文章编号: 1000-8608(2010)01-0152-05

实现长焦深的衍射光学元件设计方法

林 勇, 胡家升*

(大连理工大学电子与信息工程学院,辽宁大连 116024)

摘要:提出了一种设计长焦深小焦斑衍射光学元件的方法.该方法采用 ZEMAX 光学设计 程序,利用能量守恒原理求解目标函数,并综合考虑焦斑大小保持不变的要求,对目标函数进 行了修正,通过修正后的函数来约束输出光束在焦深范围内的轴上位置,从而完成衍射光学元 件的相位优化,并求得相应的工艺参数.该元件不但可以使激光束具有长焦深和小焦斑,而且 还具有可加工性.焦深范围能达到 2 mm,焦深范围内光斑半径在 5.32~10.48 μm 变化,与相 同参数的传统光学元件相比,焦深增加了 8 倍,焦斑半径变化很小,而普通光学元件在此范围 内最大焦斑半径达到 102.9 μm.该方法为长焦深元件的设计、加工与制造提供了可行方案.

关键词:光学设计;衍射光学元件;长焦深 中图分类号:TH74 **文献标志码**:A

0 引 言

长焦深元件在很多方面有着重要应用,如激 光切割、钻孔、微机械制作中对厚胶的曝光等.实 现长焦深的方法有多种:传统的方法是通过减小 数值孔径来扩展焦深,但这种做法以牺牲分辨率 为代价.1987年德尔宁提出无衍射光束的概念 后,人们开始利用无衍射光束来实现长焦深并提 出了一些设计方法,例如圆锥镜法^[1]、无限窄圆环 法^[2]等,但这些方法存在焦深范围不易控制和焦 深范围内轴上光强振荡厉害,或者能量利用率低 等问题.

随着二元光学技术的发展,利用衍射光学元 件实现长焦深成为人们研究的热点.研究人员已 经发表了大量有关方面的文献:Liu 等^[3]利用共 轭梯度法设计了长焦深元件;Chen 等^[4]利用串行 迭代算法设计出了具有长焦深特性的衍射光学元 件.这些衍射光学元件具有能量利用率高、轴上强 度分布均匀等优点,但面形较为复杂,元件难以制 作加工.作者曾经提出模糊控制迭代算法^[5]来设 计用于光束整形的衍射光学元件,还将该算法应 用到基于 JTC 的光学加密系统的密钥设计中^[6]. 但如果用它来设计长焦深元件,需要对多个焦深 平面进行串行迭代,运算量将骤然增大.

本文提出一种设计长焦深衍射光学元件的方法,该方法采用 ZEMAX 光学设计软件,通过约 束输出光束在光轴上的位置,来完成衍射光学元 件的相位优化,更好地完成长焦深衍射光学元件 的设计任务,并使设计的元件具有可加工性.

1 设计原理

长焦深衍射光学元件的设计,实质上就是寻 找最优的相位分布函数,使入射光波经元件作用 后,生成长焦深、小焦斑的聚焦光束.为降低衍射 光学元件的制作难度,本文采用折衍混合系统^[7], 即用同一个元件完成折射和衍射的功能,如图 1 所示.其中折射部分主要控制系统的光焦度;衍射 部分一方面影响光焦度,另一方面进一步调整光 场分布,将原本会聚于焦点位置处的能量向焦点 两边扩展,形成长焦深.由于衍射部分的调制,不 同口径处的出射光线与光轴交于不同位置.本文 把交点位置随口径的变化关系称为目标函数, 目标函数反映了各出射光线的方向.通过合理设 定目标函数,可以得到长焦深、小焦斑的聚焦光 束.

收稿日期: 2008-03-01; 修回日期: 2009-12-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60877003).

作者简介: 林 勇(1976-),男,博士生;胡家升*(1941-),男,教授,博士生导师,E-mail:jshu@dlut.edu.cn.



Fig. 1 Hybrid refractive-diffractive system with long focal depth

本文基于能量守恒原理^[8],并在长焦深下保 持焦斑大小不变的条件下来设定目标函数.原理 如图 2 所示,要求入射光波经元件作用后,输出光 场的能量全部集中于 $[d_1, d_2]$,并且在 d_1 到 d_2 的 传播距离内,轴上光强及光斑大小是均匀的. 假设 在[0,r] 口径范围内的入射光能量全部会聚在轴 上 $[d_1, z(r)]$ 内,其中 $r \in [0, R], z(r) \in [d_1, d_2]$.设入射面光场能量面密度为p,出射光在光 轴上能量线密度为q.则入射面上口径[0, r]内的 能量为 $A = 2\pi p \int_0^r r dr = \pi p r^2$,对应的出射光在轴 上 $[d_1, z(r)]$ 内的能量为 $B = \int_{d_1}^{z(r)} q dz = q(z(r) - d_1)$.依据能量守恒A = B $\mathcal{B} \frac{p}{q} = \frac{d_2 - d_1}{\pi R^2}$ 联立解 得

$$z(r) = d_1 + \frac{d_2 - d_1}{R^2} r^2; r \in (0, R)$$
 (1)

其中 d_1 和 d_2 分别是前后焦点, R 为元件半口径. 式(1) 保证了轴上光强分布均匀情况下出射光线 与光轴交点位置.考虑到主光斑大小保持不变的 条件为 $z(r) = kr^{[9]}$,其中 k 为常数,将式(1) 修正 为

$$z(r) = d_1 + \frac{(N-1)(d_2 - d_1)}{NR^2} r^2 + \frac{1}{N} kr;$$

$$r \in (0,R)$$
(2)

其中 N 为权重因子,式(2)综合考虑了轴上光强 均匀及光斑大小不变两个因素来求解目标函数. 通过 ZPL 语言编写宏指令程序(macro)来完成目 标函数在 ZEMAX 中的设定. 然后利用 ZEMAX 本身提供的优化算法,如阻尼最小二乘法,即工具 菜单(Tools)中的优化(optimization)选项,来寻 找最优的相位函数 $\phi(\rho)$,使得入射光线经元件作 用后,在光轴上的位置与预先设定的目标函数位 置尽可能一致.



Fig. 2 Schematic diagram of energy conservation principle

2 计算机设计结果

本文设计的长焦深系统参数如下:半口径 R=3.5 mm,入射平面波波长 λ =0.6328 μ m,折射 面曲率半径 37 mm,材料为 K9 玻璃,厚度 t=2 mm,系统光焦度 φ =0.014 7,由折射和衍射面共 同来承担.本文要达到的焦深范围 Δf =2 mm, 前后焦点 d_1 、 d_2 分别是 67.0 mm 和 69.0 mm.

目标函数系数 k、N 反映了轴上光强均匀和 光斑大小不变两者的折中程度,本文选取 $k = \Delta f / R$,通过调整 N 的大小寻求最优的目标函数. 经尝试,N 取值为 4 时优化效果最好.

利用 ZEMAX 软件优化设计得到衍射面为 偶次非球面的相位分布 φ(ρ),它的各阶系数如图 3 所示,本文取前 5 项系数.通过此相位分布得到 不同距离处的横向光强和弥散斑图样分别如图 4 和图 5 所示.由以上各图可见,输出光束在焦深范 围内主光斑半径大小变化范围是 5.32~10.48 μm,焦深范围基本可以达到 2 mm,且轴上光强较 为均匀.

为了与传统光学透镜进行对比,图 6 给出了 具有相同参数(R=3.5 mm,f=68 mm)的普通 光学透镜的弥散斑图样,其主光斑大小变化是 7.5~102.9 μ m,焦深为 0.24 mm^[10].由此可见, 本文所设计的元件比普通透镜焦深提高了 8 倍 多,并且焦斑较小.轴上光强分布如图 7 所示.



图 3 优化后衍射面相位分布函数各阶系数

Fig. 3 Coefficients in phase distribution function of optimized diffraction surface

154



0.2 0 66.5 67.0 67.5 68.0 68.5 69.0 69.5 *d/mm*





前面设计的相位函数 φ(ρ)所表示的面形十 分复杂,目前的加工水平难以实现.为了使其成为 可加工的元件,需要对面形加以近似,即把它转化 为衍射面各环带半径和矢高的函数(面形方程). 由于各环带边界出现在相位值是 2π 整数倍处,利 用下式可以求得各环带归一化半径 ρ_i:

$$|\phi(\rho_{i})| = |A_{1}\rho_{i}^{2} + A_{2}\rho_{i}^{4} + A_{3}\rho_{i}^{6} + A_{4}\rho_{i}^{8} + A_{5}\rho_{i}^{10}| = 2\pi i$$
(3)

其中*i*为环带序号,系数A₁~A₅的值由图3给出.

环带序号 *i* 由透镜中心向边缘递增,直到 ρ_i 达到所 需口径为止.这样就确定了环带数 *i* 和环带半径 ρ_i.

衍射面的矢高函数(面形方程)如式(4)^[11] 所示:

$$Z_{bi} = \frac{\lambda}{N-1} \left[\frac{1}{2\pi} \phi(\rho) + \operatorname{int} \left(\frac{1}{2\pi} | \phi(\rho) | \right) \right] \quad (4)$$

其中 λ 是入射光波长, N 是衍射元件基底材料的
折射率, int 为向下取整运算符. 将式(4) 中的 ρ 转
化为实际尺寸 r 后, 展开如式(5) 所示:

$$Z_i = B_1 r^2 + B_2 r^4 + B_3 r^6 + B_4 r^8 + B_5 r^{10} + b_i \quad (5)$$

其中 Z_i 代表不同环带的面形方程; $B_1 \sim B_5$ 为各 级系数,具体的数值为 $- 7.86 \times 10^{-4}$ 、4.00 × 10^{-5} 、 $- 3.50 \times 10^{-6}$ 、 2.73×10^{-7} 、 $- 7.57 \times 10^{-9}$; b_i 是各环带方程中的常数项,其值以及各环带半 径大小如表 1 所示.

表1 各环带径向半径坐标和面形方程常数项值

Tab. 1	Radial coordinate of different annulus zone and
	the constant term of surface profile function

i	r_i	$b_i / 10^{-3}$
1	1.30	0
2	1.91	-1.226
3	2.43	-2.452
4	2.95	-3.678
5	3.50	-4.904

*B*_i 和表1给出的数据确定了衍射面的面形, 但 ZEMAX 软件不能直接画出衍射面形图.本文通 过编写外部扩展程序包 DOEplot, 画出了工艺设计 的面形如图 8 所示,其中横坐标 *r*、纵坐标 *Z* 分别代 表了径向半径和矢高大小.并通过软件自定义面形 的功能,将工艺设计的面形输入到 ZEMAX 中,得 到不同焦深处弥散斑图样,如图 9 所示.考虑到实际加工过程中不可避免地引入面形误差,根据文献 [12]提到的误差模式,模拟了面形误差在±5%范 围内弥散斑图样,如图 10 所示.以上两结果(图 9 和图 10)与计算机设计的原始结果(图 5)非常接近,由此证明该元件具有较好的可加工性.





Fig. 10 Pattern of dispersed spot obtained by technically designed result with surface error

4 结 论

本文基于能量守恒原理,利用 ZEMAX 光学 设计软件设计了长焦深衍射光学元件.给出了满 足设计要求的衍射光学元件相位分布,并得到了 用于实际加工的工艺参数及衍射光学元件的面 形.计算机设计结果表明,本文设计的衍射光学元 件能够很好地将入射光束聚焦成长焦深、小焦斑, 焦深范围基本上达到了 2 mm,焦斑大小的变化 范围是 5.32~10.48 µm.对衍射光学元件可加工 性的研究,使得该种元件的面形可以用现代加工 工艺来实现,从而为长焦深衍射光学元件的设计、 加工提供了一种可行方案.

参考文献:

- SERGEI Y P, ARI T F. Apodization of generalized axicons to produce uniform axial line images [J].
 Pure and Applied Optics, 1998, 7:537-548
- [2] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory [J]. Journal of Optical Society of America, 1987, A4:651-654
- [3] LIU R, DONG B Z. Generation of pseudo nondiffracting beams with use of diffractive phase elements designed by the conjugate-gradient method [J]. Journal of Optical Society of America, 1998,

- [4] CHEN Y S, ZHANG J G, BAO N K. An adjacent sequence iteration method for designing a diffractive element with function of large depth of focus [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 32(3):267-271
- [5]林 勇,胡家升,吴克难.一种用于光束整形的衍射 光学元件设计算法[J].光学学报,2007,27(15): 1682-1686
- [6] 吴克难,胡家升,林 勇. 一种用于 JTC 光学加密系统密钥设计的新方法[J].光学精密工程,2007, 15(4):577-581
- [7] 刘 迎,林 琳,张慧娟.采用回射屏的折/衍射头盔 投影显示器设计[J].光学精密工程,2006,14(4): 564-569
- [8] 金国藩,严瑛白,邬敏贤,等.二元光学[M].北京:国 防工业出版社,1998
- [9] BURVALL A, GONCHAROV A, DAINTY C. Telephoto axicon [J]. Proceedings of the SPIE, 2005, 5962:324-331
- [10] 胡家升.光学工程导论[M].大连:大连理工大学出版社,2002
- [11] 杨国光. 微光学与系统[M]. 杭州:浙江大学出版 社,2008
- [12] 吴冬良,戴一帆,王贵林,等.光学面形误差对环围 能量比的影响[J].光学精密工程,2007,15(9): 1328-1335

Method for design of diffractive optical elements with long focal depth

LIN Yong, HU Jia-sheng*

(School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A method of the design of diffractive optical elements (DOE) with long focal depth and small focus dot is presented. The ZEMAX software was used in the method. The objective function was firstly deduced from the energy conservation principle. And then, the function was further revised to satisfy the requirement of small focus dot within long focal depth and constrain the axial position of output beam to optimize the phase of DOE. A DOE was designed by using the obtained objective function, and the corresponding parameters were obtained. Experimental results prove the effectiveness of the proposed method. The focal depth of the designed DOE is 2 mm, which is 8 times of that of a traditional optical element. The focus spot radius varies between 5.32 and 10.48 μ m, considerably smaller than the spot radius of a conventional element, which is up to 102.9 μ m in the same range. It is testified a valid approach for the design and manufacture of diffractive optical elements with long focal depth.

Key words: optical design; diffractive optical elements (DOE); long focal depth

¹⁵(1):144-151