

室内聚光测试系统的研究

赵会富^{1,2} 刘 华¹ 荆 雷^{1,2} 王 尧¹ 许文斌¹ 卢振武¹
〔¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电技术研发中心, 吉林 长春 130033
²中国科学院研究生院, 北京 100049〕

摘要 为弥补因太阳模拟器光线发散角大、测试口径小不适用于光伏聚光系统测试的缺陷, 设计了大口径、高平行度的室内聚光测试系统。另外还提出了一种新的聚光测试方法: 分立光谱局部测量法。首先选二阶菲涅耳聚光系统为测试对象, 利用单色光局部测量法测试该聚光系统的聚光效率, 然后利用各种单色光的权重与聚光效率计算聚光系统的平均聚光效率, 最后将实验结果与模拟结果进行对比分析。二阶菲涅耳聚光系统模拟聚光效率为 88.623%, 聚光测试系统测得聚光效率为 85.45%, 二者的聚光效率相差 3.173%, 透射比和光斑照度的均匀性均比较接近。聚光效率的差异主要来源于聚光系统的加工制作误差和测量误差。通过实验数据分析, 验证了室内聚光测试系统的科学性与可行性。室内聚光测试系统光线发散角为 0.267°, 与太阳光发散角相匹配, 出光口径为 145 mm, 可实现大口径聚光系统的性能测试。该系统结构简单、成本低, 在太阳能聚光领域内有广阔的应用前景。

关键词 非成像光学; 聚光测试系统; 菲涅耳聚光系统; 聚光比; 聚光效率

中图分类号 O435 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0622006

Study of Indoor concentration Test System

Zhao Huifu^{1,2} Liu Hua¹ Jing Lei^{1,2} Wang Yao¹ Xu Wenbin¹ Lu Zhenwu¹
〔¹Opto-Electronic Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and
Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China〕

Abstract Because of the large divergence angle and small test caliber, the solar simulator is not suitable for the test of photovoltaic concentration system. In order to make up this weakness, an indoor concentration test system with a large caliber and a high parallelism is designed. A new concentration test method discrete spectral local measurement method is proposed. Firstly, two-stage Fresnel concentration system is chosen as a test object and monochromatic light local measurement method is used to test its concentration efficiency. Then the average concentration efficiency is calculated according to the weight and concentration efficiency of monochromatic light. Finally, the experimental results are compared with the simulated results. The simulated concentration efficiency is 88.623%, and the measured concentration efficiency is 85.45%, with the difference of 3.173%. The transmittance and the uniformity of concentration spot are quite close. The difference of concentration efficiency mainly come from manufacturing error and measuring error. The scientificity and feasibility of the indoor concentration test system are confirmed through the experimental data analysis. The light divergence angle of indoor concentration test system is 0.267°, which can match sunlight divergence angle, and its 145 mm caliber can test the performance of concentration system with the large caliber. Indoor concentration test system with simple structure and low cost will have broad application prospects in solar-energy concentration field.

Key words non-imaging optics; concentration test system; Fresnel concentration system; concentration ratio; concentration efficiency

OCIS codes 220.4298; 220.4830; 220.4840

收稿日期: 2010-12-20; 收到修改稿日期: 2011-01-13

基金项目: 国家 973 计划(2010CB227101)资助课题。

作者简介: 赵会富(1983), 男, 博士研究生, 主要从事太阳能聚光、光伏发电、LED 路灯、汽车车灯配光设计和检测等方面的研究。E-mail: zhfdcomp@yahoo.com.cn

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.ac.cn

1 引 言

太阳能是储量最大、能量分布最广的可再生清洁能源^[1]，其主要应用是光热发电^[2,3]和光伏发电^[4,5]，目前光伏发电因成本过高而未充分进入市场。降低光伏发电成本的最有效途径是采用廉价的光学聚光元件^[6]将大量光线会聚到很小的聚光电池上，提高聚光效率、减少电池材料、降低成本。菲涅耳聚光镜^[7]体积小、重量轻、价格低廉，能够使光学系统实现微型化、集成化以及经济化，在太阳能和照明领域得到了广泛应用。

聚光系统的性能检测至关重要，它能评价其性能优劣并能根据检测结果为设计和加工提供信息反馈，指引设计和加工制作改进方向。目前聚光系统的测试方法主要有室外太阳光测试^[8]和室内太阳模拟器测试两种方法。室外测试太阳光虽然具有较为理想的光谱和光强分布，但受外界环境影响，很难精准测量聚光系统。室内太阳模拟器测试采用太阳模拟器^[9]为光源，目前太阳模拟器主要应用于太阳能电池检测^[10]、空间环境模拟实验以及老化实验等，但太阳模拟器的结构复杂、成本过高，并且其出光角度比较大(6 ~ 10)，不适合接收角较小(一般为1 ~ 2)的聚光系统。目前市场中还没有聚光系统性能测试的专用设备。本文设计搭建了室内聚光测试系统，利用该系统能够实现高平行度(光线的发散角为0.267，与太阳光的发散角匹配)、大口径(145 mm)聚光系统的性能测试，这为太阳能聚光系统的性能检测提供了一定的参考。

2 聚光测试系统的设计及测试方法

2.1 聚光测试系统的设计

聚光测试系统由光源、滤光片、平行光管、光栏和探测器组成，如图1所示。光源和不同的滤光片组合产生单色光，通过调节平行光管(图2， $\tan = b/a$)，使出射光的发散角为 $\theta = 0.267$ ，聚光系统使光线会聚，利用探测器测量聚光光斑的能量及光照度分布。

2.2 测试方法

本文提出了一种新的聚光测试方法：分立光谱局部测量法。太阳光谱大部分能量集中在350 ~ 1850 nm光谱范围内，挑选宽光谱光源和窄带滤光片产生各种单色光，单色光波长分散在350 ~ 1850 nm范围内。采用分立单色光测量聚光系统的局部聚光效率，利用局部聚光效率与其所处的位置计算单色光的平均效率。各种单色光在太阳光谱中

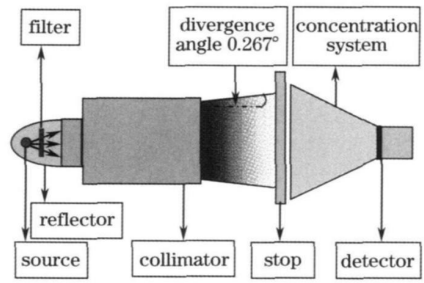


图1 聚光测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of concentration test system

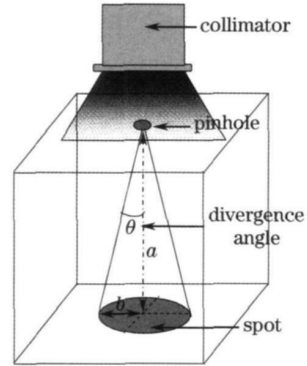


图2 调节平行光管示意图

Fig.2 Schematic diagram of collimator regulation

的归一化权重与单色光平均聚光效率的乘积之和即为聚光系统对太阳光的聚光效率。通过室内聚光测试系统可以实现聚光系统对太阳光聚光效率的测试，利用实验测试结果与理论模拟结果对比分析，验证聚光测试系统的科学性与可行性。

3 软件模拟分析

3.1 非成像光学聚光比的理论分析

非成像光学中的聚光比分为几何聚光比和光学聚光比。几何聚光比 C_g 定义为聚光系统入射口径面积 S_1 和出射口径面积 S_2 的比值。聚光效率为出射口径处光功率 Φ_2 与入射口径处光功率 Φ_1 的比值。几何聚光比和聚光效率的乘积为光学聚光比 C_o ^[11]，如图3所示。

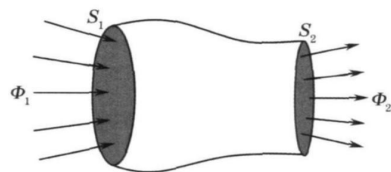


图3 几何聚光比和聚光效率的示意图

Fig.3 Schematic diagram of geometrical concentration ratio and concentration efficiency

$$C_g = \frac{S_1}{S_2}, \tag{1}$$

$$= \frac{2}{1}, \tag{2}$$

$$C_o = \frac{2/S_2}{1/S_1} = C_g. \tag{3}$$

利用光学分析软件建立二阶菲涅耳聚光系统的模型。菲涅耳聚光系统材料为聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA), 折射率为 1.5, 该材料具有相对密度小、透射比高(300~ 2000 nm 范围内光线透射比达 92% 以上)、光学性能优良以及制作成本低等优点。光源的直径为 145 mm, 菲涅耳聚光系统的尺寸为 240 mm 240 mm 2.5 mm, 焦距为 460 mm, 探测器的尺寸为 10 mm 10 mm, 光漏斗高为 70 mm, 出光处尺寸为 10 mm 10 mm, 入光处尺寸为 50 mm 50 mm, 可以收集全部的聚光光斑, 避免光能损失。聚光系统的有效入射口径为 $D=145\text{ mm}$, 根据(1) 式计算得菲涅耳聚光系统的几何聚光比为 165。非成像聚光系统^[12, 13] 没有固定的焦点, 不考虑像差, 不要求成像质量, 只考虑聚光能量和光斑的照度分布。

3.2 聚光光斑形状及均匀性的理论分析

首先设定光谱范围为 400~ 800 nm 的发光二极管(LED) 全光谱作为室内聚光测试系统的模拟光源。利用蒙特卡罗光线追迹方法模拟聚光系统整体的聚光效率和聚光光斑照度分布, 结果如图 4, 5 所示。

二阶菲涅耳聚光系统对 LED 光源全光谱的聚光效率为 88.623%。图 5 中 X 轴为过接收面中心点的纵横两个方向的位置坐标, 单位为 mm, Y 轴为照度分布值, 单位为 W/m^2 。两条曲线分别代表接收面水平方向和竖直方向的照度分布曲线。由图 5 可以看出接收面- 2~ 2 mm 中心区域光照度非常均匀, 照度从 2 mm 处向接收面边缘逐渐降低。根据(3) 式计算二阶菲涅耳聚光系统的光学聚光比的理论值为 146。

表 1 软件模拟得到聚光系统局部透射比和局部聚光效率

Table 1 Local transmittance and concentration efficiency of concentration system through software simulation														
Position /mm	$x=-60$	$x=-40$	$x=-20$	Center	$x=20$	$x=40$	$x=60$	$y=-60$	$y=-40$	$y=-20$	$y=20$	$y=40$	$y=60$	Average
Transmittance /%	91.02	91.15	91.22	91.27	91.22	91.14	91.02	91.03	91.13	91.25	91.25	91.15	91.02	91.10
Efficiency /%	89.24	90.77	88.31	88.58	88.30	90.77	89.24	89.23	90.78	88.30	88.29	90.76	89.24	89.57

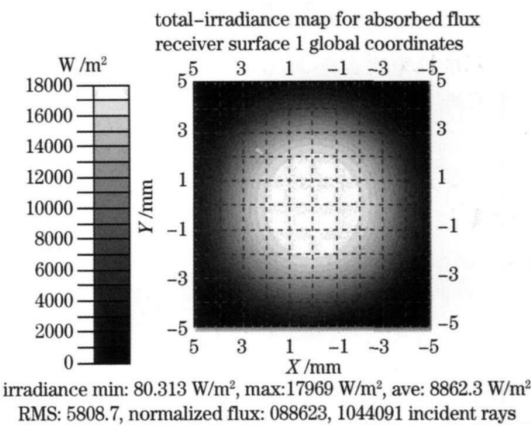


图 4 二阶菲涅耳聚光系统接收面上的照度分布图

Fig. 4 Irradiance map on the receiver surface of two-stage Fresnel concentration system

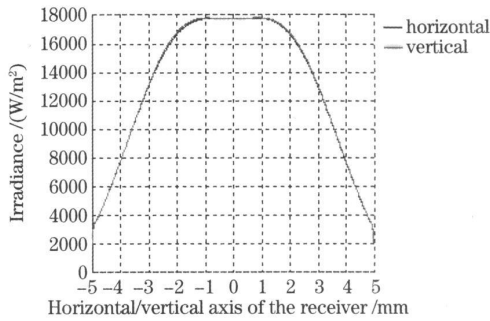


图 5 二阶菲涅耳聚光系统接收面上的照度分布曲线

Fig. 5 Irradiance distribution curve on the receiver surface of two-stage Fresnel concentration system

3.3 各单色光透射比和聚光效率的理论分析

分立光谱局部测量法中选用宽光谱光源和多个不同波长的窄带滤光片模拟太阳光谱范围内的各单色光, 根据实验室的现有条件, 本文选光谱宽度为 400~ 800 nm 的 LED 分别与 7 个窄带滤光片组合产生单色光。利用产生的单色光分别作为聚光测试系统的模拟光源, 模拟分析聚光系统对各单色光的聚光效率。

首先选用 423 nm 的单色光作为模拟光源, 利用软件模拟菲涅耳聚光系统的局部透射比和局部聚光效率, 模拟的结果如表 1 所示。

根据局部透射比、局部聚光效率以及它们在整体聚光系统中所占的面积计算透射比和聚光效率的平均值为

$$T = \frac{\sum_{i=1}^4 t_i (r_{i+1}^2 - r_i^2)}{S}, \tag{4}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^4 \eta_i (r_{i+1}^2 - r_i^2)}{S}, \tag{5}$$

表 2 菲涅耳聚光系统对不同波长的单色光的模拟聚光效率和透射比

Wavelength / nm	423	490	510	525	615	700	785
Simulated transmittance / %	91.10	91.21	91.21	91.21	91.22	91.22	91.22
Simulated efficiency / %	89.57	89.57	89.57	89.57	89.57	89.57	89.57
Normalized weight w_i	0.0649	0.1658	0.2325	0.3319	0.1817	0.0226	0.0006

3.4 分立光谱局部测量法的验证

为了验证分立光谱局部测量法的科学性, 将光谱范围为 400~ 800 nm 的 LED 全光谱作为室内聚光测试系统光源的模拟结果与分立光谱局部测量法的模拟结果进行对比分析。

LED 全光谱作为室内聚光测试系统的光源, 利用 Tracepro 光学分析软件模拟得到菲涅耳聚光系统的聚光效率为 88.623%, 如图 4 所示。各单色光在全光谱中所占的权重 w_i 为各单色光 i 的辐照度在 i 附近区域内的积分值与光波辐照度函数在 LED 全光谱范围内积分值的比值。单色光权重 w_i 的具体数值如表 2 所示。将各种单色光在 LED 全光谱中所占的权重 w_i 与单色光的模拟聚光效率的乘积相加, 得到 LED 全光谱的聚光效率。由下式得聚光效率为 89.57%:

$$= \sum_i \eta_i w_i. \tag{6}$$

由上述模拟分析结果得出, 单色光分立光谱对菲涅耳聚光系统的聚光效率略高于 LED 全光谱对菲涅耳聚光系统的聚光效率, 二者相差 0.947%。二者的偏差主要来源于两个方面: 一方面是在 LED 全光谱范围内仅选取了 7 种单色光, 数量比较少, 导致单色光的权重 w_i 计算精度比较低; 第二方面是菲涅耳聚光镜的局部测量点比较少(13 个测量点, 表 1), 计算得到的平均值与真实值略有差别。这两方面最终使单色光分立光谱对菲涅耳聚光系统的聚光效率与 LED 全光谱对菲涅耳聚光系统的聚光效率略有差别。如果选取单色光的数量与菲涅耳聚光镜的局部测量点足够多, 计算得到单色光的权重 w_i 与聚光效率的平均值将更加精确, 那么单色光分立光

式中 T 为单色光透射比平均值; η_i 为单色光聚光效率平均值; t_i 和 η_i 分别为以 r_{i+1} 为外半径以 r_i 为内半径的圆环内局部透射比平均值和局部聚光效率平均值; S 为以 70 mm 为半径圆的面积; $r_1 = 0, r_2 = 10 \text{ mm}, r_3 = 30 \text{ mm}, r_4 = 50 \text{ mm}, r_5 = 70 \text{ mm}$ 。计算得透射比 $T = 91.10\%$, $\eta = 89.57\%$ 。

利用同样的方法模拟其它单色光的平均透射比和平均聚光效率, 结果变化非常小, 如表 2 所示。

谱对菲涅耳聚光系统的聚光效率将更加接近于 LED 全光谱对菲涅耳聚光系统的聚光效率。

综上可以验证分立光谱局部测量法的科学性。

4 聚光系统实验测试与结果分析

4.1 实验测试流程

图 6 为实验测试流程图, 根据实验室现有条件, 选光谱范围为 400~ 800 nm 的 LED 作为聚光测试系统的光源, 利用 LED 光源和 7 个窄带滤光片组合模拟单色光, 因为光源发散角很大, 不能直接照射聚光系统, 通过调节平行光管使出射光发散角为 0.267。平行光管的焦距 $F = 1600 \text{ mm}, D/F = 1/11$, 出光口径 $D = 145 \text{ mm}$ 。图 7 为聚光测试系统实物图。

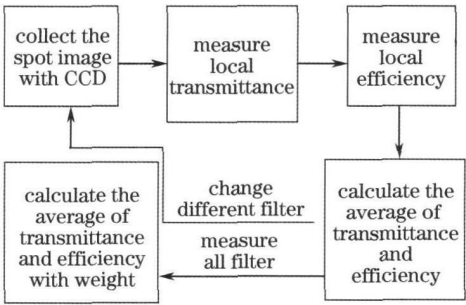
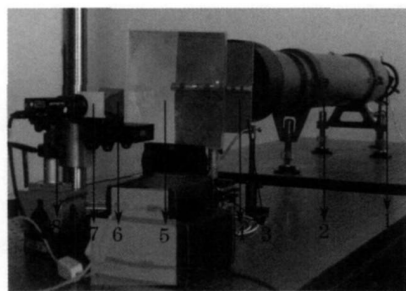


图 6 实验测试流程图

Fig.6 Flow chart of experimental test

4.2 聚光光斑均匀性分析

首先利用 LED 光源, 测试聚光系统的聚光光斑分布。利用 CCD 工业相机(AVT Stingray F046B)采集聚光光斑的图像信息。聚光光斑较强使 CCD 相机饱和, 不能精准采集图像信息, 在 CCD 相机前面焦斑处放置乳白玻璃(Edmund NT43-718)减弱



1: LE filter; 2: collimator; 3: fiber spectrometer;
4: stop; 5: Fresnel concentration system;
6: light funnel; 7: opal glass; 8: CCD camera

图 7 聚光测试系统实物图

Fig. 7 Physical map of concentration test system

光斑强度, 确保 CCD 相机没有达到饱和, 然后用 CCD 相机对准乳白玻璃采集聚光光斑的图像信息。乳白玻璃是在平板玻璃上镀了一层乳白膜, 膜层中有一些微小的颗粒。当入射的光线照射到乳白玻璃时, 乳白膜层中的小颗粒被照亮, 每个小颗粒都相当于点光源。入射光线中的强光照射到乳白玻璃相应位置的小颗粒上, 被强光照亮的小颗粒散射出的光线也较其它位置亮, 每个小颗粒散射的光线在接收面上叠加, 因此透射后的光斑与入射光斑的整体分布状况相近。所以乳白玻璃不会使入射光斑的整体分布状况发生大的改变, 只是使局部光斑分布均匀化。对采集的图像(图 8)进行计算处理, 得到聚光光斑的照度分布状况。

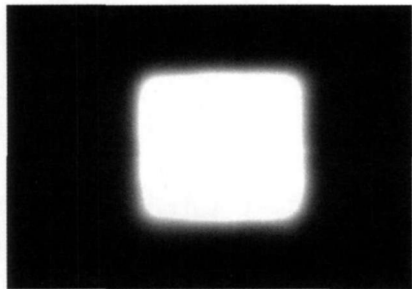


图 8 接收面上的聚光光斑图

Fig. 8 Concentration spot on the receiver

图 9 为聚光光斑计算处理后得到的等值线图, 图中两个坐标轴分别为聚光光斑的尺寸。不同颜色代表不同的灰度值。聚光光斑中心大部分区域光照度分布比较均匀, 只有在边缘处光照度有所下降。

图 10 中横轴代表聚光光斑横向位置坐标, 纵轴代表聚光光斑的灰度值。图 11 中横轴代表聚光光斑纵向位置坐标, 纵轴代表聚光光斑的灰度值。通过对图像处理分析结果图 10、11 观察可得, 聚光光斑无论是横向还是纵向的 $-2 \sim 2$ mm 中心区域的灰度值均在 200 附近, 该区域光照度分布比较均匀,

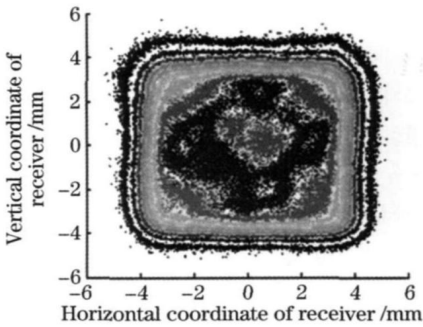


图 9 聚光光斑分布的等值线图

Fig. 9 Contour of condensity spot

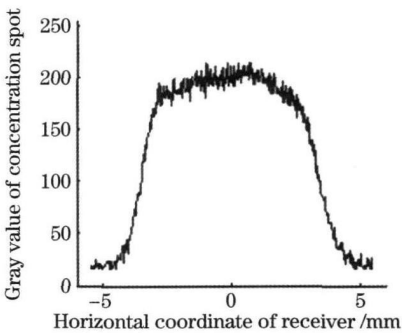


图 10 接收面上聚光光斑照度横向分布

Fig. 10 Horizontal irradiance distribution of concentration spot on the receiver

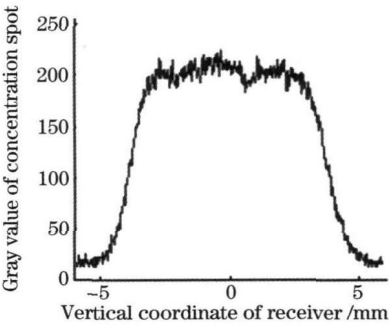


图 11 接收面上聚光光斑照度纵向分布

Fig. 11 Vertical irradiance distribution of concentration spot on the receiver

从 2 mm 处向边缘方向灰度值逐步下降。实验测试结果与软件模拟结果比较接近。聚光光斑中心区域光照度均匀分布避免了太阳能电池局部受热过高导致的光电转换效率降低或电池损坏。

4.3 透射比和聚光效率的实验测量

为了能够检验聚光系统的局部加工误差和制作质量, 需要测试聚光系统的局部聚光效率和局部透射比, 选 LED 光源与 423 nm 的窄带滤光片(半峰全宽为 5 nm) 组合产生单色光, 在平行光管出光口后 10 mm 位置设置一个光栏, 光栏在水平方向和垂直

方向各有一排圆孔,圆孔直径 4 mm,间距 20 mm,圆孔直径和间距越小,聚光镜局部测量越精确。每次只开一个圆孔,其它圆孔都关闭,这样可以减小位置偏移引起的测量误差。将菲涅耳聚光镜设置在光栏后 15 mm 处,探测器设置在聚光系统焦距处测量聚光光斑能量,并使光漏斗的底端紧贴探测器,以免光能外泄。探测器为光功率计(Ophir PD300-1 W),探头尺寸为 10 mm 10 mm。利用光功率计分别测量透过每个圆孔的光功率 E_i 。保持光源和聚光系统位置不动,把光功率计移到聚光系统后 10 mm 位置和焦斑位置分别测量透过聚光镜的能量和每个圆孔会聚的能量,得到透过菲涅耳聚光系统的能量 E_o 和焦斑处会聚的能量 E_F ,菲涅耳聚光系统透射比为

$$T = \frac{E_o}{E_i}, \tag{7}$$

表 3 实验测量菲涅耳聚光系统的透射比和聚光效率

Table 3 Measured transmittance and concentration efficiency of Fresnel concentration system

Position / mm	x = - 60	x = - 40	x = - 20	Center	x = 20	x = 40	x = 60	y = - 60	y = - 40	y = - 20	y = 20	y = 40	y = 60	Average
Transmittance / %	88.46	90.16	86.36	92.50	87.88	89.68	86.72	89.84	89.26	85.25	86.05	90.52	87.50	88.51
Efficiency / %	87.31	87.25	82.48	87.00	82.24	87.71	86.38	82.03	87.12	82.59	82.87	87.21	86.17	85.63

表 4 菲涅耳聚光系统对不同波长的单色光的透射比和聚光效率

Table 4 Experimental transmittance and concentration efficiency of Fresnel concentration system for different monochromatic light

Wavelength / nm	423	490	510	525	615	700	785
Experimental transmittance / %	88.51	88.58	88.57	88.60	88.59	88.58	88.57
Experimental efficiency / %	85.63	85.51	85.50	85.51	85.19	85.08	84.96
Normalized weight w_i	0.0649	0.1658	0.2325	0.3319	0.1817	0.0226	0.0006

由(6)式得实验测得聚光效率为 85.45%。根据几何聚光比、(3)式和实验聚光效率计算得出,二阶菲涅耳聚光系统的光学聚光比 $C_o = C_g = 165$ 85.45% 141。光学分析软件模拟二阶菲涅耳聚光系统效率为 88.623%,实验测量的聚光效率为 85.45%,二者相差 3.173%,差异主要来源于菲涅耳聚光系统的加工制作误差和测量误差。需要根据实验测试分析结果对菲涅耳聚光系统的设计和加工制作做进一步的指导,以提高聚光系统的效率和太阳能电池的光电转换效率。

4.4 红外光谱适用于聚光测试系统的可行性分析

由于实验室的现有条件限制,只验证了 400~800 nm 的光源作为室内聚光测试系统光源的可行性与科学性,但不难验证太阳光谱中除了 400~800 nm 以外的红外波段作为室内聚光测试系统的光源也是科学的、合理的,原因如下。

光源发出的光线依次经过菲涅耳聚光镜、光漏

聚光效率为

$$= \frac{E_F}{E_i} \tag{8}$$

由实验数据得出实验测得的菲涅耳聚光系统的 423 nm 单色光平均透射比与软件模拟的透射比比较接近,二者相差约 2.59%,平均聚光效率相差约 3.94%。由表 3 中数据得出:距离菲涅耳聚光镜中心 20 mm 的上、下、左、右 4 点处的透射比和聚光效率明显低于其它位置,而软件模拟得到不同位置的聚光效率相差较小,由于菲涅耳聚光镜为中心旋转对称结构,因此可以得出菲涅耳聚光系统距中心 20 mm 处的环带加工误差比较大,致使聚光系统整体的聚光效率降低。

利用同样的方法及步骤测量分析其它单色光源(LED 光源与窄带滤光片组合而得)的聚光效率,具体结果如表 4 所示。

斗,最后到达探测器。分 3 个步骤验证红外波段对于聚光测试系统是科学有效的。

1) 菲涅耳聚光镜的材料为 PMMA,该材料对 300~2000 nm 范围内光线透射比达 92% 以上,所以材料对 800~1850 nm 范围内的红外波段是透光的。

2) 菲涅耳聚光镜自身存在色散问题,宽波段的光线在其焦面附近形成较大的聚焦光斑。由色散理论可知,波长越大光线偏折角越小。太阳光谱红外波段的范围以 800~1850 nm 计算,1850 nm 光线的偏折角最小,这意味着 1850 nm 的光线透过菲涅耳聚光镜后在会聚光束中的最外边缘处。那么设计光漏斗的过程中考虑到这一点,只要保证 1850 nm 的光线通过菲涅耳聚光镜后刚好落入光漏斗入口的边缘处即可。由于色散影响,其它波长的光线会分散开。其它的光线随着波长的减小逐渐由边缘向中心分布。这样就能够保证所有的光线都能被光漏斗所

接收。接收到的光线在光漏斗内部经过数次反射,最后被探测器吸收。如图 12 所示。

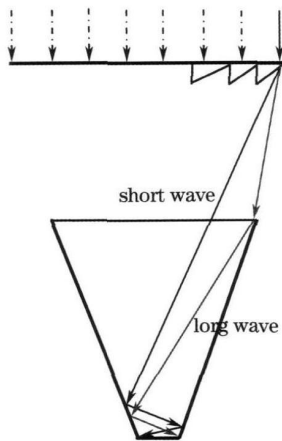


图 12 色散的外边缘光线与光漏斗的边缘对应关系

Fig. 12 Corresponding relation between the edge ray of dispersed light and the edge of funnel

3) 本文中的接收器为光功率计,而在实际应用中接收器应为太阳能电池。太阳能电池为多结分层结构,每层结构能够吸收不同的光谱范围,每层所吸收的光谱综合一起将覆盖太阳全光谱。因此多结分层结构的高倍聚光型太阳能电池能够吸收宽光谱(350~1850 nm)的太阳光^[14]。

综上所述可以得出,红外波段的光源同样也适用于室内聚光测试系统。

5 结 论

设计搭建了室内聚光测试系统,并提出一种新的测量方法:分立光谱局部测量法。根据实验室现有条件选二阶菲涅耳聚光系统为测试对象,LED 为光源,利用软件模拟聚光系统的透射比、聚光效率和聚光光斑照度分布,并用室内聚光测试系统对二阶菲涅耳聚光系统进行实验测试,将模拟结果与实验结果对比分析,二者的透射比和光斑分布均匀性比较接近,聚光效率相差 3.173%,差异主要来源于加工误差和测量误差。局部测量法检测到距聚光镜中心 20 mm 处的环带加工误差比较大,根据实验结果为设计和加工提供信息反馈以便提高聚光效率。实验测量结果验证了室内聚光测试系统的科学性与可行性,此方法完全适用于模拟测试太阳光,利用宽光谱光源和足够多的滤光片就可以实现在室内测试聚光系统对太阳光的聚光效率。室内聚光测试系统光线发散角为 0.267°,与太阳光发散角匹配,出光口径为 145 mm,解决于太阳光受天气和环境变化而

引起的聚光测试的不稳定性,可以准确评价聚光系统的性能指标。因此,室内聚光测试系统将推动光伏事业进一步发展。

参 考 文 献

- 1 B. S. William, G. Micheal. Power from the Sun[M/OL]. 2001. <http://www.powerfromthesun.net/book.htm>
- 2 Wei Xiudong, Lu Zhenwu, Lin Zi et al.. Design and optimization of heliostat field layout for solar tower power plant[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2652~2656
魏秀东, 卢振武, 林梓等. 塔式太阳能热发电站镜场的优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2652~2656
- 3 Wang Ruiting, Wei Xiudong. Shadow of heliostat field in the solar tower power plant[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2414~2418
王瑞庭, 魏秀东. 太阳能塔式电站镜场对地面的遮阳分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2414~2418
- 4 Winston Roland, Mi ano Juan C., Bentez Pablo. Nonimaging Optics[M]. Burlington: Elsevier Academic Press, 2004
- 5 Liu Dafu, Qiao Hui, Kong Lingcai et al.. The study on R-V characteristics of HgCdTe photovoltaic detectors under different baked temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 336~339
刘大福, 乔辉, 孔令才等. 不同烘烤温度下 HgCdTe 光伏探测器的 R-V 特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 336~339
- 6 Welford W. T., Winston Roland. High Collection Non-Imaging Optics[M]. New York: Academic Press, 1989
- 7 Watson Michael D., Jayroe Robert R.. Fresnel lens solar concentrator design based on geometric optics and blackbody radiation equation[C]. *SPIE*, 1999, **3781**: 85~93
- 8 Daniel Chemisana, Alecis Vossier, Alain Dollet et al.. A characterization method for testing solar concentrators using a lambertian diffuser[OL]. 2009. <http://www.concentrating-pv.org/darmstadt2009/pdf/papers/14-ChemisanaEtAl-LambertianTestForConcentrator.pdf>
- 9 Pang Hewei, Huang Bencheng, Zang Youzhu et al.. Design of KM6 solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, **23**(3): 125~133
庞贺伟, 黄本诚, 臧友竹等. KM6 太阳模拟器设计概述[J]. *航天器环境工程*, 2006, **23**(3): 125~133
- 10 Wang Zhiming, Gong Zhenbang, Wei Guangpu et al.. Solar simulation technique for solar cell measurement[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2009, **17**(7): 1542~1547
王志明, 龚振邦, 魏光谱等. 用于太阳能电池测试的太阳模拟技术[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(7): 1542~1547
- 11 Lin Jianshan, Huang Weichih, Hsu Hsiuchen et al.. A study for the special Fresnel lens for high efficiency solar concentrators[C]. *SPIE*, 2005, **5942**: 59420X
- 12 Liu Hua, Lu Zhenwu. Lateral splittable nonimaging concentrators with large acceptable angles[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2009, **17**(12): 2881~2886
刘华, 卢振武. 可横向分光的大接收角非成像式聚光系统[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(12): 2881~2886
- 13 Zhu Rui, Lu Zhenwu, Liu Hua et al.. The solar concentrator design method based on nonimaging optics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2251~2255
朱瑞, 卢振武, 刘华等. 基于非成像原理设计的太阳能聚光镜[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2251~2255
- 14 A Boeing Company. CPV Point Focus Solar Cells C3MJ. Third Generation CPV Technology[EB/OL]. 2010. <http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/CPV/C3MJ%20CDO%20Products%2020100810.pdf>