

文章编号: 1001-3806(2016)04-0560-05

单个椭球面扩束透镜的设计研究

袁文峰

(山东理工大学 理学院, 淄博 255049)

摘要: 为了设计单个椭球面缩束(扩束)透镜,采用全面学习策略的粒子群算法作为设计方法,依据光线折射定律矢量形式所表征的椭球面折射特性进行了理论分析,得到了用全面学习策略的粒子群优化算法设计单个椭球面缩束(扩束)透镜的适应度数据公式,设计出了线度小于170mm缩束14.16倍的单个椭球面缩束透镜,并用光线追迹方法模拟了缩束或扩束过程。结果表明,单个椭球面透镜可以起到缩束或者扩束作用,全面学习策略的粒子群算法可用于椭球面缩束透镜的设计。这一结果对于简化扩(缩)束系统结构、设计出适应于不同要求的单个扩(缩)束透镜是有帮助的。

关键词: 光学设计; 扩束; 非球面透镜; 粒子群算法**中图分类号:** TN202;O435**文献标志码:** A**doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.022

Design of a beam expander with a single aspheric lens

YUAN Wenfeng

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

Abstract: In order to design a beam expander or beam compressor with a single ellipsoidal lens, the comprehensive learning strategy particle swarm algorithm was introduced. The refraction characteristics of an ellipsoidal surface expressed by the vector form of refraction law was theoretically analyzed. Fitness data formula in the comprehensive learning strategy particle swarm optimizer was gotten. A single ellipsoidal beam-expanding lens with length less than 170mm and shrinkage rate of 14.16 was designed. The process of beam-shrinking or beam-expanding was simulated by using the ray tracing method. Simulation results show that a single ellipsoidal lens can play the role in compressing beam or expanding beam, and the comprehensive learning particle swarm algorithm can be applied to the design of beam expanders/compressors. The results is helpful in simplifying beam expanding/compressing systems and designing a single expanding/compressing beam lens to meet different requirements.

Key words: optical design; expanding beam; aspheric lens; particle swarm algorithm

引 言

在工程光学或者在物理实验中经常遇到缩束或扩束问题。最常用的扩束系统有折射式系统^[1-2]、反射式系统^[3-4]和折反混合系统^[5]。相比于折射系统,反射式扩束系统没有色差,且容易实现大口径高能量反射,在航天、遥感等领域应用广泛^[6]。工程光学实验以及物理实验中主要用到的是折射式扩束系统,本文中也主要研究折射式扩束系统。传统的折射式扩束系统,至少由两个单个透镜构成^[7-8],使两个不同焦距单个透镜的焦点重合,且两个透镜的像差最小化,扩束比即为两透镜的焦距之比。为了提高变倍比,就要增加镜片的数量,但

是镜片数量增加容易引起衍射散斑条纹,影响扩束光斑的均匀性^[9-10]。镜片数量的增加还增加了系统装配调试的难度。根据非球面特殊的光学折射特性和折射定律的矢量形式,本文中提出了用单个椭球面透镜作为扩束或缩束镜,使扩束系统中镜片数量只有一片,解决了影响系统调配困难和出射光斑不均匀的问题。

1 单个椭球面消球差特性

关于 x 轴旋转对称的椭球面方程如下:

$$x = Ch^2 / (1 + \sqrt{1 - h^2 C^2 k}) \quad (1)$$

式中, $h = \sqrt{y^2 + z^2}$, C 是椭球面与 x 轴交点处的曲率, $0 < k < 1$ 。常数 C 和 k 决定了椭球面的形状。椭球面是偶次非球面表达式中的高次项(大于2次)系数等于0的特殊情况,单个非球面可以校正球差,可以用全面学习策略的粒子群方法校正特殊非球面(椭球面)的球差^[11-12]。

如图1所示,已知平行于光轴的人射光线单位矢量 $\mathbf{Q}_1(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1) = \mathbf{Q}_1(1, 0, 0)$, 其上任一点 $P_0(x_0,$

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2012FM001; ZR2013FM007)

作者简介: 袁文峰(1971-),男,学士,实验师,从事激光技术的研究。

E-mail: yuanwenfeng@sdu.edu.cn

收稿日期: 2015-04-17; 收到修改稿日期: 2015-08-18

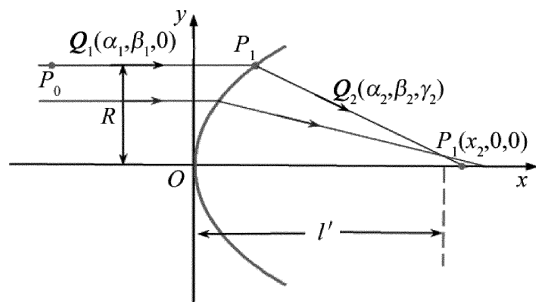


Fig. 1 Pathway of light rays parallel to the optical axis through an ellipsoidal surface

$y_0, 0)$, 由此可求得入射光线与椭球面的交点 $P_1(x_1, y_1, 0)$ 和交点 P_1 处的法矢量。假定光由空气入射到折射率 $n = 1.6$ 的玻璃椭球面上, 由折射定律的矢量形式可求得折射光线的单位矢量 $Q_2(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$, 则折射光线与光轴的交点 $P_2(x_2, 0, 0)$ 。

$$x_2 = x_1 - y_2 \alpha_2 / \beta_2 \quad (2)$$

令 $\delta L' = x_2 - l'$, $\delta L'$ 就是这条光线对于此单个椭球面的球差, 而 l' 为理想像距。

假设平行入射光束的光束半径为 h , 在光束的 x - O - y 截面内取 10 条光线(可任意取多条), 这 10 条入射光线对于椭球面的入射高分别为 $0.1h, 0.2h, \dots, 1.0h$, 10 条光线球差的平方和 $\delta L = \sum_{i=1}^{10} (\delta L_i')^2$, 由前述

可求出, 以 δL 作为全面学习策略的粒子群方法中的适应度函数, 可优化得到使 δL 等于 0 或近似等于 0 的椭球面方程(1)式中的参量 C 和 k , 优化结果列在表 1 中。

Table 1 Parameters of ellipsoids and ideal image distances after optimization

h/mm	C/mm^{-1}	k	$\sum_{i=1}^{10} (\delta L_i')^2$	l'/mm
5	1/4.5000	1 - 0.3906	3.3037×10^{-30}	12
10	1/7.8750	1 - 0.3906	1.4945×10^{-29}	21
10	1/15.7500	1 - 0.3906	1.5399×10^{-29}	42
20	1/15.7500	1 - 0.3906	5.9780×10^{-29}	42
40	1/31.5000	1 - 0.3906	2.3912×10^{-28}	84
60	1/46.8750	1 - 0.3906	7.1504×10^{-29}	125
80	1/63.0000	1 - 0.3906	9.5648×10^{-28}	168
100	1/78.3750	1 - 0.3906	8.8221×10^{-28}	209

表 1 中, h 是已知量, l' 也是一已知设定量, 但是不能随便设定。比如, 光束半径 $h = 10\text{mm}$ 时, 如果设定理想像距小于 21mm, 则不会找到球差近似等于 0 的椭球面参量, 因为使光束半径 10mm 的平行光聚焦在小于 21 mm 区域内的椭球面是不存在。一般设定 l' 比 $2h$ 大一点即可。 l' 也不能设定太大, 太大了则透镜厚度增加。

图 2 是光束半径 $h = 20\text{mm}$ 时, 根据表 1 中相应的椭球面参量模拟光在椭球面上的折射过程, 从中可以看出, 所有平行光线经过椭球面后聚焦在一点, 这一点

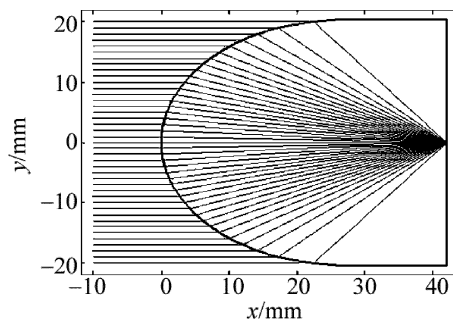


Fig. 2 Simulation of incident beam refracted and focused by an ellipsoidal surface

就是椭球面的焦点。

2 椭球面扩束透镜

由光路的可逆性, 从图 2 可以想到, 如果在光束焦

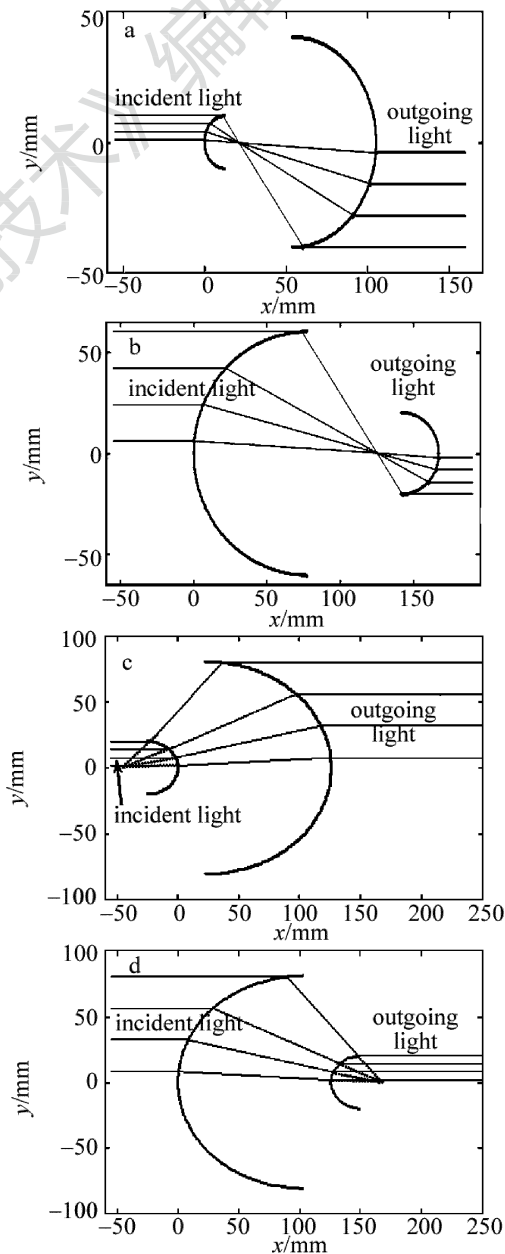


Fig. 3 Schematic of coincidence focuses of two ellipsoidal surfaces

点之后再放一合适的椭球面,使两个椭球面的焦点重合则光束又变为平行光束,如图3所示,图3a和图3b是两个椭球面的实焦点重合在一起,图3c和图3d是两个椭球面的虚焦点重合在一起。经过此次光束变换后,光束方向没有变化,但是光束半径发生了变化,如此,前后两个椭球面集成在一起可以形成扩束或者缩束的单个椭球面透镜。

根据以上分析,可以把两个椭球面集成在一个透镜上,形成单个椭球面扩束(缩束)透镜如图4所示。图4a为椭球面的虚实焦点重合所形成的缩束透镜,图4b为椭球面的实焦点重合所形成的缩束透镜。为了减小透镜的线度,可以采用两个椭球面的虚焦点重合在一起形成的椭球面扩束(缩束)透镜。由实焦点重合形成的椭球面扩束透镜(图4b)可用在特定的耦合系统中,如与光纤相耦合系统等。

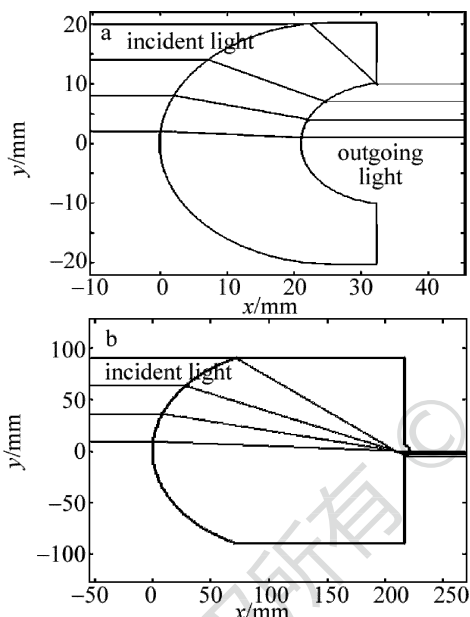


Fig. 4 Schematic of a single ellipsoidal beam expanding or compressing lens

从上面分析可以看出,单个椭球面扩束(缩束)透镜的厚度与被扩展(压缩)的入射光束半径和扩束(缩束)倍数有关,被扩展(压缩)的入射光束半径越大,扩束(缩束)倍数越大,则透镜厚度越大。一般被扩展(压缩)的光束半径并不是很大,扩束(缩束)倍率也不要求很大,所以透镜厚度并不需要很厚。

3 椭球面扩束透镜对光束变换过程模拟及变化后的光强分布

3.1 平行光束变换过程模拟

图5为椭球面缩束透镜,入射光束半径30mm,出射光束半径8.5mm,压缩率 $30/8.5 \approx 3.5$,透镜高度约66mm,透镜厚度61mm,透镜材料的折射率1.6,前后椭球面参量C分别为1/27.7500和1/7.8750,k都等

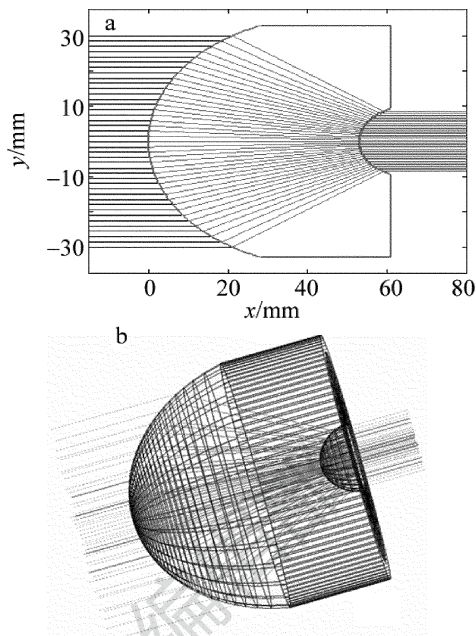


Fig. 5 Simulation of beam shrinking process in an ellipsoidal lens
a—2-D simulation b—3-D simulation

于0.6094,两个椭球面顶点相距53mm。图5a中用均匀分布的42条光线模拟了光束在透镜的缩束过程,从模拟结果可以看出,出射光束非常准直,这是因为两个面的球差都已经校正到 10^{-14} mm数量级,一般用球面透镜校正球差达不到这个数量级。

图5b是此椭圆缩束透镜缩束过程的3维模拟图,从此图中可以清楚看出椭球面透镜的整体轮廓以及缩束过程的完整图像。

3.2 出射光束在缩束透镜出射口40mm处的光强分布

图6是在缩束透镜出射口40mm处垂轴平面上的光强分布,是对均匀分布的40万条入射光线经椭球面透镜出射后进行位置统计后得到的。从图6中看到,40万条入射光线经椭球面透镜后全部分布 $-8.5\text{mm} \leq y \leq 8.5\text{mm}$ 范围之内,说明整个出射光束准直性很好。从图6中还看到,均匀分布的40万条入射光线从椭球面透镜出射后还是均匀分布,这说明,如果入射光束是平面波,则出射光束也是平面波,椭球面扩束透镜并没有改变入射光束的平面波性质。

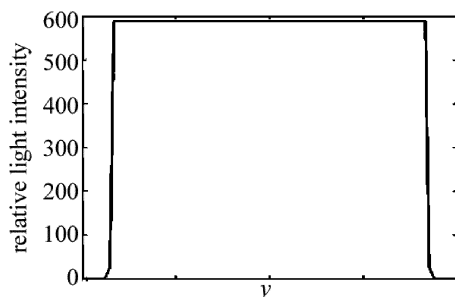


Fig. 6 Light intensity distribution on the plane perpendicular to the x-axis

3.3 高斯光束扩(缩)束过程模拟

设高斯光束的束腰半径为 w_0 , 激光波长为 λ , 折射球面的焦距为 F , 物距为 l , 由折反射面对高斯光束的变换规律^[13-14]可知, 当满足条件:

$$\left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda}\right)^2 \ll (l - F)^2 \quad (3)$$

可以用几何光学中处理傍轴光线的方法来处理高斯光束^[14]。(3)式要求高斯光束束腰与折射面顶点的距离远大于高斯光束的共焦参量, 也就是要求高斯光束束腰与折射面相距足够远。由于 $\left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda}\right)^2$ 一般较小, (3)式很容易达到。

把高斯光束看作由很多个共轴单叶双曲面构成的双曲面体, 光束中光线的传播方向是沿所对应双曲面的直母线方向^[15]。假定光束沿 x 轴方向传播, 在光束束腰截面按高斯分布取足够多个点, 这些点的坐标为 $P_0(y_0, z_0)$, 被认为是高斯光束中光线的出发点, 则过这些点的光线沿下列两条直线传播。

$$\text{直线 1: } y = y_0 + z_0 C, z = z_0 - y_0 C, x = x \quad (4)$$

$$\text{直线 2: } y = y_0 - z_0 C, z = z_0 + y_0 C, x = x \quad (5)$$

式中, $C = \frac{\lambda x}{\pi w_0^2}$, 过 $P_0(y_0, z_0)$ 的光线沿直线 1 和直线 2 的概率相等。由此可求出这条光线与椭球面的交点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和交点 P_1 处的法向量。假定光由空气入射到折射率 $n = 1.6$ 的玻璃椭球面上, 由折射定律的矢量形式可求得折射光线的单位矢量 $\mathbf{Q}_2(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$, 由此可以追迹这条光线。

取 $w_0 = 0.02\text{mm}$, $\lambda = 6.238 \times 10^{-4}\text{mm}$ (透镜对此波长的折射率假设为 1.6), 第一和第二折射椭球面的 C 分别为 $1/4.5\text{mm}^{-1}$ 和 $1/78.375\text{mm}^{-1}$ 时, 入射高斯光束距离第 1 个椭球面顶点分别是 120mm (见图 7a)

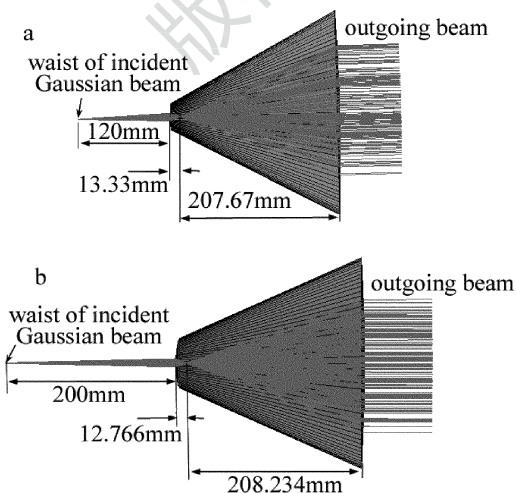


Fig. 7 Simulation of Gaussian beam expanding with the help of an ellipsoidal lens

和 200mm (见图 7b) 时, 图 7 中示出了透镜对此高斯光束的扩束过程。

图 8 展示了椭球面透镜的缩束作用。图 8 中激光波长及束腰大小同图 7, 第一和第二折射椭球面的 C 分别为 $1/78.375\text{mm}^{-1}$ 和 $1/31.5\text{mm}^{-1}$, $k = 0.6094$, 两椭球面顶点之间的距离为 134mm, 入射高斯光束距离第 1 个椭球面顶点分别是 3000mm, 入射高斯光束的发散角 1.15° , 出射光束的发散角约为 0.0952° , 这说明, 利用椭球面透镜, 不但压缩了光束直径, 而且还使发散角减小了。

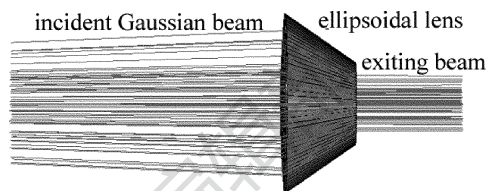


Fig. 8 Simulation of Gaussian beam compression by an ellipsoidal lens

从图 7 和图 8 对高斯光束在椭球面透镜中传输模拟看来, 椭球面透镜同样对高斯光束有扩束或者缩束作用, 但是必须特别设计, 因为高斯光束与普通光的传输特性有很大的不同。

4 结论

单个椭球面透镜完全可以作为扩束或者缩束之用。由于椭球面有好的校正球差特性, 使得出射光束的准直性较用球面透镜扩束系统的准直性好, 且不改变入射光束的平面波性质。设计椭球面扩束(缩束)透镜可以由设计单个无球差椭球面入手, 使两个无球差椭球面的焦点重合, 把两个无球差椭球面集成在一个透镜上即可, 扩束(缩束)倍率可以方便地任意设计。椭球面焦点重合有实焦点重合和虚焦点重合两种方式, 虚焦点重合可减小椭球面扩束透镜的厚度, 实焦点重合形成的椭球面扩束透镜可用在一些特定耦合系统中。

单个椭球面透镜同样可以作为激光光束的扩束或者缩束透镜, 但必须特别设计。单个椭球面透镜作为扩束(缩束)透镜, 免去了由两个以上单透镜组成的扩束(缩束)系统装配调试的麻烦, 缩短了光路, 使用更加简单。全面学习策略的粒子群方法是光学设计中一种简单有效的方法。

参 考 文 献

[1] LIU H B, AN Zh Y, GAO Y H, et al. System design of a varifocal beam expander[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 33(4):43-45 (in Chinese).
 [2] ZHENG X, ZUO Ch Ch, ZHOU X Q. Optical route simulation of two-

- photon polymerization[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(3):325-328 (in Chinese).
- [3] FAN L N, ZHU A M, LIU L, *et al.* Optical design of laser beam expanding telescope[J]. *Infrared*, 2007, 28(8):20-22 (in Chinese).
- [4] HE T, WANG Zh R, YUAN G H. Fan-shaped semiconductor micro-ring lasers based on an elliptical reflector mirrors[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(1):114-118 (in Chinese).
- [5] ZHAO Y N, WANG X, XIANG Y. Design of catadioptric variable focus beam expanding optical system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(1):46-48 (in Chinese).
- [6] GUO Y X, LI Y C, LIANG T M, *et al.* Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9):2680-2683 (in Chinese).
- [7] YU D Y, TAN H Y. *Engineering optics*[M]. 3rd ed. Beijing: China Machinery Industry Press, 2011:6 (in Chinese)
- [8] QIAO L, YANG Y N. Experimental research of laser wireless power transmission efficiency[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(5):590-594 (in Chinese).
- [9] YE J F, GAO Zh Sh, YE H Sh, *et al.* Near-infrared a focal laser beam expanding system with large zoom ratio[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5):1129-1136 (in Chinese).
- [10] HUANG Sh, DENG L M, YANG H, *et al.* Homogenization design of laser diode based on ZEMAX[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(4):522-526 (in Chinese).
- [11] HUA Q. Aberration correction of a single aspheric lens with particle swarm algorithm[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(13/14):2996-3000.
- [12] LIANG J J, QIN A K, SUGANTHAN P N, *et al.* Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2006, 10(3):281-295.
- [13] MARCUSE D. *Light transmission optics*[M]. New York, USA: Van Nostrand Reinhold Co., 1982:150-155.
- [14] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN T R, *et al.* *Principles of lasers* [M]. 7th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014:11 (in Chinese).
- [15] ZHANG F Sh. Numerical computation for propagation of Gaussian beam through aspheric system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1):179-183 (in Chinese).