

# 非共轴椭球面聚光阵列式高焦比太阳模拟器

任兰旭<sup>1,2</sup> 魏秀东<sup>1\*</sup> 牛文达<sup>1</sup> 王鹤<sup>1</sup> 许文斌<sup>1</sup> 肖君<sup>1,2</sup> 卢振武<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 为使太阳模拟器的接收靶得到高能流高均匀度光斑,需要对聚光系统进行优化设计。提出利用非共轴椭球面聚光镜优化光斑质量的方法,使光斑的能流分布均匀度有明显改善。利用蒙特-卡罗光线追迹方法,设计了聚集型高焦比太阳模拟器。在第二焦面处,80 mm 直径的接收靶面上可接收 10 kW 的辐射光能,光斑对称性和均匀性好,系统的传递效率为 23.81%,80 mm 直径靶面内的平均能流密度为 2 MW/m<sup>2</sup>,50 mm 直径靶面内平均能流密度达到 3.64 MW/m<sup>2</sup>,对应的理论色温超过 2800 K。采用非共轴椭球面聚光镜,成功研制了由电源控制系统、冷却系统、氙灯光源和聚光系统构成的太阳能模拟器。经实验测试,太阳模拟器的聚光光斑与光学仿真软件 TracePro 模拟光斑符合得很好。

**关键词** 光学设计;光斑质量;光线追迹方法;太阳模拟器

**中图分类号** O435 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1022002

## A High Flux Solar Simulator Based on an Array of Non-Coaxial Ellipsoidal Reflector

Ren Lanxu<sup>1,2</sup> Wei Xiudong<sup>1</sup> Niu Wenda<sup>1</sup> Wang He<sup>1</sup>

Xu Wenbin<sup>1</sup> Xiao Jun<sup>1,2</sup> Lu Zhenwu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** To get a high-flux and high-uniformity spot in the target of solar simulator, the design and optimization of reflector are needed. Using non-coaxial ellipsoidal reflector to improve the quality of spot, the flux uniformity of spot is improved obviously. By using Monte-Carlo ray tracing method, a high flux concentrating solar simulator is designed. The target of 80 mm diameter can receive 10 kW radiative power on the second focal plane. The symmetry and uniformity of radiative spot are good, and the transfer efficiency of system from source to target is 23.81%. The average flux is 2 MW/m<sup>2</sup> in the 80 mm diameter target and the flux can get 3.64 MW/m<sup>2</sup> in the 50 mm diameter target which corresponds to a theoretical stagnation temperature of 2800 K. Non-coaxial ellipsoidal reflector is used to manufacture a solar simulator making up of supply control system, cooling system, xenon lamps and a condenser system. The focusing spot of solar simulator obtained in experiment test accords with the model spot by optical design simulation software TracePro.

**Key words** optical design; spot quality; ray tracing method; solar simulator

**OCIS codes** 220.2740; 220.4840; 220.4610

**收稿日期**: 2012-03-30; **收到修改稿日期**: 2012-05-12

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB227101)和国家自然科学基金(11174275)资助课题。

**作者简介**: 任兰旭(1987—),男,硕士研究生,主要从事太阳能聚光方面的研究。E-mail: ren\_lanxu@126.com

**导师简介**: 卢振武(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事波动光学、太阳能应用、新型光学系统及其在空间的应用等方面的研究。E-mail: luzw@ciomp.an.cn

\* **通信联系人**。E-mail: wei\_xiudong@yahoo.com.cn

## 1 引言

太阳模拟器是室内模拟太阳光辐射特性的一种实验和定标设备<sup>[1]</sup>。太阳模拟器可分为非聚集型和聚集型,在太阳能发电领域起着重要作用<sup>[2]</sup>。非聚集型太阳模拟器因其输出光斑均匀度好,能流密度低,与太阳光相近,广泛应用于太阳能光伏领域<sup>[3]</sup>。聚集型太阳模拟器接收靶处光斑能流通常高达几百甚至数千  $\text{kW}/\text{m}^2$ ,主要用于模拟太阳能热发电系统焦面上的光斑能流分布<sup>[4,5]</sup>,例如碟式/斯特林、槽式和塔式,对高温材料的热化学性能研究具有重要意义。随着太阳能热发电技术的发展,基于聚光镜阵列的大功率、高能流的太阳模拟器相继研制成功。例如瑞士联邦理工大学研制了高能量的太阳模拟器<sup>[4]</sup>,它的输入电功率为 200 kW/h,经过椭球面聚光镜阵列,在第二焦面处可接收到 75 kW 的能量,在光斑的峰值处能流密度高达  $4250 \text{ kW}/\text{m}^2$ ,其对应理论色温为 2900 K。针对太阳模拟器成像光斑较大、能流密度低的问题,通常串联复合抛物物聚光器减小光斑大小并相应地提高能流密度<sup>[4]</sup>,而基于非共轴椭球面聚光镜设计的太阳模拟器也可改善输出光斑的辐射分布。

采用非共轴椭球面聚光镜取代标准椭球面聚光镜,可使太阳模拟器成像光斑的能流分布均匀度有明显改善。提出基于非共轴椭球面聚光镜阵列式的聚集型太阳模拟器的光学设计方法,利用蒙特-卡罗(MC)光线追迹方法分析聚光单元成像特性和传递效率,并对系统光学参数进行了设计优化,进而设计优化了 7 个聚光单元的空间排列。采用简易的测试系统,测试了太阳模拟器的光斑成像特性。

## 2 太阳能模拟器的总体结构与测试参数

研制的非共轴椭球面聚光阵列式高焦比太阳能模拟器如图 1 所示,由 7 个由非共轴椭球面聚光镜( $f_1 = 56 \text{ mm}$ ,  $f_2 = 800 \text{ mm}$ ,  $d_{\text{tru}} = 360 \text{ mm}$ ,  $\theta = 1.25^\circ$ )和高压短弧氙灯( $P_r = 6000 \text{ W}$ ,  $\eta_{\text{ref}} = 35\%$ )组成的聚光单元、用于聚光镜和氙灯散热的风冷系统以及功率可调的电源控制系统组成。7 个聚光单元组成了太阳模拟器的主框架,并按阵列式分布,其中外层聚光单元的光轴方向与中间聚光单元的光轴夹角  $\alpha$  为  $33^\circ$ 。太阳模拟器采用简易成像光斑测试系统,在 80 mm 直径的接收靶面上可接收 10 kW 的辐射光能,光斑的对称性和均匀性好,系统的传递效率为 23.81%,平均能流密度为  $2 \text{ MW}/\text{m}^2$ ,50 mm



图 1 高能流太阳模拟器

Fig. 1 High-flux solar simulator

直径靶面内平均能流密度达到  $3.64 \text{ MW}/\text{m}^2$ ,对应的理论色温超过 2800 K。

## 3 光学设计

椭球面聚光镜是太阳模拟器常用的聚光系统,它利用的是两焦点的成像关系,即所有从其中一个焦点发出的光线经过旋转椭球面聚光镜反射必成像在另一焦点上。使用的聚光镜为非共轴椭球面聚光镜<sup>[1,5]</sup>,具体是在子午面内,将椭圆的轴线以第一焦点为支点旋转一个角度  $\theta$ ,随轴线偏转后的椭圆线的一部分再绕原轴线旋转一周后形成。非共轴椭球面聚光镜的剖面图如图 2 所示,因椭球面聚光镜的对称性,可将表面划分为许多环带<sup>[1]</sup>,每一个环带的宽度由给定的  $\Delta u$  限定,聚光镜各环带的成像倍率  $\beta(u)$  是孔径角  $u$  的函数。由光学不变量得

$$J = ny \tan u = n'y' \tan u'. \quad (1)$$

系统放大倍率  $\beta(u)$  为

$$\beta(u) = y'/y = -\tan u / \tan u' = -\overline{pF_2} / \overline{pF_1}, \quad (2)$$

式中  $n$  与  $n'$  为折射率且  $n = -n' = 1$ ,  $u$  和  $u'$  分别是物方孔径角和像方孔径角,  $p$  为椭圆上的点,  $F_1$  与  $F_2$  分别为椭圆的两个焦点。

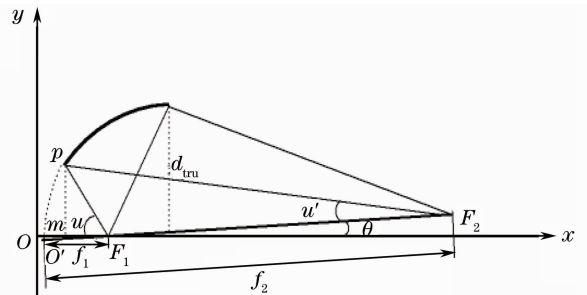


图 2 非共轴椭球面成像特性

Fig. 2 Non-coaxial ellipsoidal imaging characteristics

当物方孔径角  $u$  趋近于 0 时,  $p$  无限靠近于光轴  $F_1F_2$ , 系统近轴放大倍率为

$$\beta(u) = -f_2/f_1, \quad (3)$$

式中  $f_1$  为第一焦距,  $f_2$  为第二焦距。

如在第一焦点  $F_1$  处放置发光点, 经过非共轴椭球面聚光镜反射, 在第二焦面处形成一个亮环, 其中亮环半径为

$$r = \overline{F_1F_2} \tan \theta. \quad (4)$$

然而光线是从有一定尺寸大小的实际光源发出的, 其成像光斑由无数光环叠加而成。合理选择系统的放大倍率和旋转角  $\theta$ , 能有效地提高光斑的均匀度<sup>[5]</sup>。光源光弧的大小对聚光镜的聚光效率有重要影响, 其中聚光效率<sup>[1]</sup>为所有直接和间接到达接收靶面的辐射光能与氙灯发出的辐射光能的比率。聚光效率与聚光镜两焦点距离和光源大小有关<sup>[4]</sup>, 光源光弧尺寸和离心率越小, 聚光效率越大。

如图 1 所示,  $\overline{F_1F_2}$  为椭圆两焦点的距离,

$$\overline{F_1F_2} = 2\sqrt{a^2 - b^2}. \quad (5)$$

椭圆的离心率  $e$  为

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} = \frac{1}{1 + 2f_1/\overline{F_1F_2}}, \quad (6)$$

式中  $a$  为长半轴的大小,  $b$  为短半轴大小。

从(3)式和(5)式得系统最大放大倍率为

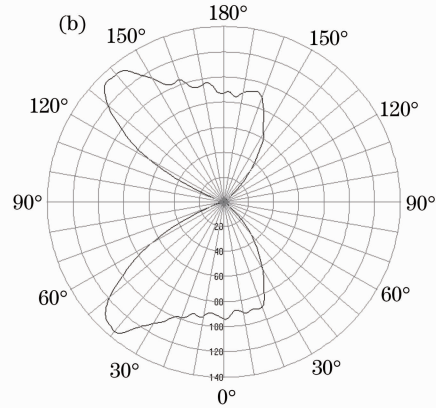
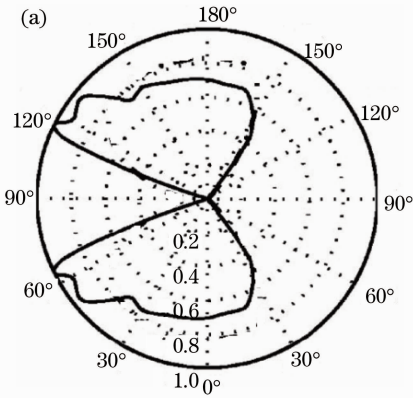


图 3 氙灯光源配光曲线。(a)实际配光曲线; (b)蒙特-卡罗法模拟的配光曲线

Fig. 3 Polar angular radiative flux distribution for xenon lamp. (a) Measured by manufacturer; (b) simulated by MC method

光源到接收靶的传递效率  $\eta$ <sup>[4]</sup> 是评价太阳模拟器利用率的重要指标。聚光单元的传递效率  $\eta$  定义为接收靶接收的辐射光能与氙灯的输入电功率之比:

$$\eta(i) = Q_{\text{tar}}/Q_{\text{sou}} = \eta_{\text{conv}}(i)\eta_{\text{conc}}(i) \times \eta_{\text{ref}}(i)\eta_{\text{cut}}(i), \quad (8)$$

式中  $\eta_{\text{conv}}(i)$  为氙灯的电光转换效率,  $\eta_{\text{conc}}(i)$  为聚光镜的聚光效率,  $\eta_{\text{ref}}(i)$  为聚光镜的镜面反射率,

$$\beta(u) = -\left(1 + \frac{\overline{F_1F_2}}{f_1}\right). \quad (7)$$

从(6)式可知, 离心率与两焦点的位置有直接关系且  $\overline{F_1F_2}$  越小, 离心率越小。从(7)式可知,  $\overline{F_1F_2}$  越小, 系统的放大倍率越小。综合聚光镜的聚光效率和放大倍率, 合理缩短两焦点之间的距离是十分重要的, 而两焦点距离受 7 个聚光镜单元空间安装尺寸和接收系统 50° 的极限接收角制约。考虑到聚光镜出口截断直径  $d_{\text{cut}}$  增大时, 其反射的光线增多, 接收靶接收的能量也增多, 而截断半径尺寸则受实际加工能力限制, 本文采用  $d_{\text{cut}} = 360$  mm。当  $d_{\text{cut}} = 360$  mm, 7 个相同的聚光单元紧密排列时,  $\overline{F_1F_2}$  最小值约为 650 mm, 考虑到实际安装尺寸和装调误差, 采用  $\overline{F_1F_2} = 744$  mm。

#### 4 蒙特-卡罗光线追迹

通过光学仿真软件 TracePro 对光弧直径为 8 mm、电功率为 6 kW/h 的高压短弧氙灯建立模型, 利用蒙特-卡罗光线追迹法<sup>[6-9]</sup> 模拟氙灯的配光曲线, 图 3 为氙灯实际的配光曲线<sup>[4]</sup> 与通过蒙特-卡罗法模拟的配光曲线。由 LED 配光曲线模拟评判标准“归一化相关性”<sup>[10]</sup> 可以判断, 模拟的配光曲线符合模拟要求。

从(8)式可以看出  $\eta_{\text{conv}}(i)$ 、 $\eta_{\text{conc}}(i)$ 、 $\eta_{\text{ref}}(i)$  和  $\eta_{\text{cut}}(i)$  的大小直接关系到聚光单元的传递效率。采用的氙灯电光转换效率为 35%, 聚光镜在全波段上的平均反射率即  $\eta_{\text{ref}}(i)$  为 90%。考虑到旋转角  $\theta$  对成像光斑均匀度影响较大, 根据瑞利判据<sup>[11]</sup>, 如图 4 所示, 光源经过聚光镜的放大倍率与旋转角  $\theta$  无关, 当旋转角  $\theta$  较大时, 在第二焦面处形成一个半径  $r$  较

大的亮环,以半径  $r$  为中心的无数子午面内的确定直径大小光斑在指向光轴方向重叠部分较少,光源经过聚光镜的成像光斑较大且中心部分能流密度较小;相反当旋转角  $\theta$  较小时,第二焦面处成像光斑较小但中心部分能流密度较大。合理选择旋转角  $\theta$  对光斑均匀度和光斑大小很重要,选用旋转角  $\theta$  为  $1.25^\circ$ 。综合考虑氙灯的安装尺寸、旋转角和聚光镜的聚光效率,采用的聚光镜第一焦距  $f_1$  为  $56\text{ mm}$ ,聚光镜后端开口直径  $d_{\text{back}}$  为  $90\text{ mm}$ ,利用蒙特-卡罗光线追迹法模拟聚光镜的聚光效率,此时聚光效率为  $84.21\%$ 。

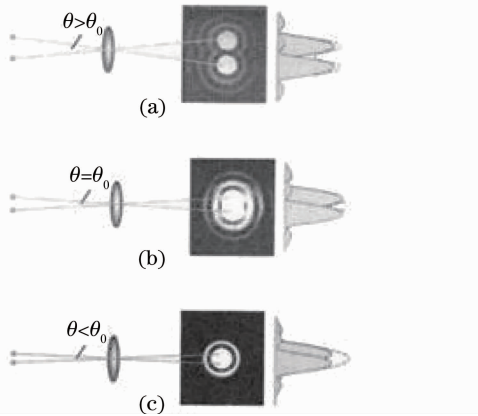


图 4 瑞利分辨极限

Fig. 4 Rayleigh resolution limit

接收靶的大小与截断效率  $\eta_{\text{cut}}(i)$  有直接的关系,间接影响传递效率。图 5 为通过蒙特-卡罗光线追迹法模拟的传递效率  $\eta$  随接收靶直径  $d_{\text{tar}}$  的变化关系。

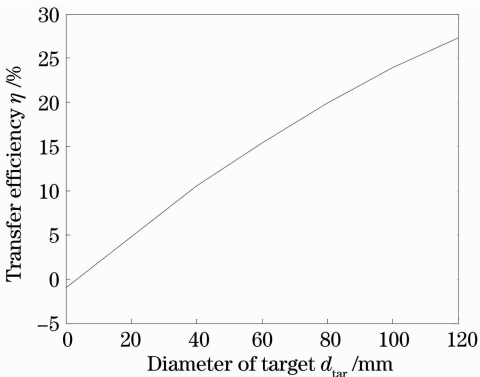


图 5 传递效率  $\eta$  随接收靶直径的变化

Fig. 5 Variation of transfer efficiency  $\eta$  with the diameter of target

系统的传递效率即氙灯单元的平均传递效率为

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta(i), \quad (9)$$

式中  $N=7$  为聚光单元的个数,  $\eta(i)$  为第  $i$  个聚光单

元的传递效率,其中 1、2、3、5、6、7 为外层聚光单元,4 为中间聚光单元。当接收靶直径为  $80\text{ mm}$  时,利用蒙特-卡罗光线追迹法模拟聚光单元的传递效率  $\eta(i)$  与  $i$  的关系如表 1 所示。利用(9)式计算,系统传递效率  $\eta$  为  $24.16\%$ ,比中间聚光单元的传递效率低  $1.27\%$ ,接收靶接收到  $10.15\text{ kW}$  的辐射光能,平均能流密度超过  $2\text{ MW/m}^2$ ,而接收靶对每个聚光单元的截断效率为  $100\%$ ,即理论上系统传递效率  $\eta_{\text{the}}$  为  $26.82\%$ ,此时理论值与模拟值相符,选择直径为  $80\text{ mm}$  的接收靶,截断效率高。

表 1 传递效率  $\eta(i)$  与  $i$  的关系

Table1 Relation between transfer efficiency  $\eta(i)$  and the number  $i$

$i$	$\eta(i) / \%$
1	23.76
2	23.82
3	23.86
4	25.43
5	24.21
6	23.94
7	24.08

## 5 太阳模拟器光学性能实验测试

太阳模拟器光学性能测试主要是测试接收光斑的成像特性,而太阳模拟器全功率工作对测试系统要求较高,受现有实验条件的限制,测试光斑特性存在一定难度。可以通过单个聚光单元的测试实验,估计太阳模拟器全功率工作下的成像光斑特性。根据设计参数加工、装调非共轴椭球面聚光阵列式高能流太阳模拟器,通过对太阳模拟器的光源离焦和接收靶离焦优化光斑的成像质量。待光斑成像质量最佳时,测试此状态下的光斑成像特性。

图 6(a)为单个非共轴椭球面聚光镜的实际成像光斑,图 6(b)为单个非共轴椭球面聚光镜的模拟成像光斑,图 6(c)为单个标准椭球面聚光镜的模拟成像光斑。从图 6(a)可以看出其成像光斑直径大小约为  $70\text{ mm}$ ,在光斑中心位置处形成一个较亮光斑,光斑对称性较好,此时辐射光能主要集中在直径约为  $40\text{ mm}$  的范围内。与标准椭球面聚光镜的成像光斑相比,非共轴椭球面聚光镜的光斑的均匀性和能流密度得到一定的提高。接收靶为铁质材料,短时间实验可将铁靶熔化,已知铁的熔点温度为  $1535\text{ }^\circ\text{C}$ ,根据斯特番-玻耳兹曼定律,其对应的能流密度  $\rho_{\text{ave}}$  为  $0.6059\text{ MW/m}^2$ ,可知单个聚光单元

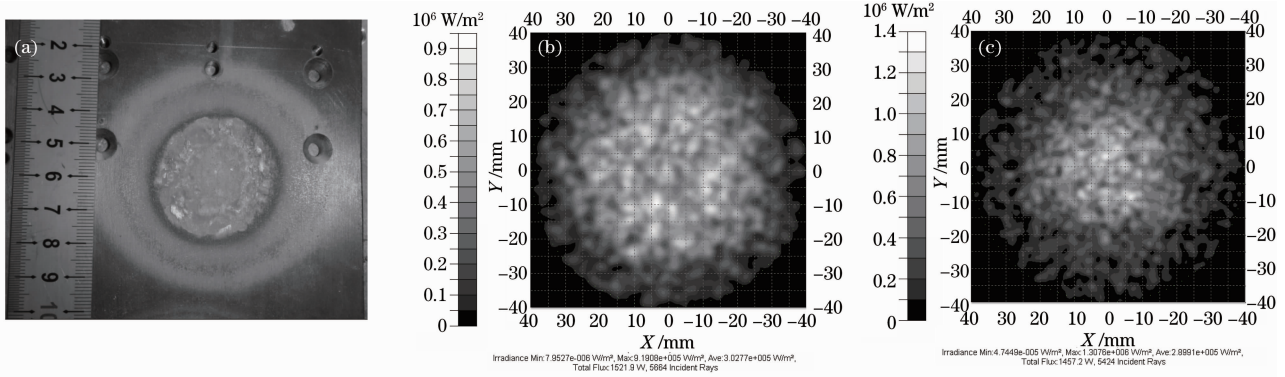


图6 成像光斑特性。(a)实验测试非共轴椭球面聚光镜；(b)蒙特-卡罗模拟非共轴椭球面聚光镜；(c)蒙特-卡罗模拟标准椭球面聚光镜

Fig. 6 Imaging characteristics. (a) Test result of non-coaxial ellipsoidal reflector; (b) modeling by MC method for non-coaxial ellipsoidal reflector; (c) modeling by MC method for standard ellipsoidal reflector

在 40 mm 直径范围内能流密度超过  $0.6059 \text{ MW/m}^2$ ，这与利用蒙特-卡罗光线追迹法模拟的结果相一致。

对于太阳模拟器全功率运行，直径大小为 80 mm 的接收靶的光斑能流密度分布可以根据聚光单元的对称性和光学知识<sup>[12]</sup> 计算估计。外层聚光单元成像光斑大小  $d'$  为

$$d' = d / \cos \alpha, \quad (10)$$

式中  $d$  为中间聚光单元实验测试的成像光斑直径， $\alpha$  为中间聚光单元光轴与外围聚光单元光轴的夹角。外层聚光单元较亮区域能流密度  $\rho'_{ave}$  为

$$\rho'_{ave} = \rho_{ave} s / s', \quad (11)$$

式中  $\rho_{ave}$  为中间聚光单元较亮光斑的平均能流密度， $s$  为中间聚光单元较亮光斑的面积， $s'$  为外层聚光单元较亮光斑的椭圆面积。

通过(10)式和(11)式可知外层单个聚光单元成像光斑特性，成像光斑为椭圆斑且短轴为 70 mm，长

轴为 83 mm，能量集中在短轴为 40 mm，长轴为 48 mm 的椭圆范围内。由(11)式计算可知，平均能流密度  $\rho'_{ave}$  约为  $0.5050 \text{ MW/m}^2$ 。太阳模拟器全功率运行下，直径约为 50 mm 的较亮区域能流密度  $\rho_{all}$  为

$$\rho_{all} \approx \rho_{ave} + 6 \times \rho'_{ave}. \quad (12)$$

太阳模拟器全功率工作时，成像光斑的直径约为 80 mm，且在直径约为 50 mm 的范围内形成较亮光斑，由(12)式可知，较亮光斑的平均能流密度约为  $3.64 \text{ MW/m}^2$ ，聚光比<sup>[4]</sup> 高达 3640，对应的理论色温超过 2800 K，这与蒙特-卡罗模拟的太阳模拟器全功率工作下的结果相符，如图 7(a)所示。在第二焦面处，接收靶接收的辐射光能为 10146 W，平均能流密度约为  $2.02 \text{ MW/m}^2$ ，系统的传递效率为 24.16%，直径为 50 mm 的范围内形成较亮光斑，平均能流密度约为  $3.48 \text{ MW/m}^2$ 。据此估计实际接收靶处接收 10 kW 的光能，系统的传递效率为

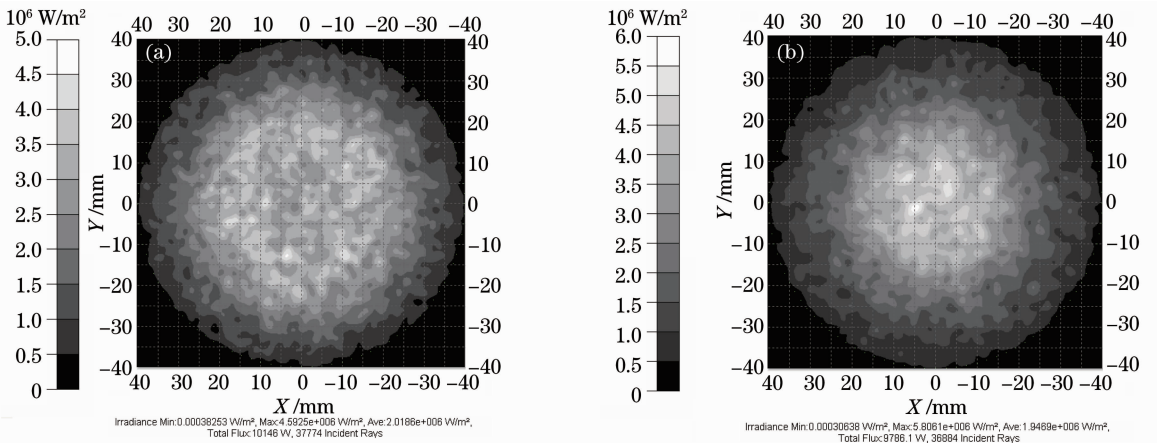


图7 蒙特-卡罗模拟太阳模拟器光斑特性。(a)非共轴椭球面聚光镜；(b)标准椭球面聚光镜

Fig. 7 Imaging characteristics of solar simulator by MC simulation. (a) Non-coaxial ellipsoidal reflector; (b) standard ellipsoidal reflector

23.81%，光斑的平均能流密度为  $2 \text{ MW/m}^2$ ，直径为 50 mm 的范围内形成较亮光斑，平均能流密度约为  $3.64 \text{ MW/m}^2$ 。而由基于标准椭球面聚光镜设计的太阳模拟器的成像光斑[见图 7(b)]可见，其成像光斑辐射均匀度明显较差。

## 6 结 论

采用非共轴椭球面聚光镜取代标准椭球面聚光镜，可使太阳模拟器成像光斑的能流密度分布均匀度有所改善。通过光学设计仿真软件 TracePro 建立氙灯光源模型，利用蒙特-卡罗光线追迹方法对聚光镜的聚光效率和聚光单元的传递效率进行设计优化。直径为 80 mm 的接收靶接收 10 kW 的辐射光能，光斑对称性和均匀性好，系统的传递效率约为 23.81%，80 mm 光斑平均能流密度为  $2 \text{ MW/m}^2$ ，50 mm 光斑平均能流密度为  $3.64 \text{ MW/m}^2$ ，对应的色温超过 2800 K。采用非共轴椭球面聚光镜，成功地研制了一台太阳模拟器，实验测试的成像光斑与光学设计仿真软件 TracePro 模拟光斑符合较好。

## 参 考 文 献

- 1 Gao Yan, Liu Hongbo, Wang Li. Solar simulation technology [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(2): 105~111  
高 燕, 刘洪波, 王 丽. 太阳模拟技术[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, **3**(2): 105~111
- 2 Daniel S. Codd, Andrew Carlson, Jennifer Rees *et al.*. A low cost high flux solar simulator[J]. *Solar Energy*, 2010, **84**(12): 2202~2212
- 3 Wang Zhiming, Gong Zhenban, Wei Guangpu *et al.*. Solar simulation technique for solar cell measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(7): 1542~1546

- 王志明, 龚振邦, 魏光谱等. 用于太阳能电池测试的太阳模拟技术[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(7): 1542~1546
- 4 Patrick Coray, Anton Meier, Max Brack *et al.*. A novel 50 kW 11000 suns high-flux solar simulator based on an array of xenon arc lamps[J]. *J. Solar Energy Engineering*, 2007, **129**(4): 405~411
- 5 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. 非共轴深椭球面反光镜的设计原理[J]. *光子·激光*, 2002, **13**(2): 210~211
- 6 Wei Xiudong, Lu Zhenwu, Lin Zi *et al.*. Design and optimization of heliostat field layout for solar tower power plant [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2652~2656  
魏秀东, 卢振武, 林 梓等. 塔式太阳能热发电站镜场的优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2652~2656
- 7 Wang Yunfeng, Ji jie, He Wei *et al.*. Performance analysis and design of paraboloidal dish solar concentrators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0122002  
王云峰, 季 杰, 何 伟等. 抛物碟式太阳能聚光器的聚光特性分析与设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0122002
- 8 Jing Lei, Liu Hua, Zhao Huifu *et al.*. Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1222010  
荆 雷, 刘 华, 赵会富等. 紧凑型高亮度发光二极管准直镜设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1222010
- 9 Du Jinglong, Tang Dawei, Li Zhigang. Radiative heat transfer characteristics between 5 kW solar simulator and Stirling engine's heat receiver [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2011, **32**(6): 985~988  
杜景龙, 唐大伟, 李志刚. 5 kW 太阳模拟器与斯特林发动机吸热器的辐射换热特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2011, **32**(6): 985~988
- 10 Ching-Cherng Sun, Tsun-Xian Lee, Shih Hsin Ma *et al.*. Precise optical modeling for LED lighting verified by cross correlation in the midfield region [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(14): 2193~2195
- 11 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 193~196  
郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 193~196
- 12 Li Lin, Huang Yifan, Wang Yongtian. *Applied Optics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005. 128~161

栏目编辑: 韩 峰