

复消色差的短波红外望远物镜设计

白清兰

(中国科学院西安精密光学机械研究所, 西安 710119)

摘要:分析计算了一些普通光学玻璃及晶体光学材料在 $0.9\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 短波红外段的色散特性. 在远距型的物镜结构后组中采用的厚弯月镜能产生一定量的反向色差补偿前组中的二级光谱, 所设计的物镜在焦距 800 mm 时的带孔径处最大色差 0.13 mm. 结果表明, 采用氟化物玻璃与重火石玻璃的三片式组合在短波红外段具有较好的消色差能力.

关键词:短波红外; 透镜设计; 色差校正; 复消色差; 望远物镜

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)01-0115-5

0 引言

短波红外成像技术在夜视侦察与监视、遥感遥测系统、红外成像制导及光电对抗等领域有着重要的应用^[1].

透射式光学系统可以全部采用球面面形而具有加工工艺简单, 装配调整容易和工程实现度高造价低廉的特点, 从而使其有着广泛的应用, 但透射式物镜在谱段较宽焦距较长时, 二级光谱成为影响其像质的主要因素, 因而必须对其加以校正以提高光学系统成像质量.

普通光学玻璃从 $0.4\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 都有较好的透过率, 一些重火石玻璃在 $2.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 段也有相对较高的透过率, 在 $0.9\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的短波红外的谱段区间, 常规光学玻璃的色散有着特殊的变化^[2], 普通光学玻璃对的组合^[3-4]难以实现对色差的校正, 因而

在这一区间, 应当选择具有高透过率, 合适色散性能的光学材料以实现该谱段光学系统色差校正.

1 短波红外消色差材料的选择

光学系统色差校正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, 通常情况下, 透射式光学系统由若干个正光焦度和负光焦度的镜片组成, 在可见光波段进行色差校正时往往用色散小的冕牌玻璃作正透镜, 色散大的火石玻璃作负透镜, 但这两种类型的玻璃在短波红外波段其色散特性发生变化, 采用这种方法不能有效地校正色差.

表 1^[5-7] 计算并给出了常用的几种光学玻璃 (SCHOTT) 在可见光波段及短波红外波段的色散差别.

表 1 几种冕牌玻璃和火石玻璃的色散特性

材料	d 光折射率 n_d	d 光色散 ν_d	1.7 μm 折射率 $n_{1.7}$	$\nu_{1.7} = \frac{n_{1.7} - 1}{n_{0.9} - n_{2.5}}$	2.4 μm 的透过率(厚度 10 mm)
BK ₇	1.516 8	64.17	1.498 72	21.7	0.74
LaK ₉	1.691	54.7	1.665 2	21.94	0.65
SK ₂	1.607 4	56.65	1.587 14	27.4	0.87
BaK ₂	1.539 96	59.7	1.521 94	25.7	0.8
PK ₅₂	1.497	81.6	1.485 06	37.44	0.98
SF ₄	1.755 2	27.58	1.714 93	22.86	0.91
SF ₆	1.805 18	25.43	1.760 07	22.59	0.95
N-KZFS ₁	1.613 4	44.29	1.586 97	20	0.7
F ₂	1.62004	36.37	1.593	25.35	0.85

在可见光谱段, 冕牌类玻璃具有较低的色散 (ν 值较大), 火石类玻璃具有较高的色散 (ν 值较小), 到短波红外波段冕牌类玻璃色散变大并接近火石类玻璃甚至高于火石类玻璃, 同时在 $2\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段

普通光学玻璃的透过率逐渐降低, 也会使光学系统性能下降.

一些氟化物玻璃在短波红外段有较高的透过率, 其色散特性不同于常用的光学玻璃, 表 2^[5-7] 计算并给出了这些氟化物玻璃的一些光学特性, 表中同时也列出了一些在短波红外段有较高光学性能的光学晶体材料的相关特性. 对于 ZnSe、ZnS 而言, 不

表 2 一些氟化物玻璃的特性 (含其它光学材料)

材料	硬度 /(Knoop·Mohs)	溶解性 [(g·100gH ₂ O) ⁻¹]	线胀系数 $\alpha \times 10^{-6}$	折射率 (1.7 μm)	$\nu_{1.7} = \frac{n_{1.7} - 1}{n_{0.9} - n_{2.5}}$	透射范围/μm
LiF	102-103/3	0.27	34.4	1.381 47	25.74	0.1~10
MgF ₂	576/6	0.007	9.4	1.369 67	36.99	0.2~7
CaF ₂	158.3/5	0.0016	18.9	1.425 32	49.97	0.23~9.7
SrF ₂	130	0.011	18.1	1.429 135	49.87	0.21~11.5
BaF ₂	82/3	0.17	18.4	1.465 55	73.05	0.27~10.3
F-silica	461	Insoluble	0.5	1.442 17	20.14	0.21~3.71
Al ₂ O ₃	1370/9	Insoluble	6.65	1.743 55	23.6	0.2~5.5
ZnSe *	120	Insoluble	7.1	2.451 6	23.36	0.55~18
ZnS *	160	Insoluble	6.6	2.268 95	37.4	0.42~18

同的工艺方式得到的材料在短波红外段的透过率会有很大的不同,使用时应当注意.

氟化物玻璃从紫外到红外有着很宽的透过范围,值得注意的是在紫外-可见段有较小色散的一些氟化物晶体到红外段色散变大,因而在近紫外段能校正色差的氟化物玻璃组合^[5]在短波红外段却不适用.

CaF₂、SrF₂ 和 BaF₂ 这三种氟化物玻璃具有较低的色散(色散系数 ν 值较大),可作为消色差时正透镜使用的材料,可作为负透镜使用的高色散材料(色散系数 ν 值较小)看上去有更多的选择:F-silica、Al₂O₃ (Sapphire)、ZnSe 和 ZnS 以及在红外段有较高透过率的 SCHOTT 光学玻璃 PK₅₂、SF₄、SF₆ 等.

2 设计实例

目前常用的光学透镜设计方法是选用已有的光学透镜结构参量采用置换玻璃的方法直接优化,但在近紫外波段和短波红外波段,由于可选用的光学材料少这种直接换玻璃的方法并不十分有效,因而一个透镜的设计仍然需要从基本的结构型式出发分析系统的特点求解其结构参量.

2.1 光学系统结构及设计要点

望远物镜一般具有较长的焦距,为了缩短物镜的尺寸,常采用远距型结构^[8-9],这种物镜的一种基本结构形式如图 1.前组具有正的光焦度,后组具有负的光焦度.

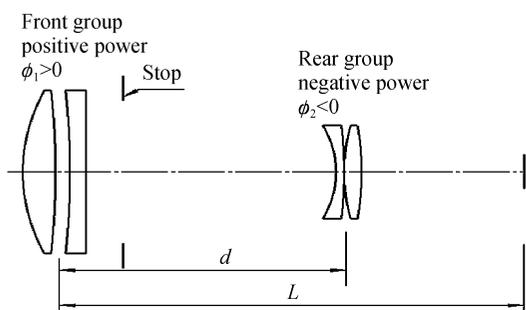


图 1 远距型物镜的基本结构型式
Fig. 1 Essential configuration of telephoto objective

由于在 0.9~2.5 μm 的工作波段,适宜用的胶合材料并不确定,因而初始结构的选取以不采用胶合件的分离式结构为宜.

对于远距型物镜,系统光焦度有

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 \quad (1)$$

为减小前组的光焦度负担,光焦度分配时,取 $L = 0.85 \sim 1f'$

同时,当 $d = 1/2L$ 时,后组有最小的光焦度.

初始结构的光焦度可依据上述原则进行分配,后组采用两片式结构,其中第一片取弯向光阑的形状以有利于像散的校正.初始光阑的位置可选择放在前组上.前组可暂取为正负分离的两片式结构,初始形状可取为平凸结构,这样在光焦度分配完毕及材料选定后即可得到初始结构参量.

对图 1 的基本结构型式进行光线追迹以分析其像差特性,发现除色差未得到校正外,与视场相关的像差-场曲、像散均较大,简单的对其进行优化是无法满足要求的,必须进行人工干预对其复杂化.由于前组承担更大的光焦度及光线偏角,其结构的复杂化更多地是用来进行球差及色球差的校正,因而对轴外像差的校正考虑调整后组的结构以增加系统校正像差的能力,而校正场曲主要用正负光焦度分离的办法来实现,为了不增加后组结构的复杂性,采用一个弯月型的厚透镜就能够起到正负光焦度分离的功能,而像散的校正通过改变透镜的弯曲来实现.如图 2,在后组中引入一背向光阑的厚弯月镜以增加

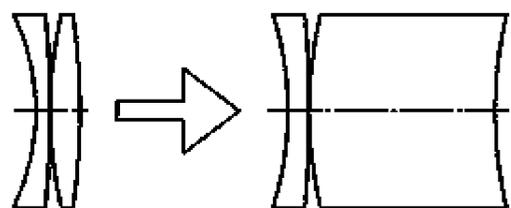


图 2 后组中采用背向光阑的厚透镜
Fig. 2 Thick meniscus element is introduced to enhance aberration correction powers

校正场曲和像散的能力. 像差分析表明厚透镜的引入不但增加了轴外像差的校正能力,同时还增加了与前组反向的色差,对于全系统的像差校正是非常有利的.

远距型物镜的前组是消色差设计的关键,在基本结构型式采用 CaF_2 与 SiO_2 两片式双分离的结构型式,尽管在可见光谱段 CaF_2 与低色散系数的玻璃组合能够有效地校正二级光谱,但在短波红外段,这样一组二片式玻璃组合是不足以校正二级光谱的,必须复杂化以进行色差的校正.

三片式的玻璃组合能减小二级光谱而不必像二片式玻璃组合那样严格的匹配材料的部分色散. 将前组复杂化为三片式,并用 $++-$ 、 $+-+$ 、 $-++$ 三种不同光焦度的组合方式进行光线追迹以分析其像差特性. 透镜的弯曲形状弯向光栏以有利于球差的校正.

复杂化后的光学系统结构型式如图 3. 后组镜片均采用石英玻璃.



图 3 复杂化后的远距型物镜结构

Fig. 3 Complicated configuration of the telephoto lens

一个好的初始结构是进行像差优化设计的必要前提,对复杂化后的结构进行光线追迹并分析其像差特点,在前组中采用 $++$ 的光焦度组合更有利于前后组像差平衡,对该结构进行优化是能够得到一个好的像差结果的.

2.2 设计结果

色散系数 $\nu_{1.7}$ 的计算旨在设计的初始阶段提供选择消色差玻璃材料的方向,在三片式的前组中低色散系数的负透镜材料看上去有更多的选择,但在设计过程中发现并非如此,尽管石英玻璃是一种性能优良的材料,但无论何种组合校正色差的效果并不理想,其它在短波红外有高透过率低色散系数的材料对色差的校正能力亦有限,尤其是对二级光谱的校正.

对于二级光谱的校正来说只有当相对部分色散很小,阿贝常量差又足够大的玻璃组合,才能得到校正的结果^[3]. 由于普通光学玻璃在 $1\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 区间色散变化特性^[2],因此考虑其在短波段的相对部分色散以完成对二级光谱的校正,同时应当增加在短波段的谱线计算密度以较准确地评价系统像质.

表 3 计算并给出了几种材料在波长 $1.3\ \mu\text{m}$ 的相对部分色散值,一些重火石类光学玻璃不仅在 $2\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 段有较高的透过率,其色散在可见光段

与短波红外段的变化亦较小. BaF_2 与重火石类玻璃 SF_4 、 SF_6 这两种材料其阿贝数相差足够大, $P_{1.3}$ 的相对部分色散接近,因此与这两种材料的组合是可以较好地校正色差的.

表 3 一些材料在 $1.3\ \mu\text{m}$ 的相对部分色散

材料	$P_{1.3} = \frac{n_{0.9} - n_{1.3}}{n_{0.9} - n_{2.5}}$	色散系数 $\nu_{1.7}$
CaF_2	0.28	49.97
BaF_2	0.37	73.05
SF_6	0.347	22.59
SF_4	0.336	22.86
PK_{52}	0.26	37.44
F-Silica	0.22	20.14
Sapphire	0.23	23.6

所设计的物镜焦距 $f' = 800\ \text{mm}$, 视场 $2\omega = 10^\circ$, 相对孔径 $D/f = 1/5.6$, 如图 3. 表 4 给出了光学系统结构参量,图 4~7 给出了物镜的几种像差结果.

表 4 光学系统结构参量 (焦距规范化为 100 mm)

半径/mm	厚度/mm	材料
49.647 48	3.12	SF_6
35.719 9	2.0	Air
57.105 94	3.33	BAF_2
-1 887.401	0.488	Air
26.360 43	4.13	CAF_2
57.243 7	1.04	Air
Stop	49.988	Air
-19.660 8	2.33	SILICA
-38.742 6	0.067	Air
56.773 92	33.54	SILICA
53.169 76	6.81	0

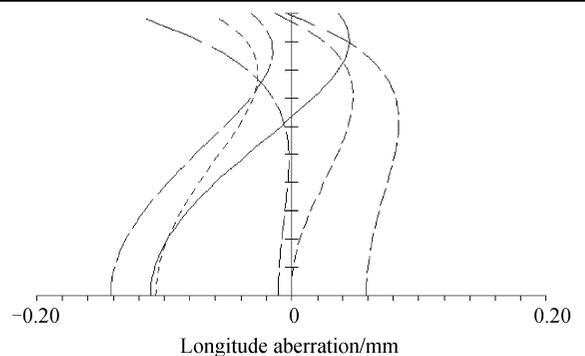


图 4 色球差曲线

Fig. 4 Longitudinal aberration curve

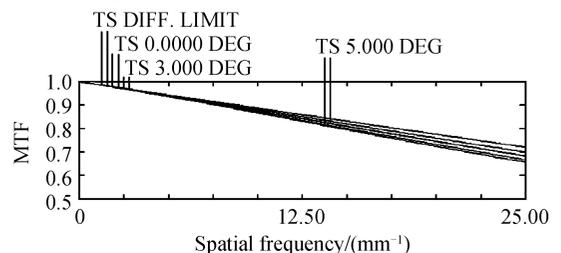


图 5 多色光 MTF 曲线

Fig. 5 Polychromatic diffraction MTF

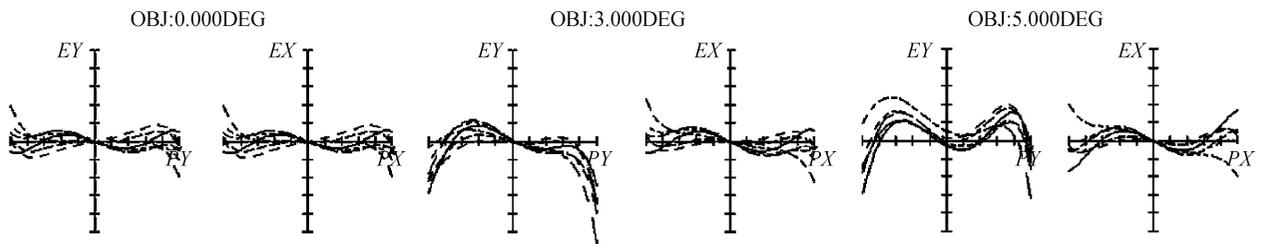


图6 光线像差曲线

Fig. 6 Transverse ray fan plot

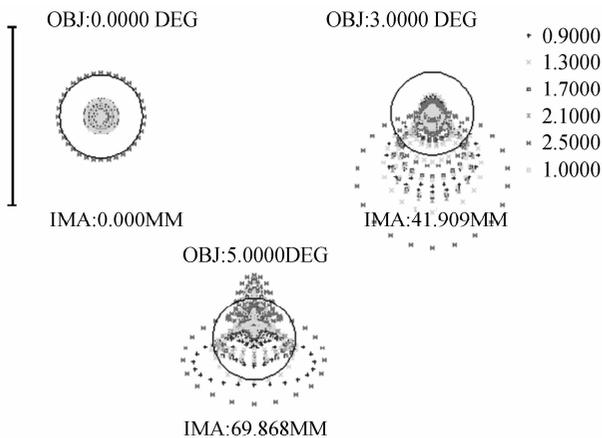


图7 点列图

Fig. 7 Spot diagram

对该结构而言,后组对像差的校正主要取决于结构型式,因而后组的材料除石英外还可以有更多的选择,如 PK_{52} 、Sapphire 和 CaF_2 优化后均可得到不错的设计结果。

在文献[9]中提到:利用前后组的光焦度符号不同,希望产生反号的二级光谱以相互抵消,但这在远距型的结构中是很难实现的,相反,远距结构对二级光谱产生不利影响。这是因为二级光谱的产生不仅与光焦度有关,与结构型式亦有很大关联,在这里所采用的厚弯月镜能产生一定量的反向色差以补偿轴向色差及倍率色差,尤其是倍率色差,这样能在很大程度上提高物镜的有效视场, 10° 的视场是一个接近衍射极限的视场,在一些不苛求成像质量必须达到或接近衍射极限的应用中,对于该结构而言,在 15° 的视场内进行优化仍然可以得到不错的像质。这种结构型式在焦距较短的情况下,厚透镜的实用性大为提高,其优良成像的视场也能提高到 20 多度。

3 小结及讨论

在短波红外 $0.9 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 可用于校正色差的玻璃组合并不是很多,一些氟化物玻璃在该波段具有较高的色散系数及相对较好的理化性能,因而是在该波段消色差材料的首选。虽然低色散系数材料有更多的选择,但重火石类材料与氟化物玻璃组合有较好的消色差能力。

在远距型的物镜结构中前组采用光学玻璃 SF_6 、 CaF_2 和 BAF_2 三片式组合,后组采用一带有厚弯月镜的两片式结构达到了复消色差的设计结果,所设计的望远镜在焦距 800 mm,相对孔径 1/5.6 时带孔径的最大色差 0.13 mm,视场角 10° 时的像质接近衍射极限,成像质量优良。

参考文献

- [1] CAI Yi, HU Xu. Short wave infrared imaging technology and its defense application. *Infrared and Laser Engineering* 2006, **35**(6): 6643-647.
蔡毅,胡旭. 短波红外成像技术及其军事应用[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(6): 643-647.
- [2] BRUCE H. Lens design for the near IR... correction of primary chromatic aberration[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(10): 8072-8073.
- [3] CHANG Qun. Corpus of optical design [M]. Beijing: Science Press, 1976: 85-99.
常群. 光学设计文集[M]. 北京: 科学出版社, 1976: 93-99.
- [4] ZENG Ji-yong, JIN Guo-fan, WANG Min-qiang, et al: Hybrid diffractive-refractive apochromatic telescope objectives design using PWC method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(10): 1570-1572.
曾吉勇, 金国藩, 王民强, 等: 折衍混合复消色差望远镜设计的 PWC 方法[J]. 光子学报, 2006, **35**(10): 1570-1572.
- [5] BAI Qing-lan, MIAO Xin-hua. Achromatized design of Near UV-Visible wide-angle objective[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1331-1335.
白清兰, 苗兴华. 消色差的近紫外-可见光广角物镜设计[J]. 光子学报, 2004, **33**(11): 1331-1335.
- [6] Catalog of optical materials. Opto-Technological Laboratory, <http://www.optotl.ru>.
- [7] Infrared and ultra violet optical material. Crystran Ltd, <http://www.crystran.co.uk>.
- [8] WANG Zhi-jiang. Handbook of optical technology [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994: 1078-1088.
王之江. 光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 1078-1088.
- [9] Movie lens design group. Optical design of movie camera lens [M]. Beijing: China Industry Press, 1971: 155-163.
电影镜头设计组. 电影摄影物镜光学设计[M]. 北京: 中国工业出版社, 1971: 155-163.

Apochromatized Design of Teleobjective in Short Wave Infrared Band

BAI Qing-lan

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Received date: 2007-09-17

Abstract: Dispersions of some conventional optical glasses and some crystal materials were analyzed in $0.9 \sim 2.5 \mu\text{m}$ bands. In the telephoto objective configuration, rear group introduced a thick meniscus element to produce the reversed color aberration to compensate secondary spectrum that remained by front group. Zonal chromatic aberration of the objective is 0.13 mm at focal length 800 mm, and the triplet combination of the fluorite glasses and some heavy flint type glass is effective to correct color aberrations.

Key words: SWIR; Lens Design; Chromatic aberration correct; Apochromatize; Telephoto objective



BAI Qing-lan was born in 1963 and graduated from University of Shanghai for Science and Technology in 1983. Currently she is a senior engineer at Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her research interests focus on optical instruments in particular lens design, optical system design from UV to the thermal infrared.