文章编号：1002-2082(2010)03-0360-05

宽谱段光学系统消二级光谱的设计

王美钦[1,2]，王忠厚[1]，白加光[1]
（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：利用修正的部分色散（P）和阿贝数（V）公式，计算一些典型的普通光学玻璃在450 nm～950 nm波段的色散特性，应用二级光谱理论，采用普通光学材料，设计了一个复消色差系统，分析近红外波段光学系统的二级光谱特性及校正方法，给出设计实例。设计结果表明：在可见光近红外波段，采用重冕玻璃ZK4、ZK8和特种火石玻璃TF3组合实现了二级光谱色差的校正，即从理论的0.18 mm减少到0.084 mm，证明该系统有较好的消色差能力，并且具有较长的后截距，为安装像移补偿反射镜提供了方便。

关键词：宽谱段；二级光谱；折射系统；光学设计
中图分类号：TN202；TH703　　**文献标志码**：A

Removing secondary spectrum in wide spectrum optical system

WANG Mei-qin[1,2], WANG Zhong-hou[1], BAI Jia-guang[1]
(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The partial dispersion of some typical glasses working on near infrared band was calculated with the formulas in which P and V were modified. The apochromatism of a wide band system was designed and analyzed. The result shows that the combination of the heavy crown glasses ZK8, ZK4 and special flint type TF3 is effective to correct secondary spectrum. Zonal chromatic aberration of the optical system is decreased from theoretic 0.18 mm to 0.084 mm in wide spectrum. The rear cut-off length of optical system is long enough for the reflector to image shifting compensation.

Key words: optical design; wide bands; refractive system; secondary spectrum

引言

光谱成像是一种将光谱分析与图像处理相结合的技术，已成功地应用于航空航天遥感、军事侦察和农业、灾害监测等方面，是近年来研究的热点。高光谱成像仪能够在连续谱段上对同一目标成像，可直接反映出被观测物体的光谱特征，甚至物体表面物质的成分。在一般的光学系统设计中，二级光谱不会影响系统的成像质量，不需要校正。但是，对于高分辨率的成像光谱仪系统，由于谱段较宽，二级光谱的校正是十分必要的[1]。通常采用特殊光学材料如萤石(CaF2)、氟冕玻璃等来校正二级光谱，但因材料昂贵而很少使用。国内外对二级光谱及复消色差问题已有很多研究[2]，如采用本征色差校正二级光谱[3]，但其光学系统工作距离大，长度长，不满足系统小尺寸要求；如二元光学元件与另一种玻璃组合成透镜组来复消色差[4]，但二元光学的工艺水平有限，难满足航空航天的环境要求。上述方法都仅限于可见光范围内讨论。现代光学系统中通常

收稿日期：2009-09-23；　**修回日期**：2010-01-26
作者简介：王美钦(1984－)，女，硕士研究生，主要从事光学设计方面的研究工作。E-mail：wangmeiqin.1984@163.com

采用CCD作为探测器件,其光谱响应范围宽,形成了独特的光学设计要求。

为了满足宽谱段光学系统消二级光谱,本文基于像差理论,结合CCD探测器件和修正的部分色散(P)和阿贝数(V)公式,应用二级光谱理论,采用普通光学材料设计了一个复消色差系统。同时为了满足像移补偿,在光学设计时保留了足够长的后截距来安装补偿反射镜。

1　传统折射式光学系统的二级光谱色差分析

系统的F光和C光消色差后,D光与F光或C光的色差为二级光谱色差[5],F光与D光的总色差等于密接薄透镜组各部分的色差之和,即

$$\sum\Delta\varphi_{FD}=(n_{F1}-n_{D1})c_1(n_{F1}-n_{D1})c_2=\frac{(n_{F1}-n_{D1})*(n_{F1}-n_{C1})*(n_{D1}-1)}{(n_{F_1}-n_{C1})*(n_{D1}-1)}*c_1+\frac{(n_{F2}-n_{D2})*(n_{F2}-n_{C2})*(n_{D_2}-1)}{(n_{F2}-n_{C2})*(n_{D2}-1)}*c_2=P_1*\varphi_1/V_1+P_2*\varphi_2/V_2 \tag{1}$$

式中:c为透镜前后面的曲率差;P为材料的部分色散。

根据薄透镜的消色差条件:

$$\varphi_1/V_1+\varphi_2/V_2=0 \tag{2}$$

和光焦度组合公式:

$$\varphi=\varphi_1+\varphi_2 \tag{3}$$

可以求出:

$$\varphi_1/V_1=\frac{\varphi}{V_1-V_2} \tag{4}$$

$$\varphi_2/V_2=\frac{\varphi}{V_2-V_1} \tag{5}$$

将(4)式和(5)式代入(1)式可得

$$\sum\Delta\varphi_{FD}=\frac{P_1-P_2}{V_1-V_2}*\varphi \tag{6}$$

$$\Delta L_{FDC}=-\frac{1}{\varphi_2}\Delta\varphi=-f*\frac{P_1-P_2}{V_1-V_2} \tag{7}$$

由(7)式可知,对于一定焦距的透射光学系统,二级光谱色差的大小与系统结构参数无关,完全由玻璃的色散特性决定。对于一定玻璃组合的透射光学系统,二级光谱色差的大小与系统焦距成正比,比例系数与玻璃的组合有关。所以校正二级光谱色差,要尽量选择阿贝数相差较大、部分色散相同或相近的玻璃。

由于接收器件的响应谱段很宽(450 nm～950 nm),在校正二级光谱时,传统可见光范围内的光学系统计算公式已经不能满足宽谱段的设计。因此需要更符合实际需要,更宽谱段的消二级光谱的计算方法。

根据光学系统校正二级光谱色差及其他像差的要求,选择谱线450 nm和950 nm作为消色差谱线,谱线700 nm作为消单色像差谱线,则修正的部分色散(P)和阿贝数(V)[6]表达式为

$$P_{\lambda3}=\frac{N_{\lambda_3}-N_{\lambda_1}}{N_{\lambda_1}-N_{\lambda_2}} \tag{8}$$

$$V=\frac{N_{\lambda_3}-1}{N_{\lambda_1}-N_{\lambda_2}} \tag{9}$$

式中:$\lambda_1=450$ nm;$\lambda_2=950$ nm;$\lambda_3=700$ nm;N为玻璃的折射率。

根据修正的部分色散(P)和阿贝数(V),计算各种玻璃在450 nm～950 nm波段的部分色散和阿贝数,几种典型玻璃材料的数据如表1所示。

通过计算各种玻璃修正后的部分色散(P)和阿贝数(V),可以看出大部分玻璃材料在可见光近红外波段的部分色散值和阿贝数值在一条直线上,其斜率近似等于－0.003,在传统可见光范围内其斜率近似等于－0.000 4。由公式(7)可知,对于这样宽谱段的光学系统而言,两种材料连线的斜率越大,其组成的双胶合透镜组的二级光谱色差越大,因此二级光谱色差严重影响成像系统的质量。

材料LAF5,FK1,TF1,TF2,TF3偏离该直线,具有较强的消二级光谱色差能力,但LAF5,FK1,TF1,TF2化学稳定性较差,光学工艺性欠佳,难于在工程上实现。ZK8,ZK4,ZK5,ZK10化学稳定性和光学工艺性好,而且部分色散P值与TF3的部分色散值相当,阿贝数V值相差较大,它们之间的组合具有相对较强的消二级光谱色差的能力。

玻璃ZK8和TF3组合消二级光谱色差能力分析如下。设光学系统的焦距为200 mm,以符合阿贝公式的两种常规玻璃K9和F2为基准玻璃,计算系统的二级光谱色差大小:

$$\Delta L_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}=\frac{P_{K9}-P_{F2}}{V_{K9}-V_{F2}}*f=0.54\text{ mm} \tag{10}$$

表 1　玻璃色散特性分析

Table 1　Characteristics of glass dispersion

玻璃牌号	λ_3/700 nm	λ_1/450 nm	λ_2/950 nm	部分色散(P)	阿贝数(V)
LAF5	1.776 448 6	1.803 801 5	1.767 023 7	0.743 4	21.111 8
ZBAF3	1.651 146 8	1.670 777 6	1.644 277 8	0.740 8	24.571 8
FK1	1.483 326 1	1.492 399 2	1.479 942 7	0.728 4	38.801 1
ZK8,ZK5, ZK10,ZK4	1.604 091 4～ 1.617 110 2	1.619 860 2～ 1.633 829 7	1.598 079 3～ 1.611 069 0	0.724 0～ 0.737 2	26.444 8～ 27.734 9
LAF1,LAF2,LAF3, LAF4,LAF6,LAF9, LAF10,LAK3,LAK7, LAK8,LAK12	1.691 106 6～ 1.777 851 2	1.710 002 3～ 1.805 206 5	1.683 916 4～ 1.768 446 5	0.724 4～ 0.746 8	16.775 0～ 26.493 5
TF1,TF2	1.524 856 1, 1.548 777 8	1.540 454 9, 1.566 201 8	1.519 033 6, 1.542 606 8	0.728 3～ 0.738 5	23.258 2～ 24.505 0
TF3	1.606 184 5	1.627 424 2	1.598 419 3	0.732 2	20.897 2
K2,K7,K9, K11,K12	1.496 942 2～ 1.529 235 9	1.508 467 5～ 1.543 893 9	1.492 303 2～ 1.523 965 1	0.713 0～ 0.735 5	26.556 3～ 30.743 2
F2,F4,F7	1.605 698 1～ 1.628 518 6	1.631 193 1～ 1.656 220 9	1.597 440 4～ 1.619 710 4	0.755 3～ 0.758 7	15.476 6～ 17.675 1

以 ZK8 和 TF3 两种玻璃为例,计算光学系统的二级光谱色差为 0.18 mm,因此,ZK8 和 TF3 透镜组具有较好的消二级光谱色差能力。同时,考虑到工作环境对玻璃材料的要求,在设计时选用了 ZK8、ZK4 和 TF3 3 种玻璃进行组合。

2　设计实例及基本结构的选型

设计要求:焦距 $f=200$ mm,视场角 $2w=24°$,F 数为 5,光谱范围为 450 nm～950 nm,像元尺寸 10 μm×10 μm。

根据设计要求,常用的结构形式有远距型、三片型、匹兹瓦型和双高斯型。远距型采用正组和负组分离的形式,可以缩短筒长,校正场曲,但由于普通玻璃的相对色散都很接近,消除高级像差需要的光学系统结构复杂。三片型采用简单的结构能够校正全部 7 种初级像差,一般采用正-负-正的结构形式,但轴外高级像差比较大,相对孔径比较小。匹兹瓦型采用分离的正组和正组形式,这种形式可以降低二级光谱色差,但增加了场曲,筒长大于焦距,结构不够紧凑。而双高斯型采用对称结构,垂轴像差容易校正,简化系统设计,并且视场、相对孔径较大,因此本文采用双高斯形式。

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的。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[7]。其复消色差方程组如下所示:

$$\Phi_1+\Phi_2h_2+\Phi_3h_3=\Phi \tag{11}$$

$$\frac{\Phi_1}{v_1}+\frac{h_2^2\Phi_2}{v_2}+\frac{h_3^2\Phi_3}{v_3}=0 \tag{12}$$

$$\frac{\Phi_1}{v_1}P_1+\frac{h_2^2\Phi_2}{v_2}P_2+\frac{h_3^2\Phi_3}{v_3}P_3=0 \tag{13}$$

式中:Φ_1、Φ_2、Φ_3 分别是玻璃 ZK8,ZK4 和 TF3 的光焦度;h_1、h_2、h_3 分别是光束在透镜上的入射高度;(11)式中一般将 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。

在设计中,简单地按薄透镜处理,将 h_1、h_2、h_3 都规划为 1,从而求得的光焦度分配如下:

ZK8:Φ_1　−0.380 3

ZK4:Φ_2　0.342 8

TF3:Φ_3　0.042 5

该系统按照上述计算过程进行光焦度分配,并且计算结果不包含透镜的前后放置顺序,因此,在设计中应当注意如何组合透镜。由于光学系统的视场角较大,轴外像差影响成像质量,故将系统分为前后 2 个透镜组,对其进行光线追迹并分析像差特性,发现色差未得到校正,与视场相关的场曲、像散也较大。因此,简单的进行优化是无法满足要求的,必须进行复杂化设计。由于前组的光焦度及光线偏角较大,结构的复杂化更多地是用来校正球差和色球差,因而通过调整后组的结构来校正轴外像差,并在前后透镜组之间的空气间隔中,加入一个近似平板玻璃的厚透镜来产生光阑球差,使系统的高级

像散和高级球差减小,改善轴外像点的质量。同时光学系统在工作时需要进行像移补偿,故设计时要保留较大的后截距以安装补偿反射镜。

3　设计结果及像质评价

在得到初步的设计结构后,用ZMAX光学设计软件[8]进行光路优化设计及像差平衡,最终的光学系统结构如图1所示。系统总长度为140 mm,后截距为76 mm,满足筒长要求。

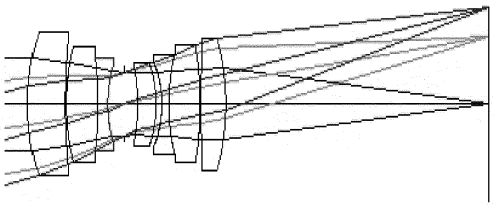

图1　光学系统的结构图

Fig. 1　The layout of the system

调制传递函数(MTF)可以全面反映光学系统的成像质量,像质高的光学仪器一般都具有达到或接近衍射极限的调制传递函数。该光学系统的调制传递函数曲线如图2所示。系统在空间频率50 lp/mm处,无论是弧矢平面(S)还是子午平面(T),MTF值都大

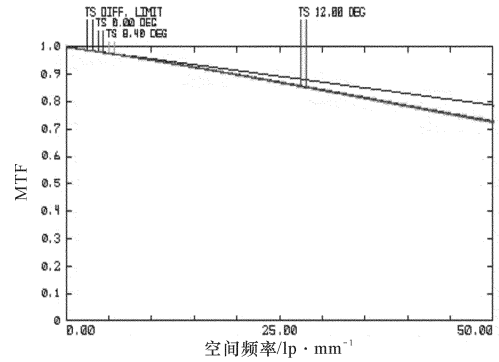

图2　光学系统的调制传递函数(MTF)

Fig. 2　MTF of the system

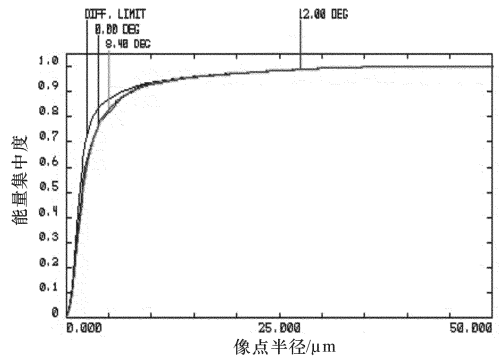

图3　光学系统的衍射能量分布曲线

Fig. 3　Diffraction encircled energy of the system

于0.72,接近衍射极限。由图4可以看出,二级光谱色差约为0.084 mm,实现了二级光谱的校正,满足成像系统的质量要求。系统能量分布图如图3所示,点列图如图5所示。轴上弥散均方根半径为2.069 μm,0.7视场均方根半径为2.112 μm,全视场均方根半径为2.600 μm,可见该光学系统在整个视场范围内,成像质量分布比较均匀。

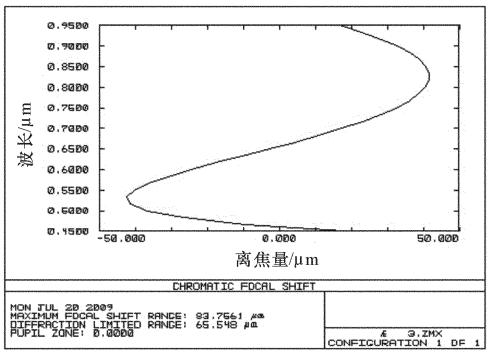

图4　光学系统的近轴色差曲线

Fig. 4　Paraxial color curve of the system

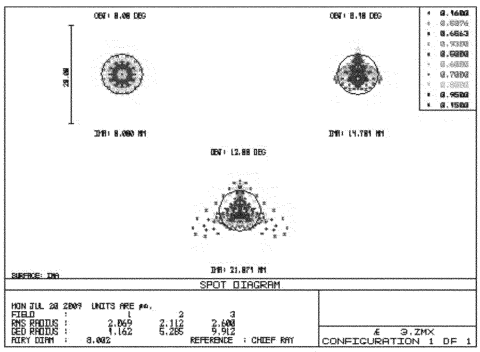

图5　光学系统的点列图

Fig. 5　Spot diagram of the system

5　结论

本文根据修正的部分色散P值和阿贝数V值,对近红外波段玻璃材料的色散特性进行了研究,并进行了光焦度的分配,设计了波长范围为450 nm～950 nm,焦距为200 mm,视场角24°的宽谱段消二级光谱色差的折射式光学系统。像质评价曲线表明,该系统在较宽谱段内很好地实现了二级光谱色差的校正,并且成像质量良好,系统结构体积较小,同时留有足够长的后截距用于安装像移补偿的反射镜,满足设计和实际要求。

参考文献:

[1]　赵顺龙,王肇圻.投影式头盔物镜设计在视空间的性能评价[J].光学学报,2006,26(5):730-735.

ZHAO Shun-long, WANG Zhao-qi. Optical assessment of a projection lens for head-mounted projective displays in visual space[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 730-735. (in Chinese with an English abstract)

[2] WYNNE C G. Secondary spectrum correction normal glasses[J]. OPT Commun., 1927, 21(3): 419-424.

[3] 史光辉. 利用本证色差校正二级光谱[J]. 光学学报, 1981, 1(5): 434-439.
SHI Guang-hui. Correction of secondary spectrum with intrinsic chromatism[J]. Acta Optica Sinica, 1981, 1(5): 434-439. (in Chinese with an English abstract)

[4] 崔庆丰. 用二元光学元件实现复消色差[J]. 光学学报, 1994, 14(8): 877-881.
CUI Qin-feng. Realization of three-color achromats with binary optical elements[J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(8): 877-881. (in Chinese with an English abstract)

[5] 袁旭昌. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
YUAN Xu-chang. Optical design [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1983. (in Chinese)

[6] 钟萍华, 胡玉禧, 周绍祥, 等. 基于S-L图的复消色差方法[J]. 光子学报, 2004, 33(5): 589-592.
ZHONG Ping-hua, HU Yu-xi, ZHOU Shao-xiang, et al. Designed method of apochromatic system based on S-L chart[J]. Acta Photonoca Sinica, 2004, 33(5): 589-592. (in Chinese with an English abstract)

[7] 陈立武, 杨建峰, 洪新华, 等. 宽谱段折射式长焦光学镜头[J]. 光子学报, 2004, 33(9): 1123-1126.
CHEN Li-wu, YANG Jian-feng, HONG Xin-hua, et al. Wide bands long focal refracting lens[J]. Acta Photonoca Sinica, 2004, 33(9): 1123-1126. (in Chinese with an English abstract)

[8] GEARY J M. Introduction to lens design with practical ZEMZX examples[M]. USA: Willmann-Bell, Inc, 2002.

[9] 杨庆华, 赵葆常, 周仁魁. 基于正常色散玻璃二级光谱的校正[J]. 光子学报, 2008, 37(4): 772-775.
YANG Qing-hua, ZHAO Bao-chang, ZHOU Ren-kui. Correction of secondary spectrum based on normal dispersion glasses [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(4): 772-775. (in Chinese with an English abstract)

[10] JOHNSON R. Very-broad spectrum afocal telescope[J]. SPIE, 1998, 3482: 9.

[11] 李士贤. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
LI Shi-xian. Optical design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)