

# 折衍混合单透镜替代双胶合望远物镜 的设计研究\*

赵丽萍 邬敏贤

(清华大学精密仪器系精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要** 提出了一种用以替代双胶合望远物镜的折衍混合单透镜的设计方法。由于一般望远物镜相对孔径较大、视场较小, 故其球差和色差较大, 校正要求高, 而与视场有关的像差本身较小。通过分析初级像差, 本文研究了折衍混合单透镜的折射器件(基底)选型、初始结构设计及消色差和球差的方法, 仅采用一种玻璃材料 K9, 设计的折衍混合单透镜具有与原传统结构相当的色差和降低了约一半的单色像差, 能成功地取代传统双胶合物镜; 展示了折衍混合结构在可见光波段的应用前景。

**关键词** 折衍混合单透镜, 双胶合透镜, 二元光学器件。

## 1 引 言

1988 年, 斯渥森(Swanson)和维尔得卡姆(Veldkamp)等人利用衍射光学元件(Diffractive optical elements, DOE)的色散特性校正单透镜的轴上色差, 研制了新型的二元光学透镜(Binary Optical Lens, BOL)——多阶相位透镜<sup>[1]</sup>, 展示了二元光学透镜用于光学成像的巨大潜力和优势。从此, 在世界范围内, 越来越多的光学研究人员开始进行二元光学透镜在光学成像领域的应用研究。这种既包括传统光学器件, 如透镜、棱镜、反射镜等, 也可以含有衍射光学器件, 如全息光学器件(HOE)、二元光学透镜等的新型光学成像系统, 同时利用了光在传播中所具有的折射和衍射两种性质, 通常被称为折衍混合光学成像系统; 它不仅可以增加光学设计自由度, 而且能够突破传统光学系统的许多局限性, 在改善系统像质、减小体积和降低成本等多方面都表现出传统光学系统无可比拟的优势。近年来用于控制、信息处理等方面的精密电子产品对光学成像系统的轻量化、小型化及像质提出了越来越高的要求, 加之微电子、微制造技术的发展, 更加快了用于成像的二元光学器件和混合成像系统的研究及实用化的步伐。

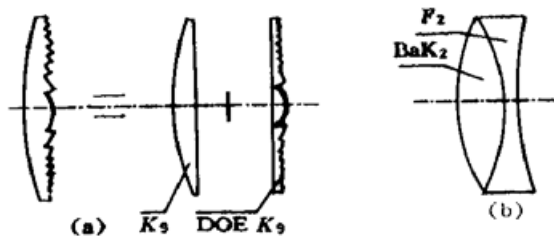


Fig. 1 The schematic construction of (a) hybrid singlets, (b) the conventional doublet

\* 国家自然科学基金资助项目。

折衍混合单透镜的折射器件是平凸透镜，因在其平面上加工衍射器件的相位表面，也是衍射器件的基底。这种带有衍射面的平凸透镜即构成形式最简单的折衍混合系统，因实际上只是一块透镜，也常叫做混合单透镜，如图 1 所示。它可以只选用一种材料，达到与传统双胶合透镜相当的像差校正结果。本文研究了混合单透镜的设计方法和步骤，并给出用以取代双胶合望远物镜的设计结果。

## 2 折衍混合单透镜望远物镜的设计方法和步骤

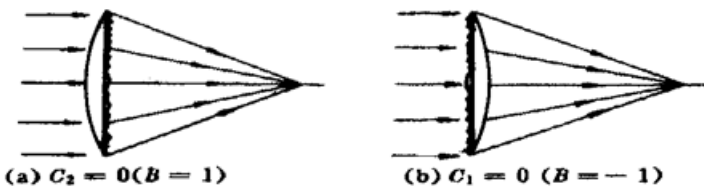
由于望远物镜视场角较小(通常全视场小于 10°)，相对孔径中等或较大，入瞳与透镜组重合，所以其像差具有以下特点：与口径有关的像差如球差较大，与视场有关的像差较小。因此，物镜通常只校正轴上球差、正弦差和轴向色差。

### 2.1 折衍单透镜望远物镜的结构形式确定

平凸基底的弯曲系数  $B = \pm 1$  的两种结构形式如图 2 所示，两种结构对应的初级球差、彗差系数<sup>[2]</sup>分别由(1)式和(2)式表示，式中的所有符号意义及正负号规定均遵循维尔福德(Welford)的约定<sup>[3]</sup>。

$$B = 1: \left. \begin{aligned} S_I &= -\frac{y^4\Phi}{4} \left[ \left| \frac{n}{n-1} \right|^2 + \frac{n+2}{n(n-1)^2} - \frac{4(n+1)}{n(n-1)} + \frac{3n+2}{n} \right], \\ S_{II} &= -\frac{y^2\Phi H}{2} \left[ \frac{n+1}{n(n-1)} - \frac{2n+1}{n} \right], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$B = -1: \left. \begin{aligned} S_I &= \frac{y^4\Phi}{4} \left[ \left| \frac{n}{n-1} \right|^2 + \frac{n+2}{n(n-1)^2} + \frac{4(n+1)}{n(n-1)} + \frac{3n+2}{n} \right], \\ S_{II} &= \frac{y^2\Phi H}{2} \left[ \frac{n+1}{n(n-1)} + \frac{2n+1}{n} \right], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$



由(1)式、(2)式和图 2 可知，弯曲系数  $B = 1$  对应结构如图 2(a)的  $S_I$ 、 $S_{II}$  系数，因其正负项相消合成，具有较小的球差和彗差；而图 2(b)结构对应的  $B = -1$  会产生较大的球差和彗差。这是由其结构形式决定的。故选择图 2(a)结构形式，以使得初始的基底像差

Fig. 2 Two possible constructs of the hybrid singlets 择图 2(a)结构形式，以使得初始的基底像差最小，减小衍射面消像差的负担，便于进行像差校正。

### 2.2 确定光焦度分配 ( $\phi_{ref}$ 和 $\phi_{oc}$ ) 以消色差——确定 $A_1$ 值

通常设旋转对称二元光学衍射面的相位函数为：

$$\Phi(\rho) = \frac{2\pi}{\lambda}(A_1\rho^2 + A_2\rho^4 + \dots) \quad (3)$$

若对于波长为  $\lambda$ ，衍射级次为  $m$ (不特别指明，一般取  $m = 1$ )设计二元器件，则其傍轴光焦度由(3)式表示的相位函数中的二次项系数  $A_1$  决定：

$$\phi_{dif} = -2mA_1 \quad (4)$$

因  $A_1$  是与  $\lambda$  成正比的系数，故设计  $A_1$  值可消色差。

对 F-C 波段，衍射光学元件的等效阿贝值为  $-3.452$ <sup>[4]</sup>，对合成焦距为  $F'$  的折衍混合器件，实现消色差的光焦度( $f'_{ref}$  和  $f'_{dif}$ ) 分配方程为：

$$f'_{\text{dif}} = F'(V_{\text{dif}} - V_{\text{ref}})/V_{\text{dif}}, \quad f'_{\text{ref}} = F'(V_{\text{ref}} - V_{\text{dif}})/V_{\text{ref}}, \quad \phi = \phi_{\text{dif}} + \phi_{\text{ref}} \quad (5)$$

对于 K9 玻璃,  $V_{\text{ref}} = 64.0$ , 有:

$$\begin{cases} f'_{\text{dif}} = 19.540F' \\ f'_{\text{ref}} = 1.0540F' \end{cases} \begin{cases} \phi_{\text{dif}} = 0.051\phi \\ \phi_{\text{ref}} = 0.949\phi \end{cases} \quad (6)$$

这样分配不仅可以实现消色差, 而且因为衍射器件的光焦度为正, 分担了一定的光焦度, 减轻了折射透镜的负担, 有利于实现大相对孔径, 从而可由(4)式确定  $A_1$ , 同时可确定平凸透镜凸面的曲率半径。

### 2.3 对主设计波长 $\lambda_d$ 消轴上球差以确定 $A_2$ 值

因衍射面分担的光焦度占总光焦度的比例很小, 而(1)式中第一项含有  $\phi_{\text{dif}}$  的三次方, 故第一项很小可略去。折衍混合器件消球差则可得<sup>[2]</sup>:

$$\begin{aligned} \Sigma S_1 = S_1 + S_{1\text{dif}} \approx \\ \frac{y^4 \phi_{\text{ref}}}{4} \left[ \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 + \frac{n+2}{n(n-1)^2} - \frac{4(n+1)}{n(n-1)} + \frac{3n+2}{n} \right] - 8mA_2y^4 = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

从而确定  $A_2$  的初始取值。

### 2.4 通过计算系统的波像差函数确定衍射面的其它面形系数 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ ...

衍射面的其它面形系数  $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ ... 为光学设计提供了新的自由度, 在本设计中主要用以消除剩余球差。为此通过光线追迹, 计算出对应不同孔径带的球差, 然后可求出系统的波像差函数为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{aligned} W = \int_0^y \Delta L \frac{y}{f^2} dy = \\ - \frac{Y^2}{2f^2} \left[ -\delta \frac{y^2}{Y} + \frac{b_1}{2} \frac{y^4}{Y} + \frac{b_2}{3} \frac{y^6}{Y} + \frac{b_3}{4} \frac{y^8}{Y} + \frac{b_4}{5} \frac{y^{10}}{Y} \dots \right] = \\ B_1y^2 + B_2y^4 + B_3y^6 + B_4y^8 + B_5y^{10} + B_6y^{12} \dots \end{aligned} \quad (8)$$

故取  $A_3 = -B_3$ ,  $A_4 = -B_4$ ,  $A_5 = -B_5$ , ... 作为初始参数。

### 2.5 通过光学设计软件优化初始结构确定最优相位函数形式

确定  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、... 后, 则已得到折衍单透镜的初始结构形式, 通过光学设计软件(如 CODEV, GOSA 等)稍加优化即可得到最终各项结构参数。

## 3 设计结果及与传统双胶望远物镜比较

为了便于分析比较, 传统双胶透镜与混合单透镜取相同的设计参数: 主设计波长:  $0.58930 \mu\text{m}$ ; 消色差波长:  $\lambda_F = 0.48610 \mu\text{m}$  和  $\lambda_C = 0.65630 \mu\text{m}$ ;  $F$  数  $F\# = 2.5$ ; 半视场角  $\omega = 2.5^\circ$ 。两系统的结构参数分别列于表 1 与表 2(衍射光学元件相位函数高阶项系数略去)中:

Table 1. Lens prescription data for traditional doublet objective<sup>[6]</sup> shown in Fig. 1(b)

surface	radius/mm	thickness/mm	glass	semi-diam/mm
1	47.860	13.0	BAK2	20.00
2	-54.70	2.5	F2	20.00
3	-2421.0	.0	AIR	20.00

Table 2. Lens prescription data for hybrid singlet objective shown in Fig. 1(a)

surface	radius/mm	thickness/mm	glass	semi-diam/mm
1	51.7900	15.0	K9	20.00
2 <sup>D</sup>	$\infty$		K9	20.00

*D*: Diffractive lens phase coefficients:  $A_1 = -3.69000 \times 10^{-4}$ ,  $A_2 = 5.34512 \times 10^{-7}$

图 3 给出了两者的横向像差曲线, 从中可以看出: 与传统系统相比, 混合单透镜的横向单色像差约降低了一半, 混合物镜的二级光谱稍优于传统物镜, 但由于衍射面用于消球差, 孔径大于 0.8 时, 混合单透镜的色球差稍大, 综合看来两结构的色差基本相当。故可以得到结论, 由单一材料组成的混合单透镜能够代替双胶望远物镜。

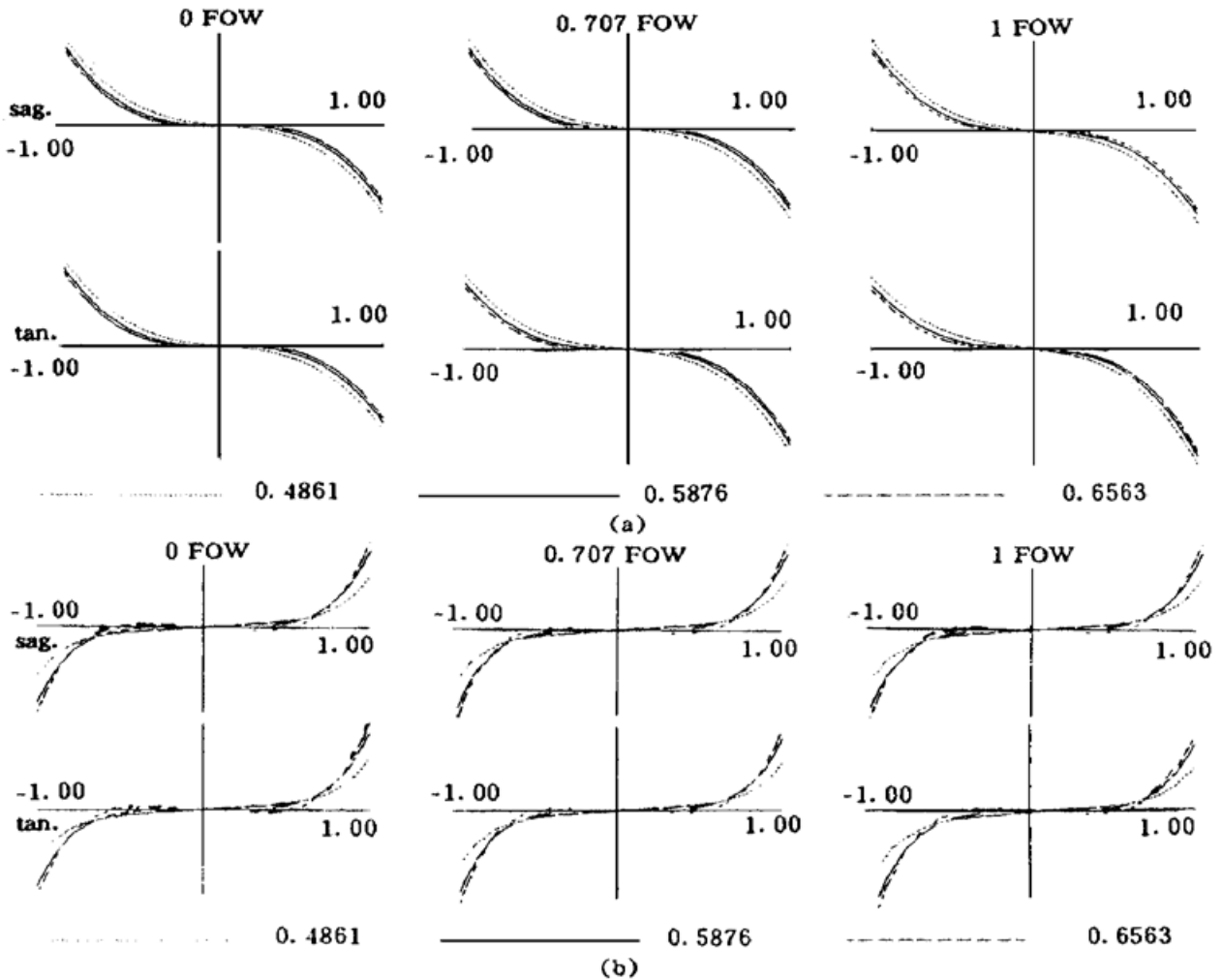


Fig. 3 Sagittal and tangential transverse aberration of different FOW versus pupil for (a) traditional doublet (with the maximal aberration 0.9558 mm), (b) hybrid singlet (with the maximal aberration 0.5996 mm)

**结 论** 由上述的折衍混合单透镜的设计研究中可见, 由于衍射面具有与正透镜相反的色差, 故通过折衍面光焦度的合理分配, 混合单透镜可以在无负光焦度的情况下实现消色差, 从而分担了正透镜的光焦度负担, 降低了系统的高级像差; 而且衍射面可以方便地实现任意形状的波面, 为光学设计提供了新的自由度。在本设计中主要用于校正剩余高级球差, 因而仅用一种最普通的玻璃材料 K9, 不仅可以达到与传统系统基本相当的消色差结果, 而且大

大减小了系统的单色像差, 如本设计的子午和弧矢横向像差均降为接近传统设计的二分之一 (由 0.95 mm 降为 0.59 mm), 表明折衍混合结构在宽光谱段成像方面也将具有广泛的应用前景。

感谢中国航天工业总公司给予的支持。

### 参 考 文 献

- [1] W. C. Sweatt, Describing holographic and optical elements as lenses. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67** (11) : 803~ 808
- [2] D. A. Buralli, G. M. Morris, Design of a wide field diffractive landscape lens. *Appl. Opt.*, 1989, **28** (18) : 3952~ 3956
- [3] W. T. Welford, *Aberrations of Optical Systems*. Hilger, Bristol, 1986 : 226~ 234
- [4] T. Stone, N. George, Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14) : 2962~ 2966
- [5] 潘君骅著, 光学非球面的设计加工与检验. 北京, 科学出版社, 1994, **4**(1) : 147~ 151
- [6] 李士贤, 郑乐年编, 袁旭沧审校, 光学设计手册. 北京, 北京理工大学出版社, 1990 : 224

## Study on the Design of the Hybrid Singlet to Replace the Refractive Doublet

Zhao Liping      Wu Minxian

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 23 January 1996; revised 31 March 1997)

**Abstract** The design of a diffractive-reflective hybrid singlet is presented to replace a conventional doublet telescope objective. As the telescope objective has a large relative aperture (1/2.5) and a small field of view, its spherical and lateral chromatic aberrations are high and should be corrected, while its aberrations relative to the field of view, such as astigmatism and distortion, are naturally small. According to the analyzation of the primary aberrations of a hybrid singlet with a plano-convex substrate, the design method of the original configuration is studied. A hybrid singlet in visible band ( $\lambda$  from 656.3 nm to 486.1 nm) is successfully designed. In comparison with the traditional construction, this hybrid singlet, with much smaller monochromatic aberrations and nearly equal chromatic aberrations, has lower weight, greatly simplified configuration and only one material K9 used. It shows that the application of hybrid singlets in visible band is promising.

**Key words** diffractive-reflective hybrid singlets, refractive doublet, binary optical lens.