

高斯光束整形为平顶光束的双凸非球面镜的数值模拟与分析

陈凯¹, 陈檬¹, 李港¹, 牛岗², 樊仲维^{2,3}, 麻云凤³

(1. 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124; 2. 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085; 3. 中国科学院光电研究院, 北京 100080)

摘要:在高斯光束整形为平顶光束的理论基础上,通过数值模拟,具体分析几个特性参数对两个凸非球面镜的子午截面曲线的影响,根据 ZEMAX 等光学软件对非球面镜子午截面曲线表达式输入要求,拟合得到误差尽可能小的双凸非球面镜系统结构。

关键词:高斯光束;平顶光束;凸非球面镜;面形参数;非球面度

中图分类号:TN249

文献标识码:A

Numerical simulation and analysis of convex two-aspheric-mirror system that converts a Gaussian to a flattop beam

CHEN Kai¹, CHEN Meng¹, LI Gang¹, NIU Gang², FAN Zhong-wei^{2,3}, MA Yun-feng³

(1. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China; 3. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The system composed of two aspheric mirrors is able to convert a Gaussian beam to a flattop beam because of its concise structure, compactness, and sound effects in beam reshaping. And in actual production processing, the asphericity and surface roughness of aspheric mirror are the crucial factors. On the basis of reshaping theory on converting a Gaussian to a flattop, by virtue of numerical simulation, we have calculated and analyzed the several characteristic parameters influence on the design of aspheric mirror surface. Then, according to the actual requirements of input expressions in ZEMAX, we get the best structure of aspheric mirror system by mathematical simulation.

Key words: Gaussian beam; flattop beam; convex aspheric mirror; parameters of surface shape; asphericity

1 引言

激光以其良好的单色性、方向性及高亮度等特点在军事及国民经济领域获得了广泛的应用,但是在激光的许多实际应用中,例如激光准直、光存储、激光材料加工、激光医疗等领域,常要求光强空间分布均匀的激光光束,而从激光器中直接输出的光束一般为光强分布不均匀的高斯光束,因此需要通过特殊设计的光学系统将高斯光束整形为光强均匀分布的平顶光束^[1]。光束的空间整形方法很多^[2-4]。相比较而言,非球面透镜组的方法结构简单、实现相对容易,可以将准直高斯光束整形成平顶光束,而且适用波长范围也很广,从红外到紫外波段。这种光学系统有两种设计方案,第一种方案(Keplerian 设

计)是由一片凹非球面镜和一片凸非球面镜组成,第二种方案(Galileam 设计)是由两片凸非球面镜组成。鉴于第一种方案中凹非球面镜加工比较困难,在此我们采用了第二种方案。

本文主要根据已有理论基础^[5-8],结合两片凸非球面镜组成的系统的结构特点、实际加工和检测要求,进行了相关方面的数值模拟和分析工作。为了尽可能地减小数值计算的误差,计算过程中尽可能地采用直接推导出来的解析式。由于 ZEMAX 中

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(No. 2008AA031901); 教委科研计划(No. KM201010005033)资助。

作者简介: 陈凯(1983-),男,硕士,主要从事光学设计和全固态激光器方面的研究。E-mail: kaigeyx@126.com

收稿日期: 2010-05-11; **修订日期:** 2010-07-07

偶次非球面表达式形式既可在 ZEMAX 等光学软件中进行检验^[9],又可用于生产加工,因此,本文首先分析了特征参数对非球面镜设计的影响,然后采用曲线拟合的办法,将双凸非球面镜的泰勒级数表达式拟合符合 ZEMAX 中偶次非球面表达式的形式。

2 理论分析

双凸非球面镜组结构如图 1 所示。

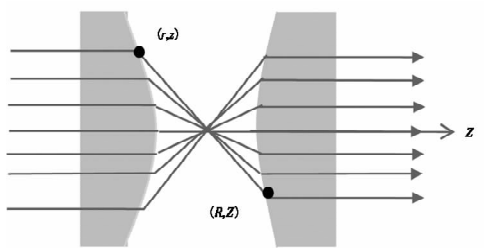


图 1 双凸非球面镜结构示意图

Fig. 1 schematic of two-aspheric-mirror system

设一束光波长为 λ , 输入光线与输出光线关于光轴对称, 光轴与 z 轴重合, 在输入光束的垂轴截面上 r 处的光强分布假设为 $f(r)$, 输出光强 R 处的光强分布为 $g(R)$, 假设能量分布是连续的, 输入高斯光束的光强分布^[5]为:

$$f_G(r) = \frac{2}{\pi\omega_0^2} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (1)$$

该透镜设计可适用任何能满足归一化和均匀性要求的输出光束分布, Fermi-Dirac 函数则可以很好地描述这种平顶光束分布:

$$g_{FD}(r) = g_0 \left\{ 1 + \exp\left[\beta\left(\frac{r}{R_0} - 1\right)\right] \right\}^{-1} \quad (2)$$

其中, R_0 是光强降低到其轴上值的一半时的光束半径, 即光强半高宽, 而 W 则为光强下降指数, 其中 $\beta = R_0/W$ 。

如图 1 所示, 引入的坐标 (r, z) 与 (R, Z) 分别为两凸非球面镜上的坐标, 则垂度曲线即为 $z(r)$, $Z(R)$ 。通过轨迹追踪可以得到垂度曲线, r 与 R 之间的关系为: $R = h(r)$ (其中 $r < 0$), 而且它对光学系统的设计至关重要, 与能量分布情况直接相关。能量守恒定律要求口径 r 内的输入光束能量与口径 R 内输出光束的能量相等, 即:

$$\int_0^r f(x) x dx = \int_0^R g(x) x dx \quad (3)$$

对于此式, 只能给出数值解, 对于任一个 r 值, 只能得到一个唯一的数值解 R , 进而可以得到 $h(r)$ 。将式(1)与式(2)分别代入到式(3)中, 可以得到如下的微分方程, 解此微分方程即可得到数值

解 $R = h(r)$:

$$\frac{dR}{dr} = \frac{2r}{\pi\omega_0^2 g_0 R} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \cdot \left\{ 1 + \exp\left[\beta\left(\frac{R}{R_0} - 1\right)\right] \right\} \quad (4)$$

再将式(1)与式(2)分别代入到式(3)中, 可以得到 r 与 R 之间另一关系式为 $r = h^{-1}(R)$:

$$r = h^{-1}(R) =$$

$$\sqrt{-\frac{\omega_0^2}{2} \cdot \ln\left\{ 1 - 2\pi g_0 \int_0^R \frac{x}{1 + \exp[\beta(x/R_0 - 1)]} dx \right\}} \quad (5)$$

根据光线追踪函数^[2], 可以得到两个凸非球面镜的子午截面曲线的函数表达式, 即:

$$z(r) = \int_0^r \frac{dx}{\sqrt{(n^2 - 1) + \left[\frac{(n-1)d}{h(x) - x} \right]^2}} \quad (6)$$

$$z(R) = \int_0^R \frac{dx}{\sqrt{(n^2 - 1) + \left[\frac{(n-1)d}{h^{-1}(x) - x} \right]^2}} \quad (7)$$

分别将 $R = h(r)$ 与 $r = h^{-1}(R)$ 的数值关系代入到式(6)、式(7)中, 即可到 $z(r)$, $Z(R)$ 的数值解^[10-11]。

3 数值模拟与分析

3.1 凸非球面镜结构影响因子分析

用两块凸非球面镜将高斯光束整形为平顶光束, 能够影响凸非球面镜结构参数的因子如下: ① β : $\beta = R_0/W$, 其中 R_0 为半高宽, W 为平顶光束光强下降指数; ② R_0 : 输出平顶光束的半高宽; ③ d : 两凸非球面镜的非球面顶点之间的距离; ④ n : 两凸非球面镜的折射率; ⑤ w_0 : 输入高斯光束的腰斑半径。

运用 MATLAB 软件, 通过编程进行计算和模拟, 具体分析这 5 个参数对第 1 片凸非球面镜面形曲线的影响。

图 2 是第 1 片凸非球面镜子午截面曲线在不同

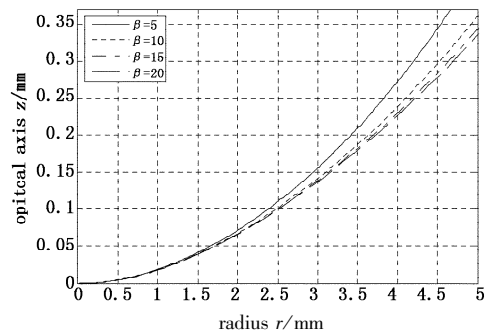


图 2 第 1 片凸非球面镜子午截面曲线(β 不同)

Fig. 2 meridional cross-section curves of the first convex aspheric mirror (β is variable)

β 值时的变化情况。从图中可以看出,当 β 越大,非球面镜的曲率越小,非球面度就会越小。同时, β 越大,输出平顶光束越接近矩形光束,效率越高,但是当 β 过大(如 $\beta = 150$) 时,平顶光束在传播的过程中,光束质量会变坏^[6],因此在不影响输出光均匀性和输出效率的前提下,为了尽可能地降低非球面度,应使 β 尽可能的大。

图3是第1片非球面子午截面曲线在不同 R_0 值时的变化情况。据图3可知,随着 R_0 增大,非球面镜的子午截面曲线的曲率也随着增大,非球面度也会相应增大。

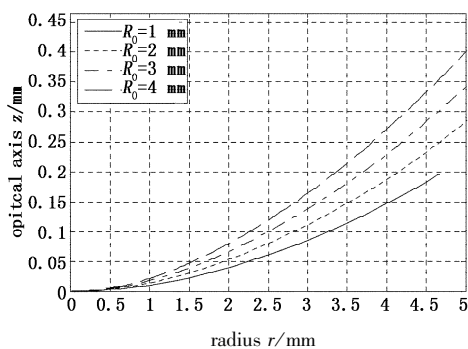


图3 第1片凸非球面子午截面曲线(R_0 不同)

Fig. 3 meridional cross-section curves of the first convex aspheric mirror(R_0 is variable)

图4是计算所得两凸非球面镜之间的距离 d 与第1片非球面镜子午截面曲线之间的关系。由图可知,当 d 越大,非球面镜的曲率越小,非球面度就会越小。因此在保证系统紧凑性的前提下,为了尽可能地降低非球面度,应使 d 尽可能地大。

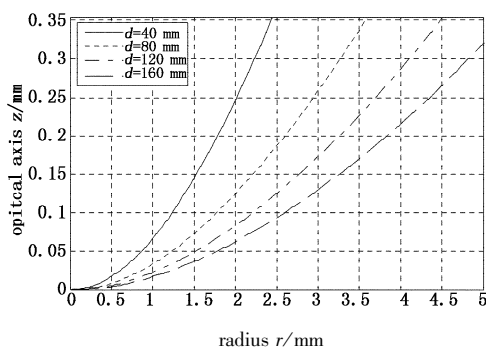


图4 第1片凸非球面子午截面曲线(d 不同)

Fig. 4 meridional cross-section curves of the first convex aspheric mirror(d is variable)

图5是非球面镜折射率 n 对第1片凸非球面镜子午截面曲线之间的关系。如图所示,当 n 越大,非球面镜的曲率越小,非球面度就会越小。因此,为了尽可能地降低非球面度,应使 n 尽可能地大,同时尽可能采用低色散材料。

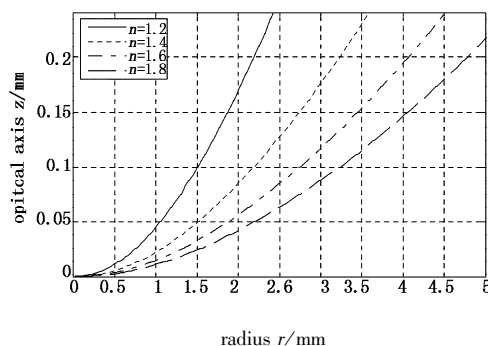


图5 第1片凸非球面镜子午截面曲线(n 不同)

Fig. 5 meridional cross-section curves of the first convex aspheric mirror(n is variable)

图6所示是输入高斯光束腰斑半径 w_0 值对第1片凸非球面镜子午截面曲线的影响。从图中可以看出,当 w_0 (输入高斯光束腰斑半径) 越大,非球面镜的曲率越小,非球面度就会越小。因此,为了尽可能地降低非球面度,应使 w_0 尽可能地大。

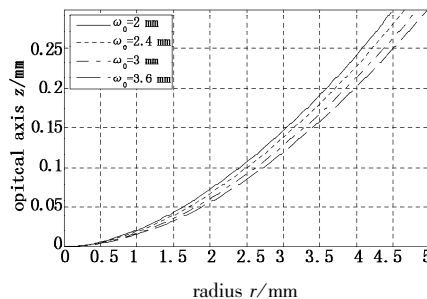


图6 第1片凸非球面镜子午截面曲线(w_0 不同)

Fig. 6 meridional cross-section curves of the first convex aspheric mirror(w_0 is variable)

由此可知,在非球面镜的设计中, β 不仅决定输出平顶光束的形状,而且决定非球面镜的面形;平顶光束半高宽 R_0 对非球面镜的面形影响较大, w_0 在数值相差不大的时候,可以使用同一片凸非球面镜系统; n 对非球面镜有很大影响,为了减小色散,减小非球面度,应尽可能地选择折射率大的介质材料;考虑系统的紧凑性, d 之间的距离不能太大,当 d 很小,则其非球面度较大,会增加加工的难度, d 与非球面度之间是互相制约的,可根据实际情况选择两透镜之间的距离。然后根据实际需要,拟合得到相应的凸非球面镜曲面表达式。在对第2片凸非球面镜的数值模拟与分析的过程中,发现第2片凸非球面镜的特点也符合上述第1片凸非球面镜的特点。

3.2 拟合非球面镜子午截面曲线

在实际检验和加工过程中,如在 ZEMAX 等光学软件中,有时候需要的非球面表达式往往并不是泰勒级数,而是二次项和高次项组成的表达式^[12],

即:

$$z(r) = \frac{c_1 \cdot r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_1) \cdot c_1^2 r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10} + \alpha_6 r^{12} + \alpha_7 r^{14} + \alpha_8 r^{16} \quad (8)$$

$$z(r) = \frac{c_1 \cdot r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_1) \cdot c_1^2 r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10} + \alpha_6 r^{12} + \alpha_7 r^{14} + \alpha_8 r^{16} \quad (9)$$

因此,要求将泰勒级数拟合为式(8)与式(9)形式的表达式。但是对上述表达式进行直接拟合会很困难,而且为了尽可能地减少高次项,便于加工,同时提高拟合的精度,我们对非球面镜子午截面曲线采用两步拟合的办法,第一步拟合得到泰勒级数表达式,第二步拟合得到符合光学软件 ZEMAX 中对偶次非球面镜参数输入要求的表达式,即式(8)与式(9)。其中 $c_1 = 1/R_{01}$, $c_2 = 1/R_{02}$ 为非球面镜的顶点曲率半径,其中 R_{01} , R_{02} 对应于 ZEMAX 中的 Radius, K_1 , K_2 对应于 ZEMAX 中的 Conic。其余参数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8$ 和 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$ 则分别为第 1, 2 片非球面表达式的高次项系数。

在计算中,我们采用的具体参数如表 1 所示。

表 2 第 1 片凸非球面镜曲面参数值

Tab. 2 the values of parameters of the first convex aspheric mirror

参数	K_1	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
数值	-88.96	0.0048	5.49×10^{-4}	6.24×10^{-5}	-6.51×10^{-6}	4.43×10^{-7}	-1.81×10^{-8}	4.03×10^{-10}	3.74×10^{-12}

表 3 第 2 片凸非球面镜曲面参数值

Tab. 3 the values of parameters of the second convex aspheric mirror

参数	K_2	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
数值	14.4421	3.86×10^{-5}	-2.72×10^{-4}	5.27×10^{-5}	-3.21×10^{-6}	9.67×10^{-8}	-1.59×10^{-9}	1.36×10^{-11}	-4.80×10^{-14}

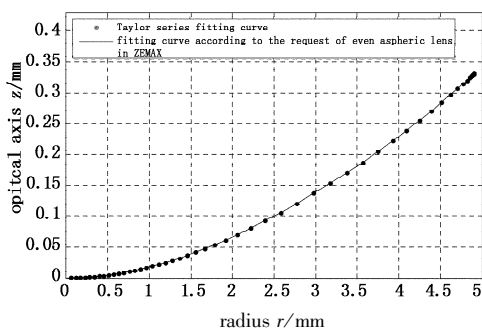


图 7 第 1 片凸非球面镜子午截面拟合曲线

Fig. 7 meridional cross-section curves of the first convex aspheric mirror

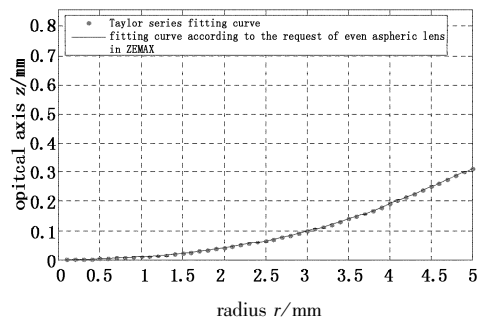


图 8 第 2 片凸非球面镜子午截面拟合曲线

Fig. 8 meridional cross-section curves of the second convex aspheric mirror

利用同样的方法,可以拟合得到符合 ZEMAX 要求的第 2 片凸非球面镜子午截面曲线,如图 8 所示。所用参数如表 3 所示。

表 1 决定凸非球面镜曲面的参数值

Tab. 1 the values of parameters that determine the surface of aspheric mirrors

参数	β	R_0/mm	d/mm	n	ω_0/mm
数值	16	3	150	1.506	2.5

根据以上参数,拟合计算得到泰勒级数为 $z(r)$, $Z(R)$, 然后分别对其求一阶导数 dz/dr , dZ/dR , 二阶导数 d^2z/dr^2 , d^2Z/d^2 , 计算可得到 $c_1 = -0.0452$, $c_2 = 0.0220$ 。因此, $R_{01} = -22.1063 \text{ mm}$, $R_{02} = 45.4025 \text{ mm}$ 。

接下来的工作就是应用 MATLAB 进行指定函数的拟合,即按照 ZEMAX 中对非球面镜参数输入要求的表达式进行拟合,在第 1 片凸非球面镜中,需要拟合的参数为 $K_1, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8$, 在第 2 片凸非球面镜中需要拟合的参数为 $K_2, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$, 在这两片凸非球面镜参数拟合中,分别分两步进行拟合,第一步拟合参数为 K_1, K_2 , 第二步拟合的两组参数分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8$ 与 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$, 则得到的值如表 2 与表 3 所示。图 7 是拟合得到的符合 ZEMAX 要求的第 1 片凸非球面镜子午截面曲线。

4 结论

双凸非球面镜的设计宗旨是要尽可能使光强分布均匀、光-光转换效率高,降低非球面度,使其易

于加工,同时还要保证其紧凑性。本文中对影响非球面度的参数进行了数值模拟和分析,通过图表分析得到各个参数对凸球面镜的设计影响,其中最关键、最麻烦的地方是计算凸非球面镜的子午截面表达式,以及将其拟合成符合 ZEMAX 等光学软件中偶次非球面表达式形式。根据不同的应用场合,可以选择恰当的参数。最后,在参数拟合中,通过各种数值拟合的办法,将一般得到的泰勒级数表达式拟合成符合 ZEMAX 对非球面镜输入参数要求的最优非球面镜系统结构。

参考文献:

- [1] 罗时荣,吕百达. 平顶高斯光束通过透镜序列的传输特性[J]. 激光技术,2001,25(2):143-146.
- [2] 龚华平,吕志伟,林殿阳. 激光束空间整形的研究现状[J]. 激光与光电子进展,2005,42(9):2-5.
- [3] 林勇,胡家升. 激光光束的整形技术[J]. 激光杂志,2008,29(6):1-4.
- [4] 牛岗,樊仲维,王培峰,等. 利用阶梯镜进行半导体激光器光束整形及光纤耦合[J]. 激光与红外,2007,37(6):510-512.
- [5] B R Frieden. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance [J]. Appl. Opt. 1965, 4(11):1400-1403.
- [6] J A Hoffnagle, C M Jefferson. Design and performance of a refractive optical system that converts a gaussian to a flat-top beam[J]. Appl. Opt., 2000, 39(30):5488-5499.
- [7] Chang-Yuan Han, Yukihiro Ishii, Kazumi Murata. Reshaping collimated laser beams with gaussian profile to uniform profiles [J]. Appl. Opt., 1983, 22(22):3644-3647.
- [8] Patrick W Rhodes, David L Shealy. Refractive optical systems for irradiance redistribution of collimated radiation: their design and analysis [J]. Appl. Opt., 1980, 19(20):3545-3553.
- [9] Phillip H Malyak. Two-mirror unobscured optical system for reshaping the irradiance distribution of a laser beam [J]. Appl. Opt., 1980, 31(22):4377-4383.
- [10] R Mc Caughey, V Nadeau, M Dickinson. Flattop beam for laser stimulated pain [C]. Conf. SPIE, 2005, 5698:1605-7422.
- [11] J A Hoffnagle, C M Jefferson. Measured performance of a refractive gauss-to-flattop reshaper for deep-UV through near-IR wavelengths [C]. Conf. SPIE, 2001, 4443:115-124.
- [12] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004:3-9.