

双轴跟踪槽式聚光器的焦面能流测试与聚光特性

王志敏^{1,2*}, 产文武¹, 杨畅¹, 田瑞^{1,2**}, 韩晓飞¹, 张学伟¹

¹内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

²内蒙古自治区可再生能源重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051

摘要 基于双轴跟踪槽式聚光系统设计了焦面能流密度测试装置,采用理论分析和实验测试的方法对由接收器的定位误差和跟踪误差引起的聚焦损失进行研究,并通过采集因子量化光学损失,从而揭示出各种误差影响的规律。结果表明:随着定位误差的增大,焦面宽度增加,焦面能流密度降低且趋于均匀;随着跟踪误差角的增大,焦面中心偏移量和光学损失增加。对于实验使用的双轴跟踪槽式聚光系统,当接收器光孔宽度为 50 mm 时,若要保证采集因子大于 90%,接收器的定位误差需保证在 455 mm 的 $\pm 1.1\%$ 之间且跟踪误差角小于 0.111° ,此时采集因子可达 95%。采集因子对跟踪误差角的变化更为敏感,实验研究结果与理论分析结果吻合,验证了测试设备和方法的可靠性,实验拟合的函数关系可为工程应用提供了理论指导。

关键词 几何光学; 能流密度; 双轴跟踪; 槽式聚光器; 采集因子; 洛伦兹函数

中图分类号 TK513.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0508001

Focal-Plane Energy Flux Test and Focusing Characteristic of Dual-Axis Tracking Trough Concentrator

Wang Zhimin^{1,2*}, Chan Wenwu¹, Yang Chang¹, Tian Rui^{1,2**},

Han Xiaofei¹, Zhang Xuewei¹

¹College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;

²Inner Mongolia Key Laboratory of Renewable Energy, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China

Abstract A test device for focal-plane energy flux density was designed based on a dual-axis tracking trough concentrator system. The focusing loss caused by the positioning error and tracking error of the receiver was studied through theoretical analysis and experimental testing. Furthermore, the optical loss was quantified by the acquisition factor, and laws of the influence of various errors were revealed. The results show that with the increase in the positioning error, the focal-plane width increases, whereas the focal-plane energy flux density decreases and tends to be uniform. Moreover, the focal-plane center migration and optical loss increase with the increase in the tracking error angle. For the dual-axis tracking trough concentrator system used in this experiment, when the receiver aperture is 50 mm, if the acquisition factor is greater than 90%, the positioning error of receiver is required to be between $\pm 1.1\%$ of 455 mm and tracking error angle is required to be less than 0.111° , and the acquisition factor can reach 95%. The acquisition factor is more sensitive to the variation of the tracking error angle. The experimental results are consistent with the theoretical analysis results, verifying the reliability of the test equipment and methods. The function relation of experiment fitting can effectively guide the engineering application.

Key words geometric optics; energy flux density; dual-axis tracking; trough concentrator; acquisition factor; Lorentz function

OCIS codes 080.2740; 350.6050; 080.2720; 220.4830

收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2019-10-13; 录用日期: 2019-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(51866011)、内蒙古自治区重大基础研究开放课题(2017)、内蒙古自治区科技创新引导项目(KCBJ2018015)、内蒙古工业大学博士基金(BS201932)、内蒙古工业大学科学研究项目(ZZ201907)、内蒙古工业大学大学生创新实验计划(2019034001)

* E-mail: wzm.imut@163.com; ** E-mail: tianr@imut.edu.cn

1 引 言

双轴跟踪槽式聚光集热系统因光学效率高而在工业用能领域具有良好的应用前景^[1-2]。在槽式聚光系统运行中,接收器的定位误差和系统跟踪误差都会引起光学聚焦损失,进而影响系统的光热转换性能。而焦面能流密度分布是聚光装置光学性能的直接体现,因此研究误差影响下聚光焦面光学特性的变化规律有重要意义。

Zou 等^[3]基于蒙特卡罗光线跟踪法,采用抽样方法研究了入射角对槽式太阳能集热器光学性能的影响。Hoseinzadeh 等^[4]采用蒙特卡罗光线跟踪法对不同尺寸的槽式太阳能集热器进行了研究,结果表明,增加边缘角可提高截距因子和光学效率,且两者会随接收器光孔宽度的增大而减小。陈飞等^[5]针对圆形接收器提出一种新型太阳能复合抛物面聚光器(CPC),并研究了该新型 CPC 光口宽度角对其光学性能的影响。吴德众等^[6]优化设计了 CPC 结构,提出一种可以实现二维光线追踪的新方法。冯志康等^[7]研究了两种接收器的光学效率差异,发现垂直和平行方向定位误差对光学效率的影响接近,而系统跟踪误差对接收器的光学效率影响较大。马保宏等^[8]研究了双轴槽式聚光器中平面光伏电池表面获得的能流密度的分布,发现越接近聚光镜的焦点,焦面平均能流密度越大,但衰减越快,导致能流密度的分布越不均匀。Cheng 等^[9]将蒙特卡罗光线跟踪法与基于种群的粒子群优化算法相结合,提出一种新的关于槽式太阳能集热器光学效率的计算方法。Song 等^[10]针对槽式集热系统(PTC)吸收管壁面能流密度不均匀且计算复杂的问题,提出一种基于降维算法的 PTC 能流分布的二维快速计算方法,并通过数学计算验证了该方法的正确性。陈飞等^[11-12]基于几何光学方法研究了太阳能槽式系统焦面的能流特性,并提出一种采用 Origin 软件中的频数统计工具对平面焦线的能流密度分布进行计算的新方法。Wang 等^[13]提出一种用于太阳能光伏系统的多段板聚光器,通过蒙特卡罗射线跟踪方法对其光学特性进行了仿真分析,并利用由朗伯靶和电荷耦合器件(CCD)相机组成的能流密度分布测量系统对其进行了实验验证。

综上所述,当前国内外关于双轴跟踪槽式系统光学特性的研究大多集中在理论与仿真分析方面,并且关于焦面能流密度的研究多采用理论计算和朗伯靶实验测试的方法。本文基于双轴跟踪槽式系

统,理论分析接收器的定位误差和系统跟踪精度对焦面聚光特性的影响,设计并搭建能流密度测试装置,利用双轴跟踪槽式聚光测试平台对其进行实验验证。该研究可为槽式太阳能系统接收器的结构设计以及工程应用提供参考。

2 理论分析

在研究槽式系统的聚光特性中,接收器的定位误差和系统跟踪精度会导致焦面宽度和位置发生变化,但通过聚光器聚焦后的能量往往比较集中,即能量的损失与焦面放大和位移并不呈正比关系,因此引入采集因子 γ ,其表示聚光镜反射的辐射落到接收器的百分比,是光反射聚焦损失的体现。任何形式的接收器在焦面所接收到的辐射都是非均匀的,焦面能流密度分布如图 1 所示,可假定为正态分布。分布曲线下的总面积是聚光镜反射的总能量,如果接收器的光孔宽度为点 A 和 B 间的距离,那么阴影部分的面积表示可被接收器接收的能量。采集因子^[14]表示为

$$\gamma = \frac{\int_A^B I(W) dW}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(W) dW}, \quad (1)$$

式中: W 为焦面半宽(单位为 mm); I 为能流密度(单位为 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)。所用的槽式聚光镜的相关参数如表 1 所示。

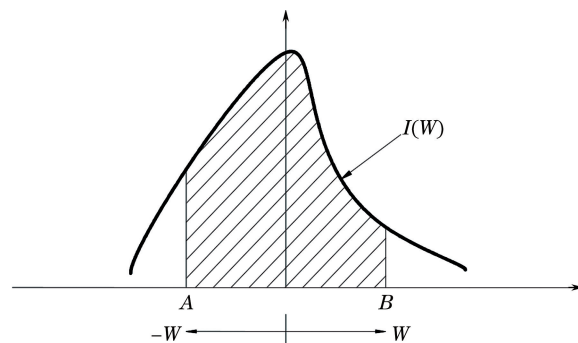


图 1 能流密度正态分布曲线

Fig. 1 Normal distribution curve of energy flux density

槽式太阳能系统的聚光特性是聚光镜在聚光焦面的能量体现,受多种因素影响,本文主要通过理论和实验研究揭示接收器定位误差和由跟踪精度产生的定向角误差引起的聚光损失的规律。在理论研究中,型面误差可忽略不计,而在实验研究中,当聚光镜加工成型并安装固定之后,其型面误差的影响将在实验结果中予以分析。

表 1 槽式聚光镜的相关参数

Table 1 Parameters of trough concentrator

Parameter	Value
Glass thickness D /mm	3
Reflectivity ρ	0.91
Length s /mm	1500
Aperture width L /mm	1500
Focal length f /mm	455

当接收器的垂直安装位置偏离焦距时,聚光焦面能流密度分布会发生变化,其光路如图 2 所示。

图 2 中, z 为聚光镜纵深, h 为接收器位置垂直方向的偏移量, F 为槽式抛物线最低点到接收器开

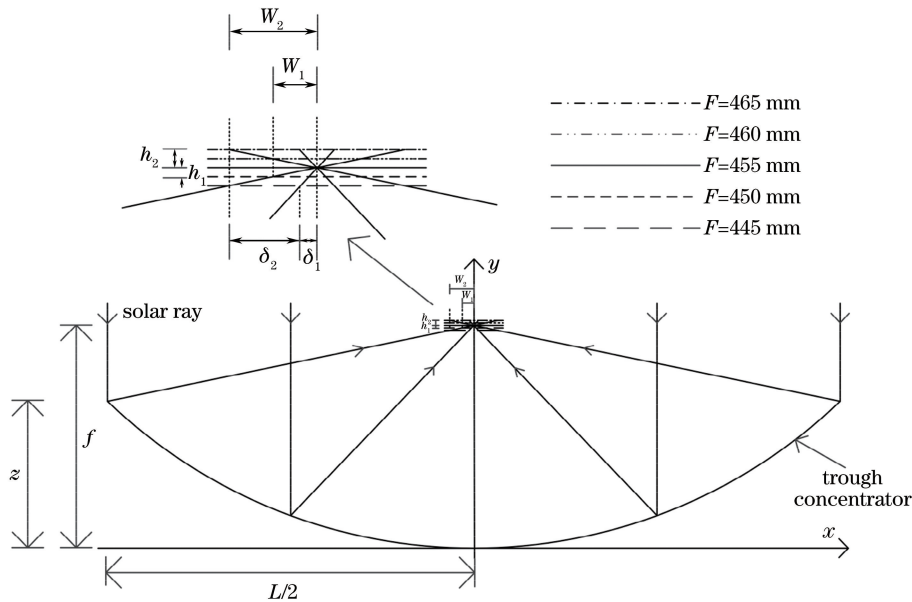


图 2 不同接收器位置下槽式聚光系统的光路示意图

Fig. 2 Optical path of trough concentrator system at different positions of receiver

因此聚光镜上光线聚焦到焦面上对应的每段能量都相等,即

$$I_1 \delta_1 s = I_2 \delta_2 s = I_3 \delta_3 s = \dots = I_n \delta_n s. \quad (4)$$

研究的聚光镜母线线型方程为 $x^2 = 4fy$, 令 m 表示 n 段中的任意某一段,且 $m \leq n$, 因此聚光镜左边任意反射光线的方程为

$$y = \frac{4f^2 - i_m^2}{4fi_m}x + f. \quad (5)$$

由三角形相似定理,可得

$$\delta_m = \frac{h}{f - i_m^2/4f} \times (-i_m) = \frac{-4fhi_m}{4f^2 - i_m^2}. \quad (6)$$

设定 $n = 20$, 入射光线的能流密度 I_0 为 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 接收器垂直安装位置的偏移量 h 分别为 5, 10, 15 mm (基线为 455 mm), 则对应的聚光

口面之间的距离。 h 和 W 会随环境和人为因素成为变量,两者之间的关系可表示为

$$W = \frac{hL}{2(f - z)}. \quad (2)$$

当接收器位置在垂直方向发生偏移时,焦面宽度会发生变化,对应的焦面能流密度也会发生变化。设入射光线的能流密度为 I_0 , 将聚光镜宽度平均分成 n 段,每段宽度为 i , 聚光焦面也会对应分成 n 段,每段宽度分别为 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$, 每段的平均能流密度分别为 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 。在理想状态下,根据能量守恒定律,可得

$$I_0 L s \rho = s(I_1 \delta_1 + I_2 \delta_2 + I_3 \delta_3 + \dots + I_n \delta_n). \quad (3)$$

焦面能流密度的分布情况如图 3 所示。

从图 3 可以看出,随着接收器定位误差变大,焦面呈发散状态,宽度增大,能流密度降低,聚光比减小。

跟踪精度也是影响槽式系统聚光性能的重要因素之一。所研究的槽式聚光系统采用双轴跟踪方式,跟踪精度较高。但是当聚光镜因太阳方位角进行东西方向转动时,其重心不会发生变化,因此东西方向跟踪精度较高且稳定;而当聚光镜因太阳高度角进行南北方向转动时,其重心会不停变动,因此导致南北方向跟踪精度下降。当风速等外界环境因素波动较大时,聚光镜受外力影响会使南北方向跟踪误差增大,直接导致入射光线的入射角发生变化,如图 4 所示。

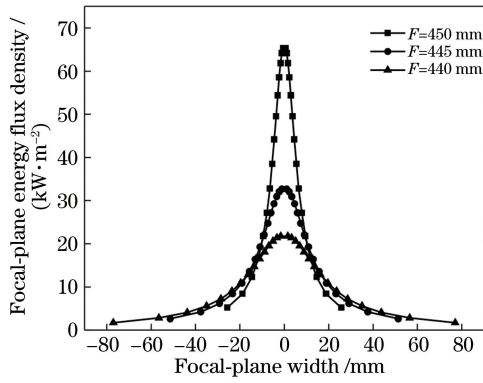


图3 聚光焦面能流密度分布

Fig. 3 Distribution of energy flux density in condensation focal-plane

图4中, θ_n 为入射角变化量, d_n 为实际焦面中

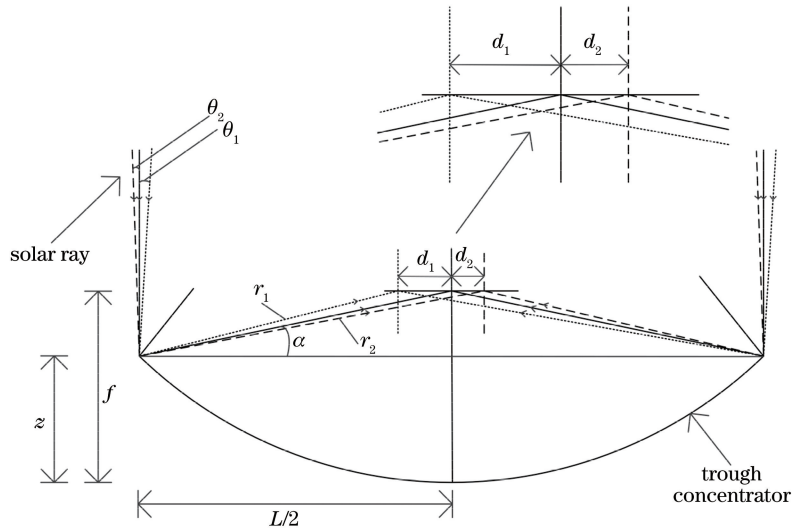


图4 入射角发生变化时的槽式聚光系统的光路示意图

Fig. 4 Optical path of trough concentrator system when the incident angle changes

3 实验分析

3.1 实验测试平台

在已有的双轴跟踪槽式聚光系统实验平台上, 利用 MEDTHERM 公司生产的能流密度计, 自行设计并加工了聚光焦面能流密度测试装置, 其设计和实物如图 5 所示。测试装置采用耐高温材料, 加工成 1500 mm × 300 mm 的矩形边框, 分别在纵向两侧边框上安装滑动模块并标定刻度, 在滑动模块上开槽以便于钢尺来回滑动, 钢尺上固定能流密度计并标定刻度, 可实现能流密度计模块沿焦面水平方向和沿槽式聚光镜焦线方向自由移动及准确定位。测试中, 将矩形边框的中心作为能流密度计横杆上的 0 点, 根据理论分析结果, 测试范围选择为 -40 ~ 40 mm。综合考虑测试精度以及操作的可行

性, 从 0 点位置分别沿径向每间隔 5 mm 测试一次, 并定义左边为负, 右边为正。实验测试到焦面能流为不连续的散点, 在计算采集因子的过程中, 为了使积分结果更准确, 采用插值和外推的方法充实数据点^[15]。外推数据的边界条件是要接近实验时间和地点对应的太阳直射辐照值。

$$\alpha = \arctan \frac{f - z}{L/2}, \quad (7)$$

$$r_n = \frac{f - z}{\sin\left(\theta_n + \arctan \frac{f - z}{L/2}\right)}, \quad (8)$$

$$d_n = \frac{L}{2} - \sqrt{\left[\frac{f - z}{\sin\left(\theta_n + \arctan \frac{f - z}{L/2}\right)}\right]^2 - (f - z)^2}. \quad (9)$$

测试过程中, 通过支架上的丝杠来实现垂直方向不同接收位置的调节, 由厂家提供能流密度计校正标定曲线, 输出电压信号通过 TP700 多路型数据采集传输仪实时记录, 实验中的太阳直射辐照值以及其他环境气象参数由 BSRN3000 气象数据采集系统提供。由于聚光焦面温度较高, 能流密度计的使用需配备相应的循环冷却水。

3.2 接收器定位误差的影响

根据 BSRN3000 气象采集系统记录的数据可

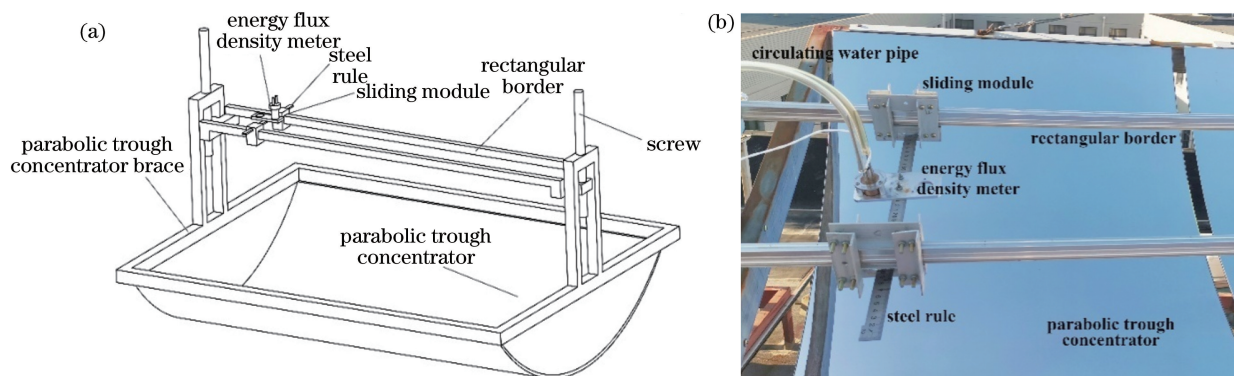


图 5 能流密度测试装置。(a)设计图;(b)实物图

Fig. 5 Test device of energy flux density. (a) Design drawing; (b) physical map

知,该地区在 8 月晴天时段每日 11:30—14:00,太阳直射辐照值、风速以及环境温度可稳定在一定范围内,因此选择该时段开展实验。测试期间太阳直射辐照值为 $780\sim 800\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,环境风速为 $0.6\sim 1.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,测试前需将聚光镜面擦拭干净以排除表面光洁度的影响,同时要随时监测跟踪状况以确保跟踪精度。

由图 6 可知:太阳辐照度在较小范围内变化时,当接收位置在 $F=455\text{ mm}$ 处,焦面最高能流密度可达 $46.28\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$,高于其他位置下的能流密度值;当偏离 455 mm 时,焦面最高能流密度随之降低,当偏离距离达 10 mm 以上时,从各位置最高能流密度占 455 mm 处最高能流密度的百分比来看,小于 445 mm 或大于 465 mm 的位置可获得的最高能流密度仅为 455 mm 处最高能流密度的 50% 甚至更低。因此选取 $445\sim 465\text{ mm}$ 的有效区间进行定位误差研究。

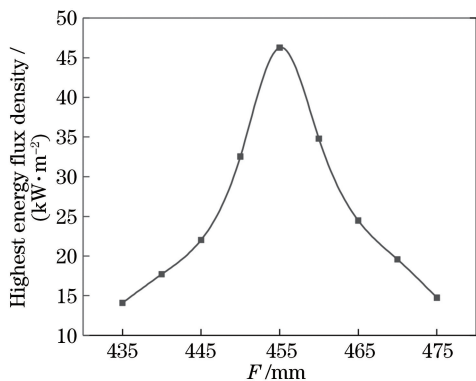


图 6 在不同接收位置的最高能流密度曲线

Fig. 6 Highest energy flux density curve at different receiving positions

由图 7 可知,在不同接收器位置下,最高能流密度值的规律与理论分析结果相似,接收位置定位误差对焦面能流密度分布影响明显。在 455 mm 位置

时,聚焦能量主要集中在 $(455\pm 15)\text{ mm}$ 之间,此时焦面宽度最窄;当接收器位置偏离 455 mm 时,随着偏离的距离增大,焦面的宽度增加,聚焦后的能流密度降低且能量趋于分散,能流分布在较宽范围内并趋于均匀。区别于理论分析,实验测试结果在偏移量相同时表现出非严格对称性,且垂直向上偏移的能流值均大于向下偏移的值,这是因为聚光镜型面存在误差,实际偏离抛物线最低点 455 mm 的位置大于设计位置^[16]。

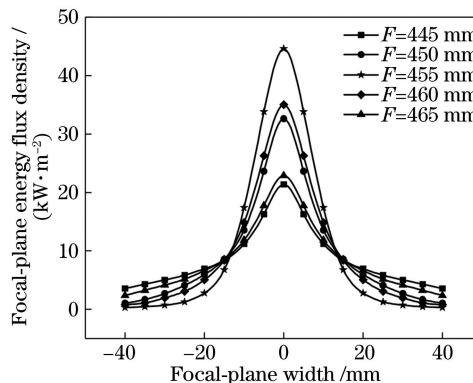


图 7 不同接收位置焦面能流密度分布曲线

Fig. 7 Distribution curve of energy flux density of focal-plane at different receiving positions

图 8 表示不同接收器光孔宽度对应的采集因子。由图 8 可知,接收器光孔宽度越大,采集因子越高,即焦面反射光损失越少。对于接收器,随着光孔宽度的增大,尽管光学损失减小,但热损失增加,因此光孔宽度的大小需综合权衡光学和热力学性能。接收器在 455 mm 位置时,采集因子呈抛物线上升,当接收器光孔宽度大于 50 mm 时,对应的采集因子可达 97.4% 以上,并变缓趋于 1 ;在 450 mm 、 460 mm 两个位置下,采集因子变化趋势比较接近,均略低于相同光孔宽度的接收器在 455 mm 位置处的采集因子。

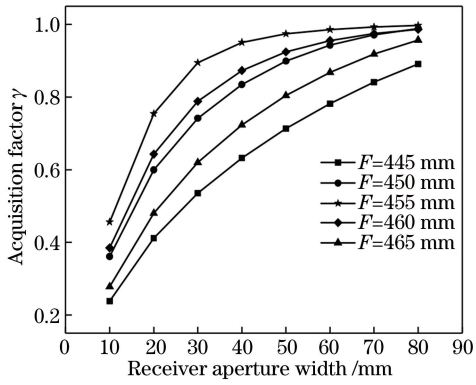


图 8 不同接收器光孔宽度对应的采集因子
Fig. 8 Acquisition factor corresponding to different receiver aperture widths

图 9 为接收器光孔宽度为 50 mm 时不同接收位置对应的采集因子。若在保证采集因子在 90% 以上,接收器的定位误差需保证偏离值在 ±5 mm 之间。将其意义延伸,对于几何聚光比为 30 的抛物槽式聚光镜,当接收器的定位误差不超过 455 mm 的 ±1.1% 的范围即可获得焦面 90% 以上的聚焦能量。因此对任意给定的光孔宽度的接收器,当其几何聚光比一定时,采集因子与安装位置精度之间的对应规律可通过函数拟合的方法进行量化。

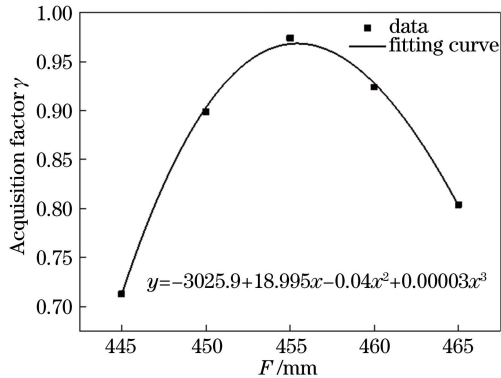


图 9 不同接收位置处的采集因子
Fig. 9 Acquisition factor corresponding to different receiver positions

3.3 接收器跟踪误差的影响

双轴跟踪槽式系统存在一定跟踪误差,该跟踪误差受跟踪系统自身影响外,还会与外界环境发生综合作用。跟踪误差会导致入射光线方向发生偏移,焦面位置随之偏移,对于安装在聚光焦面的接收器尤其是腔体接收器来说,偏移的焦面会直接影响其光学性能,并能进一步影响槽式聚光集热系统的光热转换性能,因此量化该偏移量对于接收器的设计和水平方向定位有实际的指导意义。当前测试焦面能流多采用间接测量法,但测试系统昂贵又复杂,

且 CCD 相机、滤光片等会对能流测量结果产生影响^[17]。本文基于能流密度计自行设计支架,通过直接法测试焦面能流,采用洛伦兹函数拟合方法研究跟踪误差对焦面中心偏移的影响。

实验前将能流测试装置固定于 $F = 455$ mm 位置处,并将聚光镜面擦拭干净,根据实验前期大量的调试工作,实验中选取 5 种不同的工况开展测试,实验期间太阳直射辐照值在 $730 \sim 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内,环境风速为 $0.8 \sim 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。考虑到实验中无法直接获得跟踪误差角,而跟踪误差角与焦面中心偏移量有一定的函数关系,因此采用洛伦兹函数拟合方法处理测试数据,其函数形式^[15]为

$$y_L = y_0 + \frac{2C}{\pi} \frac{\omega}{4(x_L - x_c)^2 + \omega^2}, \quad (10)$$

式中: y_0 为待估参数; C 为洛伦兹函数的积分面积; ω 为半峰全宽; x_L 为自变量; y_L 为因变量; x_c 为焦面中心偏移量。

利用 Origin 软件中的非线性拟合工具,对 5 种工况下的焦面能流密度分布数据进行洛伦兹函数拟合,拟合使用的迭代算法为 Levenberg-Marquardt 优化算法,且 5 种工况的耦合系数均大于 0.996,拟合结果较为精准。拟合结果如图 10 所示。

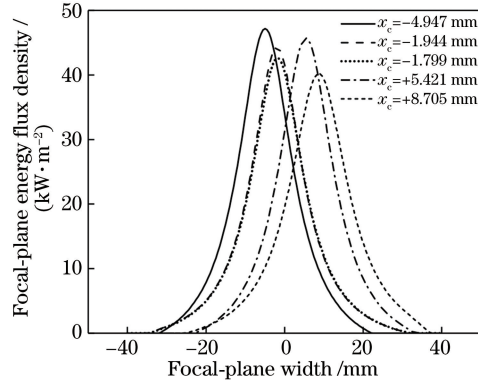


图 10 不同跟踪误差下的焦面能流分布
Fig. 10 Focal-plane energy flux distribution with different tracking errors

如图 10 所示,由于测试环境参数不同,5 种工况下最高能流有明显的区别,最高可达 $47.2 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$,焦面的宽度也有所差别,其中正负号表示偏移方向,偏左为负,偏右为正。5 种工况的焦面偏移量 x_c 分别为 -4.947 、 -1.944 、 -1.799 、 $+5.421$ 、 $+8.705$ mm,可通过(9)式进一步计算出对应的跟踪误差角(θ),分别为 -0.063° 、 -0.025° 、 -0.023° 、 $+0.069^\circ$ 、 $+0.111^\circ$,再对不同跟踪误差的采集因子进行计算分析,如图 11 所示。

图 11 为不同跟踪误差下接收器光孔宽度在

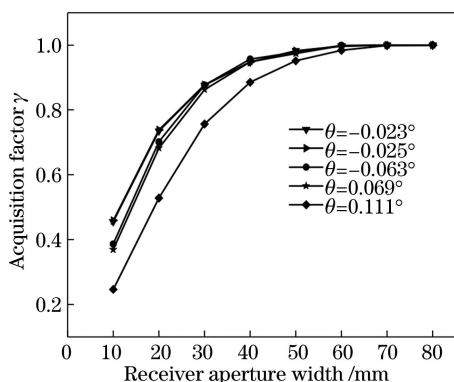


图 11 在不同的跟踪误差角下,不同接收器光孔宽度对应的采集因子

Fig. 11 Acquisition factor versus receiver aperture width with different tracking error angles

10~80 mm 间对应的采集因子。由图 11 可知:随着接收器光孔宽度增大,采集因子增大;而随着跟踪误差角增大,对于光孔宽度一定的接收器,一些反射光会偏离接收器光孔,使得采集因子减小,即当跟踪精度较差时焦面反射光损失增加;当跟踪误差角为 -0.023° 时,接收器光孔宽度大于 40 mm,可获得大于 95% 的采集因子,此时平板接收器的几何聚光比为 37.5;而跟踪误差角为 0.111° 时,接收器光孔宽度要大于 50 mm 才可获得 95% 以上的采集因子,平板接收器的几何聚光比降低为 30。可见采集因子对跟踪误差角较为敏感。

图 12 表示当接收器光孔宽度为 50 mm,几何聚光比为 30 时跟踪误差角与采集因子的关系。由图 12 可知:在聚光比为 30 时,若要保证采集因子在 95% 以上,则跟踪误差角要小于 0.111° ;随着跟踪误差角的增大,采集因子呈减小趋势,采集因子曲线的切线斜率增大;当跟踪误差角从 0.023° 增至 0.069° ,采集因子下降了 0.008,当跟踪误差角从 0.069° 增至 0.111° ,采集因子下降了 0.022,后者的变化量约为前者的 3 倍。在实际运行中应尽量减小跟踪误差角,而跟踪系统的精度与成本有直接关系,因此实际运行的跟踪系统需根据聚光比、采集因子以及成本综合权衡。

4 结 论

对双轴跟踪太阳能槽式系统的焦面能流分布和聚光特性进行了理论和实验研究,得到以下结论。1)接收器定位误差对能流密度分布影响较大,随着偏离距离增大,焦面的宽度增加,聚焦后的能流密度降低且能量趋于分散,能量聚光比减小;当接收器光孔宽度为 50 mm 时,若要保证采集因子在 90% 以

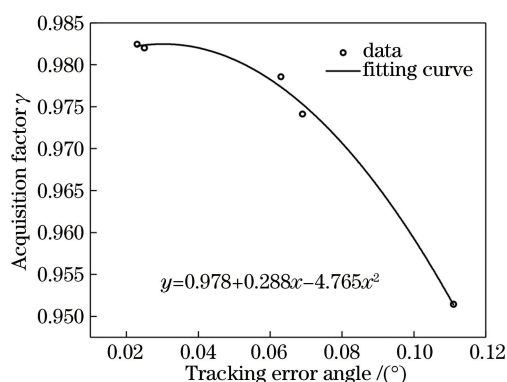


图 12 不同跟踪误差角对应的采集因子

Fig. 12 Acquisition factor corresponding to tracking error angles

上,接收器的定位误差需保证在 455 mm 的 $\pm 1.1\%$ 之间。2)跟踪误差角受环境参数综合影响,随着跟踪误差角的增大,焦面中心偏移量增加,从而焦面反射光损失增加;采集因子受跟踪误差角的影响呈非均匀分布,当跟踪误差角从 0.023° 增至 0.069° ,采集因子减小了 0.008,当跟踪误差角从 0.069° 增至 0.111° ,采集因子减小了 0.022,后者的变化量接近前者的 3 倍,因此采集因子对跟踪误差角较为敏感;当接收器的光孔宽度为 50 mm 时,若要保证采集因子在 95% 以上,则需满足跟踪误差角不大于 0.111° 。3)通过实验测量焦面能流得到的接收器定位误差和跟踪误差对采集因子影响的结论与理论分析中几何光学模型计算得出的结论能较好吻合,验证了实验和数据拟合方法的可靠性,且所提方法具有很好的普适性,可为工程应用提供理论指导。

参 考 文 献

- [1] Yan Y F, Zhang Z E, Zhang L, et al. Application and utilization technology of solar energy [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(S1): 47-56.
闫云飞, 张智恩, 张力, 等. 太阳能利用技术及其应用 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(S1): 47-56.
- [2] Kalogirou S. The potential of solar industrial process heat applications [J]. Applied Energy, 2003, 76(4): 337-361.
- [3] Zou B, Yang H X, Yao Y, et al. A detailed study on the effects of sunshape and incident angle on the optical performance of parabolic trough solar collectors [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 81-91.
- [4] Hoseinzadeh H, Kasaeian A, Shafii M B. Geometric optimization of parabolic trough solar collector based on the local concentration ratio using the Monte Carlo method [J]. Energy Conversion and Management,

- 2018, 175: 278-287.
- [5] Chen F, Gao C, Yang C X, et al. Surface-shape construction and optical analysis of novel solar compound parabolic concentrator with circular absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (6): 0608001.
陈飞, 高崇, 杨春曦, 等. 新型圆形吸收体太阳能复合抛物面聚光器面形构建及光学分析[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0608001.
- [6] Wu D Z, Li M, Li G L, et al. Photothermal properties of compound parabolic concentrator under low interception ratio [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 082201.
吴德众, 李明, 李国良, 等. 低截取比下复合抛物面聚光器的光热性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 082201.
- [7] Feng Z K, Li M, Wang Y F, et al. Study on optical efficiency characteristics of receivers in a solar parabolic trough concentrator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0122002.
冯志康, 李明, 王云峰, 等. 太阳能槽式系统接收器光学效率的特性研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0122002.
- [8] Ma B H, Ge S H, Li S Y. Investigation of energy-flux-density distribution of parabolic trough solar concentrators[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080801.
马保宏, 葛素红, 李守义. 槽式抛物面聚光器能流密度分布的理论研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080801.
- [9] Cheng Z D, Zhao X R, He Y L. Novel optical efficiency formulas for parabolic trough solar collectors: computing method and applications [J]. *Applied Energy*, 2018, 224: 682-697.
- [10] Song J, Tong K, Li L, et al. A tool for fast flux distribution calculation of parabolic trough solar concentrators [J]. *Solar Energy*, 2018, 173: 291-303.
- [11] Chen F, Li M, Ji X, et al. Energy distribution of focal plane and optimization of receiver for parabolic trough concentrator[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2015, 36(9): 2173-2181.
陈飞, 李明, 季旭, 等. 太阳能槽式系统焦平面能流特性及接收器结构优化[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(9): 2173-2181.
- [12] Xu C M, Li M, Ji X, et al. Frequency statistics analysis for energy-flux-density distribution on focal plane of parabolic trough solar concentrators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0408001.
许成木, 李明, 季旭, 等. 槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的频数统计分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0408001.
- [13] Wang G, Wang F S, Chen Z S, et al. Experimental study and optical analyses of a multi-segment plate (MSP) concentrator for solar concentration photovoltaic (CPV) system [J]. *Renewable Energy*, 2019, 134: 284-291.
- [14] He Z N. Solar thermal utilization [M]. Anhui: University of Science and Technology of China Press, 2009.
何梓年. 太阳能热利用[M]. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [15] Ye W P. Origin 9.1 technical drawing and data analysis [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2015.
叶卫平. Origin 9.1 科技绘图及数据分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [16] Chen F, Li M, Ji X, et al. Influence of glass thickness of reflector on the concentrating characteristics in the solar-energy trough system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1208002.
陈飞, 李明, 季旭, 等. 太阳能槽式系统反射镜玻璃厚度对聚光特性的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1208002.
- [17] Meng J J, Yu J, Mo Z Q, et al. Laser spot illuminance measurement method based on scattering imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (7): 0712004.
孟晶晶, 余锦, 貉泽强, 等. 激光光斑照度的散射成像测量方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0712004.