

折衍混合复消色差望远物镜设计的 PWC 方法

曾吉勇^{1,2} 金国藩^{1,2} 王民强¹ 严瑛白¹

(1 清华大学精密仪器系, 北京 100084)

(2 清华大学清华-富士康纳米科技研究中心, 北京 100084)

摘 要 将衍射结构视为折射率无限大的薄透镜,研究了衍射透镜高折射率表示的折衍混合复消色差望远物镜设计的 PWC 方法;设计了焦距为 2000mm、相对孔径为 1/15 的双片型折衍混合复消色差望远物镜,并与常规三片型纯折射复消色差望远物镜进行了比较,结果表明双片型折衍混合复消色差望远物镜具有更好的二级光谱校正能力,色球差更小,因此具有更好的成像质量.

关键词 光学设计;复消色差望远物镜;折-衍混合系统;高折射率方法

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A

0 引言

望远物镜焦距较长,当相对孔径较大时,二级光谱成为影响其像质的主要因素,因此长焦距大相对孔径的望远物镜通常采用三片透镜结构形式校正二级光谱,实现系统的复消色差^[1].近年来,利用衍射结构特殊色散性质的折衍混合(Hybrid Diffractive-Refractive, HDR)光学系统设计得到越来越多的重视^[2~4].衍射结构可以视为折射率无限大的薄透镜(衍射透镜)^[5],采用折衍混合设计,在二个折射透镜的一个表面附着衍射结构,可以实现类似三片透镜结构形式校正二级光谱.崔庆丰^[6,7]将衍射结构及其基材作为混合等效玻璃,研究了折衍混合复消色差光学系统的材料选取,并由赛德尔像差方程求解了复消色差望远物镜的初始结构.由于衍射结构采用相位函数表示,而赛德尔像差方程采用 Welford 描述^[8],崔庆丰的方法并不适用于中国传统的 optics 设计理论和方法体系^[9].

本文基于衍射透镜的高折射率模型,在中国传统的 optics 设计理论和方法体系内,研究了折衍混合复消色差望远物镜设计的 PWC 方法;设计了焦距为 2000 mm、相对孔径为 1/15 的双片型折衍混合复消色差望远物镜,并与三片型纯折射设计进行了比较.

1 衍射结构的高折射率模型

Sweat 指出衍射结构可以视为折射率无限大的薄透镜(衍射透镜)^[5],而且衍射透镜的折射率与波长成正比.在实际计算中,不可能对折射率无限大的透镜进行光线追迹,为此应在保证高折射率模型的有效性和计算机数据处理能力范围内选取折射率.

在 ZEMAX 软件的 CHINESE 玻璃库中按式 $n(\lambda) = \lambda \times 10^7 + 1$ 建立了名为 DOE 的材料,对应的 F 光、d 光和 C 光的折射率分别为 4862、5877 和 6564,当取参考波长为 d 谱线,消色差波长为 F、C 谱线时,得到阿贝数 $\nu_d = -3.542$,相对部分色散 $P_{Fd} = 0.596$.

2 单透镜的 \bar{P} 、 \bar{W} 与结构参量的关系

设透镜的折射率为 n ,透镜焦距规范化为 1,第二表面的曲率为 ρ_2 ,令 $Q = \rho_2 - 1$,设 \bar{u}_1 为规化的第一辅助光线与光轴的夹角,则有

$$P_{\min} = \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)} \right] - (\bar{u}_1 + \bar{u}_1^2) \frac{n}{n+2} \quad (1)$$

$$\rho = 1 - \frac{1}{(n+1)^2} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{1}{2(n+2)} (1 + 2\bar{u}_1) \quad (3)$$

$$W_0 = \bar{u}_1 \left(2 + \frac{1}{n} \right) \quad (4)$$

$$\bar{W} = \bar{W}_\infty + W_0 \quad (5)$$

$$\bar{P} = \rho [\bar{W} - \beta]^2 + P_{\min} \quad (6)$$

$$\bar{W}_\infty = -\frac{n+1}{n} Q - \frac{1}{n-1} \quad (7)$$

3 折衍混合复消色差望远物镜的设计

望远物镜的焦距 $f' = 2000$ mm,相对孔径 $D/f' = 1/15$,半视场角为 0.75° ,对 d 光校正单色像差,对 C 光、F 光消色差,并校正二级光谱.

3.1 光焦度分配

复消色差望远物镜由衍射透镜 1、折射透镜 2 和折射透镜 3 组成,衍射结构附着在折射透镜 2 的物侧(图 1).崔庆丰^[6,7]研究了折衍混合复消色差望远物镜的材料选取,指出选用冕玻璃为基材较选用火石玻璃为基材,透镜的光焦度分配更合理,色球差更小.本文透镜 2 和透镜 3 分别选用常用的国产玻

璃 K9 和 ZF6. 透镜 1、透镜 2、透镜 3 的 d 光折射率 n_d 、阿贝数 ν 和部分色散 P 详见表 1.

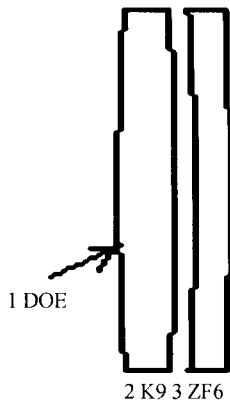


图 1 复消色差望远镜
Fig. 1 Apochromatic telescope objective

表 1 双片型衍射混合复消色差望远镜各透镜参量

透镜	材料	n_d	ν_d	P_{Fd}	φ	\bar{u}_1
1	DOE	5877	-3.54	0.596	0.014	0
2	K9	1.5164	64.1	0.692	1.534	0.009
3	ZF6	1.7552	27.5	0.712	-0.55	-2.824

由光焦度公式、消色差条件和复消色差条件得到方程组

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = \varphi \quad (8)$$

$$\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} + \frac{\varphi_3}{\nu_3} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\varphi_1}{\nu_1} P_1 + \frac{\varphi_2}{\nu_2} P_2 + \frac{\varphi_3}{\nu_3} P_3 = 0 \quad (10)$$

物镜的光焦度规范化为 1, 由方程组确定的各透镜的光焦度如表 1, 其中 \bar{u}_1 为入射到透镜的第一辅助光线与光轴的夹角.

3.2 初始结构确定

由于望远镜的视场较小, 单色像差只须校正球差和慧差. 即

$$S_I = \sum h(h\varphi)^3 \bar{P} = 0 \quad (11)$$

$$S_{II} = \sum J(h\varphi)^2 \bar{W} = 0 \quad (12)$$

由于透镜密接, 第一辅助光线在各透镜的入射高近似相等, 且 φ_1^2 和 φ_1^3 较小, 故式(11)和式(12)写为

$$\varphi_2^3 \bar{P}_2 + \varphi_3^3 \bar{P}_3 = 0 \quad (13)$$

$$\varphi_2^2 \bar{W}_2 + \varphi_3^2 \bar{W}_3 = 0 \quad (14)$$

这意味着在三个透镜中, 每一个透镜用一个曲率半径来满足光焦度分配以校正色差和二级光谱; 透镜 2 和透镜 3 各剩下一个曲率半径校正球差和慧差.

表 2 为由式(1)至式(4)计算得到的透镜 2 和透镜 3 的 P_{min} 、 ρ 、 β 、 W_0 值.

表 2 衍射混合设计中折射透镜的 P_{min} 、 ρ 、 β 、 W_0 值

透镜	P_{min}	ρ	β	W_0
2	2.0441	0.84208	0.14482	0.024529
3	-1.1738	0.86827	-0.61883	-7.2565

对于透镜 2, 由式(5)和式(6)有

$$\bar{W}_2 = \bar{W}_{2\infty} + 0.024529 \quad (15)$$

$$\bar{P}_2 = 0.8421 \bar{W}_{2\infty}^2 - 0.2026 \bar{W}_{2\infty} + 2.0563 \quad (16)$$

对于透镜 3, 由式(5)和式(6)有

$$\bar{W}_3 = \bar{W}_{3\infty} - 7.2565 \quad (17)$$

$$\bar{P}_3 = 0.8683 \bar{W}_{3\infty}^2 - 11.5267 \bar{W}_{3\infty} + 37.0815 \quad (18)$$

由式(14)、式(15)和式(17)得到

$$\bar{W}_{2\infty} = -0.1277 \bar{W}_{3\infty} + 0.9023 \quad (19)$$

由式(13)、式(16)和式(18)得到

$$\begin{aligned} \bar{W}_{2\infty}^2 - 0.2406 \bar{W}_{2\infty} - 0.0471 \bar{W}_{3\infty}^2 + \\ 0.6247 \bar{W}_{3\infty} + 0.432 = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

解方程组(19)、(20)得到 $\bar{W}_{2\infty} = 1.17078$ 、 $\bar{W}_{3\infty} = -2.10672$.

由式(7)可以计算透镜 2 和透镜 3 的表面弯曲系数 Q , 由此确定物镜的初始结构如表 3, 相应的赛德尔球差和数 $S_I = 0.00006$ 、慧差和数 $S_{II} = 0.00002$ 、轴向色差 $C_L = 0.00018$ 和垂轴色差 $C_T = 0$, 可见初始结构已对球差、慧差、色差均已良好校正.

表 3 双片型衍射混合复消色差望远镜初始结构

表面	半径	厚度	材料
光栏	1225.140631	0	DOE
2	1225.142438	0.1	K9
3	-1494.137	0.1	
4	-1292.254	0.1	ZF6
5	-2434.009	1999.7	

3.3 优化结果

采用波像差为优化目标函数, 优化后物镜的结构参量详见表 4, 从图 2 传递函数(MTF)曲线可见

表 4 双片型衍射混合复消色差望远镜的优化设计结构

表面	半径	厚度	材料
光栏	1245.257138	0	DOE
2	1245.258894	15.424	K9
3	-1435.402	5.486	
4	-1218.251	9.158	ZF6
5	-2232.477	1981.2	

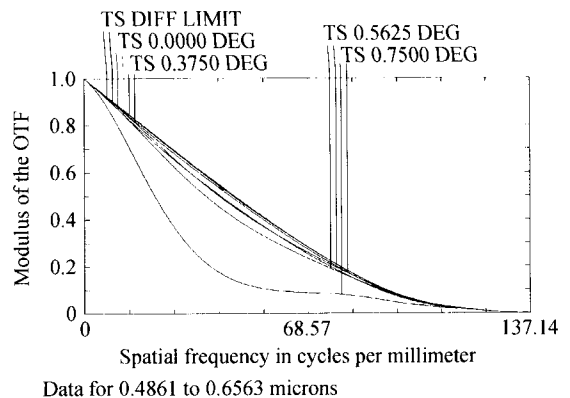


图 2 衍射混合复消色差望远镜的 MTF 曲线
Fig. 2 MTF curve of the HDR apochromatic telescope objectives

在 0.75 视场内(0.5625°)成像质量达到衍射受限.

在将衍射透镜高折射率表示转换为相位函数表示过程中,衍射透镜具有无限大的折射率,光线在衍射透镜内沿入射面的法线方向传播,衍射透镜在入射点 r 处的法线长度为 $t(r)$,以波长为单位表示的因衍射透镜带来的光程变化为 $OPD(r) = (n-1) \cdot t(r)/\lambda$,对轴上光线进行光线追迹确定衍射透镜不同口径处的光程变化,得到离散数据 (r_i, OPD_i) ,对离散数据用最小二乘法拟合光程差多项式函数 $OPD = \sum_{i=1}^n A_{2i} r^{2i}$,相位函数为 $\phi(r) = \sum_{i=1}^n C_{2i} r^{2i}$,其中 $C_{2i} = 2\pi A_{2i}$.转化后相位函数的系数为 $C_2 = -0.035547, C_4 = -3.20256 \times 10^{-9}, C_6 = -3.02940 \times 10^{-13}, C_8 = -2.38266 \times 10^{-17}$.

4 折衍混合设计和常规设计像质比较

图 3 为按同样要求设计的三片型常规复消色差望远物镜,其中透镜 1 和透镜 2 胶合.各透镜的 d 光折射率、阿贝数和部分色散及光焦度分配详见表 5.比较表 1 和表 5,双片型折衍混合设计中衍射透镜 1、折射透镜 2 和折射透镜 3 承担的光焦度分别为 0.014、1.534 和 -0.55,而三片型常规设计中透镜 1、透镜 2 和透镜 3 承担的光焦度分别为 2.52、-6.39 和 4.86,可见采用折衍混合设计较纯折射设计各透镜承担的光焦度小很多,因此折衍混合设计更有利于校正带球差和色球差,这在图 4 折衍混合双片型复消色差望远物镜和常规三片型复消色差望远物镜垂轴像差曲线中反映出来.



图 3 常规三片设计
Fig. 3 Conventional triplet design

表 5 三片型纯折射复消色差望远物镜各透镜参量

透镜	材料	n_d	ν_d	P_{Fd}	ϕ
1	K9	1.51637	64.07	0.6923	2.52
2	TF3	1.61242	44.09	0.6998	-6.39
3	BAF6	1.60771	46.11	0.7026	4.86

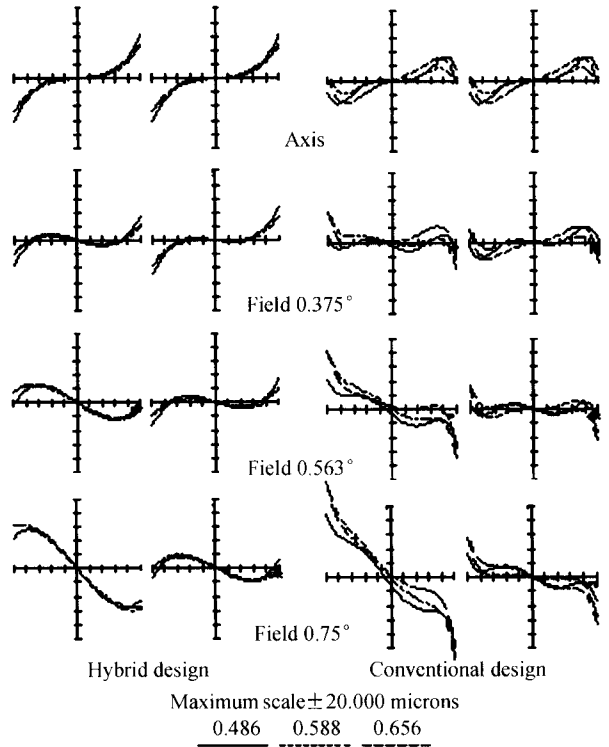


图 4 折衍混合设计和常规设计的像质比较
Fig. 4 Compared the image quality of hybrid design with conventional design

5 结论

将我国传统的几何光学设计的 PWC 方法应用于含衍射光学元件的混合复消色差望远物镜设计中,设计了焦距为 2000 mm、相对孔径为 1/15 的双片型折衍混合复消色差望远物镜.与常规三片型纯折射复消色差望远物镜比较表明折衍混合设计能选用更为常用的光学材料,结构较为简单,具有更好的二级光谱校正能力,带球差,色球差更小,因此具有更好的成像质量.

参考文献

- 王之江. 光学技术手册. 北京:机械工业出版社,1994., 951~953
Wang Z J. Handbook of optical technology. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 1994. 951~953
- 于斌,彭翔,牛憨笨. 二元光学双波段红外成像光谱仪,光子学报,2005,34(1):63~65
Yu B, Peng X, Niu H B. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1):63~65
- 杨新军,王肇圻,孙强,等. 基于二元光学的红外成像光谱仪离轴系统设计. 光子学报,2005,34(4):573~576
Yang X J, Wang Z Q, Sun Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(4):573~576
- 赵秋玲,王肇圻,全薇,等. 用于复色哈特曼人眼波像差测量的折/衍混合调焦系统. 光子学报,2004, 33(3): 342~345
Zhao Q L, Wang Z Q, Quan W, et al. *Acta Photonica*

- Sinica, 2004, **33**(3):342~345
- 5 Sweat W C. Mathematical equivalence a holographic optical elements and an ultra-high index lens. *J Opt Soc Am*, 1979, **69**(3): 486~487
- 6 崔庆丰. 用二元光学元件实现复消色差. 光学学报, 1994, **4**(8):877~881
- Cui Q F. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8): 877~881
- 7 崔庆丰, 匡裕光. 混合复消色差透镜组的设计原理. 光学学报, 1995, **15**(4):499~503
- Cui Q F, Kuang Y G. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 499~503
- 8 Welford W T. Aberrations of optical systems. Bristol: Adam Hilger LTd Techno House, 1986
- 9 王之江. 光学设计理论基础. 北京: 科学出版社, 1985
- Wang Z J. Foundation of optical design theory. Beijing: Science Press, 1985

Hybrid Diffractive-refractive Apochromatic Telescope Objectives Design Using PWC Method

Zeng Jiyong^{1,2}, Jin Guofan^{1,2}, Wang Minqiang¹, Yan Yingbai¹

¹ Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084

² Tsinghua-Foxconn Nanotechnology Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084

Received date: 2005-07-07

Abstract The secondary spectrum is a main factor debasing image quality in telescope objectives that have long focal length and large relative aperture. Recently, the special dispersion character of the diffractive structure has been applied to correct secondary spectrum with ordinary material and simple construction. In this paper, a diffractive optical element is equivalent to a thin lens with infinite refractive index. Based on this ultra-high index model, the PWC method has been investigated to design hybrid diffractive-refractive (HDR) apochromatic telescope objectives. A HDR doublet apochromatic telescope objective with a focal length of 2000 mm and a relative aperture of 1/15 has been designed. Compared with conventional triplet design, it is shown that hybrid objective is better to correct secondary spectrum and spherochromatic aberration, so has better image quality.

Keywords Optical design; Apochromatic telescopic objective; Hybrid refractive-diffractive system; Ultra-high index method



Zeng Jiyong was born in 1964 in Jiangxi Province, China. He received his MS degree from the University of Electronic Science and Technology of China in 1993, and his Ph. D degree from Department of Optoelectronics of Sichuan University in 2003. Now he is working as postdoctoral fellow in Department of Precision Instruments of Tsinghua University. His main research interests include optics design and stereo vision.