

## 太阳模拟器用变曲率光学积分器研究与设计

彭浩文<sup>1</sup>, 苏拾<sup>1,2,3\*</sup>, 张国玉<sup>1,2,3</sup>, 刘石<sup>1,2,3</sup>, 孙高飞<sup>1,2,3</sup>, 张健<sup>1,2,3</sup>, 孟凡琳<sup>1</sup>, 陈永祝<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> 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对等曲率光学积分器输出光斑的边缘辐照能量低而导致辐照面均匀性差的问题, 基于衍射理论提出辐射能量微分、积分法, 设计一种变曲率光学积分器。根据菲涅耳数来确定积分器通道的口径和数目, 等距划分辐照分布曲线。根据积分器中各圈子眼透镜焦距的不同, 对辐照分布曲线进行阶梯式叠加。基于衍射理论建立二维平面的变曲率光学积分器数学模型, 推导工作面上的光强分布数学函数。利用 Zemax 软件对场镜组中各圈子眼透镜进行非球面优化设计以提高成像质量、消除旁瓣效应。采用 LightTools 软件仿真变曲率光学积分器与等曲率光学积分器, 并对比分析它们的性能差异。结果表明, 变曲率光学积分器能够使太阳模拟器输出光斑的边缘辐照能量明显提高, 与等曲率光学积分器相比最高提升 56%,  $\Phi 100$  mm 辐照面内的辐照不均匀度优于  $\pm 0.5\%$ ,  $\Phi 200$  mm 辐照面内优于  $\pm 1\%$ 。

**关键词** 几何光学; 太阳模拟器; 变曲率光学积分器; 衍射理论; 菲涅耳数; 非球面

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0708001

## Research and Design of Variable Curvature Optical Integrator for Solar Simulator

Peng Haowen<sup>1</sup>, Su Shi<sup>1,2,3\*</sup>, Zhang Guoyu<sup>1,2,3</sup>, Liu Shi<sup>1,2,3</sup>,  
Sun Gaofei<sup>1,2,3</sup>, Zhang Jian<sup>1,2,3</sup>, Meng Fanlin<sup>1</sup>, Chen Yongzhu<sup>1</sup><sup>1</sup> College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;<sup>2</sup> Jilin Province Engineering Research Center of Optical Measurement and Control Instrumentation, Changchun, Jilin 130022, China;<sup>3</sup> Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In order to solve the problem of low radiation energy at the edge of the output spot of the equal curvature optical integrator, which leads to the poor uniformity of the radiation surface, the differential and integration method of radiation energy based on the diffraction theory is proposed, and a variable curvature optical integrator is designed. The aperture and number of the integrator channel are determined according to the Fresnel number, and the radiation distribution curve is divided equidistant. According to the difference of the focal length of each eye lens in the integrator, the radiation distribution curve is superimposed step by step. Based on the diffraction theory, the mathematical model of variable curvature optical integrator in two-dimensional plane is established, and the mathematical function of light intensity distribution on the working face is deduced. The aspheric optimization design of each circle eye lens in the field lens group is carried out by using Zemax software to improve the imaging quality and eliminate the sidelobe effect. The variable curvature optical integrator and the constant curvature optical

收稿日期: 2021-07-09; 修回日期: 2021-09-10; 录用日期: 2021-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(61603061)、吉林省科技计划(20190302064GX, 20190302124GX)

通信作者: \*sushi@cust.edu.cn

integrator are simulated by LightTools software, and their performance differences are compared and analyzed. The results show that the variable curvature optical integrator can significantly improve the edge radiation energy of the output spot of the solar simulator, up to 56% higher than that of the equal curvature optical integrator, the irradiation non-uniformity in the  $\Phi 100$  mm radiation plane is better than  $\pm 0.5\%$ , and the radiation inhomogeneity in the  $\Phi 200$  mm radiation plane is better than  $\pm 1\%$ .

**Key words** geometric optics; solar simulator; variable curvature optical integrator; diffraction theory; Fresnel number; aspheric surface

## 1 引言

太阳模拟器作为一种模拟太阳光辐射特性的测试设备,广泛应用于航天和太阳能利用等领域<sup>[1-3]</sup>。光学积分器作为太阳模拟器中的重要匀光器件,将聚光镜收集、会聚形成的高斯辐射分布进行分割与叠加,可以输出辐照均匀一致的光斑,这对提高太阳模拟器的性能起着重要作用。

光学积分器按其在聚光光路中的位置分为出瞳积分器和像面积分器。出瞳积分器的纵向尺寸小,径向尺寸大;像面积分器的径向尺寸小且对称通道相互补偿,其又分为对称式和虚像式,对称式光学积分器根据光斑形状可分为正方形、长方形和正六边形<sup>[4-6]</sup>。目前,在太阳模拟器中主要应用对称式光学积分器。2012年,美国的 Udekoc 等<sup>[7]</sup>研制出了紧凑型光学积分器,通过增加光束通过路径的长度来提高光束的均匀性,但其结构过大,装调不便。长春理工大学的李志强等<sup>[8]</sup>研制出了集束型光学积分器,其保证了光轴一致性,有效避免了旁瓣效应,但无法补偿边缘光线,光斑边缘的辐照均匀性差。日本的 Katsuki 等<sup>[9]</sup>研制出了出瞳式光学积分器,其可以防止叠加成像模糊,但更影响边缘的辐照均匀性。长春理工大学的安桂芳等<sup>[10]</sup>采用边缘透镜来扩大积分器的口径和投影镜组的离焦等,这可以补偿辐照面边缘的均匀性,但其光能损耗率高且装调难度大。上述这些等曲率光学积分器及其补偿方法,除中心透镜与主光轴重合外,外圈透镜都偏离主光轴,这会导致输出光斑边缘的辐照能量低,而且未考虑单独改善每一圈子眼透镜的光学结构。对于光学积分器的研究和设计只停留在几何光学的角度,忽略了其实质是衍射成像,而产生的衍射效应也影响了光强分布,目前未深入研究光波的传输特性和工作面上的光强分布。

为此以提高输出光斑边缘的辐照能量为目的,本文提出一种辐射能量的微分、积分法,设计一种变曲率光学积分器。通过菲涅耳数来定量评价积分器的衍射效应;基于衍射理论建立积分器数学模型,深入分析光波的传输特性;通过工作面上的光强分布

函数,详细阐述每圈子眼透镜的光学参数对照度均匀性的影响;场镜组的后表面采用非球面设计;最后利用 Lighttools 软件进行建模仿真,并与等曲率光学积分器进行对比分析,以验证所设计的器件的准确性和实用性。

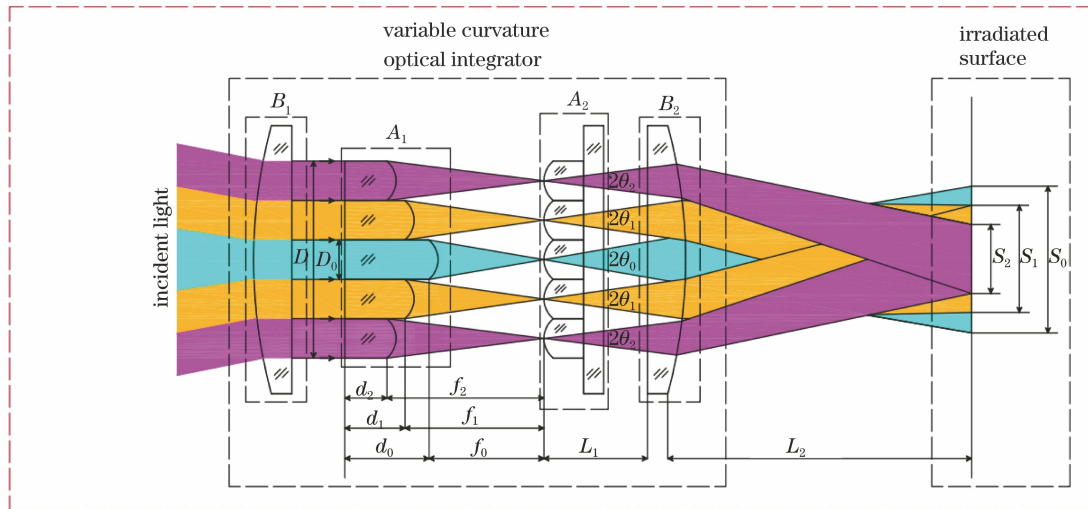
## 2 变曲率光学积分器的组成和工作原理

变曲率光学积分器的设计思想是将光能有规律地进行微分和积分,将高斯状的辐照分布曲线进行等距划分和阶梯叠加,以提高工作面边缘的辐照能量。由泰伯效应<sup>[11]</sup>分析可知,变曲率光学积分器是一种自成像效应器件,不是传统意义上的透镜成像器件,而是衍射成像器件,所以从波动光学的角度运用衍射理论来分析变曲率光学积分器的复振幅分布。

变曲率光学积分器由准直透镜、场镜组、投影镜组和聚焦透镜组成,如图 1 所示。准直透镜  $B_1$  和聚焦透镜  $B_2$  为两个平凸透镜。场镜组  $A_1$  由 25 个不同厚度的正方形棱柱透镜组成,透镜呈阶梯排列<sup>[12]</sup>。投影镜组  $A_2$  由 25 个等厚度的正方形透镜组成。将积分器中的每个小透镜称为子眼透镜,各圈子眼透镜按中心对称排列,同一圈的子眼透镜光学参数相同,不同圈的子眼透镜光学参数不同。

在理想条件下,光波经过准直透镜后准直成平行光波入射,最终在场镜组各圈子眼透镜的视场角内发生波前入射。场镜组将宽光波分割成细光波并不会聚到投影镜组,形成二次光源像。因各圈子眼透镜的焦距不同,故形成的复振幅图像大小不同。聚焦透镜将复振幅图像映射到工作面上,形成一个积分后的多圈阴影光斑。

积分器前的辐照分布曲线<sup>[13]</sup>如图 2 所示,其中  $E$  为辐照强度, $D_0$  为子眼透镜的口径。由图 2 可知,将  $C$  曲线划分为 5 个相等区域的曲线, $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C'_1$ 、 $C_2$  和  $C'_2$  分别对应积分器的各圈通道,由于各圈通道的焦距不同,故可形成不同尺寸(直径为  $S_0$ 、 $S_1$  和  $S_2$ )的光斑。图 3 为积分后的辐照分布曲线,各曲线舍弃梯度较大的边缘曲线,以中间平滑的曲线进行叠加,最终阶梯式叠加成  $H$  曲线。



$A_1$ : field lens;  $A_2$ : projector lens;  $B_1$ : collimating lens;  $B_2$ : focusing lens;  $D$ : aperture of optical integrator;  $D_0$ : lens aperture;  $L_1, L_2$ : lens spacing;  $d$ : lens thickness;  $f$ : lens focal length;  $\theta$ : Divergence angle;  $S$ : irradiation area

图 1 变曲率光学积分器的工作原理

Fig. 1 Working principle of variable curvature optical integrator

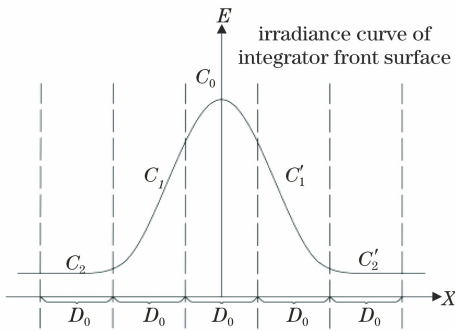


图 2 积分前的辐照分布分割曲线

Fig. 2 Partition curve of irradiation distribution before integration

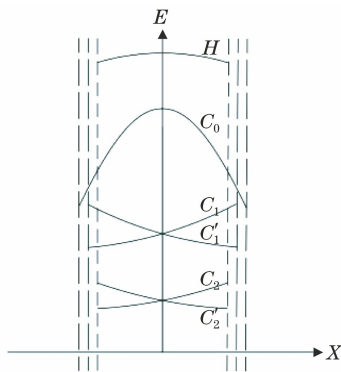


图 3 积分后的辐照分布叠加曲线

Fig. 3 Superposition curve of irradiation distribution after integration

积分器的通道数目决定了如何分割辐照分布曲线。将菲涅耳数  $F_N$  作为评价衍射效应的指标,用来定量评价辐照分布情况<sup>[14]</sup>,  $F_N$  可表示为

$$F_N = 2 \times D_{OP} = \frac{r^2}{\lambda L}, \quad (1)$$

式中:  $D_{OP}$  为光程差;  $r$  为子眼透镜口径的半径;  $\lambda$  为入射光波长;  $L$  为工作距离。

以中心子眼透镜为例,假设以平行光波入射,聚焦透镜的焦距为  $f_F$ ,辐照面的直径为  $S_0$ ,积分器的口径为  $D$ ,子眼透镜的口径为  $D_0$ ,径向的通道数为  $m$ 。将  $r = \frac{D_0}{2}$  和  $L = f_0 = \frac{D_0 f_F}{S_0}$  代入(1)式可得积分器与菲涅耳数的关系,表达式为

$$F_N = \frac{D_0 S_0}{4\lambda \cdot f_F}. \quad (2)$$

根据菲涅耳衍射原理可知,菲涅耳数越大,衍射效应越小,工作面上的光斑图样轮廓越清晰。为了使衍射效应无法调制光强分布,  $F_N$  需大于 50,若要达到高均匀性,需使  $F_N$  大于 500。在  $f_F$  和  $S_0$  不变的情况下,若使  $F_N$  与  $D_0$  成正比,则取  $S_0 = 200 \text{ mm}$ ,  $f_F = 800 \text{ mm}$ 。因太阳光谱是宽波段,选取  $\lambda$  最大值  $770 \text{ nm}$  进行计算,将数据代入(2)式得到  $D_0 > 3.12 \text{ mm}$ 。因光源在椭球反射镜第二焦面处的圆形光斑直径  $D_R = 47.26 \text{ mm}$ ,为了提高均匀性且降低能量损失,使通过准直透镜后出射的光波能够恰好完全辐射积分器场镜组中每个子眼透镜的有效辐射面积,则有效辐照面积为每个子眼透镜的内切圆,即

### 3 变曲率光学积分器的优化设计

#### 3.1 积分器通道口径和数目的确定

积分器子眼透镜的口径会限制入射波面的大小,导致辐照强度发生变化,影响工作面的均匀性。

$$D_R = [\sqrt{2}(m-1) + 1]D_0. \quad (3)$$

将  $D_0$  代入(3)式得到  $m < 11.0037$  ( $m$  为正整数), 综上所述只要  $m$  小于 11.0037, 就能获得不受衍射效应调制的光强分布。还需考虑  $m$  对辐照均匀性和能量利用率的影响, 设  $\nu$  为能量利用率, 积分器能量利用率公式为

$$\nu = \frac{m^2 D_0^2}{D_R^2} = \frac{m^2}{[\sqrt{2}(m-1) + 1]^2} \times 100\%. \quad (4)$$

为了便于加工和装调, 建立  $3 \times 3$ 、 $4 \times 4$ 、 $5 \times 5$ 、 $6 \times 6$  和  $7 \times 7$  共 5 种透镜阵列模型。根据(3)式可得  $m$  与能量利用率的关系, 如图 4 所示。仿真比较辐照面 ( $\Phi 200$  mm) 下  $m$  与不均匀性的关系, 如图 5 所示。

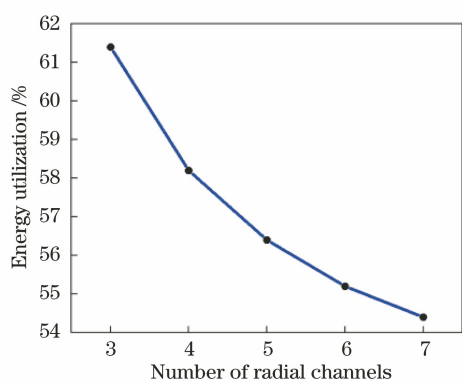


图 4 径向通道数与能量利用率的关系

Fig. 4 Relationship between number of radial channels and energy utilization

由图 4 和图 5 可知,  $m$  值越大, 不均匀性的降低幅度逐渐平滑, 能量利用率越低, 加工难度越大。为了使不均匀性优于  $\pm 1\%$  和能量利用率高于  $56\%$ , 设置  $m = 5$ 、积分器的通道数目为 25 和  $D_0 = 7.1$  mm (场镜组与投影镜组相同), 将参数代入(2)式可以得到  $F_N$  的最小值为 576.3。设计的参数

表 1 积分器通道的口径和数目

Table 1 Aperture and number of integrator channels

Item	Lens aperture / mm	Number of radial channels	Number of channels	Irradiated area / mm	Minimum value of Fresnel number
Variable curvature optical integrator	7.1	5	25	200	576.3

### 3.2 积分器各圈子眼透镜焦距的确定

积分器各圈子眼透镜的焦距决定了复振幅图像的大小, 选择不同的焦距能够补偿工作面边缘的辐照能量。理想情况下, 光波经过每个镜组都会产生一个新的波前, 发生位相延迟, 目标面上的场分布等于积分器孔径上各子波源发出的带有不同权重的球面子波的相干叠加结果。当光波通过透镜阵列时, 透镜阵列呈对称式排列, 各圈子眼透镜的焦距不同,

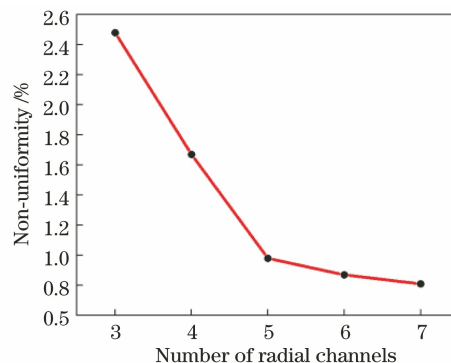


图 5 径向通道数与不均匀性的关系

Fig. 5 Relationship between number of radial channels and non-uniformity

如表 1 所示, 透镜阵列的平面图如图 6(a) 所示。

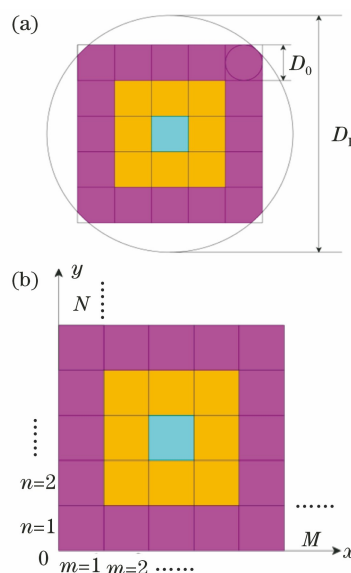


图 6 透镜阵列的示意图。(a) 透镜阵列平面示意图;

(b) 透镜阵列平面坐标系图

Fig. 6 Diagram of lens array. (a) Schematic of lens array plane; (b) planar coordinate system diagram of lens array

若以二维情况进行分析, 在透镜阵列平面区域建立坐标系, 如图 6(b) 所示, 其中  $r_{m,n}$  为每个透镜的编号,  $M$  和  $N$  为沿  $x$  轴和  $y$  轴的透镜个数。各圈子眼透镜的复振幅透过率函数是各圈子眼透镜的函数与梳状函数的乘积, 再与透镜单元的透过率函数的卷积。各圈子眼透镜的函数  $R_n(x, y)$  如表 2 所示, 其中  $a$ 、 $b$  和  $c$  分别为各圈子眼透镜的集合。表 3 为各圈子眼透镜的复振幅透过率函数  $t_n(x, y)$ , 其中

$f$  为波长,  $\otimes$  为卷积运算符。

表 2 各圈子眼透镜的函数

Table 2 Function of each circle sub-eye lens

Sub-eye lens	Function
Central sub-eye lens	$R_1(x_a, y_a) = r_{3,3} + \dots + r_{M-2, N-2}$
Second sub-eye lens	$R_2(x_b, y_b) = r_{2,2} + r_{3,2} + r_{4,2} + \dots + r_{M-1, N-1} - R_1(x_a, y_a)$
Outermost sub-eye lens	$R_3(x_c, y_c) = r_{1,1} + r_{2,1} + r_{3,1} + r_{4,1} + \dots + r_{M, N} - R_1(x_a, y_a) - R_2(x_b, y_b)$

表 3 各圈子眼透镜的复振幅透过率函数

Table 3 Complex amplitude transmittance function of each circle sub-eye lens

Sub-eye lens	Function
Central sub-eye lens $t_1(x, y)$	$\sum_m^{M-2} \sum_n^{N-2} \delta(x_a - mD_0, y_a - nD_0) \otimes \left\{ \text{rect}\left(\frac{x_a}{D_0}\right) \text{rect}\left(\frac{y_a}{D_0}\right) \cdot \exp\left[-\frac{ik}{2f}(x_a^2 + y_a^2)\right] \right\}$
Second sub-eye lens $t_2(x, y)$	$\sum_m^{M-2} \sum_n^{N-2} \delta(x_b - mD_0, y_b - nD_0) \otimes \left\{ \text{rect}\left(\frac{x_b}{D_0}\right) \text{rect}\left(\frac{y_b}{D_0}\right) \cdot \exp\left[-\frac{ik}{2f}(x_b^2 + y_b^2)\right] \right\}$
Outermost sub-eye lens $t_3(x, y)$	$\sum_m^{M-2} \sum_n^{N-2} \delta(x_c - mD_0, y_c - nD_0) \otimes \left\{ \text{rect}\left(\frac{x_c}{D_0}\right) \text{rect}\left(\frac{y_c}{D_0}\right) \cdot \exp\left[-\frac{ik}{2f}(x_c^2 + y_c^2)\right] \right\}$

以中心子眼透镜为例,表 3 中  $\sum_m^{M-2} \sum_n^{N-2} \delta(x_a - mD_0, y_a - nD_0)$  是中心子眼透镜的排列分布函数,  $\text{rect}\left(\frac{x_a}{D_0}\right) \text{rect}\left(\frac{y_a}{D_0}\right)$  是中心子眼透镜的孔径函数。理想情况下,假设波长为  $\lambda$  的平面波复振幅分布为  $E_0(x, y)$ ,光波入射到光学积分器场镜组后的复振幅分布  $E_1(x_1, y_1)$  为

$$E_1(x_1, y_1) = E_0(x, y) \cdot t_1(x_1, y_1) \quad (5)$$

宽光波被场镜组分割为细光波后会聚并入射到投影镜组中进行积分成像,传输距离为  $f_0$ ,则光波在投影镜组后的复振幅分布  $E_2(x_2, y_2)$  为

$$E_2(x_2, y_2) = \frac{\exp(ikf_0)}{i\lambda f_0} \int_{-\frac{D_0}{2}}^{\frac{D_0}{2}} \int_{-\frac{D_0}{2}}^{\frac{D_0}{2}} E_1(x_1, y_1) \cdot \exp\left\{\frac{ik}{2f_0}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 \cdot t_1(x_2, y_2) \quad (6)$$

式中: $k$  为波数; $(x_1, y_1)$  为起始坐标; $(x_2, y_2)$  为终

点坐标。光波再入射到聚焦透镜中进行成像,传输距离为  $L_1$ ,则经过聚焦透镜成像后光波复振幅分布  $E_3(x_3, y_3)$  为

$$E_3(x_3, y_3) = \frac{\exp(ikL_1)}{i\lambda L_1} \int_{-\frac{D_0}{2}}^{\frac{D_0}{2}} \int_{-\frac{D_0}{2}}^{\frac{D_0}{2}} E_2(x_2, y_2) \cdot \exp\left\{\frac{ik}{2L_1}[(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2]\right\} dx_2 dy_2 \cdot \exp\left[-\frac{ik}{2f_F}(x_3^2 + y_3^2)\right] \cdot P(x_3, y_3) \quad (7)$$

式中: $P(x_3, y_3)$  为光瞳函数。最后在工作面上形成复振幅图像,传输距离为  $L_2$ ,光波复振幅分布  $E_4(x_4, y_4)$  为

$$E_4(x_4, y_4) = \frac{\exp(ikL_2)}{i\lambda L_2} \int_{-\frac{S_0}{2}}^{\frac{S_0}{2}} \int_{-\frac{S_0}{2}}^{\frac{S_0}{2}} E_3(x_3, y_3) \cdot \exp\left\{\frac{ik}{2L_2}[(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2]\right\} dx_3 dy_3 \quad (8)$$

将(5)~(8)式联立化简可得

$$E_4(x_4, y_4) = -i \exp(ikf_0) \sum_m^{M-2} \sum_n^{N-2} \delta\left(x_4 - m \frac{\lambda f_F}{D_0}, y_4 - n \frac{\lambda f_F}{D_0}\right) \cdot \left\{ \left[ \text{sinc}\left(\frac{D_0 x_4}{\lambda f_F}, \frac{D_0 y_4}{\lambda f_F}\right) \right] \otimes \left[ \text{rect}\left(\frac{f_0 x_4}{D_0 f_F}\right) \text{rect}\left(\frac{f_0 y_4}{D_0 f_F}\right) \right] \right\} \quad (9)$$

则  $S_0$  上的光强分布数学函数为

$$I_0(x_4, y_4) = E_4(x_4, y_4) \cdot E_4^*(x_4, y_4) = |E_4(x_4, y_4)|^2 \quad (10)$$

式中: $*$  为共轭符号。同理,建立另外两圈子眼透镜的数学模型,并推导出工作上的光强分布数学函数,分析可得工作上的光波复振幅分布函数是梳状函数与两个卷积函数的乘积,焦距与相位因子、卷积项成比例关系,这可以控制工作面上复振幅图像的大小和光强的分布。同等辐照下,复振幅图像越大,则同等位置的光强越小。由中心到边缘的光强逐渐递减,即增大  $S_0$  和  $S_1$ ,使中心能量向周围扩散,舍弃  $S_0$  和  $S_1$  的边缘区域,利用  $S_0$  和  $S_1$  的中心区域来补偿  $S_2$  的边缘区域。

假设  $S_0$ 、 $S_1$  和  $S_2$  的中心辐照度均值分别为  $E_0$ 、 $E_1$  和  $E_2$ ,边缘辐照度的均值分别为  $E'_0$ 、 $E'_1$  和  $E'_2$ 。当舍弃  $S_0$  和  $S_1$  的边缘辐照度后进行叠加时,则中心辐照度  $E = E_0 + E_1 + E_2$ ,边缘辐照度  $E' = E'_0 + E'_1 + E'_2$ 。实际情况下,大部分大角度光束入射到最外圈

子眼透镜经过成像后落入投影镜边缘,所以  $E_2 \approx E'_2, E \approx E'$ ,即提高了  $S_2$  边缘区域的辐照能量。

由图 1 可知,  $S_0, S_1$  和  $S_2$  的边缘区域分别为  $\Delta S_0, \Delta S_1$  和  $\Delta S_2$  边缘尺寸的矩形环带。为了尽量减少能量损耗,使  $\Delta S_1 = \Delta S_2$ 。又因辐照分布为高斯状,所以光能主要集中在  $S_0$ ,而中心子眼透镜的数量为 1,无法充分对光能微分,则  $E_0$  远大于  $E'_0$ ,为了舍弃  $E'_0$ ,令  $\Delta S_0 = 2\Delta S_2$ 。

已知光学系统中氙灯的额定功率为 5000 W,光源在椭球反射镜第二焦面处的光斑直径为 47.26 mm。将每圈子眼透镜划分矩形环,中心子眼透镜的辐照能量为 1579.5 W,第二圈子眼透镜的辐照能量为 1060.5 W,最外圈子眼透镜的辐照能量为 610 W,由此可知各圈子眼透镜的起始光波复振幅分布。已知  $S_2 = 200$  mm,  $\Delta S_2 = 3.55$  mm,则  $S_1 = 207.1$  mm,  $S_0 = 214.2$  mm,将(5)~(10)式由 Matlab 软件编程,代入以上数据进行计算,得到的焦距如表 4 所示。

表 4 积分器中各圈子眼透镜的焦距

Table 4 Focal length of each circllet lens in integrator unit: mm

Sub-eye lens	Central sub-eye lens	Second sub-eye lens	Outermost sub-eye lens
Focal length	26.4	27.4	28.4

### 3.3 积分器场镜组子眼透镜的优化

工作面的均匀性是积分器的一个重要指标,利用 Zemax 软件对积分器光学系统中的成像杂散光进行分析与抑制,防止像质模糊和因视场过大造成

像叠加位置发生偏移<sup>[15]</sup>。积分器投影镜组置于场镜组焦面进行理想成像,但本该会聚的球面波因受到球差的影响在过高斯像面上产生离焦像,则其所引起的像面能量弥散远大于衍射效应所引起的弥散,从而导致小角度光束成像质量差、像质模糊以及大角度光束落入其他通道而产生旁瓣效应,所以需要到场镜组各圈子眼透镜的球差进行校正。由于各圈子眼透镜的焦距不同,利用 Zemax 软件的表面自动优化功能对其进行单独优化。

以中心子眼透镜为例,在 Zemax 软件中输入初始参数,波长设为 550 nm,设置视场角为  $0^\circ, 3.5^\circ$  和  $7.0^\circ$ ,材料选为 JGS3 耐高温红外光学石英玻璃,输入的透镜结构参数如表 5 所示。

表 5 中心子眼透镜的结构参数

Table 5 Structure parameters of central sub-eye lens

Lens	Radius /mm	Interval /mm	Material	Aperture /mm
Before optimization	$\infty$	5.0	JGS3	7.1
After optimization	-12.10	26.4	-	7.1

对透镜后表面采取非球面进行设计优化,将其设置为偶次非球面。为了减少加工工艺的复杂性,只对非球面的二次圆锥系数进行优化,优化前后的光路图和点列图如图 7 和图 8 所示,其中 OBJ 为视场角,IMA 为近轴像高,RMS 为均方根。由图 7(b)和图 8(b)可知,利用非球面代替球面能够校正球差,提高了小角度光束的成像质量,使大角度光束落入透镜边缘,从而提高边缘辐照能量。表 6 为场镜组各圈子眼透镜的优化结果。

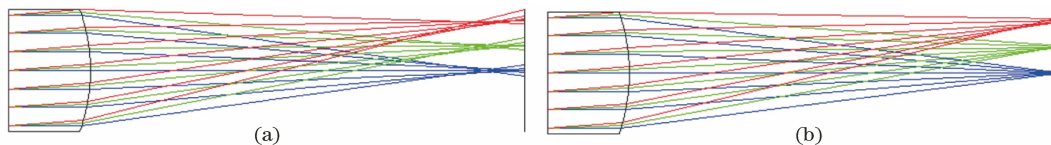


图 7 优化前后的光路图。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 7 Optical path diagram before and after optimization. (a) Before optimization; (b) after optimization

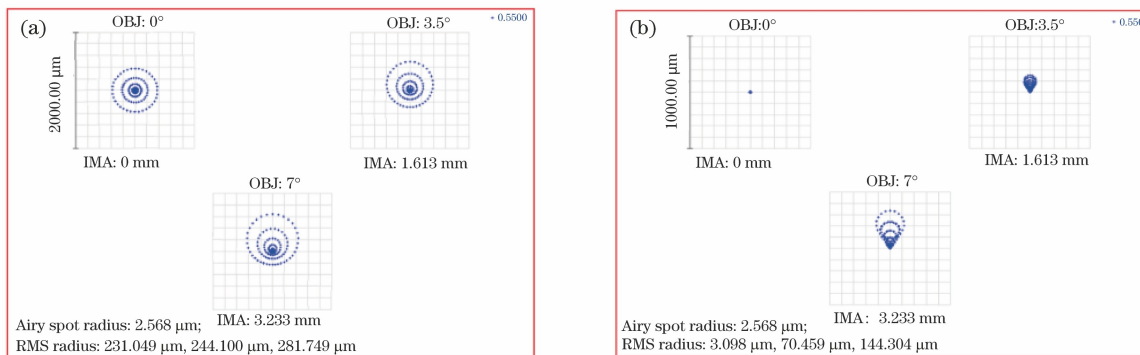


图 8 优化前后的点列图。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 8 Point plot before and after optimization. (a) Before optimization; (b) after optimization

表 6 场镜组中各圈子眼透镜的优化结果

Table 6 Optimization results of each circler lens in field lens group

Lens type	Number of lenses	Aperture /mm	Radius /mm	Thickness /mm	Quadratic conic coefficient
Central sub-eye lens	1	7.1	12.10	5	-2.231
Second sub-eye lens	8	7.1	12.56	4	-2.335
Outermost sub-eye lens	16	7.1	13.02	3	-2.430

#### 4 变曲率与等曲率光学积分器的性能对比分析

利用 lighttools 软件对太阳模拟器光学系统进行建模,光源选用短弧氙灯。以蝴蝶配光曲线为基础并采用嵌套建模思想<sup>[16-17]</sup>,将光源放置在椭球反射镜的第一焦点处,光束被会聚到第二焦点处形成高斯状的辐照分布,准直透镜选用双分离透镜。对等曲率和变曲率光学积分器进行建模,结构如图 9 和图 10 所示。将对等曲率和变曲率光学积分器置于同一太阳模拟器光学系统进行仿真,在工作面上设置接收器,设置追迹光线数目为  $1 \times 10^7$  条。图 11 为太阳模拟器光学系统仿真示意图。



图 11 太阳模拟器的仿真图

Fig. 11 Simulation diagram of solar simulator

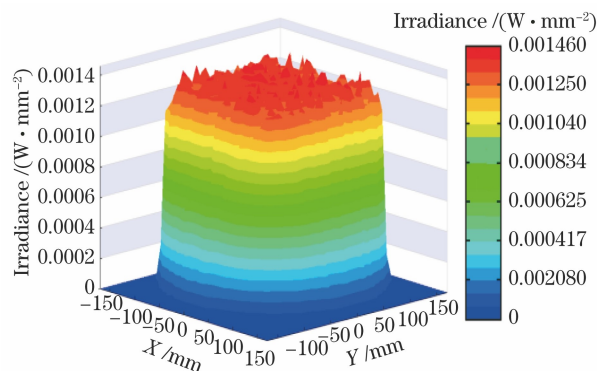


图 12 等曲率光学积分器的辐照分布图

Fig. 12 Irradiation distribution of optical integrator with equal curvature

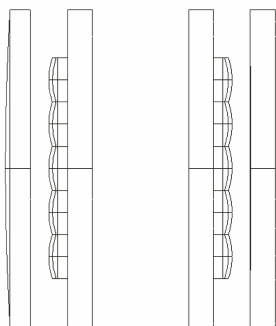


图 9 等曲率光学积分器结构图

Fig. 9 Structure diagram of equal curvature optical integrator

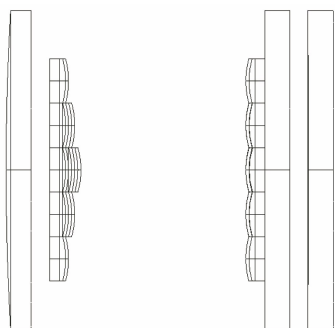


图 10 变曲率光学积分器结构图

Fig. 10 Structure diagram of variable curvature optical integrator

由图 12 可知,采用等曲率光学积分器后,辐照面中心呈锯齿状,辐照面整体颜色从中心到边缘由深至浅,辐照度由高到低。由图 13 可知,采用变曲率光学积分器后,辐照面呈多圈阴影,这是由于各圈子眼透镜的焦距不同而形成多圈阴影,通过阶梯式的叠加可以提高边缘辐照能量。在光斑面内选取 9 个采样点来测量辐照度值,依次对  $\Phi 50$  mm、 $\Phi 100$  mm、 $\Phi 150$  mm 和  $\Phi 200$  mm 进行测量,将测得数据代入 (11) 式和 (12) 式进行计算,结果如表 7 和图 14 所示。

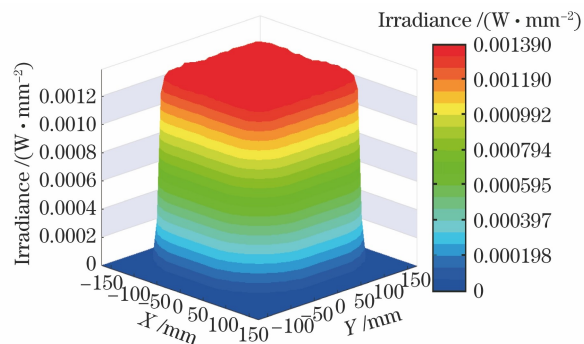


图 13 变曲率光学积分器的辐照分布图

Fig. 13 Radiation distribution diagram of variable curvature optical integrator

图 12 和图 13 分别为等曲率和变曲率光学积分器的仿真辐照面辐照分布图。

表 7 等曲率和变曲率光学积分器的辐照不均匀度对比

Table 7 Comparison of irradiance non-uniformity between equal curvature and variable curvature optical integrators

Diameter / mm	Equal curvature optical integrator			Variable curvature optical integrator			Uniformity improvement rate $\eta$ / %
	$E_{\max} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_{\min} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$\epsilon_1$ / %	$E_{\max} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_{\min} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$\epsilon_2$ / %	
$\Phi 50$	1469	1452	$\pm 0.58$	1390	1382	$\pm 0.28$	51.7
$\Phi 100$	1469	1440	$\pm 0.99$	1390	1377	$\pm 0.47$	52.5
$\Phi 150$	1469	1423	$\pm 1.59$	1390	1370	$\pm 0.72$	54.7
$\Phi 200$	1469	1404	$\pm 2.26$	1390	1363	$\pm 0.98$	56.6

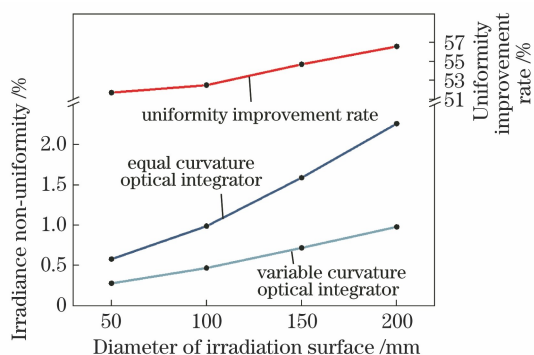


图 14 等曲率和变曲率光学积分器的对比分析曲线图

Fig. 14 Comparative analysis curves of equal curvature and variable curvature optical integrators

辐照不均匀度值计算公式为

$$\epsilon_n = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, n = 1, 2, \quad (11)$$

式中:  $E_{\max}$  为辐照度最大值;  $E_{\min}$  为辐照度最小值;  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  分别为等曲率和变曲率光学积分器的辐照不均匀度值。设  $\eta$  为均匀性提升率, 其可表示为

$$\eta = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1} \times 100\%. \quad (12)$$

对比表 7 数据可知, 变曲率光学积分器略微减小了光能利用率, 但能保证一个太阳常数的输出, 能够明显提高边缘能量, 降低辐照面整体的不均匀度, 辐照面  $\Phi 100$  mm 内的辐照不均匀度优于  $\pm 0.5\%$ ,  $\Phi 200$  mm 内优于  $\pm 1\%$ <sup>[18]</sup>, 均匀性最高可提升 56%。

分析图 14 可知: 随着辐照面尺寸  $\Phi 50$  mm 增大至  $\Phi 200$  mm, 等曲率光学积分器的辐照不均匀度越来越大, 曲线总体变化趋势明显上升, 局部上升的幅度逐渐增大; 当辐照面尺寸到达  $\Phi 200$  mm 时, 不均匀度的极大值已经超过  $\pm 2\%$ , 这是由于该积分器无法补偿辐照面边缘, 故边缘的辐照度明显低于中心的辐照度; 变曲率光学积分器的辐照不均匀度曲线总体上升趋势小, 局部上升的幅度由平滑缓慢增大, 极大值小于  $\pm 1\%$ , 这是因变曲率光学积分器等距划分和阶梯叠加辐照分布可以调控工作面上的光

强分布以及补偿边缘的辐照能量。综上所述, 该仿真结果证明了变曲率光学积分器能提高工作面边缘的辐照能量, 验证了所提设计方法的准确且有效。

## 5 结 论

基于衍射理论设计了一种能够提高工作面边缘辐照能量的变曲率光学积分器, 并构建了变曲率光学积分器的数学模型, 该模型将一个光能传递问题转化为一个数学公式, 可以反映光波在系统中的传输特性。Zemax 软件优化结果表明, 非球面设计能够提高像质、消除旁瓣效应。Lighttools 软件仿真结果表明: 采用变曲率光学积分器后, 辐照面上有多圈阴影光斑图样且三维图像顶端平滑, 证实高斯状光束被等距划分和阶梯叠加, 光强分布不受衍射效应的调制; 变曲率光学积分器的均匀性较等曲率光学积分器最高提升 56%,  $\Phi 100$  mm 辐照面内的辐照不均匀度优于  $\pm 0.5\%$ ,  $\Phi 200$  mm 辐照面内优于  $\pm 1\%$ , 这表明变曲率光学积分器能够有效提高光斑边缘的辐照能量。所提的设计方法可将透镜成像转化为衍射成像, 能够深入分析光波的传输特性, 为今后光学积分器件的研究提供了新的思想观念和 design 基础, 对提高太阳模拟器的性能具有一定的借鉴意义, 进一步验证变曲率光学积分器在实验中的应用效果、构建三维甚至是多维平面的光学积分器数学模型、利用优化算法调制光强分布是下一步研究工作的重点。

## 参 考 文 献

- [1] Meng Q L, Li Y P, Gu Y X. Dynamic mesh-based analysis of dynamic irradiance characteristics of solar simulator[J]. Optik, 2015, 126(23): 4658-4664.
  - [2] Su S, Wang Y W, Zhang G Y, et al. Design of LED array light source and collimating optical system for mobile solar simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0808001.
- 苏拾, 王逸文, 张国玉, 等. 运动式太阳模拟器 LED



- 阵列光源及其准直光学系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0808001.
- [3] Wang G C, Lin X, Gu C, et al. New type of uniform light device for solar simulator [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2436001.  
王广才, 林兴, 顾晨, 等. 用于太阳模拟器的新型匀光器[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2436001.
- [4] Liu S, Zhang G Y, Sun G F, et al. Design of an optical integrator for solar simulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(4): 467-470.  
刘石, 张国玉, 孙高飞, 等. 太阳模拟器用光学积分器设计[J]. 光子学报, 2013, 42(4): 467-470.
- [5] Li G Y, Zhang G Y, Fu M, et al. Design and analysis of square integrator in solar simulator [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 48-52.  
李光云, 张国玉, 付明, 等. 太阳模拟器中正方形光学积分器的设计与分析[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 48-52.
- [6] Fu D H. Application and research of rectangle optical integrators in solar simulator[J]. OME Information, 2011, 28(12): 70-72.  
付东辉. 太阳模拟器中长方形光学积分器的应用与研究[J]. 光机电信息, 2011, 28(12): 70-72.
- [7] Udekok A J, Yun Z S, Chen J L. Compact optical integrator: CN102754012A[P]. 2012-10-24.  
Udekok A J, 负智省, 陈金良. 紧凑光学积分器: CN102754012A[P]. 2012-10-24.
- [8] Li Z Q, Su S, Wang G M, et al. Research on a new cluster-type optical integrator for solar simulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 122301.  
李志强, 苏拾, 王国名, 等. 太阳模拟器用新型集束式光学积分器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 122301.
- [9] Katsuki T, Satoji F. Lighting device, projection display device and optical integrator: CN101625104B [P]. 2010-01-13.  
Katsuki T, Satoji F, 藤牧治. 照明装置、投射型显示装置及光学积分器: CN101625104B [P]. 2010-01-13.
- [10] An G F, Zhang G Y, Su S, et al. Analysis on improving the irradiation uniformity of the sun simulator by optical integrator[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 33(1): 1-3.  
安桂芳, 张国玉, 苏拾, 等. 利用光学积分器提高太阳模拟器辐照均匀性的分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(1): 1-3.
- [11] Lü N G. Fourier optics[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2016.  
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [12] Jin L J. Design of progressive die for cylindrical step part[J]. Die & Mould Industry, 2010, 36(2): 14-17.  
金龙建. 阶梯圆筒形件级进模设计[J]. 模具工业, 2010, 36(2): 14-17.
- [13] 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.  
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.
- [14] Du Z Q. The research of solar simulator theory and application [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.  
杜志强. 太阳模拟器理论及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [15] Zhang R, Zhang G Y, Yang J J, et al. Great irradiation area of divergence of sun simulator optical axis adjustment method [J]. Journal of instruments and meters, 2018, 33(6): 18-25.  
张燃, 张国玉, 杨俊杰, 等. 大辐照面积发散太阳模拟器光轴调整方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 18-25.
- [16] Chong W, Lü W H, Zhang J, et al. Study on calibration system of sunshine duration recorder based on bi-xenon lamp source integrating sphere[J]. Acta Optica Sinica. [2021-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.o4.20210716.1612.006.html>.  
崇伟, 吕文华, 张健, 等. 双氙灯光源积分球日照计校准系统研究[J]. 光学学报. [2021-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.o4.20210716.1612.006.html>.
- [17] 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.  
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.
- [18] State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: General specification for solar simulator: GB/T 12637—1990 [S]. Beijing: China Standards Press, 1991.  
国家技术监督局. 太阳模拟器通用规范: GB/T 12637—1990[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.