

# 一种大聚光比聚集太阳能流密度分布的 红外反射测量法

戴贵龙 郭永辉

(福建工程学院生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350108)

**摘要** 为测量大聚光比聚集太阳能流密度分布,提出了一种基于红外热像仪和水冷朗伯靶的红外反射测量方法,并设计、研制了测量装置。在十六碟聚集器平台上,用该方法获得了清晰的聚集太阳能流分布红外图像。然后考虑太阳光锥、跟踪误差和面型误差,采用蒙特卡罗射线追踪法对该十六碟聚集器的聚集能流密度进行数值模拟。通过对比实验结果与数值结果,明确该十六碟聚集器的面型误差为 2.5 mrad。为测量大聚光比聚集能流密度分布和评价聚集器面型误差参数提供参考依据。

**关键词** 测量;太阳能;聚集器;红外反射测量法;蒙特卡罗射线追踪法

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0712004

## An Infrared Reflection Measurement Method to Measure Concentrated Solar Flux Distributions of High Concentration Ratio

Dai Guilong Guo Yonghui

(College of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350108, China)

**Abstract** In order to measure the concentrated solar flux distributions of high concentration ratio, an infrared reflection measurement (IRM) method that bases on thermal infrared imager and water-cooled Lambert target is proposed, and the corresponding experimental apparatus are manufactured. Through the experiment at a sixteen-dish concentrator (SDC), clear infrared temperature images on the water-cooled Lambert surface are obtained. Then, the concentrated solar flux distributions of the SDC are simulated by the Monte Carlo ray-tracing method (MCRTM), taking into account the solar cone, the tracking error, and the slope error. By comparing with the experimental results and the simulation results, a slope error parameter of 2.5 mrad is detected. The conclusions can be used for measuring the concentrated solar flux distributions of high concentration ratio and finding out the slope error parameters of the solar concentrators.

**Key words** measurement; solar energy; solar concentrator; infrared reflection method; Monte Carlo ray-tracing method

**OCIS codes** 120.5700; 240.0240; 300.6270; 350.5610

## 1 引 言

太阳能是一种丰富的可再生清洁能源。开发利用太阳能资源对节能减排,改善生态环境具有重要意义。通过聚集实现太阳能高温热转换是一种重要的太阳能利用方式。而通过实验测量,获得聚集太阳能流密度分布对聚集器的方案设计与性能优化、

吸热器的结构和传热分析设计十分关键。

测量聚集太阳能流密度分布方法有直接测量和间接测量两类。直接测量法将热流计(或热流计阵列)布置在聚集器焦平面上,直接测量聚集太阳能流密度;间接测量法将水冷朗伯靶布置在焦平面上,采用 CCD 相机和滤光片拍摄水冷朗伯靶上的太阳像,

**收稿日期:** 2014-01-02; **收到修改稿日期:** 2014-02-19

**基金项目:** 国家 973 计划(2009CB220006)、校科研启动基金(GY-Z13031)

**作者简介:** 戴贵龙(1983—),男,博士,讲师,主要从事太阳能利用方面的研究。E-mail: daiguilong611@126.com

通过数据处理获得聚集太阳能流密度分布。这两类研究方法均有广泛应用, Elsayed 等<sup>[1-2]</sup>分别采用热流计阵列测量了定日镜场的聚集太阳能流密度分布。Jaramillo 等<sup>[3]</sup>开发了一种平面结构热流计用于测量聚集太阳能流密度。Johnston<sup>[4]</sup>采用 CCD 相机和朗伯靶测量了开口面积 20 m<sup>2</sup> 碟式聚集器的聚集太阳能流密度分布。Ulmer 等<sup>[5]</sup>采用 CCD 相机和朗伯靶测量了定日镜场吸热器入口的聚集太阳能流密度分布。戴景民等<sup>[6]</sup>基于 CCD 相机和朗伯靶的间接测量方法, 测量了旋转抛物面聚光器焦平面和多个离焦平面的太阳能流密度分布。基于温度反演能流密度思路, 许文斌等<sup>[7]</sup>提出了一种红外成像测温的聚集太阳能流密度测量方法。

近年来, 随着太阳能高温热化学、热动力发电技术的发展, 太阳能转换温度和效率不断提高, 聚集器的聚光比也越来越大。直接测量法不适合测量大聚光比聚集太阳能流密度分布, 因为太阳能流密度容易超过热流计量程、甚至烧毁热流计探头。CCD 相机和朗伯靶的间接测量方法具有较好的适用性, 但是测量时需要在镜头前布置中性密度滤光片, 会对测量精度带来一定影响。同时需要十分专业的仪器装置标定 CCD 相机的灰度值与辐射能流密度值的函数关系, 数据处理比较复杂<sup>[5-6]</sup>。红外成像测温的聚集太阳能流密度测量方法需要耐高温聚光光斑接收屏, 接收屏在高温条件下容易氧化烧坏, 实验的重复性较差<sup>[7]</sup>。因此, 发展新型的大聚光比聚集太阳能流密度分布的测量方法十分重要。

太阳能辐射以可见光和近红外为主, 包含少量的远红外。在大聚光比条件下, 远红外太阳辐射能够被探测和识别。另一方面, 红外热像仪空间分辨率高, 数据处理简洁, 在红外景象拍摄<sup>[8]</sup>和红外辐照度测量<sup>[9]</sup>等方面有广泛的应用。本文提出一种基于红外热像仪和水冷朗伯靶, 通过直接反射聚集太阳光红外成像的红外反射测量(IRM)方法。

## 2 红外反射测量法

### 2.1 测量原理

红外反射测量法测量系统主要包括红外热像仪、水冷朗伯靶、热电偶及其数据采集与显示器等。其测量原理如图 1 所示, 朗伯靶固定在聚集器的焦平面, 朗伯表面朝向聚集的太阳辐射光束。朗伯表面后面连接一个靶盒, 冷却水从靶盒的一端流入, 从靶盒的另一端流出, 带走朗伯表面吸收的聚集太阳辐射能, 降低朗伯表面温度。同时, 热电偶阵列布置

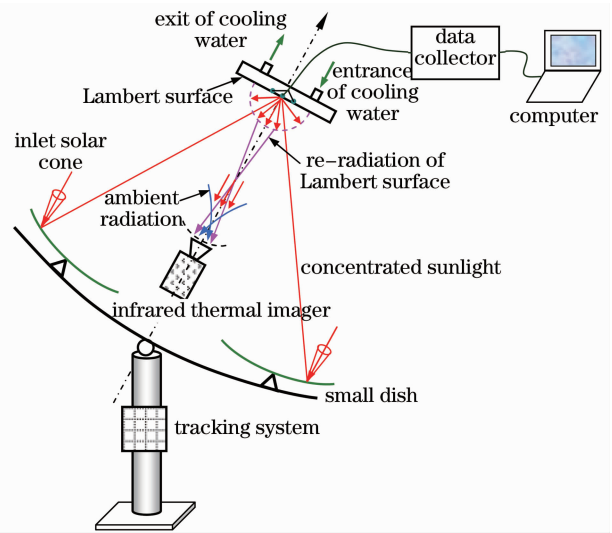


图 1 红外反射测量原理

Fig. 1 Principle of the infrared reflection measurement method

在朗伯表面的背面, 测量朗伯表面的温度。红外热像仪布置在朗伯表面的正前方, 接收朗伯表面漫反射的太阳辐射能, 获得红外温度图像。

进入热像仪的辐射能包括反射聚集太阳辐射能、朗伯表面自身的红外辐射能和环境辐射能三部分, 即红外热像仪显示的温度是由这三部分辐射能共同贡献的。在获得红外温度图像的基础上, 通过(1)式, 剔除朗伯表面自身的红外辐射能和环境辐射能, 可得到朗伯表面上正则化的聚集太阳能流密度分布, 即

$$C_{NE} = \frac{\epsilon_{ir} \sigma T_{IL}^n - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{\lambda} E_{b\lambda}(T_L) d\lambda - W_{sur}}{\max \left[ \epsilon_{ir} \sigma T_{IL}^n - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{\lambda} E_{b\lambda}(T_L) d\lambda - W_{sur} \right]}, \quad (1)$$

式中  $\epsilon_{ir}$  和  $T_{IL}$  分别为热像仪参考发射率以及显示的红外温度,  $n$  为指数, 由热像仪型号决定,  $\lambda_2$  和  $\lambda_1$  分别为热像仪响应光谱的上限和下限,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数, 为  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。  $W_{sur}$  为环境辐射能, 计算式为

$$W_{sur} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{\lambda, atm} E_{b\lambda}(T_{atm}) d\lambda, \quad (2)$$

式中  $\epsilon_{\lambda, atm}$  是环境的光谱发射率,  $E_{b\lambda}(T_{atm})$  是环境温度下的光谱辐射力函数。

### 2.2 可行性分析

如上所述, 进入红外热像仪的辐射能包含反射

聚集太阳辐射能、朗伯表面自身的红外辐射能和环境辐射能三部分能量。只有在接收的反射聚集太阳辐射能占优的条件下,红外热像仪才能得到有效测

量结果。为定量分析红外热像仪接收的总能量中反射聚集太阳辐射能的份额,定义反射聚集太阳辐射因子  $\chi_{SR}$ ,有

$$\chi_{SR} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda, atm} \rho_{\lambda} C_E F_{sc} E_{b\lambda}(T_{sun}) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda, atm} \rho_{\lambda} C_E F_{sc} E_{b\lambda}(T_{sun}) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{\lambda} E_{b\lambda}(T_L) d\lambda + W_{sur}}, \quad (3)$$

式中  $\rho_{L,\lambda}$ 、 $\epsilon_{L,\lambda}$  和  $T_L$  分别为朗伯表面的反射率和发射率及其表面温度,  $C_E$  为靶面能流聚光比,  $F_{sc}$  为太阳表面积与日地距为半径的球表面积之比,  $F_{sc} = 8.612 \times 10^{-5}$ ,  $T_{sun}$  为太阳光谱辐射等效温度, 其值为  $5762 \text{ K}^{[10]}$ 。  $\tau_{\lambda, atm}$  为大气对太阳辐射的光谱透过率, 跟气候环境、大气成分等因素有关。由于红外热像仪响应波段为大气窗口, 天气晴朗时, 透射率较大, 对标准 AM1.5 大气环境, 采用大气传输软件 MODTRAN 计算发现,  $7.5 \sim 13.0 \mu\text{m}$  波段的太阳光谱辐射透射率约为 0.8。

反射聚集太阳辐射因子  $\chi_{SR}$  与能流聚光比  $C_E$  的特征关系曲线如图 2 所示。计算参数取  $\rho_{L,\lambda} = 0.8$ ,  $T_{atm} = 300.0 \text{ K}$ ,  $\tau_{\lambda, atm} = 0.8$ ,  $\lambda_1 = 7.5 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 13.0 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出, 当  $C_E > 100$  时,  $\chi_{SR} > 0.88$ , 即反射聚集太阳辐射能的份额接近 90%。当  $C_E < 300$  时, 曲线十分陡峭, 随着  $C_E$  增加,  $\chi_{SR}$  显著增加; 当  $C_E \geq 300$  时, 曲线变得平坦, 随着  $C_E$  增加,  $\chi_{SR}$  增加不明显, 此时  $\chi_{SR} > 0.96$ 。当  $C_E$  一定时, 朗伯靶面温度  $T_L$  越低,  $\chi_{SR}$  越大。因此, 采用冷却水降低朗伯面温度, 减少其红外辐射能, 对提高  $\chi_{SR}$ , 改善测量效果有益。

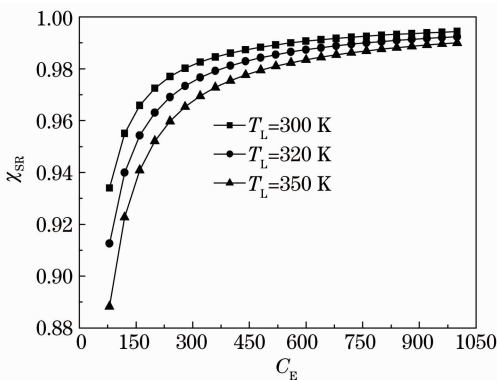


图 2 反射太阳能量因子与能流聚光比关系

Fig. 2 Solar energy factor of Lambert target as a function of energy concentration ratio

从图 2 可以看出, 当  $C_E > 100$  时, 反射聚集太阳辐射能的份额大于 90%, 能够被有效地探测、识别。因此, 用该红外反射测量方法测量大聚光比聚集能流密度分布 ( $C_E > 100$ ) 具有较好的可行性。

### 2.3 测量装置

根据红外反射测量原理, 研制了红外反射测量装置, 主要包括红外热像仪、水冷朗伯靶、热电偶及其数据采集与显示系统等三部分。

#### 1) 红外热像仪

实验采用 FLIR-SC620 型红外热像仪。该红外热像仪响应光谱范围为  $7.5 \sim 13.0 \mu\text{m}$ , 红外分辨率为  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ , 读数误差为  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 对象温度范围包括  $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $0 \text{ }^\circ\text{C} \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ , 最高可选的对象温度  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 该热像仪指数  $n \approx 4.09$ 。

#### 2) 水冷朗伯靶

由于紫铜具有优异的导热性能, 朗伯靶由 2 mm 厚紫铜板制成, 尺寸为  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 。在紫铜板的外表面(正对聚集太阳辐射)涂有硫酸钡膜, 形成朗伯表面。制作方法为将硫酸钡粉末加水搅拌, 制成较为稀硫酸钡浆液。然后为小勺将少许稀硫酸钡浆液盛在紫铜板表面, 用手摆动紫铜板, 使稀硫酸钡浆液均匀覆盖在紫铜板表面上, 然后倾斜紫铜板, 将

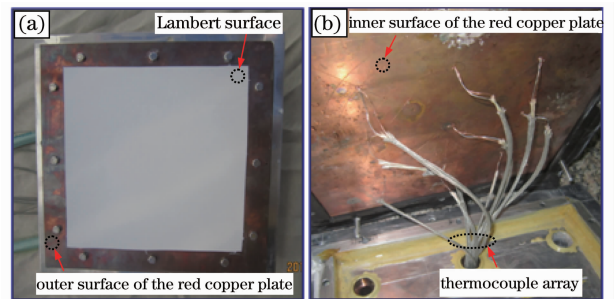


图 3 红外反射测量法的水冷朗伯靶。(a)朗伯表面; (b)热电偶阵列

Fig. 3 Water-cooled Lambert plate for the IRM method. (a) Lambert surface; (b) thermocouple array

多余的浆液流出紫铜板。晾干紫铜板上浆液,即制成硫酸钡朗伯表面。实验发现,用这种方法制成的硫酸钡朗伯表面硫酸钡膜极薄,平整和均匀性好,如图3(a)所示。

冷却水从靶背面一端的入口进入,从另外一端的出口流出,带走朗伯表面吸收的聚集太阳辐射能,降低朗伯表面的温度。

### 3) 热电偶及其数据采集与显示系统

为获得朗伯表面的真实温度,热电偶探头均匀布置在紫铜板内表面。本实验采用9根T型热电偶测量朗伯表面温度。热电偶镶嵌在紫铜板1.0 mm深的微孔内(紫铜板厚2.0 mm),沿两个同心圆环均匀布置(1根在圆心,4根均匀布置在第一个圆环上,另外4根均匀布置在第二个圆环上)。热电偶延长线从靶盒背面引出,连接到数据采集上和计算机显示器上,如图3(b)所示。

采用温控加热炉和红外热像仪测量了朗伯表面在红外热像仪响应波段的光谱发射。测量时,把朗伯表面样品放置在加热炉内容,通过温控系统设置加热炉工作温度,然后采用消光筒和红外热像仪,测量样品的红外温度,通过(4)式计算得到朗伯表面在红外热像仪响应波段的光谱发射率,即

$$\epsilon_{L,\lambda} = \frac{T_r^n - T_{amb}^n}{T_o^n - T_{amb}^n}, \quad (4)$$

式中  $T_r$  为样品的红外温度,  $T_o$  为加热炉设置温度,即为样品的真实温度,  $T_{amb}$  为环境温度,  $n$  为热像仪的红外指数,  $n \approx 4.09$ 。

由于朗伯表面不透明,在获得朗伯表面光谱发射率基础上,由(5)式即可计算其光谱反射率:

$$\rho_{L,\lambda} = 1.0 - \epsilon_{L,\lambda}, \quad (5)$$

式中  $\epsilon_{L,\lambda}$  为朗伯表面光谱发射率,见(4)式。

朗伯表面的反射率和发射率测量结果如图4所示。从图中可以看出,朗伯表面的光学性质稳定,反射率和发射率随温度的增加几乎不变,其中  $\epsilon_{L,\lambda} = 0.19$ ,  $\rho_{L,\lambda} = 0.81$ 。

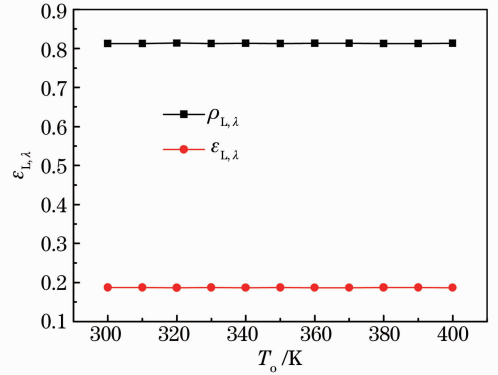


图4 朗伯表面的反射率和发射率随温度变化特性  
Fig. 4 Reflectivity of the Lambert surface as a function of the temperature

## 3 实验验证

### 3.1 实验细节

在十六碟聚集器上,通过上述测量装置,对该红外反射测量方法进行了实验验证。该十六碟聚集器由16个口径1.0 m,焦距3.25 m的小碟组成。16个小碟通过内外两圈安装在聚集器的桁架上,内圈有5个小碟,编号为1~5,外圈有11个小碟。编号为6~16,各小碟的位置参数见文献[11]。该聚集器有效聚光面积约11.4 m<sup>2</sup>。采用双轴跟踪,最大跟踪误差不大于3.0 mrad。

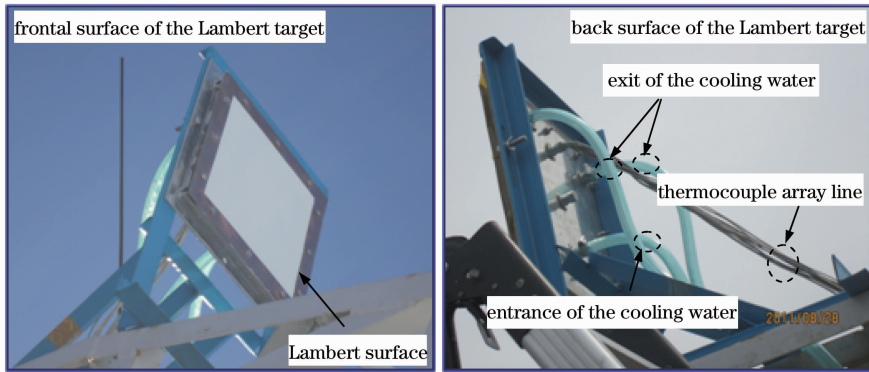


图5 红外反射测量法实验场景

Fig. 5 Experimental photograph of infrared reflection method

整个红外反射测量法的实验步骤可概述为:首先,将朗伯靶固定在十六碟聚集器的焦平面上,朗伯表面正对聚集太阳光束。热电偶延长线连接到数据

采集器和计算机显示器。同时开启水泵,让冷却水流经朗伯靶。随后,开启聚集器跟踪系统,跟踪对焦,将聚集太阳光束投射到朗伯表面。最后,将红外

热像仪正对朗伯表面,拍摄朗伯表面的红外温度图像。实验测量场景如图 5 所示。

通过拍摄,得到朗伯表面的太阳红外温度图像如图 6 所示。图中显示的太阳红外温度图像十分清晰,最高温度为 341.4 K (68.2 °C)。拍摄时,红外热像仪的参考反射率设置为 1.0,热电偶阵列显示朗伯表面的平均温度为 309 K,环境温度为 298 K。通过误差分析,测量结果的不确定度为 2.3% 左右<sup>[12]</sup>。

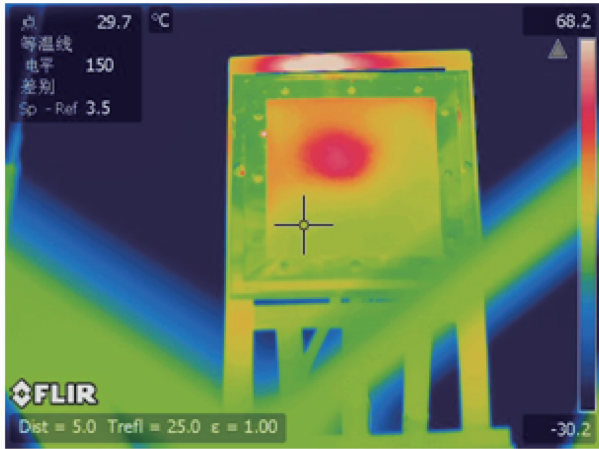


图 6 朗伯表面上的太阳红外温度图像

Fig. 6 Infrared solar imager displayed on the water-cooled Lambert surface

### 3.2 实验与模拟结果对比

由于十六碟聚集器由十六个小碟组成,结构相对复杂。为此,建立了一个系统坐标和十六个局部坐标系,在每个局部坐标系上描述对应小碟的表面方程和约束条件。然后通过坐标转换,将所有小碟的数学描述转换到系统坐标系。在此基础上,采用蒙特卡罗射线追踪法(MCRTM)对十六碟的聚集太阳能流密度分布进行模拟,考虑太阳光锥、边暗效应、跟踪误差和面型误差等因素。

面型误差指通过镜面的太阳光束实际反射方向与理想反射方向的偏差,是镜面加工、安装和表面清洁等因素的综合评价,如图 7 所示。在 MCRTM 中,采用高斯概率分布模型来描述面型误差<sup>[13]</sup>,为

$$\theta_{se} = \sqrt{(-2\sigma_{se}^2)\ln(1-R_\phi)}, \quad \varphi_{se} = 2\pi R_\psi, \quad (6)$$

式中  $R_\phi$ 、 $R_\psi$  分别是天顶角和圆周角的分布随机数,  $\sigma_{se}$  是面型误差特征数,单位是 mrad。对大多数聚集器,  $\sigma_{se}$  一般在 1.0~6.0 mrad 之间<sup>[14]</sup>。

采用 MCRTM 模拟十六碟太阳能聚集特性的程序流程见文献[10]。通过选取不同的面型误差特征数,得到不通过的能流密度分布曲线。为方便和

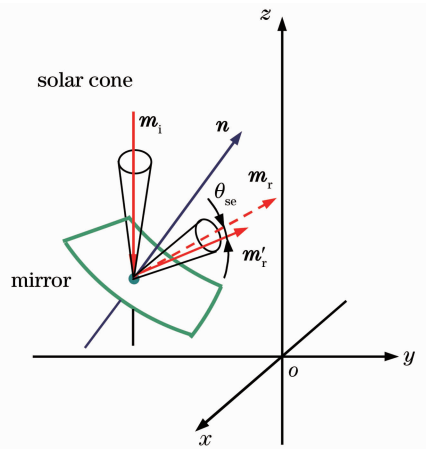


图 7 面型误差对镜反射方向的影响

Fig. 7 Influences of the slope error on the mirror reflection direction

实验结果对比,对模拟结果进行了正则化处理,即局部能流聚光比除以最大能流聚光比。图 8 对比了红外反射测量结果与模拟结果,其中实验结果是基于图 6 的红外温度图像,通过(1)式正则化处理得到的。

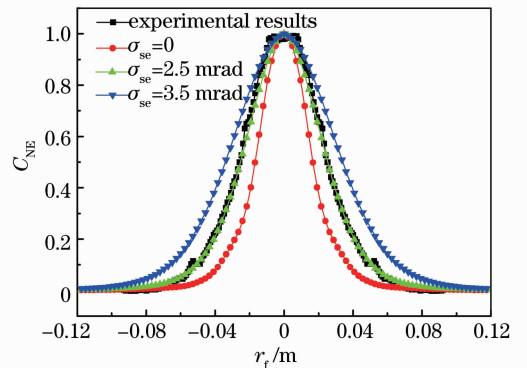


图 8 红外反射测量结果与 MCRTM 模拟结果对比

Fig. 8 Comparison between the IRM experimental results and the MCRTM simulation results

从图 8 中可以看出,十六碟聚集器聚集能流密度近似高斯分布,中间大,边缘小,光斑半径大约 6.0 cm。对比实验结果曲线和模拟结果曲线,可发现,当  $\sigma_{se} = 2.5$  mrad 时,模拟结果曲线与实验结果曲线吻合最好。由此,可认为该十六碟聚集器的面型误差约为 2.5 mrad。

## 4 结 论

通过原理设计、可行性分析和测量实践,证明红外反射测量法是测量大聚光比聚集能流密度分布的可行方法。根据相关资料和作者的认识,热流计直接测量法、CCD 相机间接测量法和红外反射测量法

三种测量聚集太阳能流密度分布的方法具有以下特点:

1) 热流计直接法能得到聚集能流密度的绝对值,但是受热流计量程限制,不合适测量大聚光比聚集能流密度。此外分辨率较低。

2) CCD 相机间接法通过选择不同厚度中性密度滤光片,能测量中高聚光比聚集能流密度分布,适应性较好。但是需要专业的仪器设备标定 CCD 灰度值与辐射能流密度的函数关系,数据处理比较复杂。此外,测量大聚光比聚集能流密度时,需要多块中性密度滤光片,影响测量结果精度。

3) 红外反射法数据处理直观、简单,可实现性好。但是仅适合测量大聚光比聚集能流密度分布(一般  $C_E > 100$ )。

总的来说,红外反射测量法是热流计直接法和 CCD 相机间接法两种传统测量聚集太阳能流密度分布方法的有益补充。

### 参 考 文 献

- 1 M M Elsayed, K A Fathalah, O M Ai-radghi. Measurements of solar flux density distribution on a plane receiver due to a flat heliostat [J]. *Solar Energy*, 1995, 54(6): 403-411.
- 2 J Ballestrin. A non-water-cooled heat flux measurement system under concentrated solar radiation conditions [J]. *Solar Energy*, 2002, 73(3): 159-168.
- 3 O A Jaramillo, C A Pérez-rábago, C A Arancibia-bulnes, C A Estrada. A flat-plate calorimeter for concentrated solar flux evaluation [J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(10): 2322-2328.
- 4 G Johnston. Focal region measurements of the 20 m<sup>2</sup> tiled dish at the Australian National University [J]. *Solar Energy*, 1998, 63(2): 117-124.
- 5 S Ulmer, E Lüpfer, M Pfänder, *et al.*. Calibration corrections of solar tower flux density measurements [J]. *Energy*, 2004, 29

(5-6): 925-933.

- 6 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.
- 7 Xu Wenbin, Lu Zhenwu. An Thermal Infrared Imaging Apparatus to Measure the Concentrated Solar Flux Distributions [P]. China, CN 101936771 A, [2011-01-05].  
许文斌, 卢振武. 红外成像测温式能流密度测量装置 [P]. 中国, CN 101936771 A, [2011-01-05].
- 8 Dong Jianing, Mu Da, Xu Chunyun, *et al.*. Projection optical system design of infrared scene simulator based on DMD [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 122202.  
董家宁, 牟达, 徐春运, 等. 基于 DMD 的红外景象模拟投影光学系统设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 122202.
- 9 Chen Liangzhi, Mu Da, Li Quanyong, *et al.*. Dual-color co-aperture infrared optical system design for irradiance measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 042202.  
陈灵芝, 牟达, 李全勇, 等. 双色红外共光路辐照度测量系统设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 042202.
- 10 John R Howell, Robert Siegel, M Pinar Menguc. *Thermal Radiation Heat Transfer* [M]. New York: Taylor & Francis, 2002. 530-545.
- 11 X L Xia, G L Dai, Y Shuai. Experimental and numerical investigation on solar concentrating characteristics of a sixteen-dish concentrator [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2012, 37(24): 18694-18703.
- 12 Dai Gguilong. *Research on Two-Stage Concentrating of Solar Energy and High Temperature Conversion* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.  
戴贵龙. 太阳能两级聚集与高温热转换的光热传输特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- 13 Y Shuai, X L Xia, H P Tan. Numerical study of radiation characteristics in a dish solar collector system [J]. *J Solar Energy Engineering*, 2008, 130(2): 021001.
- 14 D Buie, C J Dey, S Bosi. The effective size of the solar cone for solar concentrating systems [J]. *Solar Energy*, 2003, 74(5): 417-427.

栏目编辑: 何卓铭