

混合复消色差透镜组的设计原理*

崔庆丰 匡裕光

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘 要 通过对混合复消色差透镜组的像差分析导出了其结构参数的求解方程。根据计算机模拟结果发现, 二元光学元件以正透镜为基底和以负透镜为基底时单色像差状况大体相当, 但以正透镜为基底时色球差要小得多。

关键词 二元光学, 光学设计, 像差。

1 引 言

在过去的文献里^[1,2], 作者提出了将二元光学元件和传统的折射元件组合起来, 实现混合复消色差的问题, 讨论了构成原理和光焦度解的求法并给出了相应的结构。本文将基于对这种混合复消色差透镜组的像差分析, 进一步讨论它的光学设计原理, 给出透镜组结构参数的求解方程, 通过对计算机模拟结果比较指出合理的结构。

2 混合复消色差透镜组的求解方程

2.1 复消色差方程

对于具有旋转对称性的二元光学元件, 其位相函数可用下式描述:

$$\phi(y) = 2\pi(A_1y^2 + A_2y^4 + \dots) \quad (1)$$

式中 y 为二元光学元件的径向坐标, 二次项为光焦度项。根据傅里叶光学的讨论^[3], 它的光焦度为 $K_B = -2pA_1\lambda_R$, p 为衍射级次, λ_R 为参考波长。二元光学元件可等效为一种具有特殊色散性质的光学材料, 其阿贝数 V_B 和相对部分色散 P_B 分别为 $V_B = \lambda_R/(\lambda_S - \lambda_L)$, $P_B = (\lambda_S - \lambda_R)/(\lambda_S - \lambda_L)$, λ_S 和 λ_L 分别为短波和长波波长。例如当取参考波长为 D 谱线, 消色差波长为 C 、 F 谱线时, 有 $V_B = -3.46$, $P_B = 0.6063$, 则可以采用混合三元件结构, 即两个折射元件和一个二元光学元件的结构来校正二级光谱。当满足下面的关系时, 这种混合结构就能够校正二级光谱, 使三个波长的近轴像点校正重合。

$$\left. \begin{aligned} K_1 + K_2 + K_B = K, & \quad K_1/V_1 + K_2/V_2 + K_B/V_B = 0, \\ K_1P_1/V_1 + K_2P_2/V_2 + K_BP_B/V_B = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

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

* 国家自然科学基金、应用光学国家重点实验室基金和中国科学院长春分院择优支持基金资助课题。

收稿日期: 1994年3月13日; 收到修改稿日期: 1994年9月15日

了总光焦度 K , 选定了两个折射元件的材料以后, 就可以从 (2) 式的联立方程组解出三个元件的光焦度 K_1 、 K_2 和 K_3 。

混合三元件结构是能够实现混合复消色差的最简单结构。它的结构示意图见图 1, 平面为二元光学元件。

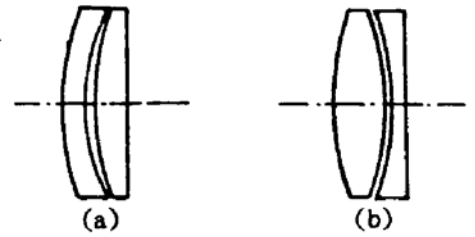


Fig. 1 Section drawing of the hybrid apochromats with a binary optical element placed on the plane

2.2 赛得像差方程

混合复消色差透镜组除了要满足复消色差要求以外, 还应根据使用情况满足一定的单色像差要求。对于复消色差透镜组来说, 满足球差的要求应该是基本的。当透镜组有一定的成像范围时也必须能够满足彗差的要求。由 (1) 式显见, 在任何情形下, 混合复消色差透镜组都有能力校正球差, 但校正彗差的要求却并不总是能够满足的。由于二元光学元件的平面性质, 当两个折射元件胶合或光胶在一起时, 彗差就不能校正; 当两个折射元件分离开, 其中一个折射元件可自由弯曲时, 彗差就可以校正。在后一种情形下, 称为二元光学元件提供基底的透镜为基底透镜, 可自由弯曲的透镜为可弯曲透镜。为了得到能够满足一定像差要求的透镜组的结构参数, 需要导出混合复消色差透镜组的像差方程。

设一个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 和 u' , 以 B 表示该透镜的弯曲参量, 以 C 表示共轭参量, 并令

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

当光阑与透镜重合时, 可弯曲薄透镜的赛得像差可表示为^[4]

$$\left. \begin{aligned} S_I &= \frac{y^4 K^3}{4} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 + \frac{n+2}{n} B^2 + \frac{4(n+1)}{n} B C + \frac{3n+2}{n} C^2 \right], \\ S_{II} &= -\frac{y^2 K^2 H}{2} \left(\frac{n+1}{n} B + \frac{2n+1}{n} C \right), \\ S_{III} &= H^2 K, \quad S_{IV} = \frac{H^2 K}{n}, \quad S_V = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 y 为光瞳半径, n 为透镜折射率, H 为拉氏不变量。当这个薄透镜的一个表面被限制为平面时, 它的弯曲参量为 $B = \pm 1/(n-1)$, 其中加号对应后表面为平面的情形, 减号对应前表面为平面的情形。将 $B = \pm 1/(n-1)$ 代入 (4) 式得基底透镜的赛得像差为

$$\left. \begin{aligned} S_I &= \frac{y^4 K^3}{4} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 + \frac{n+2}{n(n-1)^2} \pm \frac{4(n+1)}{n(n-1)} C + \frac{3n+2}{n} C^2 \right], \\ S_{II} &= -\frac{y^2 K^2 H}{2} \left[\pm \frac{n+1}{n(n-1)} + \frac{2n+1}{n} C \right], \\ S_{III} &= H^2 K, \quad S_{IV} = \frac{H^2 K}{n}, \quad S_V = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

关于具有衍射结构的光学元件的像差, 一些作者^[5~8]已做过讨论。根据 Sweatt 的高折射率模型, 在数学上, 一个衍射光学元件可用一个具有极高折射率的无限薄透镜来表示, 衍射光学元件的像差可由对薄透镜的像差表达式取 $n \rightarrow \infty$ 时的极限来得到。对于二元光学元件, 由于它固有的平面性质, 基底曲率 $C_s = 0$, 因此其弯曲参量 $B = 0$ 。将 $B = 0$ 代入 (4) 式, 取 $n \rightarrow \infty$ 时的极限并加入 (1) 式中初级像差项, 即 y^4 项的作用, 就得到了二元光学元件的赛得像差:

$$\left. \begin{aligned} S_I &= \frac{y^4 K^3}{4} (1 + 3C^2) - 8\lambda\rho A_2 y^4, \\ S_I &= -y^2 K^2 H C, \quad S_{\mathbf{I}} = H^2 K, \quad S_N = 0, \quad S_V = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

混合复消色差透镜组的赛得像差为该透镜组中各元件的赛得像差之和。将可弯曲透镜、基底透镜和二元光学元件的赛得像差分别注以下标 1、2 和 3, 以 K_1 、 n_1 、 B_{11} 、 C_{11} 和 K_2 、 n_2 、 C_{12} 表示上述两个折射元件的各对应量, 以 K_B 和 C_B 表示二元光学元件的对应量, 则混合薄透镜组总的赛得像差可写为

$$\left. \begin{aligned} S_I &= \sum_{i=1}^3 S_{Ii} = \frac{y^4}{4} \left\{ K_1^3 \left[\left(\frac{n_1}{n_1 - 1} \right)^2 + \frac{n_1 + 2}{n_1} B_{11}^2 + \frac{4(n_1 + 1)}{n_1} B_{11} C_{11} + \frac{3n_1 + 2}{n_1} C_{11}^2 \right] \right. \\ &\quad \left. + K_2^3 \left[\left(\frac{n_2}{n_2 - 1} \right)^2 + \frac{n_2 + 2}{n_2(n_2 - 1)^2} \pm \frac{4(n_2 + 1)}{n_2(n_2 - 1)} C_{12} + \frac{3n_2 + 2}{n_2} C_{12}^2 \right] \right. \\ &\quad \left. + K_B^3 (1 + 3C_B^2) - 32\rho\lambda A_2 \right\} \\ S_I &= \sum_{i=1}^3 S_{Ii} = -y^2 H \left\{ \frac{K_1^2}{2} \left(\frac{n_1 + 1}{n_1} B_{11} + \frac{2n_1 + 1}{n_1} C_{11} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{K_2^2}{2} \left[\pm \frac{n_2 + 1}{n_2(n_2 - 1)} + \frac{2n_2 + 1}{n_2} C_{12} \right] + K_B^2 C_B \right\} \\ S_{\mathbf{I}} &= \sum_{i=1}^3 S_{\mathbf{I}i} = H^2 (K_1 + K_2 + K_B) = H^2 K \\ S_N &= \sum_{i=1}^3 S_{Ni} = H^2 \left(\frac{K_1}{n_1} + \frac{K_2}{n_2} \right) \\ S_V &= \sum_{i=1}^3 S_{Vi} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

公式(4)、(5)、(6)和(7)所述像差都是指光栏与透镜重合时的情形。光栏远离透镜组时的像差可由光栏移动效应公式而得到。

3 两种结构的比较

应用上节给出的复消色差方程(2)式和赛得像差方程(7)式可以在给定的条件下解出混合复消色差透镜组的薄透镜结构参数, 作为光学设计的初始解。从(7)式可见, 对于图 1(a)和图 1(b)所示的两种混合复消色差透镜组, 除了能满足复消色差要求以外, 还可以满足两种单色像差, 即球差和彗差的要求。而且对给定的光学材料, 在满足这些要求的情况下所得到的解是唯一的。现在的问题是, 图 1(a)和图 1(b)所示的两种结构哪一个更优越一些? 本文将通过对两种结构各自唯一解的计算机模拟结果的比较来得出结论。

首先, 将两种结构都规划在相同的条件。假设这两种结构都作为望远物镜来使用, 要求消除球差、彗差和复消色差。令焦距 $f' = 1000$ mm, 相对孔径 $D/f' = 1/10$, 视场角 $2\omega = 2^\circ$, 工作波段从 435.8 nm(g 谱线)到 656.3 nm(c 谱线)。参考波长为 546.1 nm(e 谱线)。两个透镜的材料正透镜选用 K_9 , 负透镜选为 F_2 玻璃, 这是冕类和火石类玻璃中最普通、最廉价、最容易达到较高的光学指标且工艺性和理化性能最好的两种玻璃。对于二元光学元件, 考虑利用它的一级衍射光。

用(2)式和(7)式对图 1(a)和(b)的两种结构分别求解。为方便起见, 以下分别称图 1的(a)和(b)两种结构为 NPB 结构和 PNB 结构。解出的结构参数见表 1。由于按薄透镜考虑, 透镜厚度与间隔设为零。

Table 1. Configuration parameters of the two apochromats solved

	r_1	r_2	r_3	r_4	A_1	A_2
NPB	437.81	260.60	266.58	0	-1.2799E-02	-6.7958E-08
PNB	518.41	-548.79	-643.80	0	-1.2799E-02	1.0315E-06

用光学设计软件 CODEV 对这两种结构进行了模拟, 图 2 是两种结构的垂轴像差曲线。请注意, 图 2(a)和(b)两组像差曲线图中纵坐标比例尺相差四倍。

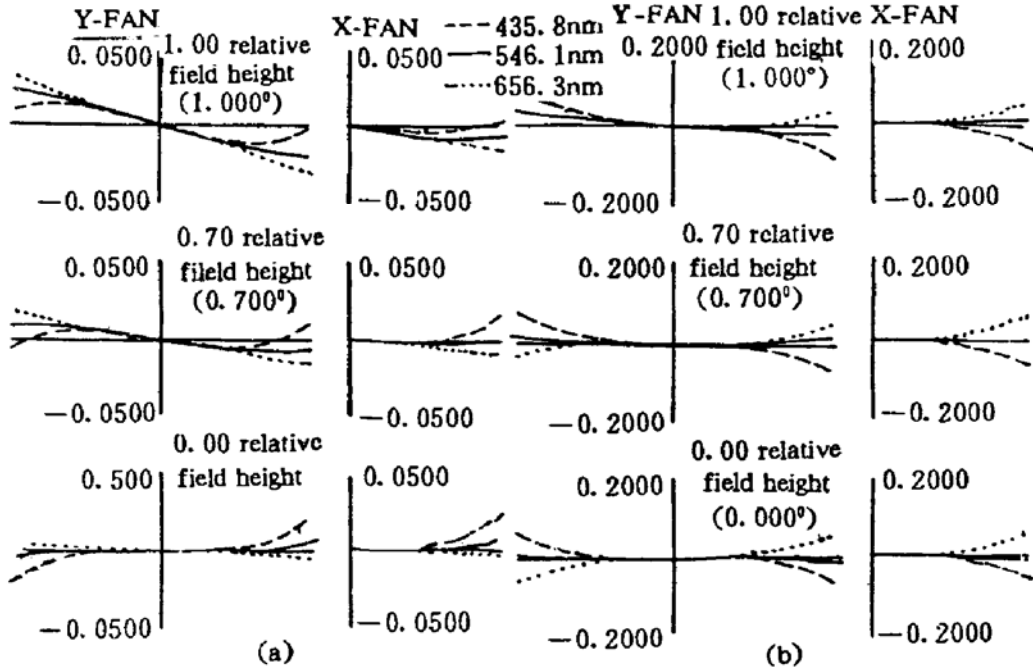


Fig. 2 Transverse ray aberration plot of the two apochromats for (a) the NPB configuration and, (b) the PNB configuration

由垂轴像差曲线可见: 1) 球差和彗差已得到了校正; 2) 由于二级光谱已得到了校正^[1], 图中所显示的色差系色球差所为, PNB 结构的色球差较大, 大约是 NPB 结构色球差的四倍。两种结构的单色像差大体相当, PNB 结构的色球差却大得多, 将对成像质量产生严重影响。因此作为一个望远物镜, 以采用 NPB 结构为宜。

将由(2)式和(7)式所解出的薄透镜加以适当的厚度, 再稍加平衡, 即可得到所要求的设计结果。

结 论 通过像差分析而导出的像差方程可用于求解混合复消色差透镜组的结构参数。在三级像差范围内, 结构参数的解是准确的。对用求解方程所获得的两种结构初始解的模拟结果表明, 两种结构的单色像差大体相当, 但当二元光学元件以正透镜作为基底透镜时色球差要小得多。作为望远物镜使用时宜采用二元光学元件以正透镜为基底的结构。

作者感谢中国科学院长春光学精密机械研究所史光辉研究员的有益讨论。

参 考 文 献

- [1] 崔庆丰, 用二元光学元件实现复消色差. 光学学报, 1994, 14(8): 877~881
- [2] 崔庆丰, 混合复消色差光学系统. 中国专利 ZL93218766.8
- [3] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics.*, New York, McGraw-Hill, 1968: 77~83
- [4] W. T. Welford, *Aberrations of Optical Systems.* Bristol, Adan Hilger, 1986: 226~234
- [5] W. C. Sweatt, Describing holographic optical elements as lenses. *J. O. S. A.*, 1977, 67(6): 803~808
- [6] W. C. Sweatt, *Mathematical equivalence between a holographic optical element and an ultra-high index lens.* *J. O. S. A.*, 1979, 69(3): 486~487
- [7] W. A. Kleinmans, Aberrations of curved zone plates and Fresnel lenses. *Appl. Opt.*, 1977, 16(6): 1701~1704
- [8] D. A. Buralli, G. M. Morris, Design of diffractive singlets for monochromatic imaging. *Appl. Opt.*, 1991, 30(16): 2151~2158

Design Principles of the Hybrid Apochromats

Cui Qingfeng Kuang Yuguang

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Changchun 130022)

(Received 13 March 1994; revised 15 September 1994)

Abstract The equations for solving the configuration parameters of hybrid apochromats are derived by Seidel aberration analysis. Computer simulation shows that there is little difference between the two simplest hybrid apochromats with a binary optical element placed on the positive lens and negative lens in terms of the monochromatic aberrations. However the spherochromatism of the configuration with a binary optical element placed on the positive lens is much smaller than that of the other.

Key words binary optics, optical design, aberrations.