

文章编号: 1001-3806(2007)02-0206-03

折衍混合在长焦物镜中的应用研究

杨 智, 戴 帆*, 张 沛

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 为了突破长焦物镜传统设计中的局限性, 从衍射面的相位多项式出发, 结合一般透镜的相位变换式, 对折衍混合消像差理论进行了探讨。给出了仅使用 1 种材料 FK1、2 片型的长焦物镜系统设计结构, 并将此设计结果与传统的 5 片型、5 种材料的纯折射长焦物镜的光学性能进行了比较。结果表明, 利用折衍混合能有效地校正长焦物镜的像差, 极大地降低系统的重量和复杂程度, 不失为长焦物镜设计的一条有效途径。

关键词: 光学设计与制造; 衍射光学; 折衍混合; 长焦物镜

中图分类号: O435.2 **文献标识码:** A

The study of hybrid refractive-diffractive telephoto lens

YANG Zhi, DAI Yifan, ZHANG Pei

(College of Mechanisms Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In order to break through the choke point of the traditional design of a telephoto lens how to eliminate aberrance by means of hybrid refraction-diffraction was studied from the view of the phase polynomial of diffractive surface and phase transformation polynomial of general lens. The telephoto lens system consisted of only two pieces of optical elements made of FK1 glass has an equivalent optical performance to the traditional telephoto lens system made of five pieces of optical elements made of different kinds of glass. Which shows that the hybrid refractive-diffractive lens can effectively eliminate the aberrance of a telephoto lens with lower weight and simple structure.

Key words optical design and fabrication; diffraction optics; hybrid refractive-diffractive; telephoto lens

引 言

为适用远距离摄影的需要, 物镜要有较长的焦距, 从而使远处的物体在像面上成较大的像, 一般称这种物镜为长焦物镜^[1]或者摄远物镜。然而, 随着焦距的增大, 物镜的色球差和二级光谱都要成比例地增大。为校正这些像差, 在传统的设计中, 常常选用复杂的系统结构及特殊玻璃材料。从而就有两个方面的局限性: 首先, 因为选用了复杂的系统结构及特殊玻璃材料, 整个系统的重量及造价会成比例的上升; 其次, 从设计角度, 负透镜的加入使得正光焦度显著增大, 折射表面弯曲严重, 加大了单色像差, 如负的消色差透镜带来的大曲率表面会使畸变、球差加剧。

纯折射有这些缺点, 折衍混合系统又如何呢? 折衍混合系统一般理解为在球面折射透镜的一个面上刻蚀衍射图案, 实现折衍混合消像差和较宽波段上的消

色差, 它最早出现于上世纪 80 年代中期, JIN 将之归结为第 1 代二元光学器件^[2]。在过去的 20 年里, 这样的研究文献非常多, 从国外而言, 如美国柏金-爱尔马公司成功地在斯密特望远镜上消除球差^[3], 美国豪奈威尔公司在远红外系统中实现了复消色差^[4], 也有研究者从几个方面研究了色差、二级光谱的消除^[5]; 在国内, 如 ZHAO 研究了折衍混合单透镜的色球差校正^[6], ZHANG 研究了折衍混合超广角视场目镜系统的设计^[7], ZHAO 研究了用于头盔显示器的折衍混合目镜的设计^[8]。

然而, 在以上这些文献中, 或者是直接引用已有结论, 或者是直接给出优化设计结果, 给一些想探讨其所以然的读者留下了不少的困扰。作者试着从衍射面的相位多项式出发, 结合一般透镜的相位变换式, 从一种比较简单的角度对折衍混合消像差理论进行探讨; 同时, 又因为折衍混合在长焦物镜上的应用还鲜有人论及, 作者就以长焦物镜作为设计的蓝本。

1 设计方法

由于长焦物镜的焦距较长, 在实际的设计过程中, 一般使筒长小于焦距^[1]。为了达到缩短筒长的目的,

基金项目: 国防预研基金资助项目 (51418070304KG0153)

作者简介: 杨 智, (1978-), 男, 博士研究生, 主要从事微光机电方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: dy@nudt.edu.cn

收稿日期: 2006-02-23 收到修改稿日期: 2006-04-30

宜采用正负组分离且正组在前的结构。为比较,作者选用了一种传统长焦物镜的设计示例^[9]。其光学特性的要求是:焦距 $f' = 250\text{mm}$, 通光孔径 $D = 50\text{mm}$, 视场角 $2\omega = 20^\circ$, 要求系统总长度小于 165mm 。结构简图见图 1a(根据原文中的结构参数在光学设计软件

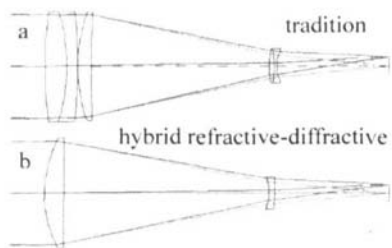


Fig 1 The 2-dimensional layout of telephoto lens

中的演示)。其中,前组焦距 $f_1' = 120\text{mm}$,后组焦距 $f_2' = -48\text{mm}$,前后两组间的主面间距 $d = 95\text{mm}$ 。传统设计整个系统为 5 片型,采用了 K9 ZF6 BaK7, BaF8 ZK6 5 种材料,总长度为 164.142mm ,小于 165mm ,焦距 250mm ,满足设计要求。

作者试着用 1 种材料、2 片型结构,在满足系统光学特性的前提下,使整个系统的光学性能达到与之相当的程度。结构简图见图 1b。

从总体上来说,设计过程分为以下 3 步:确定初始结构参数;对透镜非球面化,消除球差、慧差、像散、畸变等;对衍射面相位多项式的高次项系数进行了优化,消除高级像差。

其中,第 2 步和第 3 步通过光学设计软件进行优化设计。第 1 步的初始结构通过折衍混合消除色差和二级光谱的理论计算求得,分别对前后组求取,接下来将详细论述。

设旋转对称衍射面的相位函数表示形式^[12](衍射级次取 +1 级)为:

$$\varphi(r) = (2\pi/\lambda)(a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6 + \dots) \quad (1)$$

式中, r 为半径, λ 为波长, a_1, a_2, a_3 为对应项系数。考虑一般透镜的相位变换式^[10](略去了常数位相延迟):

$$\varphi'(r) = - (2\pi/\lambda) \cdot (r^2/2f) \quad (2)$$

式中, f 为焦距。可见,当衍射面相位函数只取到二次项时,其作用就类比一个一般透镜,令: $\varphi(r) = \varphi'(r)$, 有:

$$a_1 = -1/2f \quad (3)$$

可得衍射面的相位函数表示式: $\varphi(r) = (2\pi/\lambda) \cdot (-1/2f)r^2$, 可见,当 $\varphi(r)$ 确定时, f 与 λ 成反比。若设计波长为 λ_D , 焦距为 f_D , 则对应波长 λ_C 和 λ_F 的同一级焦距分别为: $f_C = f_D \frac{\lambda_D}{\lambda_C}$, $f_F = f_D \frac{\lambda_D}{\lambda_F}$, 下标 D, C, F 分别代表 D 光 (589.30nm), C 光 (656.28nm) 及 F 光 (486.13nm)。类比传统透镜前后表面半径与焦距的关系:

$$1/f_\lambda = (n_\lambda - 1)(1/R_1 - 1/R_2) \quad (4)$$

式中, n_λ 为对应波长 λ 的折射率, f_λ 为对应波长 λ 的焦距, R_1, R_2 为透镜前后面半径。可得在 λ_D, λ_C 和 λ_F 下的等效折射率 n_D, n_C 和 n_F 分别为:

$$n_D = \frac{1}{f_D \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)} + 1, n_F = \frac{1}{f_D \frac{\lambda_D}{\lambda_F} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)} + 1$$

$$n_C = \frac{1}{f_D \frac{\lambda_D}{\lambda_C} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)} + 1 \quad (5)$$

而传统光学材料的阿贝数 V 定义为 $\frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$, 将 n_D, n_C

和 n_F 代入得等效阿贝数为: $V_D = \frac{\lambda_D}{\lambda_F - \lambda_C} = -3.463$

为了校正色差,对于密接透镜而言,需使:

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$\frac{1}{f_1 V_1} + \frac{1}{f_2 V_2} = 0 \quad (7)$$

式中, f_1 为折射透镜的焦距, f_2 为衍射面的等效焦距, f 为前后组系统的组合焦距, V_1 为选用透镜材料的阿贝数, V_2 为衍射面的等效阿贝数,即 $V_2 = V_D = -3.452$ 。当 f, V_1 和 V_2 已知,代入 (6) 式和 (7) 式可得 f_1 和 f_2 , 将 f_1 代入 (4) 式可得合适的透镜前后面曲率半径, 将 f_2 代入 (3) 式可得衍射面的相位函数表示式系数。

再考虑二级光谱,对于一个消色差密接透镜而言,二级光谱 (secondary axial color, SAC) 为^[11]: $d_{\text{SAC}} =$

$$f(\lambda_F) - f(\lambda_D) = f \frac{P_2 - P_1}{V_1 - V_2}, \text{ 其中 } P_1 \text{ 和 } P_2 \text{ 为 F-D 相对}$$

F-C 的部分色散: $P = \frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$, 将 (5) 式代入得衍射面

的等效相对部分色散为: $P_D = \frac{\lambda_F - \lambda_D}{\lambda_F - \lambda_C} = 0.606$

为了消除二级光谱,应使 $d_{\text{SAC}} = 0$ 应该使 $P_1 = P_2$ 或者 $V_1 \rightarrow \infty$ 。首先考虑精确解,此时,选用材料的相对部分色散为: $P_1 = P_D = 0.606$ 然而,在 F-D 相对 F-C 的部分色散区内^[12],没有找到具有这种特性的合适玻璃材料,退而求其次,考虑 V_1 从 d_{SAC} 表达式得知,当 V_1 特别大时,也能收到减少二级光谱的效果。参考相对部分色散图^[12],决定选用国产 FK1, 它的阿贝数达 81.81, 相对部分色散约为 0.705, $n_D = 1.48605$ 。

考虑互换性,前后组焦距及前后组之间距离分别与示例相同。所以,前组焦距为 120mm , 将 $f = f_1' = 120\text{mm}$, $V_1 = 81.81$, $V_2 = -3.452$ 代入 (6) 式和 (7) 式,求得 $f_1 = 125.063$, $f_2 = 2963.917$, 将 $f_1, n_\lambda = n_D = 1.48605$ 代入 (4) 式得: $\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = 0.016451$, 当选为平

凸透镜(平面在后)时, $\frac{1}{R_2} = 0$ 所以, $R_1 = 60\ 787$ 将 f_2 代入 (3) 式得: $a_1 = -0.000169$ 同理, 对后组焦距 $f = f_2' = -48\text{mm}$, 求得: $R_3 = -24\ 315$, $R_4 = +\infty$, $a_{1b} = 0.000422$, 其中 a_{1b} 表示后组衍射面的二次项系数。

至此, 折衍混合长焦物镜前后组的初始结构确定, 下一步便可利用光学设计软件按照前面所说的顺序对系统进行优化设计, 得出设计结果。

2 设计结果

折衍混合长焦物镜系统的结构参数见表 1, 衍射面系数见表 2 结构简图见图 1b 系统总长 165mm, 焦

Table 1 The structure parameters of the system

surface	surface type	radius /mm	thickness /mm	glass	semi aperture /mm
0	sphere	infinity	infinity	air	
1	asphere	60 787	8.214	FK1_China	25 000
2	diffractive	infinity	89.951		24 722
3	asphere	-24 315	2.500	FK1_China	6 9732
4	diffractive	infinity	50.139		6 8354
5	sphere	infinity	0.000	air	4 4258

Table 2 The coefficient of diffractive face

surface	a_1	a_2	a_3	a_4
2	-0.000169	2.9568E-8	-8.7843E-11	5.0111E-14
4	0.000422	1.8142E-6	-4.6575E-8	1.2366E-9

距 250mm, 满足设计要求。在实验中, 对其与传统长焦物镜的光学性能进行了比较, 结果发现, 在整个视场垂轴像差、像散与传统设计相当, 垂轴色差提升了大约一个数量级, 畸变变为 0 大大优于传统设计。

3 结 论

总的说来, 利用折衍混合设计长焦物镜与传统设

计相比, 在重量、材料、结构的复杂程度等方面均具有不少的优势, 唯一的缺点在于衍射面的加工比较难, 作者曾采用灰度掩模法对衍射光学元件的制作进行过初步探讨^[13-14], 相信随着精密加工及微细加工技术的发展, 其前途会越来越好。

参 考 文 献

[1] ZHANG Y M. Applied optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1982: 58~66 (in Chinese).

[2] JIN G F, YAN Y B, WU M X. Binary optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 7~13 (in Chinese).

[3] MCHUGH T J. An overview of binary optics at PerkinElmer corporation [J]. SPIE, 1988: 884~100.

[4] COX J A. Overview of diffraction optics at Honeywell [J]. SPIE, 1988: 884: 127~132.

[5] FOO L D. Design examples of hybrid refractive-diffractive lenses [J]. SPIE, 1989: 1168: 117~125.

[6] ZHAO L P, WU M X, JIN G F. Spherochromatism correction of a hybrid refractive-diffractive singlet [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(5): 621~626 (in Chinese).

[7] ZHANG H J, WANG Zh Q, FU R L *et al*. Design of hybrid refractive-diffractive ultrawide angle eyepieces [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 85~88 (in Chinese).

[8] ZHAO Q L, WANG Zh Q, MU G G *et al*. Hybrid refractive/diffractive eyepiece design for headmounted display [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(12): 1495~1498 (in Chinese).

[9] YUAN X C. Modern optical design method [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1995: 129~138 (in Chinese).

[10] GOODMAN JW. Introduction to Fourier optics [M]. Beijing: Science Press, 1979: 88~94 (in Chinese).

[11] HERZIG H P. Mirror optics elements, systems and applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 299~310 (in Chinese).

[12] ZHANG Y M. Applied optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1982: 253 (in Chinese).

[13] YANG Zh D, AI Y F, YAN Sh H. Manufacturing system for gray-scale masks, mask patterns making and technique study [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 406~409 (in Chinese).

[14] YANG Zh. The study of binary optics elements design and manufacture techniques [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2003: 20~44 (in Chinese).

(上接第 205 页)

[2] QIU J P, LIU N Ch, XIA Y *et al*. Generation of hollow laser beams and their applications in modern optics [J]. Progress in Physics, 2004, 24(3): 336~379.

[3] OVCHINNIKOV Y B, MANEK I, GRIMM R. Surface trap for Cs atoms based on evanescent wave cooling [J]. Phys Rev Lett, 1997, 79(12): 2225~2228.

[4] SONG Y, MILLAM D, HILL W T. Clarifying the concepts of wave propagation through intermittent media [J]. Opt Lett, 1999, 24(24): 1805~1087.

[5] SODING J, GRIMM R, OVCHINNIKOV Y B. Gravitational laser trap for atoms with evanescent wave cooling [J]. Opt Commun, 1995, 119: 652~662.

[6] YIN J, ZHU Y, HE W, WANG Y. Atom guiding and cooling in a dark

hollow laser beam [J]. Physics Review, 1998, A58(1): 509~513.

[7] YIN J, GAOW, WANG H *et al*. Generations of dark hollow beams and their applications in laser cooling of atoms and all optical type Bose-Einstein condensation [J]. Chinese Physics, 2002, 11(12): 1157~1160.

[8] BALYK N V, ILETOKHOV V S. The possibility of deep laser focusing of an atomic beam into the A-region [J]. Opt Commun, 1987, 64: 151~156.

[9] CAI Y, LÜ X, LIU Q. Hollow Gaussian beams and their propagation properties [J]. Opt Lett, 2003, 28(13): 1084~1086.

[10] WANG X Q, LÜ B D. Focusing properties of Laguerre-Gaussian beams [J]. Laser Technology, 1996, 20(3): 185~190 (in Chinese).