

文章编号 1004-924X(2008)10-1810-05

基于折/衍混合原理的长焦深成像物镜消色差方法

张 慧, 丁雪梅, 谭久彬

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为兼顾成像系统消色差及扩展焦深的特性,提出了一种基于折/衍混合原理的长焦深成像物镜在可见光波段内消色差的方法。通过阐述对数光锥位相结构的特征,讨论了长焦深元件的色散特性,并依据折/衍混合消色差原理,确定长焦深成像物镜中折射元件与衍射元件位相函数重新分配的原则;位相重新分配后,衍射元件在承担扩展焦深功能的同时增加了部分消色差光焦度,从而使长焦深元件获得消色差特性。理论和仿真分析表明,位相函数重新分配后得到的长焦深元件在中心波长 λ_0 (587 nm)时的轴向光强分布与原长焦深元件一致,而在波长为 λ_F (486 nm)、 λ_c (656 nm)时的轴向光强分布区域重合,即在保留焦深扩展特性的同时,有效地校正了其在可见光波段内的初级色差。

关键词:折/衍光学系统;长焦深成像物镜;消色差;能量守恒

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

An achromatic method for optical imaging objective with long focal depth based on hybrid refractive-diffractive principle

ZHANG Hui, DING Xue-mei, TAN Jiu-bin

(*Institute of Ultra-precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: For the purpose of studying the characteristics of achromatic aberration and focal depth extension, an achromatic method in visible band was presented for the optical imaging objective with long focal depth based on the refractive-diffractive hybrid objective. By analyzing the formation of logarithmic phase, the dispersion of a element with long focal depth was discussed. According to the refractive-diffractive hybrid achromatic principle, the phase distributions of the refractive and diffractive elements were restructured. In novel objective system, the diffractive elements were employed in extending the focal depth and improving the achromatic focal power. Compared with traditional objective system, the simulation results show that the on-axis intensity distribution of the achromatic hybrid refractive-diffractive objective based on novel phase relationship is unaltered in central wavelength λ_0 (587 nm), and they are the coincidence in achromatic wavelength of λ_F (486 nm) and λ_c (656 nm).

Key words: refractive-diffractive optics; optical imaging objective with long focal depth; achromatic aberration; uniform-intensity

收稿日期:2007-12-19;修订日期:2008-03-17.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 50675052)

1 引 言

扩展焦深是保证成像光学系统能在复杂环境下在较大的范围内有较好的成像质量的重要技术之一^[1-3]。目前,基于能量守恒法的对数光锥^[4-6]实现长焦深器件的方法因其可灵活设计焦深范围,应用较为广泛。文献[1]给出一种基于折/衍混合的对数光锥结构的设计方案,其中折射器件(如平凸透镜)承担主要的光焦度,而衍射器件的位相用于扩展焦深,改善光强分布。这种结构能够解决对数位相器件加工困难的问题,但是没有考虑其色散特性,故不能用于复色成像系统中。文献[2]给出的长焦深透镜结构,其衍射元件的相位函数通过分配光焦度及焦深两步获得对数光锥形式,设计过程复杂,且很难直接判断其轴向光强分布随波长变化的趋势。

本文从分析对数光锥的结构特点入手,讨论文献[1]给出的折/衍混合长焦深透镜的色散特性,基于折/衍混合消色差原理提出一种长焦深元件在可见光波段内消色差的方法。其中衍射元件的位相函数通过直接分配光焦度获得,不但承担原有的扩展焦深功能,同时增加部分消色差光焦度,从而可使长焦深元件获得消初级色差的特性。

2 能量守恒法的基本原理

能量守恒设计方法基本原理^[4-7]如图 1 所示,要求一束平行光入射到器件表面后,在 d_1 到 d_2 的传播距离内光强分布均匀。设 $P_\delta(r)$ 为入射光在器件表面的功率密度, $P_z(r)$ 为轴上 d_1 到 d_2 间的功率密度。根据能量守恒原理有:

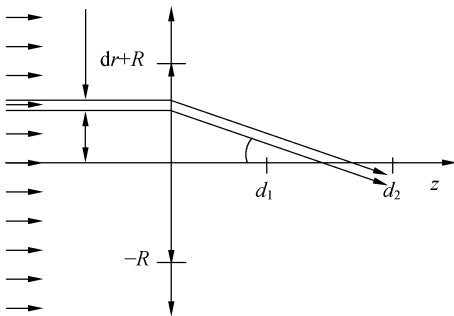


图 1 能量守恒法设计原理

Fig. 1 Illustration of principle for uniform-intensity

$$2\pi P_\delta(r)rdr = \pm P_z(r)dz, \quad (1)$$

式(1)在半径为 r , 宽度为 dr 的环带与轴向距离 dz 之间建立了一一对应的能量映射关系。对式(1)的±号取正号, 两边进行积分得到:

$$2\pi \int_0^r P_\delta(r)rdr = \int_{d_1}^{z(r)} P_z(z)dz, \quad (2)$$

由于入射波为平面波, 故 $P_\delta(r) = \text{const}$, 又要求光强沿轴平顶分布, 则 $P_z(r) = \text{const}$, 代入式(2)可得:

$$z(r) = d_1 + ar^2, \quad (3)$$

定义:

$$a = \frac{\pi P_\delta}{P_z} = \frac{\pi(d_2 - d_1)}{\pi R^2} = \frac{(d_2 - d_1)}{R^2}, \quad (4)$$

$z(r)$ 与器件位相函数 $\phi(r)$ 的关系则由远轴微分方程确定:

$$-\frac{d\phi(r)}{dr} = \sin \theta = \frac{r}{\sqrt{r^2 + z(r)^2}}, \quad (5)$$

当满足近轴近似条件时, 即 $\sin \theta \approx \tan \theta$, 则:

$$-\frac{d\phi(r)}{dr} \approx \tan \theta = \frac{r}{z(r)} = \frac{r}{d_1 + ar^2}, \quad (6)$$

对式(6)积分, 可以得到对数型位相函数:

$$\phi(r) = -\frac{1}{2a} \ln(d_1 + ar^2) + \text{const}. \quad (7)$$

3 长焦深元件的色散分析

如式(7)描述的如此复杂的面型, 常规工艺难以加工, 文献[1]给出一种用折/衍混合结构实现的方案。其中衍射元件的位相函数如式(8)所示:

$$\phi_d(r) = -\left[\frac{1}{2a} \ln\left(1 + \frac{a}{d_1} r^2\right) - \frac{r^2}{2f} \right], \quad (8)$$

式中, f 为透镜焦距的设计值。

本文期望长焦深透镜能用来替代普通透镜, 并应用于光学成像系统中。而获取较丰富的图像信息, 一般多采用复色成像系统而非单色成像系统, 因此设计工作必须考虑其色散特性。

为分析长焦深混合透镜中衍射元件的色散特性, 首先需要对如式(7)所示的对数型位相函数进行分析。

当 $d_2 - d_1 \ll d_1$ 时, 令 $f = (d_1 + d_2)/2$, 则 $d_1 \approx f$, 对式(7)进行泰勒级数展开得到:

$$\phi(r) = -\frac{1}{2a} \ln d_1 \left(1 + \frac{a}{d_1} r^2 \right) + \text{const} = -\frac{1}{2a} \left[\left(\frac{a}{d_1} r^2 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{a}{d_1} r^2 \right)^2 + \dots \right], \quad (9)$$

$$\text{令} \quad \text{const} = \frac{1}{2a} \ln(d_1)$$

对式(9)在 dof 趋于 0 时取极限得到:

$$\lim_{dof \rightarrow 0} \phi(r) = -\frac{r^2}{2f}, \quad (10)$$

折射透镜位相函数与波长的关系可描述为:

$$\phi_r(r, \lambda) = -\frac{r^2}{2f(\lambda)}, \quad (11)$$

$$f(\lambda) = \frac{[n(\lambda_0) - 1]}{[n(\lambda) - 1]} \cdot f(\lambda_0), \quad (12)$$

式中, λ, λ_0 分别表示工作波长及设计波长; $f(\lambda), f(\lambda_0)$ 分别表示在波长为 λ, λ_0 时折射透镜的焦距; $n(\lambda), n(\lambda_0)$ 分别表示在波长为 λ, λ_0 时透镜材料的折射率。

比较式(10)、(11)可知, 对数光锥位相函数的极限值与折射透镜的位相函数相同。因此, 位相函数如式(8)所示的衍射元件是近似无光焦度的元件, 该折/衍混合长焦深透镜的色散特性由组成它的折射透镜决定。

通过对折/衍混合长焦深透镜的轴向光强分布进行仿真分析可以进一步说明其色散特性。其轴向光强分布满足式(13):

$$I(z, 0) = \left(\frac{2\pi}{\lambda z} \right)^2 \left| \int_0^R \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2z} + ik\phi_h(r_1, \lambda) \right) r_1 dr_1 \right|^2, \quad (13)$$

$$\phi_h(r_1, \lambda) = \phi_d(r_1) + \phi_r(r_1, \lambda), \quad (14)$$

其中, z 为传播距离; λ 为工作波长; r_1, r_2 分别为孔径平面和观察平面的径向坐标; $\phi_h(r_1, \lambda)$ 为折/衍混合长焦深透镜的位相函数。

利用式(13)对折/衍混合长焦深透镜轴向光强分布进行仿真, 其中 ϕ_d 由式(8)确定, 仿真结果如图 2 所示, 不失一般性, 其设计参数由表 1 给出。

由图 2 可知, 这种位相分配关系的折/衍混合长焦深透镜的焦深分布区域随着波长的增大而右移, 即其色散特性与传统折射透镜的色散特性相一致。该结果与前述分析一致, 其本质原因在于光焦度主要由折射透镜承担, 而衍射器件的位相仅用于扩展焦深, 改善光强分布, 完全不承担光焦度。为满足其在复色成像系统中的应用, 必须改

变折、衍透镜的位相分配关系, 以达到消色差的目的。

表 1 长焦深透镜参数表

Tab. 1 Parameters of objective with long focal depth

| 参 数 | 设计值 |
|--------|-------------|
| 工作波段 | 486~656 nm |
| 中心波长 | 587 nm |
| $f/\#$ | $f/4$ |
| 焦 距 | $f=17.5$ mm |
| 焦 深 | $dof=1$ mm |

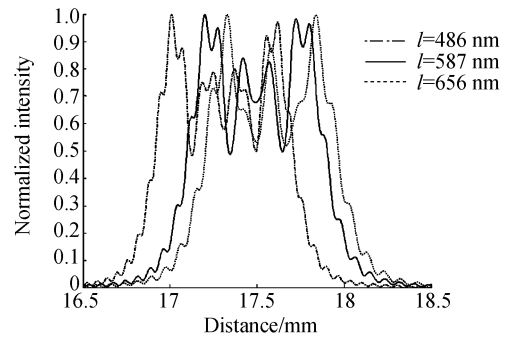


图 2 长焦深透镜轴向光强分布曲线

Fig. 2 On-axis intensity distributions of objective with long focal depth

4 折/衍混合消色差原理^[8-9]

传统折射透镜的色散特性用光学材料的阿贝数 V (色散的倒数) 来描述, 其表达式为:

$$V_r = \frac{n_d - 1}{n_F - n_c}, \quad (15)$$

式中, n_i 是波长为 λ_i 时的折射率, $i=F, c, d$ 。在可见光电磁波段, 大部分光学材料的折射率都随波长增大而减小, 故传统透镜的阿贝数恒为正值。

衍射透镜的色散特性则与此不同, 为与传统透镜的色散特性相比较, 对衍射透镜定义其等效阿贝数为:

$$V_d = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_c} = -3.453, \quad (16)$$

式中, 所用 $\lambda_F, \lambda_c, \lambda_d$ 分别为 486 nm、656 nm、587 nm。可见, 衍射透镜的色散与玻璃材料无关, 仅与波长有关, 其阿贝数为负值与传统透镜相反。这种色散的负向性和与材料无关性非常有利

于校正色差。因此,结合折射透镜与衍射透镜的色散特点,可以构成折/衍混合消色差透镜。

设 λ_d 为中心波长, λ_F 、 λ_c 为消色差波长,则利用折/衍混合来实现消色差的条件为:

$$\begin{cases} \frac{1}{f_d(\lambda_d)} + \frac{1}{f_r(\lambda_d)} = \frac{1}{f} \\ \frac{1}{f_d(\lambda_F)} + \frac{1}{f_r(\lambda_F)} = \frac{1}{f_d(\lambda_c)} + \frac{1}{f_r(\lambda_c)} \end{cases}, \quad (17)$$

$$f_r(\lambda_i) = f_r(\lambda_d) \cdot \frac{n(\lambda_d) - 1}{n(\lambda_i) - 1}, \quad (18)$$

$$f_d(\lambda_i) = f_d(\lambda_d) \cdot \left(\frac{\lambda_d}{\lambda_i}\right), \quad (19)$$

式中, f 为折/衍混合透镜的焦距; $f_r(\lambda_i)$ 、 $f_d(\lambda_i)$ 分别为折射透镜、衍射透镜在波长 λ_i 时的焦距值, $i=F, c, d$ 。

根据消色差条件可得到消色差混合透镜的光焦度分配公式:

$$\begin{cases} f_r(\lambda_d) = f \left(\frac{V_r - V_d}{V_r} \right) \\ f_d(\lambda_d) = f \left(\frac{V_d - V_r}{V_d} \right) \end{cases}. \quad (20)$$

5 折/衍混合长焦深透镜消色差方法

本文结合对数光锥的结构特点和折/衍混合消色差原理,提出一种改进的折/衍混合长焦深透镜消色差方法,该方法只需进行一次光焦度分配而无需分配焦深,设计过程简单。

为保留焦深范围设计灵活的特性,改进后的消色差折/衍混合长焦深透镜的位相函数仍根据能量守恒原理由式(7)确定:

$$\phi_h(r) = -\frac{1}{2a} \ln\left(1 + \frac{a}{d_1} r^2\right), \quad (21)$$

其中衍射透镜的位相函数设计为:

$$\phi_d(r, \lambda) = -\frac{r^2}{2f_d(\lambda)} + \phi_{d0}(r), \quad (22)$$

$$\phi_{d0}(r) = -\left[\frac{1}{2a} \ln\left(1 + \frac{a}{d_1} r^2\right) - \frac{r^2}{2f}\right], \quad (23)$$

该位相函数由两部分组成:一部分是消色差项,该项由根据消色差条件式(17)、(19)得到的 $f_d(\lambda)$ 来确定;第二部分是扩展焦深项 $\phi_{d0}(r)$,该项与前述折/衍混合透镜中衍射元件的位相函数(如式(8)所示)相同。

混合透镜中折射透镜的位相函数由依据消色差条件得到的光焦度确定为:

$$\phi_r(r, \lambda) = -\frac{r^2}{2f_r(\lambda)}, \quad (24)$$

根据上述位相函数及光焦度的分配可知混合透镜的实际位相函数为:

$$\phi_h(r, \lambda) = \phi_d(r, \lambda) + \phi_r(r, \lambda), \quad (25)$$

将式(18)~(24)分别代入式(25)可以得到:

$$\phi_h(r, \lambda_d) = \phi_h(r), \quad (26)$$

$$\phi_h(r, \lambda_F) = \phi_h(r, \lambda_c), \quad (27)$$

即波长为中心波长 λ_d 时混合透镜的位相函数等于设计的对数光锥位相函数;波长分别为 λ_F 、 λ_c 时,混合透镜的位相函数是相等的。

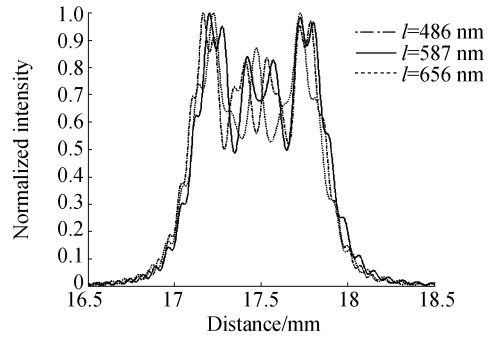


图 3 消色差折/衍混合长焦深透镜轴向光强分布曲线
Fig. 3 On-axis intensity distributions of hybrid refractive-diffractive achromatic lens with long focal depth

利用式(13)对消色差折/衍混合长焦深透镜轴向光强分布进行仿真,其中 ϕ_d 由式(22)确定,仿真结果如图 3 所示,为了同改进前的折/衍混合透镜的轴向光强分布特性比较,设计参数同样由表 1 给出。通过比较图 2、3 可知,改进型的折/衍混合长焦深透镜在中心波长处的轴向光强分布与原长焦深透镜的相同,而在消色差波长处的轴向光强分布区域在轴上发生平移,重合在一起,即是消色差的。

6 结 论

提出一种基于折/衍混合的长焦深成像物镜消色差方法。依据该方法获得的成像透镜与文献[1]、文献[2]中的结构比较,其差异在于折射元件与衍射元件的位相函数被重新分配,其中衍射元件的位相函数通过一次分配光焦度获得,在保留扩展焦深特性的基础上,依据消色差条件增加部分光焦度,并且设计方法简单,易于分析轴向光强

分布随波长变化的趋势。位相函数重新分配后得到的长焦深元件在中心波长 λ_d (587 nm) 时的轴向光强分布与原长焦深元件一致,而在波长为 λ_F (486 nm)、 λ_c (656 nm) 时的轴向光强分布区域重合,即在保留焦深扩展特性的同时有效地校正了其在可见光波段内的初级色差,从而使其应用于

成像系统时可兼顾焦深特性及消色差特性。

另外,由于本文给出的混合结构中衍射元件的位相结构中功能分配明确,相对于文献[2]的结构将其作为进一步优化的初始结构将使优化过程更易于控制。

参考文献:

- [1] 白临波,李展,陈波,等. 折衍混合系统实现长焦深方法研究[J]. 光电工程,2001,28(3):1-5.
BAI L B, LI ZH, CHEN B, *et al.*. A study on realization method of refraction diffraction hybrid system with long focal depth elements[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 28(3): 1-5. (in Chinese)
- [2] FLORES A, WANG M R, YANG J J. Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(30): 5618-5630.
- [3] 张耀举,陈俊峰. 固体浸没透镜高密度光存储系统的焦深[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3): 356-359.
ZHANG Y J, CHEN J F. Focal depth in high-density optical storage system with a solid immersion lens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 356-359. (in Chinese)
- [4] SOCHACKI J, BARA S, JAROSZEWICZ Z, *et al.*. Phase retardation of the uniform-intensity axilens[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(1): 7-9.
- [5] STARONSKI L R, SOCHACKI J, JAROSZEWICZ Z, *et al.*. Lateral distribution and flow of energy in uniform-intensity axicons[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, 9 (11): 2091-2094.
- [6] SOCHACKI J, KOLODZIEJCZYK A, JAROSZEWICZ Z, *et al.*. Nonparaxial design of generalized axicons[J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(25): 5326-533.
- [7] 张慧,丁雪梅,谭久彬. 折-衍混合长焦深光学元件焦深特性分析[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(1): 64-70.
ZHANG H, DING X M, TAN J B. Focal depth characteristics of hybrid refractive-diffractive optical element with long focal depth [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 64-70. (in Chinese)
- [8] 王肇圻,张轶楠,傅汝康,等. 折/衍混合 Petzval 光电摄像物镜设计[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(1): 1-4.
WANG ZH Q, ZHANG Y N, FU R L, *et al.*. Design of hybrid refractive-diffractive petzval objective in visible band [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 1-4. (in Chinese)
- [9] 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.
LIU Y, LIN L, ZHANG H J. Hybrid diffractive/refractive system design of head-mounted projective display using retro-reflective screen [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 564-569. (in Chinese)

作者简介:张 慧(1980—),女,博士研究生,主要从事折/衍光学、光学设计等方面的研究。E-mail: huier@hit.edu.cn
丁雪梅(1959—),女,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为光电信息检测与处理技术,光电测量技术与仪器等。