

曲面太阳辐射能流密度的实验测量

戴贵龙*, 庄莹, 王孝宇, 庄宇

福建工程学院生态环境与城市建设学院建筑新能源与节能福建省高校重点实验室, 福建 福州 350108

摘要 为测量曲面吸热器入射聚集的太阳能流密度分布, 根据曲面辐射传输的特点提出了一种分割-拼接的曲面聚集太阳能流密度分布测量方法。通过分割、提取半球壳体, 设计、加工了一种中空水冷条形球弧朗伯靶。借助图像空间坐标转换和表面辐射传输计算方法, 获得了由多幅子图像拼接形成的完整球壳曲面。在室内太阳能模拟器上, 结合 CCD 相机组装测试系统, 对该测量方法进行了实验验证。结果表明, 该方法的不确定度为 5.12%。沿半球曲面圆周角和天顶角方向聚集的太阳能流密度分布不均匀, 能流密度峰值出现在曲面顶点外缘的局部区域, 与焦平面能流密度分布存在明显差异。

关键词 散射; 聚集太阳能; 曲面吸热器; 球弧朗伯靶; 表面辐射; 实验测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220702

Experimental Measurement of Solar Radiation Energy Flux Distribution on Curved Surfaces

Dai Guilong*, Zhuang Ying, Wang Xiaoyu, Zhuang Yu

Key Laboratory of New Energy and Energy Conservation for Buildings in Fujian Province, School of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, Fujian, China

Abstract In order to measure the concentrated solar radiation flux distribution of curved surface absorbers, based on segmented-jointed approaches, a measurement method for the solar flux density distribution on the curved surfaces is proposed according to the characteristics of the surface radiation transfer. By dividing and extracting the hemispherical shell, a hollow water-cooled strip spherical arc Lambertian target is designed and processed. Using image space coordinate transformation and surface radiation transfer calculation, the entire spherical shell surface is obtained by splicing multiple sub-images. The measurement method is experimentally verified on an indoor solar simulator using a CCD camera to assemble a test system. The results show that the uncertainty of this method is 5.12%. The distribution of solar flux density along the circumferential and zenith angles of the hemispherical surface is uneven, and the peak energy flux density appears at the outer edge of the surface vertex, which is significantly different from the focal plane energy flux density distribution.

Key words scattering; concentrated solar radiation; curved surface absorber; spherical arc Lambertian target; surface radiation; experimental measurement

1 引言

在聚集太阳能流密度辐照加热作用下, 高温吸热器内部进行复杂的光-热-流耦合传热过程。聚集太阳能流密度是影响热转换效率和工作可靠性的重要因素之一^[1-2], 因此掌握聚集太阳能流密度分布对太阳能高温热动力发电和热化学反应等具有重要意义。

聚集太阳能流密度分布具有非均匀性, 实验测量是获得能流密度分布的有效途径^[3]。目前, 大多实验以测量焦平面的太阳能流密度分布为主, 包括直接测量法和间接测量法。直接测量法通过移动的单支高密度热流计或热流计阵列, 直接测量得到塔式定日镜场或抛物面碟式聚集器焦平面不同位置的聚集太阳能流密度^[4-5]。间接测量法也被称为 CCD 成像测量, 利用

收稿日期: 2022-02-10; 修回日期: 2022-03-10; 录用日期: 2022-03-18; 网络首发日期: 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51806037, 52176181)

通信作者: *daiguilong611@126.com

CCD 相机拍摄投影到焦平面处水冷朗伯靶的聚集太阳光斑图像,通过 CCD 相机的灰度与辐射能流密度的能量换算间接获得光斑的能流密度^[6-7]。相比直接测量法,间接测量法具有分辨率高、能流测量范围宽的优点,在中高密度太阳能领域得到广泛应用。戴景民等^[8-9]用 CCD 成像测量法获得旋转抛物面和抛物柱面聚光器焦平面的能流密度分布。肖君等^[10]根据太阳直射辐照值,标定 CCD 相机的像素灰度值与聚焦光斑能流密度值的比例因子,进而得出聚焦光斑的能流密度分布。Xiao 等^[11]利用 CCD 成像测量与热流计复合测量方法测得室内太阳能模拟器焦平面聚集太阳光能流密度,实验结果表明,该方法的测量结果比较可靠,相对误差约为±8.1%(重复性约为 1.1%)。这些实验主要测量的是焦平面太阳能流密度分布。为承受更高的工作压力、减少太阳光反射损失,实际应用的高温吸热器多为曲面腔式结构,包括球形、圆柱形、圆锥形、平顶圆锥形等^[12]。聚集太阳能流密度位置和方向分布的复杂性,使焦平面的能流密度测量结果不能直接反映到曲面结构上,会存在显著的失真和误差。因此,需要开发探索曲面聚集太阳能流密度分布测量方法。

曲面(如半球)的结构特性使其存在视场弯曲(CCD 不能一次完整成像)、景深大(不同区域 CCD 成像模糊)、不同位置的辐射能相互干扰等不足,不能直接通过完整的曲面朗伯靶进行 CCD 成像测量。因此,本文提出一种分割-拼接的曲面能流密度实验测量方法。该方法在球壳表面分割提取一条形球弧,通过二次加工并涂抹硫酸钡溶液,形成中空水冷条形球弧朗伯靶,沿过球心轴旋转该条形球弧即可拼接形成完整半球曲面。最后,通过实验测量与表面辐射计算验证了该方法的可行性。

2 测量原理与模型

2.1 测量原理

曲面太阳辐射能流密度测量光路系统如图 1 所示。沿聚集太阳光传播方向,依次为太阳能模拟器(产生聚集太阳光)、CCD 相机(正对形球弧朗伯靶)、条形球弧朗伯靶(中空水冷)、水冷圆盘(避免聚集太阳光照

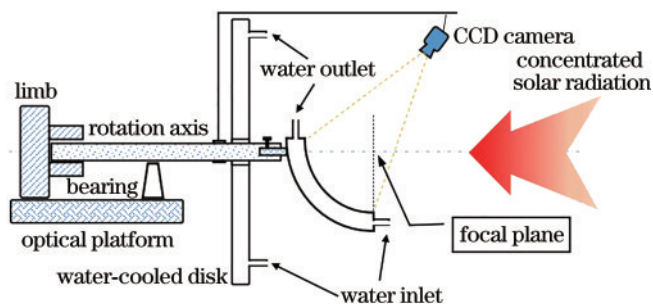


图 1 曲面太阳辐射能流密度的测量光路图

Fig. 1 Optical path diagram of concentrated solar radiation flux measurement on curve surface

射烧坏其左侧的旋转轴和分度盘)、旋转轴和分度盘等。CCD 相机和条形球弧朗伯靶固定在旋转轴上。分度盘带刻度和三爪卡盘,通过分度盘转动旋转轴并标记旋转角度。用 CCD 相机拍摄条形球弧朗伯靶在不同旋转角度下的聚集太阳光斑灰度图像。根据 CCD 相机灰度值与有效辐射能流密度值的换算表达式计算灰度图像对应的辐射能流密度值,拼接所有旋转角度的灰度图像即可得到完整的曲面能流密度分布图像。

利用均匀光源和辐照计标定 CCD 相机灰度值与有效辐射能流密度[辐照亮度,单位为 $W/(m^2 \cdot sr)$]的函数关系式可表示为

$$L = a_c \cdot G + b_c, \quad (1)$$

式中: L 为均匀光源发射的辐照亮度,由辐照计测量获得(当辐照计垂直于均匀光源的投射辐射时,辐照计的测量结果等于辐照亮度); G 为 CCD 相机拍摄的灰度值; a_c 和 b_c 分别为 CCD 相机的标定系数。

根据靶面的辐射传输过程,得到 CCD 相机灰度值与投射到靶面太阳能流强度的转换关系:

$$L_{SR,(i,j)} \cdot \rho_R \cdot f_R = a_c G_{R,(i,j)} + b_c \Rightarrow L_{SR,(i,j)} = \frac{a_c G_{R,(i,j)} + b_c}{\rho_R \cdot f_R}, \quad (2)$$

式中: $L_{SR,(i,j)}$ 为像素 (i,j) 对应微元靶面接收到的聚集太阳辐射强度(太阳辐照度); ρ_R 为靶面的反射率; f_R 为测量时 CCD 相机中性密度滤光片的衰减系数; $G_{R,(i,j)}$ 为 CCD 相机像素 (i,j) 的灰度值。

2.2 曲面聚集太阳能流密度换算模型

根据式(2)测量得到的是聚集太阳光的有效辐射密度分布,曲面的结构特性使不同微元表面的辐射能流会相互干扰叠加,需通过反演模型换算获得投射聚集太阳光能流密度分布。根据多个漫灰表面的辐射传输规律,忽略朗伯表面自身的发射辐射(水冷朗伯测量靶的壁面温度与冷却水温接近,CCD 相机的可见光波段的辐射极小,可忽略不计),则聚集太阳光能流密度 $G_{SR,(i,j)}$ ^[13] 可表示为

$$G_{SR,(i,j)} = \frac{L_{SR,(i,j)}}{1 - \epsilon_{(i,j)}} - \sum_{m=1, n=1} L_{SR,(m,n)} \varphi_{(m,n),(i,j)} = \sum_{m=1, n=1} a_{(m,n),(i,j)} L_{SR,(m,n)}, \quad (3)$$

$$a_{(m,n),(i,j)} = \frac{\delta_{(m,n),(i,j)} - (1 - \epsilon_{(m,n)}) \varphi_{(m,n),(i,j)}}{1 - \epsilon_{(m,n)}}, \quad (4)$$

系数克罗内克算符 $\delta_{(m,n),(i,j)}$ 可表示为

$$\delta_{(m,n),(i,j)} = \begin{cases} 1, & i = m, j = n \\ 0, & \text{other} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $L_{SR,(i,j)}$ 为微元表面 (i,j) 的有效辐射; $\epsilon_{(m,n)}$ 为微元表面 (m,n) 的发射率; $\varphi_{(m,n),(i,j)}$ 为微元表面 (m,n) 对 (i,j) 的角系数,对半球壳体,存在

$$\varphi_{(m,n),(i,j)} = \frac{A_{i,j}}{4\pi r^2}, \quad (6)$$

式中: $A_{i,j}$ 为半球壳体上微元面 (i,j) 的表面积; r 为半球壳体的半径。

3 实验测量与方法

3.1 实验装置

根据原理图 1 设计加工了中空水冷条形球弧朗伯靶和水冷圆盘。结合分度盘、旋转轴、CCD 相机支架、室内太阳能模拟器、PC 电脑、数据采集器、冷却水管路系统等, 搭建调试了曲面太阳辐射能流密度实验系统, 如图 2 所示。

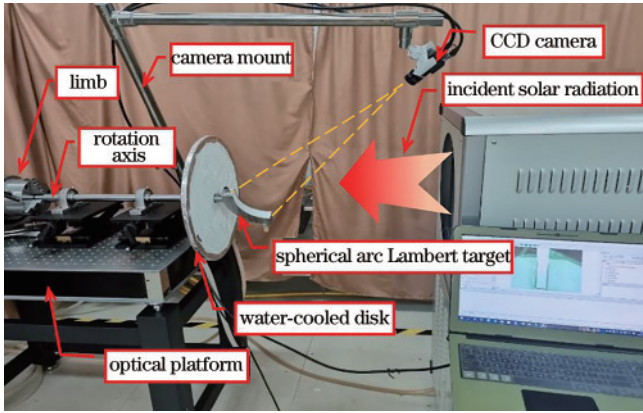


图 2 曲面聚集太阳光能流密度的实验装置图

Fig. 2 Experimental device of concentrated solar flux under curve surface

中空水冷条形球弧朗伯靶的球心半径为 100 mm, 厚度为 31.2 mm, 15°角弧长所需长度为 26.2 mm。通过冷却水带走球弧表面吸收的聚集太阳光辐射能量, 降低温度。中心轴杆将球弧锁紧固定在旋转轴上, 绕旋转轴旋转可围成一个完整的曲面半球壳, 如图 3 所示。太阳能辐射模拟器、CCD 相机、中性密度滤光片、水冷圆盘、固定轴和分度盘等主要实验装置的具体参数如表 1 所示。

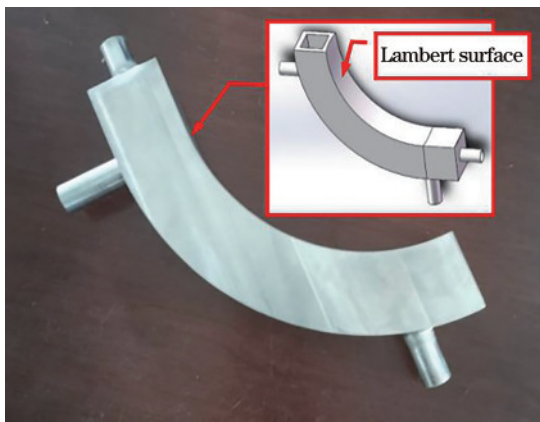


图 3 中空水冷条形球弧朗伯靶实物图

Fig. 3 Physical picture of strip-like spherical crown

表 1 曲面太阳能流实验测量装置的参数

Table 1 Parameters of solar current experimental measurement device on curved surface

No.	Experimental device	Performance parameter
1	high temperature solar simulator	peak flux density is 3 MW/m ² , spot diameter is about 0.08 m, maximum input power is 10 kW, maximum radiation power is about 3 kW (conversion efficiency is about 30%, spectrum approximate AM1.5)
2	CCD camera	MER-201-25GM, the resolution is 1682×1236
3	neutral density filter	OMGMNF-025, the transmittances include 1%, 10%, 15% and 30%
4	limb	model is HV-6 vertical indexing plate
5	rotation axis	L (length) = 0.6 m, d (diameter) = 0.02 m

实验测量与数据处理过程如下:

1) 根据光斑位置调整中空水冷条形球弧朗伯靶的位置, 确保投射的聚集太阳能流垂直照射到朗伯靶面, 同时调整 CCD 相机方位使其对准朗伯靶面。

2) 接通冷却系统, 启动太阳能辐射模拟器电源, 用 CCD 相机拍摄朗伯靶面灰度图像。通过调节分度盘带动旋转轴每次旋转 15°, 重复拍摄工作。旋转一周, 获得 24 张朗伯靶面灰度图像。

3) 读取朗伯靶面灰度图像, 通过式 (2) 计算得到聚集太阳光有效辐射密度 $L_{SR,(i,j)}$ 的分布图像。

4) 通过几何关系将平面太阳辐射能流密度映射到条形球壳曲面, 获得一个 15°圆周角的条形球壳曲面图像, 拼接 24 张图像得到完整的半球壳曲面聚集太阳光有效辐射密度 $L_{SR,(i,j)}$ 的分布图像。

5) 通过式 (6) 反演换算步骤 3) 得到的条形球弧 $L_{SR,(i,j)}$ 分布图像对应的 $G_{SR,(i,j)}$ 分布图像, 然后通过步骤 4), 拼接获得完整的半球壳曲面 $G_{SR,(i,j)}$ 的分布图像。

3.2 测量结果不确定度分析

该曲面太阳辐射能流密度实验测量结果的不确定度由 A 类不确定度 (重复性实验) 和 B 类不确定度 (仪器精度) 组成, 即

$$\mu = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2}, \quad (7)$$

式中, μ_A 和 μ_B 分别为 A 类不确定度和 B 类不确定度。

1) A 类不确定度

为了确定该曲面能流密度测量系统的重复性精度, 在不改变其他实验条件的基础上, 当分度盘为 0 时, 对中空水冷条形球弧朗伯靶的灰度图像进行了 25 次重复性实验, 计算每张灰度图像底部聚光区域 50×50 个像素点的灰度平均值 x_i , 根据格拉布斯准则剔除异常值, 得到由重复性实验引起的 A 类不确定度,

计算得到 $\mu_A = 2.31\%$ 。

2) B类不确定度

实验方案中B类不确定度包括CCD相机不确定度 μ_{B1} 、朗伯靶漫反射率 ρ_R 不确定度 μ_{B2} 和中性密度滤光片衰减系数 f_R 不确定度 μ_{B3} 。

采用均匀光源积分球(直径为300 mm,最大功率为36 W)和辐照计对CCD相机进行线性标定(标定时CCD相机镜头安装一个10%的中性密度滤光片, $f_{\text{high}} = 10^{-1}$)。结合式(1)得到线性拟合曲线方程 $L = 0.08778G - 0.6112$ 。两者线性相关度为0.98931,最大非线性不确定度 $\mu_{B1} = 3.72\%$ 。

使用医用纯硫酸钡粉末制成的稀溶液制作朗伯表面涂层,该涂层具有良好的朗伯漫反射特性。采用分光光度计测得漫反射材料硫酸钡在宽波段(400~1200 nm)的平均半球反射比因子为89.5%,最大值为86.89%,最小值为92.11%,故朗伯漫射表面反射率取值89.5%,计算得到不确定度 $\mu_{B2} = 2.61\%$ 。

滤光片衰减比的公式为 $f = 10^d$,其中, d 为光学密度,但实际中的衰减比并非常数,而随着波长变化而变化,在CCD相机波长范围内(390~780 nm),由文献[14]可知,中性密度滤光片在500 nm产生的不确定度 $\mu_{B3} = 0.5\%$ 。

将A类不确定度和B类不确定度相关数据代入式(9),得实验结果的不确定度为

$$\mu = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2} = \sqrt{2.31\%^2 + 3.72\%^2 + 2.61\%^2 + 0.5\%^2} = 5.12\% \quad (8)$$

4 结果分析

4.1 焦平面空间能流密度分布复合测量

为了验证该方法的准确性,采用高密度热流计(GD-B3-3M)和CCD相机对焦平面空间能流密度分布进行复合测量实验。高密度热流计直接测量时,通过三维移动平台调整热流计接收光斑的位置,测得光斑中心及半径方向共13个点的能流密度值,其中,光斑中心能流密度峰值为1601.53 kW/m²。采用CCD相机与朗伯靶装置的能流密度间接测量法,经后处理得到光斑能流密度图,光斑直径约为60 mm,中心能流密度峰值为1659.37 kW/m²。两种测量方法的峰值能流密度相对误差为3.6%,符合工程应用要求。 $f_s = 10^{-8}$ 时,采用4个1%的中性密度滤光片串联得到焦平面空间能流密度分布复合测量曲线图如图4所示。其中,圆点代表热流计直接测量点,曲线为CCD相机间接测量的能流密度结果。可以发现,光斑图像关于数值对称线对称。由于热流计探头相较于曲线上的单个像素点而言过大,是像素点集合区域能流密度的平均值,因此用矩形框表示该像素点集合区域。可以发现,直接测量的测点与间接测量曲线均位于矩形框内,进一步验证了本实验CCD间接测量的可靠性。

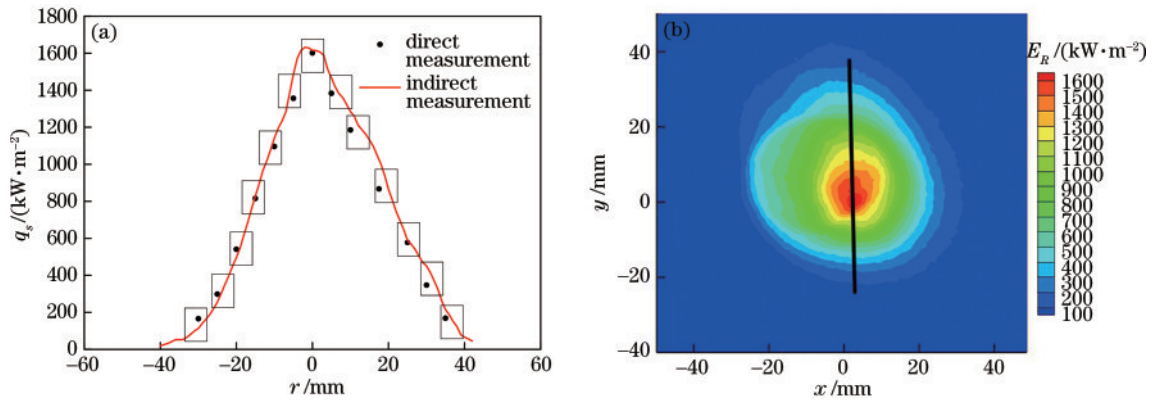


图4 焦平面空间能流密度的复合测量曲线。(a)复合测量曲线图;(b)焦平面光斑图像

Fig. 4 Composite measurement curve of focal plane spatial energy flux density. (a) Composite measurement curve; (b) focal plane spot image

4.2 曲面能流密度分布灰度图

在刻度盘的0刻度位置,条形球弧自然下垂。通过调整CCD镜头方位,保证条形球弧朗伯面充满CCD视场。图5为CCD相机拍摄的条形球弧朗伯面实物照片,其中CCD没有加装中性密度滤光片。可以发现,朗伯面位于图像的中心位置且形状比较规则,像素分析处理方便,可用于灰度成像实验。

在曲面聚集太阳能测量实验中,根据实际辐照强度大小,在CCD相机镜头前串联4个1%的中性密度

滤光片($f_s = 10^{-8}$),此时拍摄的峰值灰度约为180,接近饱和值的80%,效果较好。通过转动分度盘,驱动旋转轴旋转,每次步进15°,拍摄了分度盘在0~345°之间的24张灰度图像。截取每张灰度图像的条形球弧朗伯面区域图像(图5中矩形框区域),将条形球弧朗伯面区域图像拼接在一起,形成如图6所示的24张条形球弧朗伯面连续灰度图。可以发现,相邻灰度图之间的连贯性较好,亮度集中出现在灰度图的下端,即能流密度集中在半球壳顶点位置。球弧的亮斑位置存在

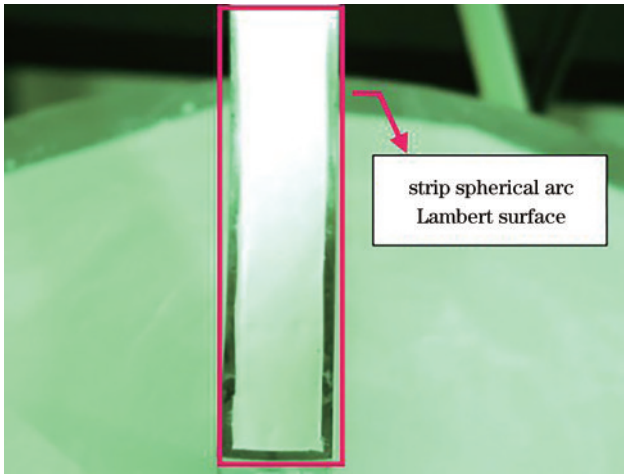


图 5 条形球弧朗伯面的实物图

Fig. 5 Photograph map of spherical crown Lambert surface

一定的波动,即左右两侧区域高,中间区域略低。这表明聚集太阳光斑在球弧曲面上沿天顶角和圆周角方向

分布不均匀。

4.3 曲面聚集太阳光能流密度分布特性

将图 6 的平面灰度图映射到实际的球弧曲面,然后根据式(2)将灰度值换算成能流值,得到曲面聚集太阳光能流密度分布的有效辐射密度 $L_{SR,(i,j)}$ 图像,如图 7 所示。可以发现,拼接形成的有效辐射能流密度图像锯齿不明显,比较光滑自然,说明该测量方法的可靠性。在曲面半球壳上,其顶点位置出现了能流密度空斑,能流密度主要集中在空斑外围。峰值有效辐射密度约 850 kW/m^2 ,位于第一象限。整体来看,沿半球壳的圆周角和天顶角方向,有效辐射能流密度分布存在显著的不均匀性,说明本实验方法可以有效地提取聚集太阳光方向分布和位置分布细节。实验中聚集太阳光的方向分布的不均匀性主要是太阳辐射模拟器的结构造成的(氙灯灯泡呈椭球形,灯泡的顶点玻璃相对较厚,导致中心点法向的方向能量几乎无法到达球心及附近,导致顶点位置出现能流密度空斑)。

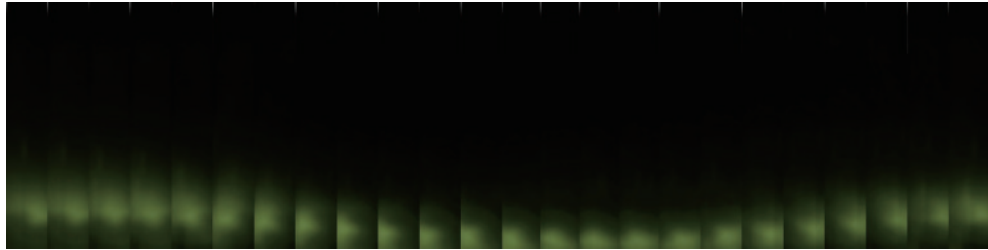


图 6 24 张平面长条灰度图

Fig. 6 Photograph of 24 flat grayscale images

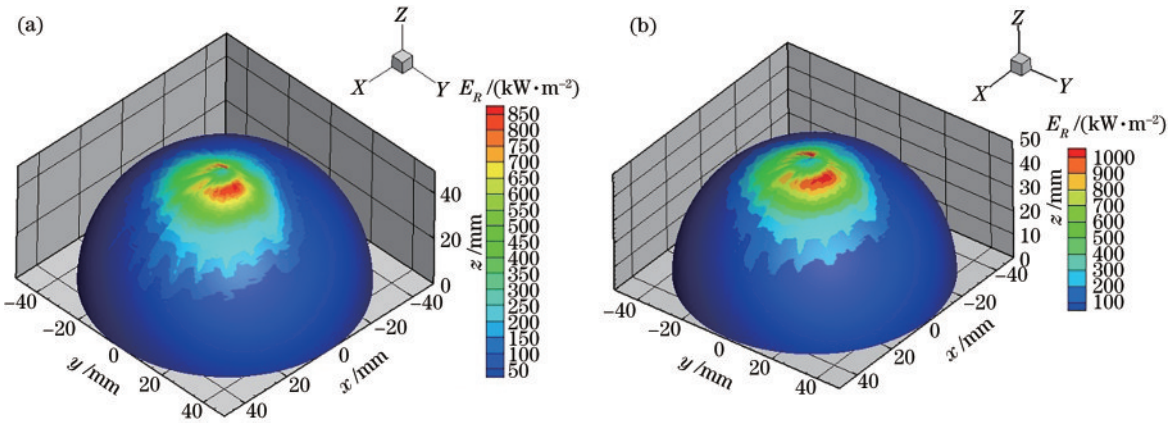


图 7 有效辐射与投射辐射的能流密度分布。(a)有效辐射;(b)投射辐射

Fig. 7 Distribution of energy flux density of effective radiation and projected radiation. (a) Effective radiation; (b) projected radiation

图 7(b)是图 7(a)反演换算的投射辐射能流密度 $G_{SR,(i,j)}$ 图像。对比图 7(a)和图 7(b)可发现,投射辐射能流密度 $G_{SR,(i,j)}$ 峰值约 1000 kW/m^2 ,较有效辐射能流密度 $L_{SR,(i,j)}$ 峰值高 18% 左右,这主要由朗伯面的反射率(89.5%)和条形球弧表面之间相互辐射会抹平能流密度差异造成。此外,由于条形球弧表面之间的投射辐射能够相互传递,图 7(a)的裙边轮廓较图 7(b)模糊,即直接测量得到的有效辐射能流密度图像与投射

辐射能流密度图像有相当明显的数值和轮廓差异,需要分开处理。

对比图 4(b)和图 7(b)可以发现,由于聚集太阳光入射方向的非均匀性,焦平面聚集太阳光能流密度分布与曲面壳体上(曲面入口在焦平面上)的聚集太阳光能流密度分布存在显著的区别。在焦平面上,聚集太阳光能流密度峰值在焦平面中心位置。而在曲面壳体上,聚集太阳光能流密度峰值在曲面顶点的边缘区域,

曲面顶点能流密度反而极小。焦平面测量得到的能流密度分布形状不能直接应用于曲面吸热器的传热设计上,需要针对曲面形状结构开展具体的研究分析。

5 结 论

基于分割-拼接技术,通过曲面热辐射传输理论分析与实验测量,采用中空水冷条形球弧朗伯靶结合 CCD 相机测量了曲面聚集太阳辐射能流密度分布。仿真结果表明:根据测量系统组成,通过计算分析,发现该曲面聚集太阳光能流密度测量方法的不确定度为 5.12%,满足工程测量应用要求;投射辐射能流密度(入射聚集太阳光能流密度分布)与曲面能流密度的测量结果(有效辐射能流密度分布)在数值和图像轮廓上存在差异,前者的峰值较后者高 18%,需要分开处理;与焦平面上中心区域高,边缘低的高斯型聚集太阳光能流密度分布不同,半球壳曲面的顶点区域曲面能流密度较低,峰值能流密度出现在顶点外缘的局部区域,即沿曲面的圆周角和天顶角方向,能流密度存在显著的不均匀分布。

参 考 文 献

- [1] Shi L, Wang X Z, Hu Y W, et al. Solar-thermal conversion and steam generation: a review[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115691.
- [2] 吕家祺, 张宁, 尹鹏, 等. 太阳能光伏聚光器光学设计类型研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 230002.
Lü J Q, Zhang N, Yin P, et al. Research progress on optically designed solar photovoltaic concentrators[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 230002.
- [3] 毛前军, 谢鸣, 帅永, 等. 太阳辐射强度对太阳能腔式吸热器热流密度的影响[J]. 太阳能学报, 2013, 34(10): 1818-1822.
Mao Q J, Xie M, Shuai Y, et al. Effect of incident solar irradiation on radiation flux distribution of a solar cavity receiver[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2013, 34(10): 1818-1822.
- [4] Ballestrín J, Monterreal R. Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation[J]. Energy, 2004, 29(5/6): 915-924.
- [5] Osuna R, Morillo R, Jimenez J M., et al. Control and operation strategies in PS10 tower plant[C]//13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, June 20-23, 2006, Seville, Spain.
Oak Ridge: Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 2006.
- [6] 王志敏, 产文武, 杨畅, 等. 双轴跟踪槽式聚光器的焦面能流测试与聚光特性[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0508001.
Wang Z M, Chan W W, Yang C, et al. Focal-plane energy flux test and focusing characteristic of dual-axis tracking trough concentrator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0508001.
- [7] 李建昌, 王成龙, 王森, 等. 聚光器吸热管表面辐射能流密度的检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 191903.
Li J C, Wang C L, Wang S, et al. Detection method for radiant energy flow density on condenser heat-absorbing tube surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 191903.
- [8] 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.
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.
- [9] 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.
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.
- [10] 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.
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.
- [11] Xiao J, Yang H Q, Wei X D, et al. A novel flux mapping system for high-flux solar simulators based on the indirect method[J]. Solar Energy, 2019, 179: 89-98.
- [12] Bellos E, Bousi E, Tzivanidis C, et al. Optical and thermal analysis of different cavity receiver designs for solar dish concentrators[J]. Energy Conversion and Management: X, 2019, 2: 100013.
- [13] Siegel R, Howell J. Thermal radiation heat transfer[M]. New York: Taylor & Francis, 2002.
- [14] 魏素, 肖君, 魏秀东, 等. 太阳能聚焦光斑能流密度测量方法评估[J]. 中国光学, 2016, 9(2): 255-262.
Wei S, Xiao J, Wei X D, et al. Evaluation of flux density measurement method for concentrated solar irradiance[J]. Chinese Optics, 2016, 9(2): 255-262.