

文章编号:1002-2082(2011)02-0195-05

紫外-可见宽光谱显微成像光学系统的设计

陈 姣,焦明印,常伟军,康文莉

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘 要:介绍一个紫外-可见宽光谱显微物镜的设计过程。通过改进的 PW 法求解初始结构参数,确定采用两个分离的正负透镜组组成透射式光学系统,根据光学材料的色散特性,选取正透镜材料为 CaF_2 ,负透镜材料为熔石英,通过建立复消色差方程组来分配双分离透镜的光焦度,合理地两组透镜的偏角进行分配。运用 CODE-V 光学设计软件对系统进行优化,使系统的位置色差和二级光谱同时得到校正,实现了复消色差。仿真结果表明:系统在整个视场范围内,点列图弥散圆 RMS 半径值小于 5,最大视场处的像散为 0.058,畸变为 0.04%。

关键词:宽光谱;紫外-可见显微物镜;复消色差;PW 法

中图分类号:TN942.2; TH703

文献标志码:A

Optical design of microscopic imaging system for ultraviolet-visible wide spectrum

CHEN Jiao, JIAO Ming-yin, CHANG Wei-jun, KANG Wen-li

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Design of a wide spectrum ultraviolet-visible microscope objective was introduced. According to the dispersive properties of ultraviolet (UV) optical materials, was selected as positive lens material, apochromatic equations for distributing the optical power of each lens in double-dialyte lens were established, and appropriate deviation angles were assigned for two groups. Based on theoretical calculation with PW method and optimization with CODE-V, the longitudinal chromatic aberration and secondary spectrum were corrected, and apochromatism was achieved. Simulation results show that the radius RMS of spot diagram dispersion circle is less than 5 in the entire field of view, astigmatism is 0.058 and distortion is 0.04% at the maximum field of view for this system.

Key words: wide spectrum; UV-visible microscope objective; apochromatism; PW method

引言

紫外-可见光学系统在空间科技、生物医学、公安侦察、医疗诊断、数据存储等领域有着广泛的应用,尤其在空间探测中,需要探测的波段有一定宽度,因而必须对光学系统的色差进行校正,以使系统有良好的光学性能,校正光学系统色差的重要手段之一就是利用光学材料的不同色散性能进行合理的光焦度分配。光学玻璃材料大多不能在紫外波段完全透射,因此首先要选取合适的紫外波

段透射材料,还要考虑材料的复消色差特性。PW 法常用于可见光学系统的初始结构求解,设计中根据所选的材料,通过改进 PW 法用于紫外-可见显微物镜的初始结构求解。

1 设计过程

根据技术要求,需设计紫外-可见显微物镜的放大倍率为 $4\times$,物方数值孔径 $\text{NA}=0.1$,光学系统分辨率 $<5\text{ }\mu\text{m}$,物镜的视场范围 $>4\text{ mm}$,消色

收稿日期:2010-09-06; 修回日期:2010-11-16

作者简介:陈姣(1986—),女,陕西蒲城人,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究工作。

差范围在 300 nm~643 nm, 焦距 $f=100$ mm。选用的初始结构为 2 个分离的透镜组, 其中, 每个透镜组均是由双分离的正负透镜组成, 且正透镜材料是 CaF_2 , 负透镜材料是熔石英。

1.1 初始结构的选择及求解

该光学系统是一个小视场的系统, 光学方案采用透射式光学系统。一般显微物镜只要求校正轴上像差, 并不要求校正轴外像差, 本设计中该显微系统是在紫外-可见宽光谱范围内成像, 且视场范围需大于 4 mm, 不仅要求校正球差、彗差、色差还要着重消色球差, 此外还应适当考虑像散、场曲等。采用一个双分离透镜组已不能满足要求, 因此选择 2 个双分离透镜组作为初始结构。为了使问题简化, 在显微物镜设计中按反向光路计算, 将 2 个远处透镜组看作薄透镜组, 并且假定物平面位于无限, 该紫外-可见显微物镜的初始结构示意图如图 1 所示。

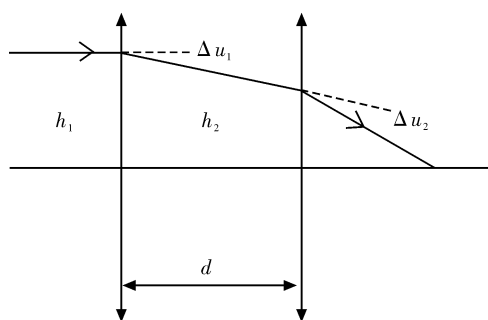


图 1 物镜的初始结构

Fig. 1 Preliminary structure of the objective

图 1 中, 2 个透镜组的光焦度分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 , 第一辅助光线在第一透镜组的入射高度为 h_1 , 在第二个透镜组上的入射高度为 h_2 , 在 2 个透镜组上的偏角分别为 Δu_1 和 Δu_2 。透镜组之间的间隔为 d 。

在下列规范化条件下进行初始结构的求解:

$$h=f'=J=1 \quad (1)$$

式中: h 和 f' 分别为光学系统在规划条件下的光线入射高度和焦距; J 为拉格朗日不变量。

在上述规范化条件下, 第一辅助光线通过系统的总偏角 $\Delta u=1$ 。由于第二透镜组的入射高 h_2 比 h_1 要小, 同时第二透镜组对应的物距在有限距离, u_2 为正, 因此它对应的球差极小值比 $u_1=0$ 的情形小, 所以让第二个透镜组的偏角比第一个透镜组多负担一些。设定两透镜组的偏角分别为

$$\Delta u_1=0.45, \Delta u_2=0.55 \quad (2)$$

设定规范化后的透镜组间隔 $d=1.0$ 。通过高斯公式计算得到系统的全部外部参数如下:

$$f'_1=2.22; f'_2=1;$$

$$h_1=1.0; h_2=0.55; h_{p1}=0; h_{p2}=1.0; J=1$$

利用上面已经求得的外部参数, 根据校正球差、彗差和像散的要求, 即可列出相应的初级像差方程式如下:

$$S_I = \sum hP = P_1 + 0.55P_2 = 0 \quad (3)$$

$$S_{II} = \sum h_p P - J \sum W = P_2 - (W_1 + W_2) = 0 \quad (4)$$

$$S_{III} = \sum \frac{h_p^2}{h} P - 2J \sum \frac{h_p}{h} W + J^2 \sum \phi = \frac{1}{0.55} P_2 - \frac{2}{0.55} W_2 + 1.45 = 0 \quad (5)$$

$$\text{式中: } P = \sum_1^k \left[\frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \right]^2 \Delta \frac{u}{n}; W = \sum_1^k \left[\frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \right] \Delta \frac{u}{n}.$$

从以上方程组可以看出, 在偏角分配和空气间隔确定的情况下, 系统的消像散条件只和第二个透镜组的结构有关, 系统能够校正正像散则必须满足方程式(5)。

1.2 光学材料的选择

在紫外波段可以采用的紫外材料很少。普通光学玻璃透明区域一般在 350 nm~2400 nm 之间, 普通冕牌类玻璃在波长 300 nm, 厚度 5 mm 时的透过率一般在 0.4~0.6 之间, 当厚度为 25 mm 时其透过率降低至 0.01~0.1 之间, 而普通火石类玻璃在波长 300 nm 几乎是不透明, 因而在紫外波段普通光学玻璃难以用在透射光学系统中, 当波长短于 350 nm 时折射式光学系统的材料主要以透紫外的光学晶体材料为主。

紫外波段一般工程上多采用熔石英、氟化钙、氟化镁, 这几种材料的色散系数差别不大, 给色差校正带来了一定的困难。而消色差的基本原则是正透镜选用 ν 值大的材料, 负透镜选用 ν 值小的材料, 综合考虑材料的理化性能, 负透镜比较适宜的材料为熔石英, 正透镜可选用的材料有 CaF_2 和 MgF_2 。

1.3 光焦度分配及基本像差参量的计算

1.3.1 光焦度分配

传统方法是用 3 种玻璃组合来实现消除二级光谱, 本文中用两种玻璃组合 CaF_2 及熔石英来完全消除二级光谱。对于两种玻璃组合而成的密接薄透镜组, 当假设光线高度在各个透镜上的高度相等时, 根据已有的复消色差理论^[3], 设 φ_1 、 φ_2 、

v_1, v_2, p_1, p_2 分别代表 2 个透镜的光焦度、阿贝数和相对色散,可以得到透镜组校正位置色差所需满足的关系式为

$$\frac{\varphi_1}{v_1} + \frac{\varphi_2}{v_2} = 0 \quad (6)$$

校正二级光谱所需满足的关系式为

$$\frac{\varphi_1}{v_1} p_1 + \frac{\varphi_2}{v_2} p_2 = 0 \quad (7)$$

在规化条件下,贴合薄透镜组的总光焦度为 1,可得到光焦度所满足的关系式

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 1 \quad (8)$$

理论上只要选择 p 值相等 v 值不等的两种玻璃组合就可消除二级光谱。而 CaF_2 的相对色散 p_1 与熔石英的相对色散 p_2 基本相等,且二者的阿贝数 v_1 和 v_2 不等,因此进行合理的光焦度分配便可实现复消色差。

由(6)式、(7)式和(8)式便可得到透镜组的光焦度分配 $\varphi_1 = 3.44, \varphi_2 = -2.44$ 。

1.3.2 基本像差参量的计算

利用分配好的光焦度来进行基本像差参量的计算。由于氟化钙和熔石英的热膨胀系数差异较大,所以二者不易胶合,故该显微物镜中选用的初始结构为 2 个双分离的透镜组,其中,每个透镜组均由材料是 CaF_2 的正透镜和材料是熔石英的负透镜组成,且都满足复消色差的光焦度分配($\varphi_1 = 3.44, \varphi_2 = -2.44$)。对于双分离透镜,在求解初始结构时可以近似按双胶合透镜来求解,其中 n_1, n_2 分别为 CaF_2 和熔石英的折射率,由双胶合透镜的结构参数和基本像差参量的关系^[4]可知:

$$P_0 = C - \frac{B^2}{4A} \quad (9)$$

$$Q_0 = -\frac{B}{2A} \quad (10)$$

$$W_0 = \frac{A+1}{2} Q_0 - \frac{1-\varphi_1-B}{3} \quad (11)$$

式中: A, B, C 是与 n_1, n_2 及 φ_1, φ_2 有关的中间量。由(9)式、(10)式和(11)式可求得:

$$P_0 = -31.6, Q_0 = -9.67, W_0 = -0.061 \quad (12)$$

其中, P_0, Q_0, W_0 是基本像差参量。

1.4 透镜组结构参数的确定

如前所述,系统能够校正像散则必须满足方程式(5)。下面结合薄透镜的初级像差公式来确定透镜组的结构参数。

在第一、二组透镜材料选定的情况下,基本像差参量 P_0, Q_0, W_0 如(12)式所示。对方程式(5)

中的 P_2 和 W_2 用规化后的 $\bar{P}_2^\infty$ 和 $\bar{W}_2^\infty$ 替代,并利用 $\bar{P}_2^\infty$ 和 $\bar{W}_2^\infty$ 之间的关系式:

$$\bar{P}_2^\infty = P_{02} + 0.85(\bar{W}_2^\infty - W_0)^2 \quad (13)$$

将其整理成一个关于 $\bar{W}_2^\infty$ 的二次方程,且其常数项包含 P_{02} ,根据有解条件可推出:

$$P_{02} \leq P_{02\max}$$

经验证,所选材料的 P_0 值满足上述消像散条件,随后计算出 $\bar{P}_2^\infty$ 和 $\bar{W}_2^\infty$,同时根据消色差条件可以计算出 $\bar{P}_1^\infty$ 和 $\bar{W}_1^\infty$ 。

然后,根据 PW 法可确定出第二透镜组的结构参数,使其满足物镜的消色差条件,然后计算出第一透镜组的结构参数,利用其产生相应的球差和彗差来补偿第一透镜组的球差和彗差,最后可以校正整个系统的球差、彗差和像散。最后根据前面求解出的外部参数 $f'_1 = 2.22, f'_2 = 1$ 计算出两组透镜的实际结构参数。

2 优化及设计结果

PW 法是假设系统的透镜为薄透镜,透镜厚度设为零,且在规化条件下,在进一步优化时应为每个透镜设定合适的厚度。同时,在实际设计中将物平面设在有限远,经过最终的优化,得到满足像质要求的结果,最终设计结果如图 3~图 7 所示。



图 2 优化后的光学系统结构

Fig. 2 Optical system layout after optimization

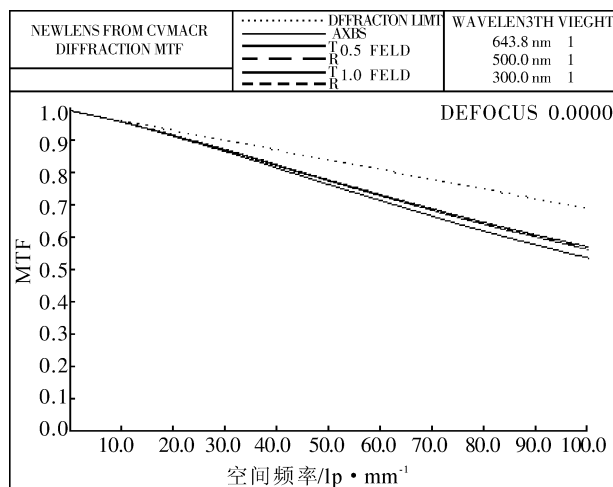


图 3 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves

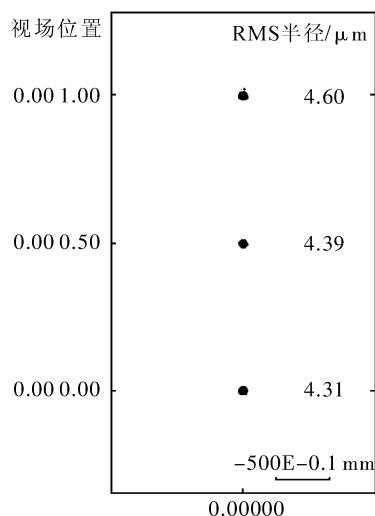


图 4 各个视场的弥散斑

Fig. 4 Spot diagram for different fields

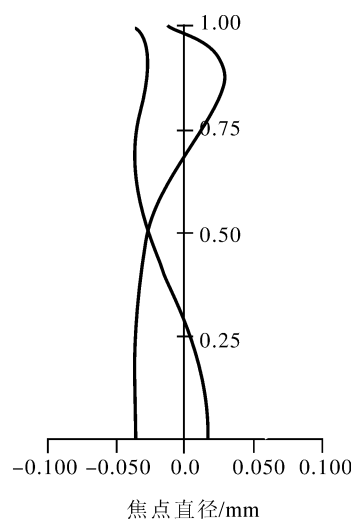


图 5 色球差曲线

Fig. 5 Spherochromatism curves

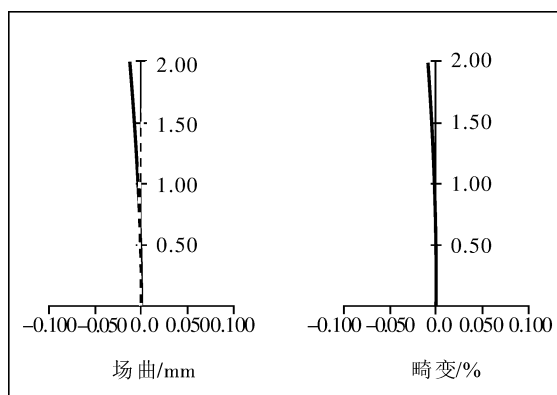


图 6 场曲曲线

Fig. 6 Field curvature

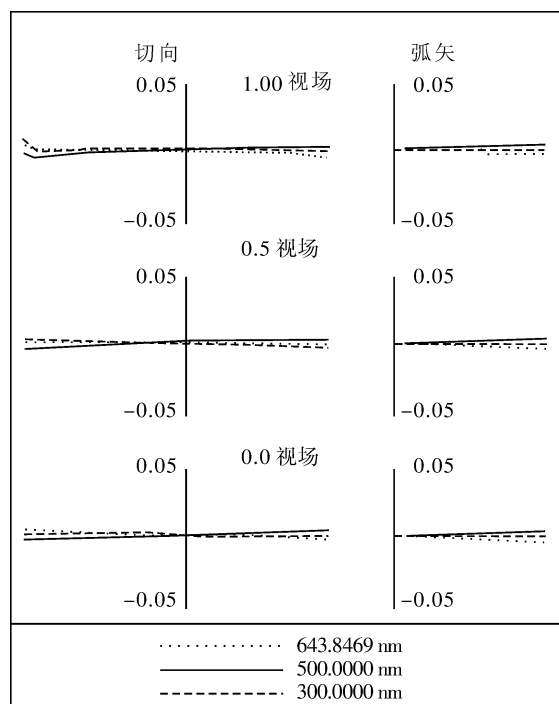


图 7 垂轴像差曲线

Fig. 7 Lateral Aberrations

由设计结果可以看出,在整个视场范围内,点列图弥散圆 RMS 半径值小于 $5 \mu\text{m}$,满足成像系统要求;传函接近衍射极限,成像质量满足设计要求。 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.643 \mu\text{m}$ 3 条谱线的二级光谱色差在公差范围内,实现了复消色差。并且最大视场处的像散为 0.058 ,畸变为 0.04% ,垂轴像差也得到很好的校正。因此可以看出,光学系统的像质优良,达到设计指标要求。

3 结束语

本文结合紫外光学材料 CaF_2 和熔石英的光学特性,通过建立复消色差方程组来进行光焦度分配,合理地对两组透镜进行偏角分配,并在此基础上,较好地利用了光学设计软件设计了一种紫外-可见显微物镜。设计过程中,结合分组设计理念,更加有目的和快速地达到理想的成像质量,并且很好地验证了设计理论的可行性。利用初级像差理论和 PW 法计算初始结构,对于紫外-可见显微物镜的设计具有一定的意义。

参考文献:

- [1] 袁旭沧. 光学系统设计[M]. 北京:科学出版社,1988.
YUAN Xu-cang. Optical system designing[M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)

-
- [2] 天津硅酸盐材料试验厂. 光学玻璃汇编[M]. 北京:机械工业出版社,1973.
Tianjin Silicate Experimental Industry Compiling. Optical glass compiling[M]. Beijing:China Machine Press,1973. (in Chinese)
- [3] R. 金斯莱克. 透镜设计基础[M]. 梁伟声译. 北京:机械工业出版社,1985.
KINGSLAKE R. Lens design fundamentals [M]. Translated by LIANG Wei-sheng. Beijing:China Machine Press,1985. (in Chinese)
- [4] 王之江. 光学技术手册:上册[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
WANG Zhi-jiang. Optical technology manual [M]. Beijing:China Machine Press,1987. (in Chinese)
- [5] 茹志兵,华珂. 一种宽光谱紫外镜头的设计[J]. 应用光学,2003,24(1):11-14.
RU Zhi-bing, HUA Ke. Design of a wide spectral UV lens[J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(1): 11-14. (in Chinese with an English abstract)