

高次柱面反射型太阳能聚光镜的光学设计*

秦华[†] 类成新 刘汉法 葛硕硕

(山东理工大学理学院, 淄博 255049)

(2012年12月5日收到; 2012年12月28日收到修改稿)

提出了一种新型高效太阳能聚光镜, 这种聚光镜用一组特定系数, $a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}, a_{16}$ 与 C 的高次柱面内壁的一部分作为反射镜. 利用高次柱面方程和光反射定律, 推导出了在高次柱面内壁上太阳反射光束的方向矢量与高次柱面系数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}, a_{16}$ 的关系, 通过优化设计这些系数, 可以使入射到高次柱面内壁上的太阳光束反射后全部聚焦在一条与柱面母线平行的宽度很窄的线段上, 形成线聚光. 这组特定系数用粒子群优化算法求得, 并经计算机模拟证明其聚焦效果. 用这组特定系数的高次柱面作为聚光镜, 其对光的压缩比可达 148 倍, 其线性光斑可作为一种强光源或高温光源. 高次柱面反射镜可由金属或玻璃直接磨制而成, 也可由高次柱面骨架和铺设在骨架上的镀铝聚酯薄膜构成.

关键词: 太阳能聚光镜, 高次柱面, 多项式系数优化, 线性聚焦

PACS: 42.79.Ek, 88.40.fr, 88.40.-j

DOI: 10.7498/aps.62.104215

1 引言

化石能源日渐萎缩, 为了满足日益增长的能源需要, 对清洁、廉价的可再生能源的开发日渐迫切. 在未来, 要取得充足的清洁能源供应是一种巨大的社会挑战. 太阳辐射作为一种最大可利用的无碳清洁能源, 一小时提供给地球的辐照能足够整个地球使用一年. 尽管如此, 今天的太阳能发电也只是提供世界电力生产的很小部分. 为了有效地利用太阳能, 科研工作者正在进行光伏发电和光能收集两方面的研究, 前者涉及利用太阳能电池通过光伏效应直接发电^[1], 后者使用各种方法将太阳辐照光束聚焦以便太阳能高温热利用和提高光伏器件的转换效率^[2].

聚光有反射式聚光和折射式聚光, 根据聚焦区域形状的不同, 主要有线聚光和点聚光. 在一些大型太阳能利用装置中, 多采用反射式聚光. 点聚光方式大多采用旋转抛物面式聚光^[3]、抛物碟式聚光^[4]和中央塔式聚光^[5], 线聚光如槽式聚光^[6,7]和菲涅耳反射式聚光^[8]. 槽式聚光包括抛物柱面聚光、复合抛物面聚光、渐开线柱面聚光和球柱面

状的碟式聚光等, 在太阳能利用中已有很好的应用. 菲涅耳线聚光是由多条平的或稍带弹性弯曲的镜面, 按一定的位置和角度放置组成初级反射镜场, 将阳光聚焦到位于初级反射镜场上方的一线形接收器上的聚光方式. 菲涅耳线聚光集热器已经开始应用于一些大规模的热发电示范^[9-11]. 文献^[8, 12]提出了适合大规模太阳能热发电厂的紧凑型线聚光菲涅耳反射器 (compact linear Fresnel reflector, CLFR) 多接收塔技术. 德国研究者研制了一个热功率 50 kW 的小型线聚光菲涅耳集热器, 运行温度达 200 °C^[13,14].

在线聚光菲涅耳集热器中, 由于接收器在反射镜的上方, 反射镜场会被接收器遮挡, 接收器的光口宽度应尽可能小, 这就要求聚光光斑的宽度要尽可能小, 使得在减少遮挡的同时, 还可提高接收器上的辐照度. 但是接收器受光线度一般又不可能很小, 例如在焦点上的太阳灶或者点火装置会挡住部分入射光束, 这就减少了阳光的反射, 直接影响太阳能利用效率. 为了不挡入射光路, 目前大部分太阳能聚光镜的设计采用了偏轴聚焦. 偏轴聚焦就是使入射光束与旋转抛物面的主轴成一定的夹角, 从

* 山东省自然科学基金 (批准号: ZR2012FM001) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zfqinh@gmail.com

而使聚焦点离开主轴. 但是离开主轴后形成的不是焦点而是一个散斑, 散斑的形状随光线与主轴的夹角而变化, 因此为了控制焦斑的形状, 又要对旋转抛物面进行改造, 有的将抛物面分割成若干段的反射镜, 光学上称之为菲涅耳镜, 也有把菲涅耳镜做成连续的螺旋式反光带片, 如此又给聚光镜面的制作带来一定困难.

本研究提出了用一种高次柱面太阳能聚光镜, 克服了现有技术存在的聚光镜面制作麻烦, 离开主轴的焦点位置和形状不易控制的问题.

2 高次柱面反射镜

形如 $F(x, y) = 0$ 的方程在空间决定一柱面, 该柱面的母线平行于 Oz 轴. 同样, 方程 $F(x, z) = 0$ 决定母线平行于 Oy 轴的柱面; $F(y, z) = 0$ 决定母线平行于 Ox 轴的柱面.

高次柱面的标准方程为

$$x = \frac{Cy^2}{1 + \sqrt{1 - y^2C^2(1 + a_2)}} + a_4y^4 + a_6y^6 + a_8y^8 + a_{10}y^{10} + a_{12}y^{12} + a_{14}y^{14} + a_{16}y^{16}, \quad (1)$$

其中 x 为曲面的弯曲量, C 为顶点的曲率, $a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}, a_{16}$ 为高次面系数, a_2 是与二次曲面的离心率有关的常数.

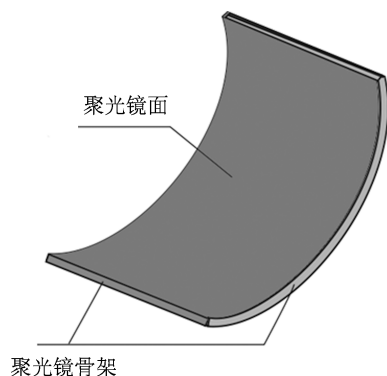


图1 高次柱面反射型太阳能聚光镜外形示意图

高次柱面反射型太阳能聚光镜的外形结构如图1所示, 由高次柱面塑料骨架和镀铝的金属薄膜构成. 当平行于 XOY 面的入射光线与 X 轴成 θ 角入射到高次柱面聚光镜上时, 其反射光束的聚光效果如图2所示, 光束在聚光镜外聚焦成一条宽度很小的线段型光斑. 从图2中可以想到, 达到聚光效果的关键是聚光镜的面型设计, 即高次方程参数 $a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}, a_{16}, C$ 的设计. 在下面

章节中将讨论高次方程参数 $a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}, a_{16}, C$ 的求解过程及所考虑的因素, 首先研究高次柱面的反射规律.

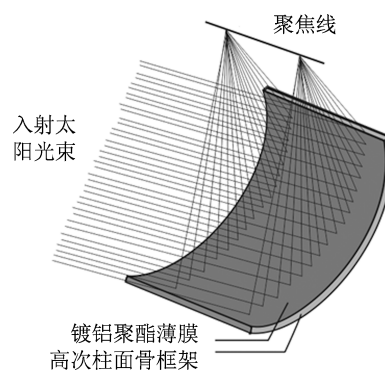


图2 太阳光束照射到高次柱面反射型太阳能聚光镜上的聚焦效果图

3 太阳光束入射到高次柱面内壁上的反射规律 —— 聚焦原理

3.1 首先研究过顶点 O 的一条特殊光线

图3中的曲线为高次柱面与 $z = 0$ 面的一条截线, 截线方程就是方程(1). 建立如图3所示的坐标系, 坐标系原点 O 在截线的顶点, 以这个顶点为界, $y > 0$ 部分属于一个高次方程, $y < 0$ 部分属于另一个高次方程, 这两个高次方程的参数 $a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}, a_{16}, C$ 分别求解. 上下两部分在 O 点处的法线都沿 X 轴的反方向, 入射光线在 $z = 0$ 面内, 入射到 O 点处的一条光线与 X 轴的夹角是 θ . 根据反射定律, 反射光线与 X 轴的夹角也是 θ , 且过 $P'(x', x' \tan \theta)$ 点, 其中 x' 为离开顶点的 X 坐标值. 因此反射光斑位置并不是任意设置的, 其偏离 X 轴的位置与离开曲面顶点 O 的 x' 值有关, x' 越大, 偏轴距离 $x' \tan \theta$ 越大.

假设 $\theta = 25.5^\circ$, 光斑离开顶点 O 的 x' 值为 50 cm , 则偏轴距离为 $50 \tan(25.5^\circ) = 23.8488$, 当光斑离开顶点 O 的 x' 值为 60 cm , 则偏轴距离为 $60 \tan(25.5^\circ) = 28.6185$. 也就是说, 入射光线与 X 轴夹角为 25.5° 时, 这种类型的聚光镜, 偏轴距离只能是离开曲面顶点 O 的 x' 值的一半左右. 如果光斑离顶点的距离为 30 cm , 则光斑偏轴距离只能在 $30 \tan(25.5^\circ) = 14.3093 \text{ cm}$. 为了不遮挡光路, 应该增大光斑偏轴距离, 也就应该相应增大光斑离开反射面顶点的距离.

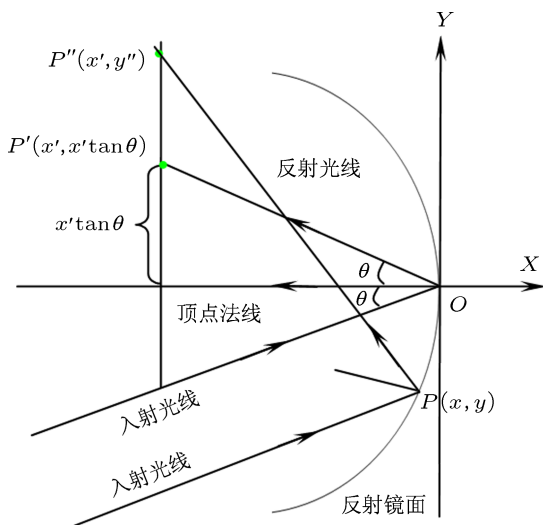


图3 过曲面顶点O处的入射光、反射光示意图

3.2 不过顶点O的一般光线

3.2.1 由P₀和Q₁求入射光线与高次曲线的交点

如图4所示, P₀(x₀, y₀)为入射光线上一点, Q₁(α₁, β₁)表示沿光线行进方向上的单位向量, 光线与高次曲线的交点可以通过如下方法近似求得.

首先求出光线和Y轴的交点P₁, 并把P₁作为光线与高次曲面的第一次近似解, 如图4所示, 然后由P₁(x₁, y₁)做X轴的平行线, 交曲线于一点P'₁(x'₁, y₁), 把光线和过P'₁点的切线的交点P₂(x₂, y₂)作为新的近似解. 然后重复以上步骤直到满足要求的精度为止.

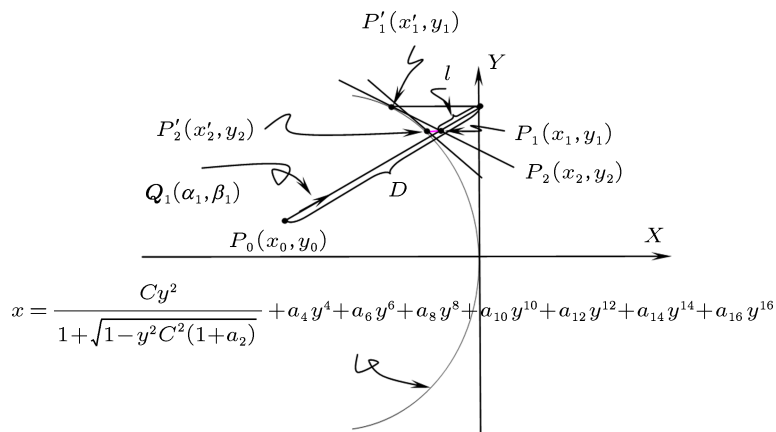


图4 入射光线与高次曲面交点追迹

由图4可直接得到:

$$D = x_0/\alpha_1, \quad \begin{cases} x_1 = 0, \\ y_1 = y_0 + D\beta_1. \end{cases}$$

令 $A = \sqrt{1 - (1 + a_2)C^2 y^2}$, 由 $P_1(x_1, y_1)$ 根据方程(1)求得 $P'_1(x'_1, y_1)$ 的坐标 x'_1

$$x'_1 = \frac{Cy_1^2}{1+A} + a_4y_1^4 + a_6y_1^6 + a_8y_1^8 + a_{10}y_1^{10} + a_{12}y_1^{12} + a_{14}y_1^{14} + a_{16}y_1^{16}.$$

下面求曲线在 P'_1 的切线方程, 首先把方程(1)改写为如下形式:

$$F(x, y) = \frac{Cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + a_2)C^2 y^2}} + a_4y^4 + a_6y^6 + a_8y^8 + a_{10}y^{10} + a_{12}y^{12} + a_{14}y^{14} + a_{16}y^{16} - x = 0,$$

把 $F(x, y)$ 分别对 x, y 求偏导得:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=x'_1, y=y_1} = -1, \\ \frac{\partial F}{\partial y} \Big|_{x=x'_1, y=y_1} = y_1 \left(\frac{Ch^2}{\sqrt{1 - (1 + a_2)C^2 y_1^2}} + 4a_4y_1^2 + 6a_6y_1^4 + 8a_8y_1^6 + 10a_{10}y_1^8 + 12a_{12}y_1^{10} + 14a_{14}y_1^{12} + 16a_{16}y_1^{14} \right) = m. \end{cases} \quad (2)$$

过 P'_1 点的切线方程为

$$\frac{\partial F}{\partial x}(x - x'_1) + \frac{\partial F}{\partial y}(y - y_1) = 0, \quad (3)$$

其中 (x, y) 为此切线上的任一点. 把以上偏导(2)代入(3)式得:

$$-(x - x'_1) + m(y - y_1) = 0.$$

假定由 $P_1(x_1, y_1)$ 到光线和切线的交点

$P_2(x_2, y_2)$ 之间的距离为 1, 则 P_2 点的坐标应满足以下关系:

P_2 点的坐标

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + \alpha_1 l, \\ y_2 = y_1 + \beta_1 l, \end{cases} \quad (4)$$

P_2 点应在切线上, 所以 (x_2, y_2) 满足切线方程, 即

$$-(x_2 - x'_1) + m(y_2 - y_1) = 0.$$

将上面的 x_2, y_2 的表达式 (4) 代入上式, 求解 l

$$-(x_1 + \alpha_1 l - x'_1) + m(y_1 + \beta_1 l - y_1) = 0,$$

求得: $l = \frac{x'_1 - x_1}{\alpha_1 - \beta_1 m}$, 代入 P_2 点得到 P_2 点的坐标. 把 P_2 作为新的近似解, 重新计算下去, 直到 $|x'_i - x_i|$ 小

于预定的一个小量为止.

3.2.2 求投射点法线方向的单位向量 N

如图 5 所示, 投射点坐标为 $P(x, y)$. 曲面 $F(x, y) = 0$ 上任意一点法线方向上单位向量 (外法线方向) 的方向余弦为

$$\alpha_N = \frac{-F'_x}{\sqrt{F'^2_x + F'^2_y}},$$

$$\beta_N = \frac{-F'_y}{\sqrt{F'^2_x + F'^2_y}}.$$

代入偏导后得:

$$\alpha_N = \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}, \quad \beta_N = \frac{-m}{\sqrt{1+m^2}}.$$

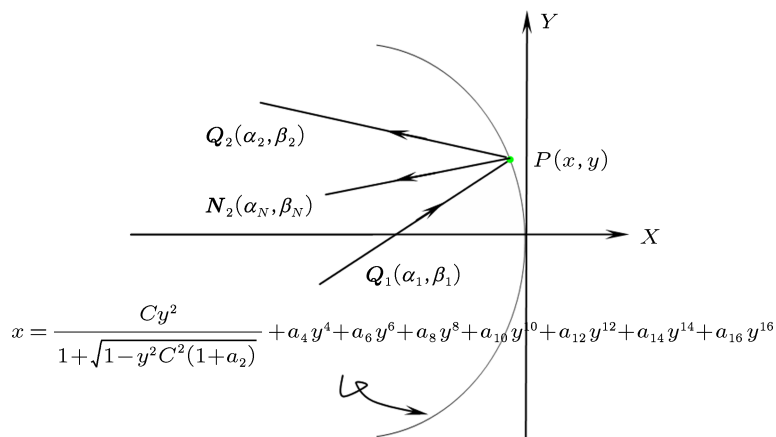


图 5 入射光矢量、入射点法线矢量及反射光矢量关系示意图

3.2.3 求反射光线矢量 $Q_2(\alpha_2, \beta_2)$

反射定律向量公式为 $Q_1 \times N = Q_2 \times N$, 式中, $N(\alpha_N, \beta_N)$ 为光线与高次曲面交点处的单位法向量, 反射定律向量公式移项得 $(Q_1 - Q_2) \times N = 0$, 说明 $(Q_1 - Q_2)$ 和 N 必然平行, 则以下公式必然成立:

$$Q_1 - Q_2 = gN, \quad (5)$$

式中 g 为一系数, 将以上公式点积 N 得:

$$(Q_1 - Q_2) \cdot N = g.$$

两个单位向量的点积等于此二向量夹角的余弦. 设 I 为入射角, I' 为反射角, 则

$$g = -\cos I - \cos I'.$$

反射时 $\cos I' = \cos I$, 所以

$$g = -2\cos I. \quad (6)$$

$$\cos I = Q_1 \cdot N = |\alpha_1 \alpha_N + \beta_1 \beta_N|.$$

由 (5) 式得

$$Q_2 = Q_1 - gN, \quad (7)$$

其分量形式

$$\alpha_2 = \alpha_1 - g\alpha_N, \quad \beta_2 = \beta_1 - g\beta_N.$$

从以上推导过程可知, 当 $Q_1(\alpha_1, \beta_1)$ 一定时, 反射光线方向的单位向量 $Q_2(\alpha_2, \beta_2)$ 与 g 和 N 有关, 而 g 亦是 N 的函数, 所以 $Q_2(\alpha_2, \beta_2)$ 是 N 的函数, 而 N 是高次柱面参数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}, a_{16}$ 的函数. 因此只要合适的选择这些参数, 就能使照射在高次曲面上任一点处的光线反射后聚焦到一特定点上, 达到聚焦的目的.

4 入射光束孔径、聚焦点位置设置及高次方程的参数优化

4.1 入射光束孔径的设置

图 6 为入射太阳光束孔径示意图. 图中 $OO_1 =$

H_1 为聚光镜下半部的入射光束孔径, $OO_2 = H_2$ 为聚光镜上半部的入射光束孔径, $O_1O_2 = H$ 为聚光镜总的入射光束孔径. 我们取 $H_1 = 90$ cm, $H_2 = 45$ cm, 则总的入射光束孔径 $H = 135$ cm. 入射光束孔径的大小决定了聚焦点的光能量密度.

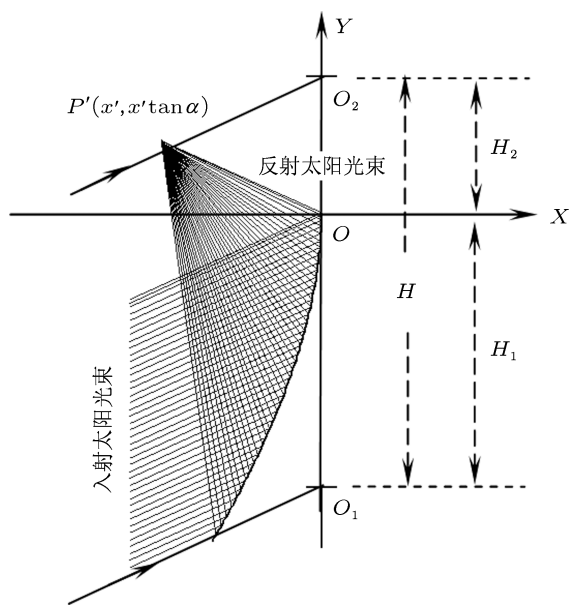


图6 入射太阳光束孔径示意图

4.2 聚焦点位置的设置与高次方程的参数优化

如图3所示, 取聚焦点 $P'(x', x' \tan \theta)$, 令 $x' = -50$, $\theta = 25.5^\circ$, 则 $P'(-50, 23.8488)$. 如果投射点为 $P(x, y)$, 则反射光线上的一点 $P''(x'', y'')$, x'' 和 y'' 的关系如下:

$$y'' = y - \frac{\beta_2}{\alpha_2}(x - x') = y - \frac{\beta_2}{\alpha_2}(x + 50), \quad (8)$$

y'' 与 $x' \tan \theta = 23.8488$ 的差 $\Delta y'$ 作为评价量, 即 $\Delta y' = y'' - x' \tan \theta = y'' - 23.8488$. $\Delta y'$ 的绝对值愈小, 反射光线聚焦愈好, $\Delta y'$ 的目标值为 0. 从以上分析可以看出, $\Delta y'$ 是参数 $a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}, a_{16}, C$ 的函数, 可以用粒子群算法对此进行优化. 表1和表2分别记录了聚光镜上、下半部分高次方程参数的优化结果以及部分 $\Delta y'$ 的数值. 表中的 $-1.00 \times H_1, -0.85 \times H_1$ 等表示入射光线在 OO_1 上的入射高, $1.00 \times H_2, 0.85 \times H_2$ 等表示入射光线在 OO_2 上的入射高. 从表1中看出 $\Delta y'$ 的最大值和最小值之间相差 0.1636 cm, 从表2中看出 $\Delta y'$ 的最大值和最小值之间相差 0.8254 cm. 也就是说, 聚焦光束的宽度小于 1 cm, 压缩比约为

$135 \cos(25.5^\circ) / 0.8254 \approx 148$ 倍.

表1 聚光镜上半部分高次方程参数的优化结果及部分 $\Delta y'$ 值

$r(1/C)/\text{cm}$	a	$\Delta y'/\text{cm}$
	$a_2 = -1.688481$	0.0501($1.00 \times H_2$)
	$a_4 = -5.000000 \times 10^{-7}$	-0.0465($0.85 \times H_2$)
	$a_6 = 5.000000 \times 10^{-11}$	-0.0014($0.70 \times H_2$)
-117.117964	$a_8 = -2.252668 \times 10^{-15}$	0.0556($0.55 \times H_2$)
	$a_{10} = 0$	0.0418($0.40 \times H_2$)
	$a_{12} = 0$	-0.0494($0.25 \times H_2$)
	$a_{14} = 0$	-0.1080($0.10 \times H_2$)
	$a_{16} = 0$	-0.0000($0.00 \times H_2$)

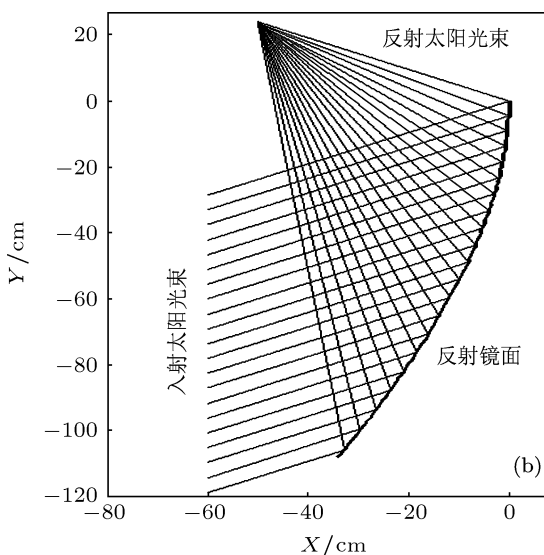
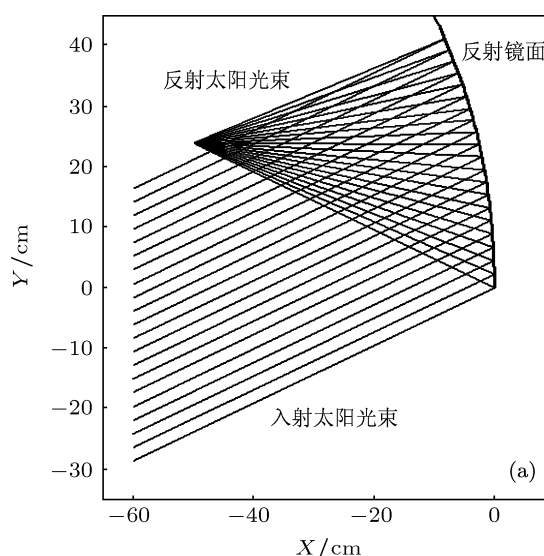


图7 高次柱面反射型太阳能聚光镜上、下半部太阳光线反射的计算机模拟 (a) 上半部; (b) 下半部

图7(a)是聚光镜上半部分对太阳光束聚焦的计算机模拟; 图7(b)是聚光镜下半部分对太阳光束聚焦的计算机模拟; 图8是整个聚光镜对太阳光束

聚焦的计算机模拟, 图中由于上下两半部分的模拟都用了 21 条光线, 而上半部分 $H_2 = 45\text{ cm}$, 下半部分 $H_1 = 90\text{ cm}$, 所以上半部分的光线较密.

表 2 聚光镜下半部分高次方程参数的优化结果及部分 $\Delta y'$ 值

$r(1/C)/\text{cm}$	a	$\Delta y'/\text{cm}$
	$a_2 = -4.449153$	$-0.1858(-1.00 \times H_1)$
	$a_4 = -2.927654 \times 10^{-8}$	$-0.1722(-0.85 \times H_1)$
	$a_6 = 3.975826 \times 10^{-13}$	$-0.1728(-0.70 \times H_1)$
-135.644301	$a_8 = -7.942335 \times 10^{-19}$	$0.3057(-0.55 \times H_1)$
	$a_{10} = 5.000000 \times 10^{-22}$	$0.2067(-0.40 \times H_1)$
	$a_{12} = 0$	$-0.3442(-0.25 \times H_1)$
	$a_{14} = 0$	$-0.5197(-0.10 \times H_1)$
	$a_{16} = 0$	$-0.0000(-0.00 \times H_1)$

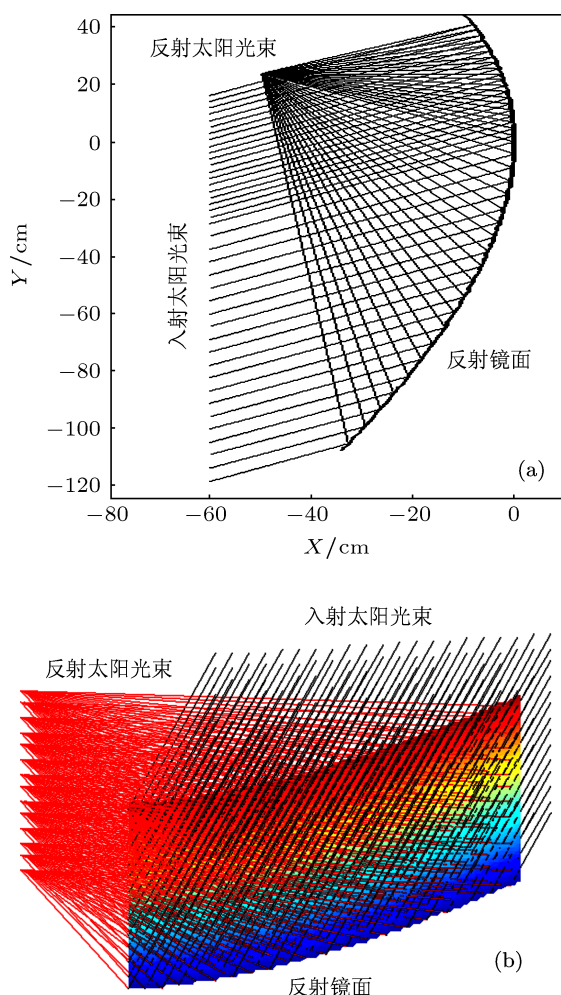


图 8 高次柱面反射型太阳能聚光镜上下两半部整体对太阳光线反射的计算机模拟 (a) 平面效果图; (b) 立体效果图

5 实验

图 9 是高次柱面聚光镜的制作过程及实物和聚焦效果图. 由于金属或玻璃高次曲面加工难度大,

少量加工价格比较昂贵, 所以我们采用易于加工的木材作为框架材料, 用阶梯逼近的方法制作, 如图 9(a) 所示. 按表 1, 2 中的数据代入到高次柱面方程中, 取不同的 y 值, 计算得到不同的 x 值. (x, y) 值点取的越多越准确, 按 x 值加工木块的高度, 然后按 (x, y) 点固定这些木块形成高次柱面框架, 在高次柱面框架上平滑铺以对太阳光高反的镀铝聚酯薄膜则形成了图 9(b) 的实物. 手工制作精度不够精准, 仅对实验效果粗略验证. 如果采用程控机床准确加工, 形成的线光斑窄度和亮度会大大提高. 图 9(c) 是用图 9(b) 实物所做的聚焦效果图, 从图中可以看出本文所设计的反射镜面完全可以达到线聚焦目的.

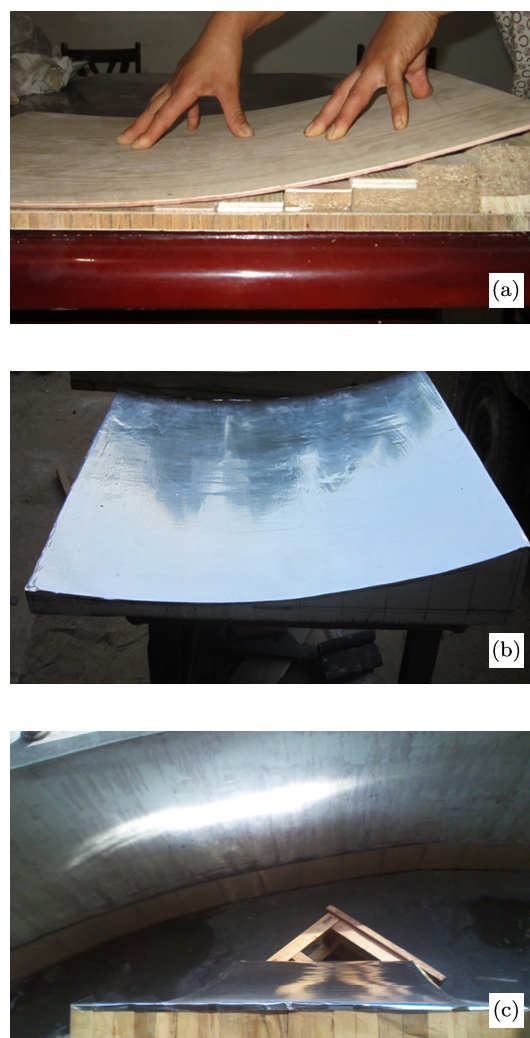


图 9 高次柱面反射型太阳能聚光镜实物图及实验效果图 (a) 制作方法; (b) 实物图; (c) 实验效果图

图 9(c) 中聚焦光斑的线宽度较宽的原因, 一是由于实物比较粗糙, 二是由于入射到地球表面的太阳光线并不是真正的平行光线, 而是有一个很小的

夹角 (大约 32°). 这个夹角的含义是, 即使高次柱面做得再精确, 反射光也不会聚焦在一个点上, 而是一个放大的有着一定直径的光团, 它就是理论上的太阳像, 聚焦光斑实际上是由反射面形成的很多个太阳像的叠加, 其光斑线宽度比理论计算要大一些.

6 结论

本文利用高次柱面方程, 推导出了在高次柱面

上太阳光反射光束的方向矢量与高次柱面系数 $C, a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}, a_{16}$ 的关系, 通过适当设计这些系数, 可以使入射到高次柱面内壁上的太阳光束反射后全部聚焦在一条与柱面母线平行的宽度很窄的线段上, 形成线聚光, 从而达到聚焦太阳能的目的. 这种高次柱面反射镜聚光本领强, 制作方便, 可以在太阳热水器、太阳能干燥、太阳能温室、太阳能制冷与空调、太阳能热发电及光伏发电系统等使用.

-
- [1] Wu L H, Zhang X Z, Yu Y, Wan C H, Tan X Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 037807 (in Chinese) [吴利华, 章晓中, 于奕, 万蔡华, 谭新玉 2011 物理学报 **60** 037807]
- [2] Cui M, Chen N F, Deng J X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 034216
- [3] Cheng K, Han D 2009 *Acta Energi. Solar Sin.* **30** 445 (in Chinese) [成珂, 韩迪 2009 太阳能学报 **30** 445]
- [4] Kussul E, Baidyk T, Makeyev O, Lara-rosano F, Saniger J M, Bruce N 2008 *WSEAS Trans. Power Syst.* **3** 577
- [5] Segal A, Epstein M 1999 *Solar Energy* **65** 207
- [6] Pei G, Fu H D, Ji J, Han C W 2010 *Acta Energ. Solar Sin.* **31** 1324 (in Chinese) [裴刚, 符慧德, 季杰, 韩崇巍 2010 太阳能学报 **31** 1324]
- [7] Xu Y F, Li M, Wang L L, Lin W X, Zhang X H, Xiang M, Wang Y F, Wei S X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8067 (in Chinese) [徐永锋, 李明, 王六玲, 林文贤, 张兴华, 项明, 王云峰, 魏生贤 2009 物理学报 **58** 8067]
- [8] Mills D R, Morrison G L 2000 *Solar Energy* **68** 263
- [9] Häberle A, Zahler C, Lerchenmüller H, Mertins M, Wittwer C, Trieb F, Dersch J 2002 *Proceedings of the 11th SolarPaces International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies* Zürich, Switzerland, September 2002
- [10] Eck M, Uhlig R, Mertins M, Häberle A, Lerchenmüller H 2007 *Heat Trans. Engin.* **28** 42
- [11] Bernhard R, Laabs H G, de Lalaing J 2008 *Proceedings of the 14th SolarPaces International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies* Las Vegas, USA, March 2008
- [12] Mills D R, Morrison G L, Pye J, Le Lievre P 2006 *J. Solar Energy Engin.* **128** 118
- [13] Kalogirou S A, Tripanagnostopoulos Y 2007 *Appl. Thermal Engin.* **27** 1259
- [14] Häberle A, Berger M, Luginsland F, Zahler C, Baitsch M, Henning H M, Rommel M 2006 *Proceedings of the 13th SolarPaces International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies* Seville, June 20–24, 2006

Optical design of a reflective concentrator mirror utilizing higher order cylindrical surfaces*

Qin Hua[†] Lei Cheng-Xin Liu Han-Fa Ge Shuo-Shuo

(Department of Sciences, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

(Received 5 December 2012; revised manuscript received 28 December 2012)

Abstract

In this paper, we present a new and highly efficient solar concentrating mirror. It is composed of partial high-order cylinder inner wall which is determined by two sets of specific coefficients $a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}, a_{16}$ and C . According to the higher-order cylindrical equation and the optical law of reflection, the relationship between the direction vectors of sunbeams reflected from the cylindrical inner wall and the coefficients of a higher order polynomial equation, $a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}, a_{16}$ and C is derived. By optimizing these coefficients, all sunbeams incident on the inner wall of higher-order cylinder can be reflected and focused into a very thin line segment parallel to the cylindrical busbar, which means line focus. Two sets of particular coefficients associated with the high-order cylindrical surface are obtained by using particle swarm optimization algorithm. The focusing effect of the solar concentrating mirror, defined by the particular set of coefficients, is demonstrated by using computer simulations. The concentrator mirror has a light compression ratio of about 148 : 1 and its linear spot can be used as a strong light source or a high temperature heat source. The higher-order cylindrical mirror can be made of metal or glass in three steps: cutting, grinding, and polishing, and may also be formed by a higher order cylindrical framework and an aluminized polyester film laid on the framework.

Keywords: solar concentrating mirror, higher-order cylindrical surface, optimization of polynomial coefficients, linear focus

PACS: 42.79.Ek, 88.40.fr, 88.40.-j

DOI: 10.7498/aps.62.104215

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2012FM001).

[†] Corresponding author. E-mail: zfqinh@gmail.com