

激光与光电子学进展

变系数椭球聚光镜的设计

孙焕杰¹, 张国玉^{1,2,3*}, 孙高飞^{1,2,3}, 张健^{1,2,3}, 明杉炽¹

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022;

³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 为了解决太阳模拟器辐照均匀度普遍较低的问题,根据太阳模拟器的工作原理,建立了变系数椭球聚光系统。通过将传统椭球面方程进行泰勒展开后得到高阶方程,再通过演变得到了一种变系数的椭球面方程。通过调整变系数椭球面方程的系数,得到最佳的变系数椭球面方程。通过 MATLAB 分别仿真变系数椭球镜和传统椭球镜的第二焦面处的能量,将两者进行对比。使用 LIGHTTOOLS 软件仿真传统椭球镜和变系数的椭球聚光镜光学系统。仿真结果表明:变系数椭球镜第二焦面的均匀度比传统椭球镜的好,变系数椭球镜的辐照面均匀度要比传统椭球镜的辐照面均匀度高 3.91%,基本满足太阳模拟器的高辐照均匀度要求。

关键词 光学设计; 太阳模拟器; 均匀度; 椭球面聚光镜; 变系数

中图分类号 V19

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0908001

Design of Variable Coefficient Ellipsoid Condenser

Sun Huanjie¹, Zhang Guoyu^{1,2,3*}, Sun Gaofei^{1,2,3}, Zhang Jian^{1,2,3}, Ming Shanchi¹

¹College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Jilin Engineering Research Centre of Photoelectric Measurement and Control Instruments, Changchun, Jilin 130022, China;

³Key Laboratory of Optical Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to solve the problem of low radiation uniformity of a solar simulator, a variable coefficient ellipsoid condenser system was established according to the working principle of solar simulators. Firstly, the high-order equation is obtained by Taylor expansion of the traditional ellipsoid equation, and an ellipsoid equation with variable coefficients is obtained by evolution. Then, the optimal variable coefficient ellipsoid equation is obtained by adjusting the coefficients of the variable coefficient ellipsoid equation. Then, MATLAB is used to simulate the energy at the second focal planes of the variable coefficient ellipsoid and the traditional ellipsoid, and the two are compared. The LIGHTTOOLS software is used to simulate the optical systems of the traditional ellipsoid and the variable coefficient ellipsoidal condenser. The simulation results show that the uniformity of the second focal plane of the variable coefficient ellipsoid is higher than that of the traditional ellipsoid. The radiation uniformity of the variable coefficient ellipsoid is 3.91% higher than that of the traditional ellipsoid, which basically meets the requirements of high radiation uniformity of solar simulators.

收稿日期: 2020-12-08; 修回日期: 2020-12-16; 录用日期: 2020-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(61805027)、吉林省教育厅“十三五”科技项目(JJKH20181131KJ)、吉林省科技发展计划项目(20200602055ZP)、长春理工大学科技创新基金(XJLG-2018-02)

*E-mail: zh_guoyu@163.com

Key words optical design; solar simulator; uniformity; ellipsoid condenser; variable coefficient

OCIS codes 080.4295; 080.4298

1 引言

太阳模拟器是一种可以模拟太阳辐照特性的设备^[1],它可以应用于光电转换器件中以实现太阳能的检测、室内环境中的太阳光谱辐照模拟^[2],以及生物领域中的植物培育。

目前国内外研究的太阳模拟器都存在着辐照均匀度较差的问题。针对这种情况,国内的刘洪兴等^[3]和刘家国等^[4]分别研究了LED与氙灯混合的太阳模拟器和便携式太阳模拟器,得到的辐照不均匀度分别为 $\pm 3\%$ 和 $\pm 5\%$ 。2006年,中国科学院长春光学精密机械研究所研制了KM6太阳模拟器^[5],其辐照不均匀度优于 $\pm 5\%$ 。2011年,中国科学院长春光学精密机械研究所又研制了高准直太阳模拟器^[6],其辐照不均匀度为 $\pm 4\%$ 左右。国外方面,美国建立了塔式结构太阳模拟器^[7],在 $1.8\text{ m} \times 1.3\text{ m}$ 范围内,其辐照不均匀度达到了 $\pm 3\%$ 左右。到了20世纪90年代初,印度建立了高通量高辐照度(LSSC)太阳模拟器,该太阳模拟器适用于大型空间环境模拟设备,其辐照不均匀度为 $\pm 4\%$ 左右^[8]。日本研究了NASDA太阳模拟器^[9],其辐照不均匀度为 5% 。西班牙的IES-UPM于2008年研发了一种SolFocus太阳模拟器^[10],其辐照不均匀度为 $\pm 5\%$ 。而上述这些例子,辐照不均匀度较高的原因是采用了传统的椭球聚光镜。

本文针对高辐照均匀度太阳模拟器光学系统进行研究,提出并设计了一种变系数椭球聚光镜,

以有效提高太阳模拟器的辐照不均匀度,在太阳模拟器现有技术的基础上,提供一种提高辐照不均匀度的方法。

2 变系数椭球镜方程的设计

在太阳模拟器的光学系统中,氙灯会在第一焦面上发光,光先经椭球镜被反射,然后会在第二焦面上形成一定范围的辐照分布。第二焦面上的积分器场镜组的元素透镜会将这种辐照分布进行对称分割,然后将光场进行叠加。叠加后的光会先经过积分器投影镜组,然后再经过准直系统,最后会在辐照面上形成均匀分布的光斑^[11]。因此整个系统辐照面上的辐照均匀度与椭球镜第二焦面上的辐照均匀度有着紧密联系。

一般人们会采用第二焦面离焦的方法来提高第二焦面的辐照均匀度^[12]。但是第二焦面离焦后能量发散,会导致积分器接收的能量很少,也会导致积分器后光学元件尺寸增大。本文在传统的椭球镜方程基础上进行泰勒展开。

传统椭球镜的方程为

$$y^2 = 2rx - (1 - e^2)x^2, \quad (1)$$

式中: x 和 y 分别代表椭球聚光镜工作模型的坐标轴的横坐标和纵坐标; $r = \frac{2f_1 f_2}{f_1 + f_2}$, $e = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1}$,其中 f_1 是椭球镜的第一焦距, f_2 是椭球镜的第二焦距。

将传统的椭球镜方程进行泰勒展开,展开后的方程为

$$x = \frac{1}{2r}y^2 - \frac{1}{8r^3}ty^4 + \frac{1}{16r^5}t^2y^6 - \dots + \frac{1}{n!} \left[\prod_{i=0}^{n-1} \left(\frac{1}{2} - i \right) \right] \frac{1}{r^{2n-1}} t^{n-1} y^{2n}, \quad (2)$$

式中: $t = -(1 - e^2)$ 。

从展开后的方程可以看出,随着方程次数的增加,分母也在不断地上升且上升速度很快。由

此可以看出,低阶量对面型影响较大,高阶量对面型影响较小^[13]。为了让面型更加精准,最后决定保留5项:

$$x = \frac{a}{2r}y^2 - \frac{b}{8r^3}ty^4 + \frac{c}{16r^5}t^2y^6 - \frac{d}{128r^7}t^3y^8 + \frac{e}{256r^9}t^4y^{10}, \quad (3)$$

式中: a, b, c, d 和 e 是系数,通过适当调整 a, b, c, d 和 e 的值便可以得到变系数的椭球镜方程。当 $a = b = c = 1, d = 5$ 和 $e = 7$ 时,变系数椭球镜方程退化传统椭球镜的方程。

3 第二焦面上能量分布

为了将传统椭球镜和变系数椭球镜进行比较,本文选用的参数为: $f_1 = 60\text{ mm}$, $f_2 = 1020\text{ mm}$, 近轴

成像倍率 $M_0=17$, 顶点曲率半径 $R_0=113.333\text{ mm}$, 偏心率 $e=0.8889$, 出瞳口径 $\varphi=238.31\text{ mm}$, 顶端开口直径 $\varphi'=62.8\text{ mm}$ 。传统椭球镜三维模型图如图 1 所示。

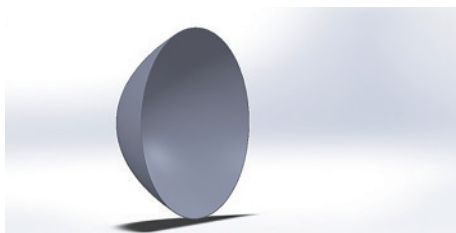


图 1 椭球镜三维模型图

Fig. 1 Three dimensional model of ellipsoid

3.1 传统椭球镜第二焦面上能量分布

根据给定参数得到的传统椭球面方程为： $y^2 =$

$$226.6666x - 0.2099x^2。$$

椭球镜工作模型如图 2 所示, 图 2 中 u_0 和 u_{10} 分别为第一焦点的发光点和与第一焦点的距离为 -1 (定义向左方向为负, 向右方向为正) 的发光点对应的后开口孔径角, u_m 和 u_{1m} 分别为第一焦点的发光点和与第一焦点的距离为 -1 的发光点对应的前开口孔径角, u_i 为与第一焦点的距离为 -1 时的发光点出射的光束 b 对应的孔径角, 光束 a 和 c 分别为与第一焦点的距离为 1 的发光点和第一焦点发出的光束。然后在 MATLAB 中建立椭球镜方程与入射光线方程, 并联立方程。图 3 为传统椭球镜的不同发光点在不同孔径角下的第二焦面的纵坐标值, 图中 l 是指光轴上的发光点与椭球聚光镜的第一焦点之间的距离。图 4 为传统椭球镜在第二焦面上的光斑形状 (1/4 圆斑)。

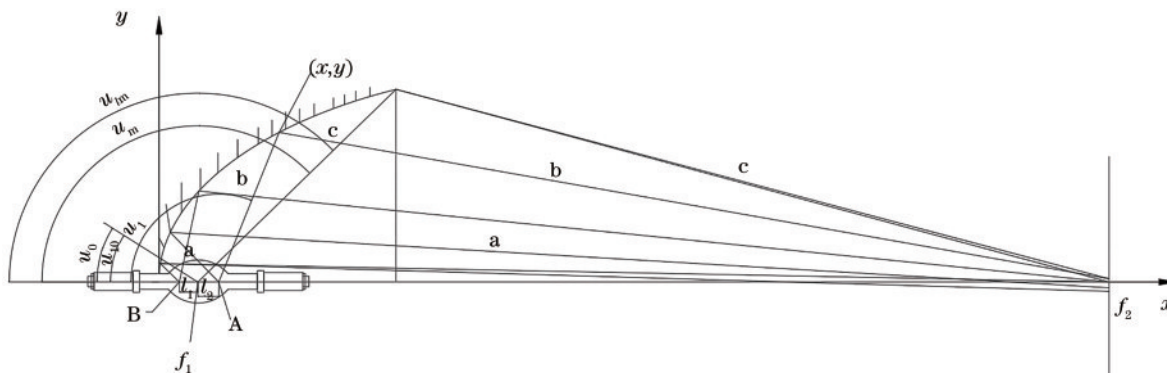


图 2 椭球聚光镜工作模型

Fig. 2 Working model of ellipsoid condenser

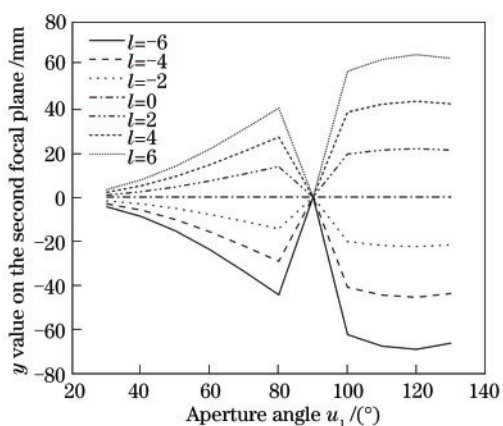


图 3 传统椭球镜第二焦面上的纵坐标值

Fig. 3 Vertical coordinate values on second focal plane of traditional ellipsoid

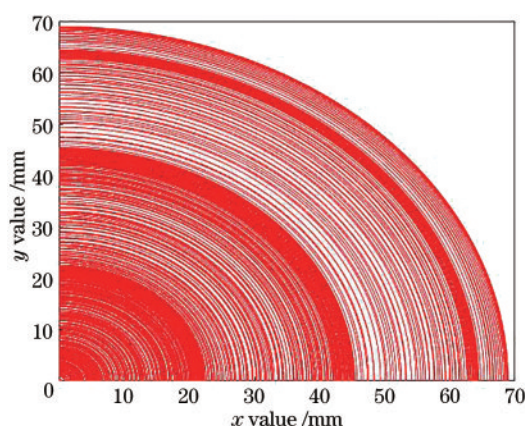


图 4 传统椭球镜第二焦面上的能量分布

Fig. 4 Energy distribution on second focal plane of traditional ellipsoid

分析图 3 和图 4 可知: 1) 在以 70 mm 为半径的区域内, 第二焦面上的光斑中心能量很高, 但随着半径的增大, 能量逐渐降低; 2) 在孔径角为 $30^\circ \sim 90^\circ$

时, 从椭球镜反射的光线在第二焦面形成的光斑的半径较小, 但有增大的趋势; 3) 在孔径角为 $90^\circ \sim 130^\circ$ 时, 从椭球镜反射的光线在第二焦面上形成的

光斑的半径较大,但总体有变小的趋势。

3.2 变系数椭球面第二焦面能量分布

针对传统椭球面聚光的特点^[14],如果要使第二焦面上的能量分布均匀度提高,需要在小孔径角时增大光斑尺寸,并在大孔径角时减小光斑尺寸。将系数设为 $a=1.1, b=0.5, c=0.5, d=3, e=5$, 变系数椭球面与传统椭球面的比较如图 5 所示。

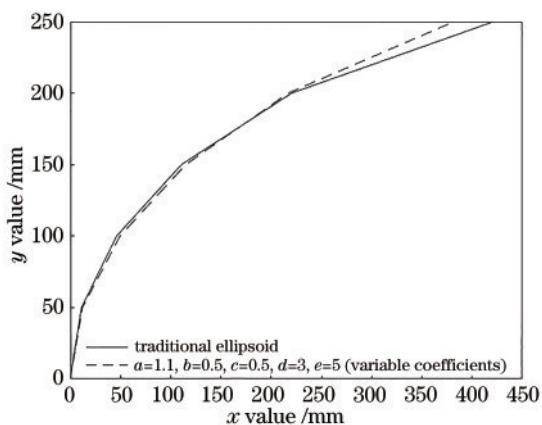


图 5 传统椭球面与 $a=1.1, b=0.5, c=0.5, d=3, e=5$ 时变系数椭球面的比较

Fig. 5 Comparison between traditional ellipsoid and ellipsoid with variable coefficients $a=1.1, b=0.5, c=0.5, d=3, e=5$

由图 5 可见,在小孔径角时,变系数椭球镜曲线和传统椭球镜曲线几乎吻合,但在大孔径角时,变系数椭球镜曲线是在传统椭球镜曲线的上方。图 6 显示的是在距离第一焦点处不同位置时,不同孔径角时的发光点发出的光经变系数椭球聚光镜在第

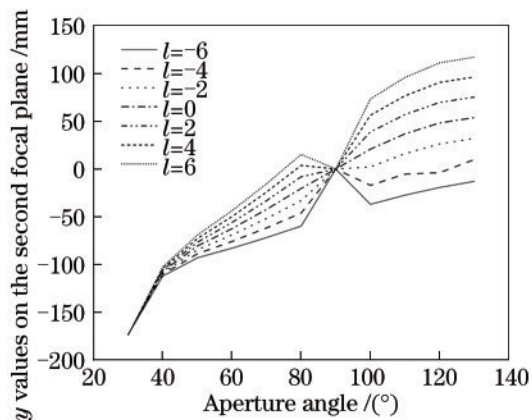


图 6 $a=1.1, b=0.5, c=0.5, d=3, e=5$ 时变系数椭球镜的第二焦面上光斑的纵坐标值

Fig. 6 Vertical coordinate values of spot on the second focal plane of variable coefficient ellipsoid with $a=1.1, b=0.5, c=0.5, d=3, e=5$

二焦面上形成的光斑的纵坐标值。

由图 6 可见,随着孔径角的增大,光斑的纵坐标值也在不断增大且增幅很大,当孔径角大于 90° 时,光斑的纵坐标值继续增大但增幅很小。相比于传统椭球镜,变系数椭球镜在大孔径角时第二焦面上的光斑纵坐标值也变大了。图 7 为变系数椭球面聚光镜的能量分布。

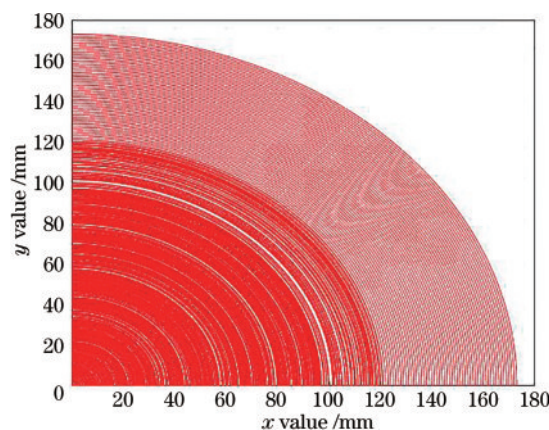


图 7 $a=1.1, b=0.5, c=0.5, d=3, e=5$ 的变系数椭球镜第二焦面上的能量分布

Fig. 7 Energy distribution on the second focal plane of variable coefficient ellipsoid with $a=1.1, b=0.5, c=0.5, d=3, e=5$

从图 6 和图 7 的结果可以得到,系数 a 是影响面型的主要因素,因为系数 a 的值较小,其少量的变化都会对整个面型有很大的影响。系数 b 对整个面型的中间部分有影响, b 的变化会直接影响最终光斑的分布效果,而系数 c, d 和 e 对整个面型的边缘部分有影响,系数 c 影响着大孔径角时的边缘面型,系数 d 和 e 影响着小孔径角时的边缘面型。因此系数范围应当设为: $1 \leq a \leq 1.5, 0 < b \leq 1, 0 < c \leq 1, 0 < d \leq 15, 0 < e \leq 21$ 。由于在 MATLAB 中,能量分布均匀的评价指标无法用数学表达式表达,所以只能采用临时试凑的方法,而不能通过数学表达式来获得最佳的系数。图 8、图 9 和图 10 分别为 $a=1.05, b=0.4, c=0.45, d=10, e=14$ 时变系数椭球镜方程和传统椭球镜方程的比较图、第二焦面上的光斑纵坐标值以及在第二焦面上的能量分布图。

在均匀度都较好的前提下,从图 5 和图 8 可以看出, $a=1.05, b=0.4, c=0.45, d=10, e=14$ 时的变系数椭球面曲线要比 $a=1.1, b=0.5, c=0.5, d=3, e=5$ 时的变系数椭球面曲线更加平滑、连续。所以,本文的变系数椭球面的曲线则选用 $a=1.05, b=0.4, c=0.45, d=10$ 和 $e=14$ 。

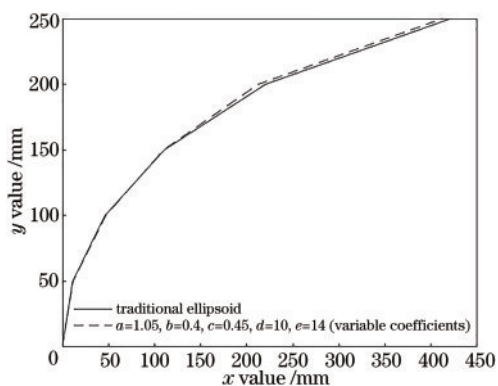


图 8 传统椭球面与 $a=1.05$ 、 $b=0.4$ 、 $c=0.45$ 、 $d=10$ 和 $e=14$ 时的变系数椭球面的比较

Fig. 8 Comparison between traditional ellipsoid and variable coefficient ellipsoid with $a=1.05$, $b=0.4$, $c=0.45$, $d=10$, and $e=14$

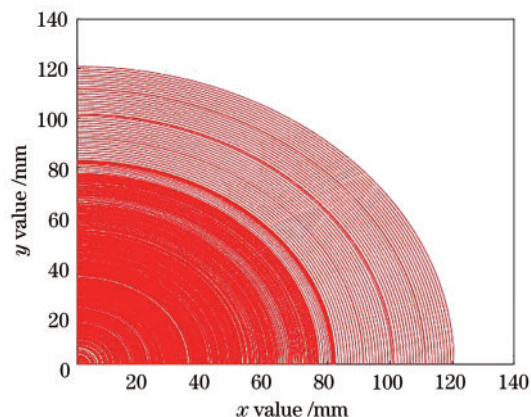


图 10 $a=1.05$ 、 $b=0.4$ 、 $c=0.45$ 、 $d=10$ 和 $e=14$ 的变系数椭球镜第二焦面上的能量分布

Fig. 10 Energy distribution on second focal plane of ellipsoid with variable coefficients $a=1.05$, $b=0.4$, $c=0.45$, $d=10$, and $e=14$

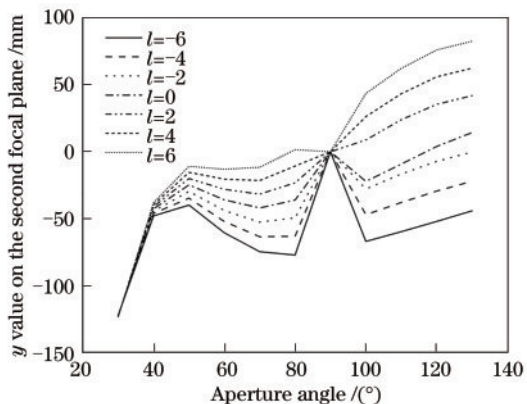


图 9 $a=1.05$ 、 $b=0.4$ 、 $c=0.45$ 、 $d=10$ 和 $e=14$ 时的变系数椭球镜的第二焦面上的光斑纵坐标值

Fig. 9 Vertical coordinate values of spot on the second focal plane of variable coefficient ellipsoid with $a=1.05$, $b=0.4$, $c=0.45$, $d=10$, and $e=14$

4 仿真分析

本文设计采用的非球面面型方程为高次方程，其模型是在 SOILDWORKS 中建立的。首先在 SOILDWORKS 画出椭球镜的曲线方程^[15]，然后建立对称轴，最后得到椭球镜的三维模型。LIGHTTOOLS 是一种照明分析软件，它所用的方法是蒙特卡罗法，利用这种方法进行光线追迹可以得到准确的照度变化^[16]。将 SOILDWORKS 中建立的椭球镜实体模型导入 LIGHTTOOLS 中，最后导入建立好的氙灯光源模型。获得的仿真分析模型如图 11 所示。第二焦面上的能量分布光栅图和辐照面的能量分布光栅图分别如图 12、13 所示。两个镜子的辐照度对比如表 1 所示。



图 11 仿真分析模型。(a)传统椭球面；(b)变系数椭球面

Fig. 11 Simulation analysis models. (a) Traditional ellipsoid; (b) variable coefficient ellipsoid

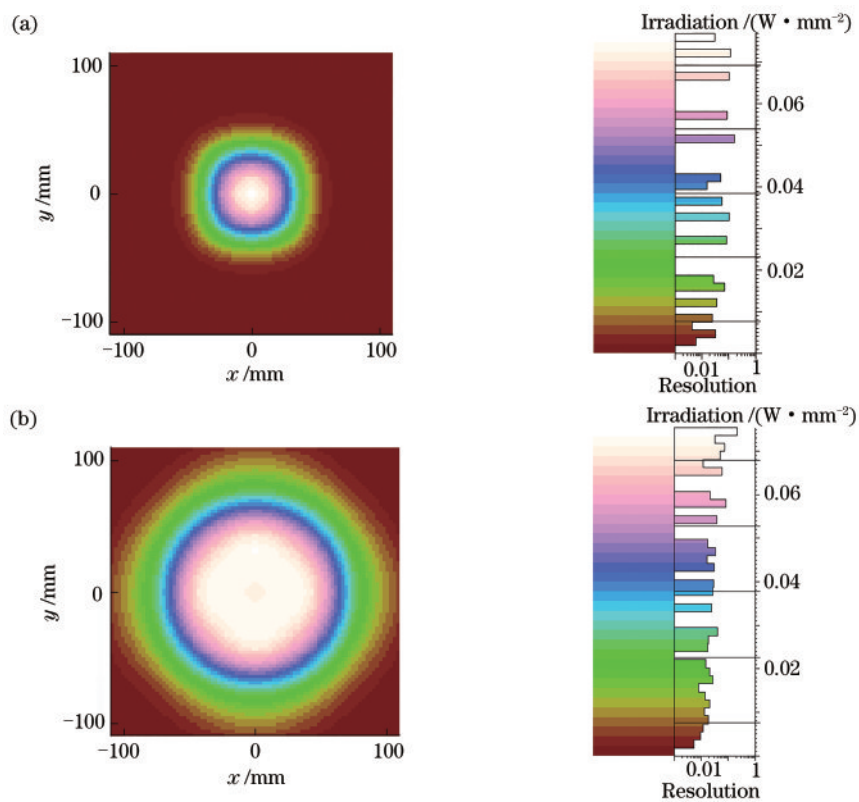


图 12 第二焦面上能量分布光栅图。(a)传统椭球面;(b)变系数椭球面

Fig. 12 Grating patterns of energy distribution on the second focal plane. (a) Traditional ellipsoid; (b) variable coefficient ellipsoid

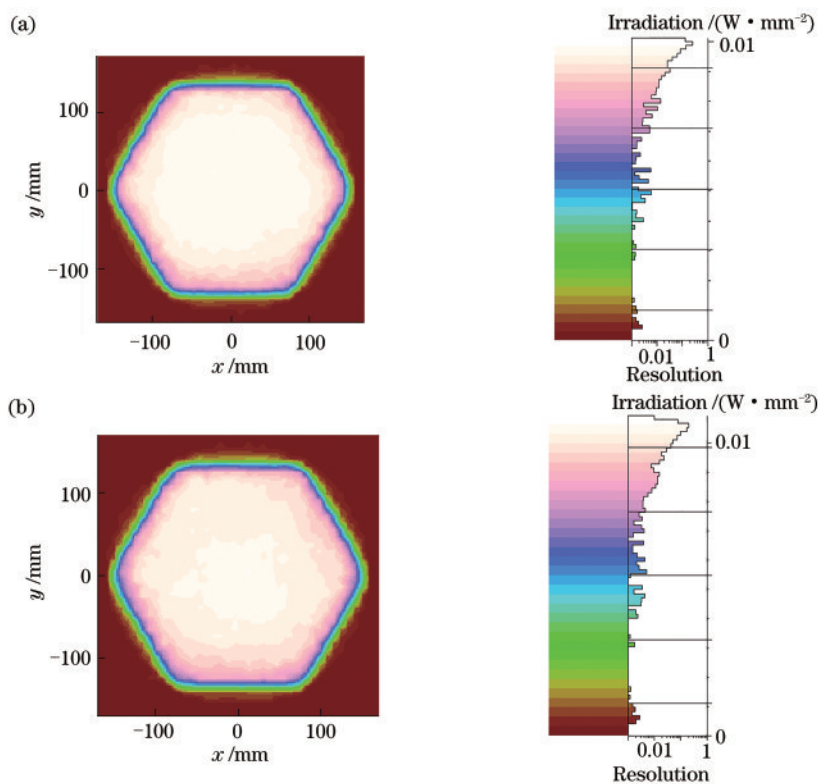


图 13 辐照面上能量分布光栅图。(a)传统椭球面;(b)变系数椭球面

Fig. 13 Grating patterns of energy distribution on irradiation surface. (a) Traditional ellipsoid; (b) variable coefficient ellipsoid

表 1 辐照面辐照度测试数据对比

Table 1 Comparison of irradiance test data of irradiation surface

Radius /mm	Irradiance of traditional ellipsoid /($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	Irradiance of ellipsoid with variable coefficients /($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
0	1479	1464
10	1458	1458
20	1436	1451
30	1415	1447
40	1392	1444
50	1378	1439
60	1362	1432
70	1345	1428
80	1330	1424

均匀度的计算公式可以表示为

$$\epsilon = 1 - \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (4)$$

式中： E_{\max} 、 E_{\min} 分别为有效辐照面内的最高辐照度和最低辐照度。由于 $1 \text{ W/mm}^2 = 10^{-6} \text{ W/m}^2$ ，经过计算可得，传统椭球镜的辐照面均匀度为 94.70%，而变系数椭球镜的辐照面均匀度为 98.61%，比传统椭球镜的提高了 3.91 个百分点。

5 结 论

提出并设计了一种变系数椭球面聚光镜，首先对传统椭球镜方程进行泰勒展开，然后选择前 5 项并改变相关系数。从 MATLAB 的仿真结果中发现：通过改变系数可以提高第二焦面辐照分布的均匀度。在 LIGHTTOOLS 中对太阳模拟器进行建模。实验结果表明：在保证能量利用率的前提下，变系数椭球镜的辐照面均匀度要比传统椭球镜的辐照面均匀度高 3.91 个百分点。

参 考 文 献

- [1] Su S, Zhang G Y, Fu Y, et al. New development of solar simulator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070003.
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.
- [2] Liu S. Study on key technique of collimation solar simulator with high-precision[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 3-9.
刘石. 高精度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: 3-9.
- [3] Liu H X, Sun J X, Liu Z X, et al. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1447-1454.
刘洪兴, 孙景旭, 刘则洵, 等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1447-1454.
- [4] Liu J G, Deng R, Wei A M, et al. Design of portable solar simulator [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3352-3355.
刘家国, 邓蓉, 魏阿满, 等. 便携式太阳模拟器设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3352-3355.
- [5] Pang H W, Huang B C, Zang Y Z, et al. Design of KM6 solar simulator [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(3): 125-133.
庞贺伟, 黄本诚, 臧友竹, 等. KM6 太阳模拟器设计概述[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(3): 125-133.
- [6] Chen J Q, Chen L F, Wang L, et al. Design and simulation of high-collimating solar simulator [J]. Optical Electro-Mechanical Information, 2011, 28(11): 68-74.
陈家奇, 陈兰峰, 王丽, 等. 高准直太阳模拟器的设计与仿真[J]. 光机电信息, 2011, 28(11): 68-74.
- [7] Snyder D B, Wolford D A. A newton-raphson method approach to adjusting multi-source solar simulators[C]//2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, June 3-8, 2012, Austin, TX, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1318-1320.
- [8] Yang L H, Li H S. The development of large solar simulators in the world[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(2): 99, 162-167.
杨林华, 李兹松. 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): 99, 162-167.
- [9] Li Q. Preliminary study on light source of high irradiance solar simulator[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011: 1-7.

- 李倩. 高辐照度太阳模拟器光源的初步研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011: 1-7.
- [10] Askins S, Taylor S, Domínguez C, et al. Realization of a solar simulator for production testing of HCPV modules[J]. *Solar Energy*, 2008, 55(2): 137-141.
- [11] Du Z Q, Zhang L M, Si X L, et al. Optical design of large-area projection solar simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0623003.
杜志强, 张黎明, 司孝龙, 等. 大面积投影式太阳模拟器的光学设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0623003.
- [12] Song P Y. Design and simulation analysis of solar simulator with high collimation and high irradiance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 44-46.
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: 44-46.
- [13] 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.
吕涛, 张景旭, 付东辉, 等. 可提高太阳模拟器均匀度的变形椭球面聚光镜[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1223001.
- [14] 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.
- [15] Schubert F, Spinner D. Solar simulator spectrum and measurement uncertainties [J]. *Energy Procedia*, 2016, 92: 205-210.
- [16] Du Z Q. The research of solar simulator theory and application [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 68-71.
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: 68-71.