

## 太阳模拟器用自由曲面聚光镜设计

刘石<sup>1,2</sup>, 邹国星<sup>1\*</sup>, 张国玉<sup>1,2</sup>, 王刚<sup>3</sup>, 张健<sup>1,2</sup>, 段宗涛<sup>1</sup>, 牛政杰<sup>1</sup>, 任太阳<sup>1</sup><sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup>吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022;<sup>3</sup>连云港杰瑞电子有限公司, 江苏 连云港 222000

**摘要** 针对积分器入射面的辐照不均匀度高导致的太阳模拟器辐照均匀性较差的问题,设计了一种自由曲面聚光镜。基于点光源模型,根据能量守恒定律和非成像光学中的边光理论,建立光源出射角度与目标面对应点的映射关系;依据菲涅耳定律结合映射关系推导出微分方程,通过龙格-库塔法求解微分方程,计算出离散点数据;拟合离散点数据得到自由曲面聚光镜的母线,旋转母线获得自由曲面聚光镜的初始结构。使用贝塞尔曲线表征自由曲面母线,利用模拟退火算法对引入扩展光源的自由曲面进行反馈优化,从而得到连续的自由曲面面形。采用LightTools软件仿真太阳模拟器光学系统,结果表明:自由曲面聚光镜的辐照均匀性较椭球聚光镜的辐照均匀性显著提升,辐照面 $\phi 50$  mm内辐照不均匀度优于 $\pm 0.32\%$ ,辐照面 $\phi 100$  mm内辐照不均匀度优于 $\pm 0.53\%$ ;通过误差仿真分析,依据现有自由曲面加工与检测水平,验证了所设计自由曲面聚光镜加工、检测与装调的可行性。

**关键词** 光学设计; 太阳模拟器; 自由曲面; 辐照不均匀度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221913

## 1 引言

太阳模拟器是一种模拟太阳光辐照特性的设备<sup>[1]</sup>,可应用在航天器的热平衡和热控涂层特性实验、太阳能电池检测、遥感技术中室内模拟太阳光谱辐照、建筑行业中材料性能老化测试等方面<sup>[2-4]</sup>。

辐照不均匀度是太阳模拟器设计的重要指标之一,直接决定太阳模拟器的精度。日本牛尾机电公司生产的USS-2000A太阳模拟器的辐照面直径为100 mm,辐照不均匀度为 $\pm 3\%$ <sup>[5]</sup>。美国Abet Technologies, Inc.公司研制的SUN2000太阳模拟器的辐照面积为100 mm $\times$ 100 mm,辐照不均匀度只能达到 $\pm 5\%$ 。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的TM-400A太阳模拟器在辐照面形成的光斑尺寸为100 mm $\times$ 100 mm,辐照不均匀度为 $\pm 3\%$ <sup>[6]</sup>。中科微能开发的CME-SOI8100-3A太阳模拟器的辐照面积为100 mm $\times$ 100 mm,辐照不均匀度达到 $\pm 2\%$ 。可见,太阳模拟器辐照面在 $\phi 100$  mm左右的辐照不均匀度仍有提升空间。

聚光系统是太阳模拟器的关键系统之一,通常采用椭球聚光镜。它将放置在第一焦点附近的光源发出的辐射通量会聚到其第二焦面上,即在积分器入射端面形

成一定范围的辐照分布,该辐照分布先被积分器场镜组对称分割,经过积分器投影镜组叠加成像后,再经准直系统,最终在辐照面上形成一个辐照均匀的光斑<sup>[7]</sup>,而聚光镜第二焦面上的辐照均匀性直接影响整个太阳模拟器系统辐照面上的辐照均匀性。为了提高第二焦面的辐照均匀性,Wang等<sup>[8]</sup>采用抛物面反射镜结合菲涅耳透镜作为光学聚光器,但其聚光后的通量仍服从高斯分布。Li等<sup>[9]</sup>设计了一种三维复合抛物线聚光器(CPC),该聚光器虽然提高了聚光效率,但是第二焦面能量分布分散的情况并未得到改善。为此,任兰旭等<sup>[10]</sup>提出一种非共轴椭球聚光镜,该椭球聚光镜是在子午面内以第一焦点为中心,将椭圆曲线的长轴相对于光轴旋转一定角度,再绕原轴线旋转一周后形成的,可有效提高第二焦面的辐照均匀性,但加工过程过于复杂。吕涛等<sup>[11]</sup>从椭球面方程泰勒展开后得到的高阶方程中演变得到一个变形的椭球面,并通过几个变形系数控制面型,但该方法只能通过试凑确定系数数值,操作性较差。

本文设计了一种自由曲面聚光镜作为太阳模拟器的聚光系统,该系统在保证聚光效率的前提下,有效提高了第二焦面上的辐照均匀性,即改善了积分器入射面的辐照分布情况,最终显著提高了太阳模拟系统辐照面的辐照均匀性。所设计系统的辐照度不小于一个

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2022-12-13; 录用日期: 2023-01-29; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20210201034GX)、吉林省科技厅项目(20200401046GX)

通信作者: \*1515175417@qq.com

太阳常数  $S_0$  ( $1353 \text{ W/m}^2$ ), 辐照面  $\phi 100 \text{ mm}$  内的辐照不均匀度优于  $\pm 1.5\%$ , 高于国家太阳模拟器 A 级标准<sup>[12]</sup>。

## 2 自由曲面聚光镜的设计

### 2.1 自由曲面聚光镜的生成

针对传统椭球聚光镜第二焦面的能量分布中心高、边缘低, 呈高斯分布的问题<sup>[13]</sup>, 以提高第二焦面上的辐照均匀性为目标, 提出一种自由曲面聚光镜的设计方法。根据能量守恒定律、边光原理和映射法对自由曲面聚光镜进行设计, 建立光源出射角度与自由曲面目标面对应点的映射关系, 并依据菲涅耳定律结合映射关系推导出微分方程, 通过龙格-库塔法求解微分方程, 计算出自由曲面母线上的离散点<sup>[14]</sup>。

首先基于点光源模型, 计算出光源选定发光区域出射光的光通量  $\Phi$ <sup>[15]</sup>, 即

$$\Phi = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} I(\theta) d\Omega = 2\pi \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} I(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (1)$$

式中:  $I(\theta)$  为光源各角度的发光强度;  $\theta$  表示天顶角, 为光源有效发光角度;  $\Omega$  为立体角;  $\theta_{\max}$  和  $\theta_{\min}$  分别为光源最大和最小有效发光角度。

选取短弧氙灯作为光源, 短弧氙灯的配光曲线呈轴对称分布, 发光角度为  $20^\circ \sim 125^\circ$ , 短弧氙灯的配光曲线如图 1 所示。取氙灯的配光曲线数据作为光源有效发光角度对应的发光强度, 对式 (1) 作数值积分, 计算出离散区间  $\Delta\theta = \theta_{i+1} - \theta_i$  内的光通量<sup>[16]</sup>, 即

$$\Phi_i = 2\pi \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} I(\theta) \sin \theta d\theta \approx \pi \times [I(\theta_i) + I(\theta_{i+1})] \times (\cos \theta_i - \cos \theta_{i+1}), \quad (2)$$

式中:  $I(\theta) = \frac{I(\theta_{i+1}) + I(\theta_i)}{2}$ , 为  $\Delta\theta$  内发光强度的平均值。

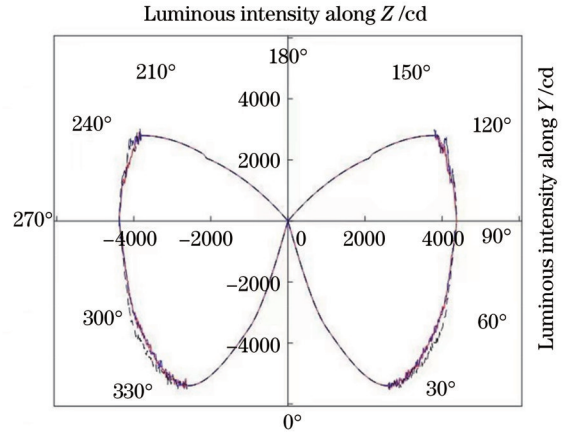


图 1 短弧氙灯的配光曲线

Fig. 1 Light distribution curves of short arc xenon lamp

如图 2 所示, 依据映射法原理, 将离散区间  $\Delta\theta = \theta_{i+1} - \theta_i$  内的光通量映射到自由曲面目标面的  $(R_i, R_{i+1})$  圆环上, 其中  $e_R$  为自由曲面目标面上的照度。为了获得均匀的辐照分布, 取  $e_R = e_0$ ,  $e_0$  为目标面上的理想照度, 则自由曲面目标面上  $(R_i, R_{i+1})$  圆环内的光通量  $E_i$  为

$$E_i = \int_{R_i}^{R_{i+1}} e_0 2\pi x dx = e_0 \pi (R_{i+1}^2 - R_i^2). \quad (3)$$

根据能量守恒定律, 假设光传递过程中没有能量损失, 即光源发出的能量经过反射后全部传递到自由曲面的目标面内, 可以认为  $\Phi_i$  和  $E_i$  相等, 即

$$\Phi_i = e_0 \pi (R_{i+1}^2 - R_i^2). \quad (4)$$

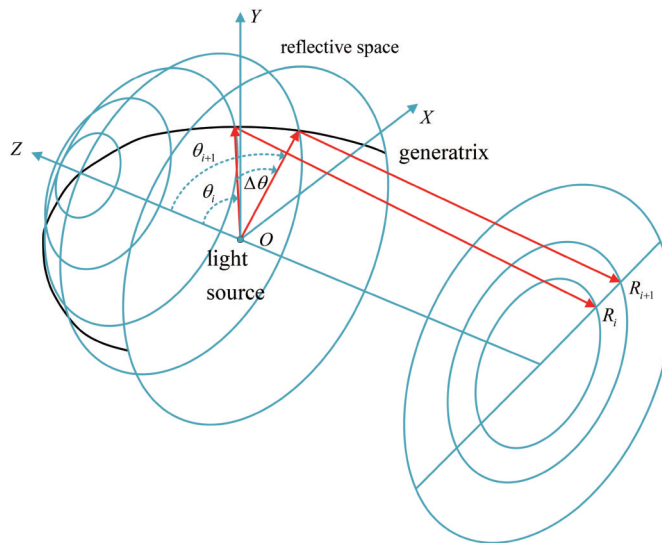


图 2 光源与目标面能量映射示意图

Fig. 2 Schematic of energy mapping between light source and target surface

利用式(4),结合光源以 20°倾斜角出射的光线经过自由曲面反射到目标面  $R=0$  处的初始条件,可以得到光源出射角度  $\theta$  与自由曲面目标面对应点  $R_i(\theta)$  的

映射关系。如图 3 所示,自由曲面母线上的点的坐标为  $(\rho \sin \theta, \rho \cos \theta)$ ,自由曲面目标面上对应点的坐标为  $(R_i(\theta), -H)$ 。

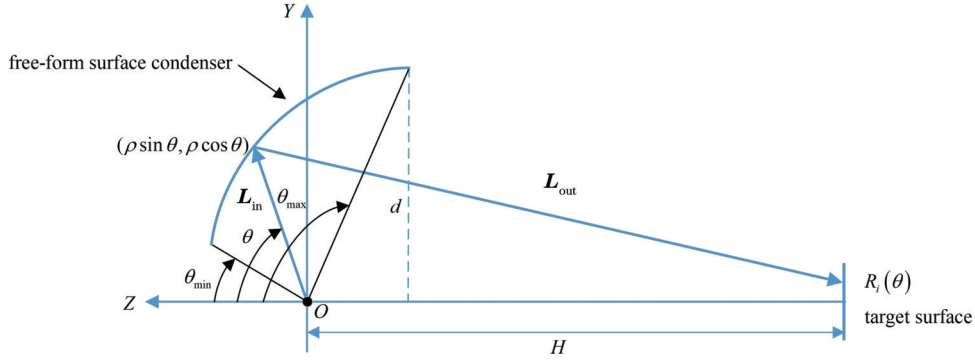


图 3 光源和自由曲面以及目标面分布示意图

Fig. 3 Distribution diagram of light source, free-form surface, and target surface

入射光线的单位矢量为

$$L_{in} = (\sin \theta, \cos \theta). \quad (5)$$

反射光线的单位矢量为

$$L_{out} = \frac{1}{K} [R_i(\theta) - \rho \sin \theta, -H - \rho \cos \theta], \quad (6)$$

式中:  $K = \sqrt{[R_i(\theta) - \rho \sin \theta]^2 + (H + \rho \cos \theta)^2}$ 。反射点的切线矢量为

$$t = (\rho_\theta \sin \theta + \rho \cos \theta, \rho_\theta \cos \theta - \rho \sin \theta), \quad (7)$$

式中:  $\rho_\theta$  表示  $\rho$  对  $\theta$  求偏导。由菲涅耳定律可知:

$$(L_{out} - L_{in}) \cdot t = 0. \quad (8)$$

将  $L_{out}$ 、 $L_{in}$ 、 $t$  代入式(8)可得

$$\begin{aligned} & [R_i(\theta) - \rho \sin \theta - K \sin \theta, -H - \rho \cos \theta - K \cos \theta] \cdot \\ & (\rho_\theta \sin \theta + \rho \cos \theta, \rho_\theta \cos \theta - \rho \sin \theta) = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

从而推导出

$$\frac{d\rho}{d\theta} = \frac{\rho H \sin \theta + R_i(\theta) \rho \cos \theta}{\rho + K + H \cos \theta - R_i(\theta) \sin \theta}. \quad (10)$$

为了与后续光学系统匹配,以及满足系统光瞳衔接原理,取太阳模拟器系统常用相对孔径  $D$  为  $1/4$ <sup>[17]</sup>,利用自由曲面后开口来限制边缘光线,控制自由曲面聚光镜会聚光线到积分器入射面的角度,保证其光线会聚角度在  $\pm 7^\circ$  内。利用几何关系确定自由曲面后开口半径  $d$ ,即

$$d = \frac{H \cdot D \cdot \tan \theta_{max}}{2 \tan \theta_{max} - D}, \quad (11)$$

式中:  $\theta_{max}$  为光源最大有效发光角度,  $\theta_{max} = 125^\circ$ ;  $H$  为光源和自由曲面目标面之间的距离。

以某气象用太阳模拟器聚光镜为例,将其第一焦点到第二焦点的工作距离  $H$  设为 1500 mm。将  $H$  和  $\theta_{max}$  代入式(11),可以得到自由曲面聚光镜后开口半径  $d$  约为 172 mm,从而计算出自由曲面母线的起始点

坐标。考虑到积分器的孔径,目标面的半径  $R$  设为 30 mm,利用龙格-库塔法<sup>[18]</sup>计算出自由曲面母线上的离散点数据,最终迭代计算得到自由曲面聚光镜前开口半径约为 17 mm。

## 2.2 基于贝塞尔曲线多参数优化自由曲面聚光镜的方法

由于氙灯是具有一定面积的扩展光源,在针对点光源设计的自由曲面聚光镜中引入扩展光源后,自由曲面目标面的辐照均匀性大幅降低,因此需要对设计结果进行反馈优化。利用菲涅耳定律计算出自由曲面聚光镜轮廓线的离散点坐标,将得到的离散点拟合成贝塞尔曲线,并反算出控制该段曲线轮廓的贝塞尔曲线控制点坐标以及所对应的切线长度和切向角。可通过改变控制点坐标以及所对应的切线长度和切向角来改变曲线的轮廓,实现对光线反射角度的调整。贝塞尔曲线的函数表达式<sup>[19]</sup>为

$$J(G) = \sum_{w=0}^q p_w g_{w,q}(G), \quad G \in [0, 1], \quad (12)$$

式中:  $p_w$  为贝塞尔曲线的控制点;  $g_{w,q}(G) = \binom{q}{w} G^w (1-G)^{q-w}$ ,  $w = 0, 1, \dots, q$ ,  $g_{w,q}(G)$  为  $q$  阶的伯恩斯坦基底多项式。

将整个曲线轮廓细分,分别选取每段细分曲线轮廓的优化变量、评价函数和优化算法,以提高自由曲面聚光镜目标面的辐照均匀性。

以细分曲线轮廓的第一段为例,  $P_0$  至  $P_3$  所表示的细分曲线轮廓可以由  $P_1$ 、 $P_2$  控制点的坐标以及所对应的切线长度和切向角表示。当控制点坐标由  $P_1$  和  $P_2$  变化到  $P_{11}$  和  $P_{21}$  时,细分曲线轮廓发生了变化,故选取  $P_1$ 、 $P_2$  的坐标和所对应的切线长度和切向角作为优化变量,对细分曲线轮廓进行优化,结果如图 4 所示。

将仿真后的自由曲面聚光镜目标面的辐照均匀度

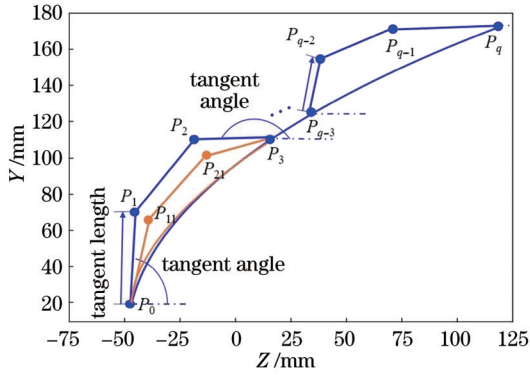


图 4 利用贝塞尔曲线构建自由曲面聚光镜轮廓线示意图  
Fig. 4 Sketch map of contour line of free-form surface condenser constructed by Bézier curve

作为评价函数,对目标面进行网格划分,将目标面上的辐照度进行归一化处理,得到

$$\begin{cases} E''_{ab} = \frac{E'_{ab}}{E'_{\max}} \\ e_f = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^m (E''_{ab} - 1)^2 \end{cases}, \quad (13)$$

式中:  $E'_{ab}$  为目标面上的辐照度;  $E'_{\max}$  为目标面上的辐照度最大值;  $e_f$  为贝塞尔曲线优化的评价函数;  $a$  和  $b$  为划分网格的横纵方向变量。

采用模拟退火算法<sup>[20-21]</sup>对贝塞尔曲线进行优化,设置退火的初始温度为  $T_{\text{initial}}$ 、终止温度为  $T_{\text{final}}$ 、初始贝塞尔曲线的优化参数为  $x_v$ 、评价函数为  $e_f(x_v)$ 。该算法会在每一温度下迭代  $M$  次,充分地解空间进行搜

索。在搜索过程中,若当前解  $x_{v+1}$  的评价函数小于前一个解  $x_v$  的评价函数时,则接受解  $x_{v+1}$ ;若当前解  $x_{v+1}$  的评价函数大于前一个解  $x_v$  的评价函数,此时会产生一个与温度有关的解的接受概率  $k(x_v \rightarrow x_{v+1})$ 。随着温度的降低,接受比原来差的解的概率不断减小,逐渐从对解空间广度搜索转变为对解空间深度搜索。

$$k(x_v \rightarrow x_{v+1}) = \begin{cases} 1, & e_f(x_{v+1}) < e_f(x_v) \\ \exp\left[\frac{e_f(x_v) - e_f(x_{v+1})}{T_c}\right], & e_f(x_{v+1}) \geq e_f(x_v) \end{cases}, \quad (14)$$

式中:  $T_c$  为温度;  $e_f(x_{v+1})$  为  $x_{v+1}$  对应的评价函数。

优化过程中选取的温度更新参数为 0.85<sup>[22]</sup>,则温度的变化可表示为

$$T_{c+1} = 0.85T_c. \quad (15)$$

在算法优化过程中,  $v+1$  次变量值和  $v$  次变量值之间的关系为

$$x_{v+1} = x_v + QU, \quad (16)$$

式中:  $U$  为服从  $(-1, 1)$  内均匀分布的随机向量,向量的维度等于优化变量的维度;  $Q$  为对角矩阵,它定义了每个变量允许的最大变化量。

在整个优化过程中,当温度变化到  $T_{\text{final}}$  时,优化结束。此时,由优化后的控制点坐标以及所对应的切线长度和切向角构建的贝塞尔曲线即为最优的自由曲面聚光镜轮廓线,输出优化后的自由曲面聚光镜面型。

图 5~7 依次为自由曲面聚光镜三维离散点云模型图、初始结构和优化结构轮廓线对比图、优化前后的目标面辐照度分布图。

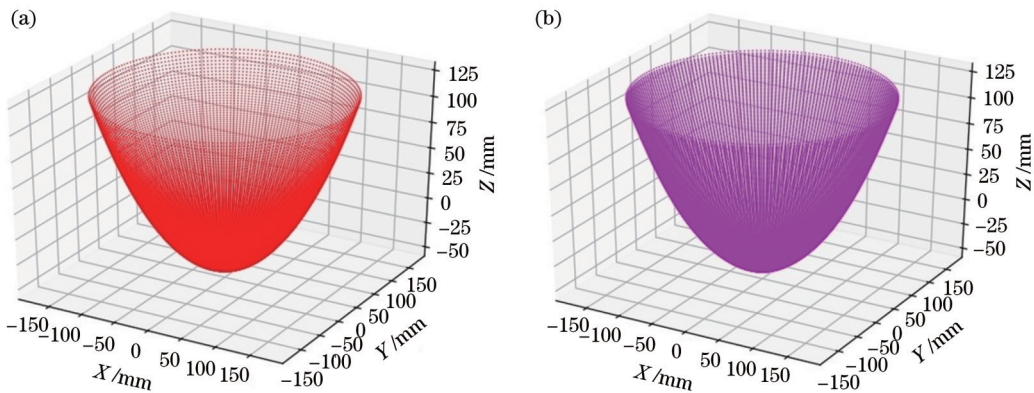


图 5 自由曲面聚光镜的三维离散点云模型。(a)优化前的模型;(b)优化后的模型  
Fig. 5 3D discrete point cloud models of free-form surface condenser. (a) Model before optimization; (b) optimized model

由图 7 可知,优化前自由曲面聚光镜目标面内辐照度的最小值和最大值分别为  $0.0212 \text{ W/mm}^2$  和  $0.0604 \text{ W/mm}^2$ ,优化后目标面内辐照度的最小值和最大值分别为  $0.0228 \text{ W/mm}^2$  和  $0.0268 \text{ W/mm}^2$ 。将辐照度数据代入式(17),计算出优化前、后的辐照不均匀度约为 48% 和 8%,即自由曲面聚光镜目标面  $\phi 60 \text{ mm}$  内的辐照均匀度约从优化前的 52% 提升到优

化后的 92%。

### 3 仿真分析

利用 LightTools 软件对太阳模拟器光学系统进行建模,将椭圆聚光镜和自由曲面聚光镜置于同一太阳模拟器光学系统中进行仿真,使用蒙特卡罗方法对 2000 万条光线进行追迹,并对设计参量进行仿真调

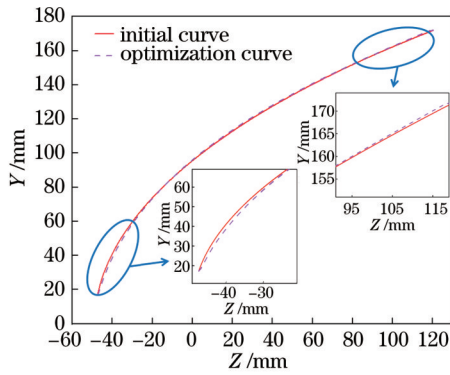


图 6 初始结构和优化结构轮廓线对比

Fig. 6 Comparison of contour lines between initial structure and optimized structure

试,太阳模拟器光学系统仿真图如图 8 所示,使用椭球聚光镜的太阳模拟器辐照面的辐照度分布如图 9 所示,使用自由曲面聚光镜的太阳模拟器辐照面的辐照

度分布如图 10 所示。

从图 9 可以看出,使用椭球聚光镜的太阳模拟器辐照面的辐照度从中心到边缘出现上下波动,整体变化较大。从图 10 可以看出,使用自由曲面聚光镜的太阳模拟器辐照面的辐照分布从中心到边缘都很均匀,这是因为积分器入射面的辐照分布较为均匀,从而提高了边缘辐照的均匀性。辐照不均匀度的计算公式<sup>[24]</sup>为

$$\epsilon = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, \quad (17)$$

式中: $\epsilon$ 为辐照不均匀度; $E_{\max}$ 为辐照度最大值; $E_{\min}$ 为辐照度最小值。在辐照面内选取 17 个采样点,依次对辐照面  $\phi 50 \text{ mm}$ 、 $\phi 100 \text{ mm}$  进行测量<sup>[23]</sup>,将测量的辐照度数据代入式(17)进行计算,结果如表 1 和图 11 所示,其中  $\epsilon_1$  为使用椭球聚光镜的太阳模拟器辐照不均匀度, $\epsilon_2$  为使用自由曲面聚光镜的太阳模拟器辐照不均匀度。

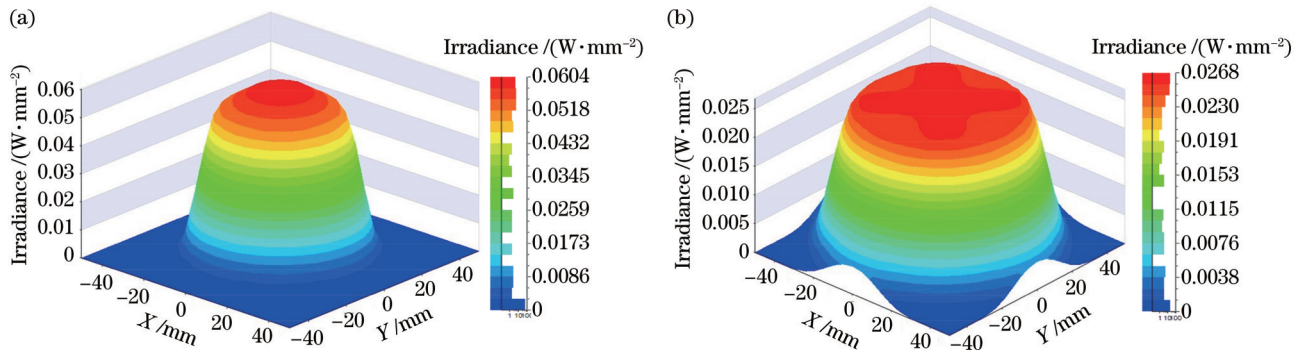


图 7 自由曲面聚光镜的目标面辐照度分布。(a)优化前的辐照度分布;(b)优化后的辐照度分布

Fig. 7 Irradiance distribution of target surface of free-form surface condenser. (a) Irradiance distribution before optimization; (b) optimized irradiance distribution



图 8 太阳模拟器光学系统仿真图

Fig. 8 Optical system simulation diagram of solar simulator

表 1 使用椭球聚光镜和自由曲面聚光镜的太阳模拟器辐照不均匀度比较

Table 1 Comparison of irradiation nonuniformity of solar simulator using ellipsoidal condenser and free-form surface condenser

Diameter /mm	Ellipsoidal condenser			Free-form surface condenser		
	$E_{\max} /(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	$E_{\min} /(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	$\epsilon_1 / \%$	$E_{\max} /(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	$E_{\min} /(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	$\epsilon_2 / \%$
$\phi 50$	2410	2321	$\pm 1.88$	2499	2484	$\pm 0.32$
$\phi 100$	2410	2280	$\pm 2.74$	2506	2479	$\pm 0.53$

对比表 1 的数据可知,相比椭球聚光镜,所设计的自由曲面聚光镜将太阳辐照度提升了 3.8%,同时降低了太阳模拟器辐照面的辐照不均匀度。在辐照面  $\phi 50 \text{ mm}$  内,辐照不均匀度优于  $\pm 0.32\%$ ;辐照面  $\phi 100 \text{ mm}$  内,辐照不均匀度优于  $\pm 0.53\%$ 。由图 11 可

知:随着辐照面从  $\phi 50 \text{ mm}$  增大到  $\phi 100 \text{ mm}$ ,椭球聚光镜的辐照不均匀度越来越大,局部上升幅度也较大;自由曲面聚光镜的辐照不均匀度的总体上升趋势较小,局部上升幅度缓慢增加。

为了评价使用自由曲面聚光镜的太阳模拟器加

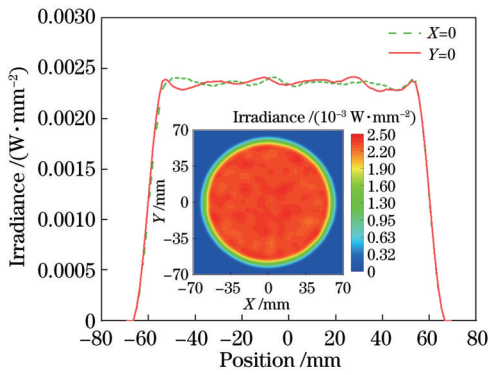


图 9 使用椭球聚光镜的太阳模拟器辐照面的辐照度分布  
Fig. 9 Irradiance distribution of solar simulator on irradiation surface using ellipsoidal condenser

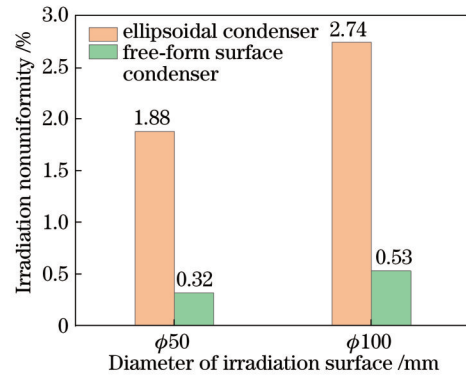


图 11 椭球聚光镜和自由曲面聚光镜的辐照不均匀度对比  
Fig. 11 Comparison of irradiation nonuniformity between ellipsoidal condenser and free-form surface condenser

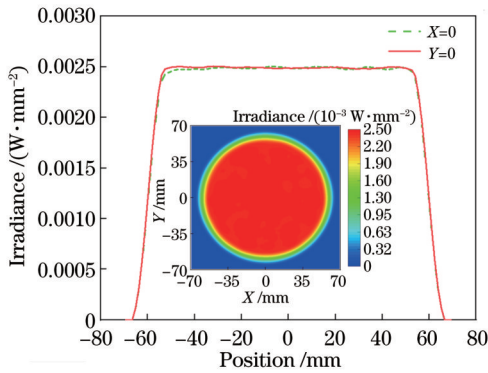


图 10 使用自由曲面聚光镜的太阳模拟器辐照面的辐照度分布  
Fig. 10 Irradiance distribution of solar simulator on irradiation surface using free-form surface condenser

装调过程中可能产生的误差对太阳模拟器光学性能的影响<sup>[25]</sup>。以辐照面 $\phi 100$  mm内的辐照度和辐照不均匀度为评价指标,利用仿真软件分别分析了自由曲面聚光镜的面形精度、沿轴位置偏移、垂轴位置偏移及角度偏移对辐照度和辐照不均匀度的影响,结果如图 12~15 所示。其中,所设计的自由曲面聚光镜为旋转对称结构,这就决定了其面形精度的基本变量是拟合自由曲面聚光镜母线的离散点坐标位置。因此,在 LightTools 软件中外接调控自由曲面聚光镜母线离散点位置误差范围为 $\pm 15 \mu\text{m}$ 的程序,分别给定各个离散点的误差值,拟合出相应的自由曲面聚光镜面形,从而仿真分析自由曲面聚光镜的面形精度对太阳模拟器辐照度和辐照不均匀度的影响。

工装调的可行性,仿真分析了自由曲面聚光镜加工

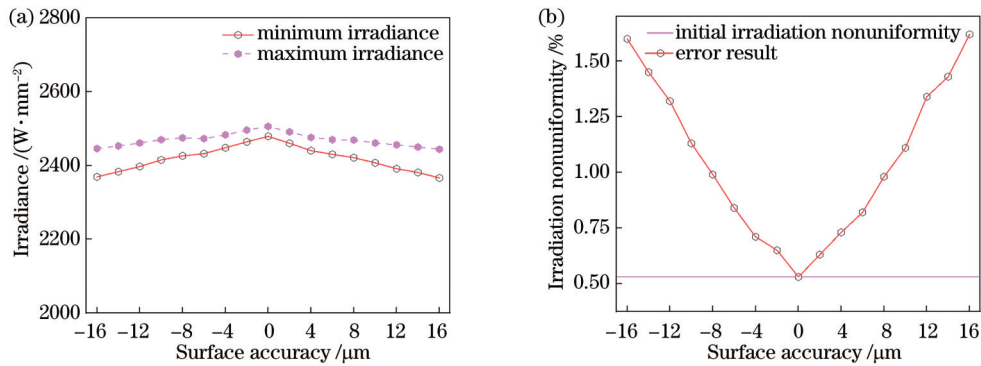


图 12 自由曲面聚光镜的面形精度对辐照度和辐照不均匀度的影响。(a)辐照度;(b)辐照不均匀度  
Fig. 12 Influence of surface accuracy of free-form surface condenser on irradiance and irradiation nonuniformity. (a) Irradiance; (b) irradiation nonuniformity

由图 12~15 可知,当自由曲面聚光镜的面形精度优于 $\pm 15 \mu\text{m}$ 、沿轴位置偏移优于 $0.3 \text{ mm}$ 、垂轴位置偏移优于 $0.3 \text{ mm}$ 、角度偏移优于 $0.4^\circ$ 时,太阳模拟器辐照面在 $\phi 100$  mm内的辐照度大于 $S_0$ ,且辐照不均匀度小于 $1.5\%$ ,满足设计要求。同时,根据现有加工与检测水平,可实现面形精度优于 $\pm 15 \mu\text{m}$ <sup>[26-28]</sup>,而位置与角度的偏移量可依据仿真分析结果,通过选取合适的

调整架在装调过程中实现。

## 4 结 论

设计了一种自由曲面聚光镜,基于点光源模型依据能量守恒定律和边光理论以及映射法建立良好的初始结构,采用贝塞尔曲线表征自由曲面聚光镜母线,选取贝塞尔曲线的参数作为优化变量以及目标面上的辐

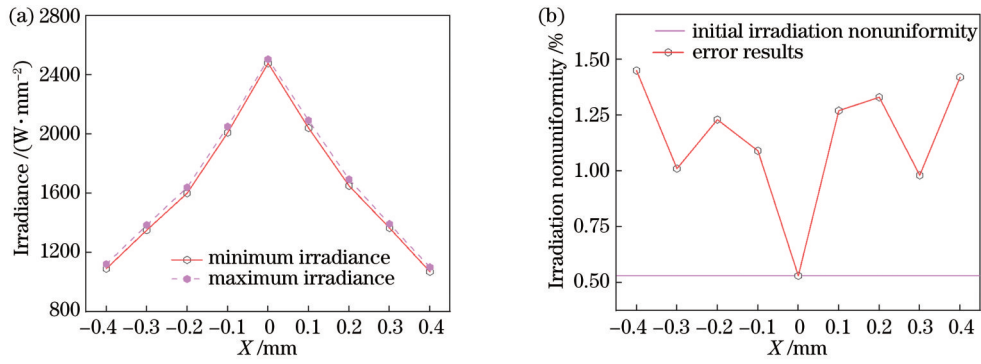


图 13 自由曲面聚光镜的沿轴位置偏移对辐照度和辐照不均匀度的影响。(a)辐照度;(b)辐照不均匀度  
Fig. 13 Influence of the axial position offset of the free-form surface condenser on irradiance and irradiation nonuniformity.

(a) Irradiance; (b) irradiation nonuniformity

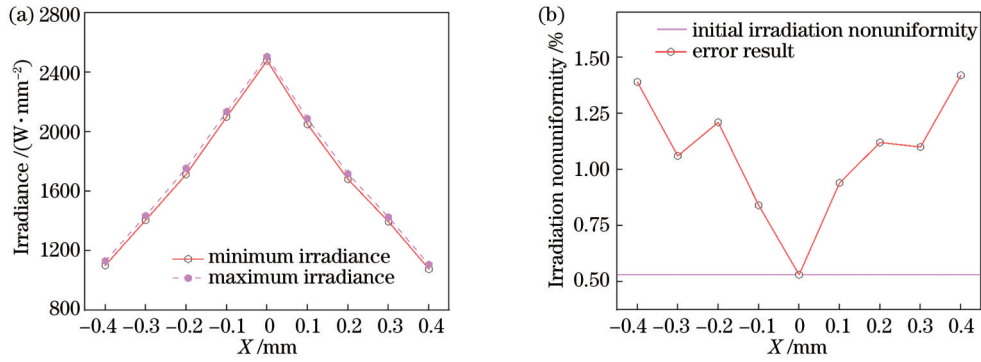


图 14 自由曲面聚光镜的垂轴位置偏移对辐照度和辐照不均匀度的影响。(a)辐照度;(b)辐照不均匀度  
Fig. 14 Influence of vertical axis position offset of free-form surface condenser on irradiance and irradiation nonuniformity.

(a) Irradiance; (b) irradiation nonuniformity

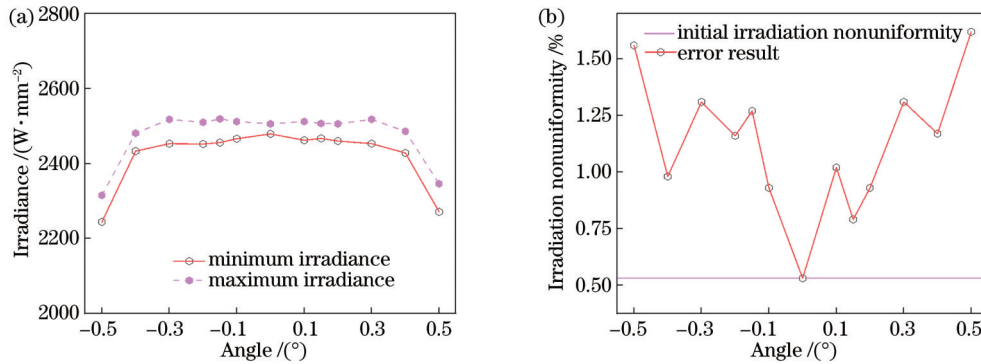


图 15 自由曲面聚光镜的角度偏移对辐照度和辐照不均匀度的影响。(a)辐照度;(b)辐照不均匀度  
Fig. 15 Influence of angle offset of free-form surface condenser on irradiance and irradiation nonuniformity.

(a) Irradiance; (b) irradiation nonuniformity

照均匀度作为评价函数,使用模拟退火算法对引入扩展光源的自由曲面进行反馈优化。仿真结果表明:采用自由曲面聚光镜后,太阳模拟器辐照面的辐照均匀性显著提高, $\phi 50 \text{ mm}$  辐照面内的辐照不均匀度优于  $\pm 0.32\%$ ,  $\phi 100 \text{ mm}$  辐照面内的辐照不均匀度优于  $\pm 0.53\%$ ;根据现有加工装调水平,考虑自由曲面聚光镜面形与位姿误差后,辐照面内可实现辐照度大于  $S_0$ ,且辐照不均匀度小于  $1.5\%$ ,由此验证了自由曲面聚

光镜加工、检测与装调的可行性。

参 考 文 献

[1] 刘石, 张国玉, 孙高飞, 等. 高精度准直式太阳模拟器光机结构设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1229-1235.  
Liu S, Zhang G Y, Sun G F, et al. Opto-mechanical structure design of collimation solar simulator with high-precision[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(4): 1229-1235.  
[2] 苏拾, 张国玉, 付芸, 等. 太阳模拟器的新发展[J]. 激光与光电

- 子学进展, 2012, 49(7): 070003.  
Su S, Zhang G Y, Fu Y, et al. New development of solar simulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070003.
- [3] 杨林华, 李竝松. 国外大型太阳模拟器研制技术概述[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(2): 162-167.  
Yang L H, Li H S. The development of large solar simulators in the world[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(2): 162-167.
- [4] 孙超, 金志樑, 宋扬, 等. 多源分布式稳态太阳模拟器设计[J]. 光学学报, 2022, 42(10): 1022001.  
Sun C, Jin Z L, Song Y, et al. Design of multi-source distributed steady-state solar simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(10): 1022001.
- [5] 宋培宇. 高准直高辐照度太阳模拟器的设计与仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
Song P Y. Design and simulation analysis of solar simulator with high collimation and high irradiance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [6] 刘石. 高精度准直式太阳模拟器及其关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.  
Liu S. Study on key technique of couimation solar simulator with high-precision[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [7] 刘石, 张国玉, 孙高飞, 等. 具有一个太阳常量的高准直太阳模拟器光学系统设计[J]. 光子学报, 2014, 43(11): 1122005.  
Liu S, Zhang G Y, Sun G F, et al. Design of optical system for the high-collimating solar simulator with one solar constant[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(11): 1122005.
- [8] Wang W, Aichmayer L, Laumert B, et al. Design and validation of a low-cost high-flux solar simulator using Fresnel lens concentrators[J]. Energy Procedia, 2014, 49: 2221-2230.
- [9] Li L F, Wang B, Pottas J, et al. Design of a compound parabolic concentrator for a multi-source high-flux solar simulator[J]. Solar Energy, 2019, 183: 805-811.
- [10] 任兰旭, 魏秀东, 牛文达, 等. 非共轴椭球面聚光阵列式高焦比太阳模拟器[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022002.  
Ren L X, Wei X D, Niu W D, et al. A high flux solar simulator based on an array of non-coaxial ellipsoidal reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022002.
- [11] 吕涛, 张景旭, 付东辉, 等. 可提高太阳模拟器均匀性的变形椭球面聚光镜[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1223001.  
Lü T, Zhang J X, Fu D H, et al. A deformed ellipsoid condenser beneficial to the uniformity of the solar simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1223001.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 光伏器件 第 9 部分: 太阳模拟器性能要求: GB/T 6495.9—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements: GB/T 6495.9—2006[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.
- [13] 明杉焱, 孙高飞, 张国玉, 等. 太阳模拟器宽范围辐照连续可调节系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1622002.  
Ming S C, Sun G F, Zhang G Y, et al. Continuous regulation system design of wide-range irradiance for solar simulators[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1622002.
- [14] 马宇飞. 自由曲面照明设计及其优化方法的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.  
Ma Y F. Research on the design method and optimization method of freeform illumination[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [15] 陈家奇, 顾国超. 利用映射法构造自由曲面反射镜[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(6): 1-5.  
Chen J Q, Gu G C. Using mapping-method to form freeform surface reflector[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 36(6): 1-5.
- [16] 朱小芳, 李红波, 薛永胜, 等. 反射罩光学设计与均匀性仿真[J]. 光电技术应用, 2010, 25(6): 18-21.  
Zhu X F, Li H B, Xue Y S, et al. Optical design and uniform simulation of reflector[J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(6): 18-21.
- [17] 高雁, 刘洪波, 王丽, 等. 大面积准直型太阳模拟器的设计与研制[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 657-664.  
Gao Y, Liu H B, Wang L, et al. Design and manufacture of a large-area collimation solar simulator[J]. Chinese Optics, 2014, 7(4): 657-664.
- [18] 易大义, 沈云宝, 李有法, 等. 计算方法[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 240-248.  
Yi D Y, Shen Y B, Li Y F, et al. Calculation method[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002: 240-248.
- [19] 梁文跃, 李远兴, 凡利娟, 等. 基于 LED 扩展光源环形均匀光斑的自由曲面透镜设计[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2018, 32(3): 12-17.  
Liang W Y, Li Y X, Fan L J, et al. Design of freeform surface lens based on extended LED light source for ring uniform illumination distribution[J]. Journal of Wuyi University (Natural Science Edition), 2018, 32(3): 12-17.
- [20] Tsallis C, Stariolo D A. Generalized simulated annealing[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1996, 233 (1/2): 395-406.
- [21] Busetti F. Simulated annealing overview[EB/OL]. (2001-05-01) [2022-12-10]. [https://www.researchgate.net/publication/238690391\\_Simulated\\_annealing\\_overview](https://www.researchgate.net/publication/238690391_Simulated_annealing_overview).
- [22] Du K L, Swamy M N S. Bee metaheuristics[M]//Search and optimization by metaheuristics. Cham: Springer, 2016: 201-216.
- [23] 彭浩文, 苏拾, 张国玉, 等. 太阳模拟器用变曲率光学积分器研究与设计[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0708001.  
Peng H W, Su S, Zhang G Y, et al. Research and design of variable curvature optical integrator for solar simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0708001.
- [24] 苏拾, 孟凡琳, 张国玉, 等. 氙灯光源太阳模拟器辐照衰减器设计方法[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0208001.  
Su S, Meng F L, Zhang G Y, et al. Design method of irradiance attenuator for solar simulator of xenon lamp[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0208001.
- [25] 段文举, 朴明旭, 全向前, 等. 适于扩展光源的紧凑型双自由曲面匀光透镜设计[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 1522001.  
Duan W J, Piao M X, Quan X Q, et al. Design of compact double freeform surface lens with uniform illumination for extended light source[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1522001.
- [26] Saunders I J, Ploeg L, Dorrepaal M, et al. Fabrication and metrology of freeform aluminum mirrors for the SCUBA-2 instrument[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5869: 14-25.
- [27] 朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0112001.  
Zhu R H, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41 (1): 0112001.
- [28] 李荣彬, 张志辉, 杜雪, 等. 自由曲面光学的超精密加工技术及其应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 110-115.  
Li R B, Zhang Z H, Du X, et al. Ultra-precision machining technology of freeform optics and its applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(1): 110-115.



## Design of Free-Form Surface Condenser for Solar Simulator

Liu Shi<sup>1,2</sup>, Zou Guoxing<sup>1\*</sup>, Zhang Guoyu<sup>1,2</sup>, Wang Gang<sup>3</sup>, Zhang Jian<sup>1,2</sup>, Duan Zongtao<sup>1</sup>,  
Niu Zhengjie<sup>1</sup>, Ren Taiyang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;*

<sup>2</sup>*Opto-Electronic Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun 130022, Jilin, China;*

<sup>3</sup>*Lianyungang JARI Electronics Co., Ltd., Lianyungang 222000, Jiangsu, China*

### Abstract

**Objective** The solar simulator is a device that simulates solar irradiation characteristics indoors. In the design of the solar simulator, the irradiation uniformity is an important indicator, which directly determines the accuracy of the device. Hence, improving irradiation uniformity has become a key research direction. In a solar simulator, the concentrator system is one of the key components, which typically uses an ellipsoidal condenser. By the ellipsoidal condenser, the radiation flux from the light source placed on the first focal plane will be focused on the second focal plane. As a result, a convergent spot is formed on the incident surface of the optical integrator, which is dense at the center, sparse at the edge, and Gaussian in shape. This uneven illuminance distribution is detrimental to the irradiation uniformity of the entire system. To address the poor performance of the solar simulator due to the low irradiation uniformity of the optical integrator's incident surface, this paper proposes and designs a free-form surface condenser as the concentrator system of the solar simulator. On the premise that the focusing efficiency is ensured, the irradiation uniformity on the second focal plane is effectively improved as the irradiation uniformity of the solar simulator is improved through better irradiation distribution on the optical integrator's incident surface.

**Methods** In this paper, the free-form surface condenser used in the solar simulation system is studied. First, the mapping relationship between the outgoing angle of the light source and the corresponding point on the target surface is determined. According to Fresnel's law and the mapping relationship, the differential equation is derived, which is solved by the Runge-Kutta method to calculate the discrete point data. After curve fitting of the discrete point data, the bus line of the free-form surface condenser is obtained. Second, the generatrix of the free-form surface is generated by the Bézier curve. A simulated annealing algorithm is employed to conduct feedback-oriented optimization on the free-form surface condenser with an extended light source. Third, the optical system of the solar simulator is modeled by the software LightTools, and the ellipsoidal condenser and the free-form surface condenser are configured in the same optical system of a solar simulator for comparative analysis. Fourth, the irradiance and the irradiation nonuniformity within  $\phi 100$  mm of the irradiation surface are taken as the evaluation indexes, and error simulation analyses are performed to investigate the influence of surface accuracy, axial position offset, vertical-axis position offset, and angle offset of the free-form surface condenser on the irradiance and the irradiation nonuniformity.

**Results and Discussions** According to the analysis results, the target surface of the developed free-form surface condenser displays a uniform irradiation distribution, which indicates an ideal improvement in the irradiation uniformity of the optical integrator's incident surface. In the design proposal, the generatrix is rotated to obtain the free-form surface condenser. After multiple parameters of the Bézier curve are optimized, the irradiation uniformity within  $\phi 60$  mm of the target surface of the free-form surface condenser rises from 52% before optimization to 92% (Fig. 7). By contrast, the irradiation nonuniformity of the solar simulator using the free-form surface condenser is significantly lower than that of the solar simulator using the ellipsoidal condenser. In the case of the free-form surface condenser, the irradiation nonuniformity within  $\phi 50$  mm of the irradiation surface is better than 0.32%, and the irradiation nonuniformity within  $\phi 100$  mm of the irradiation surface is better than 0.53% (Table 1). When the surface accuracy of the free-form surface condenser is controlled within  $\pm 15$   $\mu\text{m}$  (Fig. 12), the axial position deviation is controlled within 0.3 mm (Fig. 13), the vertical-axis position deviation is controlled within 0.3 mm (Fig. 14), and the angle deviation is controlled within  $0.4^\circ$  (Fig. 15), the irradiance within  $\phi 100$  mm of the irradiation surface of the solar simulator can be greater than  $S_0$ , and the irradiation nonuniformity is less than 1.5%.

**Conclusions** In this paper, a free-form surface condenser is proposed and designed. The point light source model is used to construct a reasonable initial structure according to the law of conservation of energy, the edge light theory, and the

mapping method. In the design proposal, the generatrix of the free-form surface condenser is represented by the Bézier curve. The parameters of the Bézier curve are selected as the optimization variables, and the irradiation uniformity on the target surface is selected as the evaluation function. In the meantime, a simulated annealing algorithm is used to optimize the free-form surface with an extended light source. The simulation results of LightTools show that the irradiation uniformity on the irradiation surface of the solar simulator is significantly improved when the free surface condenser is used. The irradiation nonuniformity within  $\phi 50$  mm of the irradiation surface is better than 0.32%, and that within  $\phi 100$  mm of the irradiation surface is better than 0.53%. When the surface and pose errors of the free-form surface condenser are taken into account according to the existing processing, assembly, and adjustment level, the irradiance greater than  $S_0$  is considered feasible on the irradiation surface, and the irradiation nonuniformity is less than 1.5%. This verifies the feasibility of the processing, detection, assembly, and adjustment of the free-form surface condenser.

**Key words** optical design; solar simulator; free-form surface; irradiation nonuniformity