

# 宽波段折射式长焦光学镜头\*

陈立武<sup>1,2</sup> 杨建峰<sup>1</sup> 洪新华<sup>1,2</sup> 常凌颖<sup>1,2</sup> 赵葆常<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 介绍了宽波段、折射式长焦镜头的光学设计. 重点讨论了宽波段(420~900 nm)二级光谱的校正问题,修正了部分色散( $P$ )和阿贝数( $V$ )的计算公式,使之适合于宽波段光学系统的设计,并给出了设计实例及设计结果. 本系统理论上的二级光谱约为1.2 mm,而设计结果使三条谱线(420 nm,600 nm,900 nm)基本交于一点,实际二级光谱约0.23 mm.

**关键词** 光学设计;二级光谱;长焦距;宽波段

**中图分类号** TB133 **文献标识码** A

## 0 引言

干涉成像光谱仪的应用,为人们获取更多更准确的信息提供了极为有力的帮助,简单的理解成像光谱技术就是将干涉仪和成像光学系统结合起来,再通过傅里叶变换的方式获取有关探测目标的光谱信息,作为一个整体它基本由干涉仪、成像系统和付氏镜等组成.

在航天摄影系统中,使用较多的是折反和反射式系统<sup>[1,2]</sup>,原因在于这两种系统可以避免折射式光学系统很难消除的二级光谱. 对于二级光谱的研究,国内外都有文章研究<sup>[3-9]</sup>,但基本都是集中在传统的可见光范围内进行讨论. 而现代光学系统大多采用 CCD 探测器件,CCD 器件的光谱响应范围比人眼更宽,形成了其独特的光学设计要求. 另一方面,相对于折反和反射式系统,折射式的光学系统较容易满足视场角的要求. 这对于航天摄影系统来说是很重要的,视场角每增大1°,卫星相应的覆盖面积要增大很多,光谱仪在单位时间内所得到的信息量增加更多,有利于减小绕行周期,如此可以节省很多能量,从而延长卫星的使用寿命. 因此在选择方案时,更多的考虑了对折射系统的二级光谱进行研究. 文中针对应用 CCD 探测器件的宽波段、长焦距折射式镜头的设计,提出了修正部分色散( $P$ )和阿贝数( $V$ )的计算公式,并应用于二级光谱理论,得到了预期的设计结果.

## 1 设计理论

在应用于可见光范围内的光学系统中,当两种色光消色差,即两种色光的焦点相重合,第三种色光的

焦点并不一定与其相重合时,其偏离量就称为二级光谱. 对于双胶合的薄透镜组或间隔比较小的双薄透镜组,当入射光束是平行光时,二级光谱可表示为

$$\Delta L'_{FCA} = -f' \times \frac{P_{(FA)1} - P_{(FA)2}}{\nu_1 - \nu_2} \quad (1)$$

式中: $P_{(FA)1}$ 表示第一种玻璃的部分色散; $P_{(FA)2}$ 表示第二种玻璃的部分色散; $\nu_1$ 表示第一种玻璃的阿贝数; $\nu_2$ 表示第二种玻璃的阿贝数; $f'$ 表示系统光组的焦距.

这就是 C 光(656 nm),F 光(486 nm)两种波长消色差,对波长  $\lambda$  的色光的偏离量.

式(1)中  $P_{FA}$  是部分色散  $N_F - N_A$  与中部色散  $N_F - N_C$  的比值,称为相对色散.

$$P_{FA} = \frac{N_F - N_A}{N_F - N_C} \quad (2)$$

由于接收器件的响应谱段很宽(420~900 nm),所以在考虑校正二级光谱时,传统可见光范围内的光学系统的计算公式不能正确反应实际系统的二级光谱的大小,更不能照搬可见光范围内光学系统的二级光谱理论进行设计. 因此,需要能符合实际需要的,适应更宽谱段的消二级光谱的计算方法.

首先应该选择合适的玻璃,由于航天环境对材料的要求很严,所以这一要求在选用玻璃方面带来一定的限制,只能选用普通玻璃(在航天用玻璃的范围内选取)这对设计这一镜头造成了一定的困难. 在设计时选用了三种玻璃进行设计,所选为 ZK5、F2 和 TF3 玻璃.

考虑到系统在校正色差和二级光谱方面及各种像差的要求,由经验得知玻璃的折射率在短波范围内的变化较快,而在长波范围内变化较慢,因此在确定消色差谱线和消单色像差谱线时,让消单色像差谱线稍接近短波端,以便像差平衡. 因此,选取校正谱线为(420 nm,600 nm,900 nm).

现将三种色光的折射率及  $P$  值列表如下:

\*863-708 资助项目

Tel:029-88484669 Email:ch-yahu@yahoo.com.cn

收稿日期:2003-08-22

表1 三种色光的折射率及 P 值

玻璃	$\lambda_3/600\text{ nm}$	$\lambda_1/420\text{ nm}$	$\lambda_2/900\text{ nm}$	P 值	V 值
ZK5	1.6105201	1.6272547	1.6011449	0.64093	23.3828
TF3	1.6115643	1.6330398	1.5996444	0.64307	18.3128
F2	1.6119309	1.6382792	1.5986442	0.66477	15.4392

由以上 P、V 值及公式

$$\Delta L'_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3} = -f' \times \frac{P_{1\lambda_3}P_{2\lambda_3}}{\nu_1 - \nu_2} \quad (3)$$

式中

$$P_{K\lambda_3} = \frac{N_{K\lambda_3} - N_{K\lambda_1}}{N_{K\lambda_1} - N_{K\lambda_2}} \quad (K=1,2) \quad (4)$$

$$\nu_K = \frac{N_{K\lambda_3} - 1}{N_{K\lambda_1} - N_{K\lambda_2}} \quad (K=1,2) \quad (5)$$

$$N_K \text{ 为不同种玻璃对应折射率 } (K=1,2) \quad (6)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta \nu} = \frac{P_{1\lambda_3} - P_{2\lambda_3}}{\nu_1 - \nu_2} = 0.00269 \quad (7)$$

以普通玻璃 ZK5 和 F2 为例,通过计算得到系统在选用该二种普通玻璃、双薄透镜的情况下,二级光谱的残留量大约是  $\Delta L'_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3} = -0.00269f'$  (在理论上,仅 420 nm 和 900 nm 谱线消色差,其交点与谱段内漂移最远的谱线 535 nm 之间的二级光谱)合 1.21 mm ( $f' = 450\text{ mm}$ ),这对于要设计的光学系统是不能容忍的像差值. 因此,在设计本系统时必须考虑校正二级光谱,才有可能获得技术上要求的像质.

本文的复消色差设计是根据消二级光谱的基本原理进行理论计算,将上述修改过的 P、V 公式所求得的各种玻璃的 P、V 值代入复消色差方程组,求得基本的光焦度分配. 简便叙述应用的计算式为

$$\phi_1 + \phi_2 h_2 + \phi_3 h_3 = \phi \quad (8)$$

$$\frac{\phi_1}{\nu_1} + \frac{h_2^2 \phi_2}{\nu_2} + \frac{h_3^2 \phi_3}{\nu_3} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\phi_1 P_1}{\nu_1} + \frac{h_2^2 \phi_2 P_2}{\nu_2} + \frac{h_3^2 \phi_3 P_3}{\nu_3} = 0 \quad (10)$$

式中:  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\phi_3$  分别是三种玻璃的光焦度;  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  分别是光束在透镜上的入射高; 式(10)中一般将  $h_1$  规划为 1, 应用试探法即可求解出接近合理的光焦度分配方案.

## 2 设计实例及基本结构的选型

本文所讨论的光学系统是干涉成像光谱仪的成像系统部分,要求设计结果除必须达到特殊的技术要求外,其余指标均按成像系统进行设计,因此仅对其成像系统的设计情况进行概述.

设计要求: 焦距 450 mm, 相对孔径  $F/5$ , 视场角  $2\omega = 2.62^\circ$  (要求无渐晕), 谱段宽 420 ~ 900 nm, 像元尺寸  $18\ \mu\text{m} \times 18\ \mu\text{m}$ .

根据以上的设计思路,及光焦度分配方程式联立求解,简要叙述得出光焦度分配如下:

$$\text{ZK5: } \phi_1 = 0.010995$$

$$\text{TF3: } \phi_2 = -0.009492$$

$$\text{F2: } \phi_3 = 0.000719$$

在本设计中,简单地按薄透镜处理将  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  都规划为 1; 按照计算的光焦度分配方案进行设计.

在折射系统中,本系统的视场角很小,因此,不需要对轴外像差考虑很多,所以设计时只需关心与孔径有关的像差校正.

由于该系统基本上是按照上述的计算过程进行光焦度分配的,所以在选型时重点考虑的是三片型,而且这样的计算结果中并不包含透镜的前后放置顺序,因此如何组合它们,是设计中应当注意的问题. 在设计中,仅仅三片不能够达到设计要求的结果,因此,在实践中又重新对结构进行了复杂化,中间设光阑,分成前后两组,把光焦度平均分配给两组镜片,基本接近设计的要求,再次将后组的光焦度稍稍进行调整,得到了基本合理的初始结构,结构如图 1 (ZEMEX 图片).

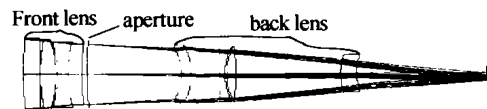


图1 光学系统结构  
Fig. 1 The structure of the Optical system

## 3 设计结果及讨论

在得到基本的初步设计结构后,应用 CAOD 和 ZEMEX 光学设计软件进行了多次校正和优化,最终的设计结果如图 2 ~ 图 5.

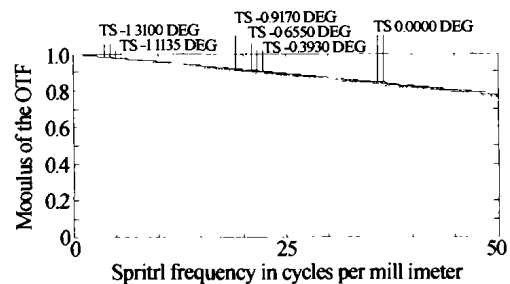


图2 系统调制传递函数 (MTF)

Fig. 2 MTF of the system

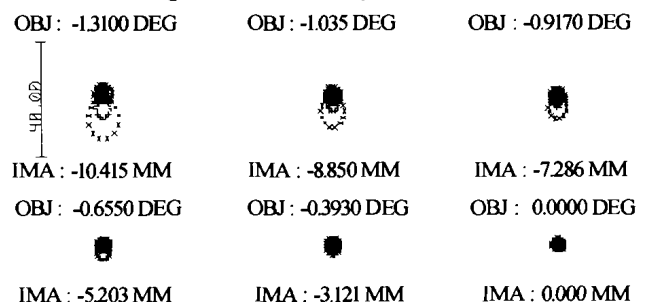


图3 系统像面的弥散斑

Fig. 3 Spot diagrams of system

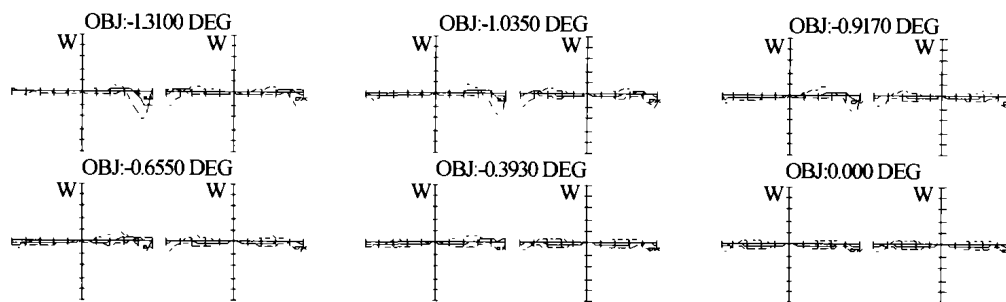


图4 波像差

Fig. 4 OPD diagrams of the system

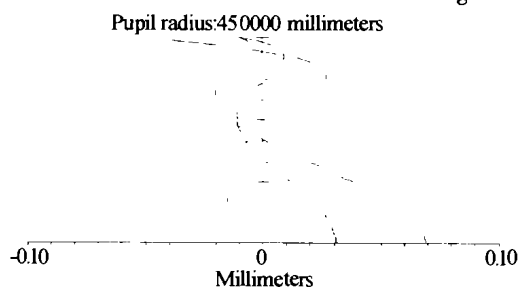


图5 三色球差曲线

Fig. 5 Three colors longitudinal aberrations

从以上结果看,由于很好的组合了二级光谱与色球差的相互影响,三条谱线(420 nm、600 nm、900 nm)在0.7孔径附近相交,实现了复消色差.从计算中发现:当420 nm与900 nm二条谱线校正色差时,二级光谱约为1.21 mm,而本系统实际二级光谱约为0.23 mm.对于这一设计结果可理解为当三条谱线交于一点时,相当于将整个谱段(420 nm~900 nm)分成两段分别校正了色差,所以系统应该呈现两个最大二级光谱极值,系统实际情况也正是如此,经比较484 nm这条谱线的二级光谱量较大,另外一条(756 nm未列出)较小.此时,设计传函已经接近衍射传函,系统处于接近理想状态,因此认为设计完成.

## 4 结论

利用修正的 $P$ 、 $V$ 值计算光焦度分配进行设计,得到的设计结果满足技术要求,弥散斑小于CCD像元尺寸,设计传函满意.对于折射式系统来说,视场角还可以再增大一些(本系统可达 $2\omega = 4^\circ$ ,无渐晕).如果对系统进一步复杂化,将可以更好的利用折射系统的这一优势,可增加卫星的使用寿命.

## 参考文献

- 1 潘君骅.关于大望远镜卡焦R-C系统视场改正镜设计的研究.光学精密工程,2002,10(3):231~234  
Pan J H. *Optic Precision Engineering*, 2002, 10(3): 231 ~ 234
- 2 左保军.成像光谱仪的光学系统设计.光学技术,2002,28(33):187~190  
Zuo B J. *Optical Technique*, 2002, 28(33): 187 ~ 190
- 3 张以谟.应用光学.天津:天津大学出版社,1988.315~327  
Zhang Y M. *Applying Optics*. Tianjing: Tianjing University Publishing Company, 1988. 315 ~ 327
- 4 袁旭沧.光学设计.北京:科学出版社,1983.307~312  
Yuan X C. *Optical Design*. Beijing: Science Publishing Company, 1983. 307 ~ 312
- 5 杨建峰.空间太阳望远镜光学系统研究.[博士论文.]西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2000.24~54  
Yang J F. *Study on optical system of space solar telescope*. [Thesis of Ph. D.] Xi'an: Institute of Optics and Precision Mechanics CAS, 2000. 24 ~ 54
- 6 常群.光学设计文集.北京:科学出版社,1976.85~102  
Chang Q. *Corpus of Optical Design*. Beijing: Science Publishing Company, 1976. 85 ~ 102
- 7 金·斯莱克.透镜设计基础.北京:科学出版社,1978.109~121  
R KinSlake. *Lens Design Fundamentals*. Beijing: Science Publishing Company, 1978. 109 ~ 121
- 8 Johnson R. Very-broad spectrum afocal telescope. *SPIE*, 1998, 3482: 9
- 9 Jamieson T H. Ultrawide waveband optics. *Opt Engr*, 1984, 23(2): 111 ~ 116

## Wide Bands Long Focal Refracting Lens

Chen Liwu<sup>1,2</sup>, Yang Jianfeng<sup>1</sup>, Hong Xinhua<sup>1,2</sup>, Chang Lingying<sup>1,2</sup>, Zhao Baochang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

<sup>2</sup> Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039

Received date: 2003-08-22

**Abstract** The imaging parts of CCD were widely taken by modern optical system, however, its ability of responding to the wide bands optical spectrum is more excellent than human being's eyes, so the optical system using CCD must be specially designed. A wide bands long focal refracting lens's design were introduced, the problem of the inherent secondary spectrum in a wide bands and long focal refracting optical system were discussed, the formulas which used to calculate  $P$  and  $V$  were modified, and made it adapt to wide bands system's design, the process of the design were showed as an example. In the theory, its remains secondary spectrum in this system is 1.2 mm (in the line 535 nm), the design made three lines (420 nm; 600 nm; 900 nm) across together at one point, its remains actually equal to 0.23 mm (in the line 484 nm). The result of this design is well enough to meet the whole system's need, so it is possibly to think that the modification of the formulas  $P$  and  $V$  in this design could meet the wide bands system's practice.

**Keywords** Optics design; Secondary spectrum; Long focal; Wide bands



**Chen Liwu** was born in Feb 1969. He received his Bachelor degree in optical engineering from Changchun Institute of Optics and Fine Mechanic, Changchun, Jilin, in 1992. Now he is studying for his Ph. D. in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences. His major interests include optical design and spectroscopy.