

# 提高太阳模拟器辐照均匀性的光学系统优化设计

王国名<sup>1</sup> 张国玉<sup>1,2</sup> 刘石<sup>1,2</sup> 王鹏伟<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>吉林光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对提高太阳模拟器辐照均匀性的要求,提出对聚光镜及积分器进行优化设计的方法,在保证较高能量利用率的基础上,实现大幅提高辐照均匀性的目的。通过光学软件 LightTools 对设计结果进行仿真验证,并与原始设计的太阳模拟器的光学系统均匀性进行比较,证明了所采取优化方法的正确性与可行性。

**关键词** 光学设计;太阳模拟器;非共轴椭球镜;光学积分器;优化仿真

中图分类号 O435 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.012204

## Optical System Optimization of Improving Solar Simulator Irradiation Uniformity

Wang Guoming<sup>1</sup> Zhang Guoyu<sup>1,2</sup> Liu Shi<sup>1,2</sup> Wang Pengwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Photoelectric Engineering Changchun University of Science and Technology,  
Chang ch un, Jilin 130022, China*

<sup>2</sup>*Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement and Control Instruments,  
Chang ch un, Jilin 130022, China*

**Abstract** To meet the requirement on solar simulator irradiance uniformity, we put forward a design method to optimize the integrator and condenser. A great improvement in irradiation uniformity is achieved while maintaining a high energy efficiency. Simulation is performed by optical software LightTools to test and verify the correctness. By comparing characteristics of homogeneity with the original optical system design of the solar simulator, the correctness and feasibility of the optimization method adopted are proved.

**Key words** optical design; solar simulator; non-coaxial ellipsoidal mirror; optical integrator; optimization and simulation

**OCIS codes** 220.4830; 220.2740

## 1 引言

太阳模拟器广泛应用于航天、气象、光伏等领域,是一种重要的环境模拟、仪器标定设备。随着太阳模拟器对辐照均匀性要求的提高,太阳模拟器光学系统优化设计的重要性日益凸显。传统设计中,聚光系统通常采用椭球反射镜,椭球镜经过第一焦点的光线会聚于第二焦点处,因为光源体积的原因,在第二焦点处往往是一个有一定尺寸的光斑,但是光斑能量很高,且辐照度呈类高斯分布,中心与边缘的辐照度梯度很大,这样就给积分器的匀光带来了一定难度,所以需要设计新型聚光镜,降低会聚面上的能量梯度。同时,积分器的设计是否合理对辐照均匀性影响很大,正确的积分器设计与优化方法能对积分器的匀光效果起很大作用。本文通过对太阳模拟器关键部分进行创新设计与优化,使太阳模拟器光学系统在能量利用率较高的基础上实现均匀性的大幅提高。

收稿日期: 2013-08-20; 收到修改稿日期: 2013-09-28; 网络出版日期: 2013-12-26

基金项目: 吉林省科技发展计划(KYC-JC-XM-2011-077)

作者简介: 王国名(1986—),男,硕士研究生,主要从事航天器地面标定与检测等方面的研究。E-mail: wgm0919@163.com

导师简介: 张国玉(1962—),男,博士,教授,主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的研究。

E-mail: zh\_guoyu@yahoo.com.cn

## 2 聚光镜的设计

对于聚光系统的优化设计,目的是将第二焦面处中心的能量分散,让整个第二焦面处能量梯度变小。这样有益于增强积分器的叠加补偿作用。所采用的方法是改变聚光镜的母线方程,改变原始的二次非球面形状,使原来类高斯的辐照分布的中心能量梯度趋缓,以达到提高均匀性的目的。

### 2.1 椭球聚光镜原理

椭球反光镜的原理<sup>[1]</sup>如图1所示,位于第一焦点处的物经椭球镜反射后,成像在第二焦点。设如图所示的椭圆方程为

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

式中 $a$ 为椭圆的长轴, $b$ 为椭圆的短轴, $a$ 与 $ox$ 轴重合。第一焦点 $F_1$ 和第二焦点 $F_2$ 。到原点的距离 $f_1, f_2$ 分别称为第一焦距和第二焦距。

由图1可知,

$$a = (f_1 + f_2)/2, \quad (2)$$

$$b = \sqrt{f_1 f_2}. \quad (3)$$

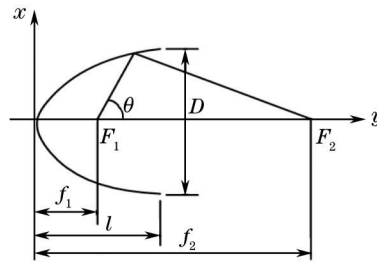


图1 椭球镜光路原理

Fig.1 Principle of ellipsoidal mirror

### 2.2 聚光镜优化方法一:非共轴椭球镜

非共轴椭球镜的是在椭球反射镜的基础上衍生出来的,是椭圆以第一焦点为中心,沿长轴旋转角度 $\theta$ ,即整个光轴旋转 $\theta$ ,则第二焦点变成回转弥散斑,使辐照面中心能量发生分散<sup>[2-3]</sup>,如图2所示。由图可知,在角度很小的情况下,

$$F_1 F'_2 = F_1 F_2 \tan \theta. \quad (4)$$

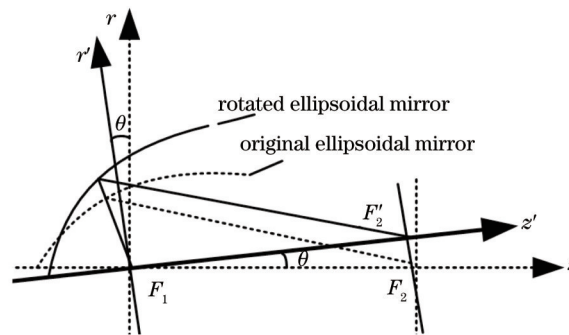


图2 非共轴椭球镜原理

Fig.2 Principle of non-coaxial ellipsoidal mirror

设坐标中心位于椭圆第一焦点的方程为

$$\frac{(r-c)^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1, \quad (5)$$

绕 $z$ 轴旋转后的坐标为

$$r' = (r+c)\cos\theta - z\sin\theta, \quad (6)$$

$$z' = (r+c)\sin\theta + z\cos\theta, \quad (7)$$

则旋转后的椭圆方程为

$$\frac{[(r+c)\cos\theta - z\sin\theta - c]^2}{a^2} + \frac{[(r+c)\sin\theta + z\cos\theta]^2}{b^2} = 1, \quad (8)$$

式中  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

非共轴椭球镜的匀光原理主要体现在将椭球聚光镜的第二焦点发生弥散,使类高斯型辐照曲线中心变缓,辐照面积增大,这样就对积分器能量利用率和辐照面均匀性都产生影响,同时也影响了光学系统的准直角以及准直镜的口径,所以光学系统设计中光轴转角的确切很重要。如图3所示是经 LightTools 仿真得出的非共轴椭球镜辐照结果。

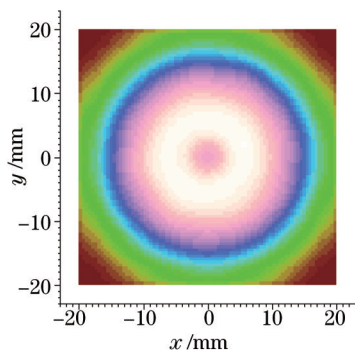


图3 非共轴椭球镜的仿真结果

Fig.3 Simulation result of non-coaxial condenser

### 2.3 聚光镜优化方法二: $xy$ 多项式曲面聚光镜

随着非球面加工工艺的提高,越来越高次的非球面镜面得到应用,其中  $xy$  多项式曲面是研究较为广泛研究的一种。 $xy$  多项式曲面是在标准圆锥曲面的基础上添加了一个10次多项式的附加项,附加多项式是由  $x^m y^n$  组成的,该曲面的表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \sum_{j=2}^{66} c_j x^m y^n, \quad (9)$$

式中  $k$  为圆锥系数,  $c$  为曲率,  $c_j$  为  $x^m y^n$  单项式的系数,其中  $j = [(m+n)^2 + m + 3n]/2 + 1$ 。

通过改变  $k, c$  以及  $c_j$  的值,可以改变原聚光镜在第二焦面处的辐照分布,达到如图4所示的要求,即原来聚焦于一点的光线在焦面处弥散,形成弥散斑。从表达式的结构上看,上面提到的非共轴椭球镜是一种二次的  $xy$  多项式曲面聚光镜。随着光学加工与制造技术的提高,更高次项的多项式曲面也会得到应用。利用光学软件的优化功能可以方便地优化出满足要求的高次项聚光镜。

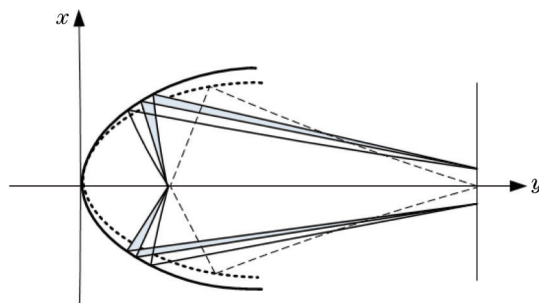


图4  $xy$  曲面聚光镜优化原理图

Fig.4 Principle of  $xy$  surface condenser optimization

利用光学软件 LightTools 中基于光线的优化函数,可将传统椭球聚光镜优化成满足要求的  $xy$  曲面聚光镜。基于光线的优化函数是通过追迹特定数量的光线,不断使实际光线位置与目标位置相逼近,最终得到满足要求的最佳位置。

如图4所示,在  $xy$  平面内,有一束光线扇,通过设定目标位置  $y_{\text{target}}$ ,利用下式所示优化评价函数进行运算:

$$\sum [W_i (y_i - y_{\text{target}})]^2, \quad (10)$$

式中  $W_i$  为权重因子,  $y_i$  为实际坐标值,  $y_{\text{target}}$  为目标值。

利用 LightTools 软件中的基于光线的优化函数, 对椭球聚光镜进行优化, 得到所示的曲线方程

$$z = \frac{0.011687(x+y)^2}{\sqrt{1-0.00013659(x+y)^2}} + 0.000567x^2 + 0.000567y^2 + 1.5189 \times 10^{-8}x^4 + 1.5189 \times 10^{-8}y^4. \quad (11)$$

利用蒙特卡罗追迹的方法, 最终得到如图 5 所示的辐照结果。可以看出在辐照面处的光斑能量峰值已经弥散开来, 形成不规则弥散斑, 辐照梯度趋缓。

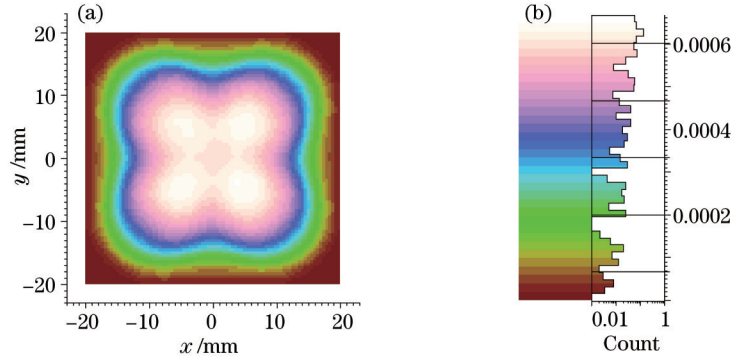


图 5 优化后的  $xy$  曲面聚光镜的会聚结果

Fig.5 Optimization result of the  $xy$  curved surface condenser lens

### 3 积分器的优化设计

为了更大程度地提高像面辐照均匀性, 需要应用光学积分器。光学积分器也称科勒 (Köhler) 积分器, 它是在 Köhler 照明原理的基础上, 利用透镜阵列对光源像进行先分割再叠加的方式达到辐照面均匀性的光学器件<sup>[4]</sup>。如图 6 所示, 积分器通常由两片附加镜 (BL、AL) 和两组复眼透镜阵列 (LA1、LA2) 组成。下面来讨论积分器的设计原则与方法。

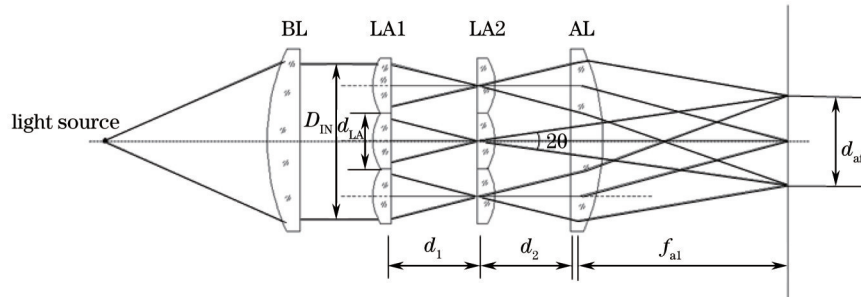


图 6 积分器成像原理图

Fig.6 Imaging principle of integrator

#### 3.1 积分器的设计方法

积分器的具体设计先从理想的模型开始。假设一个理想点光源位于无穷远处, 经过前附加下镜准直后以平行光束入射积分器场镜组, 会聚透镜焦面处的叠加像口径为  $d_{\text{af}}$ , 则叠加像面的尺寸由下式给出<sup>[5-7]</sup>:

$$d_{\text{af}} = d_{\text{LA1}} \frac{f_{\text{AL}}(f_{\text{LA1}} + f_{\text{LA2}} - d_1)}{f_{\text{LA1}}f_{\text{LA2}}}. \quad (12)$$

为了满足上述的成像要求, 两透镜阵列的间距要等于第二透镜阵列的焦距。这样第一透镜阵列的各个元素透镜像就会叠加在后附加镜的焦面上。当  $d_1 = f_{\text{LA1}} = f_{\text{LA2}}$  时, (12) 式简化为

$$d_{\text{af}} = d_{\text{LA1}} \frac{f_{\text{AL}}}{f_{\text{LA2}}}. \quad (13)$$

从 (13) 式可以看出, 在总的通光口径一致的情况下, 减小单个小透镜的孔径, 即增加元素透镜的数量,

可以减小叠加区域的面积。

积分器的出射发散角由下式给出：

$$\tan \theta = \frac{1}{2} \left( \frac{D_{IN} - 2d_{LA1} + d_{af}}{f_{AL}} + \frac{f_{LA2} \cdot d_{LA1}}{f_{LA2} \cdot f_{AL}} \right) (d_1 = f_{LA1}, d_2 = 0). \quad (14)$$

在太阳模拟器的光学系统中,积分器作为其中一部分,要与整体光路的相对孔径一致,即体现的是光学扩展量守恒原理,这样才能保证光能的最大利用。设太阳模拟器的相对孔径为 $F_N$ ,则积分器的透镜阵列的相对孔径 $F_{LA1}$ 也应等于此值,即

$$F_N = F_{LA1} = \frac{d_{LA1}}{f_{LA1}}. \quad (15)$$

通常,光学积分器的两个透镜阵列的元素透镜孔径与焦距是相同的( $f_{LA1} = f_{LA2} = f_{AL}$ ),对于扩展光源,光源的像将会经过第一透镜阵列成多个像于第二透镜阵列表面,此时要保证对应通道所成的光源像尺寸小于第二阵列元素透镜尺寸。当光源像溢出第二透镜阵列元素透镜孔径时,会在两个元素透镜交界处产生杂散光,产生光能的损失,并且在叠加像面将会产生多余的叠加像,这样叠加均匀性受到影响。因此这是光学积分器设计的一个重要原则。若扩展光源的直径为 $D_{source}$ ,前附加镜的焦距为 $f_{BL}$ ,则光源像在第二透镜阵列表面的尺寸 $D_{image}$ 为

$$D_{image} = D_{source} \frac{f_{LA1}}{f_{BL}} \leq d_{LA2}, \quad \text{if } d_1 = f_{LA1} = f_{LA2}. \quad (16)$$

由(16)式知,扩展光源的像要小于第二透镜阵列元素透镜孔径,在太阳模拟器光学系统中,描述的是聚光系统的出瞳尺寸,不是光源尺寸,即聚光系统出瞳像要小于元素透镜尺寸。透镜阵列的元素透镜个数 $N$ 由光束孔径及元素透镜的孔径决定:

$$N = \frac{D_{IN}}{d_{LA1}}. \quad (17)$$

### 3.2 积分器的优化设计

上述的设计方法是针对理想积分器的成像,但在太阳模拟器的光路中,主要成像的不是光源,而是聚光镜的出瞳,入射光线不是理想平行光线,而是会聚光线,这些都决定了积分器的原始设计需要一定的优化。对于积分器的优化不仅要进行结构上的优化,还要进行光学系统优化<sup>[8]</sup>。

在太阳模拟器的光学系统中为了提高光能的利用率,强调的是光学不变量的衔接。由(16)式知,聚光镜出瞳处的会聚角度一定要小于元素透镜入射孔径角,若聚光镜会聚角较大,则会造成第二透镜阵列在理论位置时出现光线溢出<sup>[9]</sup>,而光线的溢出不仅会造成能量的大量损失,也会造成大量杂散光,在叠加像面也会产生残缺像,影响像面辐照均匀性,这就是经验证明第二透镜阵列适当离焦会增强像面均匀性的原理。所以要对透镜阵列的间距 $d_1$ 和元素透镜的焦距进行优化。(14)式是在 $d_2=0$ 时的结果,通常发散角随着 $d_2$ 的增大而增大。发散角过大则能量会损失,过小则会使辐照面尺寸变小,所以 $d_2$ 的选取也十分重要。

除中心元素透镜外,其他子孔径通过的光线都是轴外光线,这样如果入射光线为会聚光线,则像差就会影响叠加像面的辐照均匀性。像差的影响主要分两类<sup>[9]</sup>:一类是轴上点像差,影响各通道叠加像的像面的位置与理论像面产生误差;另一类就是轴外点像差,使各通道所成的像产生变形,则叠加像面也会产生叠加像面的形状误差。这两种误差都会影响叠加像面均匀性。所以需要将第二透镜阵列子透镜与后附加镜联合进行像差校正,并对后附加镜采用非球面设计。

以上是积分器需要优化的参数,具体的优化要借助光学软件的优化功能。由于采用Zemax非序列功能优化会花费大量时间,所以本文采用Zemax的序列与非序列功能结合的方式对积分器的结构参数进行优化。Zemax序列优化分两步进行。首先单独将后附加镜添加非球面进行优化,如图7所示,消除球差过大对积分器叠加像面的影响。第二步采用多重组态方式,积分器场镜组元素透镜作为物方,将投影镜组对应透镜、后附加镜和准直镜作为整体光学系统优化,如图8所示。积分器采用 $5 \times 5$ 微透镜方阵列,只需采用3个组态就可以达到整体优化的目的。

从成像关系的角度采取的积分器序列优化,不仅避免了非序列光线追迹效率低、时间长的缺点,也为均匀性照明设计提供了一种新的方法,即虽然照明系统由于其成像关系复杂而无法完全应用序列成像原理,

但是某些过程可以使用序列成像的方法,这样会使非成像系统设计更具有针对性和规律性,得到良好的设计效果。对于优化完成的光学系统,再使用Zemax非序列功能建立积分器模型,通过光线追迹得到如图9所示的积分器叠加像面辐照图。从中可以看出,不仅叠加像边缘清晰,而且均匀性也明显提高。

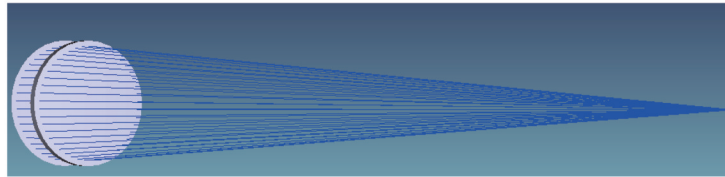


图7 后附加镜优化

Fig.7 Optimization of rear additional lens

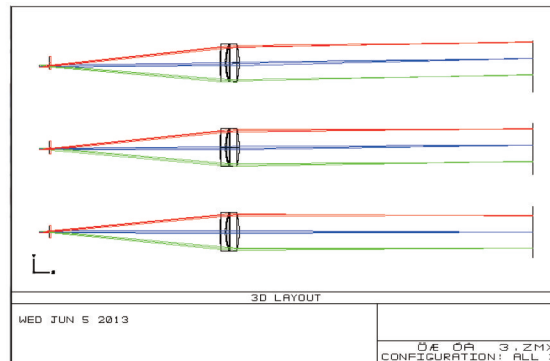
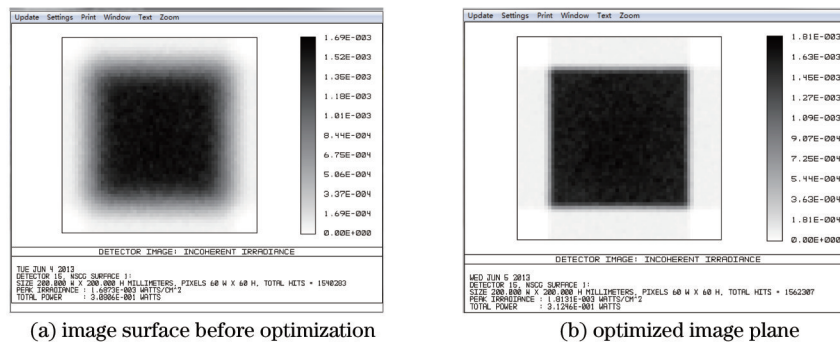


图8 积分器的多重组态优化

Fig.8 Multiple configurations optimization of integrator



(a) image surface before optimization

(b) optimized image plane

图9 积分器非序列仿真效果

Fig.9 Integrator non-sequential simulation

#### 4 太阳模拟器的整体仿真与分析

根据以上进行的优化设计方法,应用到具体的太阳模拟器设计进行分析。太阳模拟器的聚光镜直径为220 mm,积分器采用5×5方形元素透镜阵列,元素透镜半径为9.336 mm,准直镜口径为120 mm,利用Light-Tools进行仿真,如图10所示。利用蒙特卡罗追迹法进行光线追迹,得到如图11(a)所示的辐照图,可以看出辐照面并非明显的四边形形状,影响了要求辐照面上的辐照均匀性。根据上述的优化设计方法,分别对聚光镜和积分器进行优化仿真。图11(b)所示即为利用图5所示的 $xy$ 曲面聚光镜与优化后的积分器相结合的辐照面结果。可见辐照面变成严格的四边形辐照区域,并且辐照区域内中心区域与边缘辐照梯度变小,避免

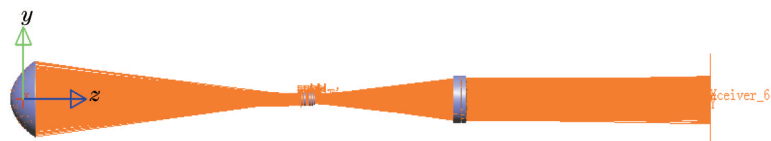


图10 太阳模拟器仿真

Fig.10 Simulation of solar simulator

了原设计中中心区域与边缘区域的辐照差值大的弊端,辐照均匀性得到很大提高。

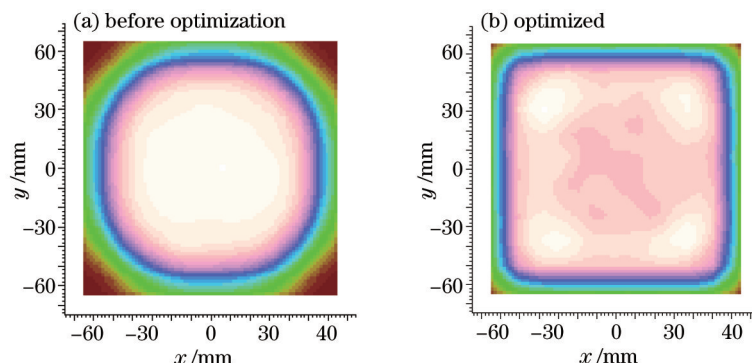


图 11 优化(a)前(b)后辐照面辐照图比较

Fig.11 Irradiance comparison (a) before and (b) after optimization

由最终的仿真结果知,在  $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  工作面口径内,原始设计的太阳模拟器辐照不均匀性为 2.87%,而经过优化设计的太阳模拟器辐照不均匀性为 0.96%,辐照均匀性得到大幅提高,证明所采取的优化方法可满足应用要求。

## 5 结 论

随着加工工艺的提高与光学优化设计软件的应用,太阳模拟器的光学系统优化设计已取得很大的提高。本文分别提出新的聚光镜及积分器的优化设计方法,并通过光学软件进行了仿真分析。对于聚光镜的优化设计,采用多项式非球面代替传统的二次椭球面,使第二辐照面处能量梯度变小;而积分器的优化设计则是利用以成像光学的像差理论为基础的序列优化与非序列仿真结合的方式代替单纯基于蒙特卡罗光线追迹的非序列优化,缩短了优化时间,并且使优化更具有针对性。从最终的太阳模拟器整体优化后的光学仿真结果可以看出,优化取得了良好的效果。

## 参 考 文 献

- 1 An Guifang, Zhang Guoyu, Su Shi, *et al.*. Optical design of solar simulator for weather sonde experiment[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2011, 32(9): 1408-1412.  
安桂芳,张国玉,苏拾,等. 气象探空仪试验用太阳模拟器光学系统设计[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(9): 1408-1412.
- 2 Wu Futian Feng Shuwen. Design of non-coaxial ellipsoidal mirror and its applications[J]. *J Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(2): 210-211.  
吴福田,冯书文.非共轴深椭球面反射镜的设计原理[J].*光电子·激光*, 2002, 13(2): 210-211.
- 3 Ren Lanxu, Wei Xiudong, Niu Wenda, *et al.*. A high flux solar simulator based on an array of non-coaxial ellipsoidal reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022002.  
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.
- 4 Liu Shi, Zhang Guoyu, Sun Gaofei, *et al.*. Design of an optical intergrator 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 Wenzhi Zhang, Qinxiao Liu, Huifang Gao, *etal.*. Fly-eyes illumination analysis[C]. *SPIE*, 2009, 7506: 75061W.
- 6 Reinhard Voelkel, Kenneth J Weible. Laser beam homogeniz ing:limitations and constraints[C]. *SPIE*, 2008, 7102: 71020J (12pp).
- 7 Martin Antoni, Wolfgang Singer, Jorg Schultz, *et al.*. Illumination optics design for EUV lithography [C]. *SPIE*, 2000, 4146: 25-34.
- 8 Jia Wenwu, Huang Feng, Wang Yuefeng, *et al.*. An optimization method for fly's eye integrator[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(8): 1308-1311.
- 9 Jia Wenwu, Wang Yuefeng, Huang Feng, *et al.*. Application of fly's eye lens in beam shaping laser diode array[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0202008.  
贾文武,汪岳峰,黄峰,等.复眼透镜在激光二极管阵列光束整形中的应用[J].*中国激光*, 2011, 38(2): 0202008.