

载荷作用下太阳能聚光器两种光-机集成建模方法的验证

颜健*, 彭佑多, 刘永祥, 胡耀松

湖南科技大学机电工程学院, 湖南湘潭 411201

摘要 针对两种光-机集成建模方法开展验证研究,包括只考虑载荷作用下镜面单元空间位姿变化(忽略镜面自身弹性变形)的镜面位姿重构方法,以及本文提出的平面微元替代方法。平面微元替代方法是将聚光器反射镜面离散成大量平面微元,并根据平面微元的变形信息直接建立其几何光学信息,实现光-机分析的数据统一与集成,建立反射镜面的光-机信息集成模型。采用两种光-机集成方法模拟得到的聚焦能流分布结果相互印证,并与承载下聚光实验测量结果进行对比验证,结果充分说明了两种建模方法的有效性。当聚光器中各反射镜面的弹性变形较大时,镜面位姿重构方法将会失去准确预测其光学性能的能力;而平面微元替代方法能够考虑载荷作用下反射镜的任何变形(弹性变形和刚体位移),能准确预测聚光性能,具有普适性和简单的优点。对于聚焦能流密度较低的情况,实验表明采用粗糙白纸(打印纸)作为朗伯靶面用于聚焦能流密度测量简单可行。

关键词 光学设计; 太阳能聚光器; 镜面变形; 光-机集成建模; 光学性能; 能流分布

中图分类号 TK513.1; TH122

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2022001

Validation on Two Optical-Mechanical Integration Modeling Methods for Solar Concentrator Under Load

Yan Jian*, Peng Youduo, Liu Yongxiang, Hu Yaosong

School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China

Abstract In this paper, we have carried out a validation study on two optical-mechanical integration modeling methods, including the mirror pose reconstruction method that only considers the spatial pose change of mirror surface units under load (ignoring the elastic deformation of the mirror surface) and the plane element substitution method proposed in this paper. The proposed method works by converting the reflecting mirror surface of the solar concentrator into many discrete plane elements and directly establishing the geometric optical information from deformation information of plane elements, so as to realize the data unification and integration of the optical-mechanical analysis, and the integration model of optical-mechanical information of the reflecting mirror is established. The results of focused flux distributions from the two optical-mechanical integration methods are verified jointly and compared with the measuring results from the experiment of solar concentrator under load, which fully demonstrates the effectiveness of the two methods. When the elastic deformation of all reflecting mirror surfaces in the concentrator is large, the mirror pose reconstruction method cannot accurately predict the optical performance of concentrators. However, the plane element substitution method can fully consider any deformation (elastic deformation and rigid body displacement) of the reflecting mirror under load and accurately predict the focused performance with its universality and simplicity. Experiments show that for low focused flux density, it is feasible to use rough white paper (printing paper) as the Lambertian surface to measure the focused flux density.

Key words optical design; solar concentrator; mirror surface deformation; optical-mechanical integration modeling; optical performance; flux distribution

收稿日期: 2022-04-06; 修回日期: 2022-04-28; 录用日期: 2022-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(52105097)、湖南省自然科学基金(2020JJ5189)

通信作者: *yanjian1988@hnust.edu.cn

1 引言

聚光太阳能热发电技术是采用大面积的反射镜面(称之为太阳能聚光器)将低密度太阳辐射能聚集到小面积的接收器上,形成高密度辐射能以加热接收器内传热工质,进而驱动热机-发电机组进行发电^[1-2]。该技术能与储热系统或常规火力发电系统有机结合,从而实现连续、稳定的发电,是实现能源结构升级并助力“碳达峰、碳中和”目标实现的重要途径^[3]。太阳能聚光器是为光热发电系统提供高品质热源的重要光学装置^[4-6],但由于其迎风面积大和结构质量大,服役过程易受自重和风载荷作用,引起结构变形^[7-8],导致反射镜面的光学形面偏离原设计曲面,恶化其聚光性能和聚焦能流分布品质,由此引发聚光热发电系统的光-电转换效率显著下降等问题。因此,建立考虑载荷作用下聚光器镜面变形的光学模型(即光-机集成模型)并准确预测其实际服役载荷下的光学性能尤其重要,这样能为聚光器的结构优化设计与性能评价提供基础。

服役载荷下聚光器光学性能预测的关键是在光学分析中考虑反射镜面的变形信息。根据变形信息与光学信息的结合方式,现有方法可主要归类为理论建模方法、曲面重构方法和镜面位姿重构方法。理论建模方法通过建立载荷作用下聚光器镜面变形的解析数学模型,直接解析表达各点的光学信息(包括位置信息和法线信息),再采用常用的光线跟踪方法进行光学分析^[9-10]。但该方法很难适用于工程中具有复杂桁架结构的聚光器。Li等^[9]提出了一种通过优化金属薄板的刚度、几何形状和加载方式获得简单类抛物聚光器的设计方法,建立了设计此类聚光器的加载变形解析模型和光学分析模型。曲面重构方法通过反射镜面离散点的变形信息去重新拟合新的反射镜曲面,再采用光线跟踪方法进行光学分析^[11-13],如要提升重构精度则需对各镜面单元单独进行拟合,其计算量大且通用性较差。陆永亚等^[11]采用有限元软件模拟了载荷下定日镜镜面的变形信息,再采用B样条全局曲面插值法对镜面离散点进行曲面重构,进而分析载荷下定日镜的聚光效率。作者先前假设聚光器中各反射镜单元是绝对刚体(忽略镜面自身的几何畸变,即其弹性变形),根据载荷下各镜面单元上三个点的变形矢量建立其新的位姿模型,再采用光线跟踪方法建立聚光器的光-机集成模型(称此光-机集成建模方法为镜面位姿重构方法),初步分析了服役载荷对碟式聚光系统聚焦能量分布的影响^[8],但还未对该方法进行实验验证研究。

总的来说,现有研究更多的是处于聚光系统的风载荷和结构静/动力学分析阶段^[7,14-15],对于载荷作用下聚光器的光-机集成建模研究关注甚少,而且相关验证实验也很缺乏。本文目的就是针对两种光-机集成建模方法开展验证研究,为今后服役载荷作用下太阳能聚光器的光学性能预测提供有效方法。两种光-机集成建模方法分别是本课题组先前提出的镜面位姿重构方法^[8]和本文提出的平面微元替代方法。本文提出

的平面微元替代方法是将聚光器反射镜面离散成大量的平面微元,并根据平面微元的变形信息直接建立其几何光学信息,实现其结构变形与几何光学分析的数据统一与集成。两种建模方法的数值模拟结果相互印证,并与承载下聚光实验进行对比验证,充分说明两种建模方法的有效性。

2 两种光-机集成建模方法

2.1 镜面光学信息与变形信息集成的刚体位姿重构方法

大型聚光器通常采用若干镜面单元拼接成光学曲面来会聚太阳光能^[4]。理论而言,载荷作用下聚光器中各镜面单元的反射镜面会产生变形,它由刚体位移(平移和旋转)和几何畸变(例如尺寸和面形的变化,也称为镜面自身的弹性变形)两部分组成。如果几何畸变对其聚光影响可忽略(例如镜面单元的刚度较大或采用单点支撑时),则镜面单元只存在刚体位移部分,即只需考虑结构变形导致的镜面单元空间位姿变化。基于上述假设,本课题组先前提出了一种镜面光学信息与其变形信息集成的镜面位姿重构方法,它是通过镜面单元表面三个点的空间坐标和变形矢量反求其新空间位姿,简单来说,就是将结构变形后镜面单元的空间位姿1看作是其从理想位姿经过一次平移和两次旋转运动后到达的,如图1所示。刚体运动等效过程为:1)整体平移运动,使点 T_1 (理想位置)平移到点 T_{11} ,此时,点 T_2 和 T_3 分别平移到 T_{21}^1 和 T_{31}^1 位置;2)镜面单元绕点 T_{11} 旋转(旋转轴矢量为 \mathbf{n}_1 ,旋转的角度为 φ_1),使点 T_{31}^1 运动到点 T_{31} ,此时,点 T_{21}^1 运动到 T_{21}^2 位置;3)镜面单元绕 $T_{11}T_{31}$ 轴线(旋转轴矢量为 \mathbf{n}_2)旋转角度 φ_2 ,使点 T_{21}^2 运动到点 T_{21} ,至此镜面单元已到达空间位姿1。根据镜面单元变形前后三个点的位置矢量 $T_1\sim T_3$ 和 $T_{11}\sim T_{31}$,就能确定上述“一移两转”刚体运动参数(平移矢量、各旋转运动的轴线矢量和旋转角度),然后将该镜面单元的反射镜表面上所有光学离散点的光学信息做相同刚体变化处理,从而可建立考虑聚光器承载变形的光学模型。具体的刚体运动参数和光学模型推导详见文献[8,16],在此不赘述。

2.2 镜面光学信息与变形信息集成的平面微元替代方法

聚光器反射镜面是实现太阳光能聚集的光学功能形面,其任意点的光学信息均由空间坐标和法线矢量组成。根据微分几何理论,反射镜面任意点的法线向量可通过对该点求偏导确定;而根据偏导数的定义,可将其表达为函数极限的形式,即反射镜面任意点的法线向量可等效为其邻域内一个微小平面的法线向量,所以理论上可采用大量平面微元来逼近任意复杂曲面。如此,可将聚光器反射镜面离散成大量的平面微元,并用这些平面微元的光学信息(位置矢量和法线矢量)去替代整个聚光器反射镜面进行聚光分析。显然,这种平面微元离散既符合采用光线跟踪方法进行聚光器光学分析的光学离散需求^[17-19],又完全符合采用有

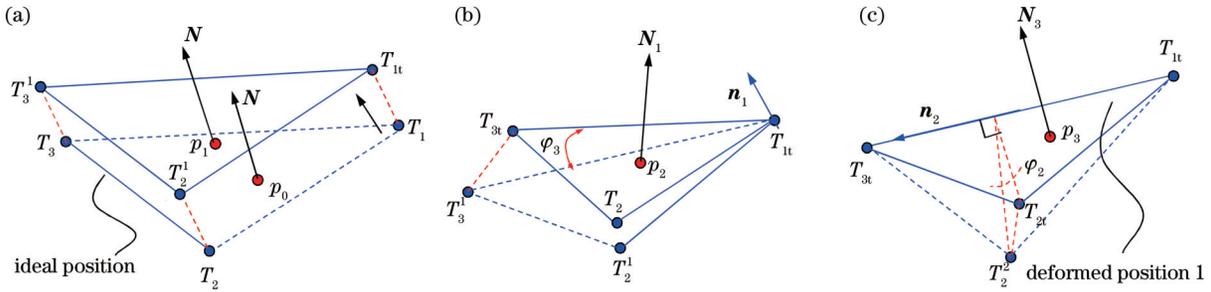


图 1 镜面单元从理想位姿到变形位姿 1 的等效刚体运动过程。(a) 平移运动; (b) 绕点 T_{1t} 的旋转运动; (c) 绕轴线 $T_{1t}T_{3t}$ 的旋转运动
Fig. 1 Equivalent process of rigid body motion of mirror unit from ideal position to deformed position 1. (a) Translational motion; (b) rotational motion around point T_{1t} ; (c) rotational motion around $T_{1t}T_{3t}$ axis

限元数值方法进行聚光器结构变形分析的离散需求^[7-8],从而直接实现其结构变形与光学分析的数据统一和集成,如图 2 所示。基于上述思路,本文提出的平面微元替代的太阳能聚光器光-机集成建模方法具有简单和普适的优点。

如图 2(c) 所示,以抛物碟式聚光器反射镜面离散后任意的一个四边形平面微元 $abcd$ (或三角形平面微元 abc) 为对象,记为平面微元 i 。服役载荷作用下聚光器结构产生变形,平面微元 i 的节点 $a \sim d$ 分别运动到点 $a_1 \sim d_1$ 位置,它们的位置矢量分别为

$$\begin{cases} a_1 = a + u_a \\ b_1 = b + u_b \\ c_1 = c + u_c \\ d_1 = d + u_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: $a \sim d$ 分别是平面微元 i 的 4 个节点 $a \sim d$ 的位置

矢量; $a_1 \sim d_1$ 分别是平面微元 i 的 4 个节点 $a_1 \sim d_1$ 的位置矢量; $u_a \sim u_d$ 分别为载荷作用下节点 $a \sim d$ 的位移矢量,它们均可直接从聚光器有限元模型及变形计算结果中获取。

此时,平面微元 i 的几何形心点 p_1 也变化到点 p_t 位置,其位置矢量为

$$p_t = \begin{cases} (a_1 + b_1 + c_1 + d_1)/4 & \text{quadrilateral element } abcd \\ (a_1 + b_1 + c_1)/3 & \text{triangular element } abc \end{cases} \quad (2)$$

相应地,平面微元 i 的单位法线向量 N_{pt} 为

$$N_{pt} = \frac{b_1c_1 \times b_1a_1}{|b_1c_1 \times b_1a_1|} \quad (3)$$

式中: $b_1c_1 = c_1 - b_1$; $b_1a_1 = a_1 - b_1$ 。

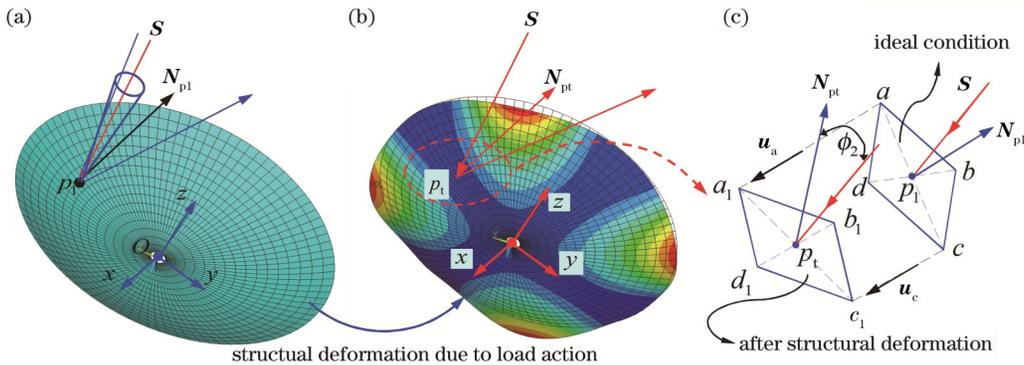


图 2 采用平面微元的光学信息和变形信息集成示意图。(a) 反射镜面离散成大量平面微元; (b) 镜面承载变形; (c) 平面微元的变形信息与光学信息
Fig. 2 Schematic diagrams of integration of optical and deformation information using planar elements. (a) Mirror surface is discreted into a large number of planar elements; (b) mirror surface deformation; (c) optical and deformation information of planar elements

采用光线跟踪方法建立聚光器反射镜面的光学模型时,假定反射镜面离散后各平面微元的几何形心位置均接收一个太阳入射光锥并进行反射[图 2(a)],则

结构变形后平面微元 i 的有效采光面积(与太阳入射光锥的中心光线垂直的投影面积)为

$$A_{pt} = \begin{cases} \frac{1}{2} (|b_1c_1 \times b_1a_1| + |d_1c_1 \times d_1a_1|) \cos \phi_2 & \text{quadrilateral element } abcd \\ \frac{1}{2} \|b_1c_1 \times b_1a_1\| \cos \phi_2 & \text{triangular element } abc \end{cases} \quad (4)$$

式中: ϕ_2 是向量 N_{pt} 与太阳入射光锥的中心光线矢量 S 的夹角。当聚光器无跟踪误差时, $S = [0, 0, -1]$, 即中心光线与聚光器的焦轴平行。至此, 可按照式(1)~(4)确定反射镜面各平面微元的光学信息模型, 建立考虑聚光器镜面变形的光学模型, 用于后续的聚焦能流分布模拟。

2.3 聚焦能流模拟方法和镜面误差评价

基于第 2.1 节或第 2.2 节建立的聚光器反射镜面光学模型, 结合太阳入射光锥和接收器的光学离散模型, 并采用广泛使用的光线跟踪方法就可模拟得到聚焦能流分布和光学效率等结果, 实现预测和评估服役载荷作用下太阳能聚光系统的光学性能。其中, 接收器和太阳入射光锥的光学离散在本课题组先前的聚光系统光学建模^[17-19]中均有详细阐述, 在此不赘述。

表面斜率误差是评价聚光器反射镜光学精度的重要指标, 它定义为镜面某点的实际法线与该点理想法线之间的夹角, 对于承载变形后的平面微元 i , 几何形心的斜率误差为

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{N_{\text{real}} \cdot N_{\text{ideal}}}{|N_{\text{real}}| \cdot |N_{\text{ideal}}|}\right), \quad (5)$$

式中: N_{real} 是结构变形后平面微元 i 的实际法线矢量, 它满足 $N_{\text{real}} = N_{pt}$; N_{ideal} 是结构未变形时的理想法线矢量, 它等于式(3)中 $u_a \sim u_d$ 均为 0 时计算的法线矢量。

另外, 聚光器承载变形后平面微元几何形心还存在位置变化, 即位置误差, 它可由点 p_1 与点 p_2 的位置矢量的差值求模确定。

3 实验装置设计与实验方法

为了降低实验成本, 采用文献[20]提出的折平板等光强反射聚光器设计方法, 设计并搭建了一台采用低成本平面镜且具有均匀能流分布的聚光器, 用于承载变形下聚光器的聚光实验, 以验证两种光-机集成建模方法的正确性。接下来, 将介绍聚光器的光学与结构设计、安装与聚焦能流分布测量。

3.1 实验聚光装置设计与搭建

折平板等光强反射聚光器是通过各平面镜的反射光均匀聚集在相同平面接收区域内, 通过依次叠加增加聚光倍数实现均匀能流分布^[20]。根据其光学设计原理, 可直接在 AutoCAD 软件中采用作图法获得各反射镜的光学尺寸。首先, 绘制 200 mm 聚焦宽度线和 1000 mm 聚焦距离; 然后将聚光器的起始点距离设置为 150 mm, 根据平行光入射到各平面镜边缘的反射光线恰好落到接收宽度边缘的规则, 可依次绘制出各反射镜面, 最终得到的镜面布置参数如图 3 所示, 其理论平均聚光比是 11.33。图 4 是采用 OptisWorks 光学软件模拟的光线传输轨迹和聚焦能流分布(采用该软件的建模方法可见文献[21]), 其计算参数中太阳光锥角为 0.26° , 假定太阳直射辐照强度(DNI)为 1000 W/m^2 。可以看到: 平面接收器的能流分布非常均匀, 最大能流密度是 12200 W/m^2 , 其聚光比约为 12.20, 与理论平均聚光比 11.33 非常接近, 说明聚光器的光学设计是正确的。

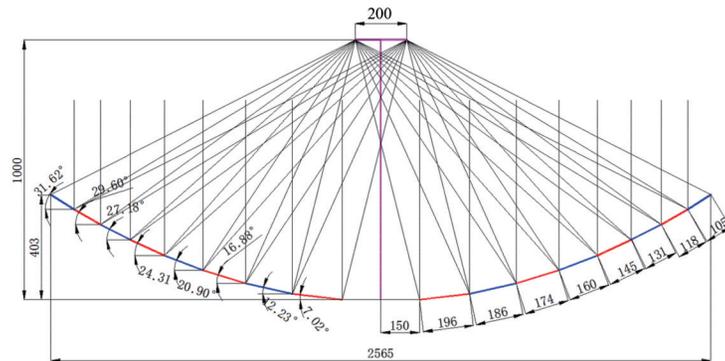


图 3 折平板等光强反射聚光器的光学设计尺寸

Fig. 3 Optical design parameters of equal-intensity reflection solar concentrator system with pleated plate

图 5(a) 是采用 SolidWorks 软件设计的聚光器三维模型, 其中平面接收器采用四根螺杆进行固定与高度调节, 支撑平板的每侧固定有两根并列的悬臂梁, 每根悬臂梁上固定有 8 块厚度为 4 mm 的平面银镜, 各平面镜与悬臂梁仅通过单个陶瓷垫/螺栓支撑结构进行固定连接, 方便同时验证两种光-机集成建模方法的正确性。采用成都诱光科技生产的 GZW-1 太阳跟踪控制系统(最高跟踪精度 $< 0.05^\circ$), 实现聚光器准确跟踪太阳位置, 其太阳位置检测传感器固定于刚度较大的支撑平板上。图 5(b1)~(b4) 是平面镜的位姿调节与固定结构, 该结构是通过将带螺杆的陶瓷垫通过结构

胶粘接在平面镜背部, 再采用球铰垫片组将平面镜固定在悬臂梁上得到的。但安装过程中会遇到两个问题, 这也是平面镜产生位姿误差的主要原因。第一是陶瓷垫片中嵌入的螺杆有松动, 即螺杆可相对于陶瓷垫片转动, 在单点支撑时平面镜的自重会使其位姿发生改变。即使在螺杆底部连接处增加硅酮结构胶[图 5(b4)]也未能解决上述问题, 因为硅酮结构胶的弹性模量小、刚度不足。所以仅选取了部分可用的平面镜进行安装, 不过减少平面镜数量是不会影响实验验证效果的。第二是平面镜的位姿固定问题, 首先是将平面镜紧靠在校准板的相应折平面位置, 然后调节球铰

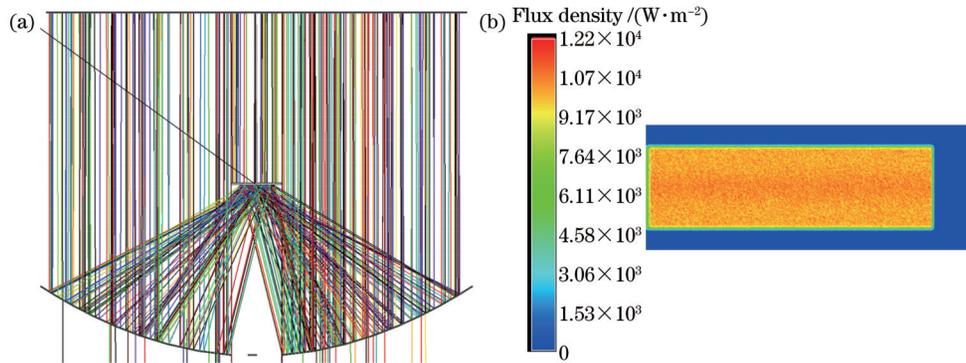


图 4 OptisWorks 光学软件模拟结果。(a) 光线传输轨迹; (b) 聚焦光斑的能流密度分布

Fig. 4 Simulation results obtained by OptisWorks software. (a) Ray transmission path; (b) flux density distribution of focused spot

垫片组并锁紧螺母以实现镜面固定,但螺母锁紧会使球铰垫片组产生内力,逐渐导致平面镜产生转动或偏

斜位姿误差,经镜面安装实践发现采用单点支撑结构进行平面镜的位姿调节与固定很有难度。

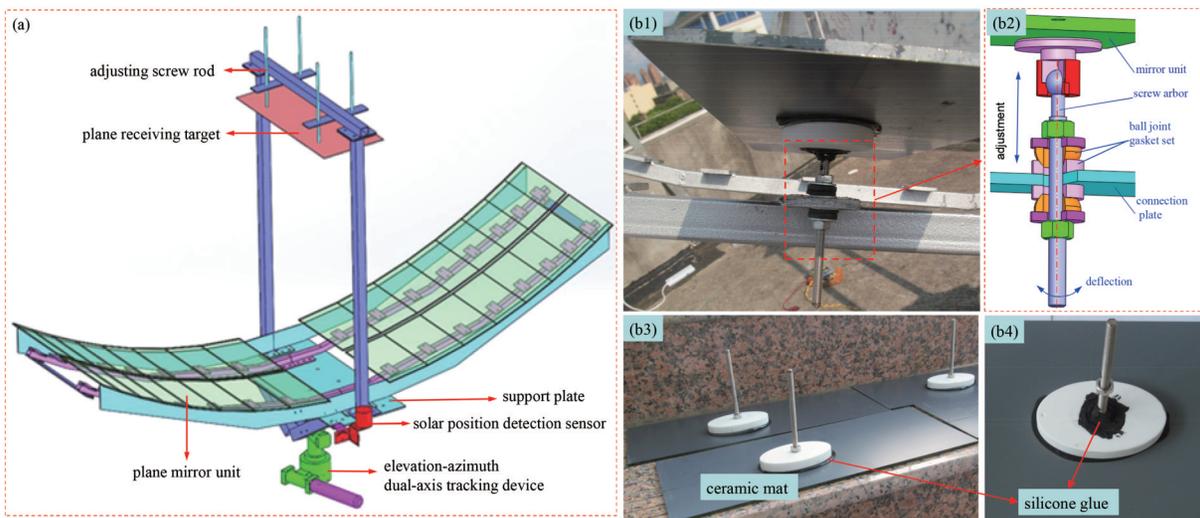


图 5 设计的聚光系统实验装置。(a) 三维模型; (b1)~(b4) 平面镜的固定结构

Fig. 5 Experimental device of designed solar concentrator system. (a) 3D model; (b1)~(b4) fixed structure of the plane mirror

3.2 聚焦能流分布测量方法

采用广泛应用的光学成像间接测量方法^[22]测量聚焦能流分布,该方法的测量过程是:采用 CCD 相机拍摄朗伯靶表面的聚焦光斑图像,将其处理为灰度图像,再采用热流密度计来标定某一灰度值代表的能流密度值,从而确定聚焦光斑的能流密度分布。采用 SS-30 热流密度传感器标定聚焦光斑的能流密度值,它也用于实验过程中太阳总辐射强度和太阳散射辐射强度的测量,将太阳总辐射强度和太阳散射辐射强度相减可得太阳直射辐射强度值。由于本实验装置的聚焦能流密度很小,所以尝试采用粗糙白纸(打印纸)作为朗伯靶面。为了检验选定白纸表面的朗伯特特性,将白纸放在太阳光照下,用佳能相机 SX150 IS 以相同曝光参数从两个角度拍摄白纸表面的辐照强度分布图像,并经 Matlab 处理得到灰度照片和灰度分布云图,如图 6 所示。可以看到整个白纸表面的亮度分布很均匀,而且不同视角下的亮度差异很小,经处理得到的非干扰区域内灰度差异在 2.5% 以内。由此可见,选定的白纸

具有很好的朗伯特特性,可用于聚焦光斑测量实验。

4 实验与数值模拟结果

4.1 实验测量

图 7 为搭建的聚光实验平台与实验现场,主要实验步骤为:1)将选定的白纸磁贴在金属平面靶表面作为朗伯靶,并调节其与反射镜面的距离至设计值 1000 mm;2)聚光器处于自动跟踪太阳位置状态,观察朗伯靶表面的聚焦光斑分布并校准太阳位置检测传感器位姿,使其与聚光器焦轴平行;3)将 SS-30 传感器放置在支撑平板上,使其接收面对准太阳,用于测量太阳总辐照强度值;4)在聚光器非施加载荷情况下,将钢尺放置在朗伯靶表面用于标定实际尺寸,调节相机的位姿使其视轴尽量垂直朗伯靶,再拍摄聚焦光斑,与此同时,记录 SS-30 传感器测量的太阳总辐射值和遮挡后的散射辐射值,其总辐射值为 1007.0 W/m^2 ,散射辐射为 185.0 W/m^2 ,将其相减得到直射辐射值为 822.0 W/m^2 ;5)快速地将朗伯靶向上移动一定距离,

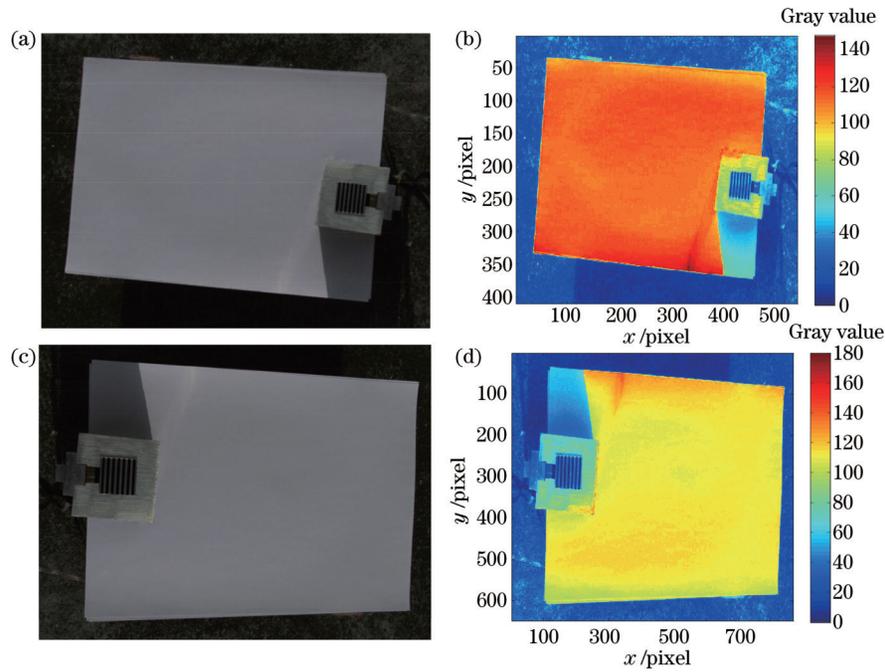


图 6 不同拍摄角度下粗糙白纸表面的太阳辐照亮度分布。(a)(b)不同拍摄角度下的粗糙白纸表面;(c)对图 6(a)处理后的灰度值分布;(d)对图 6(c)处理后的灰度值分布

Fig. 6 Solar radiation luminance distributions on rough white paper under different shooting angles. (a)(b) Rough white paper surfaces at different shooting angles;(c) distribution of gray value after processing for Fig. 6(a); (d) distribution of gray value after processing for Fig. 6(c)

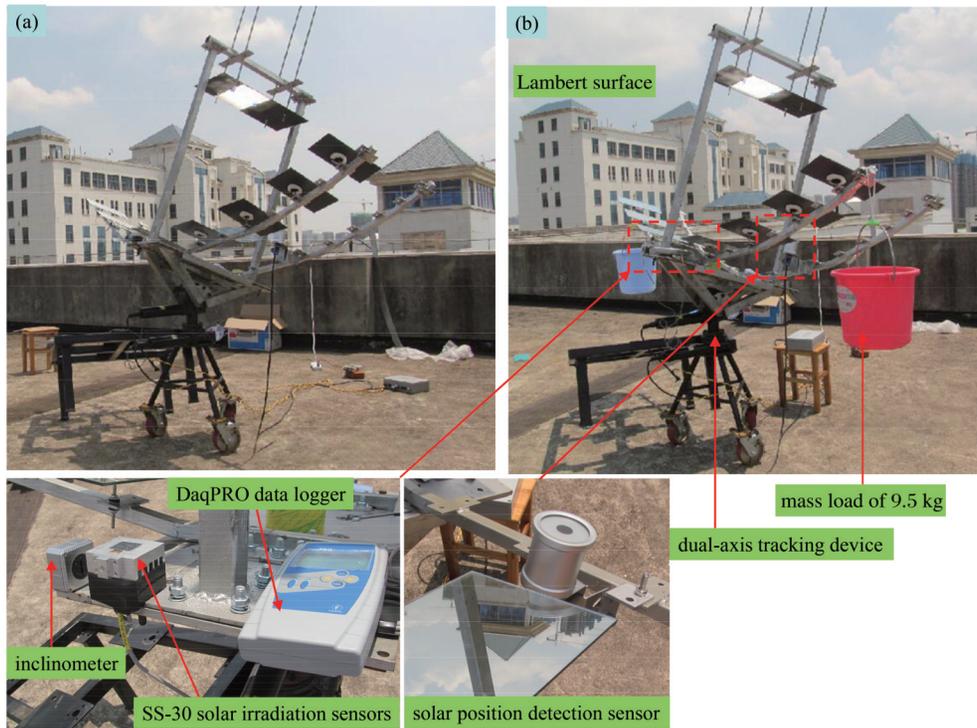


图 7 太阳能聚光系统的聚焦能流分布测量实验。(a)非加载工况;(b)加载工况

Fig. 7 Experiments of flux distribution measurement of solar concentrating system. (a) Unloaded condition; (b) loaded condition

并将 SS-30 传感器放置在原朗伯靶所在中心位置,测量辐射密度值为 4174.0 W/m^2 ;6)在聚光器施加载荷情况下,调节朗伯靶到设计位置,并将事先称量的 9.5 kg 配重(水)挂在悬臂梁的端部,如图 7(b)所示。

用电子倾角仪测量得到聚光器的高度角为 72.8° (即支撑平板与水平面的夹角为 17.8°);快速按照步骤 4)和步骤 5)的方式采集聚焦光斑图像、太阳直射辐射值和朗伯靶上相应位置的辐射能流密度值。由于实验时间

短,太阳直射辐射值基本保持在 822.0 W/m^2 ,在朗伯靶的相应位置上 SS-30 传感器测量的能流密度值为 3642.0 W/m^2 。将两种工况下拍摄的聚焦能流分布图转换为灰度图像,并用彩色云图方式显示,如图 8 所示。提取 SS-30 传感器测量位置的灰度值与其测量

值,通过对比确定比例系数,进而确定朗伯靶表面的聚焦光斑能流密度分布。从图 8(a)、(b)可看到聚焦光斑高亮区域在 200 mm 左右,与理论聚焦光斑尺寸一致。

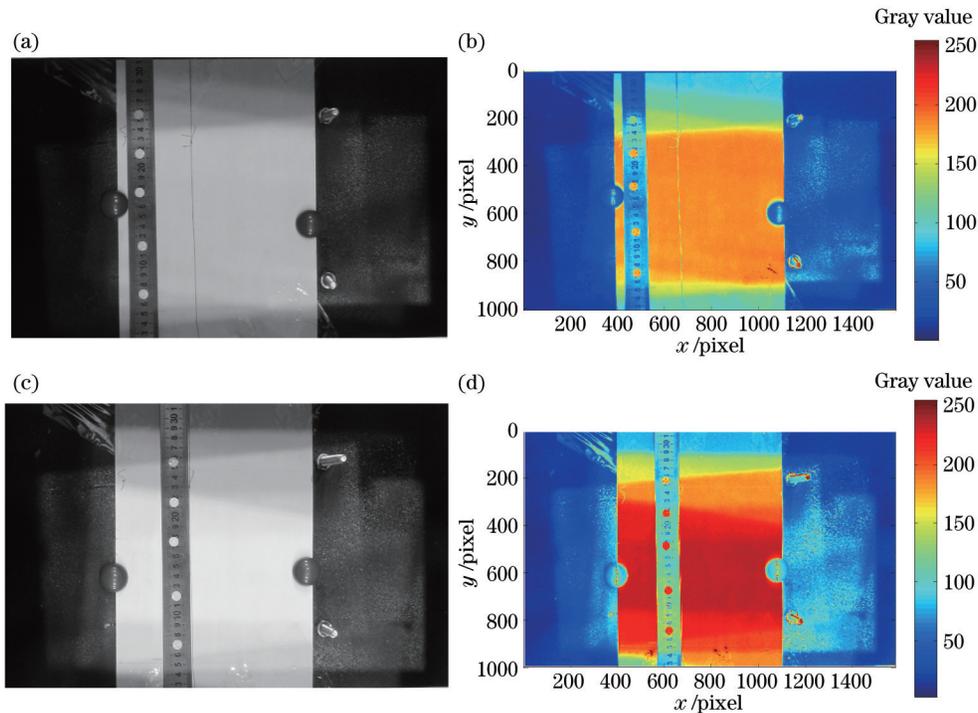


图 8 非加载和加载工况下的聚焦光斑灰度图像。(a)(b)非加载工况;(c)(d)加载工况

Fig. 8 Grayscale images of focused spot under unloaded and loaded conditions. (a)(b) Unloaded conditions; (c)(d) loaded conditions

4.2 数值模拟

采用 Ansys14.0 软件建立的聚光器有限元模型如图 9 所示,其建模简化与细节包括:由于双轴跟踪平台的刚度较大且太阳位置检测传感器固定在刚度很大的支撑平板上,所以忽略了双轴跟踪平台结构变形对聚光的影响;忽略平面镜背部粘接陶瓷垫的黏接剂,直接将陶瓷垫与镜面单元进行粘接处理;均采用三维实体单元 Solid 95 进行网格离散,反射镜表面采用三角形网格且控制尺寸为 5 mm ,镜面的网格数量为 39224;在支撑平板底部的 4 个固定面施加位移全约束,考虑实验时聚光器与水平面夹角为 17.8° ,所以将自身重力和配重载荷分别沿 z 轴和 x 轴分解,如图 9(b) 所示。图 9(b) 中 F 是集中力载荷。

图 10 是载荷作用下聚光器各平面镜的斜率误差分布。对于本实验的单点支撑平面镜而言,无论是总斜率误差还是沿 y 轴方向的斜率误差,采用镜面位姿重构方法与平面微元替代方法的计算结果均非常一致,最大总斜率误差在 0.023 rad 以内,发生在最外端的变形最大位置(在 18.00 mm 以内);沿 y 轴的斜率误差是误差的最主要形式(即悬臂方向),峰值达到了 0.022 rad ,非常接近总斜率误差。图 11 给出了由各平面镜离散后的表面微元的总斜率误差组成的曲线图,可以清晰看到两种光-机集成方法的计算结果非常吻

合,相互验证了它们的正确性。其中,由于镜面位姿重构方法仅考虑了承载导致的刚体位移,所以同一块平面镜表面各微元的斜率误差相同。而平面微元替代方法能够考虑载荷作用下平面镜的弹性变形(即几何畸变),所以各微元网格的镜面斜率误差略有波动。这也说明,当聚光器中反射镜面的弹性变形较大时镜面位姿重构方法将会失去准确预测光学性能的能力,而平面微元替代方法一直能准确预测,它具有普适性。

4.3 聚焦能流分布结果与对比分析

图 12 是采用不同方法模拟的聚焦能流分布,计算参数为: DNI 值与实验相同,均为 822.0 W/m^2 ;反射镜面的反射率为 0.87 (由厂家提供);平面接收器的吸收率假定为 100% 。从图 12(a)、(b) 可以看到,非变形工况(理想工况)下,采用平面微元替代方法的自编光线跟踪程序与 OptisWorks 光学软件的模拟结果非常吻合,聚焦光斑均为宽度约为 200 mm 的矩形均匀能流分布,最大能流密度分别为 4780 W/m^2 和 4577 W/m^2 ,相对误差仅为 4.2% ,这说明平面微元替代方法及自编光线跟踪程序均正确。从图 12(c)、(d) 可以看到,在承载变形情况下两种光-机集成方法模拟的能流分布非常一致。进一步地,提取图 8 和图 12 中聚焦光斑中心截面的能流分布曲线进行对比,结果如图 13 所示。从图 13(a) 可以看到非变形工况下采用平面微元

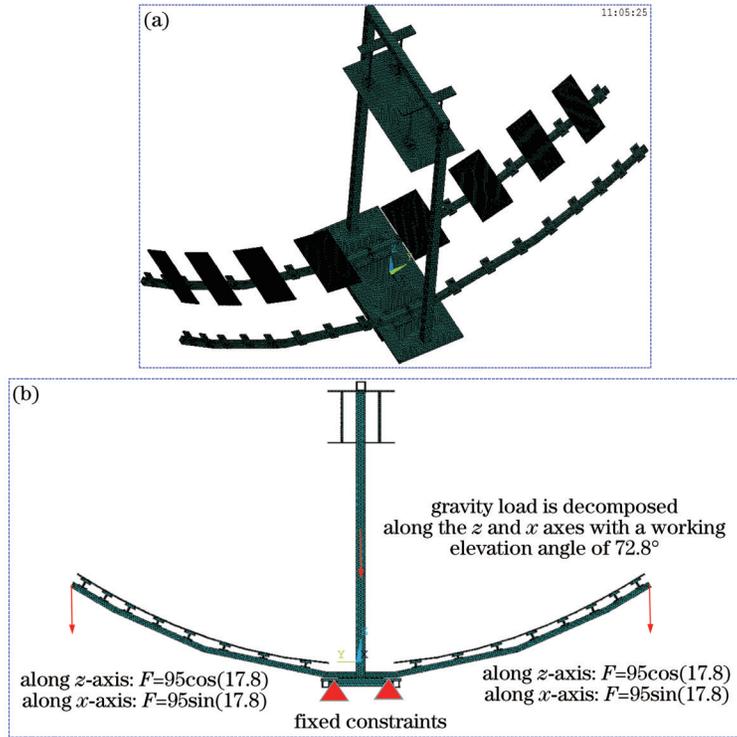


图 9 建立的聚光器有限元模型。(a)划分网格的有限元模型;(b)边界条件

Fig. 9 Established finite element model of solar concentrator. (a) Finite element model with divided meshes; (b) boundary conditions

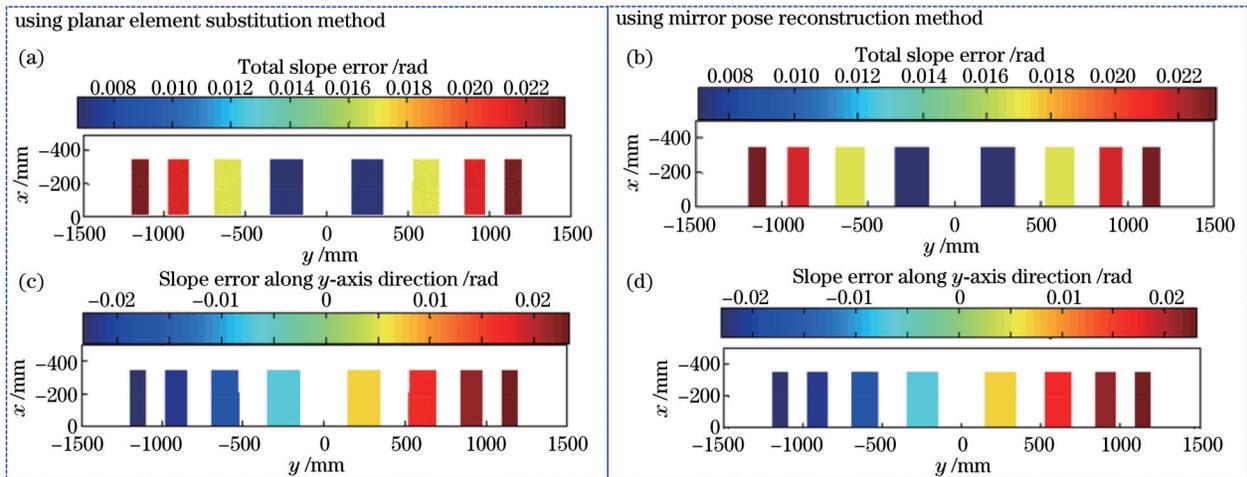


图 10 载荷作用下聚光器反射镜面的斜率误差分布。(a)(b)采用平面微元替代方法计算的总斜率误差和沿 y 轴方向的斜率误差；(c)(d)采用镜面位姿重构方法计算的总斜率误差和沿 y 轴方向的斜率误差

Fig. 10 Slope error distributions of concentrator mirror under load. (a)(b) Total slope error and slope error along y-axis direction calculated by planar element substitution method; (c)(d) total slope error and slope error along y-axis direction calculated by mirror pose reconstruction method

替代方法模拟的结果[图 12(b)]与实验结果[图 8(b)]在宽度约为 200 mm 的高能流密度区域内吻合得非常好,实验测量结果表明边缘区域存在一定的能流分布,这主要是由部分反射镜的安装误差造成的。从图 13 (b)可以看到加载变形工况下采用两种光-机集成方法模拟的能流分布曲线非常一致。根据聚光器加载后有限元模拟结果,提取各平面镜的 4 个角点坐标,在 SolidWorks 中由 4 个角点坐标建立各平面镜,再采用 OptisWorks 光学软件进行光学模拟,可以看到两种光-

机集成方法的计算结果也与此光学软件的模拟结果非常吻合。模拟和实测得到的能流分布曲线吻合,并没有达到预期效果,但二者均具有相似的能流分布特征,例如载荷作用下各平面镜位姿倾斜导致阶梯状聚焦能流分布,这主要是因为实验加载时部分平面镜的螺栓固定组件释放内力,导致其位姿改变,引入了新的位姿误差,进而改变了聚焦分布,这从图 8(c)、(d)可看到叠加的聚焦光斑之间存在一定的旋转角。整体而言,两种光-机集成方法的数值结果相互印证,其与实验测

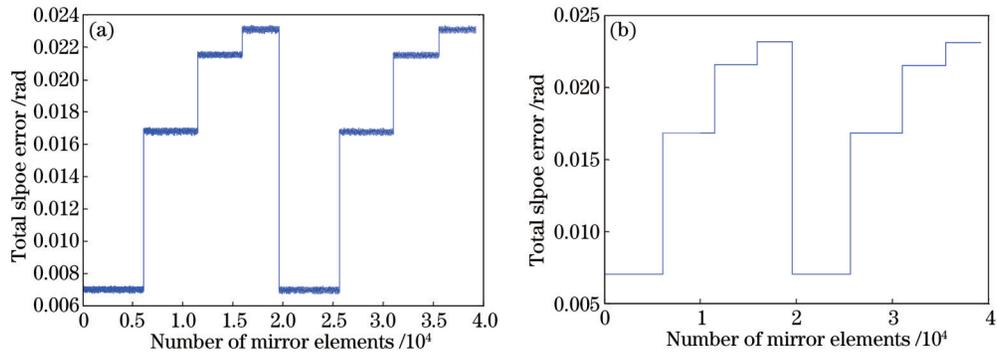


图 11 不同光-机集成计算方法下镜面微元的总斜率误差分布。(a)平面微元替代方法;(b)镜面位姿重构方法

Fig. 11 Total slope error distributions of mirror element under different optical-mechanical integration calculation methods. (a) Planar element substitution method; (b) mirror pose reconstruction method

量结果的对比说明了本文中两种光-机集成建模方法的正确性。

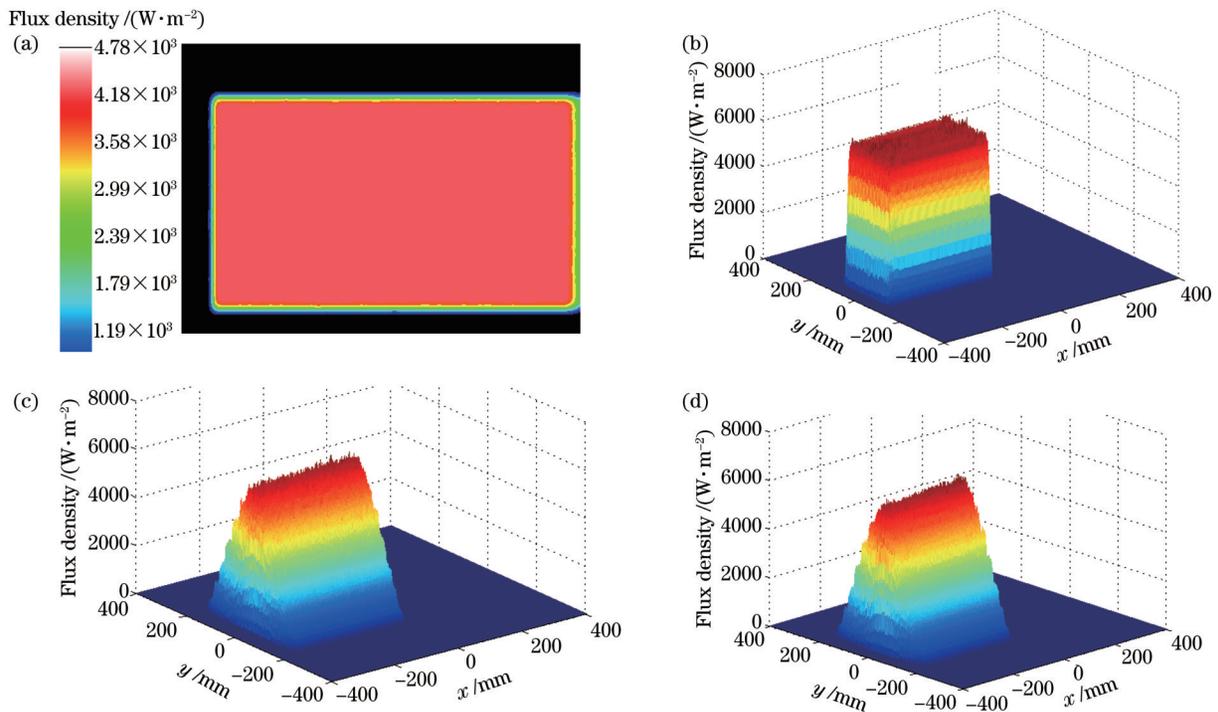


图 12 不同工况下采用不同方法计算的聚光系统中平面接收器的能流分布。采用(a) OptisWorks软件和(b)平面微元替代方法计算的理想工况的能流分布;采用(c)平面微元替代方法和(d)镜面位姿重构方法计算的载荷工况的能流分布

Fig. 12 Flux distributions of planar receivers in concentrator system calculated by different methods under different working conditions. Flux distributions obtained by (a) OptisWorks software and (b) planar element substitution method under ideal condition; flux distributions of (c) planar element substitution method and (d) mirror pose reconstruction method under loaded condition

5 结 论

开展了载荷作用下太阳能聚光器两种光-机集成建模方法的验证研究,包括忽略镜面单元自身弹性变形(即仅考虑刚体位移)的镜面位姿重构方法和平面微元替代方法。平面微元替代方法是将聚光器反射镜面离散成大量平面微元,并以平面微元的变形信息直接建立其几何光学信息,实现光-机分析的数据统一与集成。采用两种光-机集成方法的数值模拟结果互相验证,并将其与承载下的聚光实验结果进行对比验证,结

果充分说明它们的有效性。当聚光器中各反射镜面的弹性变形较大时,镜面位姿重构方法将会失去准确预测其光学性能的能力;而平面微元替代方法能够考虑载荷作用下反射镜的任何变形(弹性变形和刚体位移),任何情况下均能准确预测聚光性能,具有普适性和简单的优点;对于聚焦能流密度较低的情况,采用粗糙白纸(打印纸)作为朗伯靶面用于聚焦能流密度测量是可行的。未来,将采用所提出的光-机集成建模方法,进一步开展载荷作用下太阳能聚光器的光学性能分析与结构优化设计研究,为工程应用提供高效高精

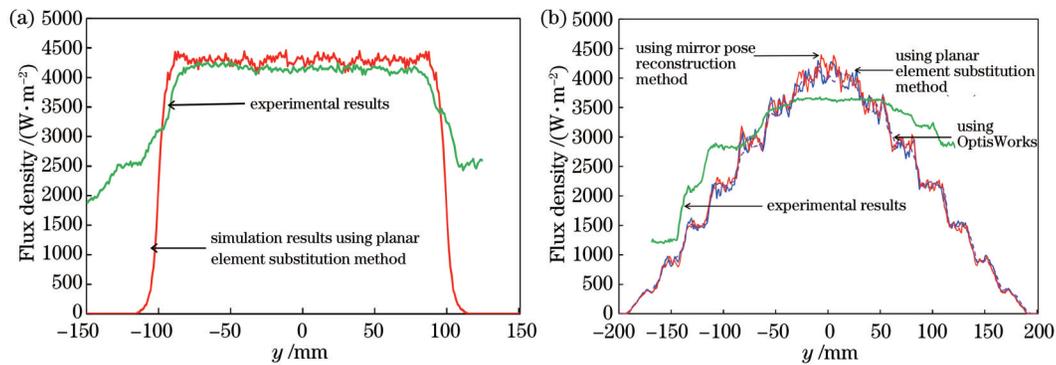


图 13 光-机集成模拟结果与实验测量结果的对比。(a)非加载工况;(b)加载工况

Fig. 13 Comparison between experimental measurement results and optical-machine integration calculation results. (a) Under unloaded condition; (b) under loaded condition

度且轻量低成本太阳能聚光器。

参 考 文 献

- [1] He Y L, Qiu Y, Wang K, et al. Perspective of concentrating solar power[J]. Energy, 2020, 198: 117373.
- [2] Zayed M E, Zhao J, Elsheikh A H, et al. A comprehensive review on Dish/Stirling concentrated solar power systems: design, optical and geometrical analyses, thermal performance assessment, and applications[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 283: 124664.
- [3] 王志峰, 何雅玲, 康重庆, 等. 明确太阳能热发电战略定位促进技术发展[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 1-4.
Wang Z F, He Y L, Kang C Q, et al. Strategic positioning of solar thermal power generation to promote technological progress[J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 1-4.
- [4] 颜健, 聂笃忠, 彭佑多, 等. 可改善平面接收器能流均匀性的太阳能碟式聚光器设计[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0922002.
Yan J, Nie D Z, Peng Y D, et al. Design of solar dish concentrator for improving flux uniformity on planar receiver[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0922002.
- [5] 王云峰, 季杰, 李明, 等. 多平面镜线性组合太阳能聚光器的设计和聚光特性[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0422002.
Wang Y F, Ji J, Li M, et al. Performance analysis and design of multi-plane mirrors linear combination solar concentrator[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0422002.
- [6] 颜健, 田勇, 刘永祥, 等. 基于相同参数抛物镜面旋转阵列的太阳能槽式聚光器聚焦特性研究[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0522002.
Yan J, Tian Y, Liu Y X, et al. Focusing characteristics of solar trough concentrator based on parabolic mirror rotating array with same parameters[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0522002.
- [7] 颜健, 彭佑多, 易陈斐. 碟式太阳能光热发电系统机架结构风振响应的时域分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 177-185.
Yan J, Peng Y D, Yi C F. Time-domain analysis for wind-induced response of a dish solar thermal power generation system's frame structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7): 177-185.
- [8] 颜健, 彭佑多, 余佳焕, 等. 碟式太阳能光热系统光-机-热多场耦合建模及其聚光性能预测应用[J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 138-151.
Yan J, Peng Y D, Yu J H, et al. Research on thermal-structural-optical multi-field coupling modeling and concentrating performance prediction of solar dish system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(14): 138-151.
- [9] Li L F, Kecskemethy A, Arif A F M, et al. Optimized bands: a new design concept for concentrating solar parabolic mirrors[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2011, 133(3): 031003.
- [10] 孟力, 尤政. 定日镜镜面弯曲机构设计及面形优化[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 36-42.
Meng L, You Z. Heliostat surface deformation mechanism design and shape optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11): 36-42.
- [11] 陆永亚, 陈小安, 王朝兵, 等. 风载荷与跟踪误差影响下定日镜聚光效率研究[J]. 机械研究与应用, 2013, 26(4): 4-7.
Lu Y Y, Chen X A, Wang C B, et al. Research on heliostat focusing efficiency with wind load and tracking error[J]. Mechanical Research & Application, 2013, 26(4): 4-7.
- [12] Meiser S, Lüpfer E, Schiricke B, et al. Conversion of parabolic trough mirror shape results measured in different laboratory setups[J]. Solar Energy, 2015, 111: 396-406.
- [13] 杜伟峰, 刘永志, 高文杰, 等. 光电对抗平台变焦镜头被动消热差结构设计与光机热集成分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131204.
Du W F, Liu Y Z, Gao W J, et al. Analysis of passive athermalization structure design and integrated opto-mechanical-thermal of zoom lens of photoelectric countermeasure platform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131204.
- [14] Liu G L, E J Q, Liu T, et al. Effects of different poses

- and wind speeds on flow field of dish solar concentrator based on virtual wind tunnel experiment with constant wind[J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(8): 1948-1957.
- [15] E J Q, Liu G L, Liu T, et al. Harmonic response analysis of a large dish solar thermal power generation system with wind-induced vibration[J]. *Solar Energy*, 2019, 181: 116-129.
- [16] Yan J, Peng Y D, Nie D Z. A method for the installation measurement and alignment of a mirror unit in the solar dish concentrator[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1511.
- [17] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R. Mirror rearrangement optimization for uniform flux distribution on the cavity receiver of solar parabolic dish concentrator system[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(11): 3588-3614.
- [18] Yan J, Peng Y D, Wang H. Assessing the impact of non-ideal optical factors on optimized solar dish collector system with mirror rearrangement[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(11): 8799-8822.
- [19] 颜健, 彭佑多, 程自然, 等. 对称型太阳能聚光集热系统吸热器能流分布的运动累加计算方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0508001.
- Yan J, Peng Y D, Cheng Z R, et al. Moving accumulative computation method for flux distribution of heat absorber in symmetry concentrating solar collector system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0508001.
- [20] 王刚, 陈则韶, 胡芑, 等. 折平板等光强反射聚光光伏系统的优化分析[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(10): 1781-1786.
- Wang G, Chen Z S, Hu P, et al. Optical analysis of bending-plate type concentrating PV system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2013, 34(10): 1781-1786.
- [21] Yan J, Cheng Z R, Peng Y D. Effects of geometrical parameters of a dish concentrator on the optical performance of a cavity receiver in a solar dish-Stirling system[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(6): 2152-2168.
- [22] 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.