

消色差的近紫外-可见光广角物镜设计

白清兰 苗兴华

(中国科学院西安精密光学机械研究所, 西安 710068)

摘要 光学材料在紫外波段色散大选择少而使得光学系统在紫外波段色差校正变得困难,设计时在反远距的结构形式中引入一组准无光焦度的镜组以平衡整个系统的色差,并讨论了几种光学材料在紫外波段的特性,给出了一个70°视场角,焦距9.5 mm,波段范围300~500 nm的物镜结构及像差结果.

关键词 光学系统;紫外;色差

中图分类号 O435 **文献标识码** A

0 引言

紫外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.普通光学玻璃品种有几十种,其相关的光学数据及理化性能数据都比较完整,使光学系统在像差校正时有较大范围的选择,但普通光学玻璃的透明区域一般在350~2400 nm之间,普通冕牌类玻璃在波长300 nm厚度5 mm时的内透过率一般在0.4~0.6左右,当厚度为25 mm时其透过率降低至0.01~0.1左右,而普通火石类玻璃在波长300 nm几乎是不透明的^[1],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.

1 系统要求及材料的选择

系统要能够用于外空间的对月探测,使用波段为近紫外至可见光部分,波段范围为300~500 nm,探测器的有效成像区为13.3 mm×13.3 mm,要求可探测到物空间70°范围,在外空间的辐照下能正常工作.

除了上述系统的使用要求外系统还应满足一些基本的设计要求,这些要求成为限制条件在系统设计时必须加以考虑.

这些基本的设计要求为:1)系统不能使用胶合面;2)全视场无渐晕;3)系统后工作距应≥6 mm;4)30 lp/mm的MTF应≥0.5;5)多色光弥散的85%能量在视场的80%范围内集中在一个像元内;6)全视场畸变应优于8%并能够进行修正;7)系统相对孔径1/5(由于各种条件的制约而得到的折衷结果).

系统工作在紫外至可见光波段,要求光学材料在紫外波段有高的透过率,所能选用的材料主要以晶体材料为主,表1^[2-4,6]为查阅资料得到的一些数据.

表1 一些透紫外光材料的性能

材料	硬度 (Knoop/Mohs)	溶解性 (g/100gH ₂ O)	外透过率		色散 $\nu_{0.4}$ $\nu_{0.4} = \frac{1 - n_{0.4}}{n_{0.3} - n_{0.5}}$	色散 ν_d
			波长 0.25 μm 厚度 10 mm	300 nm 折射率		
LiF	102-103/3	0.27	0.91	1.40871	28.97	97.29
MgF ₂	576/6	0.007	0.90	1.39298	29.08	106.217
CaF ₂	158.3/5	0.0016	0.89	1.45403	25.16	95
SrF ₂	130	0.011	0.88	1.45919	24.1	91.59
BaF ₂	82/3	0.17	0.89	1.50098	20.95	81.6
Cry-Quartz	741	-	0.85	1.48779	18.46	67.82
F-silica	461	-	0.89	1.48779	18.46	67.82
KCl	7.2	34.7	0.75	1.54136	11.31	44.02
CaCO ₃	135/3	0.0014	0.73	1.72263	12.15	48.6
Al ₂ O ₃	1370/9	-	0.70	1.81445	19.6	72.24

表中列出了10种光学晶体材料,在实际设计时

还应考虑材料的耐辐射性能、理化性能及加工性能,因而实际设计可选用的材料仅三四种,随着波长变短,光学材料的色散变大,使得光学系统的像差尤其是色差校正变得困难,要校正色差,要用不同色散的

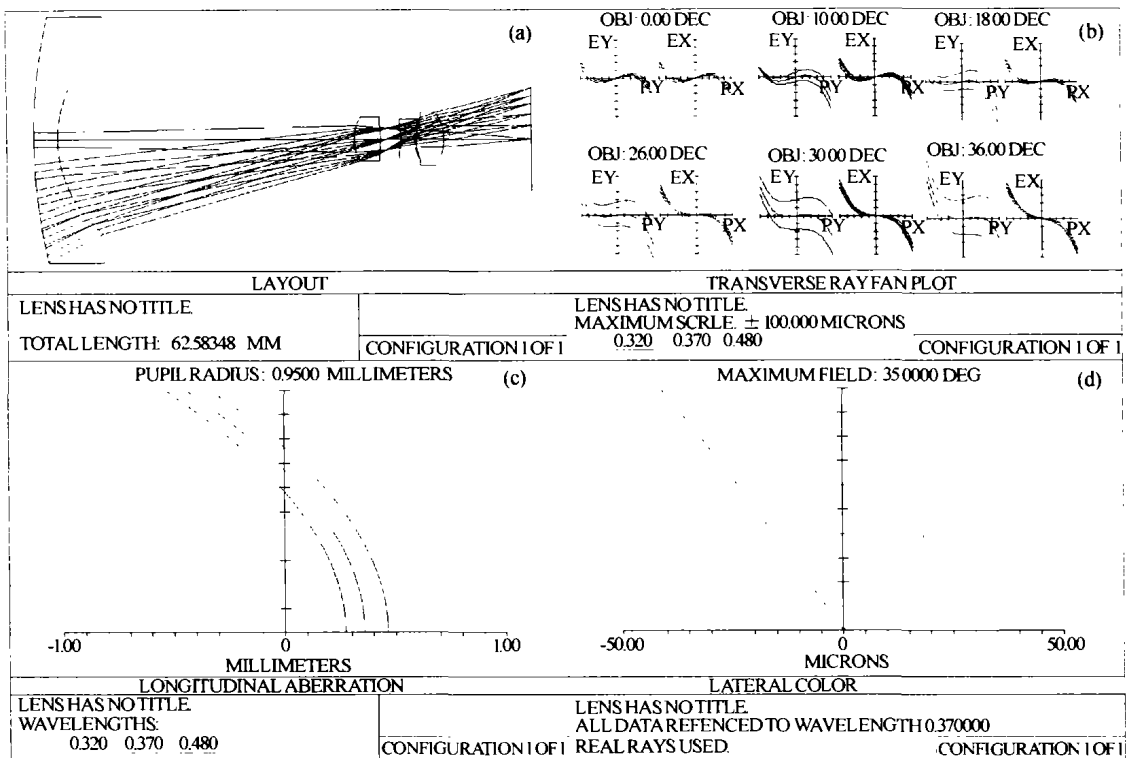
材料进行不同的光焦度分配,一般情况下,正透镜用阿贝数高的材料,负透镜用阿贝数较低的材料,在表 1 中,阿贝数较高的材料有 LiF 、 MgF_2 、 CaF_2 ,由于 LiF 较软,且在空气中易潮解,应用于工程有一定的困难,因而正透镜可选用的材料就只有两种. 阿贝数较低的材料有 F-silica 、 KCl 、 CaCO_3 ,从校正像差的角度讲, KCl 、 CaCO_3 更有利于像差校正,但 KCl 和 CaCO_3 也难以应用于工程,而多用于实验室条件下,因而负透镜可选用的材料也是非常有限的.

2 光学系统结构及消像差要点

实现广角物镜的结构有非对称的反远距型^[5]

及对称型的结构(如 Topogon、Pyccap 型等)^[4],就本系统而言,实现 70° 视场在 $13.3 \text{ mm} \times 13.3 \text{ mm}$ 有效范围内(即应当为内切圆)其焦距值为 9.497 mm ,同时要求系统的后工作距 $\geq 6 \text{ mm}$,因而系统采用反远距的结构型式来实现.

一般情况下反远距物镜分为前后两组,前组具有负的光焦度,后组具有正的光焦度. 从反远距的高斯光学及初级像差理论出发,得到一个最初步的结构型式如图 1 所示. 第一片透镜暴露在外,材料没有其它选择,只能用熔石英,这是因为石英有良好的理化性能及耐辐射性能,且厚度的设计主要考虑耐辐射的要求,然后才是像差校正的要求.



(a) Optical configuration outline; (b) Ray fan; (c) Longitudinal aberration curve; (d) Lateral color curve

图 1 初步的光学系统结构及像差曲线

Fig. 1 The primary optical system

后组为典型的三片式,其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 , CaF_2 的折射率稍高一些,有利于像差高级量的校正, MgF_2 的 ν 值稍高一些,有利于色差的校正,由于系统的主要矛盾表现为色差的校正,因而正透镜选用 MgF_2 ,并通过对前组取较大的角放大率和较大的前后组间隔来减小后组的偏角以有利于像差高级量的校正.

这样得到的结果基本保证了视场和相对孔径,影响像质的主要像差是场曲、球差及倍率色差. 加入厚透镜来校正场曲是一种解决的办法. 从对系统

的计算分析表明,球差的高级量比较大,因而在对后组进行复杂化校正像差时引入一无光焦度的弯向像面的厚透镜以增大后组能承担的偏角,从而减小系统的高级量以有利于球差的校正. 厚透镜材料选用 ν 值较小的熔石英以进一步补偿系统的位置色差. 这样处理的结果得到如图 2 所示的结构.

在引入了无光焦度的厚透镜后对单色光像差的校正是显著的,位置色差也得到了改善,从 0.1914 mm 减小到 0.06265 mm . 影响系统像质的主要因素表现为倍率色差,最大视场的倍率色差达到了 0.14 mm .

在离光栏远的镜片中加入胶合面(或将其分离)变换玻璃对倍率色差的校正是较为敏感的,但

由于玻璃的选择有限,因此考虑将无光焦度的厚透镜变换为负正负贴合(可先从胶合出发然后再将其

分离)的三片透镜以产生足够的反向倍率色差以补偿基本系统的倍率色差. 如图3所示.

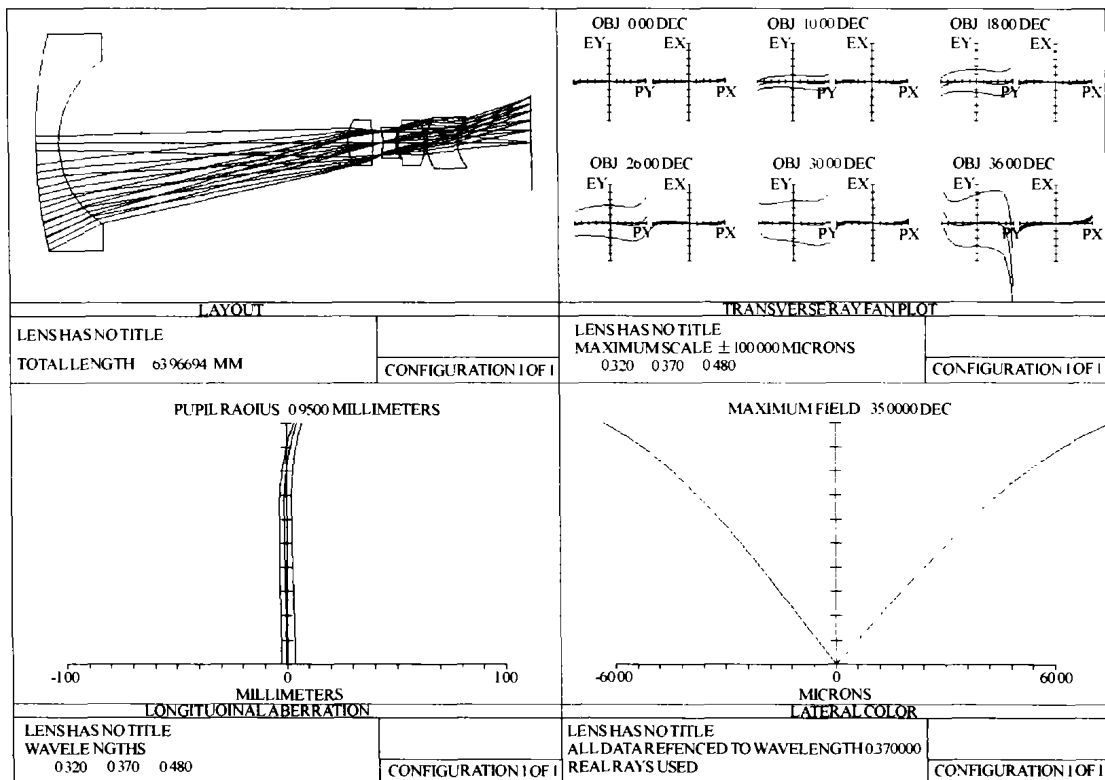


图2 引入无光焦度厚透镜的光学系统结构及像差曲线
Fig. 2 Optical configuration induced afocal thick lens and aberration curve

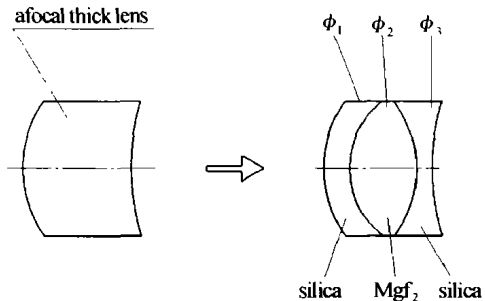


图3 将厚透镜变换为负正负的三片透镜组
Fig. 3 Change afocal thick lens to the triple lens

变换后的三片透镜光焦度的分配应能产生足够的 C_{II} 值以补偿系统的倍率色差,在实际光焦度的分配过程中,为使 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 有较为合理的取值(使 ϕ_2 不至太大而使半径过小),给贴合的三片透镜组以小量负光焦度(准无光焦度),这个过程反复进行以确定合理的光焦度分配.

将变换后的三片贴合透镜和整个系统统一优化以校正像差,通过分析计算,发现在倍率色差得到校正的状态时系统有较大的场曲和像散,若校正了场曲和像散则倍率色差又校正不足而使像质无法满足

要求,因而考虑将前组复杂化以进行像差的平衡,由此在前组中引入一无光焦度(不致重新分配整个系统的光焦度)的厚透镜来校正场曲,厚透镜背向光阑弯曲以产生一定量的正像散和后组平衡,背向光阑弯曲的厚透镜使前组的主面前移,使前后组的间隔加大,有利于高级量的校正,这也是引入厚透镜校正场曲的优点之一. 分析计算表明:若将厚透镜材料的 ν 值取高一点,同时给厚透镜一定量的正光焦度并调整第一片的光焦度以保持前组总的光焦度不变,这样前组本身能校正一定量的位置色差和倍率色差,引入的厚透镜材料使用 CaF_2 来对前组的色差进行补偿.

在前后组引入准无光焦度校正镜组后会破坏系统原有的像差,但主要矛盾解决后次要矛盾也就迎刃而解,通过对整个系统的优化,得到的结果是可以满足系统提出的要求的. 最后的结果如图4所示. 图中左上为光学系统结构示意图,右上为像差特性曲线,左中为色、球差曲线,右中为倍率色差曲线,左下为多色光 MTF 曲线,右下为多色光点列图.

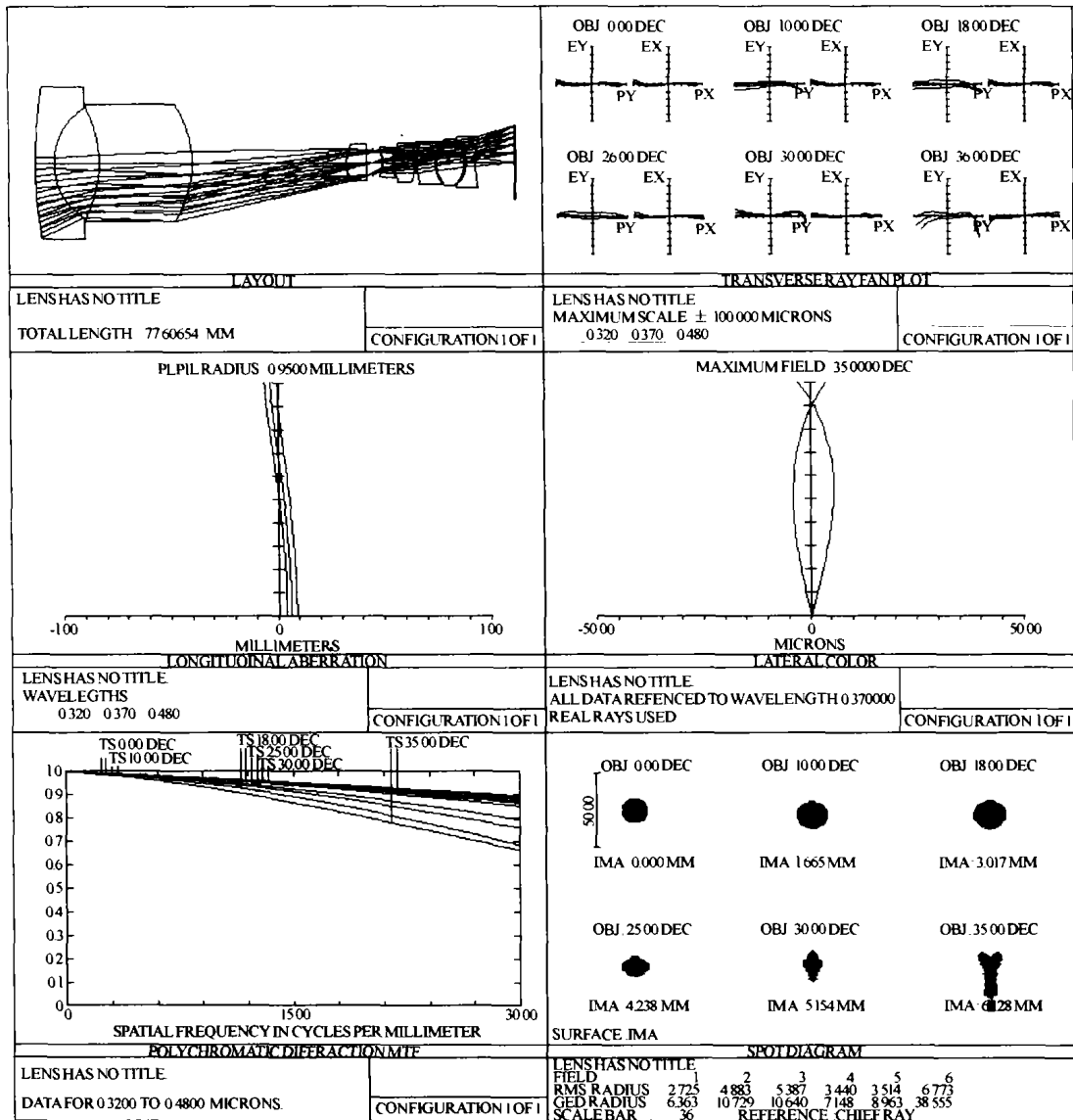


图 4 光学系统设计结果
Fig. 4 The result of optical system

3 结果及讨论

从典型的反远距物镜出发,根据系统的像差特性,在前后组分别引入了准无光焦度的厚透镜(组),得到了一个有着自身特点的在 300 ~ 500 nm 宽的波段范围内的近紫外-可见光广角物镜结构,系统在整个视场内校正了倍率色差,倍率色差曲线在 0.9 视场相交,最大值位置约在 0.5 视场,其值为 0.0095 mm,轴上位置色差为 0.046 mm,30 lp/mm 的多色光 MTF 大于 0.65,多色光的均方弥散在 0.85 视场内 < 12 μm,最边缘视场约有 8% 的光线引起较大的彗形弥散,考虑广角物镜边缘能量的下降保留了这部分能量,系统在校正了色差后还有相当量的畸变,这部分畸变可用我们编制的畸变修正软件进行数值修正,因而光学设计时主要考虑色差的校正而将畸变控制到 8% 以下.畸变修正:先求出在整个 CCD 靶面畸变分布图,根据这个畸变分布

可对视场靶面范围内任何位置上的畸变进行修正,用以提高定位精度或测量精度.(畸变的数值修正已有其它作者专文论述,此不再详细引述,请参阅相关文章.)

参考文献

- 1 天津硅酸盐材料试验厂编. 光学玻璃汇编. 北京:机械工业出版社,1973. 12 ~ 178
Tianjin silicate material factory. Optical glasses compile. Beijing:China Machine Press,1973. 12 ~ 178
- 2 Wilkerson Gary W, Pitalo S K. A Parametric Study of IR and UV Optical Designs for Neutral Particle Beam (NPB) Acquisition, Tracking, and Pointing (ATP) Application. SPIE, 1989, 1157:418 ~ 447
- 3 李景镇主编. 光学手册. 西安:陕西科学技术出版社, 1986. 1263 ~ 1339
Li J Z. Handbook of Optics. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986. 1263 ~ 1339
- 4 王之江主编. 光学技术手册(上册). 北京:机械工业出版社,1987. 763 ~ 775;1025 ~ 1026

- Wang Z J. Handbook of Optical Technology. Beijing: China Machine Press, 1987. 763 ~ 775; 1025 ~ 1026
- 5 电影镜头设计组. 电影摄影物镜光学设计. 北京: 中国工业出版社, 1971. 24 ~ 60
- Design Group of Photography Lens. Optical design of photography lens. Beijing: Chinese Industry Press, 1971. 24 ~ 60
- 6 Catalog of Optical Materials. Opto-Technological Laboratory, <http://www.optotl.ru>

Achromatized Design of Near UV – visible Wide-angle Objective

Bai Qinglan, Miao Xinhua

Xi'an Institute of Optics and Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date: 2003-10-08

Abstract The dispersion of optical material is of higher value at UV band and a few materials can be used in engineering project, so the chromatic aberration is difficulty to correct. The design introduced the quasi afocal lenses in long working distance configuration to correct the colour aberration. The performances of some optical materials are discussed and a result of lens 70 degree FOV, 9.5 mm focal length, 300 ~ 500 nm waveband is given.

Keywords Optical system; UV; Chromatic aberration



Bai Qinglan was born in 1963, and graduated from University of Shanghai for Science and Technology in 1983. She is now engaged in the research of optical instruments especially in optical design.