

聚光器吸热管表面辐射能流密度的检测方法

李建昌^{1,2}, 王成龙^{1*}, 王森^{1,2}, 孙婷婷^{1,2}

¹兰州交通大学国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070;

²兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070

摘要 提出一种基于 CCD 相机和双朗伯靶的能流均匀性测量系统和方法。系统有两块朗伯靶, 其中一块是固定的水冷朗伯靶, 靶中心开孔处装有一个用来获得区域灰度值的热流探测器, 另一块是可移动朗伯靶, 用于拍摄没有探测器的光斑图像。所提方法可以直接获得探测器区域的像素灰度值, 使得测量过程简单精确。详细阐述了测量原理和聚焦光斑灰度图像能流密度分布提取的整个过程, 并搭建了平台, 测量了多块小型定日镜的光斑能流分布, 验证了所提方法的正确性和可行性。通过重复性实验和误差分析, 结果表明, 所提方法检测的峰值能流密度误差小于 2.4%, 所提方法可用于线性菲涅耳聚光系统二次聚光器开口平面处吸热管表面的能流分布检测。

关键词 非线性光学; 能流密度; 光热耦合性; CCD 相机; 像素灰度值; 光斑灰度图像

中图分类号 TK514

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.191903

Detection Method for Radiant Energy Flow Density on Condenser Heat-Absorbing Tube Surface

Li Jianchang^{1,2}, Wang Chenglong^{1*}, Wang Sen^{1,2}, Sun Tingting^{1,2}

¹National Engineering Research Center for Technology and Equipment Technology of Environmental Deposition, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

²Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract This paper presents an energy flow uniformity measurement system and method based on CCD camera and dual Lambertian target. The system has two Lambertian targets, one of which is fixed and water-cooled. An heat flow detector at the center opening of the target is used to obtain the regional gray value. The other is a movable Lambertian target, which is used to capture spot images without a detector. The proposed method can directly obtain the pixel gray value of the detector area, making the measurement process simple and accurate. In this paper, the measurement principle and the entire process of extracting the energy flow density distribution of the gray images of the focus spot are described in detail. The platform is built and the spot energy flow distribution of multiple small heliostats is measured, verifying the correctness and feasibility of the proposed method. It can be seen from repeatable experiments and error analysis that the peak energy flow density error detected using the proposed method is less than 2.4%. The proposed method can be used for the energy flow distribution detection on the surface of the heat-absorbing tube at the opening plane of the secondary condenser in a linear Fresnel concentrator system.

Key words nonlinear optics; energy flow density; photothermal coupling; CCD camera; pixel gray value; spot grayscale image

OCIS codes 190.4870; 250.0040; 310.6860

收稿日期: 2020-01-03; 修回日期: 2020-02-18; 录用日期: 2020-02-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB626800)、兰州交通大学优秀科研团队资助项目(201703)

* E-mail: clwang@mail.lzjtu.cn

1 引言

线性菲涅耳式(LFR)系统是聚光太阳能热发电系统中的一种,在供暖、制冷及发电中具有广泛的应用前景^[1]。在LFR太阳能热发电系统中,接收器表面聚焦光斑能流密度的测量是一项非常重要的工作,能流密度不仅是评价聚光系统性能的主要参数,也是优化跟踪控制系统和镜场的重要指标^[2]。Riffelmann等^[3-4]开发了2种能检测抛物面槽式聚光器能流的方法:采用抛物槽式热通量扫描仪(PARASCAN),它是一种能快速直接探测聚光器表面能流的测试仪器;采用相机标定法,该方法可以快速简单地获得集热管表面的光斑轨迹图像,同时还可以检测安装位置错误引起的光学误差。刘颖等^[5-8]通过有限元分析并利用蒙特卡罗光线追迹法(MCRTM)计算了碟式聚光器的能流密度分布,开发了一套基于CCD工业相机间接测量碟式聚光器能流分布的检测系统。戴贵龙等^[9]采用基于红外测温的红外反射测量法测量了碟式集热器的能流密度。Ho等^[10-12]利用摄影能流(PHLUX)法测量了塔式聚光系统的光斑能流分布。赵金龙等^[13]考虑余弦损失等影响因素,利用蒙特卡罗光线追迹法建立模型,具体计算了线性菲涅耳聚光系统集热管表面的光斑能流分布。

目前,关于线性菲涅耳系统的吸热管表面辐射能流密度的测量还没有一套具体的测量系统。本文基于PHLUX法和图像处理的思想,提出了一种可应用于线性菲涅耳热发电系统二次聚光器开口平面处集热管表面聚焦光斑能流密度检测的新方法。传统的间接法测量成本高、误差也大,而线性菲涅耳系统中聚光器吸热管表面的能流分布对集热管和镜场性能有着重大意义,高效精确测量能流分布对线性菲涅耳系统来说极为重要。所提方法采用两块朗伯靶。一块是固定的水冷朗伯靶,中心有一个圆孔用来安装热流传感器;另一块是可移动朗伯靶,用于拍摄没有传感器的光斑图像。这种设计可以直接获得传感器区域的灰度值,能够对吸热管表面能流分布进行精准测量,使测量误差更小,为线性菲涅耳系统聚光设备的优化设计与评价提供了依据。

2 检测系统

检测系统装置如图1所示,主要由CCD相机、固定水冷朗伯靶(中间开孔装有一个热流传感器)、滑轨式移动朗伯靶、中性密度滤光片及计算机(PC)

等部分组成。固定水冷朗伯靶安装在聚光器下表面,滑轨式移动朗伯靶可线性滑动。CCD工业相机的有效像素为300万,为了调节CCD曝光量防止饱和及溢出及CCD像元在强光条件下的线性输出,测量时在CCD相机透镜前安装一块中性密度滤光片和衰减片。

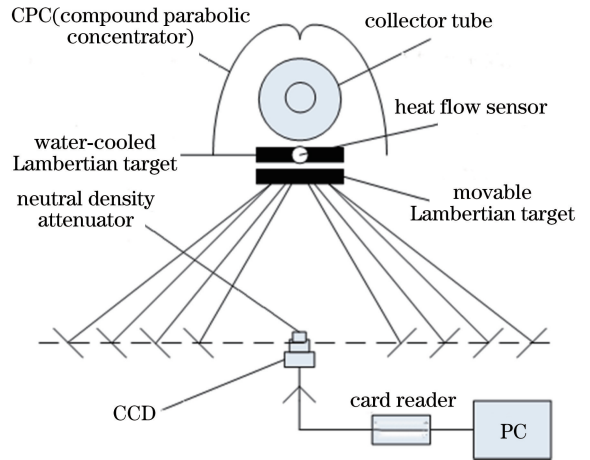


图1 LFR系统集热管表面光斑能流分布测量装置
Fig. 1 Light spot energy flow distribution measurement device on collector tube surface of LFR system

3 能流密度检测方法简介

3.1 系统方案

太阳光经一次反射镜反射后聚焦在滑轨式移动反射靶面上,利用CCD相机拍摄靶面上的光斑图像。由于相机响应和光斑亮度具有线性关系,而光斑亮度和反射到朗伯靶上的光斑能流是呈正比的,因此只要知道相机像素灰度值与能流密度的比例因子 k ,就可由光斑灰度图像得到朗伯靶上的能流分布,从而得出集热管表面的能流。设定好CCD相机的参数(焦距、光圈等),再根据当时太阳的辐照度(DNI)和太阳灰度,标定相机像素灰度值与能流密度的比例因子 k ,从而由光斑图像得到光斑的能流密度。为了进行测量,首先用CCD相机拍摄水冷朗伯靶中心热流传感器的照片,通过图像处理获得相机中传感器对应的像素位置,每隔一段时间后记录水冷朗伯靶中心传感器的读数;然后将滑轨式可移动朗伯靶移动到水冷朗伯靶的中心,以遮挡热流传感器,同时用CCD相机拍摄移动朗伯靶上的光斑图像;拍摄完成后,将可移动的朗伯靶尽快移动到系统边缘。

3.2 测量原理

图2为基本测量原理图,其中 r 为接收靶到相

机的距离, ϵ 为像元 i 相对于相机入瞳的张角。太阳光经镜场中一次反射镜反射后聚焦在朗伯靶上, 用 CCD 相机拍摄靶面上的光斑图像, 其中 A_R 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, 小面积元 $A_{R,i}$ 从镜场反射镜上接收到的辐照度为 $E_{R,i}$ (单位为 W/m^2)。因此只要将像元 i 记录的像素灰度值 $P_{CCD,i}$ 变换成接收靶上小面积元 $A_{R,i}$ 所处位置从镜场接收到的辐照度 $E_{R,i}$, 就可以得到接收靶上的能流。

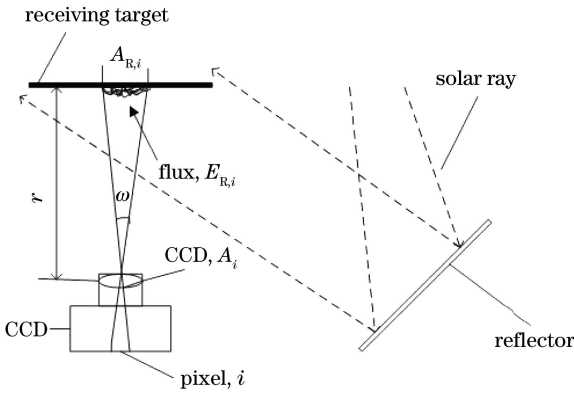


图 2 基本测量原理图

Fig. 2 Schematic of basic measurement principle

由于接收靶表面具有漫反射属性, 而且相机响应和光斑亮度呈线性关系, 因此各个方向的靶面亮度与反射到朗伯靶表面的能流密度是呈比例的。假设对应的 CCD 相机中热流传感器的像素数是 N , 则比例因子 k 可以表示为

$$k = \frac{\Phi_{\text{detector}}}{P_{\text{detector}}} = \frac{E_{\text{detector}} \sum_{i=1}^N A_{R,i}}{\sum_{i=1}^N P_{\text{detector},i}}, \quad (1)$$

式中: Φ_{detector} 为热流传感器接收到的总能流; P_{detector} 为热流传感器的像素灰度值; E_{detector} 为热流传感器的读数。因此任意像元 i 对应的辐照度 $E_{R,i}$ 为

$$E_{R,i} = k \frac{P_{CCD,i}}{A_{R,i}} = \frac{P_{CCD,i}}{A_{R,i}} \times \frac{E_{\text{detector}} \sum_{i=1}^N A_{R,i}}{\sum_{i=1}^N P_{\text{detector},i}}. \quad (2)$$

在应用透视校正和透镜畸变校正之后, 接收器区域 $A_{R,i}$ 上任意像元 i 在 CCD 像素平面上是相等的, 可推导出

$$\sum_{i=1}^N A_{R,i} = NA_{R,i}. \quad (3)$$

结合(2)、(3)式, 可以得出

$$E_{R,i} = \frac{P_{CCD,i}}{\sum_{i=1}^N P_{\text{detector},i}/N} \times E_{\text{detector}}, \quad (4)$$

式中: $\sum_{i=1}^N P_{\text{detector},i}/N$ 为热流传感器得到的光斑图像上的平均像素值。(4) 式只是像元 i 的灰度值函数。如果接收器上的辐照度相对较低, 那么由于环境光反射, 朗伯靶上能接收到大量的不可忽略的辐照度。因此, 为了保证测量的准确性, 应使用同一部 CCD 相机拍摄朗伯靶上没有辐照能流(仅有环境光)的目标图像, 并且在计算过程中必须排除该部分的影响。基于这个额外的考虑, (4) 式可改写为

$$E_{R,i} = \frac{P_{CCD,i} - P_{CCD_ambient,i}}{\sum_{i=1}^N (P_{\text{detector},i} - P_{CCD_ambient,i})/N} E_{\text{detector}} A_{R,i}, \quad (5)$$

式中: $P_{CCD_ambient,i}$ 为仅有环境光时朗伯靶表面在任意像元 i 处的像素灰度值。对所有小像元区域通量求和得出朗伯靶上总的能流, 表达式为

$$\Phi_M = \sum_{j=1}^M \frac{P_{CCD,i} - P_{CCD_ambient,i}}{\sum_{i=1}^N (P_{\text{detector},i} - P_{CCD_ambient,i})/N} E_{\text{detector}} A_{R,i}, \quad (6)$$

式中: M 为朗伯靶上光斑图像的像素总数。

4 光斑能流密度分布检测

4.1 实验装置

实验装置如图 3 所示, 测试光斑由多块平面小定日镜(焦距为 15 m, 尺寸为 30 cm × 30 cm)聚焦而成。由于紫铜具有优异的导热性能, 因此利用紫铜板制作了一块 2 mm 厚的朗伯靶, 尺寸为 30 cm × 30 cm。在紫铜板的外表面涂有硫酸钡膜, 形成朗伯表面, 如图 4 所示。

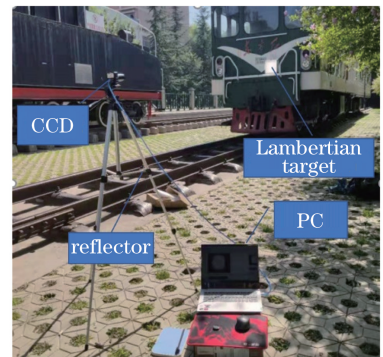


图 3 实验装置图

Fig. 3 Diagram of experimental device



图4 朗伯靶表面

Fig. 4 Surface of Lambertian target

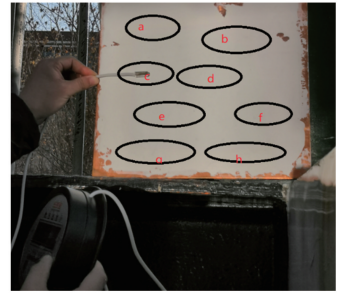


图5 标定测试图

Fig. 5 Calibration test chart

在测试之前,首先对朗伯靶表面的反射特性和 CCD 相机镜头进行严格标定,使得在整个系统的测量过程中靶面均匀性保持一致。通过对朗伯靶表面各个位置区域的光斑亮度进行多次标定测量,保证 CCD 相机在远场测量时所拍摄到的靶面各个区域

位置的光斑亮度是均匀分布的。同时也为了保证光斑灰度值的线性响应,测量了单个定日镜和多个定日镜分别作业时的光斑灰度值,确定了测量时灰度值的线性响应。标定测试如图 5 所示,测试标定结果如表 1 所示。

表 1 测试标定结果

Table 1 Test calibration result

Test area	a	b	c	d	e	f	g	h
$E_{R,i} / (W \cdot m^{-2})$	6002	6002	6010	6015	6013	6008	5998	5998

在不同的时间段(不同的季节、每天不同的时间段),光的响应强度是不同的。为了使 CCD 像元信号强度在任意时间段保持线性响应,测量时在 CCD 镜头前再放置一块衰减片(减光片)以保证在不同时间段强光下的 CCD 像元信号响应在光谱响应特性范围内是线性的,从而不会影响到测量的结果。在实验中,一块普通透镜的透光率为 92%,随后在透镜上加入衰减片,透光率从加入 1 块衰减片的 17% 变到 2 块衰减片的 6%。测试的衰减片透光率如图 6 所示,可以看出,衰减片光学性质稳定,呈线性变化,能够很好地保证 CCD 像元信号的线性响应。

计算机中。利用 Matlab 中图像选取函数读入朗伯靶表面拍摄到的光斑图像,得到的聚焦光斑图如图 7 所示。然后调用灰度函数就可以得到聚焦能流光斑灰度图,如图 8 所示。

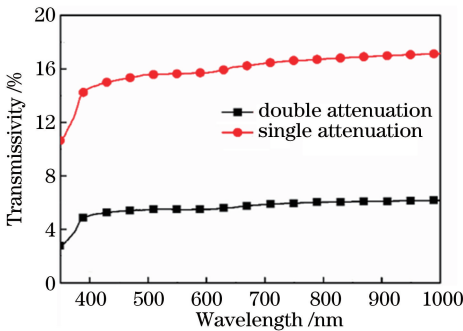


图 6 衰减片透光率测试图

Fig. 6 Transmissivity test chart of attenuation sheet

4.2 光斑灰度图的提取

通过集热管表面光斑实验,获取拍摄的集热管表面光斑图像,拍摄完成后(滤光片衰减比为 1000)将 CCD 相机拍到的光斑图像以点阵图形式保存在

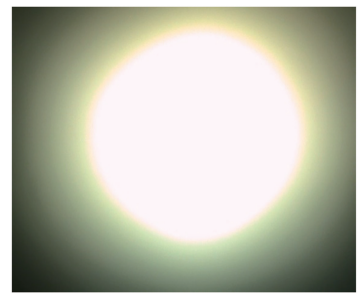


图 7 光斑图像

Fig. 7 Spot image



图 8 光斑图像灰度图

Fig. 8 Gray image of spot image

为了能够更直观地观测靶面光斑图像的灰度分布信息,在 Matlab 中调用灰度直方分布图函数得到

靶面上的光斑灰度分布直方图,如图 9 所示。可以看出,灰度级越靠近 0 的区域,其中像素点个数越多,这说明在中心灰度级低的区域分布着大量的能流。

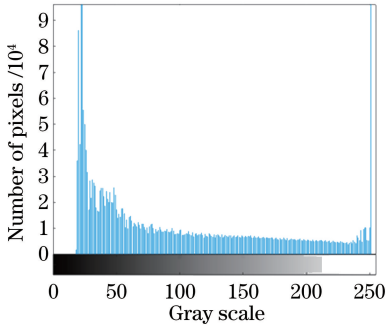


图 9 聚焦光斑图像灰度分布直方图

Fig. 9 Histogram of gray distribution of focus spot image

4.3 光斑灰度图二值化处理

在图像预处理过程中,阈值化处理是图像特征提取的一个必要过程。按照灰度级对像素集进行划分,从划分的像素集中得到每个子集,从而形成一个与目标物体相对应的区域,各个区域内部具有相一致的属性,而相邻区域不具有这种一致属性。在靶面聚焦光斑灰度图的基础上,分割阈值取 20,在 Matlab 中调用阈值分割函数对聚焦光斑灰度图进行阈值分割^[14]。阈值为 20 时的分割图如图 10 所示。



图 10 阈值为 20 的分割图

Fig. 10 Split graph with a threshold of 20

4.4 聚焦光斑能流密度分布提取

在靶面聚焦光斑灰度图和阈值分割图的基础上,调用 Matlab 中的网格采样点函数,然后再根据 CCD 相机像素灰度值与聚焦光斑能流密度的比例因子 k 计算出聚焦光斑像素灰度值所对应的能流密度 E 。最后再利用三维曲面绘制函数绘制出集热管表面聚焦光斑能流密度分布图,如图 11 所示。图 12 为光斑能流密度在朗伯靶上的投影,图 13 为光斑能流密度在 x 方向上的投影,可以看出,光斑中心能流密度较为集中,能流较高,而边缘部分相对较低。

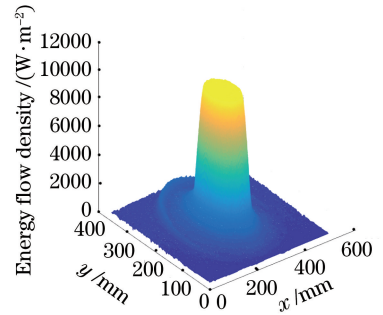


图 11 聚焦光斑能流密度分布图

Fig. 11 Energy flow density distribution map of focus spot

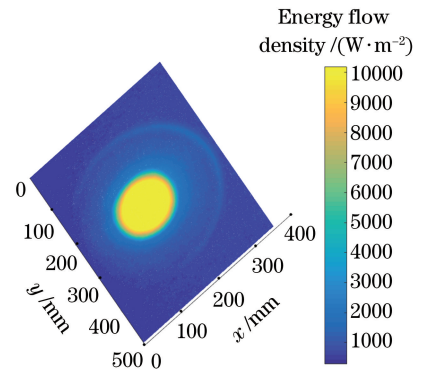


图 12 光斑能流密度在靶面上的投影分布图

Fig. 12 Projection distribution map of energy flow density of spot on target surface

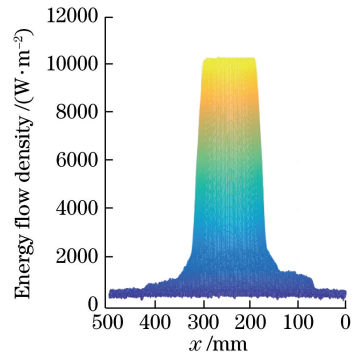


图 13 x 方向上的聚焦光斑能流密度分布图

Fig. 13 Energy flow density distribution map of focus spot along x -direction

5 结果对比分析

为了验证所提方法的准确性,采用蒙特卡罗光线追迹法对 LFR 系统集成热管的能流密度分布进行模拟。蒙特卡罗光线追迹法通过计算每条光线的入射轨迹和落点,仿真模拟出聚光器集热管表面上的光斑能流分布。在 Matlab 中利用蒙特卡罗光线追迹法仿真 LFR 聚光特性的流程方法主要参考文献 [5]。LFR 系统光斑能流密度分布曲线近似高斯分

布,中间高、边缘低,能流分布曲线的实验结果和模拟结果基本吻合。

为了进一步验证实验的准确性,采用多通道热流传感器(Hukseflux-SBG01,北京时阳电子科技有限公司)对朗伯靶面上的光斑能流峰值进行直接测量。在实验中,当 CCD 相机拍摄完接收靶上的光斑图像后,马上用热流传感器对靶面上的能流进行测量,以确保同一时刻下的误差源(CCD 暗电流、太阳直射辐照度、余弦夹角等)尽可能小。通过对实验进行多次重复性测量,求得光斑平均能流峰值为 10672 W/m^2 ,所提方法所测得的光斑能流密度为 10523 W/m^2 。经过对比验证可发现,所提 LFR 系统聚焦光斑能流分布的测试方法具有较高的测量精度,可广泛用于其他聚光系统。

6 结 论

基于 PHLUX 法和图像处理的思想,提出了一种间接检测线性菲涅耳聚光系统光斑能流分布的检测方法。详细介绍了测量方法的原理和聚焦光斑灰度图像能流密度分布提取的整个过程,并对所提方法的检测结果进行了验证分析。结果表明,所提方法测得的峰值能流密度与利用直接法的热流传感器所测得的结果的相对误差小于 2.4%。所提方法操作简单、测量误差相对较小,既可以用于大聚光比的太阳能热发电系统,也可用于小聚光比(如线性菲涅耳)太阳能热发电系统中,在未来具有良好的发展前景。

参 考 文 献

- [1] Gao F, Sun C Q, Liu Q G. The status and trends of solar energy utilization [J]. World Science and Technology Research and Development, 2001, 23(4): 35-39.
高峰,孙成权,刘全根. 太阳能开发利用的现状与发展趋势[J]. 世界科技研究与发展, 2001, 23(4): 35-39.
- [2] Wang C L, Ma J, Fan D W. Arrangement and optimization of mirror field for linear Fresnel reflector system[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 78-82.
王成龙,马军,范多旺. 线性菲涅耳式聚光系统的镜场布置与优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 78-82.
- [3] Riffelmann K J, Neumann A, Ulmer S. Performance enhancement of parabolic trough collectors by solar flux measurement in the focal region [J]. Solar

Energy, 2006, 80(10): 1303-1313.

- [4] Amina B, Miloud A, Samir L, et al. Heat transfer enhancement in a parabolic trough solar receiver using longitudinal fins and nanofluids [J]. Journal of Thermal Science, 2016, 25(5): 410-417.
- [5] Liu Y, Dai J M, Sun X G. Calculation method of flux distribution on focal plane in parabolic concentrators [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2007, 28(10): 1049-1054.
刘颖,戴景民,孙晓刚. 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.
- [6] Liu Y, Dai J M, Lang Z G, et al. Finite-element analysis for flux distribution on 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分布的有限元分析[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1775-1778.
- [7] Dai J M, Liu Y. 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.
- [8] Dai J M, Liu Y, Yu T H. 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.
- [9] Dai G L, Guo Y H. An infrared reflection measurement method to measure concentrated solar flux distributions of high concentration ratio[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0712004.
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.
- [10] Ho C K, Khalsa S S. A photographic flux mapping method for concentrating solar collectors and receivers[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2012, 134(4): 041004.
- [11] Ho C K, Gill D D, Khalsa S S, et al. Evaluation of a new tool for heliostat field flux mapping [J]. Proceedings of SolarPACES, 2011, 505: 20-23.
- [12] 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.
- 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法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112003.
- [13] Zhao J L, Li L, Cui Z J, 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.
- [14] Wang J J, Wang X. Detection method for energy flux density distribution of Fresnel lens focal spot[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(6): 902-905.
- 王进军, 王侠. 菲涅尔透镜聚焦光斑能流密度分布检测方法[J]. 半导体光电, 2016, 37(6): 902-905.