

用于偏振成像系统的20 mm~200 mm变焦物镜设计

陈鑫 甄胜来 方健 陶善静 俞本立

Design of 20 mm~200 mm zoom objective lens for polarization imaging system

CHEN Xin, ZHEN Shenglai, FANG Jian, TAO Shanjing, YU Benli

引用本文:

陈鑫, 甄胜来, 方健, 等. 用于偏振成像系统的20 mm~200 mm变焦物镜设计[J]. 应用光学, 2022, 43(5): 846–852. DOI: 10.5768/JAO202243.0501003

CHEN Xin, ZHEN Shenglai, FANG Jian, et al. Design of 20 mm~200 mm zoom objective lens for polarization imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(5): 846–852. DOI: 10.5768/JAO202243.0501003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0501003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[30 mm~300 mm轻型变焦物镜光学系统设计](#)

Optical system design of 30 mm~300 mm light weight zoom objective

应用光学. 2019, 40(1): 51–57 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101009>

[50 mm ~ 1 000 mm大变倍比变焦光学系统设计](#)

Design of 50 mm~1 000 mm zoom optical system with high zoom ratio

应用光学. 2020, 41(6): 1147–1152 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0601002>

[变焦投影物镜光学系统设计](#)

Optical design of zoom projection lens

应用光学. 2017, 38(2): 180–186 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0201005>

[一种工作于长波红外波段的40[×]成像物镜设计](#)

Design of 40[×] imaging objective lens in long-wave infrared band

应用光学. 2021, 42(2): 229–235 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0201004>

[变焦结构光成像系统的光学设计](#)

Optical design of zoom structured light imaging system

应用光学. 2018, 39(1): 22–27 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101004>

[多动型变焦距物镜设计](#)

Optical design of telephoto zoom lens

应用光学. 2017, 38(2): 277–280 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0205001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082(2022)05-0846-07

用于偏振成像系统的 20 mm~200 mm 变焦物镜设计

陈 鑫^{1,2},甄胜来^{1,2},方 健^{1,2},陶善静^{1,2},俞本立^{1,2}

(1. 安徽大学 信息材料与智能感知安徽省实验室,安徽 合肥 230601;

2. 安徽大学 光电信息获取与控制教育部重点实验室,安徽 合肥 230601)

摘要:变焦物镜是偏振成像系统的重要组成部分,目前因变焦物镜使用较多非球面而导致价格较为昂贵。为了降低偏振成像系统变焦物镜的加工成本,设计了一款用于偏振成像系统的 20 mm~200 mm 变焦物镜。采用正组补偿,利用 Zemax 优化变焦系统,最终系统仅使用 7 片球面透镜,并达到良好像质,系统调制传递函数(MTF)在 120 lp/mm 处大于 0.3,畸变小于 4%,系统凸轮曲线平滑无断点。系统公差分析结果表明,公差范围设置为:镜片表面光圈公差为 2,镜片或空气中心厚度公差为 ± 0.02 mm,透镜表面中心倾斜公差为 $\pm 0.025^\circ$,透镜装配公差为 ± 0.025 mm,透镜折射率偏差为 0.002,公差设置符合元件加工和系统装调工艺,对降低偏振成像系统成本具有一定的参考价值。

关键词:偏振成像系统;变焦物镜;正组补偿;球面透镜;低成本

中图分类号:TN202;TH703

文献标志码:A

DOI: 10.5768/JAO202243.0501003

Design of 20 mm~200 mm zoom objective lens for polarization imaging system

CHEN Xin^{1,2}, ZHEN Shenglai^{1,2}, FANG Jian^{1,2}, TAO Shanjing^{1,2}, YU Benli^{1,2}

(1. Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Key Laboratory of Opto-electronic Information Acquisition and Manipulation (Ministry of Education), Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: The zoom objective lens is an important part of the polarization imaging system. At present, the zoom objective lens on the market is relatively expensive due to the use of more aspheric surfaces. In order to reduce the processing cost of the polarization imaging system zoom objective lens, a 20 mm~200 mm zoom objective lens for polarization imaging system was designed. By using positive group compensation method and Zemax to optimize the zoom system, the final system used only 7 spherical lenses to achieve good image quality. The modulation transfer function(MTF) is greater than 0.3 at 120 lp/mm, the distortion is less than 4%, and the cam curve of the system is smooth without breakpoints. The system tolerance analysis results show that the tolerance range is set as follows: the aperture tolerance of the lens surface is 2, the thickness tolerance of the lens or air center is ± 0.02 mm, the inclination tolerance of the lens surface center is $\pm 0.025^\circ$, the lens assembly and adjustment tolerance is ± 0.025 mm, and the lens refractive index deviation is 0.002. The tolerance setting conforms to the component processing and system assembly and adjustment process, which has a certain reference value to reduce the cost of polarization imaging system.

Key words: polarization imaging system; zoom objective lens; positive compensation; spherical lens; low cost

引言

偏振成像技术可以获取不同目标在不同波段

下的偏振信息^[1]。偏振成像技术在环境^[2]、农业^[3]、生物^[4]、医学^[5]、军事^[6-7]等领域应用广泛。偏振成

收稿日期:2022-01-18; 修回日期:2022-03-26

基金项目:国家重点研发计划课题(激光多普勒光学与信号处理系统研究)(2016YFC0301902)

作者简介:陈鑫(1997—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: 2417329420@qq.com

通信作者:甄胜来(1977—),男,博士,教授,主要从事激光与光纤传感方面的研究。E-mail: slzhen@ahu.edu.cn

像系统就是利用偏振成像技术实现目标图像重构, 变焦物镜作为偏振成像系统的前置光学装置承担获取目标光信息的关键任务, 因此偏振成像光学系统的设计非常重要^[8]。本文需要设计的偏振成像系统工作在短波红外波段, 市面上短波红外变焦镜头较少且价格较为昂贵, 一个重要原因就是变焦物镜普遍使用较多非球面, 大多变焦镜头镜片数量大于 9 片, 导致加工和装配成本较高。因此, 在满足像质要求的前提下, 不使用非球面, 减少镜片数量, 降低加工和装配成本, 对变焦系统的发展具有深远的影响。

2006 年, Hiroshi Sato 采用塑料透镜元件设计了数码相机变焦镜头, 降低了镜片的加工成本^[9]。2011 年, 王海燕等采用光学塑料非球面透镜与标准玻璃球面透镜混合结构, 设计了低成本高变倍手机变焦摄像镜头^[10]。2018 年, 白冰虎等人全部使用球面透镜设计了一款焦距为 100 mm~600 mm 的变焦镜头, 满足了应用需求^[11]。2019 年, 彭台然等利用一种结构简单、成本低廉的可变形透镜实现了低阶像差的校正^[12]。文献 [9] 和 [10] 利用光学塑料制成的镜片虽然加工成本较低, 但却对温度敏感, 温度变化较大时, 会严重影响镜头成像质量, 对于工作在红外波段的物镜, 由于红外光的热效应, 同样不适用, 因此, 大大限制了变焦镜头的广泛应用。文献 [11] 设计的变焦物镜虽然全部使用球面透镜, 但整个系统较为复杂, 装配误差较大。文献 [12] 提出了一种低成本的透镜结构, 但却只实现了低阶像差的校正, 对高阶像差的校正并未提及。本文在使用 7 片球面透镜的情况下, 设计的变焦物镜达到了像质要求, 同时降低了加工成本。

1 变焦物镜设计

1.1 设计参数及要求

偏振成像系统选用 0.847 cm(1/3 英寸)CMOS(互补金属氧化物半导体)芯片, 其靶面尺寸为 4.8 mm×3.6 mm, 像元尺寸为 4.2 μm。根据 CMOS 芯片的靶面尺寸可得到变焦物镜的焦距为

$$f' = \frac{R \cdot h}{a} \quad (1)$$

式中: f' 为物镜焦距; R 为工作距离, 取 7 m~70 m; h 为靶面高, 取 3.6 mm; a 为目标高度, 取 1.2 m。视场满足公式:

$$\theta = 2 \arctan\left(\frac{l}{2f'}\right) \quad (2)$$

式中: θ 为全视场角; l 为 COMS 芯片对角线长度。

芯片的空间截止频率满足奈奎斯特采样定理, 即:

$$l_p = \frac{1}{2d} \quad (3)$$

式中: l_p 为 CMOS 芯片空间截止频率; d 为 CMOS 芯片像元尺寸。

偏振成像系统集成有主动照明系统, 其工作波长为 940 nm, 为了实现较远工作距离和短波红外成像, 系统设计参数指标如表 1 所示。

表 1 系统设计参数和指标

Table 1 Parameters and indexes of system design

参数	指标
波长/nm	940
焦距/mm	20~200
视场角/(°)	1.7~17
变倍比/(×)	10
相对孔径	1/3.3
MTF	>0.3(@120 lp/mm)
最大畸变/%	<4
镜片数/片	<8
面型	标准球面

1.2 设计理论

采用机械补偿的正组补偿形式, 即补偿组光焦度为正^[13]。正组补偿能够实现较大变倍比, 且像面移动小^[14]。正组补偿系统如图 1 所示。图 1 中 ϕ_1 为前固定组, 在变焦过程中保持固定; ϕ_2 为变倍组, 在变焦过程中运动, 可改变系统的焦距; ϕ_3 为补偿组, 在变焦过程中随变倍组同步运动, 以保持像面稳定; ϕ_4 为后固定组, 在变焦过程中保持稳定; 补偿组 ϕ_3 与后固定组 ϕ_4 之间为光阑。

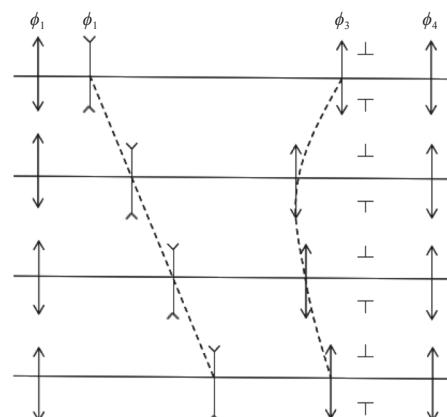


图 1 正组补偿系统

Fig. 1 Four-component mechanical compensation zoom system

设变倍组焦距 $f'_2 = -1$ mm, 为了使变倍组和补偿组移动时不与前固定组和后固定组相撞, 给定

短焦时前固定组与变倍组距离 d_{12S} 和补偿组与后固定组距离 d_{34S} 都等于 0.5 mm, 长焦时变倍组与补偿组距离 d_{23L} 为 0.6 mm。根据变焦系统变焦方程, 以长焦为初始结构, 则有:

$$m_{3L} = \frac{f'_3}{f'_2(1-m_{2L})-d_{23L}+f'_3} \quad (4)$$

式中: m_{2L} 和 m_{3L} 分别为长焦时变倍组和补偿组的倍率; f'_2 和 f'_3 分别为变倍组和补偿组的焦距。变倍组移动 q_2 时, 变倍组倍率 m_2 为

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2L}} + \frac{q_2}{f'_2}} \quad (5)$$

以长焦为初始位置, 变焦系统变焦方程的解为

$$f'_2 \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2L}} + m_2 - m_{2L} \right) + f'_3 \left(\frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3L}} + m_3 - m_{3L} \right) = 0 \quad (6)$$

将(6)式整理成补偿组 ϕ_3 的倍率 m_3 的方程:

$$m_3^2 - bm_3 + 1 = 0 \quad (7)$$

式中, 系数 b 可表示为

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2L}} + m_2 - m_{2L} \right) + \left(\frac{1}{m_{3L}} + m_{3L} \right) \quad (8)$$

补偿组 ϕ_3 的倍率 m_{31} 和 m_{32} 为

$$\begin{cases} m_{31} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \\ m_{32} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \end{cases} \quad (9)$$

由(9)式可得补偿组的移动量 A_1 和 A_2 为

$$\begin{cases} A_1 = f'_3(m_{31} - m_{3L}) \\ A_2 = f'_3(m_{32} - m_{3L}) \end{cases} \quad (10)$$

因此, 可求得系统的总变焦比 Γ_1 和 Γ_2 为

$$\begin{cases} \Gamma_1 = \frac{m_{2L}m_{3L}}{m_2m_{31}} \\ \Gamma_2 = \frac{m_{2L}m_{3L}}{m_2m_{32}} \end{cases} \quad (11)$$

前固定组的焦距 f'_1 为

$$f'_1 = d_{12S} + \frac{f'_2(1-m_{2S})}{m_{2S}} \quad (12)$$

式中 m_{2S} 为短焦时变倍组倍率。变倍组 ϕ_2 每移动 q_2 , 变倍组和补偿组同步移动, 可得需要的总变焦比 Γ_1 和 Γ_2 ^[15]。

当 $d_{23L} = 0.6$ mm 时, 高斯解有解条件为^[16]

$$f'_3 < \frac{(f'_2 + 0.6 + |m_{2L}|)}{2} \quad (13)$$

1.3 设计过程

根据变焦系统理论对系统的主要参数进行计算, 以长焦为初始结构, 求得 $f'_3 = 1.3$ mm, $m_{2L} = -1$,

$m_{3L} = -1$, $f'_1 = 4.9$ mm, 如表 2 所示, 记录了 13 组归一化高斯解数据。

表 2 归一化高斯解

Table 2 Normalized Gaussian solution

q_2	A	d_{12}	d_{23}	d_{34}
0.0	0.000	2.9	0.600	1.362
0.2	0.192	2.7	0.992	1.169
0.4	0.333	2.5	1.333	1.029
0.6	0.439	2.3	1.639	0.922
0.8	0.525	2.1	1.925	0.837
1.0	0.594	1.9	2.194	0.768
1.2	0.652	1.7	2.452	0.710
1.4	0.700	1.5	2.700	0.662
1.6	0.742	1.3	2.942	0.620
1.8	0.778	1.1	3.176	0.584
2.0	0.809	0.9	3.409	0.553
2.2	0.837	0.7	3.637	0.525
2.4	0.862	0.5	3.862	0.500

利用求得的高斯解, 根据 Zemax 建立合适的初始结构^[17]。设 $f'_2 = -40$ mm, 则 $f'_3 = 52$ mm, $f'_1 = 196$ mm。将变焦系统分为 4 个组态, 有效焦距 f' 分别为 20 mm、33 mm、66 mm、200 mm, 系统相对孔径保持不变。利用 APER 操作数设置 4 个组态下的入瞳直径, 因为偏振成像系统的 CCD 相机传感器尺寸为 0.847 cm(1/3 英寸), 利用 YFIE 操作数设置不同组态下的视场。4 个组态的入瞳直径和视场情况如表 3 所示。

表 3 4 个组态入瞳直径和视场

Table 3 Entrance pupil diameter and field of view of four configurations

参数	焦距/mm			
	20	33	66	200
入瞳直径/mm	6.06	10	20	60
视场1/(°)	0	0	0	0
视场2/(°)	6.030	3.672	1.840	0.608
视场3/(°)	8.530	5.194	2.602	0.860

对变焦系统像差进行优化。首先利用 ZEMAX 建立默认评价函数, 添加 CONF 和 EFFL 操作数控制各个组态的有效焦距, 添加 DIMX 操作数控制每个组态的最大畸变小于 4%。为了得到较少的透镜数, 应先分配每组一片透镜进行优化, 如达不到像质要求, 可根据赛德尔图观察影响系统像差最大的透镜, 逐渐增加透镜进行再次优化, 直到满足像质要求。优化过程中不加入非球面, 利用 TOTR

操作数控制各个组态下系统总长,使其相等。最终优化结果如图3所示。

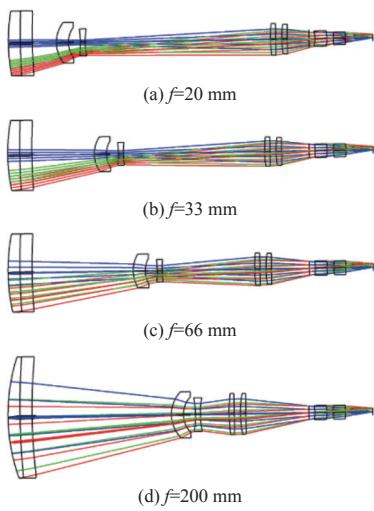


图3 变焦系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of zoom system

1.4 设计结果及像质评价

变焦系统经过像质优化后得到了长焦结构的透镜数据,如表4所示。系统仅使用了7片透镜,且所有透镜表面均为标准球面。

表4 长焦结构透镜数据

Table 4 Lens data of long focal structure

表面类型	曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃
标准球面	157.874	10.002	H-ZLAF89L
标准球面	614.992	10.002	H-BAK5
标准球面	452.332	116.000	/
标准球面	27.489	10.008	H-ZLAF92
标准球面	21.408	10.000	/
标准球面	-80.844	4.000	H-ZLAF90
标准球面	64.604	24.000	/
标准球面	128.747	4.399	H-ZLAF92
标准球面	-557.383	5.000	/
标准球面	85.890	4.593	H-ZLAF92
标准球面	1474.072	52.468	/
标准球面	-28.113	10.005	D-ZK3
标准球面	-35.119	5.356	/
标准球面	60.832	10.006	H-BAK3
标准球面	-157.675	22.904	/

调制传递函数(MTF)是光学系统的像质评价标准之一^[18],变焦系统 MTF 曲线如图4 所示。由图4可以看出,各个组态在 $120 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处 MTF 值均大于 0.3,满足指标要求。

系统 4 个组态下的场曲和畸变如图5 所示。由图5 可看出,系统所有组态场曲均小于 0.1 mm,

最大畸变均小于 4%,满足偏振成像系统的要求。

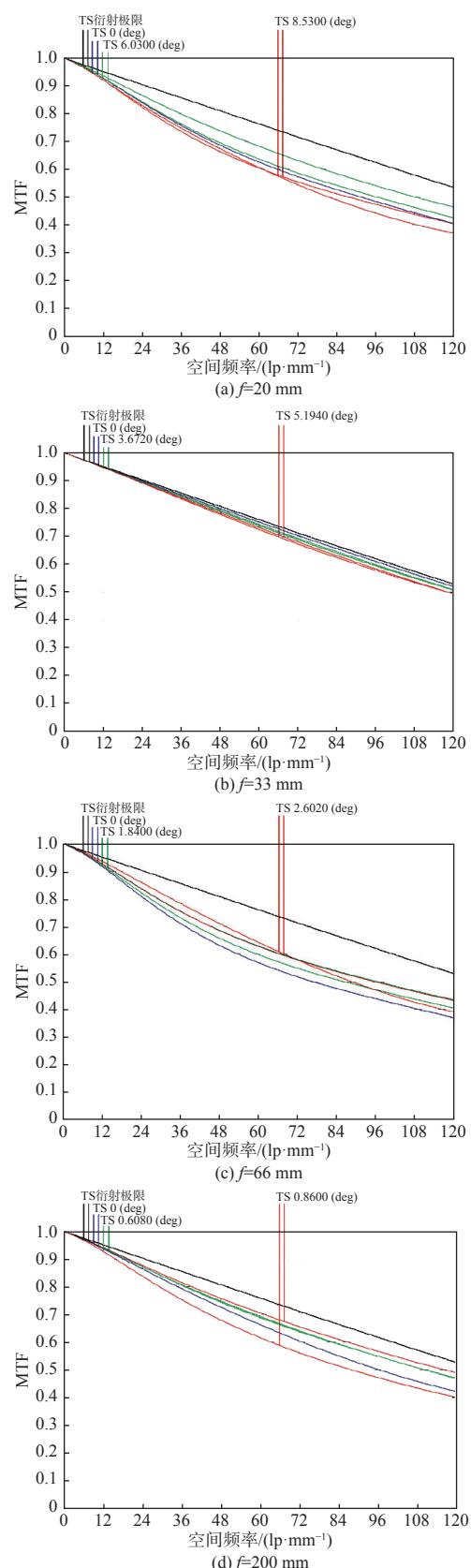


图4 系统 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves of system

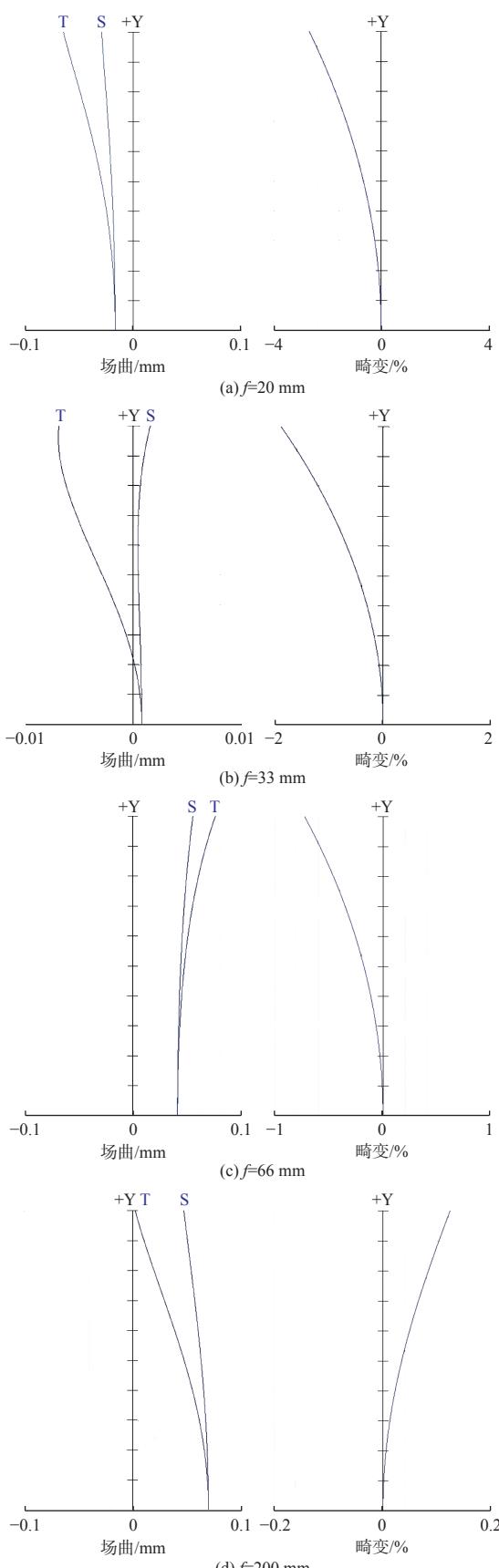


图 5 场曲和畸变

Fig. 5 Curvature of field and distortion

2 凸轮曲线

在变焦系统中,为了使系统在各个焦距下像面不发生漂移并保持稳定,必须使每个组元的位置有严格的对应关系^[19]。凸轮曲线可以描述变倍组与补偿组的运动方式^[20],利用表 2 的 13 组高斯解,即可拟合出系统凸轮曲线,如图 6 所示。图 6 中 x 和 y 分别表示变焦过程中补偿组与变倍组的位置,变倍组做直线运动,补偿组做曲线运动,凸轮曲线平滑无断点。

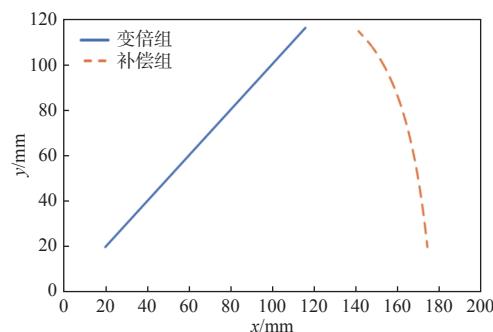


图 6 凸轮曲线

Fig. 6 Cam curve

3 公差分析

在 Zemax 中优化光学系统后,其像质评价指标只是达到设计指标理论值,但在实际加工过程中,影响整个系统性能的因素有多方面,比如各个元件之间的间隔、空气间隔、玻璃材料厚度、材料的折射率系数、阿贝数、偏心、倾斜参数等。因此需要对设计的光学系统进行公差分析。本文选用灵敏度公差分析模式,以衍射 MTF 平均值作为评价函数,进行 400 次蒙特卡洛分析^[21]。系统公差设置为: 镜片表面光圈公差为 2、局部光圈为 0.5、镜片或空气中心厚度公差为 ± 0.02 mm、透镜表面中心倾斜公差为 $\pm 0.025^\circ$ 、透镜装调公差为 ± 0.025 mm、透镜折射率偏差为 0.002、透镜阿贝数偏差为 1%。公差分析结果如表 5 所示。由表 5 可看出,系统在

表 5 公差分析结果

Table 5 Tolerance analysis results

采样率/%	焦距/mm			
	20	33	66	200
90	0.354	0.459	0.348	0.347
80	0.377	0.472	0.366	0.367
50	0.403	0.495	0.391	0.395
20	0.419	0.506	0.412	0.421
10	0.426	0.511	0.420	0.429

该公差范围内像质较高, 设置的公差范围符合透镜加工和系统装调工艺。

4 结论

设计了一款用于偏振成像系统的 20 mm~200 mm 短波红外变焦物镜, 系统仅用 7 片球面透镜实现了 10[~]的较高变倍比, 全视场 MTF 值均大于 0.3, 畸变小于 4%, 达到像质要求, 同时降低了系统加工成本, 系统最终质量为 650 g, 长度为 280 mm, 系统凸轮曲线平滑无断点, 公差设置范围符合元件加工和系统装调工艺。设计结果表明, 该设计方法对于降低偏振成像系统成本有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 周强国, 黄志明, 周炜. 偏振成像技术的研究进展及应用[J]. 红外技术, 2021, 43(9): 817-828.
ZHOU Qiangguo, HUANG Zhiming, ZHOU Wei. Research progress and application of polarization imaging technology[J]. Infrared Technology, 2021, 43(9): 817-828.
- [2] ZHANG W, LIANG J, REN L. Haze-removal polarimetric imaging schemes with the consideration of airlight's circular polarization effect[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2019, 182: 1099-1105.
- [3] 林芬芳, 张东彦, 王秀, 等. 基于偏振光谱的叶片尺度下玉米与杂草识别研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 361-370.
LIN Fenfang, ZHANG Dongyan, WANG Xiu, et al. Identification of corn and weeds on the leaf scaleusing polarization spectroscopy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 361-370.
- [4] SUN Y, SU J W, LO W, et al. Multiphoton polarization imaging of the stratum corneum and the dermis in ex-vivo human skin[J]. Optics Express, 2003, 11(25): 3377-3384.
- [5] DORADLA P, ALAVI K, JOSEPH C, et al. Detection of colon cancer by continuous-wave terahertz polarization imaging technique[J]. Journal of Biomedical Optics, 2013, 18(9): 0504.
- [6] 段锦, 付强, 莫春和, 等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(上)[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 190-195.
DUAN Jin, FU Qiang, MO Chunhe, et al. Review of polarization imaging technology for international military application (I)[J]. Infrared Technology, 2014, 36(3): 190-195.
- [7] 莫春和, 段锦, 付强, 等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(下)[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 265-270.
MO Chunhe, DUAN Jin, FU Qiang, et al. Review of polarization imaging technology for international military application (II)[J]. Infrared Technology, 2014, 36(4): 265-270.
- [8] 卢勇男. 偏振成像光学系统设计及其应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
LU Yongnan. Study on the design and application of polarization imaging optical system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [9] SATO H, YAMAGUCHI S. Optical design of digital camera zoom lenses employing plastic lens elements[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6196: 6196D-1-9.
- [10] 王海燕, 苗华, 宋玉龙, 等. 低成本高变倍光学变焦手机摄像头设计[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 5.
WANG Haiyan, MIAO Hua, SONG Yulong, et al. Design of low cost and high zoom ration optical zoom camera for mobile phone[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 5.
- [11] 白虎冰, 缪礼. 大口径长焦距变焦光学系统设计[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 58-63.
BAI Hubing, MIAO Li. Design of large aperture and long focal length zoom optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(5): 58-63.
- [12] PENG T, DAI C, LOU J, et al. A low-cost deformable lens for correction of low-order aberrations[J]. Optics Communications, 2019, 460: 125209.
- [13] 刘纪华. 机械补偿变焦透镜的基本方程[J]. 光电工程, 1988(4): 12-17.
LIU Jihua. The basic equation of mechanically compensated zoom lens[J]. Photo Electric Engineering, 1988(4): 12-17.
- [14] 葛婧菁, 林招荣, 朱大凯. 机载轻小型中波红外连续变焦系统设计[J]. 应用光学, 2013, 34(5): 728-732.
GE Jingjing, LIN Zhaorong, ZHU Dakai. Design of air-borne small medium wave infrared continuous zoom system[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(5): 728-732.
- [15] 张健, 罗天娇, 罗春华, 等. 30 mm~300 mm 轻型变焦物镜光学系统设计[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 52-53.
ZHANG Jian, LUO Tianjiao, LUO Chunhua, et al. Optical system design of 30 mm-300 mm light weight zoom objective[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(1): 52-53.

- [16] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- TAO Chunkan. Optical design of zoom lens system [M]. Beijing: National Defend Industry Press, 1988.
- [17] 金逢锡, 金虎杰. 变焦镜头结构形式的最佳选择方法[J]. *光学仪器*, 2004, 26(1): 34-38.
- JIN Fengxi, JIN Hujie. The best choice of the form of zoom lens [J]. *Optical Instrument*, 2004, 26(1): 34-38.
- [18] 刘圆, 叶德茂, 王建楹, 等. 50 mm~1 000 mm大变倍比变焦光学系统设计[J]. *应用光学*, 2020, 41(6): 1148-1150.
- LIU Yuan, YE Demao, WANG Jianying, et al. Design of 50 mm~1 000 mm zoom optical system with high zoom ratio [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(6): 1148-1150.
- [19] 崔军, 何国雄. 变焦系统凸轮曲线的拟合设计[J]. *仪器仪表学报*, 1990, 11(1): 108-112.
- CUI Jun, HE Guoxiong. The fitting design of the cam curve of the zoom system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1990, 11(1): 108-112.
- [20] 陈鑫, 付跃刚. 变焦系统凸轮曲线的优化设计[J]. *应用光学*, 2008, 19(1): 45-47.
- CHEN Xin, FU Yuegang. Optimal design of cam curve of zoom system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 19(1): 45-47.
- [21] 窦伟, 黄浩, 李琦, 等. 细胞发酵罐显微光电检测系统显微镜头光学设计[J]. *光学技术*, 2020, 46(1): 45.
- DOU Wei, HUANG Hao, LI Qi, et al. Optical design of microscope for photodetection system of cell fermenter [J]. *Optical Technique*, 2020, 46(1): 45.