

高斯光束整形为平顶光束的非球面镜系统设计和面形参数分析

陈凯 李平雪* 陈檬 张雪霞 白振乔 李港

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 在将高斯光束整形为平顶光束的整形系统中,由两个非球面镜组成的系统是比较简单的结构形式,该系统由平凹镜和平凸镜组成。在实际生产加工中,非球面镜的非球面度直接反映加工的难度。在理论分析高斯光束整形为平顶光束的基础上,分析计算了几个特性参数对非球面截面曲线的影响,然后根据实际需要,在保证其紧凑性、尽可能地降低非球面度同时,按照 ZEMAX 对非球面镜输入参数的要求拟合得到尽可能优化的非球面镜系统结构。最后,对该非球面镜系统进行物理光学传播追踪,分析其光强分布。

关键词 光学设计;高斯光束;平顶光束;非球面镜;面形参数;非球面度

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.032201

Design and Analysis of Surface Parameters of Aspheric Lenses System Converting Gaussian Beam to Flattop Beam

Chen Kai Li Pingxue* Chen Meng Zhang Xuexia Bai Zhen'ao Li Gang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Among the reshaping systems converting a Gaussian beam to a flattop beam, the system composed of a plane-concave and a plane-convex lens, is a relatively simple structure. In actual production processing, the asphericity of an aspheric surface is directly relative to its manufacture difficulty. Based on theoretical analysis of the conversion from a Gaussian beam to a flattop beam, the influences of several characteristic parameters on the sectional curves of aspheric surface of lenses are calculated and analyzed. Then, according to the actual requirements of input expressions in ZEMAX, a better structure of aspheric lenses system is obtained under condition that compactness is not destroyed and the asphericity is reduced. At last, physical optics propagation through the aspheric system is analyzed and then the irradiance distribution is discussed.

Key words optical design; Gaussian beam; flattop beam; aspheric lens; surface parameters; asphericity

OCIS codes 220.1250; 220.4830; 140.3300

1 引言

在激光的许多实际应用中,例如激光驱动核聚变、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。而从激光器中直接出来的光束通常为高斯光束,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,利用非球面透镜组、全息滤波器、二元相位、振幅调制光栅、相位型光束整形、衍射光学元件、微透镜阵列整形、双折射透镜组、液晶空间光调制器、长焦深整形元件(圆锥镜光束变换)均可将高斯光束整形为平顶光束^[2~4]。但比较而言,非球面透镜组的方法结构简单、实现相对容易。这种光学系统是由一个凹面镜与一个凸面镜组成,可以将准直高斯光束整形成

收稿日期: 2010-09-26; 收到修改稿日期: 2010-11-29

基金项目: 北京市科委科技新星计划项目(2007013B)资助课题。

作者简介: 陈凯(1983—),男,硕士研究生,主要从事光学设计和全固态激光器等方面的研究。

E-mail: chen kai@bjut.edu.cn

导师简介: 陈檬(1963—),女,副教授,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: chenmeng@bjut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: pxli@bjut.edu.cn

平顶光束,允许远场衍射形式的控制,而且从入射光瞳和出射光瞳处所产生的衍射可以控制在很小的范围内。

目前,对高斯光束转换为平顶光束的产生和传输过程已进行了较多的理论研究,但非球面镜的非球面度与各个特性参数之间的关系,以及如何将一般表达形式的非球面表达式拟合为满足 ZEMAX 要求的特殊形式非球面表达式,迄今为止,还没有相关方面的研究报道。本文在 B. R. Frieden 等^[5,6] 理论上,结合实际加工和应用要求,开展相关方面的数值分析和模拟工作。同时,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。曲线的拟合形式多种多样,为了便于在 ZEMAX 等光学软件中进行检验^[7],同时又可用于生产加工,本文将其曲线拟合成交次非球面的形式。

2 理论分析

图 1 为两个非球面镜所组成的透镜组结构。可以假设一个波长 λ , 输入光线与输出光线关于光轴对称,光轴沿 z 方向,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 R 处的光强分布为 $g(r)$ 。由于输入光束的能量与输出光束的能量是相等的,所以可以得到一个归一化的等式^[8],即

$$2\pi \int_0^{\infty} f(r)rdr = 2\pi \int_0^{\infty} g(r)rdr = 1, \quad (1)$$

输入高斯光束的光强分布为

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

费米-狄拉克函数则可以很好地描述这种平顶光束分布^[5]

$$g_{FD}(r) = g_0 \left\{ 1 + \exp\left[\beta\left(\frac{r}{R_0} - 1\right)\right] \right\}^{-1}, \quad (3)$$

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

如图 1 所示,引入的坐标 (r, z) 与 (R, Z) 分别为两非球面镜上的坐标,则矢高为 $z(r), Z(R)$ 。通过轨迹追踪可以得到垂度曲线, r 与 R 之间的关系为: $R = h(r)$, 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。根据能量守恒定律,有

$$\int_0^r f(x)xdx = \int_0^R g(x)xdx. \quad (4)$$

对于(4)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(2)式与(3)式分别代入到(4)式中,可以得到如下的微分方程,解此微分方程即可得到数值解 $R = h(r)$ 。

$$\frac{dR}{dr} = \frac{2r}{\pi\omega_0^2 g_0 R} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \cdot \left\{ 1 + \exp\left[\beta\left(\frac{R}{R_0} - 1\right)\right] \right\}, \quad (5)$$

再将(2)式与(3)式分别代入到(4)式中,可以得到 r 与 R 之间另一关系式

$$r = h^{-1}(R) = \sqrt{-\frac{\omega_0^2}{2} \cdot \ln\left\{ 1 - 2\pi g_0 \int_0^R \frac{x}{1 + \exp[\beta(x/R_0 - 1)]} dx \right\}}, \quad (6)$$

根据光线追踪函数^[2],可以得到两个非球面镜的截面曲线的函数表达式,即

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

$$Z(R) = \int_0^R \frac{dx}{\sqrt{(n^2 - 1) + \left[\frac{(n-1)d}{h^{-1}(x) - x}\right]^2}}. \quad (8)$$

分别将 $R = h(r)$ 与 $r = h^{-1}(R)$ 的数值关系代入到(7)与(8)式中,即可到 $z(r), Z(R)$ 的数值解。

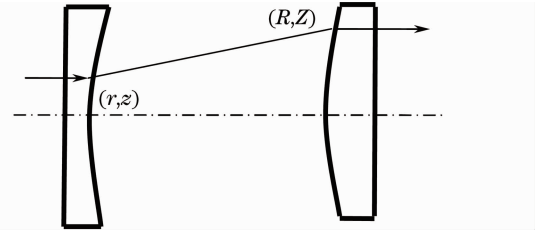


图 1 非球面镜结构示意图

Fig. 1 Schematic of aspheric lenses

3 与非球面镜结构设计有关参数的数值分析

用两块非球面镜将高斯光束整形为平顶光束,能够影响非球面结构参数的因子如下^[9]:1) β : $\beta = R_0/W$,其中 R_0 为半峰全宽, W 为平顶光束光强下降指数;2) R_0 :输出平顶光束的半峰全宽。3) d :两非球面镜的非球面顶点之间的距离;4) n :两非球面镜的折射率;5) ω_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^[7],具体分析这 5 个参数对第 1 片非球面镜面形曲线的影响。图 2(a)是第 1 片非球面镜截面曲线在不同 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,非球面度也越小,而且在定一定范围内,输出平顶光束越接近矩形分布,因此在不影响输出光束质量的前提下,为了尽可能降低非球面度,应使 β 尽可能的大。图 2(b)是第 1 片非球面截面曲线在不同 R_0 值时的变化情况,可知 R_0 对非球面镜的截面曲线影响较大,当 $R_0 < \omega_0$ 时,变化趋势不明显,但是当 $R_0 > \omega_0$ 且随着 R_0 增大时,非球面镜的曲率越大,非球面度也越大。图 2(c)是计算所得两非球面镜之间的距离 d 与第 1 片非球面镜截面曲线之间的关系,当 d 越大,非球面镜的曲率越小,非球面度越小。因此在保证系统紧凑性的前提下,为了尽可能地减小像差、降低非球面度,应使 d 尽可能大。图 2(d)是非球面镜折射率 n 对第 1 片非球面镜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,非球面度越小。因此,为了尽可能降低非球面度,应使 n 尽可能大。图 2(e)所示是输入高斯光束腰斑半径 ω_0 值对第 1 片非球面镜截面曲线的影响,从图中可以看出,当 ω_0 越大,非球面镜的曲率越小,非球面度越小。因此,为了尽可能降低非球面度,应使 ω_0 尽可能大。

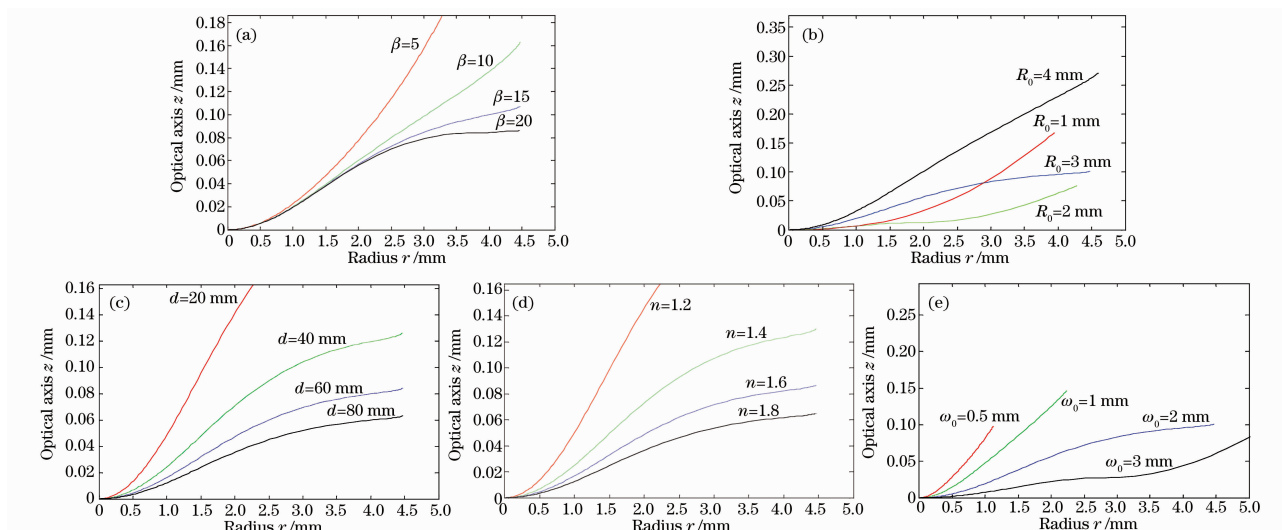


图 2 第 1 片非球面截面曲线

Fig. 2 Cross-section curves of lens 1

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。平顶光束半峰全宽 R_0 对非球面镜的面形影响较大, ω_0 在数值相差不大时,可以使用同一个非球面镜系统。 n 对非球面镜有很大影响,为了减小色散,减小非球面度,应尽可能的选择折射率大、色散小的介质材料。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,拟合得到相应的非球面镜曲面表达式。在对第 2 片非球面镜的数值分析的过程中,发现第 2 片非球面镜的特点也符合上述第 1 片非球面镜的特点。

4 非球面镜截面曲线拟合

非球面镜截面曲线的拟合形式有很多种,为了便于在诸如 ZEMAX 等光学软件中进行检验,并提高拟合精度,在此将非球面镜截面曲线拟合成由二次项和高次项组成的偶次项非球面表达式^[10],即

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

$$Z(R) = \frac{c_2 R^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_2) c_2^2 R^2}} + A_1 R^2 + A_2 R^4 + A_3 R^6 + A_4 R^8 + A_5 R^{10} + A_6 R^{12} + A_7 R^{14} + A_8 R^{16}. \quad (10)$$

因此要求将泰勒级数拟合为(9)式与(10)式形式的表达式。其中 c_1, K_1 与 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8$ 分别为第 1 片非球面镜二次曲面参数、高次项系数, c_2, K_2 与 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$ 分别为第 2 片非球面镜的二次曲面参数、高次项系数。为了提高拟合的精度,同时降低拟合难度,我们置 $c_1 = 0, K_1 = 0, c_2 = 0, K_2 = 0$, 只对其余参数 $\alpha_1 \sim \alpha_8$ 和 $A_1 \sim A_8$ 进行拟合,采用的拟合方法为最小二乘法。

表 1 决定非球面镜曲面的参数值

Table 1 Parameter values determining the surface of aspheric lenses

Parameters	β	R_0/mm	d/mm	n	ω_0/mm
Value	16	3.0	50.0	1.5164	2.0

表 2 第 1 片非球面镜曲面参数值

Table 2 Parameter values of the first aspheric lens

Parameters	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
Value	0.022	-2.64×10^{-3}	2.03×10^{-4}	-8.55×10^{-6}	5.34×10^{-8}	1.16×10^{-8}	-4.70×10^{-10}	5.83×10^{-12}

表 3 第 2 片非球面镜曲面参数值

Table 3 Parameter values of the second aspheric lens

Parameters	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
Value	9.71×10^{-3}	2.39×10^{-4}	-7.29×10^{-5}	4.16×10^{-6}	-1.16×10^{-7}	1.81×10^{-9}	-1.51×10^{-11}	-5.24×10^{-14}

表 1 为给出的非球面镜相关参数,通过该表的参数,计算拟合可得到两片非球面镜的高次项系数,如表 2 与表 3 所示。图 3 为第 1 片非球面镜截面计算点与拟合曲线。从图中可以看出,两片非球面镜的子午截面曲线拟合得比较好。由 MATLAB 计算可知,拟合均方根误差控制在 10^{-5} mm 数量级。

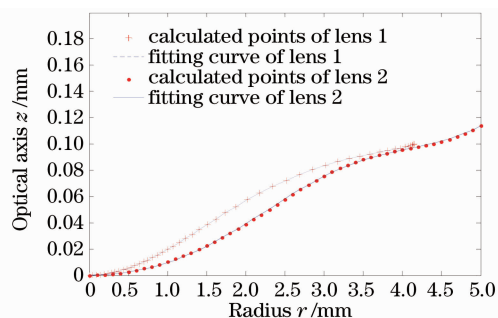
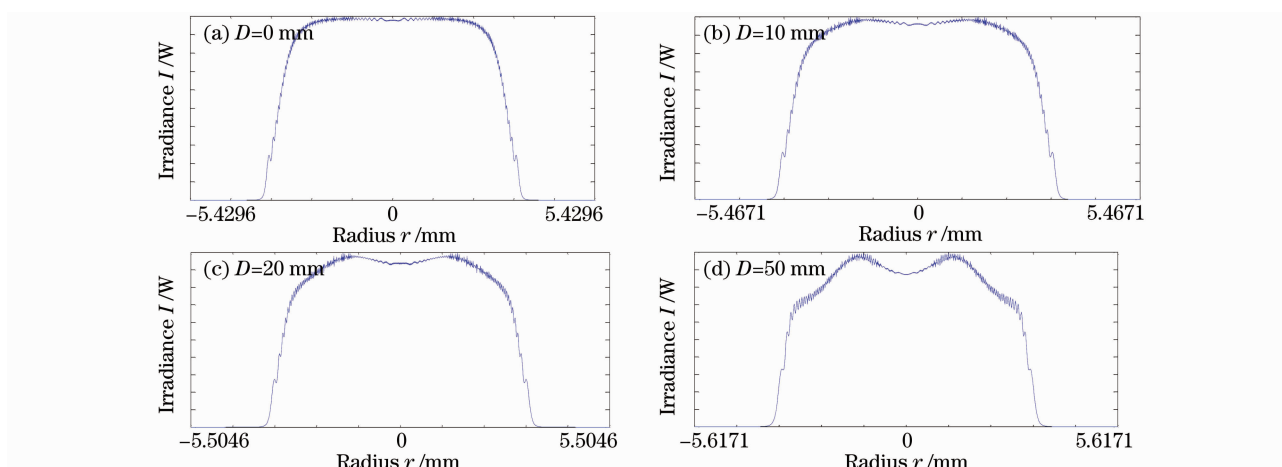


图 3 第 1 片非球面镜截面计算点与拟合曲线

Fig. 3 Calculated points and cross-section curves of lens 1

5 物理光学传播结果分析

在光学设计软件 ZEMAX-EE 2003 的 Lens Data Editor 表格中,输入表 2 与表 3 中的数据,对其物理光学传播(POP)过程进行仿真,得到输出平顶光束光强子午截面曲线图如图 4(a)所示,仿真得到的光强分布曲线与(3)式描述的理论曲线基本吻合。由于在计算精度上存在一些误差,因此,仿真曲线的顶端会有微小的波动。

图 4 物理光学传播结果(D 为传播距离)Fig. 4 Results of POP (D is propagation distance)

由于衍射的存在,传播距离越远,光束均匀性越差,如图 4(b)~(d)。当然,在非球面镜输出端放置一组扩束镜后,能将平顶光束传播得更远。

6 结 论

在非球面镜的设计中,最关键的地方是计算非球面镜的曲面表达式,因此分析其相关的影响因子显得至关重要。设计的宗旨是要尽可能地降低非球面度,同时保证其紧凑性。对影响非球面度的参数进行了数值模拟和分析。在参数拟合中,通过各种数值拟合的办法,将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;最后在光学设计软件中检验了高斯光束整形后的结果。

参 考 文 献

- 1 Luo Shirong, Lü Baida. Propagation characteristics of flattened Gaussian beams through a lens series[J]. *Laser Technol.*, 2001, **25**(2): 143~146
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 Gong Huaping, Lü Zhiwei, Lin Dianyang. Present status of laser beam spatial shaping[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9): 2~5
龚华平, 吕志伟, 林殿阳. 激光束空间整形的研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(9): 2~5
- 3 Lin Yong, Hu Jiasheng. Laser beam shaping techniques[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(6): 1~4
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 Li Ke, Shi Peng, Zhang Xiaobo *et al.*. Design and preparation of diffraction optical element in dual lens system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1972~1977
李 珂, 石 鹏, 张晓波 等. 双透镜系统光束整形元件的设计制作[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1972~1977
- 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 flattop beam[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(30): 5488~5499
- 7 R. McCaughey, V. Nadeau, M. Dickinson. Flat-top beam for laser stimulated pain[C]. *SPIE*, 2005, **5698**: 263~272
- 8 J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson. Measured performance of a refractive Gauss-to-flat-top reshaper for deep-UV through near-IR wavelengths[C]. *SPIE*, 2001, **4443**: 115~124
- 9 Tang Jiade. Nonlinear curve fitting based on MATLAB[J]. *Comput. Modern*, 2008, **154**(6): 15~19
唐家德. 基于 MATLAB 的非线性曲线拟合[J]. *计算机与现代化*, 2008, **154**(6): 15~19
- 10 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004. 3~9
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