

宽波段光学系统三级光谱的校正方法

王靖锋^{**}, 崔庆丰^{*}

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 提出了一种子波段缝合光学玻璃组合的选择方法,通过最小二乘法求解复消色差方程,得到了能有效校正三级光谱的最优化玻璃组合。基于该组合设计了一个宽波段长焦距光学系统,该系统的波长范围为 $0.45\sim 1.014\ \mu\text{m}$,焦距为 $400\ \text{mm}$,F数为6,全视场角为 10° 。系统共有3种光学玻璃,7片球面透镜,调制传递函数(MTF)接近衍射极限。研究结果表明,所提方法可以在复消色差光学系统中实现三级光谱残差的校正。

关键词 光学设计;复消色差;三级光谱;光学玻璃组合

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1122002

Calibration Method of Tertiary Spectrum for Broadband Optical Systems

Wang Jingfeng^{**}, Cui Qingfeng^{*}

College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A selection method for the sub-band stitching optical glass combination is proposed. The apochromatic equation is solved by the least square method, and the optimal glass combination which can effectively correct the tertiary spectrum is obtained. A broadband long-focus optical system is designed based on this optical glass combination with a wavelength range of $0.45\sim 1.014\ \mu\text{m}$, a focal length of $400\ \text{mm}$, an F number of 6, and a full field of view of 10° . This system consists of three kinds of optical glasses and seven spherical lenses, and the modulation transfer function (MTF) of this system is closed to the diffraction limit. The research results show that the calibration of the tertiary-spectral residuals in the apochromatic optical system can be achieved with this proposed method.

Key words optical design; apochromatism; tertiary spectrum; optical glass combination

OCIS codes 220.3620; 220.1000

1 引言

在消色差系统中,残余色差以二级光谱的形式存在,当对成像质量要求更高时,需要对二级光谱进行校正^[1-2]。已校正二级光谱的系统称为复消色差光学系统。在需要更进一步提高光学系统的分辨率时,需要对复消色差光学系统中的三级光谱进行校正。

校正色差可利用基于几何图形和数学方法求解出的最佳玻璃组合^[3-7]。这些方法有助于由两种或三种玻璃组成的简单系统的二级光谱的校正。但是,当光学系统变得更复杂时,波段加宽,所使用的光学玻璃种类增多,这些方法不再适用。此外,还有研究者提出使用基因优化算法^[8]来优化玻璃选择。尽管

这种方法可以得到非常好的结果,但计算量大,即使对于简单的光学系统也需要对大量的数据进行处理。

为了能够快速选择复消色差,得到可对三级光谱进行校正的最佳光学玻璃组合,本文提出了一种子波段缝合的方法,对设计波长进行拆分和缝合,并针对拆分和缝合后产生的子波段进行复消色差以选择最佳的光学玻璃组合。

2 光学玻璃选择方法

单透镜与消色差系统的初级轴向色差曲线与二级光谱曲线分别如图1(a)、(b)所示,其中 F 为焦点。可以看出,消色差光学系统的轴向色差曲线呈U形,并具有一个拐点,可以使消色差波长对应相

收稿日期: 2018-05-18; 修回日期: 2018-05-28; 录用日期: 2018-06-13

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(51-H34D01-8358-13/16)

* E-mail: qf_cui@163.com; ** E-mail: custwangsl602@163.com

同的焦面位置。图 1(c)、(d)所示为复消色差透镜系统的典型轴向色差曲线,可以看出,复消色差光学系统的轴向色差曲线有两种形式:一种为 S 形,该曲线具有两个拐点,可以使得两个边缘波长与中心波长对应同样的焦平面位置,两边缘波长与中心波长之间的波长对应的焦面位置相对复消色差焦平面位置的距离即为三级光谱;另一种为 W 形,该曲线具有三个

拐点,故其对应的三级光谱残余量要小于 S 形的^[9]。

校正三级光谱就是在指定的光谱范围内对 4 个波长校正轴向色差,使得 4 个波长对应的焦面位置重合^[10]。对于图 1(d)所示的这种情况,将焦平面向左移动一点就可以产生 4 个焦点,因此能够产生 W 形轴向色差曲线的复消色差光学系统,其三级光谱已经得到了校正。

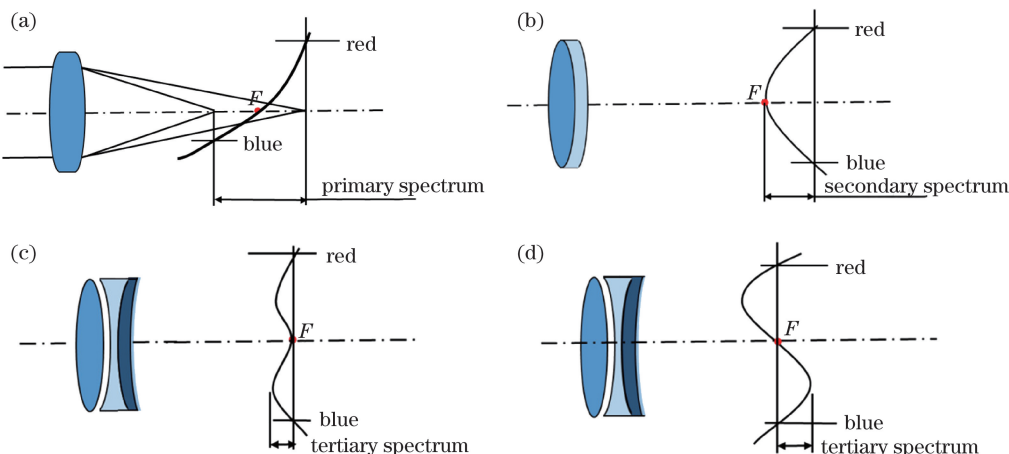


图 1 光谱。(a)初级色差;(b)二级;(c)三级,S形;(d)三级,W形

Fig. 1 Spectra. (a) Primary; (b) secondary; (c) tertiary, S-shaped; (d) tertiary, W-shaped

为了能够产生 W 形的轴向色差曲线,除对边缘波长和中心内波长进行复消色差外,还要考虑其余波长。为能引入其余波长,采用子波段缝合型复消色差校正方法。

2.1 子波段缝合光学玻璃组合的选择方法

由 j 种玻璃构成的薄透镜模型如图 2 所示,为了使该系统能够对某一波段实现复消色差^[11],有

$$\sum_{i=1}^j \phi_i = 1, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^j \phi_i \frac{1}{\nu_i} = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^j \phi_i \frac{P_i}{\nu_i} = 0, \quad (3)$$

式中 ϕ_i 为第 i 个透镜的光焦度; P_i 为第 i 个透镜所使用的材料的相对部分色散系数; ν_i 为第 i 个透镜所使用材料的色散系数。为了能够实现对多色焦点偏移曲线的控制,需要对整个设计波段进行拆分再缝合,过程如图 3 所示。设这个波段中含有 m 个特征波长($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 且 $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_m$),相邻的三个特征波长构成一个子波段区间,并将其作为缝合的基本元素。一级缝合是在基础子波段 $\lambda_{i-1}, \lambda_i, \lambda_{i+1}$ 上引入一个相邻的特征波长 λ_{i+2} ,将新引入的波长作为边缘波长,以原有的中心波长 λ_i 和边缘波长 λ_{i+1} 分别作为新生成的范围更大的子波段区间各

自的中心波长,生成两个新的子波段区间作为一级缝合的结果,即 $\lambda_{i-1}, \lambda_i, \lambda_{i+2}$ 与 $\lambda_{i-1}, \lambda_{i+1}, \lambda_{i+2}$ 。例如,以 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 所构成的子波段作为基础子波段,一级缝合在其基础上加入 λ_4 ,一级缝合产生的结果是以 λ_1, λ_4 作为边缘波长,以 λ_2, λ_3 作为中心波长的两个子波段区间,即 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_4$ 与 $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_4$ 。二级缝合则是在一级缝合的基础之上进一步引入一个相邻的特征波长,并将其作为新的子波段区间的边缘波长,再重复缝合的过程。以此类推直至包含 m 个特征波长的 m 级缝合,覆盖整个设计波段。

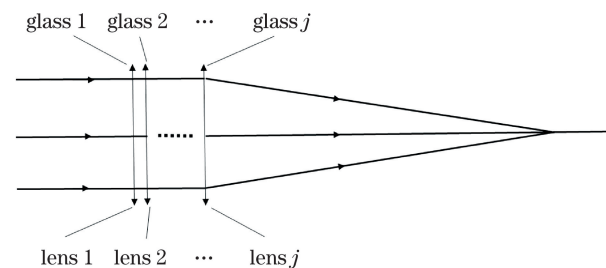


图 2 薄透镜系统示意图

Fig. 2 Schematic of thin lens system

对全部的光学玻璃重新计算相对于每个基础子波段区间以及缝合产生的新子波段区的相对部分色散 P 和色散系数 ν ,同时计算 $\frac{1}{\nu}$ 与 $\frac{P}{\nu}$ 的值,分别记为 V 与 ξ 。则由(2)、(3)式可以得到

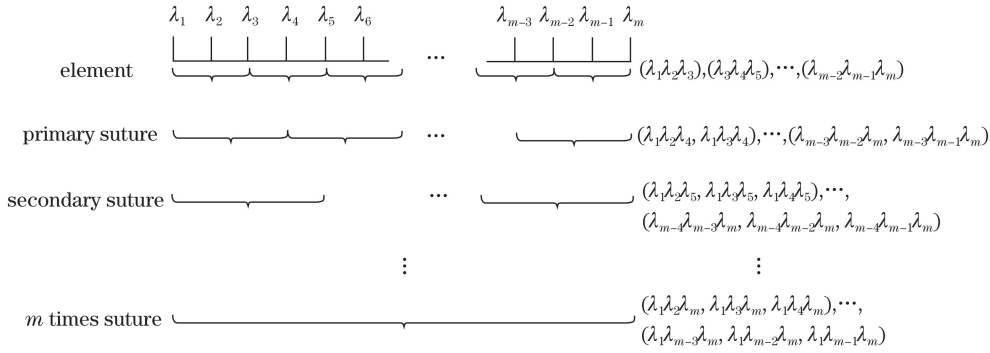


图 3 波段的拆分与缝合

Fig. 3 Splitting and stitching of frequency bands

$$\begin{bmatrix} V_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}^1 & V_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}^2 & V_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}^3 & \cdots & V_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}^j \\ V_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4}^1 & V_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4}^2 & V_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4}^3 & \cdots & V_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4}^j \\ V_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4}^1 & V_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4}^2 & V_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4}^3 & \cdots & V_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4}^j \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m}^1 & V_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m}^2 & V_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m}^3 & \cdots & V_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m}^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \vdots \\ \phi_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \xi_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}^1 & \xi_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}^2 & \xi_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}^3 & \cdots & \xi_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}^j \\ \xi_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4}^1 & \xi_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4}^2 & \xi_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4}^3 & \cdots & \xi_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4}^j \\ \xi_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4}^1 & \xi_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4}^2 & \xi_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4}^3 & \cdots & \xi_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4}^j \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \xi_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m}^1 & \xi_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m}^2 & \xi_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m}^3 & \cdots & \xi_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m}^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \vdots \\ \phi_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中各参数 $\xi_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3} = \frac{P_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}}{\nu_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}}$, $\xi_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4} = \frac{P_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4}}{\nu_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4}}$, $\xi_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4} = \frac{P_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4}}{\nu_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4}}$, \dots , $\xi_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m} = \frac{P_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m}}{\nu_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m}}$, $V_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3} = \frac{1}{\nu_{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}}$, $V_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4} = \frac{1}{\nu_{\lambda_1\lambda_2\lambda_4}}$, $V_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4} = \frac{1}{\nu_{\lambda_1\lambda_3\lambda_4}}$, \dots , $V_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m} = \frac{1}{\nu_{\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m}}$; V 与 ξ 的下角标代表计算波段, 上角标代表不同的玻璃。

将(4)、(5)式中由 V 与 ξ 构成的矩阵分别记为 \bar{V} 与 $\bar{\xi}$, 故(4)、(5)式可合写为

$$\begin{bmatrix} \bar{V} \\ \bar{\xi} \end{bmatrix} \cdot \bar{\Phi} = \mathbf{0}, \quad (6)$$

式中 $\bar{\Phi} = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_j]^T$; T 表示矩阵的转置, 下同; $\mathbf{0}$ 为零矩阵。

故(1)式可写为

$$\bar{A} \cdot \bar{\Phi} = 1, \quad (7)$$

式中 $\bar{A} = [1 \ 1 \ \cdots \ 1]$ 。

将(6)、(7)式联立可以得到

$$\begin{bmatrix} \bar{A} \\ \bar{V} \\ \bar{\xi} \end{bmatrix} \cdot \bar{\Phi} = \bar{a}, \quad (8)$$

式中 $\bar{a} = [1 \ 0 \ \cdots \ 0]^T$ 。(8)式即为 j 块光学玻璃对 m ($m > j$) 个波长的复消色差条件。

对所设计波段的拆分和缝合使得方程的数量多于未知数的数量, 故(8)式无解。在这种情况下使用最小二乘解作为方程的近似解。令矩阵参量

$$\bar{H} = \begin{bmatrix} \bar{A} \\ \bar{V} \\ \bar{\xi} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

则有

$$\widehat{\bar{\Phi}} = (\bar{H}^T \cdot \bar{H})^{-1} \cdot \bar{H}^T \cdot \bar{a}, \quad (10)$$

由(10)式可以求解出 j 种薄透镜的光焦度近似解, 这种近似解并不能严格满足 m 个主要波长上的复消色差条件, 即不能使(8)式两边严格相等。此时计算各个子波段的色差残余值, 将 $\widehat{\bar{\Phi}}$ 代入(6)式中, 令矩阵

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} \bar{V} \\ \bar{\xi} \end{bmatrix} \cdot \widehat{\bar{\Phi}}, \quad (11)$$

则方差值 $D = |\bar{S}|$ 。 D 表示各个子波长的焦距对于各自中心波长焦距的偏离程度, 该值可以用来评估该组光学玻璃的色差校正能力。如果 D 小于所设

计的光学系统的焦深,则可认为该组光学玻璃可消除该系统内产生的色差。

除了对色差的校正能力的考量,还希望玻璃所承担的光焦度在一个合理的范围内。单个透镜如果承担很大光焦度,其表面曲率会很大,会给单色像差的校正和加工带来诸多问题。同时希望该组光学玻璃可产生较小的高级球差和色球差。

2.2 边界条件的计算

对于已知光焦度的一个简单薄透镜,其球差^[12]可以表示为

$$L = -2\beta/(y\phi^2), \quad (12)$$

式中 y 为半口径; ϕ 为光焦度; β 为角弥散,其表达式为

$$\beta = y^3\phi^3[n^2 - (2n + 1)K + (n + 2)K^2/n]/4(n - 1)^2, \quad (13)$$

式中 n 为折射率; K 用来表示透镜的形状,其表达式为

$$K = r_2/(r_2 - r_1), \quad (14)$$

式中 r_1 和 r_2 分别为透镜的前、后表面半径。

由(12)~(14)式可知,单薄透镜的球差是关于折射率和形状的函数。

单薄透镜的球差最小形状为

$$r_2/(r_2 - r_1) = K = n(2n + 1)/2(n + 2). \quad (15)$$

此时,球差为只与折射率有关的函数:

$$L = -\frac{n(4n - 1)}{8(n - 1)^2(n + 2)}y^2\phi. \quad (16)$$

此形状 K 下的色球差为

$$\Delta L_{FC} = L_F - L_C, \quad (17)$$

式中长波时的球差 $L_C = -2\beta_C/(y\phi_C^2)$;短波时的球

差 $L_F = -2\beta_F/(y\phi_F^2)$,其中 β_C 、 β_F 分别为长波和短波的角弥散, ϕ_C 、 ϕ_F 分别为长波和短波的光焦度。

根据高级球差估计式可知,此时的高级球差^[13]为

$$\Delta L'_{Sn} = L_{0.707} - \frac{L_m}{2}, \quad (18)$$

式中 $L_{0.707}$ 为 0.707 孔径处的球差; L_m 为边缘孔径处的球差。

通过计算可以获得 j 个薄透镜组中每个透镜的

光焦度 $\widehat{\Phi}$ 、多色焦点偏离程度 D 、高级球差 $\Delta L'_{Sn}$ 以及色球差 ΔL_{FC} 。合适组合中单个透镜的光焦度不应过大,残余的色差值应小于系统焦深,高级球差和色球差应尽量小。

2.3 玻璃组合的选择步骤

要明确光学系统的使用波段和有效焦距(EFL)等设计参数,再根据经济性等因素对玻璃库进行初步的筛选,剔除不常见玻璃或成本较高的玻璃。将筛选后的玻璃库中的玻璃按照每一种组合中含有 j 种光学玻璃进行组合,并将所有可能的组合进行编号。对设计波段进行拆分和缝合,对每一个子波段计算每一种光学玻璃的 P 、 ν 值,利用(11)式得到光焦度分配 $\widehat{\Phi}$,令 $\bar{F} = \sum_{i=1}^j |\widehat{\Phi}(i)|$, \bar{F} 表示各个元件的光焦度绝对值之和。若 \bar{F} 值过大,则认为该组合的光焦度分配不合理。对光焦度分配合理的组合计算 D 值,将 D 值乘以有效焦距(EFL)判断该乘积是否小于光学系统焦深,若是则将结果保留。对所有可能的光学玻璃组合进行计算,再对满足 $\widehat{\Phi}$ 、 D 值要求的组合计算 $\Delta L'_{Sn}$ 与 ΔL_{FC} 。选择 $\Delta L'_{Sn}$ 与 ΔL_{FC} 大小合适的组合进行光学系统设计,该过程如图 4 所示,其中 N 为循环次数, F number 为相对孔径倒数。

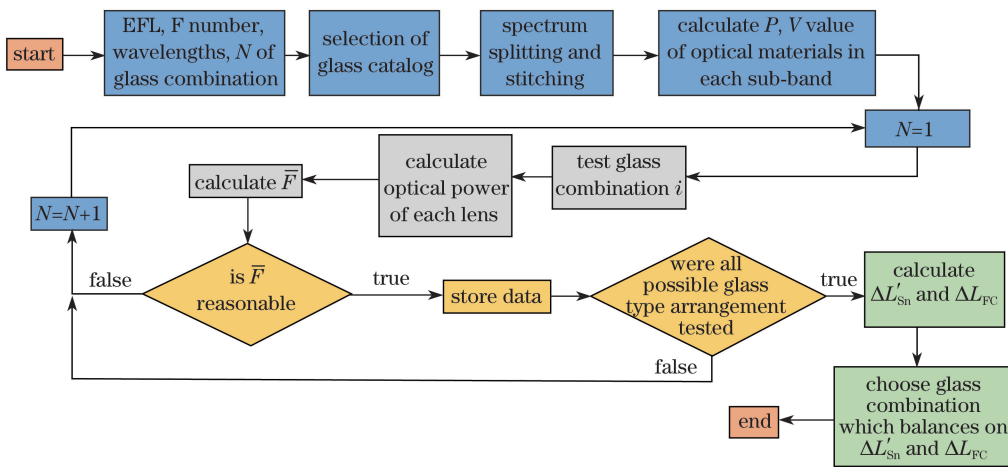


图 4 玻璃组合选择方法的流程图

Fig. 4 Flow chart of glass combination selection methods

3 设计实例

根据设计流程完成一个宽波段长焦相机镜头的优化设计,在设计过程中只使用球面镜。选择的设计实例参数见表 1。

表 1 光学系统要求

Table 1 Specifications for optical system

Parameter	Requirement
EFL /mm	400
Field of view /($^{\circ}$)	± 5
F number	6
Spectral waveband / μm	0.45-1.014
MTF	Close to diffraction limit

从给定波段中选择 5 个特征波长:0.45, 0.5461, 0.6438,0.852,1.014 μm ,将 0.6438 μm 作为 EFL 的

表 2 光学玻璃组合的参数

Table 2 Optical glass combination parameters

N	Mark 1	Mark 2	Mark 3	Φ_1	Φ_2	Φ_3	\bar{F}	$d / (10^{-2} \text{ mm})$	$\Delta L'_{\text{Sn}} / 10^{-4}$	$\Delta L_{\text{FC}} / 10^{-4}$
70	H-FK61	H-BAK7	H-ZF62	3.70	-2.79	0.1	6.59	3.07	2.33	5.89
74	H-FK61	H-BAK7	H-ZF88	3.70	-2.77	0.08	6.55	4.08	2.34	6.81
34	H-FK61	H-ZF62	H-BAK8	4.23	0.14	-3.38	7.75	4.40	2.49	-12.5
45	H-FK61	H-ZF52	H-BAK8	4.27	0.18	-3.46	7.91	4.44	2.49	-17.8
119	H-FK61	H-ZF88	H-BAK8	4.22	0.11	-3.34	7.67	6.10	2.50	20.0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

将表 2 中的数据按照 d 值由小到大排列。根据设计要求,计算出该光学系统的焦深为 $\pm 0.046 \text{ mm}$,前 4 组的 d 值都小于焦深,再比较 $\Delta L'_{\text{Sn}}$ 与 ΔL_{FC} 。第 1 组的 $\Delta L'_{\text{Sn}}$ 与 ΔL_{FC} 明显比其他几组的都小,故使用第 1 组光学玻璃组合来完成设计。

光学系统图如图 5 所示,采用 7 片球面镜片、3 种玻璃,其中第 1、2、7 片使用了牌号为 H-FK61 的光学玻璃,第 3、4、6 片使用了牌号为 H-BAK7 的光学玻璃,第 5 片使用了牌号为 H-ZF62 的光学玻璃。

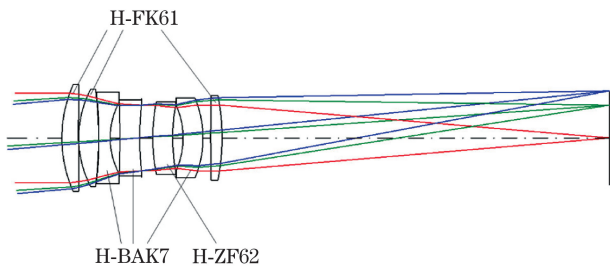


图 5 光学系统结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of optical system

中心波长。计算所采用的光学玻璃库为从成都光明(CDGM)玻璃库中选取的综合性能优且常年在库的光学玻璃,计算光学玻璃在所有的子波段区间上的 V 与 ξ 。将材料库中的材料每三个一组进行排列组合,利用(10)式计算每一组光学玻璃中每一种材料的归一化光焦度 Φ_1, Φ_2, Φ_3 。计算归一化光焦度绝对值之和 \bar{F} ,通过 \bar{F} 值的大小可以判断该组透镜的光焦度是否合理,记录 \bar{F} 值小于 10 的玻璃组合,将所使用的光学玻璃牌号写入表 2 中。当测试完所有的玻璃组合,对满足 \bar{F} 值小于 10 条件的玻璃组合按照(11)式计算残差值,再由残差值求出方差值 D 。由于方差 D 值是按照归一化的光焦度进行计算的,在与光学系统的焦深进行比较时需要乘以 EFL。 D 值乘以光学系统的 EFL 得出的值为 d 。再利用(17)、(18)式计算 ΔL_{FC} 与 $\Delta L'_{\text{Sn}}$ 的值,结果见表 2。

光学系统的成像性能如图 6 所示,其中 RMS 代表均方根,T 表示子午方向,R 表示弧矢方向。由图 6(a)知,各个视场中的弥散斑尺寸与艾里斑大小十分接近,这与图 6(c)中 MTF 接近衍射极限相对应,说明该光学系统的成像质量良好。由图 6(b)可知,该系统的最大畸变小于 0.25%。

图 7 所示为最佳像点位置随着波长变化的曲线图,最佳像点的最大偏移量为 -0.03 mm ,小于光学系统本身的焦深 $\pm 0.046 \text{ mm}$ 。该曲线图呈 W 形,与零点出现了四处交点,说明该系统使得四种波长的最佳像点位置重合在一起,实现了三级光谱的校正。

4 结 论

提出了一种针对宽波段长焦距光学系统的光学玻璃选择的优化计算方法。该方法可以快速得出符合三极光谱校正的最优光学玻璃组合,并给出了设计实例。研究表明,通过所提计算方法得到的

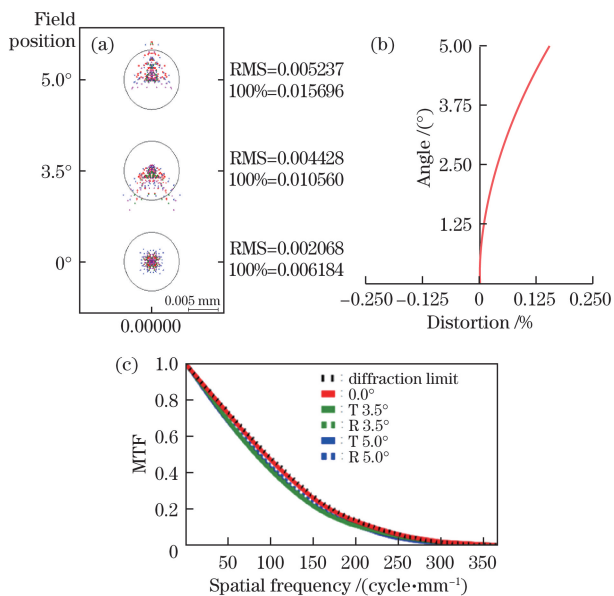


图 6 光学系统的成像性能。(a)点列图;(b)畸变;(c) MTF

Fig. 6 Imaging performances of optical system.

(a) Spot diagram; (b) distortion; (c) MTF

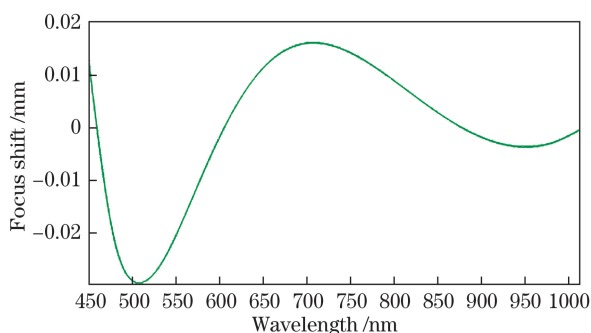


图 7 多色焦点漂移曲线

Fig. 7 Chromatic focal shift

光学玻璃组合实现了 $0.45 \sim 1.014 \mu\text{m}$ 波段的复消色差,并且能够实现 W 形的多色焦点偏移曲线,即对三级光谱进行了校正,且各个视场的成像质量好,MTF 接近衍射极限。

参 考 文 献

[1] Li Y Y, Tang Y, Lin Z H, *et al.* Design of apochromatism objective lens of aerial camera based on large frame array CCD[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3183-3185.
李玉瑶,唐勇,林昭珩,等.基于大面阵 CCD 的复消色差航空相机物镜设计[J].光学学报,2009,29(11): 3183-3185.
[2] Wu Y X, Wu H B, Zhang J Z, *et al.* Optical system

design of star camera with high precision better than second level[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0716001.
伍雁雄,吴洪波,张继真,等.亚秒级甚高精度星相机光学系统设计[J].中国激光,2015,42(7): 0716001.
[3] Rayces J L, Rosete-Aguilar M. Selection of glasses for achromatic doublets with reduced secondary color[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4093: 36-46.
[4] Sun W S, Chu C H, Tien C L. Well-chosen method for an optimal design of doublet lens design[J]. Optics Express, 2009, 17(3): 1414-1428.
[5] Qu R, Deng J, Peng X L, *et al.* 0.4-1.7 μm wideband fast F-number optical system design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0822007.
曲锐,邓键,彭晓乐,等.0.4~1.7 μm 宽波段大相对孔径光学系统设计[J].光学学报,2015,35(8): 0822007.
[6] de Albuquerque B F, Sasian J, de Sousa F L, *et al.* Method of glass selection for color correction in optical system design[J]. Optics Express, 2012, 20(13): 13592-13611.
[7] Sigler R D. Glass selection for airspaced apochromats using the Buchdahl dispersion equation[J]. Applied Optics, 1986, 25(23): 4311.
[8] Fang Y C, Tsai C M, Macdonald J, *et al.* Eliminating chromatic aberration in Gauss-type lens design using a novel genetic algorithm[J]. Applied Optics, 2007, 46(13): 2401-2410.
[9] Maxwell J. Tertiary-spectrum manipulation in apochromats[J]. Applied Optics, 1992, 31(13): 2194-2198.
[10] Greisukh G I, Ezhov E G, Kazin S V, *et al.* Diffraction-refraction corrector of the tertiary spectrum[J]. Journal of Optical Technology, 2010, 77(9): 542-547.
[11] Malacara D, Malacara Z. Handbook of optical design[M]. 3rd ed. New York: CRC Press, 2013: 65-87.
[12] Smith W J. Modern optical engineering[M]. Zhou H X, Cheng Y F, Transl. 4th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 167-168, 409-411.
史密斯.现代光学工程[M].周海宪,程云芳,译.第4版.北京:化学工业出版社,2011: 167-168, 409-411.
[13] Yuan X C. Optical design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 103-105.
袁旭沧.光学设计[M].北京:北京理工大学出版社,1988: 103-105.