

文章编号: 0253-2239(2008)05-0981-07

折衍射混合复消色差望远物镜中的色球差

冷家开 崔庆丰 裴雪丹 董 辉

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 一个正透镜、一个负透镜及一个衍射光学元件以不同的组合可以构成两种折衍射混合光学系统。当这两种系统消球差、彗差及复消色差后会产生不同的色球差。通过赛德尔像差理论,分析了这两种结构产生不同色球差的原因。计算表明当衍射光学元件以负透镜的平面为基底时产生的色球差为以正透镜的平面为基底时产生的色球差的 7 倍。对衍射光学元件以负透镜的平面为基底的情形,提出了减小系统色球差的解决办法,使系统色球差减小到 0.307 mm。另外设计了一个传统复消色差光学系统,并和折衍射混合光学系统进行了比较,分析表明,衍射光学元件可代替传统光学系统中的特殊光学材料并使系统达到相同的成像质量。最后讨论了衍射光学元件的衍射效率对系统成像质量的影响。

关键词 光学设计; 衍射光学; 色球差; 二级光谱

中图分类号 TH74 文献标识码 A

Spherochromatism of Hybrid Diffractive-Refractive Apochromatic Telescope Objectives

Leng Jiakai Cui Qingfeng Pei Xuedan Dong Hui

(Department of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract A positive lens, a negative lens and a diffractive optical element (DOE) can compose two kinds of hybrid diffractive-refractive telescope objectives when assembled differently. There is a different spherochromatism after the two systems correct secondary spectrum, spherical aberration and comatic aberration. Reasons of the different spherochromatism of the two configurations are researched by Seidel aberration analysis. And spherochromatism of the configuration with diffractive optical element placed on the negative lens is 7 times as much as that of the other. When the substrate of diffractive optical element is the negative lens, a solution is presented to decrease spherochromatism of the system, and the value of spherochromatism is decreased to 0.307 mm. A conventional apochromatic optical system is designed in addition, and compared with the hybrid diffractive-refractive apochromatic optical system. It shows DOE can substitute special optical material of conventional optical system and obtain the same imaging effect. The influence of diffraction efficiency on the imaging optical system by the polychromatic integrated efficiency of DOE is analyzed at last.

Key words optical design; diffractive optics; spherochromatism; secondary spectrum

1 引 言

传统的消色差镜头,往往由两块或两块以上性能(折射率和色散)不同的材料组合而成。当系统校正轴向色差后,对第三波长的光,像点并不完全重

合,而有一定的偏离,这种偏离统称为二级光谱。二级光谱的存在会造成系统成像质量的降低。这对于长焦距物镜、高倍显微物镜等成像质量要求较高的光学系统是不允许的,必须考虑二级光谱的校正问

收稿日期: 2007-10-11; 收到修改稿日期: 2007-11-13

基金项目: 国防科工委“十一五”基础科研项目(B1020060365)资助课题。

作者简介: 冷家开(1979—),男,重庆人,硕士研究生,主要从事光学设计、衍射光学等方面的研究。

E-mail: peixuedan_2001@163.com

导师简介: 崔庆丰(1954—),辽宁人,教授,博士生导师,主要从事衍射光学、光学设计等方面的研究。

E-mail: cuiqf@yahoo.com.cn

题。传统二级光谱的校正(也称复消色差)往往采用具有特殊色散性质的材料(如 CAF_2 晶体)与不同的玻璃组合制成复消色差光学系统,但 CAF_2 晶体价格较高,加工性能也不理想。近年来由于衍射光学理论及加工技术的不断完善,衍射光学元件(Diffractive optical elements, DOE)已进入光学领域的很多方面^[1~3]。由于衍射光学元件独特的色散性质,可以应用于成像光学系统二级光谱的校正^[4~5],从而提高系统成像质量,减小系统体积。采用衍射光学元件实现系统复消色差最简单的结构是采用一个普通火石玻璃做成的负透镜、一个由普通冕牌玻璃做成的正透镜及一个衍射光学元件组成折衍射混合透镜组。崔庆丰等^[6]在设计中发现这两种结构消球差、彗差及复消色差后,当衍射光学元件以负透镜的平面为基底时产生的色球差与以正透镜的平面为基底时产生的色球差有较大的区别。本文通过赛德尔像差理论分析,对两种结构产生不同色球差的原因进行了进一步的讨论。对衍射光学元件以负透镜的平面为基底的情形,提出了减小系统色球差的办法。另外设计了一个传统复消色差光学系统,并和折衍射混合光学系统进行了比较。最后讨论了衍射光学元件的衍射效率对系统成像质量的影响。

2 混合复消色差透镜组赛德尔像差理论分析

2.1 衍射光学元件的相位表达式

设计一个衍射光学元件关键在于确定描述衍射光学元件的相位多项式系数。相位多项式确定了出射波前的形状,旋转对称性衍射光学元件的相位函数在 Zemax 软件中用多项式进行描述:

$$\varphi(y) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots, \quad (1)$$

式中 A_1 为二次项系数,决定衍射面的光焦度:

$$K_D = -m\lambda A_1 / \pi, \quad (2)$$

式中 m 为所用的衍射级次, λ 为波长。(1) 式中 A_1 项用于光学系统色差的校正,其他各项 A_2 、 A_3 项相当于非球面的作用,可用于系统单色像差的校正。

2.2 赛德尔像差方程

设薄透镜两个表面的曲率分别为 C_1 和 C_2 , 光焦度为 K , 物方和像方孔径角分别为 u, u' 。以 B 表示透镜的弯曲参量,以 C 表示共轭参量,并令^[7]

$$B = \frac{C_1 + C_2}{K}, \quad C = \frac{u + u'}{u - u'}. \quad (3)$$

由像差理论及高折射率模型^[8]可得图 1 中混合薄透镜组与光阑重合时赛德尔像差表达式为:

$$\begin{aligned} S_I &= \frac{y^4}{4} \left\{ K_1^3 \left[\left(\frac{n_1}{n_1 - 1} \right)^2 + \frac{n_1 + 2}{n_1} B_1^2 + \frac{4(n_1 + 1)}{n_1} B_1 C_1 + \frac{3n_1 + 2}{n_1} C_1^2 \right] + \right. \\ &\quad \left. \left[K_2^3 \left(\frac{n_2}{n_2 - 1} \right)^2 + \frac{n_2 + 2}{n_2} B_2^2 + \frac{4(n_2 + 1)}{n_2} B_2 C_2 + \frac{3n_2 + 2}{n_2} C_2^2 \right] + K_D^3 (1 + 3C_D^2) - 32m\lambda A_2 \right\}, \\ S_{II} &= -y^2 H \left[\frac{K_1^2}{2} \left(\frac{n_1 + 1}{n_1} B_1 + \frac{2n_1 + 1}{n_1} C_1 \right) + \frac{K_2^2}{2} \left(\frac{n_2 + 1}{n_2} B_2 + \frac{2n_2 + 1}{n_2} C_2 \right) + K_D^2 C_D \right], \\ S_{III} &= H^2 (K_1 + K_2 + K_3) = H^2 K, \\ S_{IV} &= H^2 (K_1/n_1 + K_2/n_2), \\ S_V &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 y 为光瞳半径, n_1, n_2 为透镜 1, 2 的折射率, H 为拉格朗日不变量, K_1, K_2, K_D 分别为 1, 2 元件及衍射光学元件的光焦度。

2.3 混合复消色差透镜组初始结构的求解

为讨论方便,图 1(a)、图 1(b)分别为 NPB 结构 PNB 结构。假设系统设计要求为:系统焦距 $f' = 1000 \text{ mm}$, 主设计波长为 d 光,消色差波长为 g 光和 c 光,入瞳孔径 100 mm ,全视场角 $2\omega = 1^\circ$ 。透镜选用最普通的两种玻璃材料 H-K9L 和 F2,衍射光学元件取一级衍射光。假设这两种结构都作为望远物镜使用,要求消球差、彗差及复消色差。

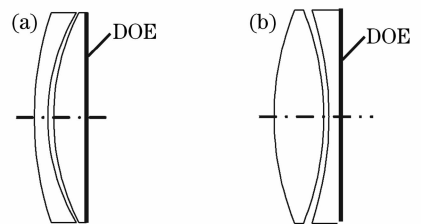


图 1 含衍射光学元件的混合复消色差透镜组。

(a) NPB, (b) PNB

Fig. 1 Hybrid apochromats with a diffractive optical element. (a) NPB, (b) PNB

由于这两种结构消球差、彗差及复消色差后色

球差有较大的区别,为了进一步分析这两种结构产生不同色球差的原因,通过赛德尔像差理论解出满足不同像差要求的系统结构参量。由复消色差原理^[6]结合(4)式的 S_I 项解出了满足消球差和复消色差要求的两种系统的结构参量。

对表 1 中两种系统结构进行 S_{II} 计算,得到系统消球差和复消色差后 NPB 型的初级彗差系数为 $S_{II}=0.000052$;PNB 型的初级彗差系数为 $S_{II}=0.001571$ 。图 2、图 3 为表 1 结构数据给透镜一定厚度值后(用光学设计软件 Zemax 进行模拟)的垂轴像差特性曲线, P_Y, P_X 分别为系统在 X, Y 方向上的规一化光瞳半径, E_X, E_Y 分别为规一化光瞳半径在 X, Y

方向对应的像差。由图 2 可见 NPB 型结构消球差和复消色差后,系统也满足消彗差要求,由解得的 B_1 值(B_1 为系统第一个透镜的弯曲参量)和(4)式 S_I 项可算出系统色球差约为 $\Delta L_{gc}=0.337$ mm;而图 3 表明 PNB 型结构消球差和复消色差后彗差较大,需要采取其他措施来校正系统彗差。

表 1 满足消球差和复消色差要求的两种系统的结构参量
Table 1 Configuration parameters after the spherical aberration and the secondary spectrum are corrected

	R_1	R_2	R_3	R_4	A_1
NPB	442.55	263.38	268.2	∞	-204
PNB	421.60	-737.16	-650.6	∞	-204

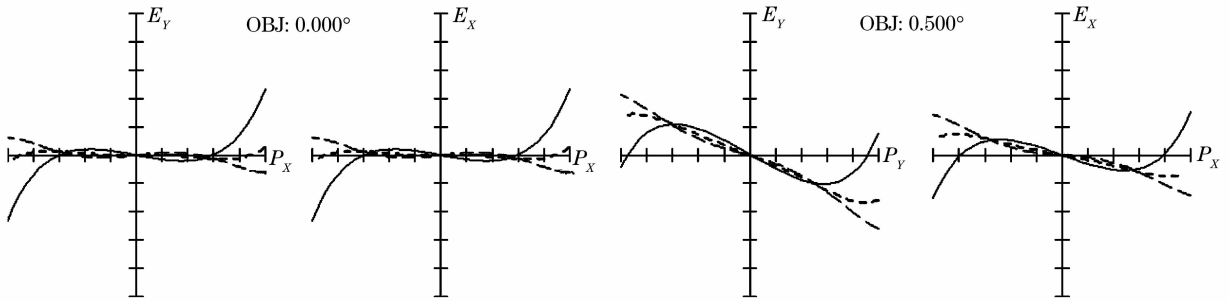


图 2 NPB 型垂轴像差特性曲线图(E_Y 最大尺寸: $\pm 20 \mu\text{m}$)

Fig. 2 Transverse ray fan plot of NPB configuration (E_Y maximal scale is $\pm 20 \mu\text{m}$)

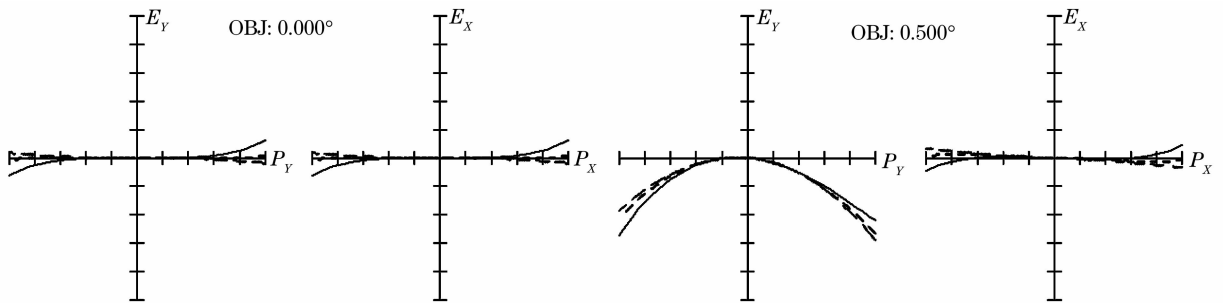


图 3 PNB 型垂轴像差特性曲线图(E_Y 最大尺寸: $\pm 100 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Transverse ray fan plot of PNB configuration (E_Y maximal scale is $\pm 100 \mu\text{m}$)

为证明上述观点的正确性,对两种系统结构满足不同像差要求时的 B_1 值进行求解。对于 NPB 型结构,系统满足消球差和复消色差时的 B_1 值为 -6.387,系统满足消彗差和复消色差的 B_1 值为 -6.395,可见系统基本可同时提供满足消球差和彗差的解。而 PNB 结构,系统满足消球差和复消色差时的 B_1 值为 0.525,系统满足消彗差和复消色差的 B_1 值为 0.172,表明此结构复消色差后只能提供消球差或者彗差的解,无法得到同时满足消球差和消彗差的解。

2.4 混合复消色差透镜组产生较大色球差原因

因为系统设计要求消彗差,而 PNB 型结构消球差和复消色差后,除衍射光学元件相位表达式的

A_2, A_3 等高次项外没有其他的设计变量可用于系统像差的校正;又由于设计系统的光阑位置在衍射面附近,衍射光学元件相位表达式的 A_2, A_3 等高次项可用于系统球差的校正(设计中只采用了 A_2 项),所以要求 PNB 型结构修改像差校正方案。先前用于校正系统球差的透镜改用校正系统彗差,系统球差采用衍射面的 A_2 项进行校正。由复消色差原理及(4)式中的 S_{II} 项解得满足消彗差和复消色差要求

表 2 满足消彗差和复消色差要求的系统的结构参量

Table 2 Configuration parameters after the comatic aberration and the secondary spectrum are corrected

	R_1	R_2	R_3	R_4	A_1	A_2
PNB	492.48	-588.95	-650.6	∞	-204	0

的 PNB 型系统结构参量,见表 2。

表 2 中解得的 B_1 值带入(4)式中的 S_I 项,算出此时系统的初级球差系数 $S_I = 0.027822$ 。图 4 为

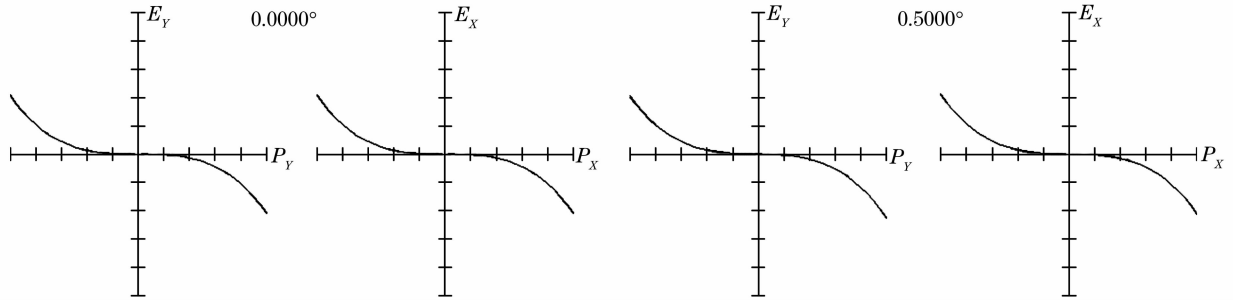


图 4 PNB 型垂轴像差特性曲线图(E_Y 最大尺寸: $\pm 500 \mu\text{m}$)

Fig. 4 Transverse ray fan plot of the PNB configuration (E_Y maximal scale is $\pm 500 \mu\text{m}$)

由分析,用衍射面的 A_2 项校正系统球差。当衍射面的 A_2 项用于系统球差的校正时,衍射面校正的球差和产生的色球差之间满足关系^[9]:

$$\Delta L_{gC}^D = -\Delta L_d/v_d^D, \quad (5)$$

式中 ΔL_{gC}^D 为衍射光学元件产生的色球差, ΔL_d 为折射光学元件组产生的球差, v_d^D 为衍射光学元件的等效阿贝数。由计算的球差赛德尔系数 S_I 及(5)式算出衍射面的 A_2 项产生的色球差值

表 2 数据结构给定透镜一定厚度值后的垂轴像差特性曲线,可见系统球差没有校正。

$$\begin{aligned} \Delta L_{gC}^D &= -(-S_I/2u^2)/v_d^D = \\ &= -0.027822/(2 \times 0.05^2 \times 2.477) \text{ mm} = \\ &= -2.246 \text{ mm}. \end{aligned}$$

可见,PNB 结构系统消球差、彗差及复消色差后色球差约为 NPB 型的 7 倍。图 5 为用衍射面的 A_2 项校正系统球差后在 0.7 孔径复消色差的垂轴像差特性曲线。

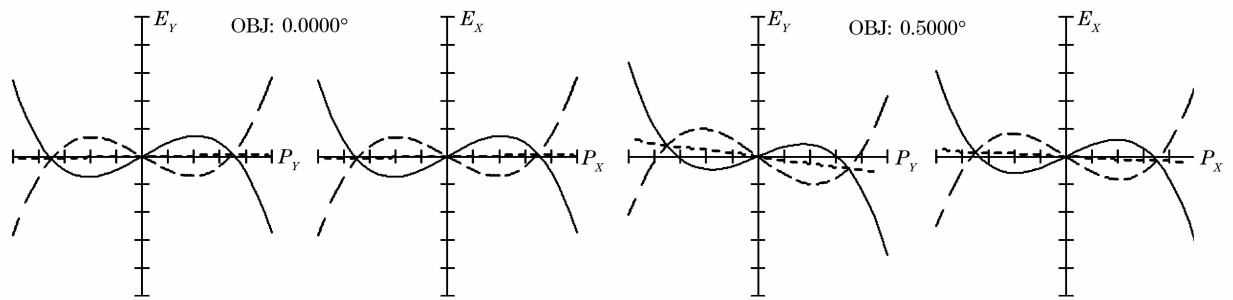


图 5 PNB 型垂轴像差特性曲线图(E_Y 最大尺寸: $\pm 50 \mu\text{m}$)

Fig. 5 Transverse ray fan plot of the PNB configuration (E_Y maximal scale is $\pm 50 \mu\text{m}$)

2.5 减小混合复消色差透镜组色球差的方法

由分析可知,对于 PNB 型结构由于用衍射面的 A_2 项校正系统球差,而衍射面的 A_2 项校正球差和产生的色球差存在(5)式的关系,从而产生了较大的色球差。因此,为了减小系统色球差的产生,不能采用衍射面的 A_2 项来校正系统球差。

随着衍射光学元件加工技术的发展,衍射面的加工基底可以为球面或非球面,增加了系统设计自由度,可以用于系统像差的校正。对 PNB 型系统结构参量进行计算,其中衍射面基底可以弯曲,且 A_2 项系数为 0,使系统满足消球差、彗差及复消色差要求。

对系统初级像差进行计算得到初级球差系数 $S_I = 0.000546$, 初级彗差系数 $S_{II} = 0.000374$, 色球差值

$$\begin{aligned} \Delta L_{gC}^D &= -(S_{Ig} - S_{Ic})/2u^2 = \\ &= (0.0005 - 0.00103)/(2 \times 0.05^2) \text{ mm} = \\ &= 0.307 \text{ mm}. \end{aligned}$$

可见系统色球差值比用衍射面的 A_2 项校正系统球差时产生的色球差值大大减小,和 NPB 型结构产生的色球差相当。图 6 为表 3 中数据结构优化后在 0.7 孔径系统复消色差的垂轴像差特性曲线,和图 5 相比也可见,系统色球差下降很大。

表 3 满足消球差、彗差及复消色差要求的系统结构参量
Table 3 Configuration parameters after the spherical aberration, the comatic aberration and the secondary spectrum are corrected

	R_1	R_2	R_3	R_4	A_1
PNB	547	-526.22	-510.15	-2364.78	-204

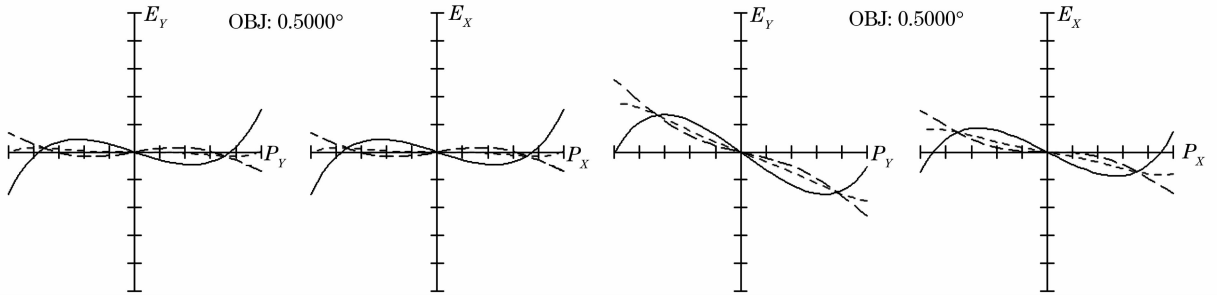


图 6 PNB 型垂轴像差特性曲线图(E_Y 最大尺寸: $\pm 20 \mu\text{m}$)

Fig. 6 Transverse ray fan plot of the PNB configuration (E_Y maximal scale is $\pm 20 \mu\text{m}$)

2.6 折衍混合复消色差系统与折射式复消色差系统的比较

为了与设计的折衍射混合复消色差光学系统进行比较,本文设计了一个折射式复消色差光学系统,设计要求和前面的折衍射混合光学系统设计要求相同,系统结构参量如表 4 所示。

从图 7 和图 6 的比较,可见折射式复消色差光学系统的轴上色球差比折衍射混合光学系统的轴上色球差稍大,而轴外像差两者变化很小,表现为折射式复消色差光学系统的轴上点调制传递函数 (Modulation transfer function, MTF) 值(图 8)比折

衍射混合光学系统的轴上点调制传递函数值(图 9)略有下降。可见,在复消色差光学系统的设计中,衍射光学元件可代替超低色散材料(如 CaF_2 晶体),且不增加系统的重量。

表 4 折射式复消色差光学系统结构参量

Table 4 Configuration parameters of the refractive-apochromatic conventional optical system

Radius/mm	Thickness /mm	Glass
540.43	8	CAF2
-225.13	1	
-229.97	8	K6
-1042.8	990.07	

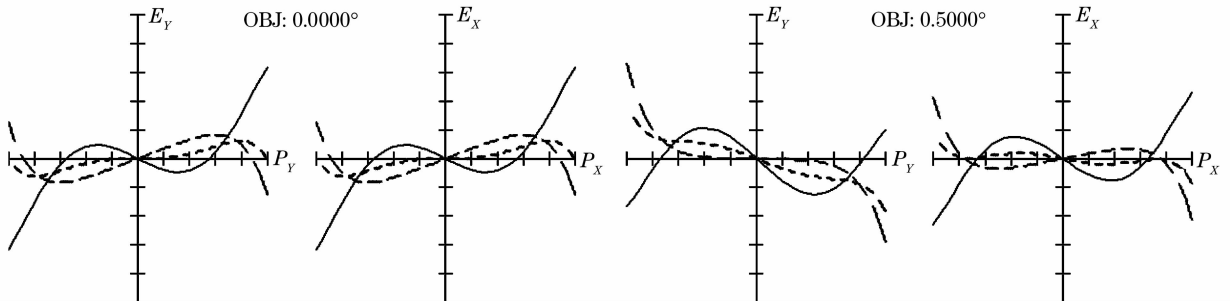


图 7 折射式复消色差光学系统垂轴像差特性曲线图(E_Y 最大尺寸: $\pm 20 \mu\text{m}$)

Fig. 7 Transverse ray fan plot of the refractive-apochromatic conventional optical system. (E_Y maximal scale is $\pm 20 \mu\text{m}$)

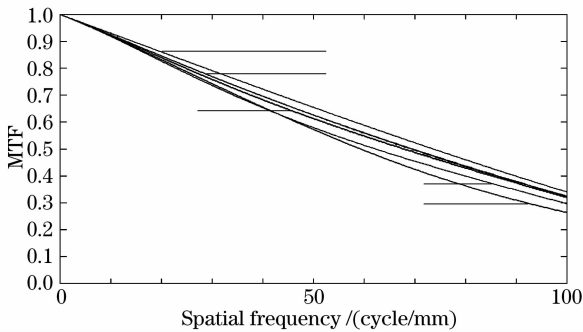


图 8 折射式复消色差系统调制传递函数曲线
Fig. 8 Modulation transfer function curve of refractive optical system

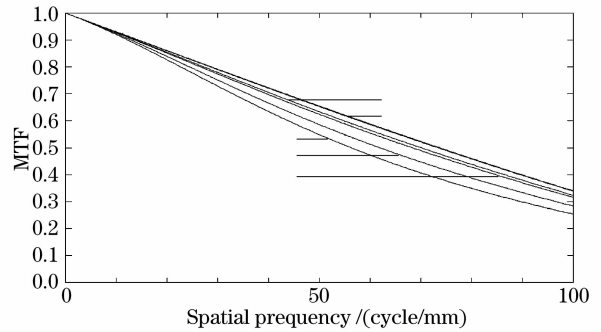


图 9 折衍混合复消色差系统调制传递函数曲线
Fig. 9 Modulation transfer function curve of hybrid diffractive-refractive apochromatic optical system

3 折衍混合复消色差系统在工程上的实现

3.1 衍射光学元件的可加工性

图 1 中讨论的两种结构衍射面的相位几乎相同,因此这里仅讨论 PNB 结构衍射面的特征参量。衍射面的连续面型结构如图 10 所示,横坐标为实际径向坐标,纵坐标为光栅高度,整个衍射面有 31 个

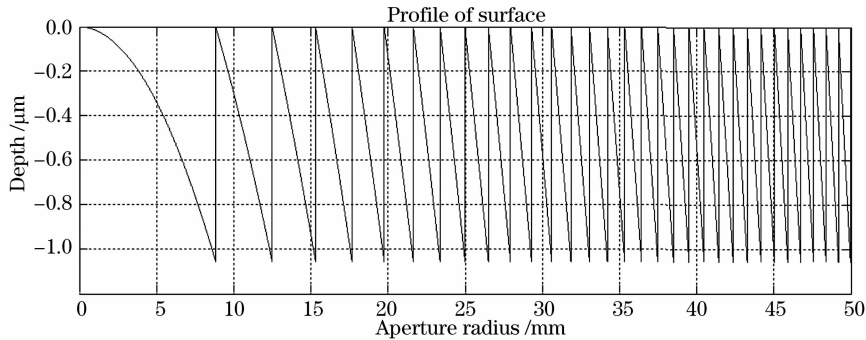


图 10 衍射光学元件的面型结构

Fig. 10 Surface configuration of DOE

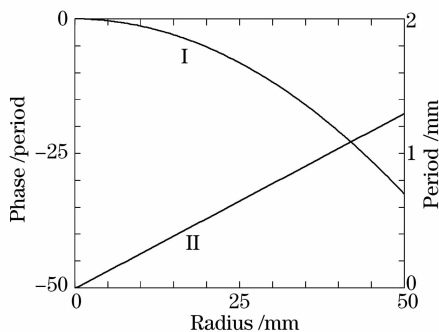


图 11 衍射面特征参量曲线

Fig. 11 Characteristic parameter curve of the diffraction plane

3.2 衍射效率对混合光学系统性能的影响

虽然衍射光学元件具有特殊的衍射色散性质,它的出现为光学设计开拓了一片新的领域,但若光学系统中采用单层衍射光学元件也存在一些限制,其中衍射效率随成像光谱宽度的增加而下降就是最为重要的一个问题,因此必须评价它对成像质量的影响。

采用带宽积分平均衍射效率来评价衍射效率对折衍混合成像光学系统的影响是比较合理的,带宽积分平均衍射效率可表示为^[11]

$$\bar{\eta}(\lambda) = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_1(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

式中 $\eta_1(\lambda)$ 为一级衍射效率。根据系统设计要求, $\lambda_{\max} = 656.3 \text{ nm}$, $\lambda_{\min} = 435.8 \text{ nm}$, 则通过数值积分

衍射周期。图 11 为衍射面的特征参量曲线,其中曲线 I 表示衍射面相位随实际径向坐标的变化,以周期数(periods)表示;曲线 II 表示衍射面每毫米周期数(period/mm)随实际径向坐标的变化,其最小周期线宽为 0.77 mm 。若衍射面采用二元面型结构,每周期刻蚀 8 个台阶,则每个台阶的加工尺寸为 $96 \mu\text{m}$,这样的尺寸完全可以加工^[10]。

办法,当衍射面为连续面型结构时,可计算出带宽积分平均衍射效率为 95.4% ;若衍射面用二元加工方法进行加工,每个周期刻蚀 8 个台阶时,带宽积分平均衍射效率为 90.5% 。可见,系统有少量次级衍射能量弥散在主衍射级的像面上,导致像面衬度下降,进而影响系统的成像质量。

4 结 论

对于衍射面以正透镜的平面为基底的双分离望远物镜系统复消色差后,由于折射元件能同时提供满足校正系统球差和彗差的解,从而能够达到较好的像质;而对于衍射面以负透镜的平面为基底的双分离望远物镜系统复消色差后,折射元件只能提供校正系统球差或彗差的解。由于衍射基底为平面,不能提供设计变量,而由衍射光学元件的 A_2 项来提供,而衍射面的 A_2 项校正的球差和产生色球差有一定的关系,因此造成了较大的色球差。改用衍射光学元件的基底面校正系统球差,则可以减小系统色球差值。另外,由于衍射光学元件衍射效率的影响,决定了单层衍射光学元件一般用于带宽范围较小或系统成像质量要求不是很高的光学系统。

参 考 文 献

- 1 Fan Changjiang, Wang Zhaoqi, Wuhuanbao. The design of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1266~1270
范长江,王肇圻,吴环宝. 红外双波段双层谐波衍射光学系统设计

- [J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1266~1270
- 2 Li Dongyuan, Hou Lantian, Yan Xiusheng *et al.*. Hybrid refractive diffractive coupler for image fiber bundle[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1211~1233
李东源, 侯蓝田, 闫秀生等. 转像光纤的折-衍混合耦合器[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1211~1233
- 3 Wang Fang, Zhu Qihua, Wang Xiao *et al.*. Study of dispersive and phasic compensation using composite binary optical elements [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1334~1338
王方, 朱启华, 王道等. 复合型二元光学器件补偿色散和相位畸变研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(10): 1334~1338
- 4 T. Stone, N. George. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14): 2962~2966
- 5 D. A. Buralli, G. M. Morris. Design of a wide field diffractive landscape lens[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(18): 3952~3956
- 6 Cui Qingfeng, Kuang Yuguang. Design principles of hybrid apochromats[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 499~503
崔庆丰, 匡裕光. 混合复消色差透镜组的设计原理[J]. 光学学报, 1995, **15**(4): 499~503
- 7 W. T. Welford. *Aberrations of Optical Systems* [M]. Bristol: Adan Hilger, 1986. 226~234
- 8 W. A. Kleinmans. Aberrations of curved zone plates and Fresnel lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(6): 1701~1704
- 9 Zhao Liping, Wu Minxian, Jin Guofan *et al.*. Spherochromatism correction of a hybrid refraction-diffractive singlet [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(5): 621~626
赵丽萍, 邬敏贤, 金国藩. 折衍射混合单透镜的色球差校正研究[J]. 光学学报, 1998, **18**(5): 621~626
- 10 Cui Qingfeng, Gao Shiping, Kuang Yuguang. Design, fabrication and experiment of a hybrid diffractive-refractive binary optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, **5**(5): 17~20
崔庆丰, 高士平, 匡裕光. 高分辨率成像二元光学系统的研制与实验结果[J]. 光学精密工程, 1997, **5**(5): 17~20
- 11 D. A. Buralli, G. M. Morris. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(22): 4389~4396