

# 机器视觉光学系统的复消色差设计

骆魁桢<sup>1,2</sup>, 于方津<sup>1</sup>, 高兴宇<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>桂林电子科技大学机电工程学院广西制造系统与先进制造技术重点实验室, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

**摘要** 根据机器视觉物镜对复消色差和高分辨率的要求,将光学系统分成四个光组,对每组初始结构分别进行优化后再组合,得到透镜组的初始结构。利用 Buchdahl 色散矢量分析方法对部分玻璃材料进行针对性替换,通过多次优化得到符合光学性能要求的复消色差机器视觉光学系统。系统的焦距为 60 mm,半视场角为 11°,  $F$  数为 5.45,像方视场可匹配 1" 大靶面 CMOS 相机,且各视场的调制传递函数值在 200 lp/mm 处均大于 0.2。系统在 0.707 孔径处的残余色差为 0.01665  $\mu\text{m}$ ,满足系统的色差容限。系统的二级光谱为 0.08385  $\mu\text{m}$ ,基本实现了光学系统的复消色差。实验结果表明,Buchdahl 色散矢量分析方法在分组设计和透镜系统的整体优化过程中,可为光学玻璃的选择及系统整体优化提供较大的便利。

**关键词** 机器视觉; 光学设计; 色散矢量; 复消色差设计

中图分类号 O435.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2415003

## Apochromatic Design of Machine Vision Optical System

Luo Kuizhen<sup>1,2</sup>, Yu Fangjin<sup>1</sup>, Gao Xingyu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Guangxi's Key Laboratory of Manufacturing Systems and Advanced Manufacturing Technology, School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>2</sup>School of Electronics Engineering and Automation, Guilin University of Electronics Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** The optical system is divided into four segments in this study, according to the apochromatic and high-resolution requirements of the machine vision lens, and the initial structure of each segment is optimised independently before being merged to obtain the initial structure of the lens segment. The Buchdahl dispersion vector analysis method is employed to perform targeted replacement of some glass materials, and multiple optimisations are applied to provide an apochromatic machine vision optical system that fulfils the criteria of optical performance. The focal length of the system is 60 mm, the half field of view is 11° and the  $F$ -number is 5.45. The image field can match a 1" large target CMOS camera, and each field of view has a modulation transfer function value of 200 lp/mm. At an aperture of 0.707, the system's residual chromatic aberration is 0.01665  $\mu\text{m}$ , which is within the system's chromatic aberration tolerance. The secondary spectrum of the system is 0.08385  $\mu\text{m}$ , indicating that the optical system is apochromatic. The Buchdahl dispersion vector is shown to be effective in the experiments. In the process of grouping design and overall optimisation of the lens system, the analysis method can provide greater convenience for the selection of optical glass and the overall optimisation of the system.

**Key words** machine vision; optical design; dispersion vector; apochromatic design

**OCIS codes** 150.0155; 080.3620; 160.4670

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-02-02; 录用日期: 2021-03-03

基金项目: 广西自然科学基金(2018JJA170110)、广西创新驱动发展专项资金(桂科 AA18118002-3)

通信作者: \*gxy1981@guet.edu.cn

# 1 引言

机器视觉技术在 3C 制造、机械、汽车等行业的质量在线检测领域中具有广泛应用,而成像镜头对机器视觉系统的性能有着很大的影响<sup>[1]</sup>。随着人们对产品质量要求的提高,对机器视觉光学成像系统的视场、分辨率、工作距离等光学性能的要求也越来越高。传统复消色差光学系统常用于高倍率显微物镜和天文望远镜,近些年机器视觉镜头也要进行复消色差设计,而各种玻璃材料对光的色散会导致色差<sup>[2]</sup>。为了消除光学系统中 F 光、C 光和 D 光的消色差,需要校正其二级光谱,达到复消色差的目的<sup>[3]</sup>。普通的光学玻璃在相对色散-阿贝常数(P-V)图上的分布接近一条直线,相互之间的组合很难达到消除二级光谱的效果<sup>[4]</sup>,因此,需要使用反常的低色散玻璃材料<sup>[5]</sup>,但低色散材料(如萤石)的价格昂贵、材质脆弱、加工难度大<sup>[6]</sup>。近些年,光学公司用一些玻璃材料代替萤石制造复消色差透镜,如氟冕玻璃,合理选用低色散光学玻璃配合其他常规玻璃材料可进行复消色差光学系统的设计<sup>[7-9]</sup>。复消色差方法主要有双胶合透镜复消色差、三片式透镜复消色差、二元光学元件复消色差等<sup>[10]</sup>。

本文针对 3C 制造行业光学检测对机器视觉镜头的要求,设计了焦距为 60 mm,工作距离大于 100 mm 的复消色差光学系统,且该系统的调制传递函数(MTF)在 200 lp/mm 处大于 0.2,像方视场与 1"靶面 CMOS 相机相匹配。将整个光学系统分成四个光组,对每个光组分别进行消色差设计后适当选用低色散光学玻璃材料进行设计。对系统整体进行优化设计时,通过 Buchdahl 色散矢量分析方法<sup>[11]</sup>选用和替换光学玻璃,使光学系统的玻璃组合更加合理,最终实现复消色差。

## 2 光学系统的初始结构设计

选用 1"靶面 CMOS 的工业相机 MV-E1200M/C 进行设计,该相机的像素尺寸为  $3.1 \mu\text{m} \times 3.1 \mu\text{m}$ ,计算得到相机的极限空间分辨率为 161 lp/mm。考虑到生产制造过程中的公差,设计镜头时的分辨率应大于 161 lp/mm,这与设计目标对镜头分辨率的要求是相互匹配的,因此不需要进一步提高镜头的分辨率。像面尺寸为 16 mm,镜头焦距为 60 mm,计算得到的半视场角为  $7.6^\circ$ (设计时取  $8^\circ$ ),光学系统的设计参数如表 1 所示。

表 1 光学系统的设计参数

Table 1 Optical parameters of the optical system

Parameter	Value
Focal length $f$ /mm	60
Field of view $2\omega$ /( $^\circ$ )	15.2
Size of image /mm	16
Resolution /( $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	200
Size of pixel /( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	$3.1 \times 3.1$

光学系统的总焦距  $f' = 60 \text{ mm}$ ,在高斯光学中设置的各光组均为薄透镜光组。初始结构将整个光学系统分成四个光组,第一个光组用来控制视场,第二个光组与第三个光组用双胶合透镜校正像差,光阑设置在第二个光组与第三个光组之间,第四个光组用来控制像面大小。前三个光组的焦距分别为  $f'_1 = 100 \text{ mm}$ 、 $f'_2 = 120 \text{ mm}$ 、 $f'_3 = -60 \text{ mm}$ ,光组间的距离分别为  $d_1 = 20 \text{ mm}$ 、 $d_2 = 18 \text{ mm}$ 、 $d_3 = 10 \text{ mm}$ 。通过多光组组合计算得到第四个光组的焦距  $f'_4 = 50 \text{ mm}$ <sup>[12]</sup>,理想光学系统的初始结构如图 1 所示。

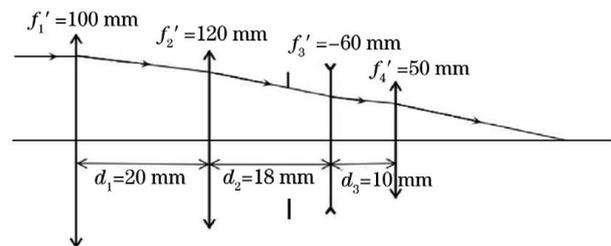


图 1 理想光学系统的初始结构

Fig. 1 Initial structure of the ideal optical system

将第一个光组设置为一个单透镜与一组双胶合透镜的组合,其中,双胶合透镜的光焦度可通过双胶合薄透镜的自消色差公式计算<sup>[12]</sup>。设单透镜的焦距为 400 mm,其与双胶合透镜组的距离为 10 mm,计算得到双胶合透镜组的焦距为 190 mm。用低色散的氟冕玻璃 H-FK71 作为单透镜的玻璃材料,以减小单透镜对光组整体消色差的影响。用钡冕玻璃 H-BaK1 和重火石玻璃 H-ZF1<sup>[13]</sup>作为双胶合透镜玻璃材料。假定透镜的厚度为 0 mm,用光焦度法可计算透镜各面的曲率半径<sup>[12]</sup>。设镜片的中心厚度均为 3 mm,计算得到单透镜后表面中心到双胶合透镜前表面中心的距离为 9.015 mm,从而得到第一个光组的初始结构。按相同的方法计算其他三个光组并在 ZEMAX 软件中进行优化,得到四个光组的初始结构如图 2 所示,各光组的色差曲线如图 3 所示。

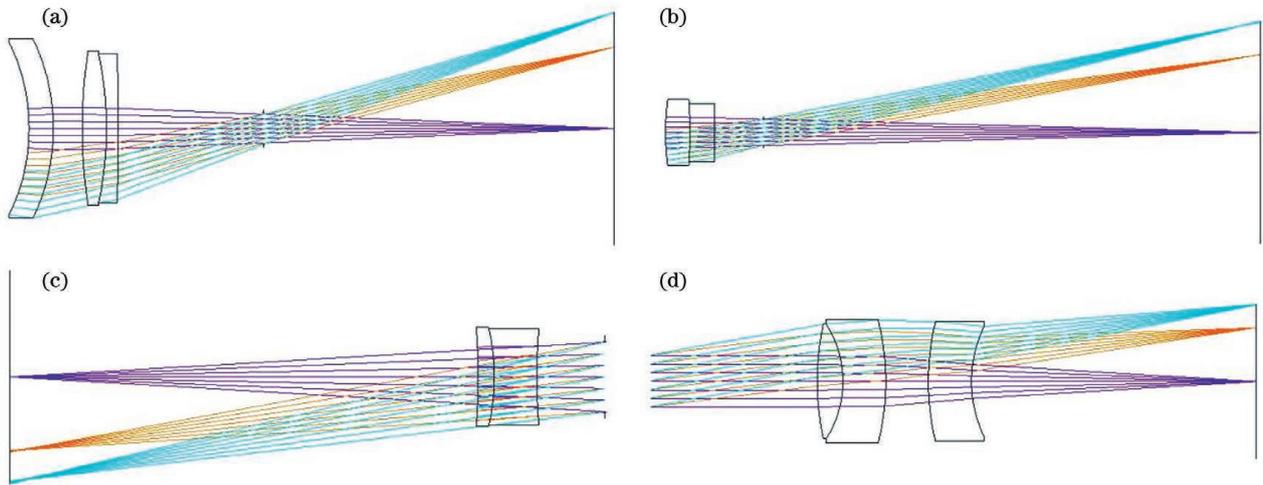


图 2 四个光组的光学结构。(a)第一个光组;(b)第二个光组;(c)第三个光组;(d)第四个光组

Fig. 2 Optical structure of four segments. (a) First segment; (b) second segment; (c) third segment; (d) fourth segment

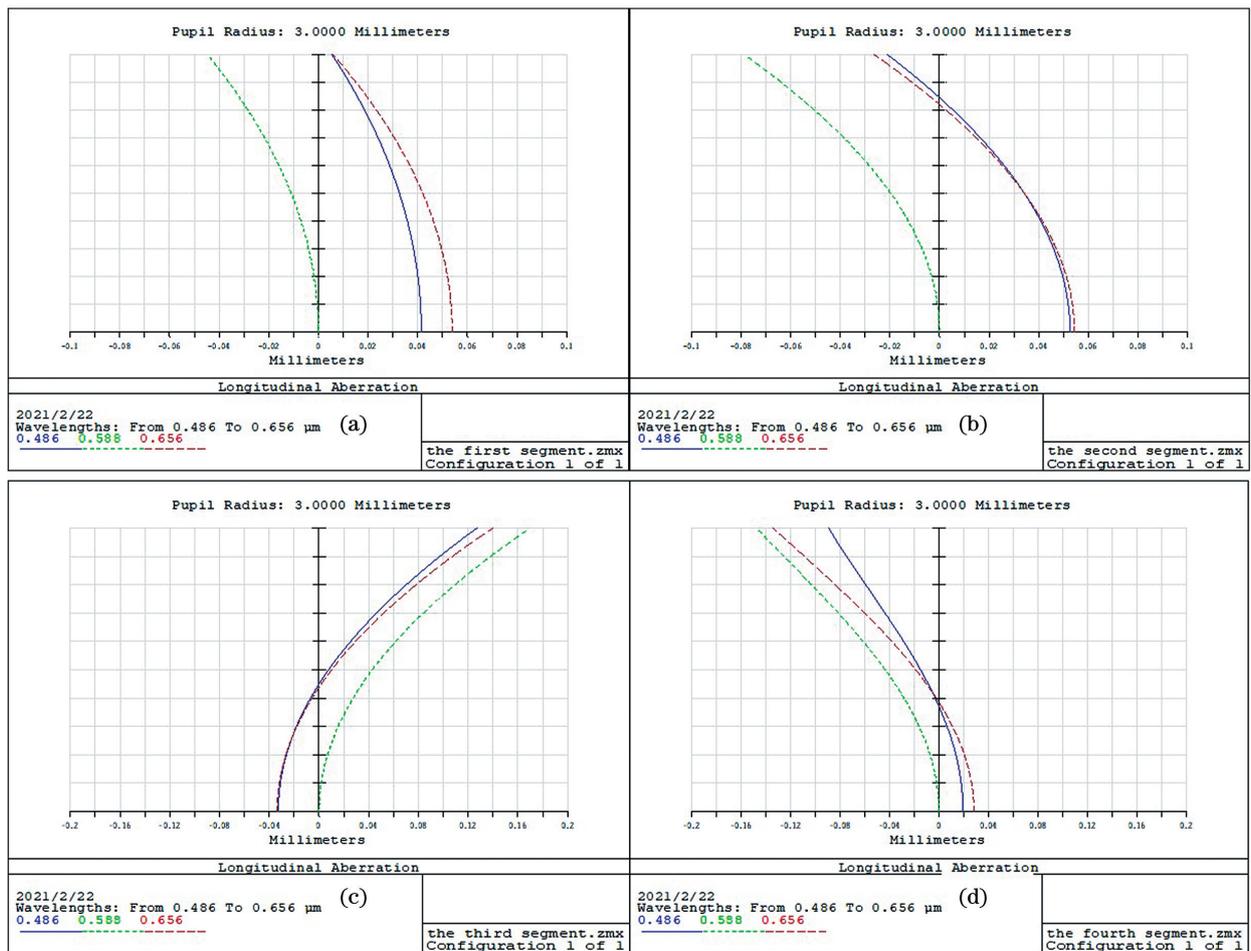


图 3 四个光组的色差曲线。(a)第一个光组;(b)第二个光组;(c)第三个光组;(d)第四个光组

Fig. 3 Chromatic aberration curves of four segments. (a) First segment; (b) second segment; (c) third segment; (d) fourth segment

读取各光组主面的位置并计算各光组之间的距离,然后将光阑放置在第二个光组主面后 10 mm 的位置,计算得到第二个光组后表面到光阑的距离为

4.24 mm。为了提高系统的分辨率,设入瞳直径为 10 mm,将各光组的几何参数输入 ZEMAX 软件中,得到透镜组的初始结构如图 4 所示。

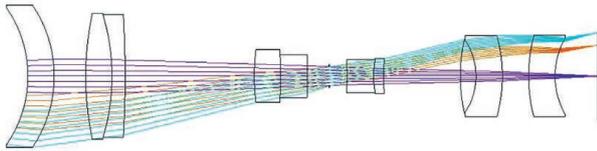


图 4 光学系统的初始结构  
Fig. 4 Initial structure of the optical system

### 3 光学系统的优化方法

用 ZEMAX 软件的优化函数工具对整个系统的初始结构进行初步优化后,镜头的 MTF 曲线在全视场条件下趋近衍射极限,但二级光谱很大,未达到复消色差的要求。复消色差透镜设计的关键在于合理

选择能同时消除初级色差与二级光谱的玻璃材料<sup>[14]</sup>。因此,用低色散的 H-FK71 玻璃代替第二个光组以及第四个光组中的 H-BaK1,将肖特玻璃 F2 替换为国产玻璃 H-F2。重新对光学系统进行优化,第二次优化后光学系统的 MTF 和色差曲线如图 5 所示。可以发现,第二次优化的结构性能更好。F 光、C 光和 D 光的曲线相交于 0.707 孔径附近,二级光谱得到了极大改善,但仍未达到复消色差的要求,需要进一步用 Buchdahl 色散矢量法寻找合适的玻璃材料。玻璃材料的初级和二级 Buchdahl 色散系数<sup>[15]</sup>如图 6 所示。基于 Buchdahl 色散系数,假设优化结果中的透镜均为薄透镜,则光学系统的色散矢量可表示为<sup>[11]</sup>

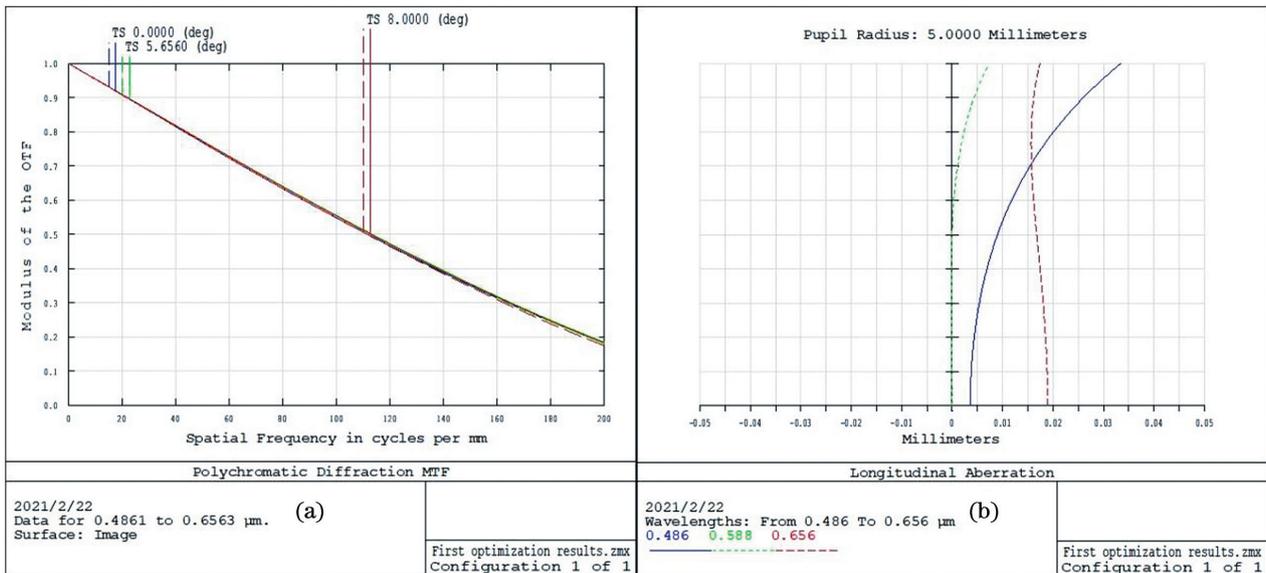


图 5 第二次优化后的光学系统性能。(a)MTF;(b)色差曲线  
Fig. 5 Optical system performance after the second optimization. (a) MTF; (b) chromatic aberration curve

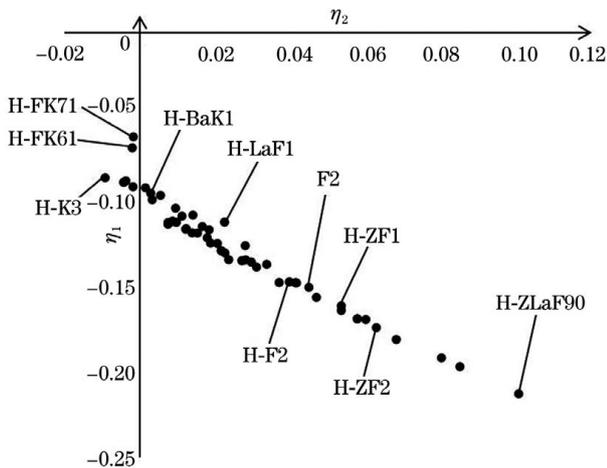


图 6 部分玻璃材料的 Buchdahl 色散系数  
Fig. 6 Buchdahl dispersion coefficients of some glass materials

$$G_0 = \sum_{j=1}^n \alpha_j G_j, \quad (1)$$

式中,  $G_j$  为定义在色散向量空间  $\eta$  中的向量,可表示  $n$  个玻璃中第  $j$  个玻璃的色散。向量  $G_0$  可表示光学系统的色散特性,其值越小,表明系统的复消色差性能越好。玻璃色散系数的缩放因子  $\alpha_j$  可表示为

$$\alpha_j = \frac{\phi_j Y_j^2}{\phi_0 Y_1^2}, \quad (2)$$

式中,  $\phi_j$  为第  $j$  个透镜的光焦度,  $Y_j$  为基础波长下第  $j$  个透镜表面实际光线的高度,  $\phi_0$  为光学系统的总光焦度。光线追迹参数和优化结果的色散系数如表 2 所示。

光学系统的色散系数可表示为

表 2 第二次优化中光线的追迹参数和玻璃的色散系数

Table 2 Tracing parameters of the light and the dispersion coefficient of the glass in the second optimization

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Material	H-FK71	H-BaK1	H-ZF1	H-FK1	H-ZF1	H-K3	H-F2	H-FK71	H-ZF1	H-FK71
$\phi_j$	0.0106	-0.0175	0.0161	0.0318	-0.0416	-0.0260	0.0463	0.0339	-0.0370	-0.0231
$Y_j$	6.9050	6.5310	6.2490	5.3420	4.8840	6.0660	6.3660	6.5280	6.4690	6.8480
$\alpha_j$	0.6335	-0.9379	0.7888	1.1403	-1.2495	-1.2048	2.3593	1.8180	-1.9471	-1.3610
$\eta_1$	-0.0613	-0.0913	-0.1608	-0.0613	-0.1608	-0.0854	-0.1473	-0.0613	-0.1608	-0.0613
$\eta_2$	-0.0017	0.0015	0.0535	-0.0017	0.0535	-0.0092	0.0416	-0.0017	0.0535	-0.0017

$$\begin{cases} \eta_{10} = \sum_{i=1}^{10} \eta_{1i} = 0.0914 \\ \eta_{20} = \sum_{i=1}^{10} \eta_{2i} = -0.0248 \end{cases} \quad (3)$$

图 7 为第二次优化结果的色散向量图,可以发现,组合向量  $G_0(-0.0248, 0.0914)$  下负透镜的向量和与正透镜的向量和偏差较大,导致了模值较大的组合向量  $G_0$  和较大的残余色差<sup>[8]</sup>。 $G_0$  的模比正、负透镜向量和的模小,因此,需要替换掉玻璃色散系数缩放因子相对偏小的玻璃。分析表 2 中的数据后,选用 H-BaK3 替换第 2 块玻璃 H-BaK1,原因是二者的折射率相近,色散系数相差不大且 H-BaK3 的一阶色散系数  $\eta_1$  值更大,二阶色散系数  $\eta_2$  值更小。第三次优化中的追迹参数和玻璃的色散

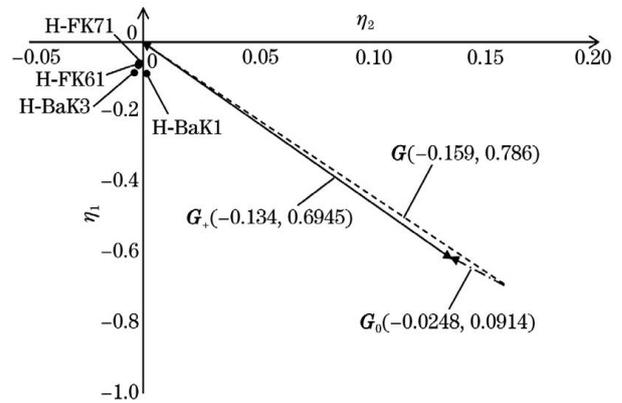


图 7 第二次优化结果的色散向量图

Fig. 7 Dispersion vector diagram of the second optimization result

系数以及色散向量图如表 3 和图 8 所示。

表 3 第三次优化中光线的追迹参数和玻璃的色散系数

Table 3 Tracing parameters of the light and the dispersion coefficient of the glass in the third optimization

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Material	H-FK71	H-BaK3	H-ZF1	H-FK1	H-ZF1	H-K3	H-F2	H-FK71	H-ZF1	H-FK71
$\phi_j$	0.0118	-0.0151	0.0120	0.0317	-0.0416	-0.0272	0.0485	0.0347	-0.0359	-0.0249
$Y_j$	9.3520	8.0680	7.7060	5.2570	5.0170	5.7430	6.0790	6.3860	6.3290	6.9340
$\alpha_j$	0.7067	-0.6740	0.4870	0.6013	-0.7186	-0.6153	1.2292	0.9702	-0.9862	-0.8211
$\eta_1$	-0.0613	-0.0881	-0.1608	-0.0613	-0.1608	-0.0854	-0.1473	-0.0613	-0.1608	-0.0613
$\eta_2$	-0.0017	-0.0043	0.0535	-0.0017	0.0535	-0.0092	0.0416	-0.0017	0.0535	-0.0017

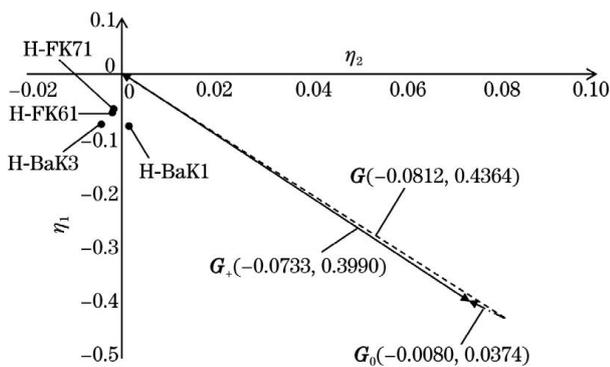


图 8 第三次优化结果的色散向量图

Fig. 8 Dispersion vector diagram of the third optimization result

图 8 中组合向量  $G_0(-0.0080, 0.0374)$  的模明显小于第二次优化结果中  $G_0$  的模,证明了第三次优化的有效性,优化结果的 MTF 曲线和色差曲线如图 9 所示。可以发现,图 9(b)中 F 光、C 光、D 光的曲线约在 0.707 孔径处交于一点,非常接近复消色差水平,但图 9(a)中的 MTF 曲线在 200 lp/mm 处仍小于 0.2,还需进一步提高分辨率。光学成像系统的分辨率可以通过增大相对孔径来提升<sup>[16]</sup>,将系统的入瞳直径增加到 11 mm 后,系统的色差曲线仍然保持较好的复消色差水平,这表明选择的玻璃材料比较合适。

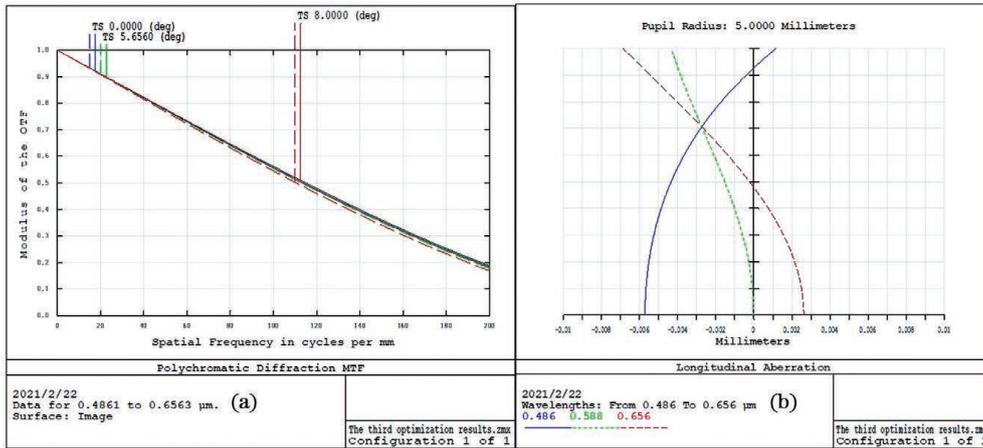


图 9 第三次优化后的光学系统性能。(a)MTF;(b)色差曲线

Fig. 9 Optical system performance after the third optimization. (a) MTF; (b) chromatic aberration curve

### 4 光学系统的最终结构

为了证明优化的镜头可适用于其他型号的光学图像传感器,匹配像面尺寸更大的CMOS相机,需

要使镜头适用于更大的视场。因此,将半视场角定为  $11^\circ$ ,继续进行优化,并用 Buchdahl 色散矢量分析方法替换玻璃材料,得到最终优化的复消色差光学系统结构如图10所示。从图10(e)可以发现,F光、

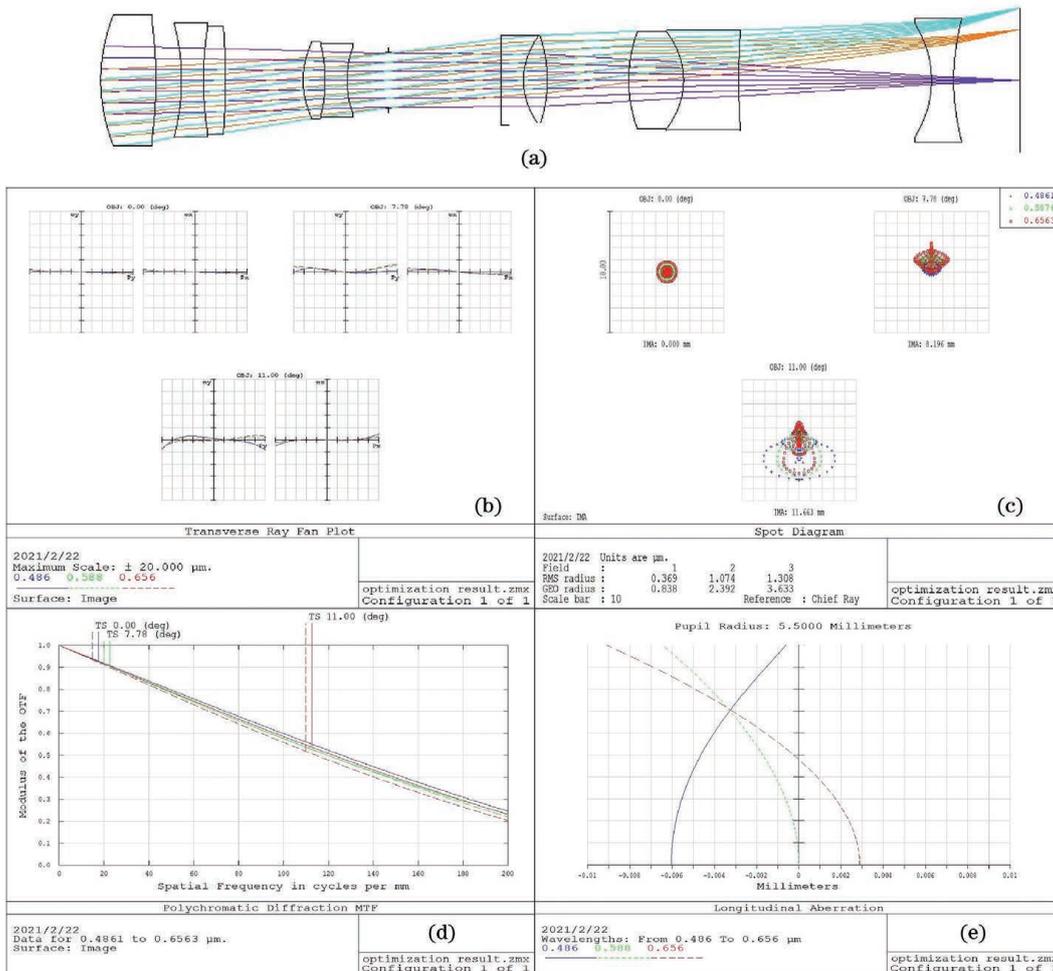


图 10 最终的复消色差光学系统。(a)结构图;(b)像差曲线;(c)点列图;(d)MTF;(e)色差图

Fig. 10 Final apochromatic optical system. (a) Structure diagram; (b) aberration curve; (c) point diagram; (d) MTF; (e) chromatic aberration diagram

C 光、D 光的像差曲线在 0.707 孔径处完全交于一点。在 0.707 孔径处的残余色差为  $0.01665 \mu\text{m}$ 。系统能允许的色差可表示为

$$\Delta S'_\lambda < 2\lambda F^2 = 23.8 \mu\text{m}. \quad (4)$$

根据(4)式计算出系统色差的允差为  $23.8 \mu\text{m}$ ，残余色差远远小于系统的允差<sup>[17]</sup>。此时二级光谱为  $0.08385 \mu\text{m}$ ，表明光学系统达到了复消色差水平。最终光学系统的各参数：焦距  $f' = 60 \text{ mm}$ ，半视场角  $\omega = 11^\circ$ ，光圈数  $F = 5.45$ ，系统总长  $L = 83.5 \text{ mm}$ 。各视场的 MTF 在 200 lp/mm 处均大于 0.2，各视场的弥散斑面积均小于艾里斑，表明系统具有较高的成像质量。最终优化得到的复消色差光学系统在全视场的 MTF 均大于 0.2，且视场角适配于 1"靶面的工业相机，这表明该设计方法可以匹配不同型号工业相机的复消色差光学镜头。

## 5 结 论

从初始结构出发，利用 ZEMAX 软件对系统的各个光组进行设计和优化，在分光组设计时，开始就使用一些低色散玻璃，使分析系统色差时更加简明。通过 Buchdahl 色散矢量分析方法替换透镜材料，设计得到焦距  $f' = 60 \text{ mm}$ ，满足复消色差要求的光学透镜组。实验结果验证了 Buchdahl 色散矢量分析方法和优化步骤的有效性，且该方法能快速设计出高质量光学系统，为机器视觉光学系统镜头质量的提升提供了技术支撑。

### 参 考 文 献

- [1] Ye W W, Zhou T F, Huang J X, et al. Design of dual-vision double telecentric optical system based on machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 012202.  
叶文伟, 周天福, 黄锦媛, 等. 基于机器视觉的双视野双远心光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 012202.
- [2] Sharov A A, Ponin O V, Grudzinov Y B, et al. Apochromatic objectives for amateur and professional astronomy[J]. Journal of Optical Technology, 2013, 80(4): 233-235.
- [3] Zhang Y M. Applying optics[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2015: 230-246.  
张以谟. 应用光学[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2015: 230-246.
- [4] Yang A, Ning L H, Gao X Y, et al. Design of liquid-glass achromatic zoom lens[J]. Optical Review, 2017, 24(3): 361-369.
- [5] Sigler R D. Apochromatic color correction using liquid lenses [J]. Applied Optics, 1990, 29 (16): 2451-2459.
- [6] Duplov R. Apochromatic telescope without anomalous dispersion glasses [J]. Applied Optics, 2006, 45 (21): 5164-5167.
- [7] Zajac M, Nowak J. Correction of chromatic aberration in hybrid objectives[J]. Optik, 2002, 113 (7): 299-302.
- [8] Yang A, Gao X Y, Li M F. Design of apochromatic lens with large field and high definition for machine vision[J]. Applied Optics, 2016, 55(22): 5977-5985.
- [9] Cao G L, Liu F F, Jia Y D, et al. Design of ultraviolet warning optical system with large relative aperture and long focal length[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 122203.  
曹桂丽, 刘芳芳, 贾永丹, 等. 大相对孔径、长焦距的紫外告警光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 122203.
- [10] Liu Y Q, Long F N. Optical design of apochromatic objective of wide spectral and long focal[J]. Optical Technique, 2009, 35(3): 419-421, 425.  
刘莹奇, 龙夫年. 宽光谱长焦距物镜的复消色差设计[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 419-421, 425.
- [11] Sigler R D. Glass selection for airspaced apochromats using the Buchdahl model of refractive-index dispersion[J]. Applied Optics, 1986, 25(23): 4311-4320.
- [12] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: Publishing China Machine Press, 2015.  
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [13] CDGM Glass Co. Ltd. CDGM optical glass products database [EB/OL]. [2020-12-25]. <http://www.cdgm.com/208/search.asp?key=hk91&otype=title&Submit=+Go+>.
- [14] Rosete-Aguilar M, Rayces J L. Selection of glasses for achromatic doublets with reduced secondary spectrum. II: application of the method for selecting pairs of glasses with reduced secondary spectrum[J]. Applied Optics, 2001, 40(31): 5677-5692.
- [15] Chipman R A, Reardon P J. Buchdahl's glass dispersion coefficients calculated in the near infrared [J]. Applied Optics, 1989, 28(4): 694-698.
- [16] Ren Z G, Li X Y, Ni D W. Compact space optical system design with large relative aperture and field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0922001.  
任志广, 李旭阳, 倪栋伟. 大相对孔径、大视场、紧凑型空间光学系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0922001.
- [17] Mikš A, Novák J. Method for primary design of superachromats[J]. Applied Optics, 2013, 52(28): 6868-6876.