

塔式太阳能热发电站圆月夜聚光实验研究*

王楠^{1,2,3,4}, 王心愉^{2,5}, 孙飞虎^{1,2,3,4}, 郭明焕^{1,2,3,4†}

(1. 中国科学院太阳能热利用及光伏系统重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院电工研究所与五星太阳能公司太阳能热利用技术联合研究中心, 北京 100190;
5. 太原理工大学, 太原 030024)

摘要: 在塔式太阳能热发电系统中, 吸热器采光面上的聚光能流密度分布的测量对优化整个系统的光热性能有着重要意义。本文提出一种基于月光聚光信息的塔式电站定日镜场聚光能流密度分布的间接测量方法。主要介绍 2018 年 9 月 24 日晚在延庆塔式电站开展的两种对月聚光实验: 一种是通过塔上布置的照度计标定电荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 相机拍摄的光斑图像, 得到定日镜场聚光光斑的照度分布; 另一种是使聚光光斑扫描过照度计, 得到不同时刻的照度计数值, 通过高斯拟合得到聚光光斑的照度分布。将聚光光斑的照度分布与月光测光站测得的月光法向直射照度对比, 得到塔上聚光光斑的相对能流密度分布。实验结果表明, 通过月光聚光实验, 可以得到塔式电站的聚光光斑的相对能流密度分布 (即聚光比分布), 为后续依据太阳和月亮之间的亮度分布关系, 转换为日光聚光能流密度分布提供实验数据支持。

关键词: 塔式太阳能热发电; 聚光能流密度分布; 月光聚光实验; 照度计; CCD 相机

中图分类号: TK513

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2019.01.003

Experimental Study of Moonlight Concentration of a Solar Tower Power Plant in the Full Moon Night

WANG Nan^{1,2,3,4}, WANG Xin-yu^{2,5}, SUN Fei-hu^{1,2,3,4}, GUO Ming-huan^{1,2,3,4}

(1. Key Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Joint Laboratory, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences and Guangdong Five Star Solar Energy Co., Ltd, Beijing 100190, China; 5. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In the solar thermal tower power generation system, the measurement of concentrated flux distribution on the receiver aperture is of great significance for optimizing the solar thermal performance of the whole system. In this paper, an indirect measurement method was proposed based on moonlight concentration for the concentrated solar flux distribution of the heliostat field of a tower power plant. Two moonlight concentrating experiments carried out at Yanqing Solar Tower Power Plant in Beijing in the night of September 24, 2018, were introduced: one was to obtain the illuminance distribution of the concentrated lunar image taken by a CCD camera and calibrated through the illuminometers arranged on the tower; another was to obtain the illuminance distribution of the concentrated image by moving the image through the fixed illuminometers and then reconstructing the lunar image from the measured illuminance values at different times by Gaussian fitting. And then the relative illuminance distribution of the concentrated lunar image on the tower was obtained by comparing the illumination distribution with the direct normal illumination of the moonlight measured by the moonlight measuring station. The moonlight concentrating experiments showed that the relative flux distribution (ie, the concentration ratio distribution) of the concentrated lunar image of the tower power plant can be obtained, which provided experimental data support for the subsequent conversion to the solar flux distribution according to the brightness distribution relationship between the sun and the moon.

Key words: solar thermal tower power; concentrated solar flux density distribution; moonlight concentration experiment; illuminometer; CCD camera

* 收稿日期: 2018-11-04 修订日期: 2018-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61671429)

† 通信作者: 郭明焕, E-mail: guominghuan@mail.iee.ac.cn

0 前 言

在塔式太阳能热发电系统中,吸热器采光面上的聚光能流密度分布的测量对优化整个系统的光热性能有着重要意义,不仅是评价定日镜场和吸热器性能的重要参数,还可以优化各个定日镜在采光面的跟踪目标点、控制采光面上的能流密度分布,避免吸热器因温度过高而损坏。

现有太阳能热发电系统聚光光斑能流密度测量的方法可分为三类:直接测量法^[1-2]、间接测量法^[3-9]、用实验数据作为支撑的仿真算法^[10]。直接测量法是直接使用能流探测器(热流计)测量接收面的能流密度,通过数据插值得到聚焦光斑的能流密度。间接测量法则使用摄影系统(CCD相机、红外热像仪等)拍摄接收靶上的光斑图像,然后通过图像处理得到接收靶上的能流密度分布。仿真算法以实验数据作为依据,通过基于“蒙特卡罗”的光线追迹法、“锥体光学法”计算出光斑的能流密度。

直接测量法只能测量特定点处的能流密度,而且测量时间长、空间分辨率低。与直接法相比,间接测量法需要的热流计数量较少,空间分辨率高。但使用相机拍摄和反射面的非朗伯特特性会引入误差。直接测量法和间接测量法都必须在吸热器工作的时候测量,而且需要高温防护或者是复杂的冷却结构;仿真算法依赖于多种先验的实测结果,可用于聚光能流密度分布的辅助测量,但不能成为基础测量方法。

国外一些研究机构用圆月进行聚光实验,但是仅限于根据测量结果来调整镜面面型^[11],估计镜面光学精度^[12]或者是实测光斑与模拟光斑进行对比,探索优化光斑能流密度的方法^[13],并没有进行能流密度的测量。

本文提出基于月光聚光信息的塔式电站定日镜场能流密度分布的测量方法。由于月球与太阳有相似的角直径,圆月与太阳相对于地面上观测点的张角约为 0.5° ,从地球上,太阳和月亮一样大。圆月光束在地面上的法向直射辐照度约为太阳的百万分之一。因此一般假设月亮和太阳具有相似的亮度分布,月光光斑能流密度分布近似为高斯分布。因此在圆月夜进行月光定日镜场聚光实验,通过塔上布置的若干照度计标定 CCD 相机拍摄的光斑图像,得到聚光光斑的照度分布;或者是将光斑扫描过照度计,得到不同时刻的照度计数值,通过高斯拟合

得到聚光光斑的照度分布。然后与月光测光站测得的月光法向直射照度对比,得到塔上聚光光斑的相对能流密度分布,即聚光比分布。聚光比分布与特定时刻(太阳的高度角、方位角与圆月高度角、方位角分别相等的时刻)的太阳法向直射辐照度相乘,得到日光聚光光斑的能流密度分布。实验过程不影响定日镜场白天的工作运行;测量过程不影响吸热器的正常工作;而且月光是冷光源,不需要高温防护,不需要复杂的冷却结构,避开了直接测量中央高强度能流密度的困难。因此可以用月光代替日光来测量能流密度,获得定日镜场聚光能流密度分布的规律特征。

本文主要介绍通过 2018 年 9 月 24 日晚在延庆塔式电站开展对月聚光实验来获得塔式电站聚光光斑的相对能流密度分布。

1 实验设施

1.1 月光测光站

如图 1,月光测光站由方位-俯仰双轴跟踪器及其搭载的 CCD 相机、长焦镜头和弱光照度计探头等组成。CCD 相机用于拍摄月亮图像,根据拍摄的图像监测月光追踪器追踪月亮的准确度,其中 CCD 相机和长焦镜头固定在月光测光站上,拍摄的照片通过数据线传送到电脑。弱光照度计用于测量月光法向直射照度,其中照度计探头固定在月光测光站上,通过数据线将数据传送到照度计主机。月光测光站的控制系统包括上位机控制系统、中间层、月亮跟踪器本地控制系统和通讯 4 部分。本地控制系统通过无线网络与中间层可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)进行数据交换,上位机控制系统通过以太网和 PLC 进行数据交换。



图 1 月光测光站

Fig. 1 Moonlight metering station

1.2 塔式聚光集热系统

延庆塔式太阳能热发电站如图 2 所示，位于北京延庆八达岭地区，是由中国科学院电工研究所主持建成的中国第一座 MW 级的塔式太阳能示范电站。定日镜场共有 100 台定日镜，定日镜采用方位-俯仰双轴跟踪方式，每台定日镜的反射面积是 100 m²；共有三个吸热器，从下往上依次是直接过热水工质吸热器、熔融盐吸热器、自然对流循环水工质吸热器。本次月光聚光实验共用 63 台定日镜，如图 3 所示，带橙色标记的为参与月光实验的定日镜。

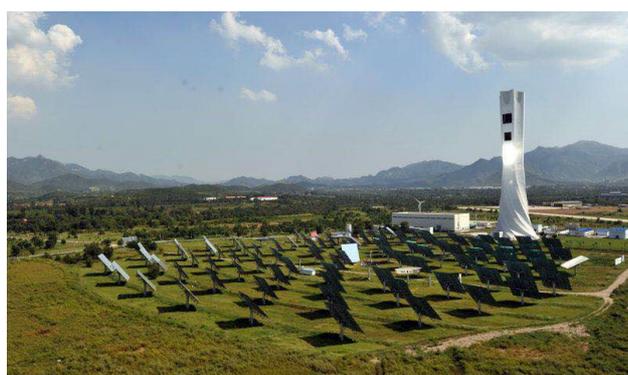


图 2 延庆塔式太阳能热发电站
Fig. 2 Yanqing solar thermal tower power plant

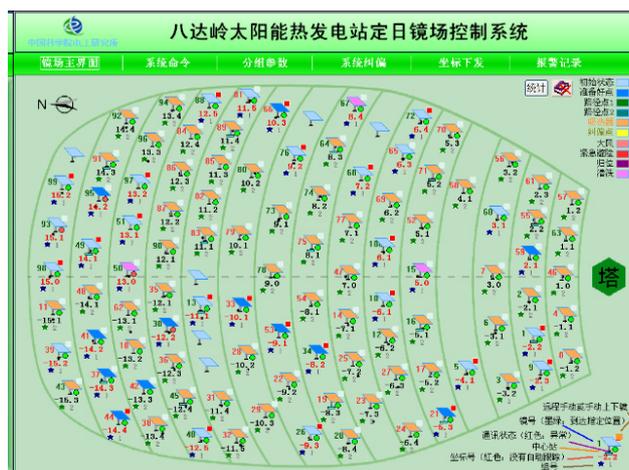


图 3 定日镜控制系统界面显示各个定日镜的工作状态
Fig. 3 The heliostat control system interface displays the working status of each heliostat

图 4 为 2018 年 9 月 24 日晚 21:21 在塔上照度计安装处向下拍摄的定日镜场照片。定日镜场控制系统包括上位机控制系统、中间层、定日镜本地控制系统和通讯 4 部分。上位机控制系统监控整个定日镜场的运行情况，通过中间层下发命令到定日镜本地控制系统中。



图 4 9 月 24 日晚 21:21 定日镜场照片
Fig. 4 Photograph of the heliostat field viewed from the tower at 21:21 on the night of September 24, 2018

1.3 聚光光斑测量系统

聚光光斑测量系统如图 5，由 CCD 相机、数据线、长焦镜头（焦距为 200 ~ 400 mm）、有良好漫射特性的白靶、7 个照度计探头、安装数据采集软件的计算机、安装图像采集软件的计算机组成。白靶长宽均为 4 m，CCD 相机和镜头安装在定日镜场中心线上，靠近 12 环定日镜，白靶上设置 4 个直角黑框用于标定像素与长度的转换因子。白靶及 7 个照度计探头的安装位置如图 6，其中， X_i 轴为东西方向的坐标轴， Y_i 为垂直于地面方向的坐标轴， O_i 为参考原点，7 个照度计探头安装在直接过热水工质吸热器上。白靶中心以及 7 个照度计探头的坐标见表 1。

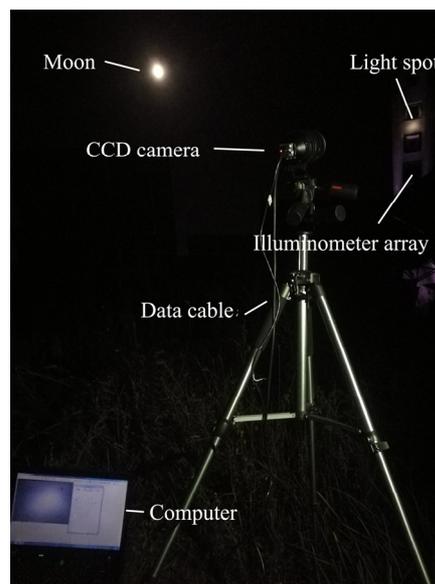


图 5 聚光光斑测量系统
Fig. 5 Measurement system for concentrated lunar image on the tower

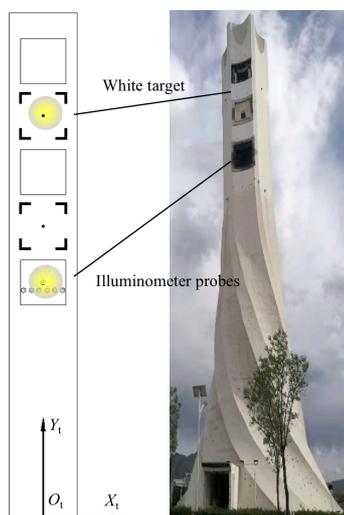


图 6 白靶及 7 个照度计探头的安装位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the installation positions of the white target and the seven illuminometer probes

表 1 白靶中心及照度计探头坐标

Table 1 Coordinates of the white target center and illuminometer probes

Position	X_i / m	Y_i / m
White target center	0.000	74.500
Probe 1	-1.950	65.135
Probe 2	-1.010	65.135
Probe 3	0.105	65.135
Probe 4	0.000	65.545
Probe 5	1.860	65.135
Probe 6	0.925	65.135
Probe 7	-0.105	65.135

2 实验过程

实验时, 首先将定日镜跟踪目标点设置到白靶中心, 定日镜将月光汇聚到白靶处, CCD 相机拍摄光斑图像, 通过通讯光缆将数据传输到安装有图像处理软件的电脑上并进行保存, 时间间隔设置为每 5 s 拍摄保存一次, 然后将目标点设置为 4 号照度计探头, 将光斑打到照度计探头处, 此时, 照度计探头测量光斑的照度计数值, 通过通讯光缆将数据传送到电脑上, 设置为每 5 s 采集保存一次。

以此同时, 月光测光站跟踪月亮, 月光测光站上的 CCD 相机拍摄月亮图像, 将数据通过图像数据线传送到电脑上, 每隔 5 s 拍摄保存一次; 弱光照度计测量月光法向直射照度, 其中照度计探头固定在月光测光站上, 通过数据线将数据传送到照度计主机上。

2018 年 9 月 24 日 23:54~9 月 25 日 0:05, 调整定日镜场跟踪目标点, 将聚光光斑从上到下扫描过 7 个照度计探头, 定日镜场跟踪目标点的 Y_i 轴坐标从 62 m 升到 68 m, X_i 轴坐标不变, 每个跟踪目标点的 Y_i 轴坐标相差 0.5 m, 得到 91 个照度计数值。

3 实验结果及分析过程

3.1 月光测光站数据分析

图 7 所示为 2018 年 9 月 24 日晚测得的月光法向直射照度。由图可知, 9 月 24 日晚 21:39~9 月 25 日 1:00, 月光法向直射照度基本维持在 0.2 Lx, 9 月 25 日 1:00 以后月光法向直射照度开始下降。9 月 25 日 1:31~2:00, 由于塔的阴影遮挡, 照度计探头测得的月光法向直射照度迅速下降; 2:00 以后, 随着月亮的移动, 塔的阴影偏离月光测光站, 数据恢复正常; 2:17 时, 由于云对月亮的遮挡, 测得的照度值迅速下降, 随后恢复正常。

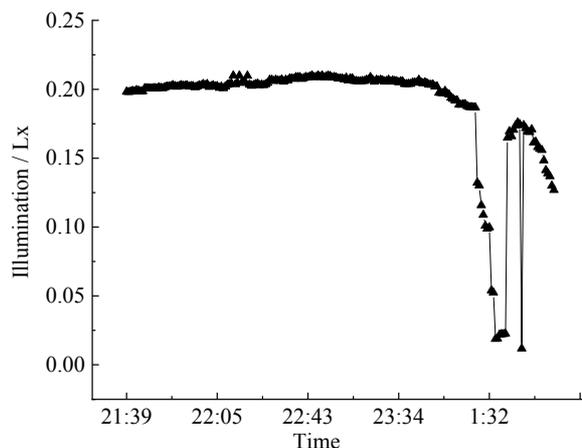


图 7 2018 年 9 月 24 日晚月光法向直射照度

Fig. 7 Direct normal illumination of moonlight on the night of September 24, 2018

图 8 为 2018 年 9 月 24 日晚拍摄的到的圆月图像, 以水平方向为 u 轴, 以竖直方向为 v 轴, 靶面中心为原点, 建立右手直角坐标系, 记录光斑与靶面中心的偏差。图 9 为月亮中心与图像中心的偏差, 靶面中心为原点, u 为光斑中心横坐标的值, v 为光斑中心纵坐标的值, 坐标单位为像素 (px)。可知, u 轴最大偏差为 -288 px, v 轴最大偏差为 -85 px, 其中图像横轴整体像素为 1280 px, 纵轴整体像素为 960 px, 则 u 轴最大偏差占比为 $|-288/1280|=22.5\%$, v 轴最大偏差为 $|-85/960|=8.85\%$, 因此月光测光站

追踪月亮较为准确。9 月 25 日 1:37~1:57 之间，由于塔的阴影将照度计完全遮挡，所以拍摄不到月亮图像，月亮中心到图像中心的误差为零。

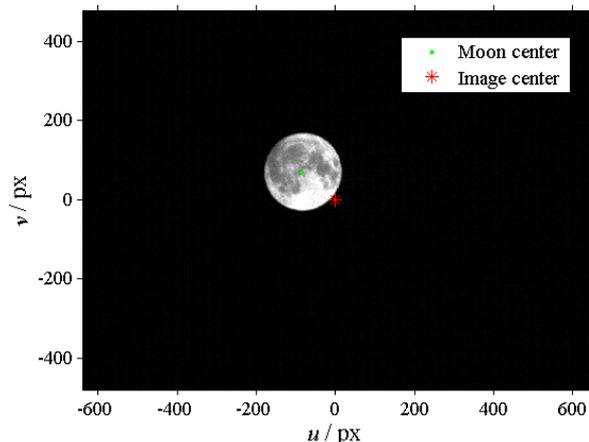


图 8 2018 年 9 月 24 日晚拍摄的月亮图像
Fig. 8 Moon image taken on the night of September 24, 2018

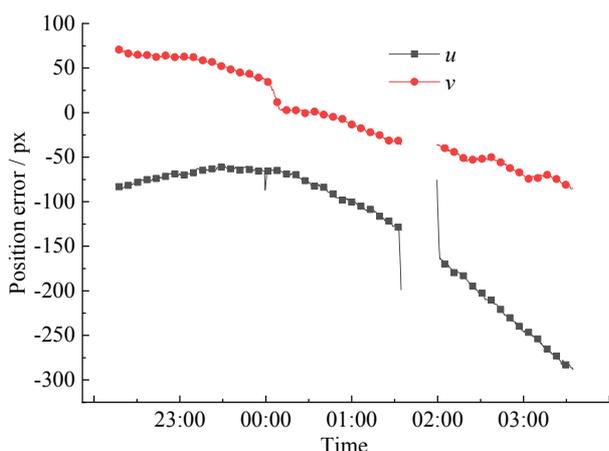


图 9 月亮中心与图像中心的偏差
Fig. 9 Deviation between the center of the moon and the center of the image

图 10 为 2018 年 9 月 24 日晚月亮的天顶角和方位角变化情况，天顶角以垂直地面为初始零度，方位角以正东方向为初始零度。可知从 9 月 24 日 21:39~9 月 25 日 3:34，月亮的方位角由 48.59°增大到 150.68°；9 月 24 日 21:39~9 月 25 日 0:00，月亮的天顶角从 55.84°减小至 46.25°，从 9 月 25 日 0:00~3:34，月亮的天顶角从 46.25°增大到 66.94°。9 月 25 日 0:00，月亮的天顶角最小，即月亮的高度角最大；此时月亮的方位角为 91.70°，月亮在定日镜场的正南方。

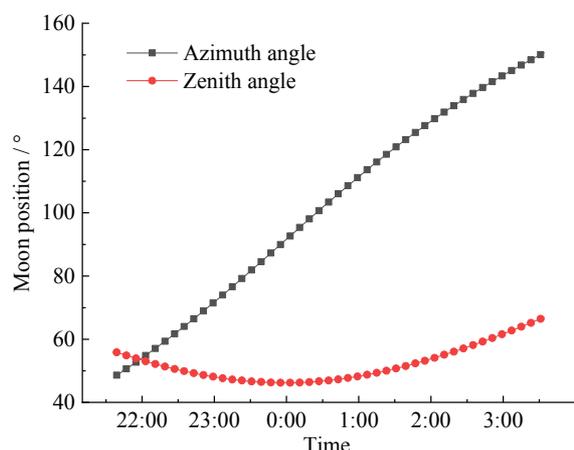


图 10 2018 年 9 月 24 日晚月亮天顶角和方位角变化
Fig. 10 Changes of the zenith angle and azimuth of the moon on the night of September 24, 2018

3.2 聚光光斑测量系统数据分析

图 11 为 9 月 25 日 1:59 拍摄的光斑图像，图 12a 为由图 11 得到的灰度图像。由多组数据拟合得到照度与灰度之间的转换公式为：

$$I(x, y) = 0.1358G(x, y) - 3.0527 \quad (1)$$

其中： I 为光斑各处的照度； G 为光斑图像各处的灰度，在 xy 平面的离散采样。拟合优度，拟合程度很高，证明照度与灰度呈线性关系。

图 12b 为由图 12a 经过换算得到的光斑图像的照度分布，图 12c 为光斑的聚光比分布。月光聚光光斑的聚光比分布 $CR(x, y)_{\text{moon}}$ 的计算公式为：

$$CR(x, y)_{\text{moon}} = I(x, y) / \text{DNI}_{\text{moon}} \quad (2)$$

其中： I 为光斑各处的照度，在 xy 平面的离散采样； DNI_{moon} 为月光法向直射照度。

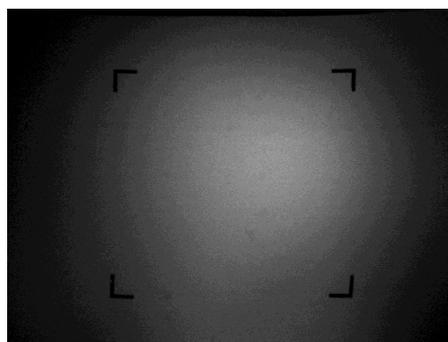


图 11 2018 年 9 月 25 日 1:59 太阳塔靶面上月光光斑图像
Fig. 11 Moonlight image on the target surface of the solar tower at 1:59 on September 25

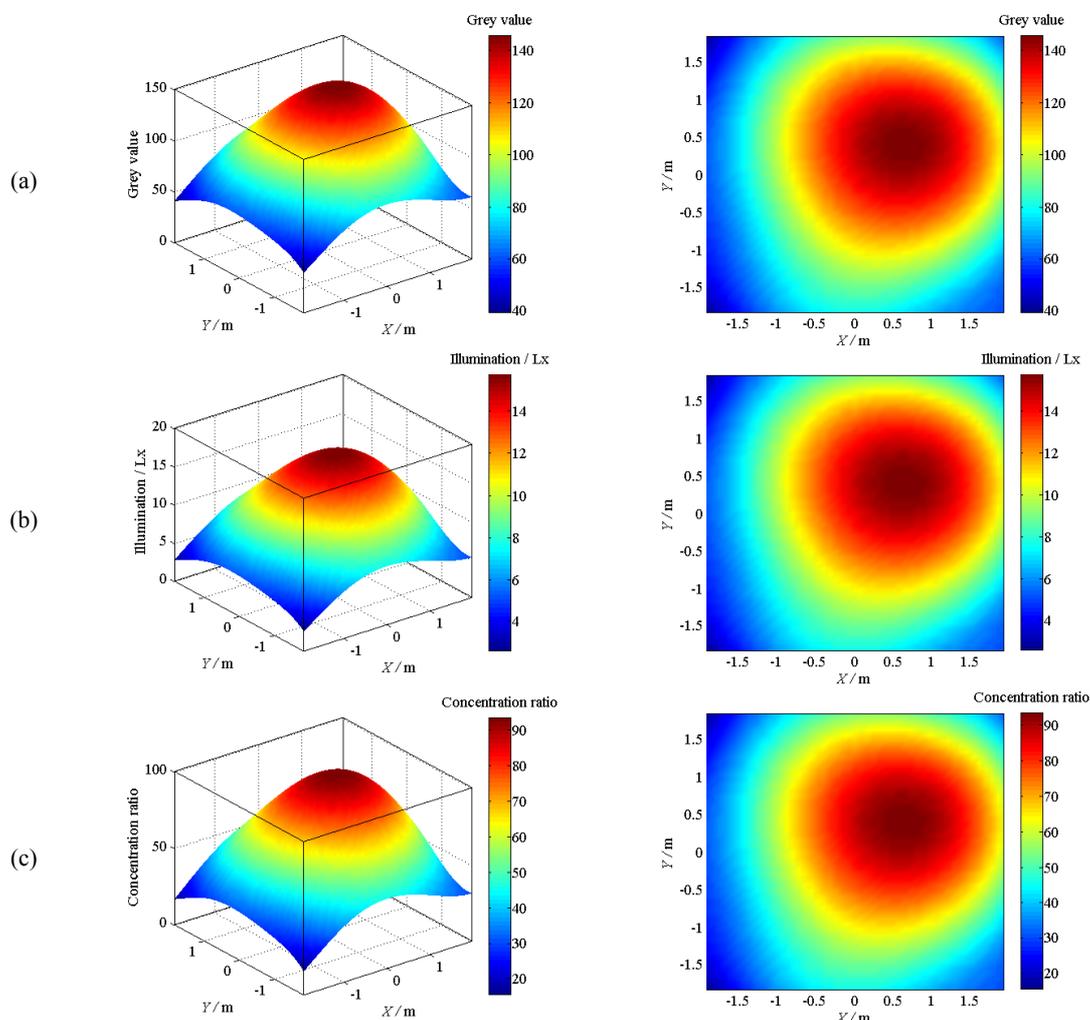


图 12 2018 年 9 月 25 日 1:59 月光光斑的灰度分布 (a)、照度分布 (b)、聚光比分布 (c)

Fig. 12 Gray value distribution (a), illumination distribution (b), and concentration ratio distribution (c) of moonlight image at 1:59 on September 25, 2018

2018 年 9 月 24 日 21:51、22:39 以及 9 月 25 日 0:29、0:52、1:59 和 2:35 对应的聚光比分布图像分别如图 13 所示, 沿 L1、L2 截取直线, 以对应的实际位置为横坐标, 聚光比大小为纵坐标, 画出图 14 和图 15。由图 14 可知, 光斑整体偏右; 由图 15 可知, 光斑整体偏上。

图 16 是 2018 年 9 月 24 日 21:51、22:39 及 9 月 25 日 0:29、0:52、1:59 和 2:35 对应的光斑的峰值聚光比、峰值照度以及 63 个镜子的平均余弦效率图, 由图可知, 峰值聚光比和峰值照度的变化趋势基本一致。9 月 24 日 21:51~9 月 25 日 0:52 时间段内, 峰值聚光比逐渐增大, 而后峰值聚光比逐渐降低。月光的法向直射照度由 9 月 24 日 21:31~9 月 25 日 0:53 逐渐增大, 而后逐渐降低; 9 月 24 日 21:39~9 月 25 日 0:29, 定日镜场的余弦效率逐渐增大, 9 月 25 日 0:29 以后, 定日镜场的余弦效率逐渐降低; 因

此 9 月 24 日 22:39、9 月 25 日 0:29、9 月 25 日 0:52 峰值聚光较大。9 月 25 日 1:59 定日镜场平均余弦效率较高, 但由于 9 月 25 日 1:31~9 月 25 日 2:00 塔的阴影遮挡, 部分镜面不能反射月光, 因此 9 月 25 日 1:59 光斑的峰值聚光比和峰值照度较低。

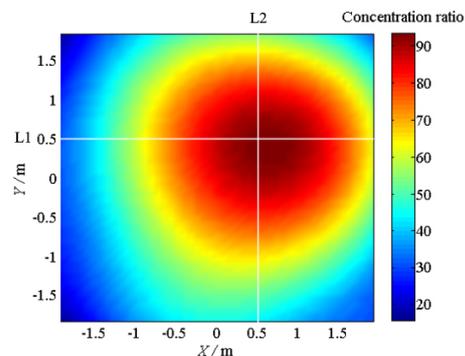


图 13 2018 年 9 月 25 日 1:59 月光光斑聚光比分布

Fig. 13 Concentration ratio distribution of moonlight image at 1:59 on September 25, 2018

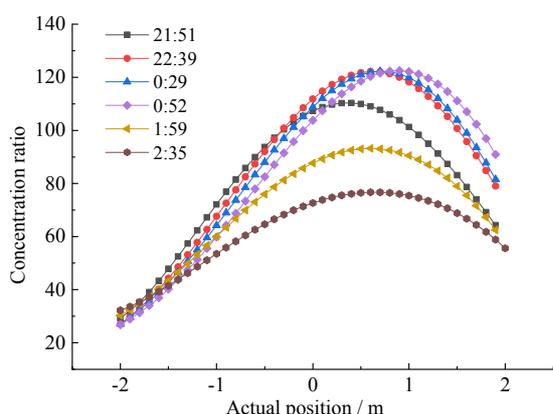


图 14 L1 截线上的聚光比分布
Fig. 14 Concentration ratio distribution on L1 line

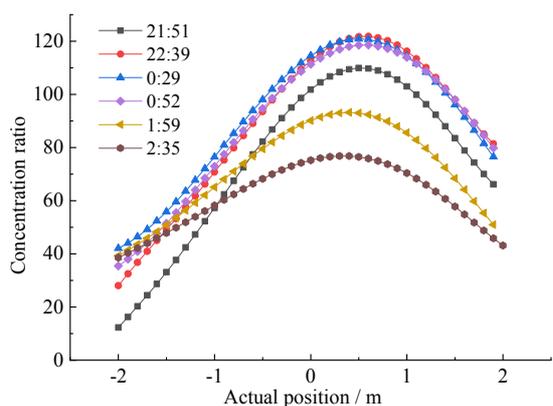


图 15 L2 截线上的聚光比分布
Fig. 15 Concentration ratio distribution on L2 line

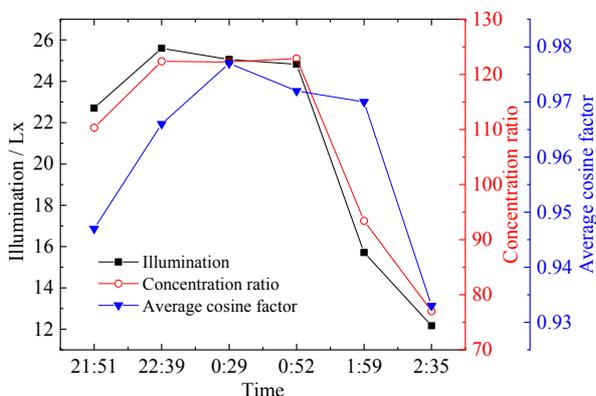


图 16 峰值聚光比、峰值照度和平均余弦效率
Fig. 16 Peak concentration ratio, peak illumination and average cosine factor

由 2018 年 9 月 24 日 23:54 ~ 9 月 25 日 0:05 扫描得到的 91 个照度计数数值高斯拟合出来的光斑图像如图 17 和图 18 所示, 拟合的高斯函数如式 (3):

$$f(x, y) = a \cdot \exp \left[- \left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $a=18.91$; $\sigma_x=-1.585$; $\sigma_y=1.945$; $x_0=0.3379$; $y_0=0.2471$ 。拟合优度 $R^2=0.9413$, 拟合程度高, 证明月光光斑照度值分布为高斯分布。

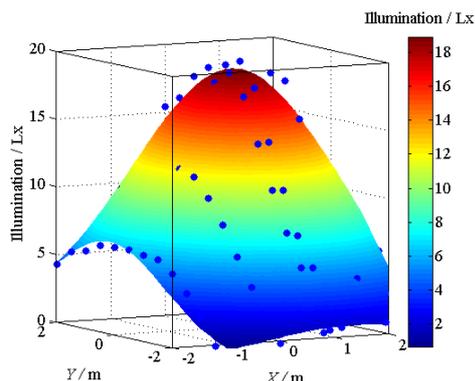


图 17 数据扫描点的分布及拟合图像
Fig. 17 Illumination on scanned points and the fitted image

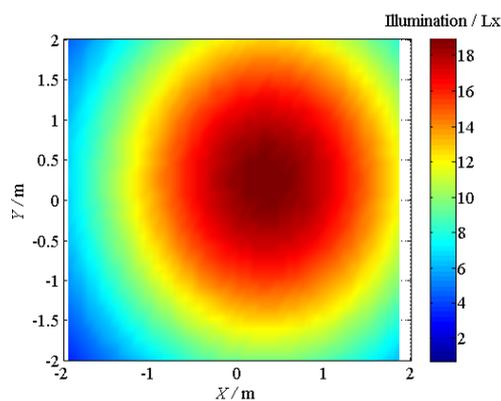


图 18 拟合光斑照度分布
Fig. 18 Illumination distribution fitted

图 19 为用 91 个扫描的照度值标定 9 月 24 日 23:45 的光斑图像得到的光斑照度分布。图 18 与图 19 相比, 光斑的形状及照度分布基本类似。但是由于扫描时月光的法向直射照度比 9 月 24 日 23:45 时要低, 因此扫描的峰值照度比 9 月 24 日 23:45 时的峰值照度低; 而且, 由于扫描的时间过长, 有 11 min, 聚光光斑会发生较大的变化, 因此拟合得到的光斑形状与 9 月 24 日 23:45 时得到的光斑形状存在少许差距。图 18 与图 19 在如图 13 所示的 L1 截线处对应的照度值如图 20 所示, 照度分布基本一致, 光斑偏右。

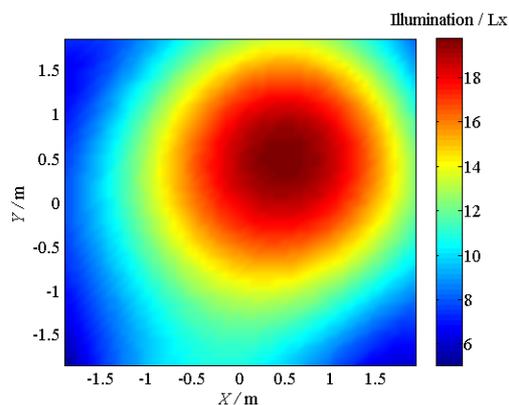


图 19 2018 年 9 月 24 日 23:45 光斑照度分布

Fig. 19 Illumination distribution of concentrated lunar image at 23:45 on September 24, 2018

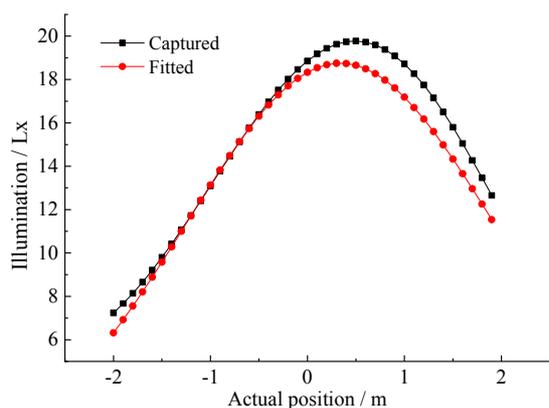


图 20 L1 截线上的照度分布

Fig. 20 Illumination distribution on L1 line

4 结 论

本文提出一种基于月光聚光信息的塔式电站定日镜场能流密度分布的间接测量方法，即圆月夜定日镜场对月聚光，在太阳塔的靶面上形成月光光斑，CCD 相机采集月光光斑灰度图像，利用靶面上的照度计标定得到月光光斑的照度分布，与地面月光测光站测得的瞬时月光法向直射照度比较，得到月光光斑的聚光比分布，即定日镜场的聚光比分布；定日镜场在聚光靶面的聚光比分布与太阳测光站测得的太阳法向直射辐照度相乘，便得到定日镜场对日光的聚光能流分布。

基于用月光代替日光的定日镜场聚光能流密度分布测量方法，于 2018 年 9 月 24 日晚在延庆塔式电站开展对月聚光实验，获得一些典型时刻、典型工况下塔式电站聚光光斑的能流密度相对比值分布。通过北京延庆太阳能塔式热发电站中秋节圆月夜的聚光实验，得到以下结果和结论：

(1) 月光聚光光斑图像的灰度与对应点之间的照度呈线性关系，因此可以利用照度计来标定月光聚光光斑，进而得到聚光光斑的照度分布。

(2) 聚光光斑相对于目标跟踪点整体偏右、偏上，可以为定日镜场跟踪纠偏提供数据支持。

(3) 由于定日镜场余弦损失、月光法向直射照度、塔的阴影遮挡三方面原因，9 月 24 日 21:51 ~ 9 月 25 日 0:52 时间段内，峰值聚光比逐渐增大，而后峰值聚光比逐渐降低。

(4) 2018 年 9 月 24 日 23:54 到 9 月 25 日 0:05，调整定日镜场跟踪目标点，将聚光光斑从上到下扫描过 7 个照度计探头，由得到的 91 个照度计数值高斯拟合出来的光斑照度分布图像与用 91 个照度计数值标定的 9 月 24 日 23:45 时的光斑图像得到的照度分布整体相似，拟合优度 $R^2 = 0.9413$ ，拟合程度高，证明月光光斑的照度值分布为高斯分布，也证明可以用光斑扫描照度计直接测量得到光斑的照度分布。

(5) 实验结果表明，通过月光聚光实验，可以得到塔式电站聚光光斑的能流密度相对比值分布，为日后转换得到对日聚光光斑能流密度分布提供实验数据支持。

致 谢

本论文研究成果受国家自然科学基金“基于月光聚光先验信息和实测边界能流信息的太阳能塔式电站聚光能流密度成像方法”课题 (No. 61671429) 资助，也感谢广东省引进创新创业团队计划资助 (No. 2013N070)。

参考文献：

- [1] BALLESTRIN J. A non-water-cooled heat flux measurement system under concentrated solar radiation conditions[J]. *Solar energy*, 2002, 73(3): 159-168. DOI: 10.1016/S0038-092X(02)00046-4.
- [2] OSUNA R, MORILLO R, JIMÉNEZ J M, et al. Control and operation strategies in PS10 tower plant[C]//Proceedings of the 13th Solar PACES, Seville, Spain: Solar PACES, 2006.
- [3] BALLESTRÍN J, MONTERREAL R. Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation[J]. *Energy*, 2004, 29(5/6):915-924. DOI: 10.1016/S0360-5442(03)00196-8.
- [4] GÖHRING F, BENDER O, RÖGER M, et al. Flux density measurement on open volumetric receivers[C]//Proceedings of the SolarPACES 2011. Granada, Spain: Solar PACES, 2011.
- [5] NEUMANN A, HOUSER R, PACHECO J. Concepts to measure flux and temperature for external central

- receivers[C]//Proceedings of the Joint Solar Engineering Conference. San Francisco: ASME, 1994: 595-603.
- [6] HO C K, KHALSA S S. A flux mapping method for central receiver systems[C]//Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability. Washington, DC, USA: ASME, 2011: 743-751.
- [7] 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. DOI: 10.1115/1.4006892.
- [8] HO C K, KHALSA S S, GILL D D, et al. Evaluation of a new tool for heliostat field flux mapping[C]//Proceedings of the SolarPACES 2011. Granada, Spain: SolarPACES, 2011.
- [9] NAOR G, GOLDWINE G, HAYUT R, et al. Flux measurement system using IR camera[C]//Proceedings of the SolarPACES 2010. Perpignan, France: SolarPACES, 2010.
- [10] BLANCO M, ALARCON D. Enertracer: A new computer tool for energy concentrating systems[C]//Proceedings of the Solar Thermal 2000 Renewable Energy for the New Millennium Conference. Sydney, Australia: STE, 2000: 87-93. GUESDON C, ALXNEIT I, TSCHUDI H R, et al. PSI's 1 kW imaging furnace—A tool for high-temperature chemical reactivity studies[J]. Solar energy, 2006, 80(10): 1344-1348. DOI: 10.1016/j.solener.2005.04.028.
- [11] HISADA T, MII H, NOGUCHI C, et al. Concentration of the solar radiation in a solar furnace[J]. Solar energy, 1957, 1(4): 14-16. DOI: 10.1016/0038-092X(57)90166-4.
- [12] HOLMES J T. Heliostat operation at the central receiver test facility, 1978-1980[J]. Journal of solar energy engineering, 1982, 104(3): 133-138. DOI: 10.1115/1.3266293.
- [13] SALOMÉ A, CHHEL F, FLAMANT G, et al. Control of the flux distribution on a solar tower receiver using an optimized aiming point strategy: application to THEMIS solar tower[J]. Solar energy, 2013, 94: 352-366.

作者简介:

王楠(1994-),女,硕士研究生,主要从事塔式太阳能聚光光斑能流密度测量技术研究。

郭明焕(1977-),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事太阳能热发电聚光技术研究。