

文章编号 2095-1531(2014)05-0844-11

组合非球面太阳能聚光镜的光学设计

秦 华*, 冯东太, 葛硕硕, 王 勇
(山东理工大学 理学院, 山东 淄博 255049)

摘要:提出了一种组合非球面反射型太阳能聚光镜并给出了设计方法。聚光镜由38片非球面组成,每一片非球面都由一组特定系数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$ 的偶次非球面方程决定,是此特定非球面的一部分。根据非球面方程和光反射定律矢量形式,导出了非球面内壁上太阳反射光束的方向矢量与非球面系数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$ 的关系,适当地选择这些非球面系数,即适当地调整非球面面型,可以使太阳反射光束具有特定的方向矢量,使入射到非球面内壁上的太阳光束反射后全部聚焦在某一特定的区域内,形成小的光斑。每组特定系数都用粒子群优化算法求得,并经计算机模拟和实验证明其聚焦效果。聚光镜的光束压缩比为330:1,其聚焦光斑可作为一种高温热源,而此聚光镜可以用在太阳能加热装置中。

关键词:太阳能聚光镜;组合非球面;多项式系数优化;光束压缩比

中图分类号:TK513.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20140705.0844

Optical design of build-up aspherical solar concentrating mirror

QIN Hua*, FENG Dong-tai, GE Shuo-shuo, WANG Yong
(School of Sciences, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)
* Corresponding author, E-mail: zjqinh@gmail.com

Abstract: In this paper, a build-up aspherical solar concentrating mirror and its design method are presented. It is composed of 38 pieces of revolution surfaces, and each piece of revolution surface is the part of the aspheric surface defined by a set of specific coefficients $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$. According to the even aspherical equation and the law of reflection in vector form, the relationship between the direction vectors of rays of light reflected from the inner wall of aspheric surface and the coefficients of an aspherical equation, $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$, has been derived. By appropriately choosing these aspherical coefficients, namely, appropriately adjusting an aspherical surface type, the reflected light beam can have specific direction vectors, which can make the sunbeams incident on an aspherical inner wall focus on a particular area and form a small spot. Each group of specific coefficients is obtained by using particle swarm optimization algorithm. The focusing effect of the solar concentrating mirror with the specific coefficients is demonstrated by using computer simulations and proved experimentally. The theoretical compression ratio for this concentrating mirror is 330:1. The focused spot can be used as a high temperature heat source and the concentrating mirror can be used in a solar heating

收稿日期:2014-06-15;修订日期:2014-07-19

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2012FM001)

device.

Key words: solar concentrating mirror; build-up aspherical surface; optimization of polynomial coefficients; beam compression ratio

1 引 言

近几十年来,人们使用能源的方式发生了显著的变化。来自政府、企业和科研机构寻找可替代能源和改善能源使用效率的投入日益增多,来自社会各方面减少二氧化碳排放量的呼声日益增大,这激发了对现有能源利用系统改造和优化技术的发展,也大大激发了新能源的开发和利用。

太阳能是地球上最为丰富的可利用碳中性能源,它1小时提供给地球的能量比整个地球全年消耗的能量还要多^[1],正成为最有前途的可开发资源。利用太阳能发电、取暖或制冷技术一直在研究之中^[2]。太阳能工业应用方面的研究大致可分为两个方面,一是利用光电收集器或者太阳能发电站把太阳能转变为电能^[3-5],二是利用各种太阳能聚光装置将太阳光聚焦以便高温利用或者聚焦在光伏器件上以便提高光电转换效率^[6-7]。两方面的研究都涉及到太阳能聚光镜,顾名思义,太阳能聚光镜就是把大面积的太阳辐照光收集或者聚焦到一小的接收器或输出装置上的工具。

根据聚光方式,聚光镜大致可以分为四类:反射式聚光、折射式聚光、折反混合式聚光和场致发光式聚光^[8]。根据聚光镜的形状有抛物面聚光镜^[9]、双曲面聚光镜^[10]、菲涅尔聚光镜^[11]、复合抛物面聚光镜^[12]、高次柱面聚光镜^[13]、量子点太阳能聚光器^[14]等。在一些大型太阳能利用装置中,多采用反射式聚光。在反射式聚光集热装置中,旋转抛物面反射镜的光能接收器正好位于入射光束的中心,遮挡了部分入射太阳光束,直接影响了聚焦效果,降低了聚焦区域的温度。为了不遮挡光路,大部分太阳能聚光装置采用了偏轴聚焦^[15]。为了实现偏轴聚焦,科研工作者设计出了各种不同形式的聚光镜^[10-13]。为了实现偏轴聚焦,本文提出了一种组合非球面太阳能聚光镜,这种非球面由偶次非球面方程确定,克服了将抛物面分割成若干段的不确定性,也克服了偏轴聚焦

的焦点位置和焦斑形状的难于控制问题。

2 非球面反射镜及其反射面上的光矢量

2.1 非球面反射镜的结构及其面型方程

组合非球面太阳能聚光镜的结构示意图如图1(a)所示,它由38片不同的非球面片组成(如

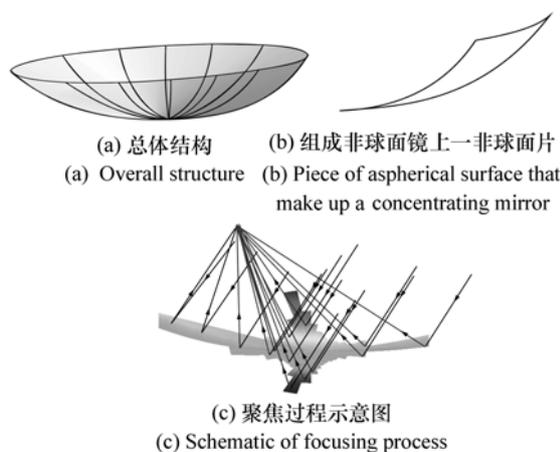


图1 组合非球面太阳能聚光镜面的结构示意图

Fig.1 Profile diagram of a build-up aspherical solar concentrating mirror

图1(b)),38片非球面长短不一定相同,其聚焦效果示意图如图1(c)所示。每一片非球面由具有特定系数的偶次非球面方程(1)决定。

$$y = \frac{Ch^2}{1 + \sqrt{1 - h^2 C^2 (1 + a_2)}} + a_4 h^4 + a_6 h^6 + a_8 h^8 + a_{10} h^{10}, \quad (1)$$

式中,第一项相当于一个二次曲面, $h = \sqrt{x^2 + z^2}$, x, y, z 为直角坐标系的3个坐标量, C 为二次曲面的顶点曲率, $1 + a_2$ 为二次曲面系数, a_2 与二次曲面的离心率有关; a_4, a_6, a_8, a_{10} ,为非球面方程多项式中各高次项的系数。

若令 $a_4 = a_6 = a_8 = a_{10} = 0$,则式(1)可简化为

$$y = \frac{Ch^2}{1 + \sqrt{1 - h^2 C^2 (1 + a_2)}}$$

这就是轴对称旋转二次曲面,随 a_2 的取值不同分别表现为双曲面、抛物面、椭球面、球面等。

非球面被用作反射型太阳能聚光镜,其达到聚光效果的关键是非球面形状设计,即高次方程参数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$ 的优化选择。下面章节中将讨论非球面参数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$ 与聚焦光斑的位置和形状之间的关系,从而得到这些参数的求解方法。

2.2 过顶点 O 的一条特殊光线追迹

建立如图 2 坐标系,坐标系原点 O 位于非球面顶点处。令入射光束平行于 $z=0$ 的平面,首先研究一条过 O 点的特殊入射光线。设这条特殊光线的入射角为 φ ,即入射光线与 Y 轴的夹角,则反射光线必过 $P'(x', y', 0)$ 点,其中 $x' = -y' \tan\varphi, y'$ 为离开顶点的 Y 坐标值。选过 O 点的反射光线上的任一点 P' 作为聚焦光斑中心,为了不遮挡光路,应当增大 y' 或者 $y' \tan\varphi$ 的值。

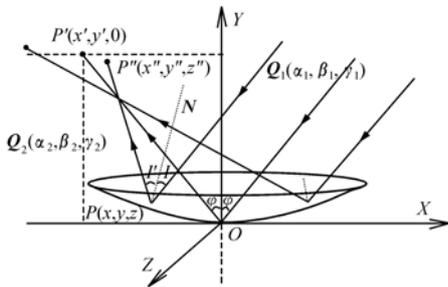


图 2 特殊入射、反射光线与非特殊入射、反射光线位置关系

Fig. 2 Positional relationship between special incident-reflected rays and common incident-reflected rays

2.3 非特殊光线追迹

2.3.1 由 P_0 和 Q_1 求入射光线与非球面的交点

如图 3 所示, $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 为入射光线上任一点, $Q_1(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 为入射光线单位矢量。由于已假定入射光线平行于 XOY 平面,则 $\gamma_1 = 0$ 。光线与非球面的交点可以通过如下方法近似求得。

首先求出光线和 XOZ 面的交点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$,由 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 作 Y 轴的平行线,交非球面于一点 $P'_1(x_1, y'_1, z_1)$,并把 P'_1 作为光线与非球

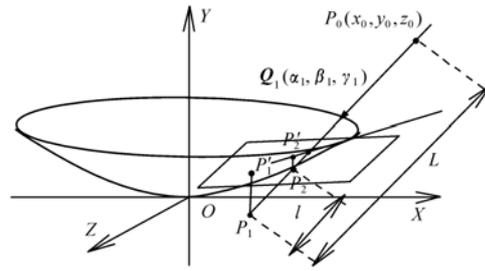


图 3 入射光线与非球面的交点追迹

Fig. 3 Method of finding points of intersection between incident light rays and an aspherical surface

面交点的第一次近似解,然后求光线与过 P'_1 点切面的交点 $P_2(x_2, y_2, z_2)$,再由 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 作 Y 轴的平行线,交非球面于点 $P'_2(x_2, y'_2, z_2)$,并把 P'_2 作为新的近似解。重复以上步骤直到满足要求的精度为止^[16]。

2.3.2 反射光线矢量 $Q_2(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$

假定 $N(\alpha_N, \beta_N, \gamma_N)$ 为非球面上入射点处单位法线向量(外法线方向), $\alpha_N, \beta_N, \gamma_N$ 为其 3 个分量, I 为入射角, I' 为反射角,根据反射定律的矢量形式可以得到反射光线矢量 $Q_2(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ ^[17]:

$$Q_2 = Q_1 + gN, \tag{2}$$

式中, $g = -2|\alpha_1\alpha_N + \beta_1\beta_N + \gamma_1\gamma_N|$ 。

式(2)的分量形式:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \alpha_1 + g\alpha_N, \\ \beta_2 &= \beta_1 + g\beta_N, \\ \gamma_2 &= \gamma_1 + g\gamma_N, \end{aligned} \tag{3}$$

从式(2)可知,当 $Q_1(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 一定时,反射光线的单位方向矢量 $Q_2(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ 由 g 和 N 决定,而 g 由 N 决定,所以 $Q_2(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ 只是 N 的函数,而 N 由非球面参数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$ 决定。因此 $Q_2(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ 最终只是非球面参数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$ 的函数。适当选择这些参数的组合就一定能够得到一恰当的 Q ,使反射光线指向某特定区域,实现对太阳光束的聚焦。

3 入射光束孔径和聚焦点位置设置及非球面方程的参数优化

3.1 入射光束孔径

反射面为非球面,斜照射到反射面上的太阳

光束横截面为圆面,这个圆面直径(图4中的 A_1 A)的大小就是入射光束直径,入射光束直径越大,聚焦光斑越小,则此反射面的聚焦能力越好。如图4所示,入射光束孔径用入射光束在 XOZ 面上的投影表示,设在 XOZ 面上投影高度为 H ,则入射光束直径为 $H\cos\varphi$ 。由于偏轴入射, $x > 0$ 部分和 $x < 0$ 部分并不对称,所以把 H 分为 H_1 ($x > 0$ 部分)和 H_2 ($x < 0$ 部分)两部分设计, $H = H_1 + H_2$,并且每一片非球面的 H 不一定相同。

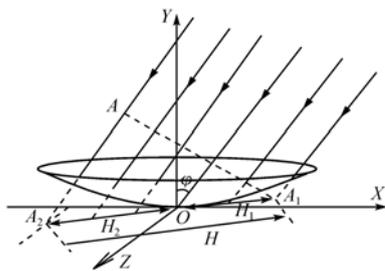


图4 入射太阳光束孔径示意图

Fig.4 Diagrammatic sketch of the aperture of incident solar beam

3.2 聚焦点位置的设置与非球面方程的参数优化

使入射光束平行 XOY 面,则过 O 点的入射光线、反射光线都在 XOY 面,且过 O 点反射光线上的任一点 $P'(x', y', z')$ 的坐标值满足 $x' = -y' \tan\varphi, z' = 0$,如图2所示。不过 O 点的任一入射光线,在非球面上的投射点为 $P(x, y, z)$ (如图2所示),令其反射光线上的任一点 $P''(x'', y'', z'')$,则 x'', z'' 与 y'' 的关系由图2可以推出:

$$\begin{cases} x'' = x + \frac{\alpha_2}{\beta_2}(y'' - y) \\ z'' = z + \frac{\gamma_2}{\beta_2}(y'' - y) \end{cases}, \quad (4)$$

令 $y'' = y'$,则 $P''(x'', y'', z'')$ 与 $P'(x', y', 0)$ 之间的距离为 $R = \sqrt{(x'' - x')^2 + (z'' - 0)^2} = \sqrt{\Delta x'^2 + \Delta z'^2}$ 。取点 P' 作为聚焦点,以 R 作为评价量,则 R 愈小,聚焦光斑区域越小,本文中 R 的目标值为 $R \leq 5$ (cm)。从 R 的表达式可以看出, R 是参数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$ 的函数,可以用粒子群算法对这些参数进行优化,以使 R 达到极小。

在旋转曲面上的某些部分,反射光线的 $\Delta x'$ 、

$\Delta z'$ 不能同时校正到很小,往往把 $\Delta x'$ 校正小了,而 $\Delta z'$ 却变大了,反之亦然,如图5(a)所示。当某旋转部分的 $R_i = \sqrt{\Delta x_i'^2 + \Delta z_i'^2}$ 愈小而允许的最大投影高度 H_1 愈大时其聚焦能力愈强,显然旋转曲面上不同旋转部分其聚焦能力不同。聚焦能力大的旋转部分其 H_1 就大(如图5(b)所示),聚焦能力小的旋转部分其 H_1 就小(如图5(a)所示),所以应对整个反射面按旋转弧度的不同分别进行设计。至于按旋转弧度顺序分割成多少片可由设计者根据聚焦要求决定,在 $R_i = \sqrt{\Delta x_i'^2 + \Delta z_i'^2} \leq \text{constant}$ 要求下,分割的片数愈多则设计出的反射面积愈大,但同时给反射面的制作带来了困难。因此在本文非球面设计中我们把整个反射面按旋转弧度顺序分割成38片参数不同的非球面,即 $x > 0$ 和 $x < 0$ 时各19片。即整个反射面是由这38片不同非球面不同旋转部分的组合。

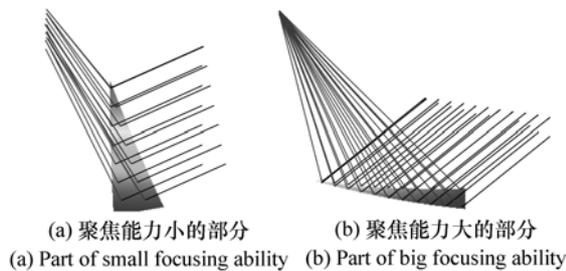


图5 旋转曲面上不同旋转部分对太阳光聚焦能力不同

Fig.5 Different focusing ability in different rotating parts of surface of revolution possess

取 $\varphi = 25.5^\circ$,取聚焦点 $P'(-95.3951, 200, 0)$,则 $\Delta x' = x'' - x' = x' + 95.3915, \Delta z' = z''$ 。把 $\sum_i R_i = \sum_i \sqrt{\Delta x_i'^2 + \Delta z_i'^2}$ 作为粒子群算法中的适应度函数,式中 i 为不同光线的编号。采用粒子群算法对参数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$ 进行优化^[18]。由于偏轴聚焦,非球面中 $x > 0$ 部分与 $x < 0$ 部分并不对称,因此 $x > 0$ 部分和 $x < 0$ 部分分别进行优化。表1记录了 $x > 0$ 部分19组非球面参数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$ 优化结果及允许的最大投影高度 H_2 ,表2记录了 $x < 0$ 部分19组非球面的参数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$ 优化数据及允许的最大投影高度 H_1 ,表1、2中的 $(1/19 \sim 2/19)\pi, (2/19 \sim 3/19)\pi$ 等表示组合非球面按旋转弧度顺序分成的38等

份的每一份,每一份属于不同非球面的某一旋转部分。

表1 用粒子群算法优化得到的 $x > 0$ 部分 19 组非球面方程参数及投影高度
 Tab.1 Coefficients for 19 aspheric equations ($x > 0$) obtained with the particle swarm optimization algorithm and the projected height H_1

pamameters	$r = 1/C(\text{cm})$	a_2	a_4	a_6	a_8	a_{10}	H_1/cm
(0 ~ 1/19) π	399.918 9	-2.865 5	$7.281 0 \times 10^{-10}$	$3.203 2 \times 10^{-13}$	$4.665 3 \times 10^{-20}$	$1.304 5 \times 10^{-25}$	63
(1/19 ~ 2/19) π	406.965 0	-6.949 1	$-2.675 2 \times 10^{-10}$	$5.214 0 \times 10^{-13}$	$3.312 4 \times 10^{-19}$	$-5.152 8 \times 10^{-26}$	50
(2/19 ~ 3/19) π	418.121 2	-10.837 8	6.0248×10^{-10}	$3.434 1 \times 10^{-13}$	$-8.000 0 \times 10^{-20}$	$6.265 0 \times 10^{-27}$	44
(3/19 ~ 4/19) π	433.061 7	-14.343 8	$-7.999 8 \times 10^{-10}$	$3.985 8 \times 10^{-13}$	$-8.000 0 \times 10^{-20}$	$-4.421 2 \times 10^{-26}$	44
(4/19 ~ 5/19) π	456.021 9	-7.736 5	$-8.000 0 \times 10^{-10}$	$-8.000 0 \times 10^{-14}$	$-7.999 6 \times 10^{-18}$	$-5.211 1 \times 10^{-22}$	41
(5/19 ~ 6/19) π	471.526 2	-8.269 6	$-8.000 0 \times 10^{-10}$	$-8.000 0 \times 10^{-14}$	$-8.000 0 \times 10^{-18}$	$-6.000 0 \times 10^{-22}$	43
(6/19 ~ 7/19) π	485.375 8	-9.259 3	$-8.000 0 \times 10^{-10}$	$-8.000 0 \times 10^{-14}$	$-8.000 0 \times 10^{-18}$	$-6.000 0 \times 10^{-22}$	49
(7/19 ~ 8/19) π	496.708 5	-9.8285 7	$-8.000 0 \times 10^{-10}$	$-8.000 0 \times 10^{-14}$	$-8.000 0 \times 10^{-18}$	$-6.000 0 \times 10^{-22}$	62
(8/19 ~ 9/19) π	506.095 9	-8.776 7	$-8.000 0 \times 10^{-10}$	8.4880×10^{-15}	$-4.193 9 \times 10^{-18}$	$-9.060 1 \times 10^{-23}$	93
(9/19 ~ 10/19) π	531.881 4	-4.486 7	$-8.000 0 \times 10^{-11}$	$-8.000 0 \times 10^{-15}$	$1.172 0 \times 10^{-19}$	$-7.758 4 \times 10^{-25}$	223
(10/19 ~ 11/19) π	511.291 3	-6.205 4	$-1.716 5 \times 10^{-10}$	$1.640 7 \times 10^{-14}$	$-8.000 0 \times 10^{-19}$	$-5.999 9 \times 10^{-23}$	93
(11/19 ~ 12/19) π	497.414 4	-8.487 6	$-8.000 0 \times 10^{-10}$	$-8.000 0 \times 10^{-15}$	$-8.000 0 \times 10^{-19}$	$-6.000 0 \times 10^{-23}$	62
(12/19 ~ 13/19) π	485.549 2	-8.991 9	$-8.000 0 \times 10^{-10}$	$-8.000 0 \times 10^{-15}$	$1.537 8 \times 10^{-18}$	$1.135 8 \times 10^{-22}$	49
(13/20 ~ 14/19) π	469.921 4	-6.631 1	$5.142 5 \times 10^{-10}$	$-7.925 7 \times 10^{-15}$	$-6.375 1 \times 10^{-19}$	$-4.619 9 \times 10^{-23}$	43
(14/19 ~ 15/19) π	456.084 8	-7.195 6	$-8.000 0 \times 10^{-10}$	$-8.000 0 \times 10^{-15}$	$7.353 5 \times 10^{-20}$	$-6.000 0 \times 10^{-23}$	42
(15/19 ~ 16/19) π	433.426 0	-12.518 2	$7.534 7 \times 10^{-10}$	$-6.973 0 \times 10^{-15}$	$1.592 6 \times 10^{-16}$	$1.915 0 \times 10^{-21}$	42
(16/19 ~ 17/19) π	417.926 5	-11.412 5	$-8.000 0 \times 10^{-10}$	$2.642 9 \times 10^{-15}$	$1.738 3 \times 10^{-16}$	$2.423 4 \times 10^{-22}$	44
(17/19 ~ 18/19) π	404.963 5	-5.432 4	$5.357 8 \times 10^{-9}$	$1.663 2 \times 10^{-15}$	$-1.629 0 \times 10^{-19}$	$-5.989 2 \times 10^{-23}$	50
(18/19 ~ 19/19) π	398.297 0	-4.241 4	$-6.173 5 \times 10^{-10}$	$-3.625 8 \times 10^{-15}$	$-7.986 1 \times 10^{-19}$	$1.002 9 \times 10^{-20}$	63

表2 用粒子群算法优化得到的 $x < 0$ 部分 19 组非球面方程参数及投影高度
 Tab.2 Coefficients for 19 aspheric equations ($x < 0$) obtained with the particle swarm optimization algorithm and the projected height H_2

pamameters	$r = 1/C(\text{cm})$	a_2	a_4	a_6	a_8	a_{10}	H_2/cm
(19/19 ~ 20/19) π	392.966 8	-2.031 5	$3.897 7 \times 10^{-11}$	$1.056 1 \times 10^{-13}$	$-8.000 0 \times 10^{-19}$	$-6.000 0 \times 10^{-23}$	83
(20/19 ~ 21/19) π	396.697 2	0.195 5	$1.196 5 \times 10^{-9}$	$3.898 3 \times 10^{-15}$	$1.524 5 \times 10^{-19}$	$2.367 5 \times 10^{-22}$	113
(21/19 ~ 22/19) π	406.117 5	0.626 4	$-7.995 1 \times 10^{-10}$	$4.019 2 \times 10^{-15}$	$4.182 0 \times 10^{-18}$	$-6.000 0 \times 10^{-23}$	152
(22/19 ~ 23/19) π	428.627 9	3.084 1	$-8.000 0 \times 10^{-9}$	$8.847 9 \times 10^{-13}$	$9.075 1 \times 10^{-19}$	$-3.003 2 \times 10^{-22}$	74
(23/19 ~ 24/19) π	443.861 5	15.623 7	$3.525 9 \times 10^{-9}$	$2.935 1 \times 10^{-12}$	$1.606 4 \times 10^{-17}$	$1.355 6 \times 10^{-21}$	64
(24/19 ~ 25/19) π	449.825 6	-0.693 3	$-7.998 9 \times 10^{-9}$	$-7.687 4 \times 10^{-13}$	$6.189 0 \times 10^{-17}$	$1.256 5 \times 10^{-22}$	64
(25/19 ~ 26/19) π	462.140 6	-0.186 0	$-8.000 0 \times 10^{-9}$	$-8.000 0 \times 10^{-13}$	9.7826×10^{-17}	$1.711 3 \times 10^{-22}$	70
(26/19 ~ 27/19) π	473.268 7	3.364 2	$-8.000 0 \times 10^{-9}$	$5.561 1 \times 10^{-13}$	-7.9335×10^{-18}	$-5.778 2 \times 10^{-22}$	93
(27/19 ~ 28/19) π	442.940 0	-5.799 0	$-8.000 0 \times 10^{-9}$	$4.833 7 \times 10^{-14}$	-6.7149×10^{-18}	$1.324 3 \times 10^{-22}$	200
(28/19 ~ 29/19) π	428.411 9	-9.543 3	$-7.999 3 \times 10^{-9}$	$-2.719 1 \times 10^{-13}$	7.6611×10^{-18}	$-6.149 2 \times 10^{-23}$	240
(29/19 ~ 30/19) π	451.102 5	-5.934 4	$-7.997 0 \times 10^{-9}$	$-2.242 9 \times 10^{-13}$	8.4790×10^{-18}	$-9.103 3 \times 10^{-23}$	200
(30/19 ~ 31/19) π	465.833 9	-1.775 5	$-6.892 5 \times 10^{-9}$	$-4.026 6 \times 10^{-13}$	$5.822 5 \times 10^{-18}$	$1.737 9 \times 10^{-21}$	94
(31/19 ~ 32/19) π	465.423 0	3.923 3	$-7.885 6 \times 10^{-9}$	$5.036 5 \times 10^{-13}$	$-7.641 6 \times 10^{-18}$	$-6.000 0 \times 10^{-22}$	70
(32/19 ~ 33/19) π	454.080 1	3.516 5	$-8.000 0 \times 10^{-9}$	$3.659 4 \times 10^{-13}$	$-8.000 0 \times 10^{-18}$	$-5.999 8 \times 10^{-22}$	64
(33/19 ~ 34/19) π	443.160 4	6.545 0	$-8.000 0 \times 10^{-9}$	$1.662 7 \times 10^{-12}$	$4.639 9 \times 10^{-18}$	$3.391 4 \times 10^{-22}$	64
(34/19 ~ 35/19) π	427.685 5	3.342 0	$-2.713 0 \times 10^{-9}$	$-2.061 4 \times 10^{-13}$	$-5.381 4 \times 10^{-19}$	1.1622×10^{-20}	74
(35/19 ~ 36/19) π	367.761 2	-11.508 1	$-6.422 0 \times 10^{-9}$	$-8.000 0 \times 10^{-13}$	$3.254 0 \times 10^{-17}$	-3.6167×10^{-22}	152
(36/19 ~ 37/19) π	396.921 5	-3.840 5	$-7.881 6 \times 10^{-9}$	$1.356 9 \times 10^{-13}$	$2.904 6 \times 10^{-18}$	$-1.235 1 \times 10^{-22}$	114
(37/19 ~ 38/19) π	395.421 4	2.725 3	$8.031 6 \times 10^{-9}$	$3.468 2 \times 10^{-13}$	$-5.617 8 \times 10^{-18}$	$1.088 6 \times 10^{-22}$	83

表3和表4记录了非球面 $x > 0$ 和 $x < 0$ 部分组合非球面聚光镜中每一片两条边缘半径上不同入射点的反射光线在 $x' = -95.3951$ 平面上的交点与目标值 $P'(-95.3951, 200, 0)$ 之间的距离 R_i 。

表3、4中的 $1.00 \times H_2, 0.8 \times H_1$ 等表示入射光线在 XOZ 面上的投影高度。从表3、4中看出 $R_i = \sqrt{\Delta x_i'^2 + \Delta x_i''^2}$ 都小于 5 cm 。

表3 组合非球面聚光镜每一非球面 $x > 0$ 部分反射光线在聚焦光斑处的 R_i 值
Tab.3 Values of R_i about the light rays reflected from each aspheric surface($x > 0$) of a build-up aspherical concentrating mirror

	R_i/cm									
	$1.0H_1$	$0.9H_1$	$0.8H_1$	$0.7H_1$	$0.6H_1$	$0.5H_1$	$0.4H_1$	$0.3H_1$	$0.2H_1$	$0.1H_1$
$(0 \sim 1/19)\pi$	3.442 1	2.646 8	2.011 1	1.496 9	1.078 4	0.7391	0.469 0	0.262 4	0.116 3	0.029 0
	4.997 1	4.294 9	3.643 5	3.030 0	2.452 8	1.9154	1.423 3	0.981 6	0.595 1	0.267 1
$(1/19 \sim 2/19)\pi$	3.945 0	3.268 7	2.694 4	2.197 2	1.759 8	1.3709	1.023 9	0.715 1	0.442 6	0.204 9
	4.914 0	4.316 6	3.749 6	3.202 2	2.671 1	2.1578	1.665 9	1.200 0	0.764 6	0.363 8
$(2/19 \sim 3/19)\pi$	4.489 6	3.841 1	3.263 6	2.741 3	2.262 1	1.8181	1.404 0	1.016 9	0.655 0	0.316 9
	4.957 6	4.397 3	3.858 4	3.331 8	2.813 7	2.3040	1.805 2	1.321 3	0.856 6	0.415 2
$(3/19 \sim 4/19)\pi$	4.956 9	4.302 0	3.705 5	3.153 3	2.635 4	2.1449	1.677 7	1.231 3	0.804 2	0.394 7
	4.972 6	4.432 0	3.907 8	3.391 2	2.878 5	2.3697	1.867 4	1.375 3	0.897 8	0.438 5
$(4/19 \sim 5/19)\pi$	4.869 3	4.324 5	3.793 7	3.277 0	2.774 3	2.2851	1.808 9	1.344 4	0.889 9	0.442 8
	4.815 7	4.274 0	3.742 9	3.223 8	2.718 0	2.2268	1.751 0	1.291 2	0.847 0	0.417 4
$(5/19 \sim 6/19)\pi$	4.929 6	4.387 2	3.856 9	3.338 8	2.833 1	2.3394	1.857 0	1.384 4	0.919 6	0.459 5
	4.461 0	3.960 4	3.469 0	2.988 3	2.519 7	2.0647	1.624 5	1.199 1	0.788 2	0.389 5
$(6/19 \sim 7/19)\pi$	4.971 3	4.425 3	3.891 0	3.368 9	2.859 3	2.3622	1.877 0	1.402 0	0.934 3	0.469 2
	3.985 3	3.542 1	3.104 7	2.674 2	2.252	1.8436	1.448 5	1.068 7	0.703 5	0.349 5
$(7/19 \sim 8/19)\pi$	4.986 8	4.434 7	3.893 6	3.365 3	2.850 9	2.3514	1.867 3	1.397 1	0.936 4	0.475 6
	3.285 3	2.910 2	2.549 9	2.195 1	1.844 6	1.5019	1.173 1	0.863 2	0.571 9	0.290 7
$(8/19 \sim 9/19)\pi$	4.968 3	4.417 3	3.860 4	3.315 1	2.791 1	2.2869	1.805 7	1.353 5	0.926 1	0.494 0
	1.954 3	1.581 4	1.387 5	1.226 7	1.050 3	0.8427	0.627 9	0.454 2	0.344 0	0.230 1
$(9/19 \sim 10/19)\pi$	4.913 3	4.326 8	3.699 4	3.305 9	2.825 0	2.1760	1.629 0	1.531 2	1.607 9	1.238 1
	4.913 3	4.326 8	3.699 4	3.305 9	2.825 0	2.1760	1.629 0	1.531 2	1.607 9	1.238 1
$(10/19 \sim 11/19)\pi$	1.923 3	1.768 0	1.584 2	1.345 2	1.069 5	0.8063	0.616 3	0.522 5	0.455 0	0.306 7
	4.969 0	4.400 5	3.850 1	3.312 6	2.791 1	2.2967	1.839 2	1.414 9	0.999 2	0.546 4
$(11/19 \sim 12/19)\pi$	3.328 5	2.971 7	2.604 3	2.232 3	1.864 0	1.5086	1.173 7	0.863 1	0.573 6	0.293 0
	4.981 6	4.428 1	3.887 3	3.359 3	2.845 7	2.3479	1.866 5	1.399 2	0.940 1	0.478 7
$(12/19 \sim 13/19)\pi$	3.967 4	3.535 0	3.102 4	2.673 5	2.252 6	1.8432	1.448 1	1.068 5	0.703 6	0.349 6
	4.975 0	4.426 8	3.891 6	3.369 1	2.859 5	2.3625	1.877 6	1.402 8	0.935 1	0.469 7
$(13/19 \sim 14/19)\pi$	4.518 9	4.011 7	3.511 5	3.021 4	2.543 8	2.0809	1.634 1	1.203 9	0.789 6	0.389 4
	4.921 0	4.377 7	3.846 5	3.327 7	2.821 6	2.3280	1.846 2	1.375 1	0.912 4	0.455 3
$(14/19 \sim 15/19)\pi$	4.964 7	4.404 3	3.854 5	3.317 3	2.794 4	2.2874	1.797 3	1.324 4	0.868 3	0.427 7
	4.999 4	4.438 5	3.892 5	3.361 3	2.844 8	2.3427	1.854 1	1.377 9	0.911 9	0.453 8
$(15/19 \sim 16/19)\pi$	4.977 2	4.441 9	3.918 3	3.399 2	2.882 9	2.3710	1.866 7	1.373 9	0.896 6	0.438 0
	4.929 0	4.281 0	3.692 8	3.146 9	2.632 8	2.1443	1.678 1	1.232 1	0.805 1	0.395 3
$(16/19 \sim 17/19)\pi$	4.959 6	4.405 5	3.869 4	3.342 2	2.821 8	2.3096	1.808 7	1.323 4	0.857 7	0.415 7
	4.470 0	3.819 9	3.248 2	2.731 7	2.256 7	1.8151	1.402 3	1.015 8	0.654 4	0.316 5
$17/19 \sim 18/19)\pi$	4.912 3	4.313 3	3.748 2	3.206 3	2.681 9	2.1738	1.684 1	1.216 6	0.776 7	0.369 6
	3.949 1	3.273 2	2.693 0	2.190 5	1.750 6	1.3619	1.016 4	0.709 1	0.437 8	0.201 6
$(18/19 \sim 19/19)\pi$	4.989 6	4.305 2	3.667 3	3.056 8	2.478 9	1.9406	1.446 8	1.001 7	0.609 6	0.274 4
	3.477 2	2.600 7	1.964 0	1.463 2	1.056 3	0.7258	0.463 2	0.263 5	0.123 0	0.038 5

表4 组合非球面聚光镜每一非球面 $x < 0$ 部分反射光线在聚焦光斑处的 R_i 值Tab.4 Values of R_i about the light rays reflected from each aspheric surface ($x > 0$) of a build-up aspherical concentrating mirror

	R_i/cm									
	$1.0H_2$	$0.9H_2$	$0.8H_2$	$0.7H_2$	$0.6H_2$	$0.5H_2$	$0.4H_2$	$0.3H_2$	$0.2H_2$	$0.1H_2$
(19/19 ~ 20/19) π	4.903 7	4.016 3	3.236 1	2.546 6	1.941 1	1.418 5	0.980 3	0.627 3	0.356 5	0.156 6
	2.930 5	1.880 4	1.053 5	0.421 5	0.068 5	0.363 1	0.537 7	0.584 4	0.508 3	0.312 8
(20/19 ~ 21/19) π	4.865 1	3.698 3	2.640 1	1.685 0	0.901 3	0.358 0	0.306 5	0.473 4	0.502 0	0.349 0
	3.022 0	1.458 0	1.085 4	1.337 8	1.621 9	1.783 0	1.791 0	1.632 7	1.294 2	0.757 5
(21/19 ~ 22/19) π	4.952 8	3.385 1	2.002 9	0.779 2	0.715 8	1.395 5	1.768 1	1.783 9	1.480 1	0.888 4
	3.716 4	2.253 8	2.531 6	3.121 6	3.501 7	3.605 6	3.431 8	2.992 0	2.293 7	1.318 0
(22/19 ~ 23/19) π	3.678 5	3.569 1	3.432 6	3.245 9	2.996 7	2.675 3	2.276 1	1.799 5	1.253 5	0.650 1
	4.977 1	4.727 7	4.416 1	4.043 3	3.615 6	3.137 2	2.609 4	2.032 7	1.407 7	0.732 9
(23/19 ~ 24/19) π	4.741 2	4.403 0	4.056 9	3.688 4	3.287 6	2.847 0	2.360 9	1.827 7	1.250 9	0.638 8
	4.997 7	4.646 0	4.257 7	3.829 8	3.367 1	2.874 9	2.355 7	1.809 8	1.237 2	0.636 1
(24/19 ~ 25/19) π	4.976 1	4.642 8	4.277 4	3.868 2	3.411 8	2.912 2	2.377 4	1.815 6	1.232 5	0.629 0
	4.801 3	4.369 1	3.945 2	3.517 8	3.078 2	2.622 2	2.148 8	1.656 7	1.141 6	0.594 6
(25/19 ~ 26/19) π	4.985 7	4.618 3	4.232 0	3.817 3	3.364 3	2.869 8	2.339 0	1.781 4	1.205 8	0.614 5
	4.151 5	3.793 8	3.416 3	3.035 0	2.648 3	2.251 1	1.841 1	1.418 5	0.980 1	0.514 9
(26/19 ~ 27/19) π	4.948 8	4.614 8	4.244 9	3.840 6	3.401 8	2.925 0	2.406 0	1.845 2	1.251 4	0.637 2
	3.382 3	3.080 7	2.790 4	2.491 1	2.180 1	1.857 4	1.521 2	1.171 0	0.809 1	0.431 8
(27/19 ~ 28/19) π	4.938 3	4.848 6	4.340 3	4.431 5	4.490 0	3.860 7	2.968 7	2.418 5	2.158 4	1.541 5
	1.960 9	3.122 5	1.893 5	1.699 0	2.120 5	1.656 9	1.011 1	1.377 5	1.813 2	1.479 3
(28/19 ~ 29/19) π	1.558 1	1.600 6	1.957 8	1.666 6	1.656 6	2.032 5	1.501 0	1.155 1	2.302 6	2.283 4
	1.558 1	1.600 6	1.957 8	1.666 6	1.656 6	2.032 5	1.501 0	1.155 1	2.302 6	2.283 4
(29/19 ~ 30/19) π	1.629 3	1.651 0	1.692 4	1.509 4	1.339 4	1.238 4	1.012 0	0.967 7	1.245 9	1.124 3
	4.471 2	4.462 3	4.339 2	4.140 2	3.901 9	3.550 0	2.975 2	2.315 7	1.816 1	1.255 9
(30/19 ~ 31/19) π	3.397 1	3.139 0	2.808 7	2.494 7	2.189 7	1.872 1	1.543 2	1.214 3	0.880 0	0.499 9
	4.987 4	4.640 8	4.282 6	3.901 6	3.467 9	2.969 2	2.419 7	1.844 4	1.259 6	0.657 9
(31/19 ~ 32/19) π	4.184 5	3.799 4	3.419 5	3.038 0	2.649 5	2.249 5	1.835 6	1.407 3	0.963 9	0.500 5
	4.976 7	4.614 7	4.228 1	3.811 1	3.359 5	2.871 0	2.346 8	1.791 4	1.211 9	0.614 9
(32/19 ~ 33/19) π	4.825 9	4.386 4	3.955 5	3.521 4	3.076 3	2.615 5	2.136 5	1.638 7	1.120 7	0.578 4
	4.969 4	4.629 9	4.262 2	3.857 3	3.410 7	2.921 9	2.393 6	1.831 3	1.241 9	0.631 0
(33/19 ~ 34/19) π	4.999 0	4.651 2	4.262 1	3.832 0	3.368 1	2.875 7	2.356 7	1.811 3	1.238 9	0.637 6
	4.740 2	4.392 7	4.049 8	3.685 1	3.286 3	2.845 7	2.358 5	1.824 3	1.247 9	0.637 3
(34/19 ~ 35/19) π	4.973 9	4.734 4	4.413 6	4.033 1	3.606 4	3.131 4	2.606 0	2.031 3	1.408 6	0.735 0
	3.700 7	3.542 7	3.427 3	3.270 6	3.038 9	2.714 5	2.299 3	1.806 4	1.251 8	0.647 8
(35/19 ~ 36/19) π	4.105 6	2.249 3	2.913 9	3.713 0	3.983 2	3.758 8	3.596 7	3.706 5	3.463 2	2.257 9
	4.896 1	3.400 6	1.565 6	1.008 6	1.773 2	1.789 4	1.806 1	2.323 5	2.494 5	1.719 2
36/19 ~ 37/19) π	3.167 1	1.759 3	1.157 5	1.306 3	1.608 0	1.792 3	1.808 9	1.648 2	1.303 3	0.761 4
	4.986 5	3.734 0	2.671 2	1.757 2	1.005 1	0.480 3	0.365 0	0.485 7	0.504 6	0.349 7
(37/19 ~ 38/19) π	2.983 9	1.904 9	1.080 0	0.468 6	0.114 0	0.312 6	0.474 8	0.523 7	0.460 7	0.286 6
	4.906 6	4.017 2	3.233 8	2.533 8	1.911 0	1.368 7	0.913 3	0.550 8	0.284 4	0.109 5

4 聚焦效果的计算机模拟

图6用516条光线模拟了聚光镜对太阳光束

聚焦效果,图6(a)、(b)为从不同观察角度展示的聚光镜对太阳光束聚焦的模拟效果。从模拟效果可以看出,特定参数的组合非球面作为聚光镜面完全可以实现偏轴聚焦,其光束压缩比约为:

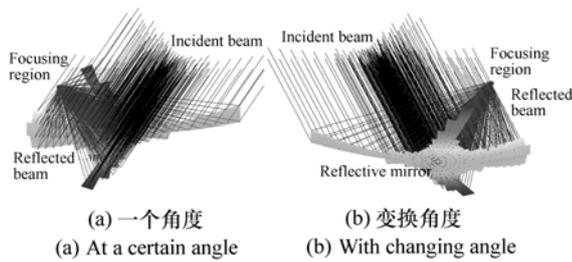


图 6 组合非球面反射型太阳能聚光镜对太阳光线反射的计算机模拟

Fig. 6 Computer simulation of solar beam reflected from a build-up aspherical solar concentrating mirror

$$\cos^2 \theta \sum_{i=1}^{38} H_i^2 / (38 \times 5^2) =$$

$$\cos^2 25.5 \sum_{i=1}^{38} H_i^2 / (38 \times 5^2) \approx$$

$$330.27. \quad (5)$$

取 14 478 条太阳光线且均匀的照射在聚光镜上,反射后被聚焦在 $P'(-95.3951, 200, 0)$ 点周围,假定每条光线所携带的能量相等,则可用反射光线在聚焦光斑处的落点分布统计作为光能量分布。把 $-5 \leq \Delta x' \leq 5$ 、 $-5 \leq \Delta z' \leq 5$ 区域分割成 50×50 个网格,统计所有光线落入到每一个网格中的数目,这些数目代表每一个网格上的相对光强,图 7(a)、(b) 就是该统计分布结果。图 7(a) 是能量统计分布的三维图形,图 7(b) 是能量统计分布的平面图形。图 7(c) 是把 $-5 \leq \Delta x' \leq 5$ 、 $-5 \leq \Delta z' \leq 5$ 区域分割成 100×100 个网格,统计得到的相对光强分布图。从图 7 可以看出,14 478 条光线全部落入到以 P' 点为圆心半径为 5 cm 的垂直于 Y 轴的圆内,但是落点在此圆中的分布并不均匀,中心与正方形对角线部分的强度较大。从图 7(a) 和 (c) 比较来看,网格分割即不能太多又不能太少,太少了反映不了细节问题。太多了,由于统计光强分布所用的光线数量有限,反映的细节问题就会失去真实性。

从图 6 中可以看到,这样设计的聚光镜是一个不规则形状,即不美观也浪费空间,为此可以把表 1 和表 2 中 H_1 和 H_2 都取它们的最小值 41 cm。这样就可以得到一个规则紧凑的聚光镜,是一个很整齐的旋转曲面如图 8 所示,其光束压缩比为:

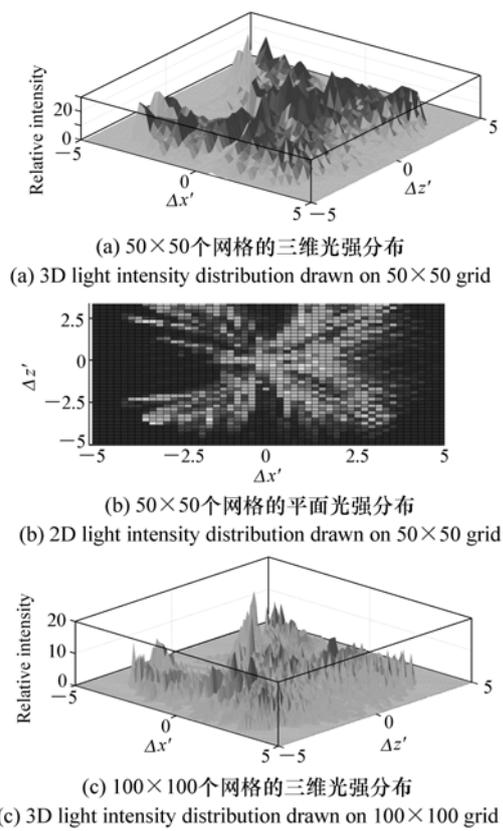


图 7 由统计反射光线落在 P' 点周围的数目得到的反射光束在 P' 点处的光强分布

Fig. 7 Light intensity distribution obtained by counting the number of reflected rays falling in the vicinity of point P'

$\cos^2 25.5 \times 41^2 / 5^2 \approx 54.8$, 压缩比大大降低。尽管如图 8 所示的聚光镜光束压缩比降低,但是却有利于多个这样的聚光镜联合使用。

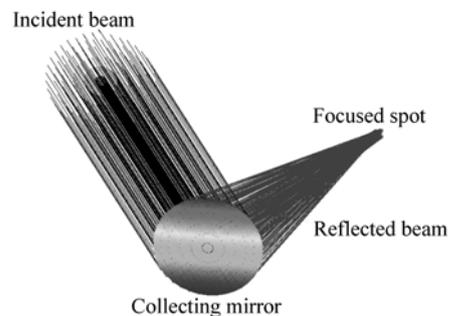


图 8 取 $H_1 = H_2 = 41$ cm, 聚光镜的聚光效果模拟
Fig. 8 The simulation of focusing light of reflecting mirror when $H_1 = H_2 = 41$ cm

5 实验

图9是手工制作的组合非球面聚光镜实物图以及其对太阳光束的聚焦效果照片。采用易于加工的木材作为框架材料,38条木材框架按以下方法加工:由表1和表2的旋转弧度位置取相应的非球面方程参数,代入这些参数到非球面方程(2)中,得到有确定系数的非球面方程,在此非球面方程中,取不同的 h ,计算得到不同的 y 值,这个 y 值就是木条在 h 值处的高度。每一木条的 h 最大取值都为41 cm。 h 取点愈多,制作出的产品愈接近设计精度。按 h 值和 y 值坐标测量出木条 h 处的高度,然后用砂纸按测量高度打磨,就得到了此旋转位置上的非球面木材框架。如此制作的38条非球面木条按其旋转位置固定就形成所要制作的整个非球面框架,在此框架上平滑密铺对太阳光高反的镀铝聚酯薄膜得到如图9(a)的所

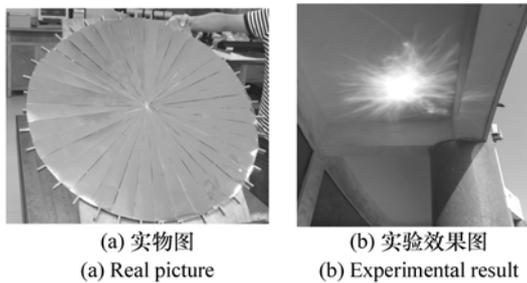


图9 组合非球面反射型太阳能聚光镜实物图及实验效果图

Fig.9 Real picture of a build-up aspherical solar concentrating mirror and experimental results

示的聚光镜实物。用此方法制作的组合非球面聚光镜面,一是木条太少,铺在每一根木条上的聚酯薄膜形不成旋转面,如果用38对两两相同的木条或者38组(每一组木条相同)木条制作成聚光镜,就可能更接近旋转曲面;二是手工制作精度不够,取值点不可能很多,测量有误差,打磨也有误

参考文献:

- [1] BARLEV D,VIDU R,STROEVE P. Innovation in concentrated solar power[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*,

差。所以此实验仅对太阳光束聚焦效果粗略验证。如果采用精密的非球面加工技术,此组合非球面聚光镜对太阳光束的聚焦光斑会大大缩小,光斑亮度会大大提高。图9(b)是用图9(a)实物所做的聚焦太阳光束的效果图。把聚光镜放在距地面大约1 m处,使太阳光聚焦在教学楼走廊的天花板上,即聚光镜与聚焦光斑的垂直距离约2 m,慢慢调整聚光镜与太阳光线之间的角度,即可得到如图9(b)的聚焦光斑。图9(b)说明了本文所设计的反射镜面具有与理论值相吻合的聚焦能力,并且是偏轴聚焦,可以达到不遮挡入射光路的目的。

图9(b)中聚焦光斑的面积较理论值大,一是实物手工制作,误差较大,所制作的聚光镜与理论上的聚光镜差别较大;二是设计过程中假定太阳光线是绝对平行光线,而实际上太阳光线之间有一个大约 $32'$ 的最大夹角,即设计的理论前提与实际情况不相符造成了聚焦光斑的实际面积较理论面积大,所以在实际应用中不能忽略这个夹角的存在。

6 结论

本研究根据光反射定律的矢量形式和非球面方程,推导了照射在非球面反射镜上的太阳光束反射后反射光束的方向矢量与非球面方程参数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}$ 的关系。把反射镜分成38个旋转弧面,每一个旋转曲面的非球面方程参数不同。通过粒子群算法优化选择这组非球面参数,能使由这组非球面参数决定的非球面反射太阳光束到以 $P'(-95.3951, 200, 0)$ 点为圆心半径为5 cm的垂直于 X 轴的圆内,从而达到聚焦太阳光的目的。由于偏轴聚焦,旋转曲面中 $x > 0$ 部分与 $x < 0$ 部分并不对称,因此 $x > 0$ 部分和 $x < 0$ 部分分别进行设计。此非球面太阳能聚光镜可以被用作太阳能高温热产生装置,也可以用在太阳光高效光能转换装置中。

- 2011,95(10):2703-2725.
- [2] OLABI A G. The 3rd international conference on sustainable energy and environmental protection SEEP 2009-guest editor's introduction[J]. *Energy*,2010,35(12):4508-4509.
- [3] 胡志强,秦颖,姜妍彦,等. CoAl_2O_4 粉体制备及在染料敏化太阳电池中的应用[J]. *光学精密工程*,2013,21(8):2017-2022.
- HU ZH Q,QIN Y,JIANG Y Y,*et al.*. Preparation of spinel CoAl_2O_4 nanopowders and their application to DSSC[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(8):2017-2022. (in Chinese)
- [4] 韩雪冰,魏秀东,卢振武,等. 太阳能热发电聚光系统的研究进展[J]. *中国光学*,2011,4(3):233-239.
- HAN X B,WEI X D,LU ZH W,*et al.*. Review of concentration system in solar thermal power plant[J]. *Chinese Optics*,2011,4(3):233-239. (in Chinese)
- [5] 闫勇,金光. 空间太阳能电站发展及研究[J]. *中国光学*,2013,6(2):129-135.
- YAN Y,JIN G. Development and research of solar power systems[J]. *Chinese Optics*,2013,6(2):129-135. (in Chinese)
- [6] ZONDAG H A,DE VRIES D W,VAN HELDEN W G J,*et al.*. The yield of different combined PV-thermal collector designs[J]. *Solar Energy*,2003,74(3):253-269.
- [7] FERNANDEZ-GARCIA A A,ZARZA E,VALENZUELA L,*et al.*. Parabolic-trough solar collectors and their applications[J]. *Renew Sustain Energy Rev.*,2010,14(7):1695-1721.
- [8] SALA G,PACH N D,ANT N I. Book 1: "Classification of PV Concentrators", Test, Rating, and Specification of PV Concentrator Components and Systems, C Rating Project. [EB/OL]. [2010-03-05]. <http://www.ies-def.upm.es/ies/CRATING/crating.htm>.
- [9] 潘其坤,张来明,谢冀江,等. 基于卡塞格林结构的高倍太阳能聚光镜[J]. *中国光学*,2012,5(4):388-393.
- PAN Q K,ZHANG L M,XIE J J,*et al.*. High power solar condenser based on Cassegrain structure[J]. *Chinese Optics*,2012,5(4):388-393. (in Chinese)
- [10] HORNE S,CONLEY G,GORDON J D. A Solid 500 Sun Compound Concentrator PV Design[C]. In Proceedings of the IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, 2006:694-697.
- [11] FACÃO J,OLIVEIRA A C. Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator[J]. *Renewable Energy*,2011,36(1):90-96.
- [12] ISELLAMI N,MALLICK T K. Optical efficiency study of PV crossed compound parabolic concentrator[J]. *Applied Energy*,2013,102:868-876.
- [13] 秦华,类成新,刘汉法,等. 高次柱面反射型太阳能聚光镜的光学设计[J]. *物理学报*,2013,62(10):104215.
- QIN H,LEI CH X,LIU H F,*et al.*. Optical design of a reflective concentrator mirror utilizing higher order cylindrical surfaces[J]. *Acta Phys. Sin.*,2013,62(10):104215. (in Chinese)
- [14] BOMM J,BCHTEMANN A,CHATTEEN A J,*et al.*. Fabrication and full characterization of state-of-the-art quantum dot luminescent solar concentrators[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*,2011,95(8):2087-2094.
- [15] 郑宏飞,何开岩,陶涛,等. 反射式顺向聚焦整体跟踪式高温太阳能集热装置[J]. *太阳能学报*,2009,30(8):1033-1036.
- ZHENG H F,HE K Y,TAO T,*et al.*. The Reflection style same direction focusing high temperature solar collector with holistic tracking function[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*,2009,30(8):1033-1036. (in Chinese)
- [16] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998.
- YUAN X C. *Optical Design*[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,1998. (in Chinese)
- [17] QIN H,LEI CH X,LIU H F,*et al.*. Optical design of an aspherical cylinder-type reflecting solar concentrator[J]. *Energy*,2013,57:751-758.
- [18] QIN H. Aberration correction of a single aspheric lens with particle swarm algorithm[J]. *Optics Communications*,2012,285(13-14):2996-3000.

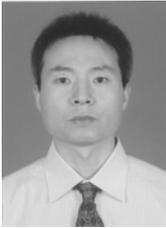
作者简介:



秦 华(1964—),男,山东临沂人,博士,副教授,2002年于青岛海洋大学获得硕士学位,2005年于南开大学获得博士学位,主要从事光学设计、固体激光器件等方面的研究。E-mail:zfqinh@163.com



葛硕硕(1990—),男,山东临沂人,硕士,2014年于山东理工大学获得硕士学位,主要从事光学设计方面工作和研究。E-mail:shuo_520@yeah.net



冯东太(1962—),男,山东济南人,博士,教授,1982年于山东师范大学获得学士学位,1991年于青岛海洋大学获得硕士学位,2003年于山东大学获得博士学位,主要从事光学、凝聚态物理等方面的研究。E-mail:fengdongtai@sdut.edu.cn



王 勇(1992—),男,山东枣庄人,硕士,2014年于山东理工大学获得硕士学位,主要从事光学设计方面工作和研究。E-mail:wangyongchina@126.com