

文章编号: 0253-2239(2004)08-1137-4

利用边缘相位校正实现光束整形的高精度优化*

高 峰 刘建莉 高福华 刘世杰 郭永康
(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

摘要: 提出利用边缘相位校正的新方法,校正用追迹法设计的产生环形光束的衍射光学元件的相位分布,从而实现光束整形中的高精度优化。通过将高斯光束整形为环形光束,将该方法、G-S(Gerchberg-Saxton)算法和改进的 G-S 算法设计得到的整形结果作了比较,结果表明,G-S 算法的整形结果虽然衍射效率最大,但是均方根值和最大偏差也太大;改进的 G-S 算法可以有效的降低均方根值和最大偏差,但衍射效率也有较大的下降;而用边缘相位校正可以在衍射效率略微下降的情况下,更大的降低均方根值和最大偏差,其整形结果是综合了衍射效率、均方根值和最大偏差这三个评价指标以后得到的最优化结果,已接近理想的环形光束。

关键词: 衍射光学; 光束整形; 追迹法; 边缘相位校正

中图分类号: O436 文献标识码: A

High-Accuracy Optimization for Beam Shaping Using Marginal Phase Correction

Gao Feng Liu Jianli Gao Fuhua Liu Shijie Guo Yongkang
(Physics Department of Sichuan University, Chengdu 610064)
(Received 1 July 2003; revised 20 October 2003)

Abstract: A high-accuracy optimization method for beam shaping, the marginal phase correction, is presented for correcting the phase of the diffractive optical element (DOE) designed by ray tracing to generate a ring-shaped beam. Using an instance of converting a Gaussian beam into a ring-shaped profile, the shaped results of DOEs designed by this new approach, Gerchberg-Saxton (G-S) algorithm and improved Gerchberg-Saxton algorithm are compared. The compared results show that the Gerchberg-Saxton algorithm simultaneously brings about high diffraction efficiency and large root-mean square value and maximum error; the improved Gerchberg-Saxton algorithm can effectively decrease the root-mean-square value and maximum error but also drop down the diffraction efficiency too much; this new approach can balance the diffraction efficiency, root-mean-square value and maximum error to obtain the least root-mean-square value and maximum error upon the slight decrease of diffraction efficiency. The shaped ring of the beam by this new method approaches a perfect ring.

Key words: diffraction optics; beam shaping; ray tracing; marginal phase correction

1 引 言

现代衍射光学的优化设计方法和更精细加工技术的出现使衍射光学元件(DOE)在越来越多的领域得到了应用^[1~3],其设计方法大部分可归为两类:以

G-S(Gerchberg-Saxton)算法^[4]为代表的双向迭代方法和以模拟退火法^[5]为代表的单向搜索。虽然这两大类算法的通用性较好,但是依然存在一些缺点,例如 G-S 算法容易陷入局部极小,而模拟退火法无法实现真正意义上的缓慢退火等,因此尚存在一些算法用于设计在某种特定领域中使用的衍射光学元件,例如追迹法^[6]可以在满足稳相条件时设计出高精度的衍射光学元件,然而,稳相条件通常无法满足,因此,在

* 国家自然科学基金(10376019)资助课题。

E-mail: gaofeg@163.com

收稿日期:2003-07-01;收到修改稿日期:2003-10-20

利用追迹法求出衍射光学元件的相位分布以后,常常需要进一步优化。

本文的设计思想是利用边缘相位校正的新方法,校正用追迹法设计的产生环形光束的衍射光学元件的相位分布,从而实现光束整形中的高精度优化,由于仅对不满足输入输出函数缓慢变化条件的边缘进行相位校正,因此保留了追迹法设计的相位分布中满足稳相条件的部分,并校正了其设计的相位分布中不满足条件的那部分,因此在整形中得到了接近理想的输出函数。

2 设计方法

2.1 追迹法

在本文的设计中,是以圆对称的高斯光束整形为环形光束作为例证,因此,追迹法均用极坐标来描述。将衍射光学元件放置于高斯光束的束腰处,入射光和出射光的光强分布为

$$\begin{cases} P_i(r) = \begin{cases} \exp(-2r^2/r_0^2), & r \leq R_0 \\ 0, & r > R_0 \end{cases} \\ P_o(\rho) = \begin{cases} I_0 = \text{const}, & \rho \in [\rho_1, \rho_2] \\ 0, & \rho \notin [\rho_1, \rho_2] \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

r 和 r_0 分别为入射光束在衍射光学元件表面的径向坐标和高斯光束束腰半径, R_0 表示数值计算时抽样的半径, ρ_1 和 ρ_2 为出射光束的环形内外半径。根据入射和出射的总能量守恒和部分能量守恒,则得到

$$\begin{cases} \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r P_i(r) dr = \int_{\rho_1}^{\rho_2} 2\pi \rho P_o(\rho) d\rho, \\ \int_{r_1}^r 2\pi r P_i(r) dr = \int_{\rho_1}^{\rho(r)} 2\pi \rho P_o(\rho) d\rho, \end{cases} \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式,可求出 r 和 ρ 的映射函数

$$\rho(r) = \sqrt{\frac{(\rho_2^2 - \rho_1^2)[1 - \exp(-2r^2/r_0^2)]}{1 - \exp(-2R_0^2/r_0^2)}} + \rho_1, \quad (3)$$

考虑到相位函数 $\varphi(r)$ 的导数等于相应的方向余弦,在傍轴近似的条件下,方向余弦为 $(\rho - r)/z$, 于是有

$$\frac{d\varphi(r)}{dr} = k \frac{\rho(r) - r}{z}, \quad (4)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长,由此可以得到衍射光学元件的相位为

$$\varphi(r) = \frac{k}{z} \left[\left(-\frac{1}{2}r^2\right) + \int_{r_1}^r \rho(r) dr \right], \quad (5)$$

将(3)式代入(5)式中积分即可得到衍射光学元件的相位分布 $\varphi(r)$,但是,(5)式的积分没有解析解,

不过很容易通过数值积分得到给定点的相位值。

2.2 边缘相位校正

设计衍射光学元件时,通常并不满足输入函数和输出函数缓慢变化的条件,因此使用追迹法设计的元件其整形效果较差。利用边缘相位校正的方法可以对追迹法设计出的相位分布作进一步的校正,该方法基于衍射发散理论,通过人为的控制光束的发散,校正衍射光学元件中不满足输入输出函数缓慢变化条件的边缘相位,从而得到高精度的优化结果。

对高斯光束整形为环形光束,除了边缘部分以外,入射光束振幅 $U_i(r)$ 、相位 $\varphi(r)/k$ 和输出光束振幅 $U_o(\rho)$ 都是变化缓慢的函数。根据前述的原理, $P_o(\rho)$ 边缘的陡峭程度[即 $dP_o(\rho)/d\rho$] 受光学系统固有的衍射发散约束,进一步说,如果得到了陡峭的边缘,就又会使 $P_o(\rho)$ 的振荡加剧,特别是在边缘的周围。如果需要消除振荡,那么就on应该将 $P_o(\rho)$ 边缘的下降轮廓扩展变宽,至少也会增宽到光学系统有限孔径衍射所增大的固有宽度。这里,我们需要的是平滑 $P_o(\rho)$ 边缘的下降轮廓减小衍射效应,从而避免 $P_o(\rho)$ 的振荡。如图1所示,通过改变衍射光学元件靠近圆心($r \rightarrow 0$)处和外边缘($r \rightarrow r_a$)处的相位分布形式,来实现对 $P_o(\rho)$ 下降边缘的轻微扩展。

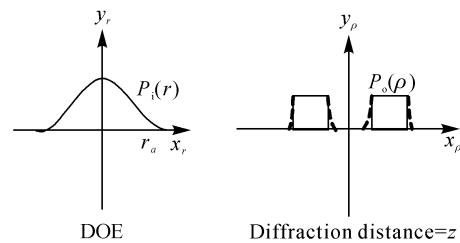


Fig. 1 Schematic of smoothing slopes of P_o

校正相位 $\varphi^{\text{cor}}(r)$ 可以实现扩展 $P_o(\rho)$ 的下降边缘,并可以从追迹的方法来考虑,校正前的映射函数为 $\rho(r)$,校正后变为 $\rho'(r)$,其中 ρ' 表示输出面上校正后的极坐标半径。利用(4)式,可以得到

$$\frac{d\varphi(r)}{dr} + \frac{d\varphi^{\text{cor}}(r)}{dr} = k \frac{\rho'(r) - r}{z}, \quad (6)$$

其中 $\varphi(r)$ 为直接用追迹法得出的相位分布,将(4)式再代入(6)式,替代 $d\varphi(r)/dr$ 后得到

$$\Delta\varphi(r) = \rho'(r) - \rho = \frac{z}{k} \frac{d\varphi^{\text{cor}}(r)}{dr}, \quad (7)$$

其中 $\Delta\varphi$ 表示由于校正而引入的与输入面 r 点对应的输出面 ρ 点的偏移量,由于 r 和 ρ 的对应关系, $\Delta\varphi(r)$ 也可以写为 $\Delta\varphi(\rho) = \Delta\varphi[r(\rho)]$,为了有效的平滑 $P_o(\rho)$ 的下降边缘,需要注意的是:在 ρ_1 和 ρ_2 点附近的 $|\Delta\varphi(\rho)|$ 的值,应该大于 $P_o(\rho)$ 下降边缘原

来的最小宽度。由此得到校正相位

$$\varphi^{\text{cor}}(r) = \frac{k}{z} \int_0^r \Delta\rho(r) dr, \quad (8)$$

与(5)式类似,该积分并没有解析解,只能求出数值

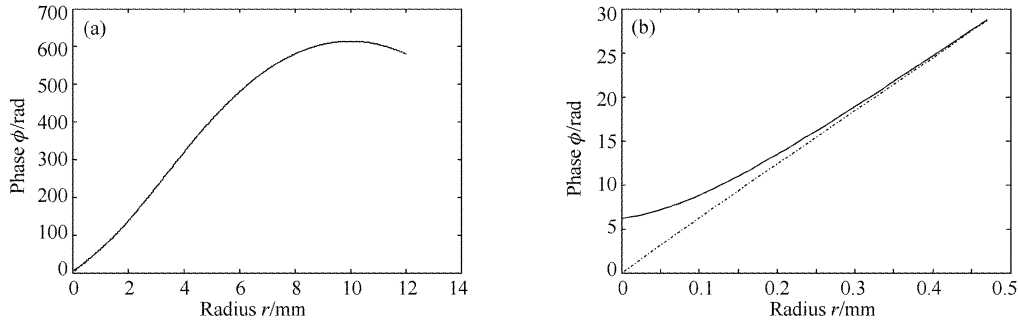


Fig. 2 Uncorrected (dashed line) and corrected (solid line) radial phase distribution of DOE. (a) Entire radial phase distribution, (b) Partial radial phase distribution near center

3 模拟计算

利用菲涅耳衍射积分,可以对衍射光学元件的衍射输出进行模拟计算,菲涅耳积分形式为

$$U_o(\rho, z) = \frac{k}{iz} \int_{\mathcal{A}} U_1(r) \exp\left[ik\left(z + \frac{r^2 + \rho^2}{2z}\right)\right] J_0\left(\frac{kr\rho}{z}\right) r dr = \frac{k}{iz} \int \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \exp[i\varphi(r)] \exp\left[ik\left(z + \frac{r^2 + \rho^2}{2z}\right)\right] J_0\left(\frac{kr\rho}{z}\right) r dr, \quad (9)$$

其中 J_0 表示第一类 0 阶贝塞尔函数, $\varphi(r)$ 即为衍射光学元件的相位函数, z 表示输出面与输入面之间的距离, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光波长。在下面的计算中我们选取的激光波长为 532 nm, 传输距离 $z=700$ mm。

为了评价整形效果,这里引入了三个评价参量: 衍射效率 η , 均方根 I_{rms} 和最大偏差 δ 。其定义如下:

$$\begin{cases} \eta = I_{\text{sw}}/I_{\text{total}}, \\ I_{\text{rms}} = \left[\sum_D (I_d - I_0)^2 / N \right]^{1/2}, \\ \delta = \left[\frac{I_d(x)_{\text{max}} - I_d(x)_{\text{min}}}{I_d(x)_{\text{max}} + I_d(x)_{\text{min}}} \right]_{\text{sw}}, \end{cases} \quad (10)$$

其中下标 sw 和 total 分别表示信号窗口和整个抽样窗口, I_d 和 I_0 分别表示整形后的输出光强分布和需要设计的理想光强分布, N 为抽样点数, \sum_D 代表

对整个抽样窗口内的所有抽样点求和。利用均方根值可以直观的看出计算值与预期值的整体差异,也可以在 G-S 算法中用它来决定迭代是否结束。 δ 表示信号窗口内最大的偏差。

3.1 Gerchberg-Saxton(G-S)算法的设计

由于 G-S 算法的计算量大,难以设计大尺寸的衍射光学元件,因此我们选择的尺寸为: $R_0=4$ mm, 高斯光束束腰半径为 $r_0=0.75$ mm, 需要整形成为的环形光束其内半径为 1.5 mm, 外半径为 3 mm。利用 G-S 算法^[4] 和改进的 G-S 算法^[7] 设计的衍射光学元件的整形结果如图 3 所示。其中,利用 G-S 算法和改进的 G-S 算法设计的衍射光学元件在衍射 700 mm 后得到的环形光束的几个评价参量的值如表 1 所示。

Table 1 The evaluation parameters of shaped ring beam

	Diffraction efficiency η	RMS	Maximum error δ
G-S algorithm	98.63%	2.75×10^{-3}	74%
Improved G-S algorithm	85.28%	2.66×10^{-5}	5.51%

3.2 追迹法设计和边缘相位校正

利用追迹法可以设计大尺寸的衍射光学元件,

这里设计了一个半径为 12 mm 的衍射光学元件,其中入射高斯光束的束腰半径为 2.821 mm, 需要整形

成为的环形光束其内半径为 3.75 mm, 外半径为 10 mm。图 2 即为设计的衍射光学元件相位分布。

图 4(a)、图 4(b)分别为追迹法设计整形的环形光束和边缘相位校正后的环形光束。

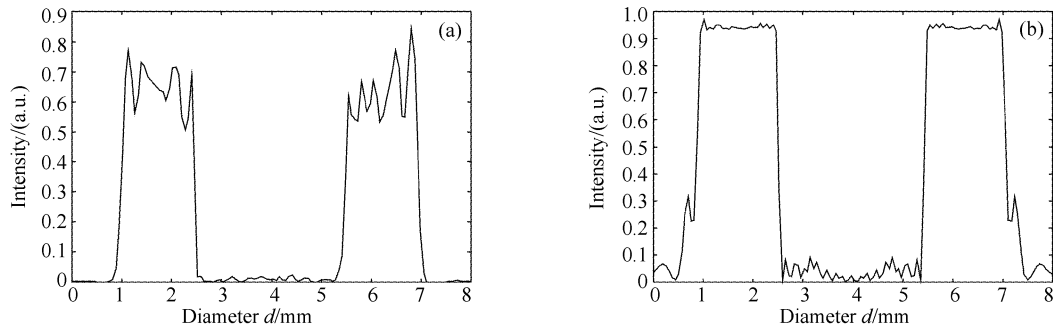


Fig. 3 The diametric intensity distribution of the shaped beam through Fresnel diffraction of 700 mm.
(a) Designed by G-S algorithm, (b) Designed by improved G-S algorithm

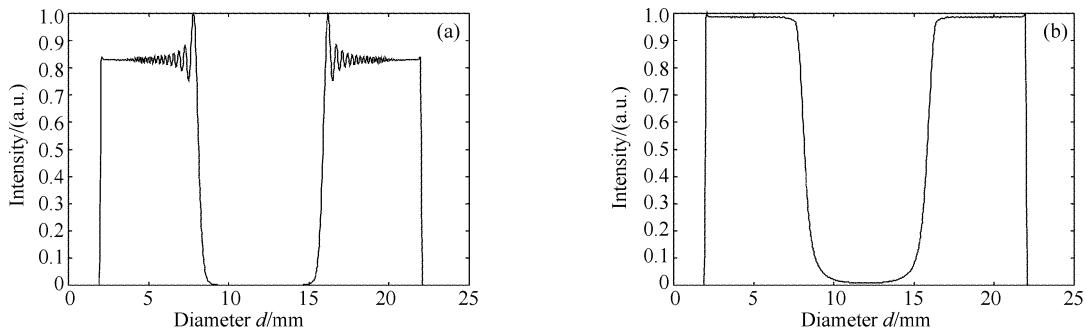


Fig. 4 The diametric intensity distribution of the shaped beam through Fresnel diffraction of 700 mm.
(a) Designed by ray tracing, (b) Designed by ray tracing plus marginal phase correction

利用相位校正以后的环形光束的评价参量为： $\eta=92.16\%$ ， $I_{\text{rms}}=3.30\times 10^{-7}$ ， $\delta=2.87\%$ 。利用边缘相位校正法对追迹法得到的衍射光学元件的相位进行校正后，其整形结果可以通过评价参量(衍射效率、均方根值和最大偏差)与改进的 G-S 算法设计的衍射光学元件的整形结果进行比较。可以看出，边缘相位校正以后的衍射光学元件整形的衍射效率更大、均方根值和最大偏差均更小，这也可以从比较图 3 和 4 直观的看出。G-S 算法虽然衍射效率较高，但是其最大偏差高达 74%，由此说明，边缘相位校正综合了衍射效率、均方根值和最大偏差这三个评价指标以后得到的最优化结果。

结束语 利用边缘相位校正的新方法，校正用追迹法设计的产生环形光束的衍射光学元件的相位分布，从而实现光束整形中的高精度优化。通过将高斯光束整形为环形光束和引入的三个评价参量，将该方法、G-S 算法和改进的 G-S 算法设计得到的整形结果作了比较，结果表明，边缘相位校正综合了衍射效率、均方根值和最大偏差这三个评价指标以后得到的最优化结果，其整形出的环形光束已接近

理想的环形光束。

参 考 文 献

- Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Athermalized infrared hybrid optical system by employing diffractive element. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(11): 1364~1367 (in Chinese)
- Zhang Liang, Shi Yunfei. Computer generated holography wavefront-transforming element fabrication by binary optical technique. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(9): 1150~1152 (in Chinese)
- Zhou Chongxi, Lin Dajian, Du Chunlei. Optical design of hybrid reflective/diffractive binary optics Schmidt telescope. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(5): 627~630 (in Chinese)
- Gerchberg R W, Saxton W O. Phase determination for image and diffraction plane pictures in the electron microscope. *Optik*, 1971, **34**(3): 275~284
- Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi J M P. Optimization by simulated annealing. *Science*, 1983, **220**(4598): 671~679
- Bryngdahl O. Geometrical transformations in optics. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1974, **64**(8): 1092~1099
- Tang Hong, Huang Xiaoyang, Chen Ran *et al.*. A modified algorithm for designing laser wavefront shaper. *Opto-Electronic Engineering* (光电工程), 1997, **24**(5): 5~10 (in Chinese)