体吸收的热量以及对流和辐射引起的热损失)的影响较大^[11]。

本文介绍一种不需要在接收面或移动靶上安装探测器的基于 CCD (Charge Coupled Device) 的能流密度间接测量法^[16]。该方法克服了传统测量方法的诸多缺点,可以适应很高的能流密度值。使用同一部 CCD 相机,在相同的相机参数设置下拍摄太阳图像和聚焦光斑的图像。只要知道接收面的反射率和当前太阳直射辐射值,就可以根据聚焦光斑和太阳的图像得到接收面的能流密度分布。太阳图像有两个作用:一是提供一个参考图像,结合当前太阳直射辐射值 (Direct Normal Irradiance, DNI) 来确定光斑图像的像素灰度值与能流密度值的对应关系;二是提供尺寸参考以确定光斑图像与实际光斑的大小对应关系。拍摄太阳图像时,在相机镜头前使用中性密度滤光片以防止 CCD 饱和。这种方法的创新之处是使用太阳图像来标定光斑图像各点的像素灰度值对应的能

流密度大小以及每个像素对应的光斑面积。通过实验对一块球面小定日镜的聚焦光斑进行了测量,并根据当前 DNI 值、定日镜面积和反射率、余弦效率等参数计算光斑总能量的理论值,与根据实验结果计算的总能量比较,估算了该方法测量能流密度的误差。

2 能流密度测量方法简介

聚焦光斑的亮度与入射能流密度的大小成正比,而 CCD 相机对光斑亮度的响应是线性的,故相机拍摄的光斑图像可以用来描述光斑的能流密度分布特征。只要知道图像的像素灰度值与能流密度值的比例因子,就可以根据光斑图像的灰度值分布得到光斑能流密度分布。传统的间接测量方法通过在被测面的特定位置安装水冷的能流计或量热计来标定该比例因子。本文研究方法中使用太阳图像的像素灰度值和 DNI 值来标定该比例因子。拍摄光斑图像与太阳图像时使用同一部相机、完全相同的相机参数(焦距、光圈、曝光时间、对焦等)。在拍摄太阳图像时需要在相机镜头前安装中性密度滤光片以防止 CCD 阵列饱和。该方法适用于任意表面的能流密度测量。

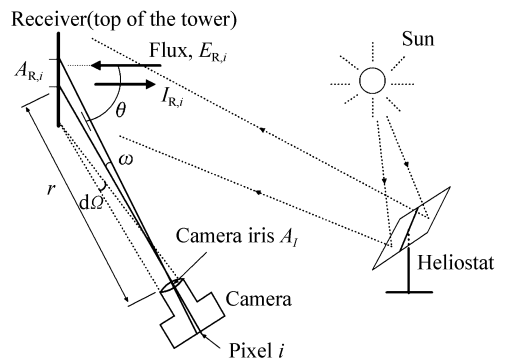


图1 能流密度测量原理

Fig. 1 Principle of flux density measurement

测量原理如图1,假设相机像素面上像元*i*对

应的光斑面元为 $A_{R,i}$ (m^2), 它表面的辐照度为 $E_{R,i}$ (W/m^2), 通过推导得到相机像元 i 上的响应灰度值为:

$$P_{\text{CCD},i} = \frac{\rho_{R,i} E_{R,i} A_{R,i} \cos\theta}{\pi r^2} \frac{\sum_{\text{sun}} P_{\text{CCD},\text{sun},i}}{E_{\text{DNI}}}, \quad (1)$$

式中, $\rho_{R,i}$ 为被测面的漫反射率, r 是光斑面元与相机光阑的距离, $P_{\text{CCD},i}$ 为太阳图像上像元 i 的灰度值, E_{DNI} 是太阳直射辐射值。光斑面元 $A_{R,i}$ 的面积可表示为:

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

式中, θ 是被测面元法线与相机光轴的夹角, ω 是面元 $A_{R,i}$ 对相机光阑的张角。由于拍摄太阳图像与光斑图像时使用同样的相机参数, 故相机节点与 CCD 之间的距离保持不变, 因此可根据式(3)求 ω :

$$\frac{\tan(\omega/2)}{1/2} = \frac{\tan(\delta_{\text{sun}}/2)}{n_{\text{sun_pixels}}}, \quad (3)$$

式中, δ_{sun} 是太阳对地球的张角, $n_{\text{sun_pixels}}$ 是太阳图像上沿着半径的像素个数, 如图 2 所示。

$$E_{R,i} = \frac{(P_{\text{CCD},i} - P_{\text{CCD,ambient},i}) E_{\text{DNI}}}{\rho_{R,i} \tan^2(\delta_{\text{sun}}/2)} \frac{\pi n_{\text{sun_pixels}}^2}{\sum_{\text{sun}} P_{\text{CCD},\text{sun},i}} \frac{f_{\text{receiver}}}{f_{\text{sun}}}, \quad (5)$$

式中, $P_{\text{CCD},\text{sun},i}$ 和 $P_{\text{CCD},i}$ 分别是太阳图像和光斑图像上像元 i 处的像素灰度值, $P_{\text{CCD,ambient},i}$ 是没有光斑时时接收靶图像上像元 i 处的像素灰度值, E_{DNI} (W/m^2) 是拍摄太阳图像时的 DNI 值, $n_{\text{sun_pixels}}$ 是太阳图像半径对应的像素个数, $\rho_{R,i}$ 为漫反射靶的反射率, δ_{sun} 是太阳的发散角。 f_{receiver} 和 f_{sun} 分别是拍摄光斑图像和太阳图像时所用中性密度滤光片的衰减比。可见测得的能流密度与相机拍摄的角度和位置无关。

3 测量系统误差源分析

该能流密度测量方法的误差取决于式(5)中各参数的误差。误差源包括相机引入的误差、DNI 测量误差、漫反射率 $\rho_{R,i}$ 的误差、太阳发散角 δ_{sun} 的误差、滤光片衰减比的误差。

3.1 相机引入的误差

相机造成误差的原因主要有暗电流影响以及

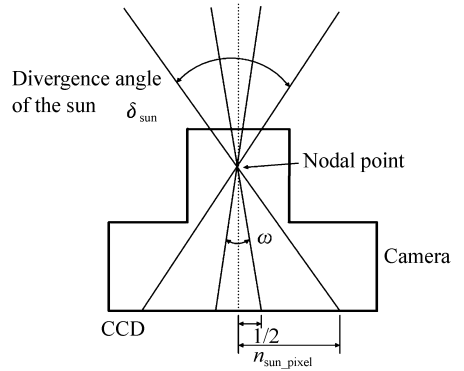


图2 相机示意图

Fig.2 Schematic of the CCD camera

由式(1)、(2)、(3)可得, 小面元 $A_{R,i}$ 上的能流密度 $E_{R,i}$ 与像素灰度值 $P_{\text{CCD},i}$ 的关系为:

$$E_{R,i} = \frac{P_{\text{CCD},i} E_{\text{DNI}}}{\rho_{R,i} \tan^2(\delta_{\text{sun}}/2)} \frac{\pi n_{\text{sun_pixels}}^2}{\sum_{\text{sun}} P_{\text{CCD},\text{sun},i}}. \quad (4)$$

如果被测面上能流密度值较低, 则环境光对测量结果影响较大。又考虑到拍摄图像时会用到滤光片以防止相机 CCD 饱和, 式(4)可改写为:

CCD 对光强响应的非线性。

在无光照情况下, CCD 芯片也会产生暗电流, 平均暗电流通常用平均暗输出表示^[8]。盖上相机镜头盖采集一帧图像, 求出所有像元灰度的平均值即平均暗输出。对 DH-SV2001GM 型号的 CCD 相机进行暗电流测试, 得到其平均暗输出为 1.65。而在测量能流密度的实验中太阳图像平均灰度值为 209.57, 暗电流所占比例为 0.79%。实际应用中将采集的图像灰度值减去平均暗输出, 可消除暗电流影响。

在 CCD 信号电荷存储转移的过程中, 如果反型层电荷足够多, 势阱被填满, 会造成电荷溢出, 输出电流信号与输入照度呈现非线性, 即 CCD 对光强响应的非线性。使用积分球测量 DH-SV2001GM 型号的 CCD 相机的线性度, 得到曲线如图 3。经计算, CCD 相机图像平均灰度值与积分球辐亮度的相关系数为 0.997 3, 图像灰度平均值的最大非线性误差为 3.84%。

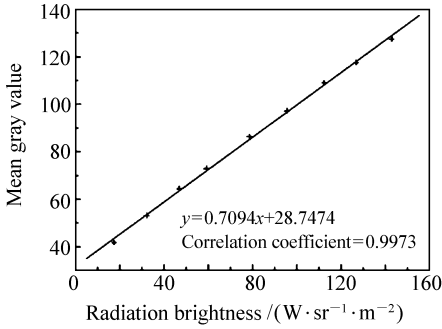


图3 相机线性度曲线

Fig.3 Linearity curve of the camera

3.2 太阳直射辐射值和漫反射靶反射率的误差

太阳直射辐射值 DNI 的误差取决于测量设备。下文中的实验使用北京华创维想科技开发有限公司生产的 TSB-2-B-I 直射辐射表测量 DNI 值,其灵敏度为 $9.22 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$,测量值的相对误差约为 0.2%。

实际应用中吸热器表面漫反射率应该是已知值,其误差取决于给定的参数。本实验使用 Avian-D 漫反射涂料喷涂而成的漫反射板,该涂层具有高朗伯特特性,在 $400 \sim 800 \text{ nm}$ 范围内的平均半球反射比因子为 98.2%,最小值为 97.9%,最大值为 98.5%。故漫反射板反射率取值 98.2%,其误差估计为 0.3%。

3.3 太阳发散角的误差

太阳发散角 δ_{sun} 由如下公式确定:

$$\tan(\delta_{\text{sun}}/2) = \frac{r_{\text{sun}}}{l_{\text{sun}}}, \quad (6)$$

式中, r_{sun} 是太阳半径, l_{sun} 是地球与太阳的距离。地球绕太阳公转的轨道是椭圆,故 l_{sun} 随一年中的日期变化。

以地球公转的长、短轴分别为 x 轴、 y 轴建立坐标系,假设地球和太阳的连线与 x 轴夹角为 γ ,可推导得:

$$l_{\text{sun}} = \frac{b^2}{a + c \cos \gamma}, \quad (7)$$

式中, a 、 b 、 c 分别为椭圆长半轴、短半轴、半焦距, $a = 1.4960 \times 10^8 \text{ km}$, $b = 1.4958 \times 10^8 \text{ km}$, $c = 2.50 \times 10^6 \text{ km}$ 。在 2015 年,1 月 3 日,地球位于近日点,7 月 4 日,地球位于远日点,对于这一年中

的第 n 天,式(7)中 γ 的值为:

$$\gamma(\text{rad}) \approx 2\pi(n-2)/365. \quad (8)$$

近日点与太阳的距离为 $1.48 \times 10^8 \text{ km}$,远日点与太阳的距离是 $1.52 \times 10^8 \text{ km}$ 。计算得一年中 δ_{sun} 的最小值为 9.152 mrad,最大值为 9.463 mrad,平均值为 9.305 mrad。

若 δ_{sun} 取平均值 9.305 mrad,如果不考虑大气折射对观测到的太阳半径的影响,则一年中 δ_{sun} 的最大相对误差为 $\pm 1.7\%$, $\tan^2(\delta_{\text{sun}}/2)$ 的最大相对误差为 $\pm 3.4\%$ 。若使用式(6)、(7)、(8)计算,则可基本消除该误差。

3.4 中性密度滤光片衰减比的误差

中性密度滤光片衰减比的理论计算公式为 $f = 10^d$, d 是光学密度。然而,其实际的衰减比并非常数,而是随波长变化。用光谱仪测量得到沈阳汇博光学技术有限公司生产的光学密度等于 4 的中性密度滤光片的衰减比随波长的变化关系如图 4 所示。拍摄太阳和光斑图像所用相机的光谱响应曲线如图 5 所示。可见相机响应的峰值在 500 nm 处。故滤光片的衰减因子取 500 nm 处的值, $f_{\text{sun}} = 10^{4.28} = 19\,055$ 。根据测量数据的分布和曲线拟合结果,500 nm 处衰减因子的取值误差范围为 0.5% 以内。

表 1 列出了上面讨论的各种误差。这些误差相互独立,总误差通过求各误差平方和的平方根得到。由于需要拍摄 3 张图片,计算总误差时相机像素灰度值的误差加了 3 次。总误差的值为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{total}} &= \\ &= \sqrt{3.84^2 \times 3 + 0.2^2 + 3.4^2 + 0.5^2 + 0.3^2} \% = \\ &= 7.5\% . \end{aligned} \quad (9)$$

表 1 误差源总结

Tab.1 Summary of error sources

Error source	Relative error/%
Pixel value of the CCD camera, P_{CCD}	3.84
Direct normal irradiance, E_{DNI}	0.2
$\tan^2(\delta_{\text{sun}}/2)$	3.4
Attenuation factor of the filter, $f_{\text{sun}}/f_{\text{receiver}}$	0.5
Reflectance data of the receiver	0.3

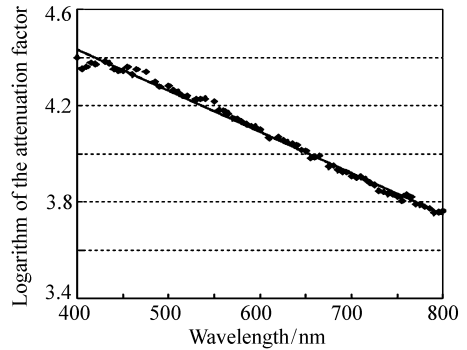
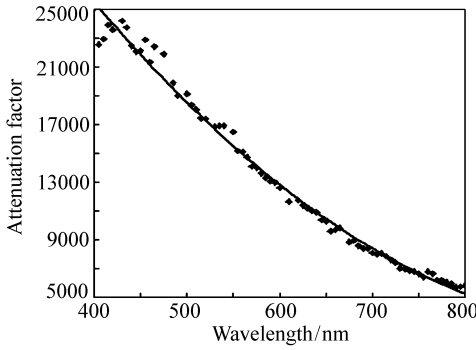


图 4 OD4 滤光片衰减比随波长变化

Fig. 4 Attenuation factor of the OD4 filter varies with wavelength changing

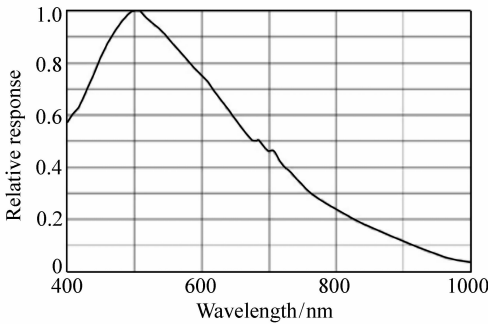


图 5 DH-SV2001GM 摄像机的光谱响应曲线

Fig. 5 Spectral response curve of the DH-SV2001GM camera

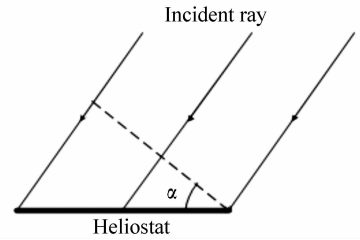


图 6 余弦效率示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cosine efficiency

假设光斑图像上每个像素对应的光斑面积相等(在本实验条件下,该假设近似成立),即 $A_{R,i}$ 为常数,则式(11)可改写为:

$$E_{\text{beam_total}} = A_{\text{pixel_m}} \sum_i E_{R,i}, \quad (12)$$

式中, $A_{\text{pixel_m}}$ 为每个像素对应的光斑面积。若可求出与图像像素的边长对应的实际光斑长度 k , 则 $A_{\text{pixel_m}} = k^2$ 。从而有:

$$E_{\text{beam_total}} = k^2 \sum_i E_{R,i}, \quad (13)$$

可见光斑总能量与各点能流密度值之和成正比。若各点能流密度值测量的相对误差相等,则测得的光斑总能量的相对误差等于所测各点能流密度值的相对误差。若可准确测量定日镜反射率 ρ_h 和余弦效率 $\cos\alpha$, 则可根据式(10)计算的结果评估能流密度分布的测量误差。

如图 7, 在拍摄太阳图像的同时, 使用全站仪测量太阳位置的高度角和方位角, 并测量定日镜和漫反射板在全站仪坐标系中的三维坐标, 可计算余弦效率 $\cos\alpha$, 显然有:

4 误差测量实验

4.1 原理

定日镜将太阳光反射到漫反射板上得到聚焦光斑, 由定日镜反射的光能可由下式给出:

$$E_r = \rho_h E_{\text{DNI}} S_h \cos\alpha, \quad (10)$$

式中, ρ_h 为定日镜反射率; S_h 为定日镜面积; E_{DNI} 为太阳直射辐射值; α 为定日镜上光线的入射角, $\cos\alpha$ 为余弦效率。余弦效率定义为入射光线的入射向量与定日镜法向量的夹角的余弦值。图 6 中虚线表示定日镜在垂直于光线的方向上的投影面积, 即定日镜接收能量的有效面积。

用本文研究的间接测量法可得到光斑的能流密度分布及总能量。光斑总能量公式为:

$$E_{\text{beam_total}} = \sum_i A_{R,i} E_{R,i}. \quad (11)$$

$$\cos(2\alpha) = \frac{\vec{BA} \cdot \vec{BC}}{|\vec{BA}| \cdot |\vec{BC}|}. \quad (14)$$

从而得:

$$\cos\alpha = \cos\left[\frac{1}{2}\arccos\left(\frac{\vec{BA} \cdot \vec{BC}}{|\vec{BA}| \cdot |\vec{BC}|}\right)\right]. \quad (15)$$

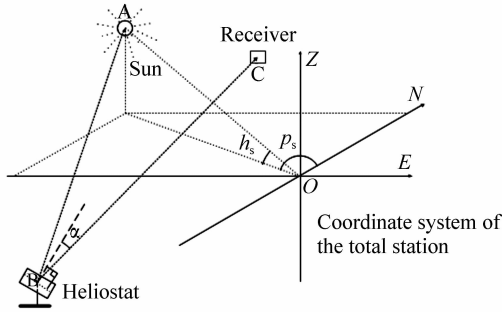


图7 余弦效率测量原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the cosine efficiency measurement

由于太阳位于无穷远处,而全站仪坐标中心点 O 与定日镜中心点 B 的距离很小,故有:

$$\vec{OA} = \vec{BA}, \quad (16)$$

而:

$$\vec{OA}/|\vec{OA}| =$$

$$(\cosh_s \cos p_s, -\cosh_s \sin p_s, \sinh_s), \quad (17)$$

因此

$$\vec{BA}/|\vec{BA}| =$$

$$(\cosh_s \cos p_s, -\cosh_s \sin p_s, \sinh_s). \quad (18)$$

4.2 实验过程及结果

采用一块边长约 35 cm, 焦距为 15 m 的球面小定日镜将太阳光反射到漫反射板上得到聚焦光斑。漫反射板边长为 35 cm, 在 400 ~ 800 nm 波段的平均反射率为 98.2%。使用一部 CCD 相机, 在完全相同的相机参数下分别拍摄漫反射板上的光斑图像、没有光斑时漫反射板的图像以及太阳图像。记录下拍摄时的太阳直射辐射值。拍摄太阳图像时, 在镜头前安装了沈阳汇博光学技术有限公司生产的光学密度(optical density)等于 4 的滤光片。在拍照的同时, 用全站仪测量定日镜中心和光斑中心的三维坐标以及全站仪坐标系中太阳的高度角、方位角, 从而计算光线在定日镜上的入射角 α 及余弦效率 $\cos\alpha$ 。实验条件和设备参数如表 2。

表 2 实验条件和设备参数

Table 2 Test conditions and device parameters

Date and Time	6/3/2015 9:38 AM (Beijing time)
Location	Changchun, China
Direct normal irradiance/(W · m ⁻²)	870
Reflectivity of the heliostat	0.83
Reflectivity of the receiver	0.982
Size of the receiver/m	0.35 × 0.35
Area of heliostat reflective surface/m ²	0.120 5
Neutral density filter attenuation factor for beam image	1
Neutral density filter attenuation factor for sun image	19 055
Resolution of the CCD camera	1 236 × 1 628
Pixel size of the CCD/μm	4.40 × 4.40

实验中拍摄的图像如图 8, 其中(a)是光斑图像, (b)是环境光图像, (c)是太阳图像。光斑能流密度分布的测试结果如图 9。

测得的全站仪坐标系中光斑中心的三维坐标为(0.53 m, 10.91 m, -0.02 m), 定日镜中心的三维坐标为(-3.93 m, -0.47 m, -0.65 m), 太

阳的高度角和方位角分别为 $h_s = 54^\circ 58' 16''$, $p_s = 2^\circ 27' 18''$ 。从而计算得到定日镜上光线入射角 $\alpha = 38.4^\circ$, 余弦效率 $\cos\alpha = 0.783 6$ 。边长为 35 cm 的漫反射板在图像中所占像素个数是 $1\ 054 \times 1\ 054$, 因此光斑图像中像素边长与光斑尺寸的对应关系为 $k = 0.35/1054 = 3.321 \times$

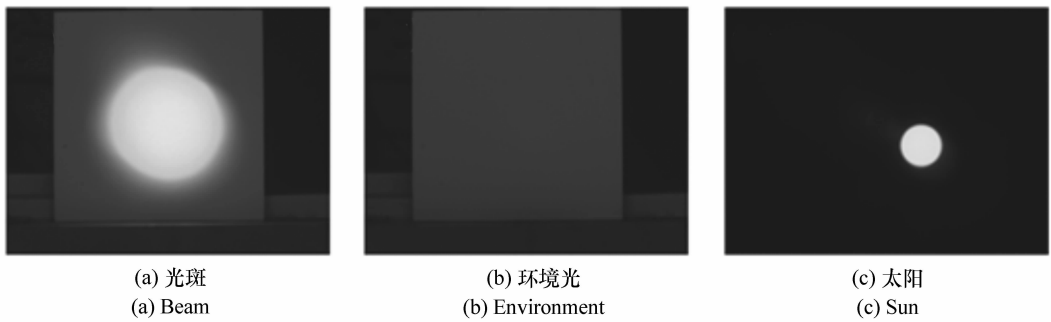


图8 CCD相机拍摄的图像

Fig.8 Images taken by a CCD camera

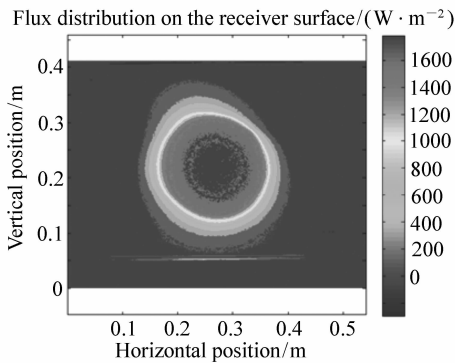


图9 光斑能流密度分布

Fig.9 Flux density distribution of the beam

10^{-4} m/pixel。滤光片衰减比取值 19 055,测得的光斑总能量为 $E_{\text{beam_total}} = 70.62$ W。而光斑能量理论计算值为 $E_r = \rho_h E_{\text{DNI}} S_h \cos \alpha = 68.18$ W。二者的相对误差为 3.5%,该误差在实际应用的可接受范围内。

实验得到的测量误差是在当前实验条件下得

到的结果,不具有普遍性,其目的是验证该能流密度测量方法的有效性。实际应用中,由于选用的设备不同、吸热塔较高以及其他客观不确定因素,测量误差也会不同。

5 结论

进一步评估了一种新型的测量太阳能热发电系统聚焦光斑能流密度分布的方法,分析了其误差源;使用该方法测量漫反射板上的聚焦光斑能流密度分布并得出光斑总能量,通过比较测得的光斑总能量与理论计算的光斑总能量,得出在当前实验条件下测得的光斑总能量及能流密度分布的相对误差为 3.5%,该误差在估计的最大误差范围内,也在实际应用的允许范围内,证明了该能流密度测量方法的可行性。

参考文献:

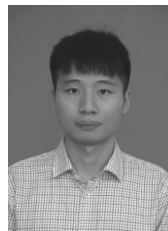
- [1] 韩雪冰,魏秀东,卢振武,等. 太阳能热发电聚光系统的研究进展[J]. 中国光学,2011,4(3):233-239.
HAN X B,WEI X D,LU ZH W, *et al.*. Review of concentration system in solar thermal power plant[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(3):233-239. (in Chinese)
- [2] IMENES A,STEIN W,HINKLEY J, *et al.*. Ray tracing and flux mapping as a design and research tool at the National Solar Energy Centre[C]. ANZSES Conference 2006(Australia and New Zealand Solar Energy Society), Canberra, Australia, September 13-15,2006;S06-81.
- [3] BALLESTRIN J. A non-water-cooled heat flux measurement system under concentrated solar radiation conditions[J]. *Solar Energy*,2002,73(3):159-168.
- [4] BALLESTRÍN J,MONTERREAL R. Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation[J]. *Energy*,2004,29(5-6):915-924.

- [5] BALLESTR N J, VALERO J, GARC A G. One-click heat flux measurement device[C]. Proceedings of the Solar PACES 2010; Perpignan, France, September 21-24, 2010.
- [6] BALLESTR N J. Heat flux measurement on CSP[C]. 4th SFERA Summer School, Hornberg Castle, Germany, May 15-16, 2013.
- [7] ULMER S, L PFERT E, PF NDER M, *et al.*. Calibration corrections of solar tower flux density measurements[J]. *Energy*, 2004, 29(5-6):925-933.
- [8] GÖHRING F, BENDER O, R GER M, *et al.*. Flux density measurement on open volumetric receivers[C]. Proceedings of Solar PACES 2011; Granada, Spain, Sept. 20-23, 2011.
- [9] RÖGER M, HERRMANN P, EBERT M, *et al.*. Flux density measurement on large-scale receivers[C]. Proceedings of Solar PACES 2011, Granada, Spain, Sept. 20-23, 2011.
- [10] 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.
DAI J M, LIU Y, YU T H. Development of flux density distribution measurement system based on CCD[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(11):1507-1511. (in Chinese)
- [11] 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.
DAI J M, LIU Y. Measurement and analysis of flux density distribution for spot focused by concentrator [J]. *J. Applied Optics*, 2008, 29(6):917-920. (in Chinese)
- [12] HO C K, KHALSA S S. A photographic flux mapping method for concentrating solar collectors and receivers[J]. *J. Solar Energy Engineering*, 2012, 134(4):041004.
- [13] HO C K, KHALSA S S, GILL D, *et al.*. Evaluation of a new tool for heliostat field flux mapping[J]. *Solar PACES*, 2011, Granada, Spain, September 20-23, 2011.
- [14] NAOR G, GOLDWINE G, HAYUT R, *et al.*. Flux measurement system using IR camera[C]. Proceedings of the Solar PACES 2010; Perpignan, France, September 21-24, 2010.
- [15] 戴贵龙, 郭永辉. 一种大聚光比聚集太阳能流密度分布的红外反射测量法[J]. *光学学报*, 2014, 34(7):0712004.
DAI G L, GUO Y H. An infrared reflection measurement method to measure concentrated solar flux distribution of high concentrated ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7):0712004. (in Chinese)
- [16] 肖君, 魏素, 魏秀东, 等. 塔式太阳能热发电系统聚焦光斑能流密度的检测方[J]. *光学学报*, 2015, 35(1):0112003.
XIAO J, WEI S, WEI X D, *et al.*. Solar flux measurement method for concentrated solar irradiance in solar thermal power tower system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1):0112003. (in Chinese)

作者简介:



魏素(1991—),女,湖北十堰人,硕士研究生,2013年于华中科技大学获得学士学位,主要从事塔式聚光系统中聚焦光斑能流密度分布的测量方面的研究。
E-mail:wei_huster@163.com



肖君(1986—),男,湖北黄冈人,博士,助理研究员,2010年于南开大学获得学士学位,2015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,主要从事太阳能聚光中光学检测方面的研究。E-mail:xiaojun_nk@163.com