

折衍混合单透镜的色球差校正研究*

赵丽萍 邬敏贤 金国藩 严瑛白

(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 分析研究了小视场折衍混合单透镜的设计中, 当衍射面同时用于消色差和球差时光焦度分配的最优方案, 得到了改进的光焦度分配公式。通过设计实例表明, 由该改进公式可得到较好的初始结构, 能够有效地克服衍射光学透镜校球差时产生的较大的色球差, 验证了此改进公式的正确性和有效性。此改进公式对折衍混合系统的设计具有指导意义。

关键词 折衍混合单透镜, 衍射光学透镜, 色球差。

1 引 言

目前, 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。通常被称为折衍混合光学成像系统即包括传统光学器件, 如透镜、棱镜、反射镜等, 也含有如全息光学器件(HOE)、衍射光学透镜(DOE)等的衍射光学器件, 这样的系统同时利用了光在传播中的折射和衍射两种特性, 具有独特的色散性质、良好的热性能及单色像差校正能力(即波面校正能力)^[1~4], 在光学设计中不仅可以增加设计的自由度, 而且能够突破传统光学系统的诸多方面的局限。因而, 在改善系统像质、减小体积和降低成本等多方面表现出传统光学系统无可比拟的优势。

在混合成像系统中, 衍射光学透镜独特的色散特性可用于消色差。沿用类似于传统双胶合透镜的消色差光焦度分配公式, 可得到用于混合系统的折衍光焦度分配公式^[5]; 但是通常情况下, 若同时用衍射光学透镜实现消球差, 由于衍射器件具有大反向色差, 往往会带来很大的色球差; 因此有些设计者认为对于由球面折射透镜与衍射光学透镜组成的混合单透镜不能同时实现对色差和球差的校正, 严重地限制了混合系统有效孔径的增大^[5]。

本文研究了小视场成像情况下, 当衍射光学透镜同时用以消色差和球差时, 若沿用折射系统的光焦度分配公式则得不到混合单透镜的较优初始解, 从而也难得到最优结构, 反应了所用公式的局限性。本文通过分析衍射光学透镜色球差的色分布特性及其产生原因, 成功地用过校正位置色差的方法校正色球差, 得到了更适于折衍混合单透镜设计的光焦度分配公式, 由此初始解则较容易得到混合单透镜的最佳结构, 其像质甚至优于传统双胶合物镜。

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-04-28; 收到修改稿日期: 1997-06-13

2 混合透镜消色差光焦度分配公式

1988年,罗彻斯特光学研究院的 Stone 和 George 较系统地进行了折衍混合透镜消色差的研究^[6],给出了衍射光学透镜对 d 光($0.5876 \mu\text{m}$)的等效阿贝数:

$$V_d^B = \lambda_d / (\lambda_1 - \lambda_2) \quad (1)$$

上式中,若 $\lambda_1 = \lambda_F = 0.4861 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = \lambda_C = 0.6563 \mu\text{m}$, $\lambda_d = 0.5876 \mu\text{m}$, 则 $V_d^B = -3.452$ 。

他们还沿袭了传统折射系统消色差的方法,代入衍射光学透镜的阿贝数得到了著名的实现混合透镜消色差的光焦度分配公式:

$$f'_{\text{dif}} = f' \left(\frac{V_{\text{dif}} - V_{\text{ref}}}{V_{\text{dif}}} \right), \quad f'_{\text{ref}} = f' \left(\frac{V_{\text{ref}} - V_{\text{dif}}}{V_{\text{ref}}} \right) \quad (2)$$

其中 f' 为混合透镜在 λ_d 的合成焦距, f'_{dif} 和 f'_{ref} 分别为衍射透镜和折射透镜的焦距。设 f'_{dif} 和 f'_{ref} 分别为对应衍射、折射元件的等效阿贝数。

3 光焦度分配公式的改进

大孔径小视场的系统由于具有较大的球差和位置色差,其与视场有关的像差几乎可以忽略,因此设计这种系统的主要问题是校正色差和轴上点球差。

设旋转对称的衍射光学透镜的半径为 ρ , 其相位函数为:

$$\Phi(\rho) = 2\pi(A_1\rho^2 + A_2\rho^4 + A_3\rho^6 + \dots) \quad (3)$$

系数 A_1 决定衍射光学透镜的光焦度,对于设计波长为 λ_d 的衍射光学透镜,当照明波长为 λ 时光焦度为

$$\phi = -2m \frac{\lambda}{\lambda_d} A_1 \quad (4)$$

式中 m 为衍射级次,一般 $m = 1$; 因而系数 A_1 可用于校正系统的位置色差; 其他各项系数 A_2 、 A_3 、 \dots 则用于单色像差的校正; 在小视场大孔径系统中 A_2 主要用于消球差,利用下式可计算混合单透镜的 λ 色光的总球差系数^[7]:

$$\Sigma S_I = S_I + S_{I,\text{dif}} \approx \frac{y^4 \phi_{\text{ref}}}{4} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 + \frac{n-2}{n(n-1)^2} - \frac{4(n+1)}{n(n-1)} + \frac{3n+2}{n} \right] - 8m\lambda A_2 y^4$$

式中 y 为光线与透镜的交高。若系统要求消球差,则应有 $\Sigma S_I = S_I + S_{I,\text{dif}} = 0$, 即:

$$\frac{y^4 \phi_{\text{ref}}}{4} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 + \frac{n+2}{n(n-1)^2} - \frac{4(n+1)}{n(n-1)} + \frac{3n+2}{n} \right] - 8m\lambda A_2 y^4 = 0 \quad (5)$$

从(5)式可得到校球差的衍射光学透镜的相位函数的四次项系数 A_2 的值。

在 F-C 波段,若设计焦距为 f' 的折衍混合消色差器件,折射透镜材料选为 K9 玻璃,其阿贝数为 64.0, 根据(2)式进行光焦分配可得:

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

这样的光焦度分配使混合单透镜只能校正位置色差。当利用衍射光学透镜的第二项系数 A_2 校正折射透镜 d 光的球差时,同时也产生了较大的色球差,这是因为衍射光学透镜具有与波长成正比的、大的反向色散。利用(7)式和(8)式可分别求出衍射光学透镜的 F 光($0.4861 \mu\text{m}$)、C 光($0.6563 \mu\text{m}$)的消球差贡献:

$$S_1^F = -8mA_2\lambda_F y^4, \quad S_1^C = -8mA_2\lambda_C y^4 \quad (7)$$

显然球差的色分布如下:

$$S_1^{F-C} = -8mA_2 \frac{\lambda_F - \lambda_C}{\lambda_d} \lambda_d y^4 = \frac{1}{V_d^B} (-8mA_2 \lambda_d y^4) = \frac{1}{V_d^B} S_1^d \quad (8)$$

设折射透镜的球差为 ΔL , 则由于校正球差, 衍射光学透镜产生的相应的色球差为:

$$\Delta L_{FC'} = \Delta L / V_d^B \quad (9)$$

可见, 色球差大小与衍射光学透镜所校正差的大小成正比, 与其阿贝数成反比, 且与由光焦度产生的色差方向相反。由图 1 所示的三种色光的弧矢横向像差 DS_s 和子午横向像差 DT_t 的像差曲线即可看出这一点: 在图 1(a) 中, 衍射面仅用来消色差, 故无色球差产生, 但是存在很大的球差; 图 1(b) 是用衍射面同时消色差和球差的结果, 因而出现了较大的色球差, 但是单色像差大大减小。

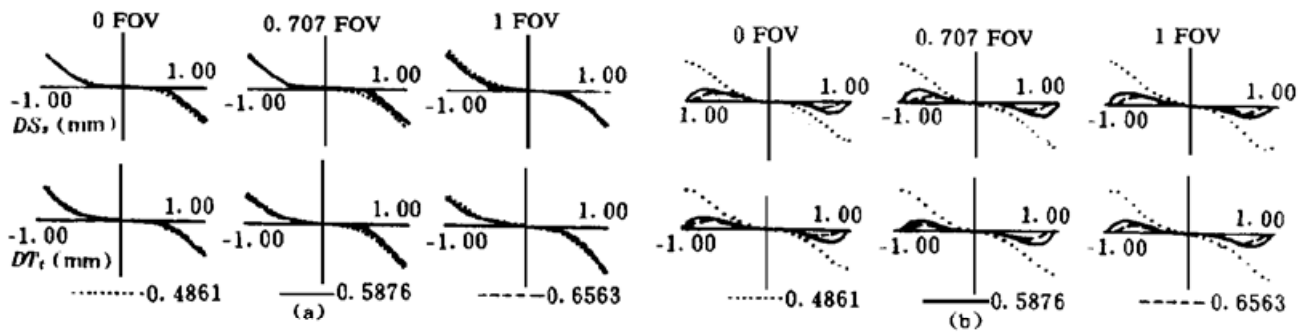


Fig. 1 Comparison of sagittal and tangential transverse aberrations for configurations of (a) and (b).

(a) $A_2 = 0$ (maximum is 1.1053), (b) $A_2 \neq 0$ (maximum is 0.3226)

为了校正色球差, 在光焦度分配时必须保留一定的色差值, 以抵消(9)式所表示的球差色分布。即光焦度的分配应满足下述条件^[8]:

$$\phi_{\text{dif}}/v_{\text{dif}} + \phi_{\text{ref}}/v_{\text{ref}} = \Delta L_{FC'}/l'^2, \quad \phi_{\text{dif}} + \phi_{\text{ref}} = \phi \quad (10)$$

当物体在无穷远时, $l' = f'$, 由上述可解得改进后消色差光焦度分配公式:

$$\begin{cases} \phi_{\text{dif}} = \left[\frac{V_{\text{dif}}}{V_{\text{dif}} - V_{\text{ref}}} - \frac{V_{\text{ref}}}{V_{\text{dif}} - V_{\text{ref}}} \left(\frac{\Delta L}{f'} \right) \right] \phi \\ \phi_{\text{ref}} = - \left[\frac{V_{\text{ref}}}{V_{\text{dif}} - V_{\text{ref}}} - \frac{V_{\text{ref}}}{V_{\text{dif}} - V_{\text{ref}}} \left(\frac{\Delta L}{f'} \right) \right] \phi \end{cases} \quad (11)$$

由于 $\frac{V_{\text{ref}}}{V_{\text{dif}} - V_{\text{ref}}} = -0.9488$, 且对于平凸折射透镜, 在无穷远处成像, 弯曲系数 $B = 1$, 共轭系数 $C = -1$, 一般 K9 玻璃 $n = 1.5163$, 可得:

$$S_1 = \frac{y^4 \phi}{4} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 + \frac{n+2}{n(n-1)} B^2 + \frac{4(n+1)}{n(n-1)} BC + \frac{3n+2}{n} C^2 \right] = 2.20y^4 \phi$$

$$\frac{\Delta L}{f'} \approx - \frac{1}{2nu^2 f'} S_1 \approx 1.1 \left(\frac{y}{f'} \right)^2 \quad (12)$$

将上结果代入(11)式, 可得消色差光焦度分配近似公式:

$$\begin{cases} \phi_{\text{dif}} \approx \left[V_{\text{dif}} / (V_{\text{dif}} - V_{\text{ref}}) + (y/f')^2 \right] \phi \\ \phi_{\text{ref}} \approx - \left[V_{\text{ref}} / (V_{\text{dif}} - V_{\text{ref}}) + (y/f')^2 \right] \phi \end{cases} \quad (13)$$

可见, 改进公式加大了衍射面的光焦度, 过度校正位置色差以抵消球差的色分布。

4 实例分析

4.1 设计一混合单透镜

焦距为 96.0 mm, 主设计波长: 0.58930 μm; 消色差波长: λ_F = 0.48610 μm 和 λ_C = 0.65630 μm; 入瞳直径为 40 mm, 密接于第一面; 半视场角 ω = 2.5°。系统结构如表 1 所示。

Table 1. Lens prescription data for hybrid singlet objective

surface	radius/mm	thickness/mm	glass	aperture/mm
1	51.7900	15.0	K9	40.00
2 ^D	∞		K9	40.00

由于折射器件所具有的球差约为 3 mm, 对边缘孔径消色球差, 由(8)式求得的光焦度分配为:

$$\phi_{dif} = 0.0944\phi, \quad \phi_{ref} = 0.9056\phi \tag{14}$$

由(6)式和(14)式分别求得衍射光学透镜的相位函数系数为各为 A₁, A₁^{*}:

$$A_1 = -\phi_{dif}/2 = -2.77 \times 10^{-4}; \quad A_1^* = -4.92 \times 10^{-4};$$

图 2(a) 和图 2(b) 分别表示衍射光学透镜不用于校正球差 (A₂ = 0), 和用于校正球差 (A₂ ≠ 0), 由(5)式求出在两种不同情况下, A₁ 值与不同色光的边缘光线的横向像差的关系曲线。从 2(a) 中可以看出, 当衍射光学透镜不用来校正球差的情况下, 修改前的折衍混合透镜的光焦度分配公式很好地实现了消色差。而当衍射光学透镜同时用于校正位置色差和球差(如曲线 2(b) 所示)时, 修改后的光焦度分配公式可获得较优的初始解。

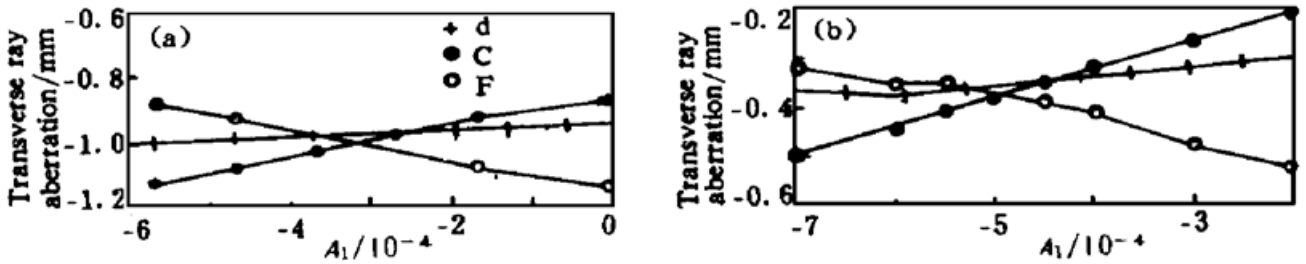


Fig. 2 The relationship between the value A₁ and the transverse aberration of three wavelengths. (a) A₂ = 0, (b) A₂ ≠ 0

图 3 示出了分别在 A₁ 和 A₁^{*} 取值下, 混合单透镜横向像差与 A₂ 间的关系。A₁ 系数确定了一定单色像差下色差的大小, 即确定了各种单色像差曲线相交点的位置。显然, 在改进前的光焦度分配下, 三种单色像差变化线在较大的像差处相交。由(5)式确定 A₂ 处单色横向像差和色差均较大; 且无论如何调整 A₂ 的取值, 都不可能得到单色像差和色球差均较小的结

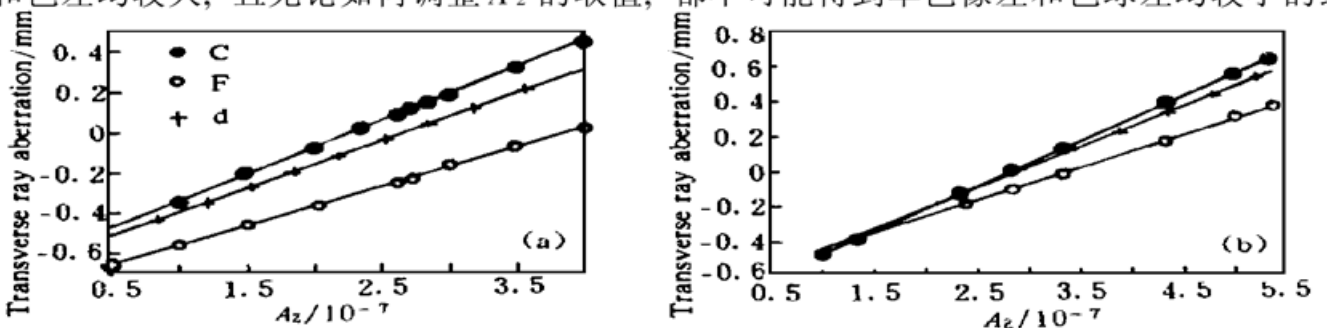


Fig. 3 The relationship of the value of A₁ and the transverse aberrations of three wavelengths. (a) A₁ = -2.7668 × 10⁻⁴, (b) A₁ = -5.02 × 10⁻⁴

果。而光焦度公式改进后, 在(5)式确定的 A_2 值附近的单色像差和位置色差、二级光谱均较小, 得到的初始结构(衍射光学透镜面相位系数取值 $A_1 = -4.94 \times 10^{-4}$, $A_2 = 1.34 \times 10^{-7}$)的像差如图4所示。

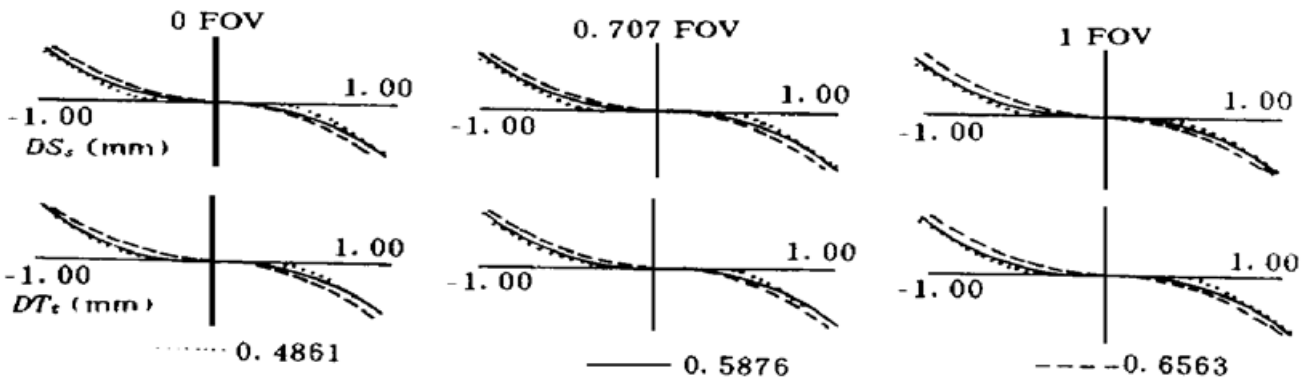


Fig. 4 Sagittal and tangential transverse aberration for the original hybrid singlet (maximum is 0.4757)

4.2 设计一混合单透镜代替一双胶合望远物镜^[9]

焦距为 35.02 mm, F 数为 2.5, 视场为 9° , 分别按改进前、后光焦度分配公式设计初始结构如表 2 所列(带*号为改进后公式的设计值)。图 5 为这两种初始结构的像差曲线比较, 可见由改进后公式可以得到更好的初始结构, 具有更小的初始色球差和二级光谱和相当的单色像差, 便于进一步的优化设计。

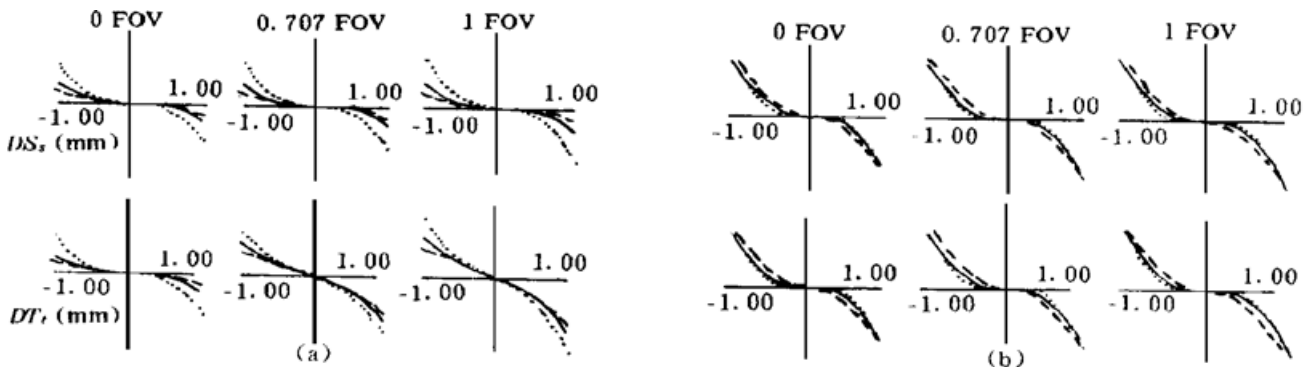


Fig. 5 Comparison of sagittal and tangential transverse aberrations for configurations designed by (a) The former formula for division of power (maximum is 0.2111) and (b) The revised formula (maximum is 0.2260)

Table 2. Lens prescription data for hybrid singlet objective

surface	radius/mm		thickness/mm	glass	aperture/mm
1	19.02	19.858*	1.5	K9	14.00
2 ^D	∞			K9	14.00

^DDiffractive lens phase coefficients: $A_1 = -1.286 \times 10^{-4}$, $A_1^* = -6.43 \times 10^{-4}$, $A_2 = A_2^* = 4.5 \times 10^{-6}$

结 论 本文提出大孔径小视场折衍混合单透镜设计中, 衍射光学透镜同时校球差和色差时, 折衍器件间光焦度分配应进行改进, 过校正位置色差以降低色球差, 才能够校正球差的色分布, 得到较好的初始解, 从而有利于优化到较好结果。文中提出改进公式并通过两个计算实例表明通过改进公式可以得到较好的初始解, 证明对公式的改进是很有效的。

感谢中国航天工业总公司空间技术研究所给予的支持。

参 考 文 献

- [1] A. Tudorovskii, An objective with a phase plate. *Opt. & Spectrosc.*, 1959, **6**(2) : 126~ 133
- [2] G. I. Swanson, W. B. Veldkamp, Infrared applications of diffractive optical elements. *Proc. SPIE*, 1988, **885** : 22
- [3] W. C. Sweatt, Describing holographic and optical elements as lenses. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67** (11) : 803~ 808
- [4] W. A. Kleinhans, Aberrations of curved zone plates and fresnel lenses. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(6) : 1701~ 1704
- [5] A. P. Wood, Design of infrad hybrid refractive-diffractive lenses. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(13) : 2253~ 2258
- [6] T. Stone, N. George, Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14) : 2962~ 2966
- [7] D. A. Buralli, G. M. Morris, Design of a wide field diffractive landscape lens. *Appl. Opt.*, 1989, **28** (18) : 3952~ 3956
- [8] 张以谟主编, 应用光学, 北京, 机械工业出版社, 1982 : 246
- [9] 李士贤, 郑乐年编, 光学设计手册. 北京, 北京理工大学出版社, 1990 : 224

Spherochromatism Correction of a Hybrid Refractive-Diffractive Singlet

Zhao Liping Wu Minxian Jin Guofan Yan Yingbai
(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)
(Received 28 April 1997; revised 13 June 1997)

Abstract An improved formula for division of optical power in an achromatic hybrid refractive-diffractive singlet with small field of view is presented as the diffractive optical element (DOE) is used to correct both axial chromatic and spherical aberrations. The examples show that using the revised formula one can get a better original configuration without the significant level of spherichromatism aberration introduced by the aspheric term of DOE for correcting the spherical aberration. The correctness and effectiveness of the formula have been proven. This formula is also useful in designing other hybrid optical systems.

Key words hybrid diffractive-refractive singlet, the diffractive optical elements (DOE), spherochromatism.