

基于衍/折射光学元件二级光谱的校正

洪新华¹ 陈立武¹ 郑黎¹ 张向东¹ 张淳民² 赵葆常¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068); (² 西安交通大学应用物理系, 西安 710049)

提要:采用衍射和折射光学元件结合的方法,对星载用长焦距望远镜的二级光谱进行了复消色差设计。计算机模拟结果表明:校正后的望远镜满足了使用要求,并且设计方法简单可行。

关键词:衍射光学,折射光学,校正,二级光谱,望远镜

Correction of apochromats by the method of hybrid diffractive - refractive

Hong Xinhua¹ Chen Liwu¹ Zheng Li¹ Zhang Xiangdong¹ Zhang Chunmin² Zhao Baochang¹

(¹ Xi'an Institute of Optics Precision and Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068);

(² Department of Applied Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: Diffractive optics allows for increasing optical performance, decreasing size and weight, and decreasing systems costs in numerous applications. Many types of optics can be fabricated using diffractive surfaces that standard refractive lenses are not possible, or not cost competitive, using standard refractive lenses. By means of hybrid diffractive - refractive, a method has been used for apochromats in long focus telescope. The results showed: apochromats do not affect quality of sight field in corrected telescope. The correction method is simple and satisfiable.

Key words: diffractive optics, refractive optics, correction, apochromats, telescope

1 引言*

传统的消色差镜头,往往由两块或两块以上性能(折射率和色散)不同的材料组合而成。当两种不同波长的色光汇聚在同一像点上时,即可校正轴上色差,但是对第三种波长的光,像点并不能完全重合,而有一定的偏离,这种偏离统称为二级光谱。二级光谱的存在会使成像的对比度降低,出现“色渗透”现象,不仅造成分辨率下降,还会降低色饱和度和亮度。这对长焦距物镜、高倍显微物镜等成像质量要求较高的光学系统,是不能允许的,必须考虑二级光谱的校正问题,消二级光谱也称复消色差。

由于二级光谱与镜头焦距成正比,并且和透镜的色散有关,故可采用有特殊色散性质的萤石与不同的玻璃组合制成消二级光谱系统,如密接三透镜系统或多透镜密接等。萤石具有透光性好、色散小的特点,但很难找到具有均匀光学性质的大块萤石,并且加工性能不理想,价格也高,在工程上实际很少使用。二元光学透镜(Binary Optics Lens, BOL)的色散和波长有关,可以和光学材料结合用来消除二级光谱。本文采用衍/折射光学相结合的方法来解决航空航天卫星望远镜头的二级光谱问题,进行了计算机模拟。结果表明,该设计可以有效地减小二级光谱,满足星载望远镜的要求,对实际设计具有指导意义。

2 复消色差的基本原理

2.1 二级光谱的产生

设密接双透镜已对 λ_2 和 λ_3 两种色光校正了位置色差,而这两种色光的公共像点相对于第三种色光 λ_1 的像点位置仍有差异,这种差异就是二级光谱。二级光谱的特性为^[1]:

$$\Delta L_{\lambda_1} = -f(P_{\lambda_1} - P_{\lambda_2})/(\nu_1 - \nu_2) \quad (1)$$

式中 P_{λ_1} 和 P_{λ_2} 分别表示二透镜对两种不同色光的相对色散, ν_1 和 ν_2 分别表示双透镜的阿贝数, f 为透镜的总焦距。二级光谱产生的原因是冕玻璃和火石玻璃的折射率随波长的变化规律不同造成的。

可见要消除二级光谱必须使用 P_D 值相等的两种玻璃消色差,但一般的玻璃 P 近似与 ν 成比例, P 相等则 ν 也近似相等。因为两种 ν 值相同的玻璃是不能消色差的,要消色差必须用 ν 值不同的玻璃,且相差越大越好。

该系统需要相对色散相同而阿贝数相差大的材料来满足消色差和二级光谱,而普通光学玻璃无法满足上述要求,总难以完全消除残余的二级光谱^[4]。采用三分离物透镜,在相对孔径较小时,可以消除二级光谱,但带来温度系数不匹配问题,尤其是在使用环境温度波动较大的星载系统,该问题显得更为突出,因此要完全实现复消色差,必须采用其他途径。

2.2 采用 BOL 消复色差的原理

2.2.1 BOL 的光学特性

以D光(587.6nm)为主光线,其它为红外光(900.0nm,用h表示)和紫光(420.0nm用p表示)进行消二级光谱的设计。BOL的成像原理类似于全息器件的再现^[5],其光焦度可由 $f_C = f_d(\lambda_d/\lambda_c)$, $f_F = f_d(\lambda_d/\lambda_F)$,得到 $\Phi_C = (\lambda_c/\lambda_d)\Phi_d$ 。其中各量下标分别表示相应光波的波长、焦距和光焦度。

BOL的等效折射率为:

$n_{eff} = 1 + 1/(C_0 f_z) = 1 + \lambda_z(C_0 f_d \lambda_d)$, C_0 为常数,与透镜表面的几何形状有关^[5],下标Z表示为二元光学元件, λ_z 为设计波长,(文中 $\lambda_z = \lambda_c$)。传统光学材料的阿贝数 ν_d (色散的倒数)定义为 $\nu_d = (n_d - 1)/(n_F - n_C)$,由此可得 BOL的等效阿贝数 $\nu_b^B = [\lambda_d/(\lambda_F - \lambda_C)]$,将相应数值代入可得: $\nu_b^B = -3.452$ 。

二元光学透镜的色散公式为^[6]:

$$P_{\lambda_1 \lambda_2} = (\lambda_1 - \lambda_2)/(\lambda_F - \lambda_C) \quad (2)$$

式中 $P_{\lambda_1 \lambda_2}$ 为 BOL对1光和2光的色散。由式(2)可见,

* 收稿日期:2003年3月10日
基金项目:国家自然科学基金项目(60278019);陕西省自然科学基金重点项目(2000X08)
作者简介:洪新华,男(1957-),现在中科院西安光学精密机械研究所工作并攻读博士学位。研究方向为二元光学理论与应用,红外与毫米波的衍射特性,计算物理学等,发表论文30多篇。

BOL的色散只和波长有关,与所用光学玻璃的折射率无关,正光焦度的BOL透镜具有负的色散,为校正系统色差提供了条件,并分担了光焦度,有利于减少单色象差。而传统光学材料的色散特点是在短波段表现出较大的色散,而在长波段色散较小,在光学系统中,若将二者结合起来可以进行二级光谱的校正,必须采用三片以上才可以对二级光谱进行校正^[4]。

2.2.2 衍-折透镜光焦度的分配

设由三片光学材料组成的光学系统的焦距为 f ,三个透镜的焦距分别为 f_a, f_b, f_c ,则^[5]:

$$\begin{aligned} f_a &= f \Delta P (v_a - v_c) / (P_b - P_c) P_a \\ f_b &= f \Delta P (v_a - v_c) / (P_c - P_a) P_b \\ f_c &= f \Delta P (v_a - v_c) / (P_a - P_b) P_c \end{aligned} \quad (3)$$

式中, v_a, v_b, v_c 是3个透镜的阿贝值。 P_a, P_b, P_c 为相应的部分色散。 ΔP 为 b 透镜材料在 $P-v$ 图上的点与 a, c 透镜对应点连线在 P 方向上的垂直距离, b 透镜材料的点在此连线上方 ΔP 为正,在下方为负,BOL可取其中任意一个

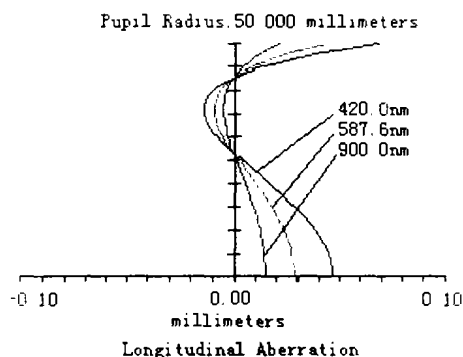


图1 望远物镜系统的位置色差

根据消二级光谱的原理,在计算机模拟的望远物镜球差、正弦差较小至可用条件下,所产生的二级光谱满足系统要求,见图1。由图1可见,这里设计的望远物镜在0°视场为过校正,0.50°和0.85°孔径中三种色光校正的差值都为0,在0.70°孔径中都校正不足,但分析可知,其二级光谱已经不影响系统的使用。

由图1还可见,色光420.0nm的曲线变化较大,这是由二元光学元件的特性所决定的,波长短则变化大,波长长则变化小,尤其是红外波段部分变化的更小。

3.2 系统的光学传递函数

光学传递函数可以表征卫星观测相机地面分辨率所需的特征频率,还可以全面反映光学系统的成像性质。像质高的光学仪器一般都具有达到或接近衍射极限的光学传递函数。图2是用光学传递函数综合表示本系统的成像结果,无论是弧矢平面(S)还是子午平面(T),其结果都比较好,达到使用要求。图中线分辨率用SF表示。

由图2可见,这个镜头的设计按照所要求的指标时效果都很好,在0.5°视场角以下基本达到或接近衍射极限,视场角为1°,频率为30左右时传递函数系数略小,但还可以达0.6以上。在确定光焦度之后,加入其他参数校正畸变等像差,其效果与普通望远透镜相比,显著地减少了系统的外观尺寸和整体重量。

元件。

$$\Delta P = [v_a(P_b - P_c) + v_b(P_c - P_a) + v_c(P_a - P_b)] / (v_a - v_c) \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知,对某一确定总光焦度, ΔP 绝对值越大,各个复消色差透镜的光焦度越小,面型曲率也越小,更有利于消二级光谱。因此,采用BOL透镜消二级光谱较为理想。

3 结果与分析

3.1 系统的位置色差

本文采用ZEMAX光学设计软件,设计的为望远物镜。系统要求总焦距为 $f=450\text{mm}$,最大孔径 $D=100\text{mm}$,视场角为 $2\omega \leq 2^\circ$ 。针对卫星观测需要,光谱波段为420.0~900.0nm,采用3个镜片组合,第1片为BK7玻璃制成的透镜,第2片为BOL透镜,第3片为SF10玻璃制作的透镜。设计时将二元光学片附在第一片透镜上,其曲率半径与第一镜片的第二面曲率相同,焦距分配按照式(3)计算,可知焦距 f_b 为 $-1.16 \times 10^5\text{mm}$ 。镜筒总长度为750mm。

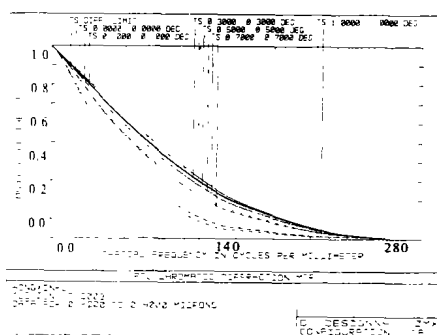


图2 衍-折混合望远镜不同视场的传递函数

4 结论

通过对设计结果分析讨论可知,用衍-折混合方法设计星载望远透镜可将二级光谱减小至很小的范围,并且结构尺寸小,重量减轻。计算机仿真结果表明,在整个视场中系统的光学传递函数很好,可以应用于望远透镜上,不仅满足了航空航天的要求,而且可以推广到其他领域。

参考文献

- [1] 张以谟.应用光学(第二版).北京:机械工业出版社,1988,322~327
- [2] 崔庆丰.用二元光学元件实现消色差.光学学报,1994,14(8):877~881
- [3] 崔庆丰,匡裕光.混合复消色差透镜组的设计原理.光学学报,1995,15(4):499~503
- [4] 金国藩,严瑛白,邬敏贤等.二元光学.北京:国防工业出版社,1998,192~211
- [5] Thomas Stone, Nicholas George. Hybrid Diffractive - refractive Lenses and Achromats. Applied Optics, 1998, 27(14): 2960~2971
- [6] Buralli D A, Morris GW. Design of a wide Diffractive landscape lens. Appl. Opt. 1989, 28(18): 3952~3956