

# 用于可见光波段的折/衍混合复消色差长焦物镜设计

闫佩佩<sup>1,2</sup> 樊学武<sup>1</sup> 邹刚毅<sup>1</sup> 何建伟<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学研究室, 陕西 西安 710119)

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 采用折/衍光学元件结合的方法,使用两种普通国产玻璃 K9 和 TF3,设计了工作波段为 0.546~0.768 μm 的 3 片式长焦物镜系统,并对其二级光谱进行了校正。将此设计结果与 7 片型,4 种材料的全折射式长焦物镜的光学性能进行比较。结果表明,利用折/衍光学元件能在简化系统的基础上有效校正长焦物镜的像差,极大降低系统的长度、重量和复杂程度,其光学成像和结构性能优于全折射型。

**关键词** 光学设计;折/衍混合;复消色差;长焦物镜

中图分类号 O439

OCIS 220.0220 220.4830

文献标识码 A

## Design of Hybrid Refractive-Diffractive Apochromatic Telephoto Lens Used in Visible Spectra

Yan Peipei<sup>1,2</sup> Fan Xuewu<sup>1</sup> Zou Gangyi<sup>1</sup> He Jianwei<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Space Optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** By means of hybrid refractive-diffractive structure, a kind of three-elements telephoto lens based on two kinds of ordinary homebred glass K9 and TF3 has been designed. The working wavelength range of the system is 0.546~0.768 μm. The secondary spectrum has been revised. Its optical performances are compared with all refractive ones which are made of seven pieces of optical elements and four kinds of glass. The results show that hybrid refractive-diffractive lens can effectively eliminate the aberrance of telephoto lens and greatly reduce system length, weight, and complexity. The optical imaging and structure performances of hybrid refractive-diffractive telephoto lens are superior to all refractive system.

**Key words** optical design; hybrid refractive-diffractive; apochromatism; telephoto lens

## 1 引言

长焦物镜有较长的焦距,使远处的物体在像面上成较大的像,适用远距离摄影的需要。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增大,特别是二级光谱的校正十分困难。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的玻璃材料。这样就使整个系统的重量及造价成比例地上升。因此,对长焦距折射式光学系统复消色差,是光学设计的一大难题。

衍射光学元件具有独特的色散性质,且有较多的自由度和较轻的重量,用一种或很少的几种材料即可实现成像光学系统二级光谱的校正,实现复消色差和校正单色像差,从而提高系统成像质量,减小系统体积。因此,各国科研人员开始研究衍射光学元件在光学成像领域的应用。但对于折/衍混合的长焦物镜,在红外领域的研究工作较多,可见光波段的设计研究工作还很少。本文设计了用于可见光波段的 3 片式折/衍混合

收稿日期: 2010-04-03; 收到修改稿日期: 2010-05-05

作者简介: 闫佩佩(1985—),女,硕士研究生,主要从事光学设计和杂散光分析等方面的研究。

E-mail: yppoptics@163.com

导师简介: 樊学武(1972—),男,博士,研究员,主要从事光学设计、光学检测和校准等方面的研究。

E-mail: 3076048309@sina.com

复消色差长焦物镜。该设计方法简单,二级光谱和高级像差得到了很好的校正,光学传递函数(MTF)接近衍射极限,光学成像和结构性能得到了进一步的提高。

## 2 设计方法

### 2.1 复消色差折/衍混合光学透镜的设计

基于二元光学元件(BOL)的折/衍混合光学透镜(HOL)的色散和波长有关,因此可以和光学材料结合用来消除二级光谱。二元光学元件的等效阿贝数和相对部分色散为<sup>[1]</sup>

$$V = -\lambda_R / (\lambda_L - \lambda_S), \quad (1)$$

$$P = (\lambda_S - \lambda_R) / (\lambda_S - \lambda_L), \quad (2)$$

式中 $\lambda_R$ 为参考波长, $\lambda_S$ 和 $\lambda_L$ 分别为短波和长波波长。由(1),(2)式可见,二元光学元件的色散性质由所使用的波长决定,与基底材料无关。而折射元件的色散是由材料的性质决定的。当取参考波长为D谱线,消色差波长为C,F谱线时,可得到 $V = -3.46$ , $P = 0.6063$ 。正光焦度的BOL透镜具有负的色散,为校正系统色差提供了条件,并分担了光焦度,有利于减少单色像差。传统光学材料的色散特点是在短波波段表现出较大的色散,而在长波波段色散较小。在光学系统中,将二者结合起来需采用3片或3片以上透镜才可以对二级光谱进行校正<sup>[2]</sup>。因此,可以采用混合三元件结构,即两个折射元件和一个BOL的结构来校正二级光谱。当满足关系式

$$K_1 + K_2 + K_B = K, \quad (3a)$$

$$K_1/V_1 + K_2/V_2 + K_B/V_B = 0, \quad (3b)$$

$$K_1P_1/V_1 + K_2P_2/V_2 + K_BP_B/V_B = 0 \quad (3c)$$

时,这种混合结构就能够校正二级光谱,使3个波长的近轴像点校正重合。式中 $K_1, K_2, V_1, V_2, P_1, P_2$ 分别为两个折射元件的光焦度,阿贝数和相对部分色散。当给出了总光焦度 $K$ ,选定了两个折射元件的材料后,就可以从(3)式解出3个元件的光焦度 $K_1, K_2$ 和 $K_B$ 。

### 2.2 玻璃的选择

F光和C光消色差系统对波长为 $\lambda$ 的色光的傍轴纵向色差为<sup>[3]</sup>

$$\Delta L = -f(P_{1FC} - P_{2FC}) / (V_{1A} - V_{2A}), \quad (4)$$

式中 $f$ 是消色差透镜的焦距, $P_{1FC}$ 和 $P_{2FC}$ 分别是透镜 $\lambda$ 光到F光和C光的相对部分色散; $V_{1A}$ 和 $V_{2A}$ 是透镜的阿贝数。

按照(4)式,参考相对部分色散图<sup>[4]</sup>,采用3个镜片组合。第1片为K9玻璃制成的透镜,第2和第3片为TF3玻璃制成的透镜。为同时校正位置色差与二级光谱的复消色差,照相物镜设计中常常采用中国牌号的特种火石玻璃TF系列,它相当于德国牌号的KZFSN系列玻璃<sup>[5]</sup>。此处选择TF3玻璃。根据计算对比,这种组合可以满足设计要求。

### 2.3 衍射面系数

对于具有旋转对称性的BOL,其相位函数可描述为

$$\varphi(y) = 2\pi(A_1y^2 + A_2y^4 + A_3y^6 \cdots), \quad (5)$$

式中 $y$ 为二元光学元件的径向坐标,二次项为光焦度项。其光焦度 $K_B = -2pA_1\lambda_R$ , $p$ 为衍射级次, $\lambda_R$ 设计过程中取589 nm。对于某一特定波长的BOL, $A_1$ 与所用波长成正比,可以用来校正系统色差。 $A_2, A_3$ 等为非球面相位系数,可用于校正系统的各级球差。对于BOL,考虑利用它的一级衍射光,即 $p=1$ 。通常,单层衍射光学元件受设计波长影响,偏离设计波长衍射效率明显下降,而多层衍射光学元件改善了宽波段的衍射效率。只要两块元件之间适当的配合,就可使整个宽波段的衍射效率提高,通常衍射效率最低处都可达到98%以上<sup>[6]</sup>。

根据这些已确定的系数,可以得到透镜的初始结构,并结合输入光学设计软件,优化后即可得到各项参数。一般采用计算机辅助优化设计的方法对BOL进行设计。目前能对衍射光学元件进行优化设计的软件有CODEV和ACCOS等,其中以CODEV最为常用<sup>[7]</sup>。

设计过程中需要注意的是,当系统中某个元件表面附加上衍射结构后,会使系统的光焦度产生微小变

化,因此需对光学系统中光学元件的曲率半径和厚度参数做微量调整,以满足系统工作参数要求。

另外,应注意到选择的衍射结构所附面的曲率半径大小对色差的影响。曲率半径越小,衍射结构的频率就越大,衍射结构所带来的色差也就越大<sup>[7]</sup>。因此,权衡附加衍射结构后所带来的色差与所能校正单色像差的关系,做出适当选择。

除此之外,必须谨慎选择相位多项式(5)式中的系数。CODEV 仅对一定数量的视场角进行优化。经验表明,过多地选择系数变量或错误选择,会导致在程序选定的视场上出现收敛结果,而在它们之间出现恶劣的像差行为,即产生收敛的假象。

### 3 设计结果和性能分析

#### 3.1 设计结果

图 1 为折/衍混合可见光波段复消色差长焦物镜系统结构图。主要光学参数如表 1 所示。其中第 1 和第 4 面是高次非球面,第 3 和第 5 面是衍射面,根据衍射结构所附面的曲率半径大小对色差影响程度的不同及加工的难易程度,选择第一个衍射面附加在平面上,第二个衍射面附加在曲率半径为 582 mm 的凸球面上。系统由两种材料组成,第 1 片为 K9 玻璃,第 2 和第 3 片为 TF3 玻璃,系统总长为 386 mm。

图 2 给出了 7 片可见光波段全折射式长焦物镜系统结构图,其主要光学参数与折/衍混合系统相同。它由两个双胶合透镜,一个双分离透镜和一个负透镜组成,主要利用双胶合透镜和 4 种不同色散值的玻璃组合来实现复消色差。比较图 1 和图 2 可以看出,全折射系统所用镜片较多,总长较长。前者工作距为 1500 mm,后者为 173 mm。

表 1 主要光学参数

Table 1 Main optical parameters

Focal distance /mm	Entrance pupil diameter /mm	$F$	Angle of view ( $2\omega$ )/( $^{\circ}$ )
2000	180	11	8.5

注: $F$  为  $F$  数

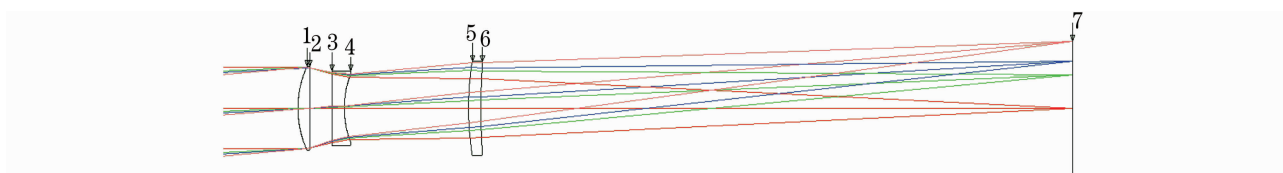


图 1 折/衍混合可见光波段长焦物镜系统结构图

Fig. 1 Layout of hybrid refractive-diffractive telephoto lens in visible band

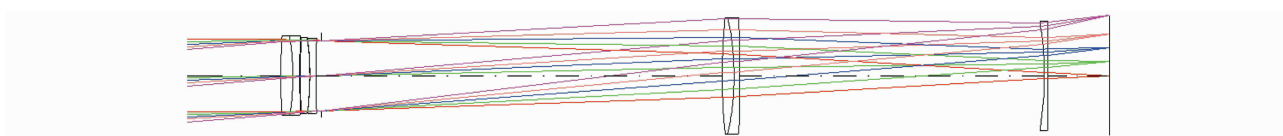


图 2 全折射式长焦物镜系统结构图

Fig. 2 Layout of conventional 7-element all refractive telephoto lens in visible band

#### 3.2 系统的位置色差分析

图 3 给出了两个系统的位置色差图。由图可见,折/衍混合长焦物镜在轴上的点略过校正。在 0.85 倍孔径附近三种色光校正的差值都为 0,实现了复消色差;在 0.70 倍孔径时都校正不足,但其二级光谱不影响系统的使用。而全折射式长焦物镜系统轴上的点位置色差大于 0.25 mm,且系统二级光谱没有得到很好的校正。

#### 3.3 系统性能分析

图 4 和 5 分别为折/衍混合长焦物镜系统的点列图和 MTF 曲线。由图可以看出,弥散斑直径最大为 8.837  $\mu\text{m}$ ,系统 MTF 接近衍射极限。

为进一步分析折/衍混合系统的性能,表 2 和表 3 分别给出了折/衍混合光学系统的像差特性和结构参

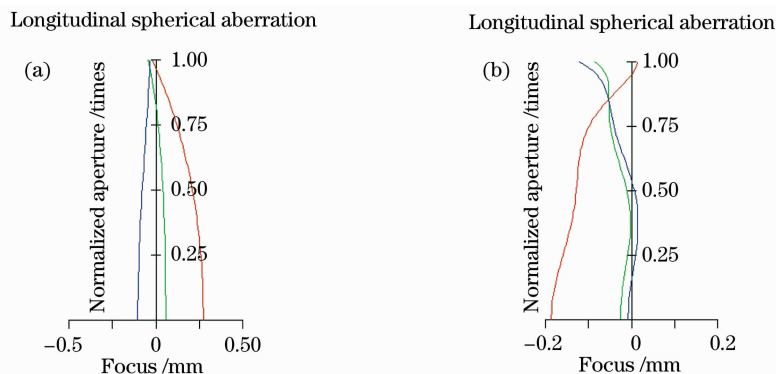


图3 长焦物镜系统位置色差曲线。(a)全折射式长焦物镜位置色差曲线,(b)折/衍混合长焦物镜位置色差曲线  
Fig. 3 Longitudinal aberration curves of the telephoto lens. (a) longitudinal aberration curves of all refractive telephoto lens, (b) longitudinal aberration curves of hybrid refractive-diffractive telephoto lens

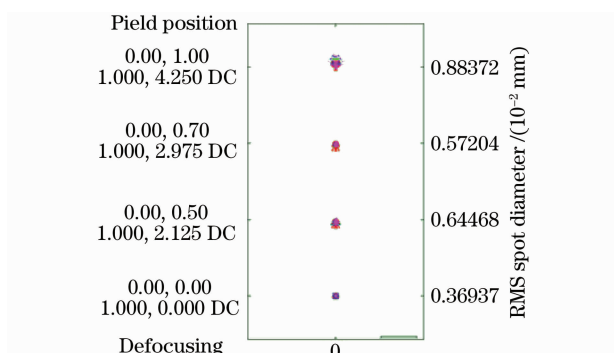


图4 折/衍混合长焦物镜系统点列图

Fig. 4 Spot diagram of hybrid refractive-diffractive telephoto lens

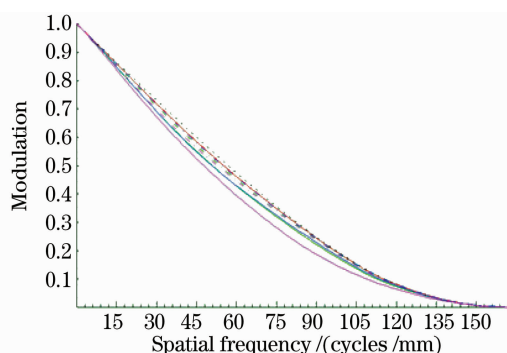


图5 折/衍混合长焦物镜系统 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curve of hybrid refractive-diffractive telephoto lens

量,并将它们与全折射式光学系统做了比较。从表 2,3 看出,与全折射长焦物镜相比,折/衍混合系统在简化系统的基础上,有效校正了长焦物镜的像差,系统像差减小一个数量级,极大降低了长焦系统的重量和复杂程度。

表2 全折射式长焦物镜与折/衍混合长焦物镜像差特性比较

Table 2 Performance merits of the hybrid refractive-diffractive telephoto lens compared with all refractive telephoto lens

Lens type	Tangential astigmatism /mm	Lateral color/mm	Field curvature/ mm	Distortion /%
Conventional telephoto lens	-0.015	0.022	0.125	0.437
HOL	0.008	0.007	0.083	0.077

表3 全折射式长焦物镜与折/衍混合长焦物镜结构参量比较

Table 3 Structure parameters of the hybrid refractive-diffractive telephoto lens compared with all refractive telephoto lens

Lens type	Number of elements	Total track /mm	Weight /g	BFL /mm
Conventional telephoto lens	7	2198	20229	173
HOL	3	386	6878	1500

注:BFL 为后工作距

随着技术的进步,金刚石单点车削(SPDT)技术能够加工出完全符合理论设计的连续相位衍射光学元件的表面微结构<sup>[8]</sup>。这种方法可以在适当的光学基底材料上直接加工出轴对称衍射光学元件。因此,设计中将两个衍射面分别附加在一个平面和一个凸球面上。

## 4 结 论

设计结果表明,折/衍混合可见光波段长焦物镜不需要任何特殊材料,不仅能显著减轻传统光学系统的

重量,而且具有更好校正二级光谱的能力,能有效改善系统的成像质量,适应现代光学系统重量轻、体积小、质量高的发展方向。计算机仿真结果表明,在整个视场中,系统的光学传递函数接近衍射极限,可以满足成像质量要求,具有重要的应用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Cui Qingfeng. Realization of three-color achromats with binary optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8): 877~881  
崔庆丰. 用二元光学元件实现消复色差[J]. 光学学报, 1994, **14**(8): 877~881
- 2 Hong Xinhua, Yang Jianfeng, Chen Liwu *et al.*. Design of correction of secondary spectrum by hybrid diffractive-refractive [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(4): 421~424  
洪新华, 杨建峰, 陈立武 等. 衍/折射光学元件消二级光谱的设计[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(4): 421~424
- 3 R. Kingslake. *Lens Design Fundamentals*[M]. New York: Academic, 1978. 115
- 4 Zhang Yimo. *Applied Optics (The Second Edition)*[M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 1988: 322~327  
张以谟. 应用光学(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 322~327
- 5 Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Chen Liwu *et al.*. Design of the wide bands Fourier lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 468~473  
赵葆常, 杨建峰, 陈立武 等. 干涉成像光谱仪中宽谱段傅氏光学系统设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 468~473
- 6 Dong Hui, Cui Qingfeng, Pei Xuedan *et al.*. Imaging characteristics of multi-layer diffractive optical elements[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 694~698  
董 辉, 崔庆丰, 裴雪丹 等. 多层衍射光学元件成像特性的研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 694~698
- 7 Fan Zhongwei. Binary optical elements in optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, **3**(2): 1~9  
樊仲维. 光学系统中的二元光学元件[J]. 光学精密工程, 1995, **3**(2): 1~9
- 8 Cui Qingfeng. Design of hybrid diffractive-refractive imaging optical systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2006, **35**(1): 12~15  
崔庆丰. 折衍射混合成像光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(1): 12~15