

文章编号:1004-4213(2011)08-1270-6

户外聚光测试系统设计

赵会富^{1,2}, 刘华¹, 孙强¹, 荆雷^{1,2}, 刘英¹, 王尧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, 长春 130033)

(2 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 为了提高聚光系统的聚光效率, 设计了一种户外聚光测试系统. 选二阶菲涅耳聚光系统为测试对象, 采用局部测量法测试其性能. 利用软件模拟聚光系统的透过率、聚光效率和聚光光斑照度分布, 并利用户外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发现: 二者的光斑分布均匀性比较接近, 透过率相差 1.800%; 聚光效率相差 4.346%, 主要差异来源于加工误差和测量误差. 据此可以为设计和加工提供信息反馈, 从而改进加工工艺, 提高聚光效率.

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: O439; TK513.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114008.1270

0 引言

随着太阳能等可再生清洁能源技术的迅速发展^[1], 特别是太阳能光伏发电技术^[2-3]为光伏并网发电、空间卫星供电、化石能源危机提供了广阔前景. 但太阳能电池材料紧缺, 制作工艺复杂, 发电成本高, 需要进一步提高光伏发电效率和降低发电成本. 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^[4], 将大量光线会聚到面积很小的聚光电池上, 能够提高聚光效率, 减少电池材料并降低成本. 菲涅耳聚光镜^[5]具有体积小、重量轻、价格低廉等优点, 在太阳能和照明领域有着广泛应用.

聚光系统的性能检测结果为设计和加工提供信息反馈, 指引设计和加工改进方向. 目前国内外对于聚光系统的测试方法主要在室内利用太阳模拟器测试聚光系统的性能^[6-8], 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($6^{\circ} \sim 10^{\circ}$), 不适合接收角较小($1^{\circ} \sim 2^{\circ}$)的聚光系统. 因此室内太阳模拟器测试方法有一定的局限性, 并不适合测试聚光系统的性能. 目前国内外还没有聚光测试系统的专用装置, 本文利用真实的太阳光作为光源设计了一套户外聚光测试系统, 并利用局部测量法的实验测量结果和软件模拟结果对比分析, 检测了聚光系统的性能并验证了户外聚光测试系统的科学性.

1 聚光测试系统的设计及测试方法

1.1 聚光测试系统的设计

聚光测试系统由太阳跟踪系统、聚光系统、太阳垂直辐射计、光纤光谱仪、光栏、光功率计、CCD 相机、计数器等器件组成, 如图 1.

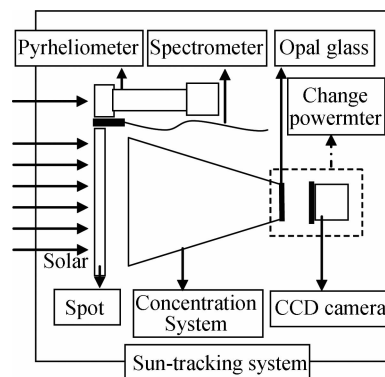


图 1 聚光测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of concentration test system

将上述所有实验设备按照图 1 中的位置顺序安置在双轴跟踪系统上. 菲涅耳聚光镜和光漏斗组成二阶菲涅耳聚光系统. 可调节大小的光栏放置在菲涅耳聚光系统前 5 mm 位置, 聚光系统焦面位置放置 CCD 工业相机. 利用 CCD 相机采集聚光光斑图像信息后, 以光功率计取代 CCD 相机, 并利用光功率计测量聚光光斑的光功率值. 太阳光通过光栏后直接照射到菲涅耳聚光镜表面, 通过菲涅耳聚光镜的会聚作用使入射的太阳光线会聚到光漏斗内, 并

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB227101)资助

第一作者: 赵会富(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为太阳能聚光与光伏发电. Email: zhfcioimp@yahoo.com.cn

导师: 卢振武(1955-), 男, 研究员, 主要研究方向为波动光学与光伏发电. Email: luzw@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2011-02-15; 修回日期: 2011-04-16

在光漏斗内经过数次全反射后被探测器接收,光漏斗能够实现光线的再次会聚和光线分布均匀化的双重目的.利用光功率计测量光线聚光后的光功率,入射光功率由太阳垂直辐射计间接测得,二者的比值可求出聚光系统的聚光效率. CCD 相机能够采集聚光光斑图像信息,通过图像处理,可以得到聚光光斑的光斑分布情况.聚光光斑分布的均匀程度直接影响到太阳能电池的光电转换效率.

1.2 测试方法

为检验聚光镜的局部加工误差及制作质量,本文采用局部测量法测试聚光系统的性能.聚光系统前设置一光栏,光栏的通光孔为不同尺寸的方形环,方形环通光孔分的越多,聚光镜局部测量越精细.光线通过光栏后经聚光镜会聚后被探测器接收,根据测得聚光镜的局部聚光效率可以检验聚光镜的局部加工误差和制作质量.通过户外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,图 2 为聚光测试流程图.

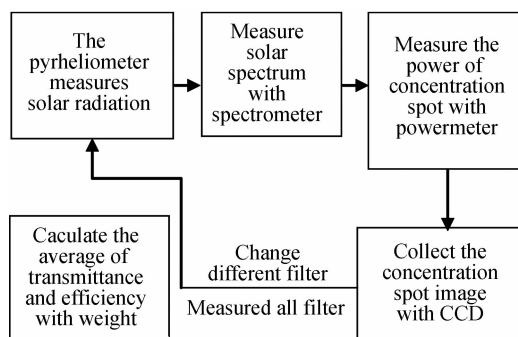


图 2 聚光测试流程图

Fig. 2 Flow chart of concentration test

2 软件模拟分析

2.1 聚光比的理论分析

非成像光学中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的面积 S_1 和出射口径面积 S_2 的比值;聚光效率 η 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 C_g 和聚光效率 η 的乘积为光学聚光比 C_o ^[9],如图 3.

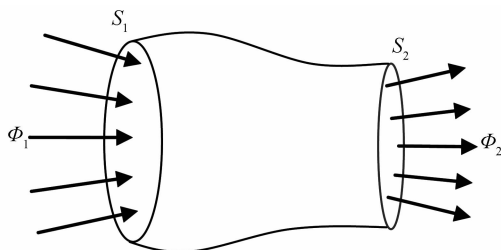


图 3 几何聚光比和聚光效率的示意图

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

$$C_g = S_1 / S_2 \quad (1)$$

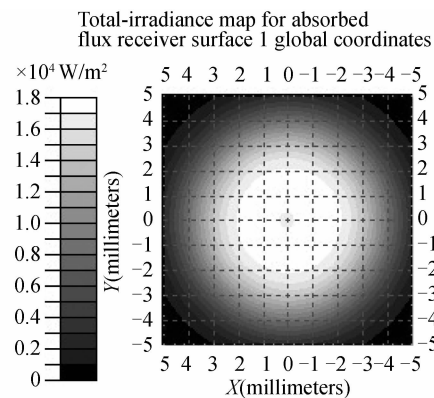
$$\eta = \Phi_2 / \Phi_1 \quad (2)$$

$$C_o = \frac{\Phi_2 / S_2}{\Phi_1 / S_1} = C_g * \eta \quad (3)$$

利用光学分析软件 Tracepro 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(Polymethyl Methacrylate, PMMA),折射率为 1.5,该材料具有相对密度小、透过率高(300~2 000 nm 范围内光线透过率达 92% 以上)、光学性能优良、制作成本低等优点.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 10×10 mm²,光漏斗高为 70 mm,出光处尺寸为 10×10 mm²,入光处尺寸为 50×50 mm²,可以收集全部的聚光光斑,避免了光能损失.根据式(1)计算得二阶菲涅耳聚光系统(由菲涅耳聚光镜和光漏斗组成)的几何聚光比为 576X.非成像聚光系统^[10-12]没有固定的焦点,不考虑像差,不要求成像质量,只考虑聚光能量和聚光光斑的照度分布.

2.2 聚光光斑形状及均匀性的理论分析

太阳光谱大部分能量集中在 350~1 850 nm 光谱范围内,根据太阳光谱及其权重在光学分析软件 Tracepro 中模拟太阳光,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光斑照度分布,结果如图 4.



Irradiance Min:64.999 W/m²,max:17662 W/m²,Ave:8901.4 W/m², RMS:5831.4,normalized flux:0.89014 1073580 incident rays

图 4 二阶菲涅耳聚光系统接收面上的照度分布图

Fig. 4 The irradiance map on the receiver surface of two stages Fresnel concentration system

二阶菲涅耳聚光系统对太阳光的聚光效率为 89.014%.图 5 中 X 轴为接收面的位置坐标,单位为 mm,Y 轴为照度分布值,单位为 W/m².蓝色代表接收面的水平方向的照度分布曲线;绿色代表接收面的垂直方向的照度分布曲线.接收面 -2~2 mm 中心区域光照度均匀性达到 95% 以上,照度均匀性从 ±2 mm 处向接收面边缘逐渐降低.

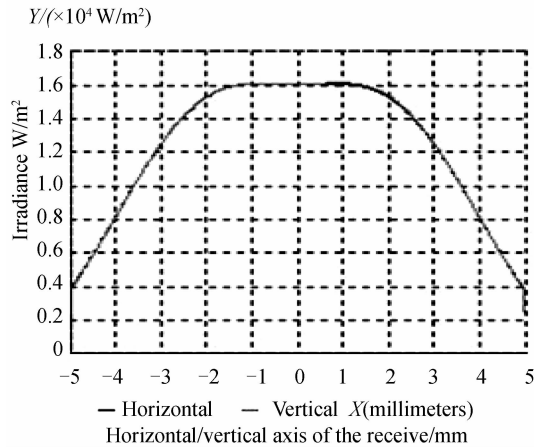


图5 二阶菲涅耳聚光系统接收面的照度分布曲线
Fig. 5 Irradiance distribution curve on the receiver surface of two stages Fresnel concentration system

2.3 透过率和聚光效率的理论分析

在软件中设置不同的矩形环光栏(见图6)分别测量菲涅耳聚光系统的局部聚光效率,每种颜色的矩形环分别代表不同尺寸的通光孔,矩形环通光孔的宽度为25 mm,结果见表1.

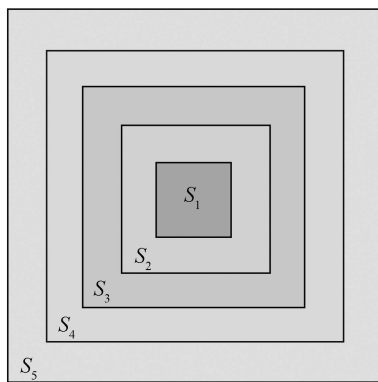


图6 矩形光栏
Fig. 6 Rectangle stop

表1 软件模拟得到聚光系统局部透过率和局部聚光效率
Table 1 The local transmittance and concentration efficiency of concentration system through software simulation

Position/mm	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	Ave
Transmittance/(%)	92.371	92.365	92.325	92.170	91.869	92.146
Efficiency/(%)	90.151	91.977	91.921	89.896	86.165	89.478

根据局部透过率、局部聚光效率以及它们在整体聚光系统所占的面积计算透过率和聚光效率的平均值

$$T = \frac{\sum_{i=1}^5 t_i * S_i}{S} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^5 \eta_i * S_i}{S} \quad (5)$$

式(4)和(5)中 T 为透过率加权平均值, η 为聚光效率加权平均值, t_i 和 η_i 分别为以 S_i 矩形环内的局部透过率和局部聚光效率, S 为菲涅耳聚光镜的

面积,计算得透过率和聚光效率的加权平均值分别为: $T=92.146\%$; $\eta=89.478\%$. 利用局部测量法测得局部效率的加权平均值比软件模拟聚光系统的整体聚光效率低0.464%,二者相差较小.二者的差异主要是光栏的矩形通光带的面积不是足够小.每个矩形通光带的尺寸越小,测量的准确度越高,测量值越能真实地反映聚光镜的聚光效率和透过率.可见局部测量法是合理的、科学的.

3 实验测试与结果分析

3.1 实验步骤

1) 利用太阳垂直辐射计(Kipp & Zonen Pyrheliometer CHP 1)测量太阳辐射常数,并计算太阳辐射光功率.

2) 利用光纤光谱仪(AvaSpec-1024)测量太阳光谱.

3) 实验中选 AVT F-046B CCD 相机为探测器采集聚光光斑的图像信息. AVT F-046B CCD 相机具有线性响应、高灵敏度、高速拍摄图像和宽光谱动态响应等特点.其光谱动态响应范围为300~1100 nm,能够满足实验要求.聚光光斑较强使 CCD 相机饱和,不能精准采集图像信息,在 CCD 相机前面焦斑位置放置乳白玻璃(Edmund NT43-718)减弱光斑强度,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的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^[13],不影响光斑整体分布状况.对采集的图像进行计算处理,得到聚光光斑的照度分布状况.

4) 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过率.在聚光镜前5 mm 位置设置光栏,利用光功率计(Ophir 30A)在聚光镜后和焦点处分别测量每个通光孔的透过的光功率和聚光光斑的光功率,并利用太阳垂直辐射计间接测得的入射光功率计算二阶菲涅耳聚光系统的透过率和聚光效率.

3.2 光谱分析

聚光测试系统的实验装置如图7.其中1为菲涅耳聚光镜;2为光栏;3为光漏斗;4为光功率计;5

为太阳垂直辐射计;6 为光纤光谱仪;7 为计数器. 首先利用光纤光谱仪测得太阳光谱,见图 8. 图 9 为标准太阳光谱.

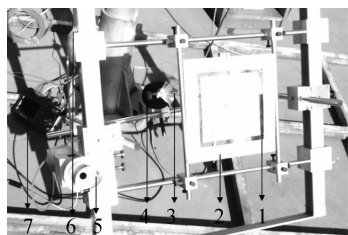


图 7 聚光测试系统的实物图
Fig. 7 Physical map of concentration test system

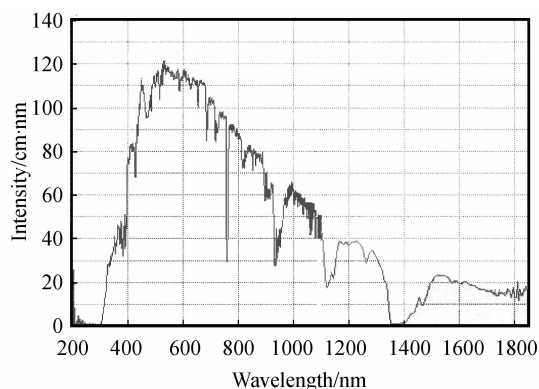


图 8 测得的太阳光谱
Fig. 8 The measured solar spectrum

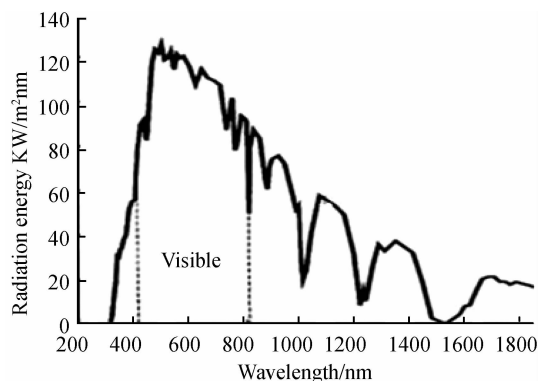


图 9 标准的太阳光谱
Fig. 9 The standard solar spectrum

实验测得的太阳光谱与标准的太阳光谱比较接近,由计数器(midi LOGGER GL200A)读出太阳垂直辐射计输出电压为 6.60 mV,由式(6)计算太阳辐射

$$E_{\text{solar}} = \frac{U_{\text{emf}}}{S_s} \quad (6)$$

式(6)中 U_{emf} 为太阳垂直辐射计输出电压; S_s 为太阳垂直辐射计的灵敏度. 实验测得 $U_{\text{emf}} = 6.60 \text{ mV}$; $S_s = 8.08 \times 10^{-6} \text{ V/W} \times \text{m}^{-2}$, 计算得 $E_{\text{solar}} = 817 \text{ W/m}^2$, 符合当地(吉林省长春市)的标准太阳辐射,由此数据可得整体实验装置能够对准太阳,系统跟踪误差在 0.2° 以内,跟踪误差在双轴跟踪系统的跟踪准确度之内.

3.3 聚光光斑均匀性分析

调整 CCD 工业相机,使其对准乳白玻璃上的聚光光斑,确保 CCD 相机没有达到饱和的情况下采集聚光光斑的图像信息. 对采集的图像进行计算处理,得到聚光光斑的照度分布状况(见图 10).

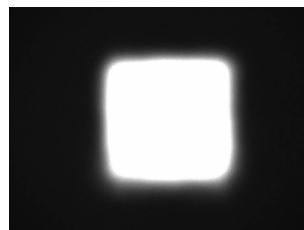


图 10 接收面上的聚光光斑分布
Fig. 10 Concentration spot on the receiver

图 11 为计算处理后得到的等值线图,坐标轴为聚光光斑的尺寸. 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.

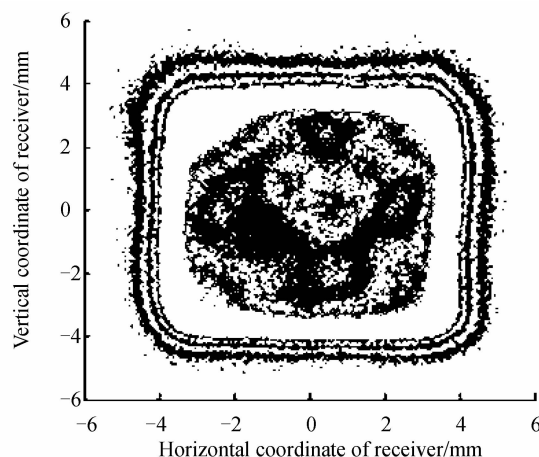


图 11 聚光光斑分布的等值线图
Fig. 11 The contour of concentration spot

图 12 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. 图 13 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. 通过对图像处理分析结果图 12、图 13 的观察可得,聚光光斑无论是横向还是纵向的 $-2 \sim 2 \text{ mm}$ 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.

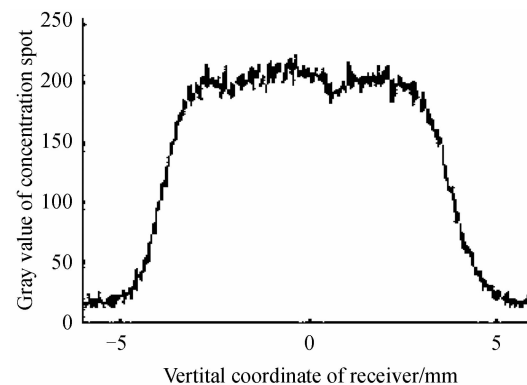


图 12 接收面上聚光光斑照度纵向分布
Fig. 12 Vertical illumination distribution of concentration spot on the receiver

- concentrators with large acceptable angles[J]. *Optics and Precision Engineering*, 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.
- [11] ZHU Rui, LU Zhen-wu, LIU Hua, *et al.* The solar concentrator design method based on nonimaging optics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **31**(8):45-47.
- 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*, 2008, **31**(8):45-47.
- [12] LIU Hua, LU Zhen-wu, ZHU Rui, *et al.* RX non-imaging solar concentrator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2):194-197.
- 刘华,卢振武,朱瑞,等.RX型非成像太阳能聚光镜的设计[J].*光子学报*, 2008, **37**(2):194-197.
- [13] <http://www.edmundoptics.com/sg/onlicecatalog/displayproduct.cfm?productid=1671>.

Design of Outdoor Concentration Test System

ZHAO Hui-fu^{1,2}, LIU Hua¹, SUN Qiang¹, JING Lei^{1,2}, LIU Ying¹, WANG Yao¹, LU Zhen-wu¹

(1 *Opto-electronic Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to improve the concentration efficiency of optical concentration system, an outdoor concentration test system was designed. The second order Fresnel concentration system was chosen as the test object, and its performances were tested by localized measurement. Using Tracepro software, transmittance, concentration efficiency and concentration spots of the concentration system were simulated. The second order Fresnel concentration system was experimentally tested by outdoor concentration system. Compared the simulation result with experiment result, it was found that the spots uniformity of the two systems are close, and transmittance differences and differences between concentration efficiencies are 1.800% and 4.346% respectively. The differences of concentration efficiencies mainly come from the manufacturing error and measuring error. So this experimental data can provide information and feedback for the designer and manufacturer of the system to improve the processing technology and raise the concentration efficiency.

Key words: Non-imaging optics; Concentration test system; Fresnel concentration system; Concentration ratio; Concentration efficiency