



激光与光电子学进展
Laser & Optoelectronics Progress
ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目： 基于线性渐变滤光片的宽谱段高光谱相机光学系统设计
作者： 崔亚珍, 刘春雨, 谢运强, 徐明林
网络首发日期： 2022-07-17
引用格式： 崔亚珍, 刘春雨, 谢运强, 徐明林. 基于线性渐变滤光片的宽谱段高光谱相机光学系统设计[J/OL]. 激光与光电子学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220714.1305.337.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于线性渐变滤光片的宽波段高光谱相机光学系统设计

崔亚珍^{1,2,3}, 刘春雨^{1,3*}, 谢运强^{1,2,3}, 徐明林^{1,3}

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

² 中国科学院大学, 北京 100049;

³ 中国科学院天基动态快速光学成像技术重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 宽波段高光谱相机能够更为全面地记录目标的光谱信息, 是目前高光谱相机所追求的主要方向之一。然而, 宽波段势必会带来系统的色差和二级光谱过大的问题, 从而对成像质量造成影响。因此, 本文基于 Buchdahl 矢量色散分析方法, 提出了一种基于线性渐变滤光片的宽波段高光谱相机光学系统。该系统为一款焦距为 100mm、F 数为 5、视场角为 14.2°且光谱范围在 400-1000nm 内的像方远心透射式光学系统。基于该系统的高光谱相机可在 500km 轨道处获得空间分辨率为 21.5m, 光谱分辨率为 10nm, 幅宽为 125km 的图像。像质评价及公差分析结果表明, 系统具有良好的成像质量并能够满足加工和装调的要求。传递函数测试结果表明, 系统符合实际应用需求。

关键词 光学系统设计; 高光谱相机; 复消色差; 宽波段

中图分类号 0439 **文献标志码** A

Optical system design of broad band hyperspectral camera based on linear variable filter

Cui Yazhen^{1,2,3}, Liu Chunyu^{1,3*}, Xie Yunqiang^{1,2,3}, Xu Minglin^{1,3}

¹ *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;*

² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³ *Key Laboratory of Space-based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

Abstract Broad band hyperspectral camera can more comprehensively record the spectral information of the target, which is one of the main directions pursued by the hyperspectral camera at present. However, the broad band is bound to cause problems with excessive chromatic aberration and secondary spectra of the system, which will affect the image quality. Therefore, based on the analysis method of Buchdahl vector dispersion model, this paper proposes a optical system of broad band hyperspectral camera based on linear variable filter. An image side telecentric transmitted optical system with a focal length of 100mm, F-number 5, 14.2° field of view and a spectral range of 400-1000nm is designed. The hyperspectral camera based on the system can obtain images with a spatial resolution of 21.5 m, a spectral resolution of 10nm and a swath width of 125km at the altitude of 500km. The evaluation of image quality and the result of tolerance analysis show that the system has

基金项目: 国家自然科学基金(41974210, 62175236)

通信作者: *E-mail: mmlucy@163.com

excellent image quality and can satisfy the requirements of fabrication and alignment. MTF test experiment results show that the system can satisfy the actual application requirements.

Key words optical system design; hyperspectral camera; apochromatic; broad band

OCIS codes 220.4830; 040.1490; 110.5200; 110.6770

1 引言

光谱相机能够同时采集目标的空间信息和光谱信息^[1], 具有图谱合一的优点^[2]。其中, 高光谱相机由于具备高的光谱分辨率的优势, 受到研究人员的广泛关注。近年来, 高光谱相机在人类生活中发挥着越来越重要的作用, 广泛应用于航天航空^[3]、矿产资源勘探、水体和灾害监测、农作物精确监测、军事侦察等众多领域^[4]。与此同时, 对高光谱相机的空间分辨率、光谱范围、幅宽、体积和重量等指标的要求也越来越高。随着高光谱技术的快速发展, 不断涌现出越来越多更小、更轻的高光谱相机^[5]。

相比色散型和干涉型高光谱相机, 滤光片型高光谱相机通过在成像光路中加入滤光片进行分光, 具有体积小、结构紧凑和成本低等优点。近年来, 随着微小卫星平台的发展, 滤光片型高光谱相机受到了许多国家的重视。丹麦于 2018 年发射的立方星 GOMX 上搭载的就有微型渐变滤光片高光谱相机 HyperScout^[6], 该相机的光谱范围为 400-1000nm, 光谱分辨率优于 15nm, 空间分辨率为 70m。虽然该相机的光谱分辨率较高, 但其空间分辨率较低, 无法提供高分辨率的遥感图像。同年, 韩国标准与科学研究院的 Khaled Mahmoud 在 SPIE 会议上介绍了其研制的紧凑型 CCD 高光谱相机, 该相机将线性渐变滤光片集成在 CCD 探测器上^[7], 光谱范围为 300-850nm, 光谱分辨率为 10-20nm。虽然该相机的光谱分辨率也较高, 但其光谱范围较窄, 无法提供物体更为全面的信息。2016 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的王颖等设计的线性渐变滤光片成像光谱仪^[8], 光谱范围为 600-1100nm, 光谱分辨率可达 9nm, 空间分辨率却接近 300m。综上所述, 这些国内外高光谱相机大都具有相对较高的光谱分辨率, 但或多或少都存在谱段范围不够宽、空间分辨率不够高等问题。可见, 一种能在宽谱段范围内工作的同时具备大幅宽、高空间分辨率及高光谱分辨率的紧凑型高光谱相机值得研究。

本文提出了一种基于线性渐变滤光片的宽谱段高光谱相机光学系统, 其光谱范围为 400-1000nm, 焦距为 100mm, 视场角为 14.2°。相比已有的滤光片型高光谱相机光学系统, 该系统谱段较宽, 同时具有较高的空间分辨率和光谱分辨率以及大的幅宽, 且系统结构简单、紧凑。但由于系统的谱段太宽, 必须校正色差和二次光谱^[9]以获得良好的成像质量。晶体等

特殊光学材料由于具有光学透过率高、色散特性好等优点常被用于复消色差光学系统中，然而，考虑到这些材料的理化性能和可获得性等问题^[10-11]，玻璃材料成为了航空和航天光学相机的不二之选。基于此，Buchdahl 色散模型提供了一种为复消色差系统选择玻璃材料的有效方法。通过调整孔径光阑的位置以及改变某些透镜的形状等方式，可以减少像散和畸变等其他像差。经过 ZEMAX 软件的迭代优化，最终得到了成像质量良好的光学系统。通过对系统进行像质评价、公差分析以及传递函数测试，结果表明该系统性能优良，符合实际应用需求。

2 初始光学结构设计

2.1 光学设计参数的确定

光学系统的焦距 f' 可由下式给出

$$f' = \frac{H}{L_{GS}} \cdot a, \quad (1)$$

其中， a 是探测器的像元尺寸， H 是轨道高度， L_{GS} 是地面采样距离。该高光谱相机安装在 500km 高度的轨道卫星上，技术指标要求地面采样距离小于 21.5m。探测器选用的是由 Gpixel Inc 生产的具有 5056×2968 个像元以及像元大小为 4.25μm×4.25μm 的 CMOS 图像传感器 GSENSE5130。经计算可知，系统的焦距为 98.8mm。为了留有足够的余量，将本系统的焦距确定为 100mm。

经计算，可以得到单个 CMOS 的斜边长为 $d = 24.9\text{mm}$ ，那么光学系统的半视场角 ω 可以计算如下

$$\omega = \arctan \frac{d}{2f'} = 7.1^\circ, \quad (2)$$

为了与探测器的尺寸相匹配，选择了尺寸为 33.2mm×33.2mm×1.2mm 的线性渐变滤光片，其有效镀膜面积为 21.5mm×12.7mm。其中，探测器的前 98 行像元对应滤光片的全色带区域，大小约为 0.42mm×12.7mm。紧接着的 70 行像元对应滤光片的过渡区域，大小约为 0.3mm×12.7mm。与接下来的 2800 行像元对应的滤光片的剩余区域是 400-1000nm 范围内的光谱梯度区域。中心波长沿滤光片的纵向变化。滤光片的半峰全宽约为中心波长的 5%，透射率在 90%以上。光谱校准能够实现波段和不同行像元之间的精确配准。经过波段和探测器的配准之后，可以在推扫模式下通过对相应像元的数据进行积分来获得光谱图像。

光学系统的 F 数由系统的信噪比决定^[12]，信噪比 R_{SN} 定义为信号功率与噪声功率的比值，可以通过下式进行计算^[13-14]

$$R_{SN} = \frac{S_e}{N_e} = \frac{S_e}{\sqrt{S_e + \sigma_R^2 + D_e}}, \quad (3)$$

其中， S_e 是信号电子数的数量， N_e 是噪声电子数的数量， σ_R 是读出噪声， D_e 是暗电流。

通过查询 GSENSE5130 手册可知， $\sigma_R = 1.6e^{-1}$ ， $D_e = 3e^{-1}/s/pix$ 。而积分周期内的信号电子数 S_e 可由下式得到

$$S_e = \frac{\pi AMt}{4F^2 hc / \lambda} L_0 \tau_0 \eta, \quad (4)$$

其中， A 是单个像元的面积； M 是 CMOS 的积分级数； t 是曝光时间， $t \approx \frac{GSD}{v}$ ，其中 v

是运行速度； L_0 是光学系统入瞳处的辐射亮度，可以通过大气仿真计算得到，其值约为 $3.037042 \times 10^{-5} W/(sr \cdot cm^2)$ ； τ_0 是光学系统的透过率，由透镜每个表面的透过率、每个透镜的吸收率以及滤光片的透过率共同决定； η 是探测器的量子效率， F 是光学系统的 F 数， h 是普朗克常数， c 是光速， λ 是中心波长。系统预计在 400-1000nm 谱段范围内使用 9 个厚度为 10mm 时透过率为 0.95 的由光学玻璃制成的透镜。为保证所有光学表面的透过率均超过 0.995，系统所有的透镜表面都将镀上减反射膜。根据滤光片的平均透过率为 0.9，可以得到光学系统的透过率为 0.518。考虑到系统的体积和进光量，将 F 数设置为 5，再结合行频和内存等因素，将积分级数设置为 8。经过计算可知，系统的信噪比 R_{SN} 为 64，这样的信噪比可以满足实际应用要求。

相机的 MTF 值由光学系统设计的 MTF 值、光学系统加工和装调的 MTF 值以及探测器采样的 MTF 值共同决定^[15]，根据实际使用要求，该高光谱相机的 MTF 在奈奎斯特频率（118lp/mm）处应大于 0.12，其表达式为

$$MTF = MTF_{design} \cdot MTF_{manufacture} \cdot MTF_{CMOS}, \quad (5)$$

其中， MTF 为相机的 MTF 值， MTF_{design} 为光学系统设计的 MTF 值， $MTF_{manufacture}$ 为光学系统加工和装调的 MTF 值，根据工程经验可将其设置为 0.8，而 MTF_{CMOS} 为 CMOS 探测器的

MTF 值，其值一般为 0.5。经计算可知， MTF_{design} 应至少为 0.3。结合应用需求，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 Design parameters of the optical system

Parameters	Value
Wavelength range	400-1000nm
Focal length	100mm
F-number	5
Field of view	$\pm 7.1^\circ$
MTF	$>0.3@118lp/mm$
Distortion	$<0.06\%$

2.2 光学系统初步设计

根据表 1 中的设计参数，本系统选择了具有 7 个透镜的摄远物镜作为初始结构，该系统的第一个元件被设置为正弯月形透镜，以压缩轴外光线相对于光轴的角度，从而减小其他光学元件的口径。另外，由于滤光片可能存在光谱偏移问题，系统需在像空间具有像方远心光路，以保证不同视场的像方主光线可以垂直入射到像平面。而为实现系统的像方远心特性，在像平面前方设置了正透镜组以压缩出射光线，并使其与光轴平行。由于系统的工作谱段太宽，因此有必要消除色差和二次光谱。为了对系统进行色差校正，系统通常会使用由色散小的冕牌玻璃和色散大的火石玻璃组成的双胶合透镜^[16]。然而，受空间环境的影响，双胶合透镜结构不稳定，因此很少用于航空航天相机。基于此，系统使用了两组具有一定空气间隔的双分离透镜。为了提高系统的透过率，系统选择了在 400-1000nm 范围内透过率较高的玻璃，并把光线与各面法线的夹角控制得尽可能小，以减少光线的反射。同时，为了增加优化的自由度，在系统中增加了两个透镜。

在上述基础上，使用光学设计软件 ZEMAX 对系统进行优化。经过多次迭代优化，得到了如图 1 所示的初始光学系统。系统的 MTF 和纵向像差曲线分别如图 2 和图 3 所示。从图 2 可以看出，各个视场的 MTF 均较低，这意味着系统成像质量较差。由于 0.707 孔径处的消色差使得全孔径的色差接近近轴区域的色差，因此系统以 0.707 孔径处的色差作为主要参考，从而使系统达到最佳的消色差效果。如图 3，在纵向像差曲线中，400nm、700nm 和 1000nm 的波长在 0.707 孔径处不收敛，且系统在该区域的色差为 0.135mm，表明系统没有实现复消色差。为了增强系统的复消色差能力，应更换系统中不合适的玻璃。因此，玻璃的选择方法是后续设计的关键。本文将使用 Buchdahl 色散模型来分析玻璃材料的色散特性，并为系统

选择合适的玻璃。

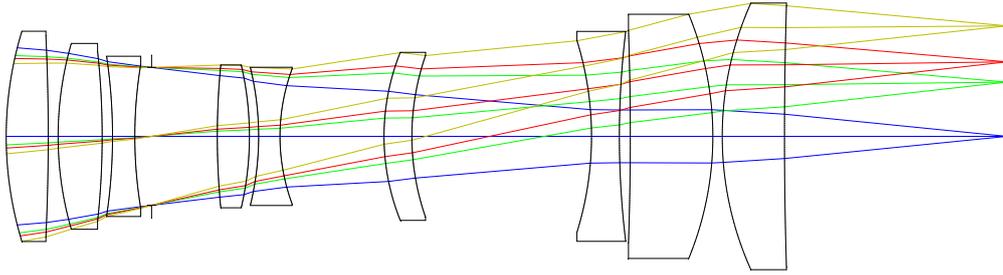


图1 初始光学系统结构

Fig. 1 Optical configuration of the initial system

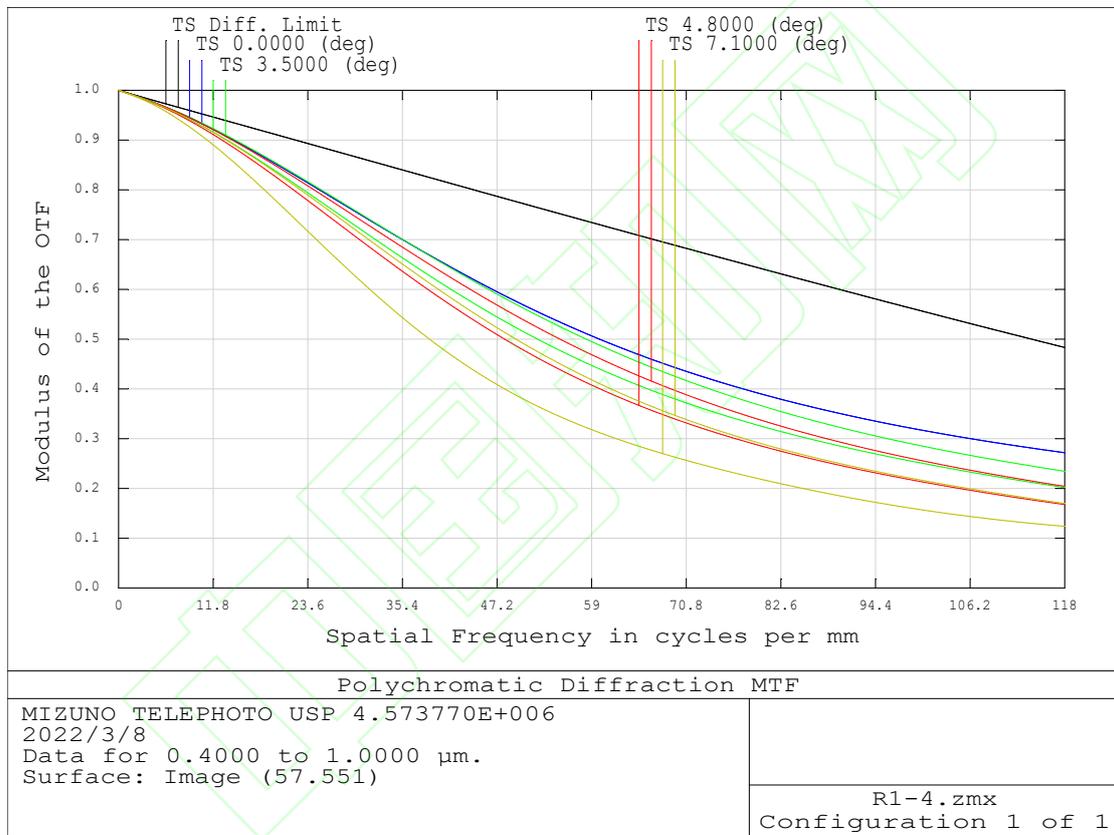


图2 初始光学系统的MTF

Fig. 2 MTF of the initial optical system

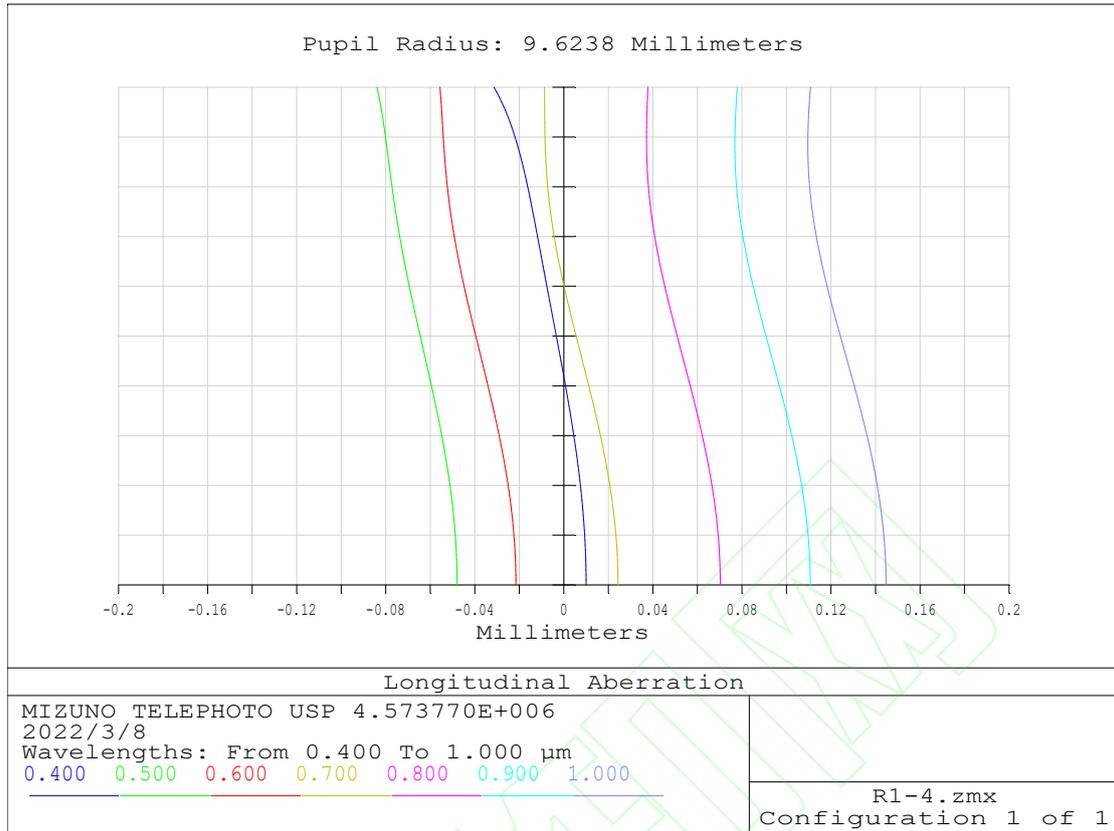


图3 初始光学系统的纵向像差

Fig. 3 Longitudinal aberration of the initial optical system

3 复消色差玻璃的选择

3.1 Buchdahl 色散模型

光学材料的折射率随波长的变化而变化的这一现象称为色散，因此对于玻璃材料来说，在研究玻璃材料的色散特性之前，首先要对玻璃材料的折射率进行准确地描述。肖特模型作为常规的描述玻璃材料折射率之一的模型，可由公式（6）进行表述。

$$N^2 = A_0 + A_1 \cdot \lambda^2 + A_2 \cdot \lambda^{-2} + A_3 \cdot \lambda^{-4} + A_4 \cdot \lambda^{-6} + A_5 \cdot \lambda^{-8}, \quad (6)$$

其中， N 是波长为 λ 时的折射率， A_0 、 A_1 …… A_5 是玻璃材料不同阶数的系数，由每种玻璃材料的制造商提供^[17]。

折射率作为波长的函数，可以表示成多项式求和的形式，其具体表达式如公式（7）所示。

$$\Delta N(\lambda) = a_0 + a_1 \cdot \Delta\lambda + a_2 \cdot (\Delta\lambda)^2 + a_3 \cdot (\Delta\lambda)^3 + \dots, \quad (7)$$

其中， $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ ， λ_0 表示中心波长， $\Delta N(\lambda)$ 表示对应的折射率之间的差值，当 $\Delta\lambda$ 足够

小时， $\Delta N(\lambda)$ 近似对应该波长下的色散。然而，等式（7）的收敛速度很慢，即使对于足够小的 $\Delta\lambda$ ，也需要高阶项来满足收敛条件，另外，只有 $\Delta\lambda$ 较小时，才能满足拟合精度要求。等式（6）描述了折射率的平方与波长之间的关系，导致求解等式（6）时计算过程复杂繁琐。对于实际应用下的色散特性理论分析，等式（6）和等式（7）都显得过于复杂。为简化计算过程并保证精度要求，有必要获得一种收敛速度较快的折射率公式。

Buchdahl 色散模型通过引入色散坐标得到了快速收敛的折射率公式^[18]，色散坐标 ω ^[19] 作为波长 λ 的函数，可以定义为

$$\omega = \frac{\lambda - \lambda_0}{1 + \alpha(\lambda - \lambda_0)}, \quad (8)$$

其中， λ_0 的单位为 μm ， α 被称为比例因子，是使 Buchdahl 色散模型快速收敛的常数，且 α 可以通过公式（9）计算得到。

$$\alpha = \frac{\alpha'}{1 + \alpha(\lambda_0 - \lambda_0')}, \quad (9)$$

在公式（9）中，根据统计结果可知，当 $\lambda_0' = 0.574\mu\text{m}$ 时， α' 有接近 2.5 的最佳值，由此可以计算任意中心波长 λ_0 下的 α ^[20]。

不同于折射率关于波长的函数^[21]，Buchdahl 色散模型是玻璃折射率关于色散坐标的函数，其表达式如公式（10）所示。

$$N = N_0 + v_1\omega + v_2\omega^2 + \dots + v_i\omega^i, \quad (10)$$

其中， N_0 为中心波长 λ_0 对应的折射率， v_i 为每种玻璃所特有的玻璃系数。当用公式（10）表征玻璃材料的色散特性时， ω 取到平方项就能得到较好的精度^[22]。也就是说，只需确定玻璃系数 v_1 和 v_2 即可， v_1 和 v_2 的详细计算过程如文献^[23]所述。

玻璃的色散系数 η_i 定义为：

$$\eta_i = \frac{v_i}{N_0 - 1}, \quad (11)$$

其中， η_i 称为玻璃的色散系数，而 η_1 称为初级色散系数， η_2 称为次级色散系数， η_3 称为第三级色散系数，以此类推。

作为描述玻璃材料色散特性的方法之一，色散度 D 被定义为

$$D(\lambda) = \frac{\Delta N}{N_0 - 1}, \quad (12)$$

将 Buchdahl 色散模型代入色散度公式中，公式 (12) 可以进一步写为

$$\begin{cases} D(\lambda) = \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{N_0 - 1} \omega^i = \sum_{i=1}^m \eta_i \omega^i \\ \eta_i = \frac{v_i}{N_0 - 1} \end{cases}, \quad (13)$$

根据三级像差理论可知，纵向色差和横向色差存在在 $L\text{Achc} = -T\text{Achc} / u_k'$ 的关系，

因此只需要分析横向色差即可。对于无穷远处的物体，横向色差可以表示为

$$T\text{Achc} = \sum_{j=1}^n \frac{y_j^2 \phi_j}{u_k' V_j}, \quad (14)$$

其中， y_j 为边缘光线经过每个透镜的高度， ϕ_j 为每个透镜的光焦度，系统出射光线与光轴的夹角 $u_k' = -y_1 / f' = -\phi_0 y_1$ (ϕ_0 为光学系统的光焦度)， V_j 可用瞬时阿贝数来代替，所以

$V_j = -\frac{1}{2} \frac{n(\lambda) - 1}{dn/d\lambda}$ 。倘若忽略常数项，则 V_j 近似为 D 的倒数，公式 (14) 可进一步改写为

$$T\text{Achc} = -y_1 \cdot D_0 = -y_1 \cdot \sum_{j=1}^n \frac{y_j^2 \phi_j}{y_1^2 \phi_0} \cdot D_j(\lambda), \quad (15)$$

其中， D_0 为系统的色散度， y_1 为第 1 个透镜的光线高度， n 为光学系统中透镜的数量。

将二次 Buchdahl 色散模型代入公式 (15) 中，可得下列等式

$$\begin{cases} D_0 = \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot (\eta_{1j} \cdot \omega + \eta_{2j} \cdot \omega^2) = \eta_{10} \omega + \eta_{20} \omega^2 \\ \alpha_j = \frac{y_j^2 \cdot \phi_j}{y_1^2 \cdot \phi_0} \\ \eta_{i0} = \sum_{j=1}^n \alpha_j \eta_{ij} (i=1,2) \end{cases}, \quad (16)$$

其中， α_j 是透镜的比例因子， η_{10} 和 η_{20} 是系统的初级和次级色散系数，而 η_{1j} 和 η_{2j} 是第 j 个透镜的初级和次级色散系数。这样，每个透镜的色散特性都可以用 η_1 和 η_2 组成的坐标系中的某一点坐标 (η_{1j}, η_{2j}) 进行描述，而整个系统的色散特性可由系统各个透镜的色散特性叠加而得，若表示成矢量的形式，则光学系统的色散特性可以表示为

$$\mathbf{G}_0 = \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot \mathbf{G}_j, \quad (17)$$

其中， $\mathbf{G}_0 = (\eta_{10}, \eta_{20})$ ， $\mathbf{G}_j = (\eta_{1j}, \eta_{2j})$ ， \mathbf{G}_0 越小即光学系统的整体色散越小，表明系统的复消色差能力越好，反映在数值上则为 \mathbf{G}_0 的模越小越好。为了提高系统的复消色差能力，通过更换透镜的玻璃材料以调整透镜的比例因子及玻璃材料的色散系数从而减小 \mathbf{G}_0 的模值是一个好的选择。通过计算，可以得到成都光明 (CDGM) 生产的所有玻璃材料的色散系数，如图 4 所示。

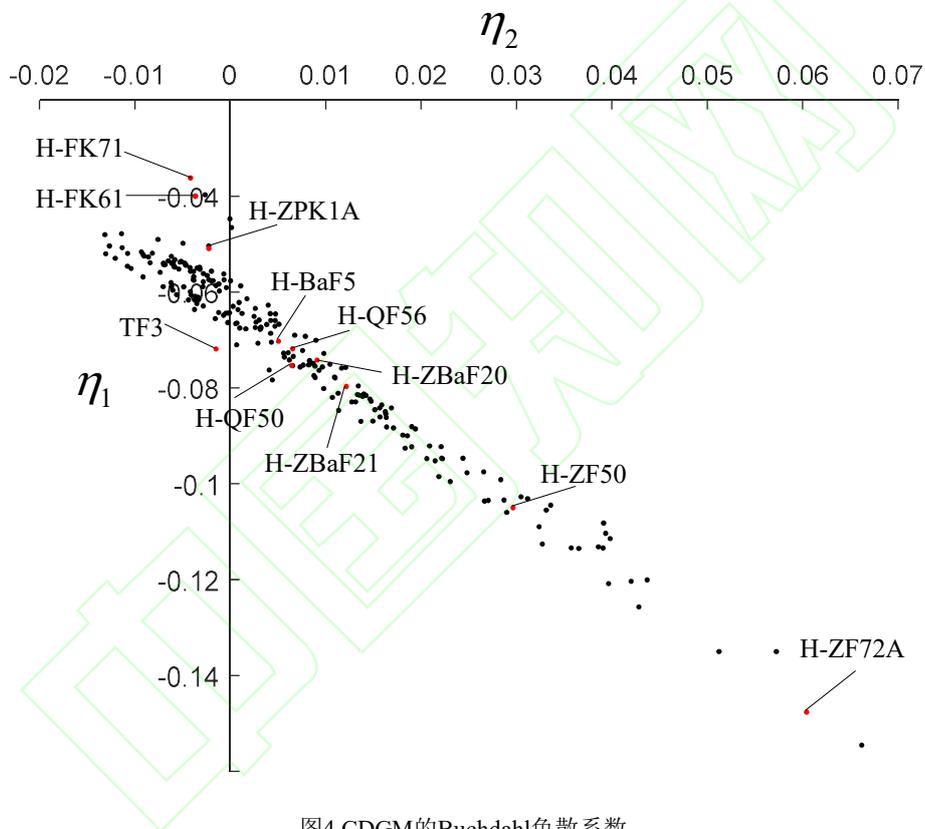


图4 CDGM的Buchdahl色散系数

Fig. 4 Buchdahl dispersion coefficient of CDGM

3.2 色散矢量分析和玻璃更换

在进行玻璃材料更换之前，选择合适的透镜进行玻璃材料的更换是关键所在。表 2 展示了初始光学系统的光线追迹参数及每块玻璃的色散系数，对应的色散矢量图如图 5 所示。红箭头长划线表示正透镜的色散矢量总和，黑箭头实线表示负透镜的色散矢量总和，蓝箭头圆点线表示整个系统的色散矢量，其模值为 0.0129。从图 5 可以看出，负透镜的总色散矢量与

正透镜的总色散矢量相距较远，导致较大的合成矢量 \mathbf{G}_0 ，因此存在较大的残留色差。

表 2 初始光学系统的光线追迹参数

Table 2 Ray-tracing parameters of the initial optical system

Number	Glass	ϕ_j/mm^{-1}	y_i/mm	N_0	α_j	η_1	η_2
1	H-FK61	0.015	9.624	1.4942	1.4436	-0.0400	-0.0037
2	H-FK71	0.018	9.003	1.4542	1.5159	-0.0362	-0.0042
3	H-BaF5	-0.024	8.103	1.5995	-1.6373	-0.0703	0.0051
4	H-ZBaF21	0.031	6.596	1.7151	1.4014	-0.0797	0.0122
5	H-QF56	-0.047	5.981	1.5615	-1.7470	-0.0718	0.0065
6	H-ZF72A	0.00599	4.902	1.9027	0.1496	-0.1476	0.0604
7	H-ZF50	-0.031	2.932	1.7294	-0.2769	-0.105	0.0296
8	H-ZBaF20	0.019	2.884	1.6940	0.1642	-0.0742	0.0091
9	H-ZPK1A	0.017	2.833	1.6135	0.1418	-0.0509	-0.0022

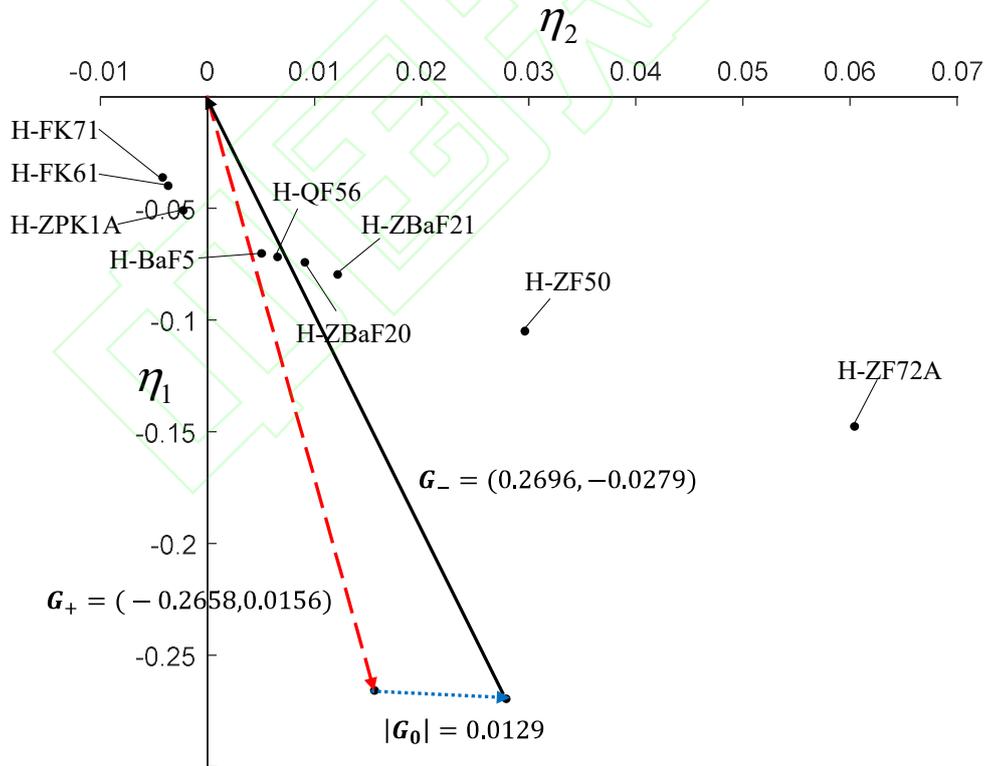


图5 初始光学系统各透镜的色散系数及色散矢量

Fig. 5 The dispersion coefficient and vector of each lens of the initial optical system

为了尽可能减小 \mathbf{G}_0 的模，应该更换一些负透镜的玻璃材料。另外，为保证系统焦距变

化不大，色散矢量坐标系中远离原点的玻璃不能被替代。从图 5 中可以看出，H-ZF50 和 H-ZF72A 两个玻璃离原点较远，所以不可更换；而靠近原点的玻璃对系统的色差影响不大，其中 H-FK61、H-FK71 和 H-ZPK1A 三个玻璃离原点较近；也就是说，可以更换的玻璃集中在色散系数处于中间的那部分，可以看出，玻璃 H-BaF5、H-QF56、H-ZBaF20 及 H-ZBaF21 在图 5 的中间位置。其中，H-ZBaF20、H-ZBaF21 均为正透镜，H-BaF5、H-QF56 均为负透镜。另外，H-BaF5 和 H-QF56 分别对应第三个和第五个透镜，它们都属于减少色差的双分离透镜的一部分，如前文 2.2 节所述。因此，应该选择更换第三和第五个透镜的玻璃材料。选择的新玻璃在 η 空间中的坐标 (η_1, η_2) 应该接近原来的玻璃，这样它们的色散系数不会相差太大，可以防止其他像差的增加以及光焦度的过度变化。

根据上述原则，选用玻璃材料 H-QF50 和 TF3 来分别替代原来的玻璃材料 H-BaF5 和 H-QF56。更换玻璃材料后，使用 ZEMAX 软件对系统进行优化，优化后光学系统的结构如图 6 所示，光学系统的光线追迹参数及每块玻璃的色散系数如表 3 所示，对应的色散矢量图如图 7 所示。从图中可以看出， G_0 的模为 0.0108，比初始系统小很多。也就是说，系统最终的色散系数很小，表明该系统具有良好的复消色差能力。系统的纵向像差曲线如图 8 所示，可以看出，400nm 和 1000nm 的波长在 0.707 孔径处会聚在了一点，表明系统在 0.707 孔径处校正了色差；而 700nm 的波长在 0.707 孔径处离 400nm 和 1000nm 波长的交点尚存在一定的距离，表明系统未完全消除二级光谱，且系统在 0.707 孔径处的二次光谱为 $1.25\mu\text{m}$ 。在初始光学系统纵向色差曲线中，400nm、700nm 和 1000nm 的波长在 0.707 孔径处均不收敛，色差还很大，二级光谱更是无从谈起。相比初始光学系统，尽管进行了玻璃材料更换和结构优化后的系统未完全消除二级光谱，但此时的二级光谱远小于初始光学系统，大大提高了系统的复消色差能力。

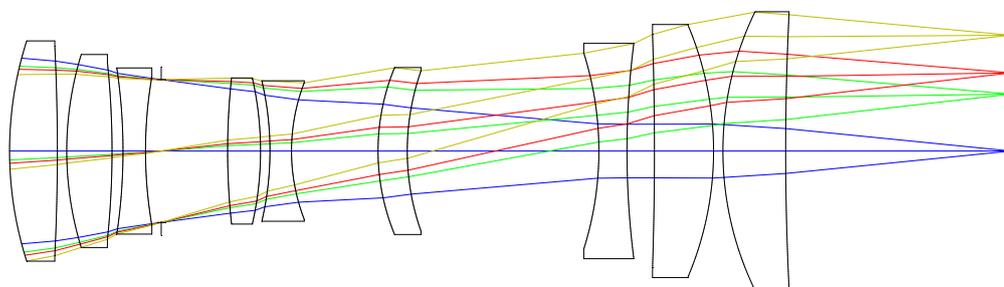


图6 优化后的光学系统结构

Fig. 6 Optical configuration of the optimized system

表 3 优化后光学系统的光线追迹参数

Table 3 Ray-tracing parameters of the optimized optical system

Number	Glass	ϕ_j/mm^{-1}	y_i/mm	N_0	α_j	η_1	η_2
1	H-FK61	0.015	10.005	1.4942	1.5007	-0.04	-0.0037
2	H-FK71	0.018	9.307	1.4542	1.5583	-0.0362	-0.0042
3	H-QF50	-0.023	8.355	1.5752	-1.6047	-0.0753	0.0064
4	H-ZBaF21	0.031	6.692	1.7151	1.3875	-0.0797	0.0122
5	TF3	-0.051	6.008	1.6062	-1.8399	-0.0719	-0.0015
6	H-ZF72A	0.006569	5.05	1.9027	0.1674	-0.1476	0.0604
7	H-ZF50	-0.031	2.944	1.7294	-0.2685	-0.105	0.0296
8	H-ZBaF20	0.019	2.892	1.6940	0.1588	-0.0742	0.0091
9	H-ZPK1A	0.017	2.843	1.6135	-0.1373	-0.0509	-0.0022

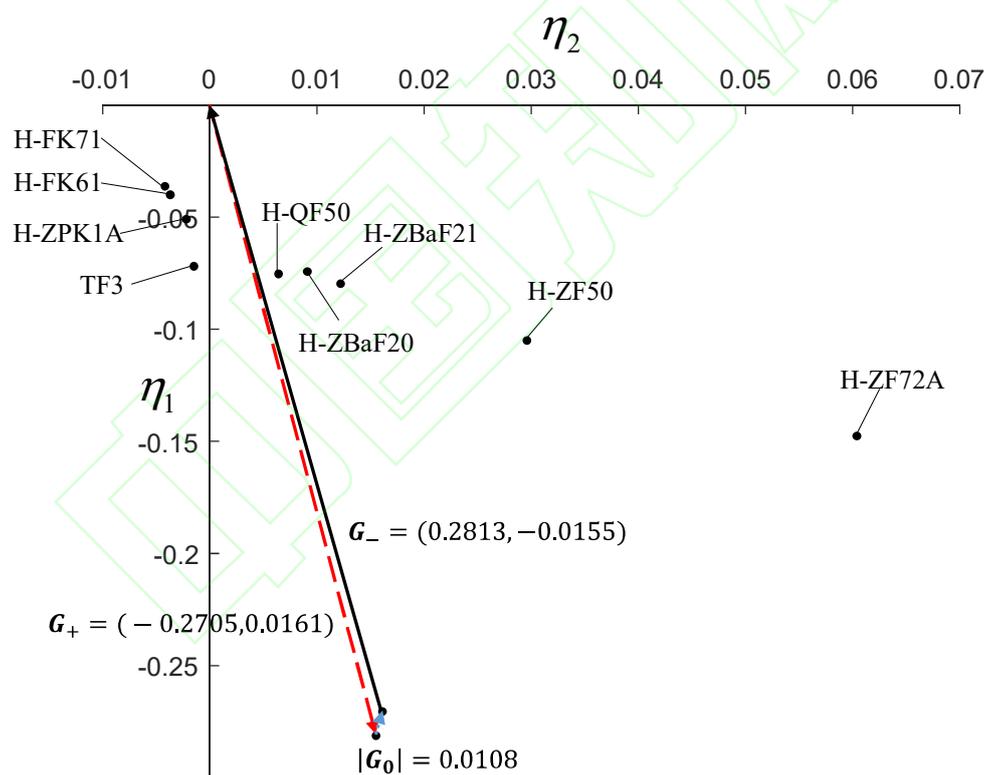


图7 优化后光学系统各透镜的色散系数及色散矢量

Fig. 7 The dispersion coefficient and vector of each lens of the optimized optical system

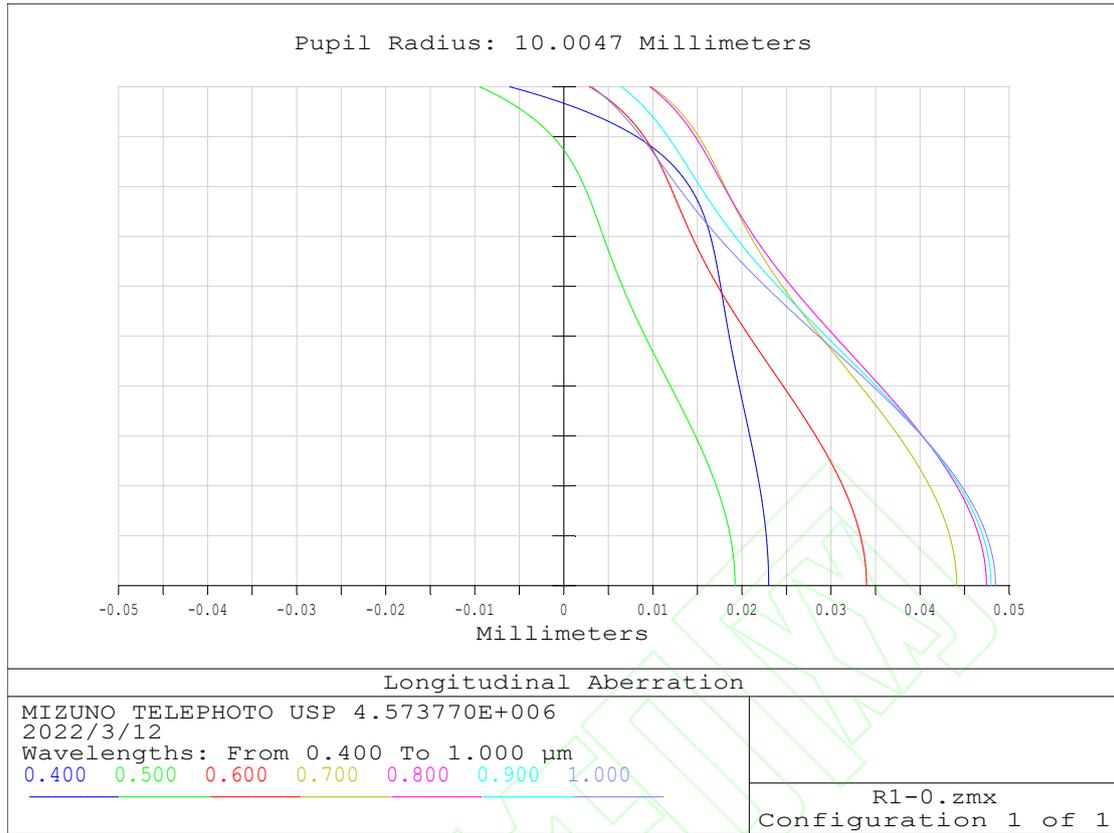


图8 优化后光学系统的纵向像差

Fig. 8 Longitudinal aberration of the optimized optical system

4 像质评价和公差分析

4.1 像质评价

经过以上设计和分析，最终得到了 F 数为 5（相对孔径为 1/5），焦距为 100mm，视场角为 14.2°且光谱范围为 400nm-1000nm 的光学系统。为更好地分析系统的性能，有必要对该系统进行像质评价。光学系统的 MTF 表明了光学系统成像质量的好坏。如图 9 所示，全视场的 MTF 在 118lp/mm 处位于 0.4 左右，优于系统设计要求。可见，该系统具有良好的对比度，且轴上和轴外的成像质量表现出良好的一致性。系统的点列图如图 10 所示。可以看出，全视场的均方根半径小于单个像元大小，表明系统具有较高的分辨率。图 11 为系统的场曲和畸变，从图 11 的右侧可以看出，系统的最大畸变小于 0.06%，表明畸变校正良好；从图 11 的左侧可以看出，所有波段的场曲均小于 0.05mm，表明场曲得到了良好的校正。

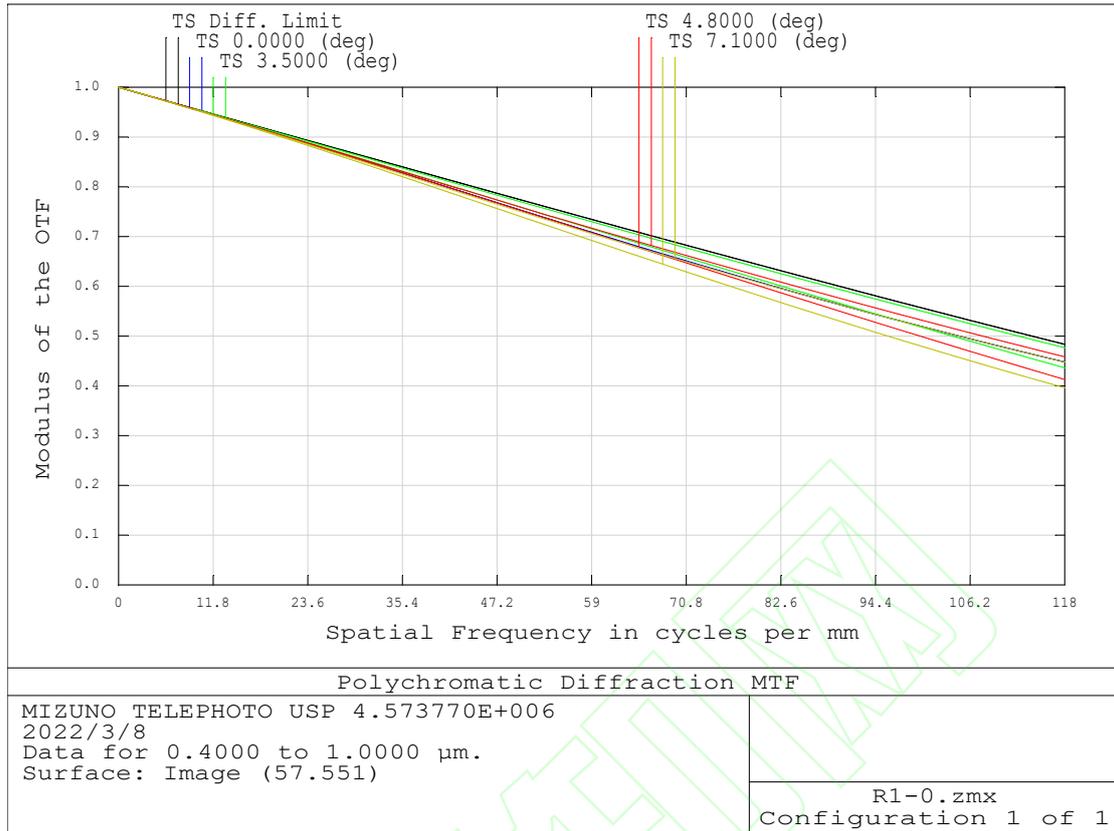


图9 优化后光学系统的MTF

Fig. 9 MTF of the optimized optical system

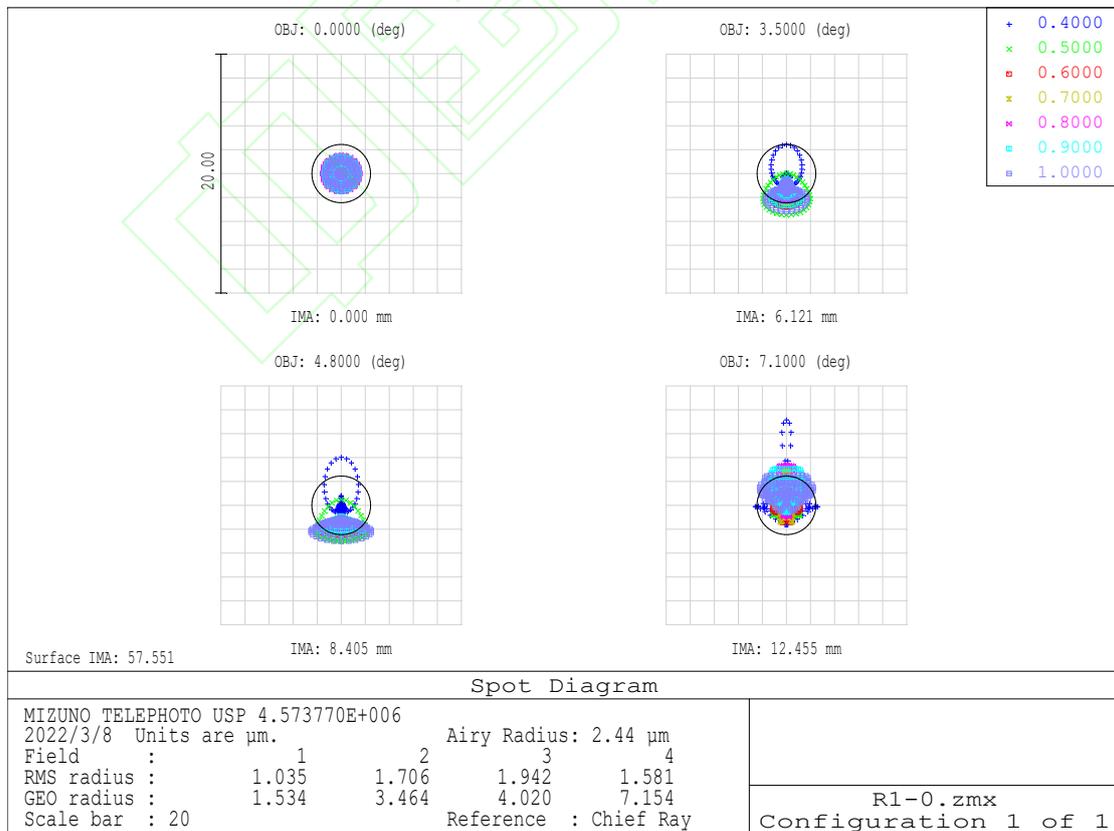


图10 优化后光学系统的点列图

Fig. 10 Spot diagram of the optimized optical system

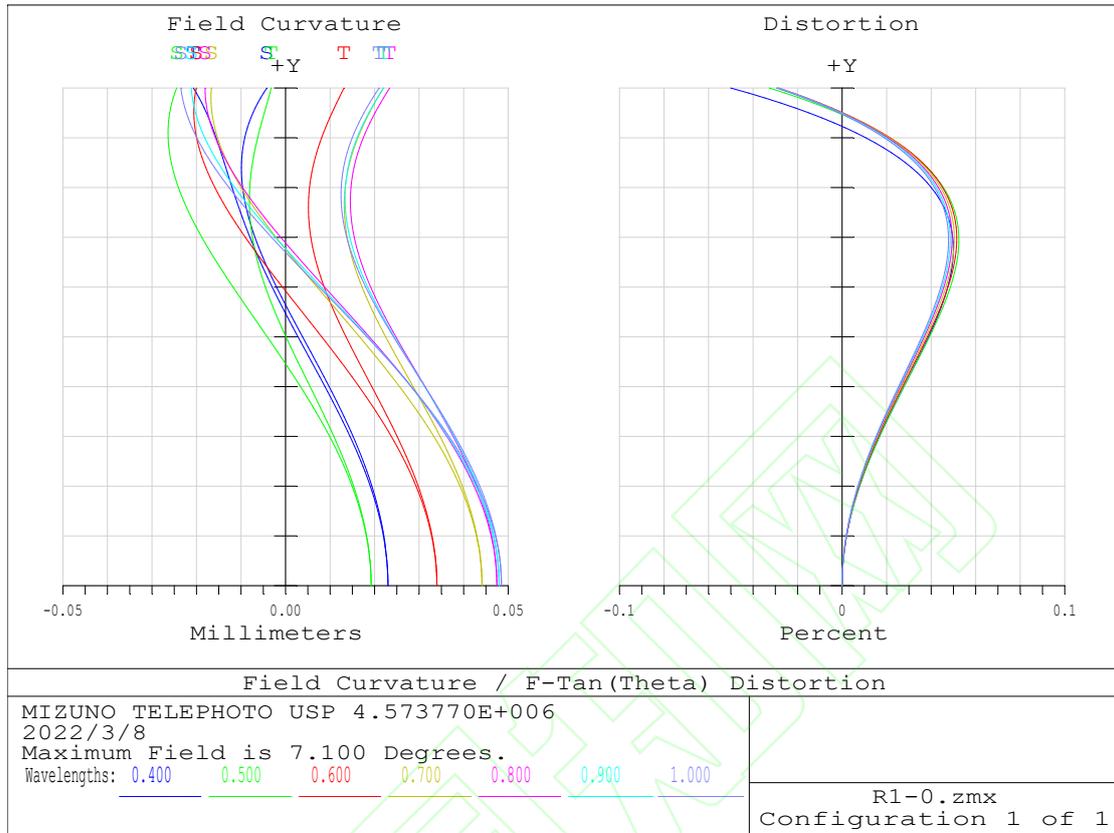


图11 优化后光学系统的场曲和畸变

Fig. 11 Field curvature and distortion of the optimized optical system

4.2 公差分析

光学系统设计完成之后，需要对系统进行公差分析。公差分析用于系统地分析微小误差或色散对光学系统性能的影响，以确定各误差的类型和数值，并将其引入光学系统，以分析系统性能是否符合实际要求^[24]。在本次公差分析中，以 118lp/mm 处的衍射平均 MTF 作为评价标准，表面和元件的公差分配分别如表 4 和表 5。根据公差分析结果中 118lp/mm 处的衍射平均 MTF 在 0.4 以上的概率为 90%，可以看出系统满足实际加工和装调的要求。

表 4 表面公差分配

Table 4 Tolerance assignment of surfaces

Tolerance Items	Value
Radius /fringes	1
Thickness /mm	0.01
Decenter (X/Y) /mm	0.01
Tilt (X/Y) /degrees	0.0042

表 5 元件公差分配

Table 5 Tolerance assignment of components

Parameters	Value
Decenter (X/Y) /mm	0.01
Tilt (X/Y) /degrees	0.01
Index of refraction	0.0003
Abbe number /%	0.5

5 实验结果分析

5.1 传递函数测试

针对前文所设计的光学系统，实验测试了其奈奎斯特频率下不同视场的 MTF 曲线，如图 12 所示。经测试， 0° 、 -7.1° 和 7.1° 半视场下的 MTF 分别大于 0.4、0.3 和 0.25，表明系统性能较为优良。

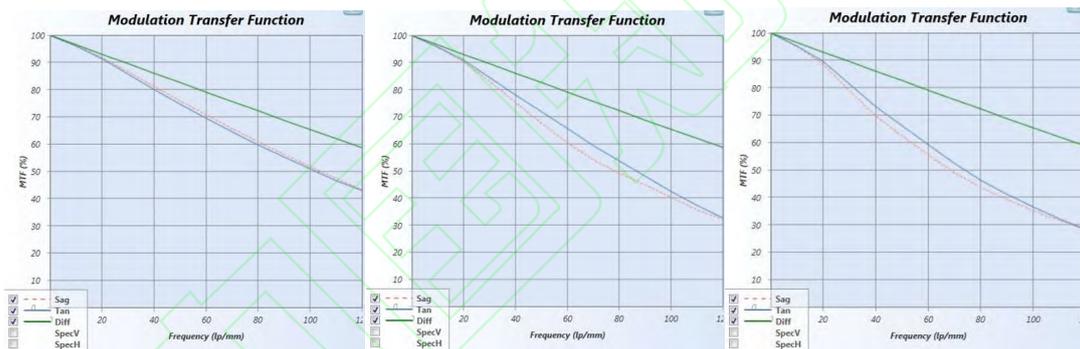


图12 不同视场下的MTF测试结果。(a) 0° ; (b) -7.1° ; (c) 7.1°

Fig. 12 MTF experiment results at different fields of view. (a) 0° ; (b) -7.1° ; (c) 7.1°

6 结论

本文针对高分辨率、大幅宽的宽波段高光谱相机，基于 Buchdahl 色散模型，设计了一款具有宽波段的复消色差光学系统。首先根据实际应用需求确定了系统的设计参数，然后设计了光学系统的初始结构。之后为提高系统的复消色差能力，采用了基于 Buchdahl 色散模型的矢量运算方法来分析玻璃材料的色散特性，并据此更换了系统中某些透镜的玻璃材料。经过最终优化后，系统具有良好的成像质量。不同视场的 RMS 光斑尺寸均小于单个像元大小，且在 118lp/mm 的奈奎斯特频率处，MTF 将近 0.4，系统的场曲和畸变也得到了很好的

校正。公差分析结果表明,该系统满足加工和装调要求。在满足地面采样距离为 21.5m,幅宽为 125km,谱段范围为 400-1000nm 的成像需求下,对焦距为 100mm, F 数为 5 以及视场角为 14.2° 的光学系统进行了传递函数测试,测试结果表明,系统符合实际应用条件。

参考文献

- [1] 常凌颖,张强,邱跃洪. 宽光谱一体化 AOTF 成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0722002.
Chang L Y, Zhang Q, Qiu Y H. Design of optical system for broadband and integrated AOFF imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0722002.
- [2] 贾文波,秦天翔,黄蕴涵,等. 红外双波段成像光谱仪光学系统的设计与分析[J]. 中国激光, 2021, 48(23): 2311002.
Jia W B, Qin T X, Huang Y H, et al. Optical system design and analysis for a infrared dual-band imaging spectrometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2311002.
- [3] 沈宇航,倪争技,黄元申,等. 凸面光栅同心结构成像光谱仪的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0900002.
Shen Y H, Ni Z J, Huang Y S, et al. Research progress of concentric imaging spectrometer with convex grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0900002.
- [4] 梁德印,安萌,王啸虎,等. 资源一号 02D 卫星高光谱相机系统指标论证及总体设计[J]. 航天器工程, 2020, 29(6): 26-34.
Liang D Y, An M, Wang X H, et al. Hyperspectral camera system index argument and system design of ZY-1-02D satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(6): 26-34.
- [5] 薛庆生,王楠,杨柏. 基于 PGP 型自校正成像光谱仪系统设计与研究[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2322001.
Xue Q S, Wang N, Yang B. Design and research of self-correcting imaging spectrometer system based on PGP[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2322001.
- [6] 刘春雨,丁祎,刘帅,等. 滤光片分光型高光谱相机发展现状及趋势(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 20210981.
Liu C Y, Ding Y, Liu S, et al. Development status and trend of filter hyperspectral camera (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 20210981.
- [7] Mahmoud K, Park S, Lee D H. Development of a new linearly variable edge filter (LVEF)-based compact slit-less mini-spectrometer[C]//Journal of Physics: Conference Series, February, 2018, Korea, Egypt, Saudi Arabia. Ireland: IOP, 2018, 972: 1-8.
- [8] 王颖,巩岩. 线性渐变滤光片型多光谱成像光谱仪设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 013003.
Wang Y, Gong Y. Design of multispectral imaging spectrometer using linear variable filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 013003.
- [9] Grammatin A P, Tsyganok E A. Apochromatic systems made from glasses with ordinary dispersion behavior[J]. Journal of Optical Technology, 2012, 79(4): 202-204.
- [10] 王伟. 多波段短波红外相机光学系统设计与成像质量评估[D]. 长春: 中国科学院大学, 2020: 49-51.
Wang W. Optical system design and imaging quality evaluation of multi-band short-wave

- infrared camera[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 49-51.
- [11] Duplov R. Apochromatic telescope without anomalous dispersion glasses[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(21): 5164-5167.
- [12] 杜康. 微纳卫星遥感相机光学系统紧凑化设计与杂散光分析[D]. 长春: 中国科学院大学, 2020: 15-18.
- Du K. Optical system compact design and stray light analysis of micro/nano satellite remote sensing camera[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 49-51.
- [13] 姚园. 大视场三线阵航空测绘相机光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(9): 2335-2344.
- Yao Y. Optical-system design for large filed-of-view three line array airborne mapping camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(9): 2335-2344.
- [14] 韩昌元. 光电成像系统的性能优化[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 1-9.
- Han C Y. Performance optimization of electro-optical imaging systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 1-9.
- [15] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2164-2172.
- Han C Y. Study on optical system of high resolution space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2164-2172.
- [16] 白清兰. 复消色差的短波红外望远物镜设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(1): 115-119.
- Bai Q L. Apochromatized design of teleobjective in short wave infrared band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1): 115-119.
- [17] Sigler R D. Glass selection for airspaced apochromats using the Buchdahl dispersion equation[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(23): 4311-4324.
- [18] Reardon P J, Chipman R A. Buchdahl's glass dispersion coefficients calculated from Schott equation constants[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(15): 3520-3523.
- [19] Ojala T, Pietikainen M, Maenpaa T. Design and fabrication of multispectral optics using expanded glass map[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9451: 94511N.
- [20] Chipman R A, Reardon P J. Buchdahl's glass dispersion coefficients calculated in the near infrared[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(4): 684-698.
- [21] De Albuquerque B F C, 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.
- [22] Robb P N, Mercado R I. Calculation of refractive indices using Buchdahl's chromatic coordinate[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(8): 1198-1215.
- [23] Yuan 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.
- [24] Xie Y Q, Liu C Y, Liu S, *et al.* Optical design of imaging spectrometer based on linear variable filter for nighttime light remote sensing[J]. *Sensors*, 2021, 21, 4313.