

# 二元光学透镜在长焦距宽谱段光学系统中的应用

梁士通<sup>1,2</sup>, 杨建峰<sup>1</sup>, 李湘眷<sup>1,2</sup>, 白 瑜<sup>1,2</sup>, 王洪伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**分析了二级光谱的成因以及消二级光谱的条件。介绍了二元光学器件的阿贝数和相对色散与普通光学玻璃的差别。并将二元光学面刻画在透镜的表面,在校正系统初级像差的同时,实现了系统的复消色差。该系统结构简单、质量轻,可用于小型长焦距望远系统中。

**关键词:**光学设计; 二级光谱; 长焦距; 二元光学

**中图分类号:** TB133      **文献标识码:** A

## Use of BOL in Long Focal-wide Bands Optical System

LIANG Shi-tong<sup>1,2</sup>, YANG Jian-feng<sup>1</sup>, LI Xiang-juan<sup>1,2</sup>, BAI Yu<sup>1,2</sup>, WANG Hong-wei<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The theory of secondary spectrum which exists in long focal-wide bands optical systems is introduced in this paper and the qualifications needed to eliminate are also analyzed. BOL devices and ordinary optical glass have different Abbe number and relative aberration. By chiseling a BOL on a surface of a lens, a apochromatic system is composed, which actualizes the system's apochromatism, as well as revising primary aberration. Experimental results show that the system is characteristic of simple structure and light weight and can be used in mini-long focal telescope systems.

**Key words:** optics design; secondary spectrum; long focal; BOL

### 1 引言

在航天用遥感或观测用光学成像相机中,一般都要求具有比较高的地表分辨率,也就是要求成像系统具有大的相对孔径,同时具有比较长的焦距。对于此类相机,应用比较多的是折反和反射系统,因为反射系统可以避免折射式光学系统产生的二级光谱,而二级光谱对于折射式光学系统是很难校正的。对于折射式光学系统二级光谱的研究,国内外已经有相当深入的探讨。比较常用的方法有利用特种玻璃消二级光谱,或利用二元光学透镜(binary optical lens, BOL)消二级光谱。本文将着重论述利用 BOL 消二级光谱的原理和具体应用。

### 2 复消色差的基本原理

#### 2.1 二级光谱

对于一光学系统,如其以对 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 两种色光校正了位置色差,则他们会在光轴上交于一点,而该点相对于第三种色光 $\lambda_3$ 的轴上像点不交于一点,两点之间有一差异 $\Delta L_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}$ ,这个差异就是二级光谱。

二级光谱值由下式决定:

$$\Delta L_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3} = f' \frac{P_{\lambda_1\lambda_3} - P_{\lambda_2\lambda_3}}{v_1 - v_2} \quad (1)$$

**作者简介:**梁士通(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学设计和深空探测。E-mail:liangshitong@yahoo.com.cn

**收稿日期:**2008-06-30

式中,  $P_{\lambda_1\lambda_3}, v_1$  是第一种玻璃的相对色散和阿贝数;  $P_{\lambda_2\lambda_3}, v_2$  是第二种玻璃的相对色散和阿贝数;  $f'$  为系统总焦距。

式(1)中,  $P_{\lambda_1\lambda_3}$  是部分色散  $n_{\lambda_1} - n_{\lambda_3}$  与中部色散  $n_S - n_L$  的比值:

$$P_{\lambda_1\lambda_3} = \frac{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_3}}{n_S - n_L} \quad (2)$$

式中,  $n_S, n_L$  分别是材料对成像波段的短波和长波段的折射率。

从式(1)可以看出, 校正二级光谱其实就是在系统焦距一定的情况下使  $\frac{P_{\lambda_1\lambda_3} - P_{\lambda_2\lambda_3}}{v_1 - v_2}$  最小, 也就是找到合适的玻璃。

但是对于普通玻璃, 很难使  $\frac{P_{\lambda_1\lambda_3} - P_{\lambda_2\lambda_3}}{v_1 - v_2}$  小到令人满意的结果。

### 2.2 二元光学透镜(BOL)

BOL的发展给校正二级光谱带来了方便。BOL 可以看成是同轴计算全息透镜且通常做成多阶相位型, 故衍射效率很高。这类透镜本质上是一种衍射光学原件, 其性质与分析方法类同全息光学器件。

通常设旋转对称二元光学衍射面的相位函数表示形式为:

$$\phi(\rho) = M \sum_i^n A_i \rho^{2i} \quad (3)$$

式中,  $A_i$  为二次相位系数, 决定该面的傍轴光焦度, 此项常用于校正系统色差, 其他项为非球面相位系数且比较小, 因此一般仅取到  $A_2$  项, 其他项可以忽略, 高次项多用于校正系统单色像差。

由  $A_1, A_2$  可得 BOL 各环带的半径:

$$\rho_k = \sqrt{\frac{-A_1 - \sqrt{A_1^2 - 8\pi k A_2}}{2A_2}} \quad (4)$$

面形方程为:

$$y = \frac{\lambda_0}{(n-1)} \left[ \frac{1}{2\pi} \phi(\rho) + \text{int} \left( \frac{1}{2\pi} \phi(\rho) \right) \right] \quad (5)$$

可以用 BOL 面型的最小间隔来描述 BOL 的加工难易程度, 即:

$$b = 2\lambda_0 (f/\#) \quad (6)$$

由光栅方程可以推导出光栅的折射率、阿贝数和相对色散:

$$d(\sin\theta_k - \sin\theta) = k\lambda \quad (7)$$

式中,  $d$  为光栅常数;  $\theta_k$  为第  $k$  级的衍射角;  $\theta$  为入射光与光栅的夹角。

由式(7)可以求出 BOL 的折射率、相对色散和

阿贝数分别为:

$$n(\lambda) = \frac{\sin\theta_k}{\sin\theta} = 1 + \frac{k\lambda}{d\sin\theta} \quad (8)$$

$$P_{\lambda_1\lambda_2}^B = \frac{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}{n_S - n_L} \quad (9)$$

$$V_{\lambda_1}^B = \frac{\lambda_1}{\lambda_S - \lambda_L} \quad (10)$$

由式(10)可以看出: BOL 因衍射产生的相对色散与光学材料因折射而产生的相对色散情况有很大不同, 在相同的成像波段, 大部分折射材料在蓝光波段的末端表现出较大的部分色散, 向红光波段逐渐减小, 而 BOL 的相对色散与之相反; BOL 的色散与玻璃材料无关, 仅与波长有关, 这与折射材料也是有很大区别的。BOL 与光学材料性质的差异给我们消除像差提供了方便。

### 2.3 BOL 与二级光谱

BOL 相对色散和阿贝数与折射材料的差异给校正折射系统的二级光谱提供了可能。因为对于结构型式一定的光学系统, 结构参数的变化不会对高级像差产生太大的影响, 所以如果高级像差对系统的像差影响较大, 则必须先选好总体的结构型式, 优先校正高级像差。然后可以对系统加以优化, 校正初级像差, 得到满意的设计结果。

本文采用应用较多的双胶合透镜, 外加一 BOL。三个透镜的光焦度分别为  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ , 系统总光焦度为  $\varphi$ , 则  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$  必须同时满足光焦度条件、消色差条件和消二级光谱条件, 即:

$$\begin{aligned} \varphi_a + \varphi_b h_b + \varphi_c h_c &= \varphi \\ \frac{\varphi_a}{v_a} + \frac{\varphi_b h_b^2}{v_b} + \frac{\varphi_c h_c^2}{v_c} &= 0 \\ \frac{\varphi_a P_a}{v_a} + \frac{\varphi_b h_b^2 P_b}{v_b} + \frac{\varphi_c h_c^2 P_c}{v_c} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$  分别为三个透镜的光焦度;  $h_b, h_c$  分别为光线在透镜上的投射高度, 在此将在第一个透镜上的投射高度设为 1。将透镜按薄透镜处理, 则也可将  $h_b, h_c$  设为 1。则可求得三个透镜的焦距为:

$$\begin{aligned} \varphi_a &= \varphi \frac{(P_b - P_c)v_a}{\Delta P(v_a - v_c)} \\ \varphi_b &= \varphi \frac{(P_c - P_a)v_b}{\Delta P(v_a - v_c)} \\ \varphi_c &= \varphi \frac{(P_a - P_b)v_c}{\Delta P(v_a - v_c)} \\ \Delta P &= \frac{v_a(P_b - P_c) + v_b(P_c - P_a) + v_c(P_a - P_b)}{v_a - v_c} \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $v_a, v_b, v_c$  分别为三个透镜的阿贝数;  $P_a, P_b, P_c$  分别是它们对应的相对色散;  $\Delta P$  是第二个透镜材料在  $P-v$  图上的点与第一和第三透镜对应点连线在  $P$  方向上的距离。当系统焦距一定时, 各透镜的光焦度越小, 则面型的曲率也越小, 这对于消除二级光谱和其他初级像差是有利的, 因而在设计中应努力增大  $\Delta P$ 。BOL 的在  $P-v$  图上偏离普通玻璃, 所以在光学系统中加入 BOL 对于减小系统像差是有利的。

### 3 设计结果

本文按照航天用摄影物镜的指标要求  $f = 600\text{mm}$ , 相对孔径  $F/6$ ,  $2\omega = 4^\circ$  (无渐晕), 波长范围  $\lambda = 0.45 \sim 0.90\mu\text{m}$ , 采用三片胶合结构, 中间加 BOL。三种色光的折射率和相对色散如表 1 所示。

表 1 三种色光的折射率和相对色散

材料	$\lambda_1 = 600\text{nm}$	$\lambda_2 = 450\text{nm}$	$\lambda_3 = 900\text{nm}$	$P$	$V$
FK51	1.4862003	1.4926672	1.4811052	0.5593	42.6109
SF6	1.8032770	1.8407670	1.7793505	0.6104	13.6896
BOL	—	—	—	0.6667	-1.3333

将表 1 中的数据代入式 (12), 可得各透镜的光焦度如下:

$$\begin{aligned} \text{FK51:} & \quad \varphi_a & 0.0046475 \\ \text{SF6:} & \quad \varphi_b & -0.0028488 \\ \text{BOL:} & \quad \varphi_c & -0.0001320 \end{aligned}$$

由于该三块透镜光焦度的确定没有涉及透镜的前后位置和距离, 所以可以通过适当的放置三块透镜以及改变透镜的半径, 可以很方便地校正初级像差。

利用 ZEMAX 设计并优化后的透镜形状如图 1 所示, 光学传递函数如图 2 所示, 点列图如图 3 所示。

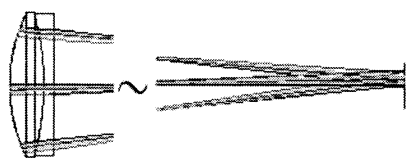


图 1 利用 ZEMAX 设计并优化后的透镜形状

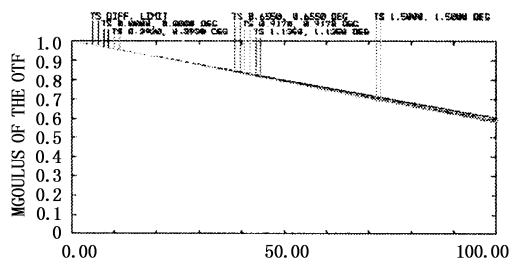


图 2 系统的光学传递函数

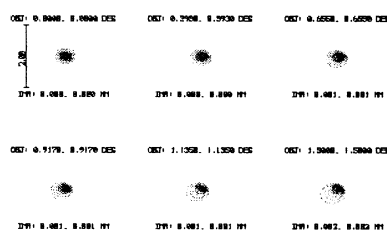


图 3 点列图

通过在 ZEMAX 中的模拟分析可以看到, 该镜片已经基本上接近衍射极限, 系统各项指标基本符合使用要求。至此, 设计完成。

BOL 的各阶参数分别是:

$$A_1 = 1.27 \times 10^{-4} \quad A_2 = -6.82785 \times 10^{-7}$$

将数据代入式 (6) 可得 BOL 最窄环带的宽度  $b = 12\mu\text{m}$ , 该宽度已没有加工上的难度, 因此, 设计满足实际加工和生产要求。

### 4 结论

用 BOL 器件代替普通透镜, 光学系统性能得到提高的同时, 可以明显减轻系统质量, 给光学系统的小型化和轻量化带来了方便。但光学系统的相对口径不能做得太大, 否则相差很难校正。另外, BOL 设计时还应考虑加工的难易度和成本。综合考虑以设计出性价比高的光学系统。

### 参考文献:

- [1] 陈立武, 杨建峰, 洪新华, 等. 宽光谱折射式长焦光学镜头[J]. 光子学报, 2004, 33(9): 1123 - 1126.
- [2] 金国藩, 邬敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 1 - 16, 182.
- [3] 陈立武, 赵葆常, 杨建峰, 等. 折射率、色散变化量与宽光谱傅里叶镜二级光谱变化量的分析[J]. 光子学报, 2005, 34(9): 1355 - 1358.
- [4] 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.
- [5] 姜会林. 关于二级光谱问题的探讨[J]. 光学学报, 1982, 2(3): 225.
- [6] 金国藩, 等. 二元光学[J]. 光子学报, 1992, 21(5): 43 - 49.
- [7] 杨建峰. 空间太阳望远镜光学系统研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1983: 307 - 312.
- [8] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [9] 相里斌, 赵葆常, 薛名球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. 光学学报, 1998, 18(1): 19 - 22.
- [10] Johnson R. Very-broad spectrum afocal telescope [J]. SPIE, 1998, 3482: 9.