

文章编号 2097-1842(2023)06-1376-08

折反式变形光学系统设计

吴庆^{1,2}, 史广维¹, 张建萍^{1*}, 赵尚男^{1,2}, 张新¹
(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 变形光学系统具有双平面对称性, 其在两个对称面内的焦距不同。利用变形光学系统能够在使用常规尺寸传感器的情况下获得更宽的视场。本文根据变形光学系统的一阶像差特性, 提出了一种设计折反式变形光学系统的方法。使用双锥面(Biconic Surface)面型设计了一个折反式变形光学系统。系统在 XOZ 面内的焦距为 500 mm, 在 YOZ 对称面内的焦距为 1000 mm。系统 F-number 为 10, 全视场角为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。系统在 80 lp/mm 处的全视场调制传递函数均值高于 0.3。系统整体结构紧凑, 成像质量良好。

关键词: 光学设计; 变形系统; 折反系统; 双锥面

中图分类号: O439 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0035

Design of catadioptric anamorphic optical system

WU Qing^{1,2}, SHI Guang-wei¹, ZHANG Jian-ping^{1*}, ZHAO Shang-nan^{1,2}, ZHANG Xin¹
(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
* Corresponding author, E-mail: zhjpy@ciomp.ac.cn

Abstract: The anamorphic optical system has a two-plane symmetry, with different focal lengths in the two symmetry planes. This system can obtain a wider field of view when using sensors with conventional size. We propose a method for designing catadioptric anamorphic optical systems based on their first-order aberration characteristics. A catadioptric anamorphic optical system is designed by using a biconic surface, with a focal length of 500 mm in the XOZ plane and 1000 mm in the YOZ plane. The system's F-number is 10, and the full field angle is $1^\circ \times 1^\circ$. The mean value of the full field of view MTF of the system is higher than 0.3 at 80 lp/mm. The overall structure of the system is compact, and the imaging quality is excellent.

Key words: optical design; anamorphic optical system; catadioptric system; biconic surface

收稿日期: 2023-02-22; 修订日期: 2023-03-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 62005271); 国家基础科学公共科学数据中心“光学技术数据库”(No. NBSDC-DB-02)

Supported by Youth Project of National Natural Science Foundation of China (No. 62005271); "Optical Technology Database" in National Basic Science Data Center (No. NBSDC-DB-02)

1 引言

变形光学系统具有双平面对称性,系统关于 XOZ 、 YOZ 平面对称,其在两个对称面内的垂轴放大率不同。变形光学系统所成的像为变形图像,图像变形比为系统的两个对称平面内垂轴放大率的比值。变形光学系统被广泛用于电影摄影中。

1927年, Henri C 设计了经典的 Hypergonar 变形镜头,该镜头能将 2.35:1 的宽幅画面压缩到 1.33:1 的电影胶片上,放映时再利用变形投影镜头将图像还原为正常比例^[1]。该技术在充分利用现有尺寸传感器的情况下有效拓宽了电影画面的视场。

在下一代的 EUVL (Extreme UltraViolet Lithography) 投影物镜组中,物镜系统的数值孔径预计将大于 0.5,因此,光线在掩模板处的入射角将增大,这会导致图像对比度整体降低。为了避免该问题,下一代 EUVL 投影物镜组将采用变形镜头的设计构型,其不同方向的放大率将不再相同,以避免光线入射角过大^[2-3]。此外,变形光学系统在激光光束整形、光学扫描系统、大视场望远镜中均有应用^[4-7]。

Wynne C G 采用柱透镜附件变形光学系统的一阶像差理论,推导得出了该类系统的 16 个一阶像差系数及其表达式^[8]。

S.Yuan 构建了一般同轴透射式变形光学系统的一阶像差理论,推导了采用一般双曲面构型的变形光学系统的一阶像差系数^[9]。

目前,变形系统的设计构型多为在常规光学系统的基础上添加本身没有光焦度的变形附件。变形附件由两片无焦柱透镜对组成,通常置于光学系统的前方(定焦变形系统常用构型)、后方(变焦光学系统常用构型)、中间(与上述两种构型没有本质区别)^[10]。

现有变形光学系统并未充分释放光学元件的设计自由度,其系统结构复杂,体积大。在设计大变形比(变形比为 1.5:1 以上)的光学系统时,使用变形附件的光学系统已经无法获得较好的像质^[7]。设计变形光学系统需要考虑校正更多的像差,其优化方法的像质评价指标与传统光学系统有所不同。

本文根据变形光学系统的像差特性,利用

一种同轴折反式变形光学系统的设计方法,设计了一个光学系统。该系统使用具有双曲率半径的 Biconic Surface 作为光学表面,在不使用高阶项的情况下获得了较好的成像质量。相比于现有的变形光学系统,系统在保持结构紧凑的同时,获得的成像质量较好。

2 变形光学系统结构及像差特性

变形光学系统是包含双曲率表面的成像系统。双曲率表面是指在两个垂直横截面上具有不同曲率半径的表面,如图 1 所示。该曲面具有两个相互垂直的对称平面。因此,变形光学系统具有双平面对称性,两个对称面也是变形光学系统的主平面。

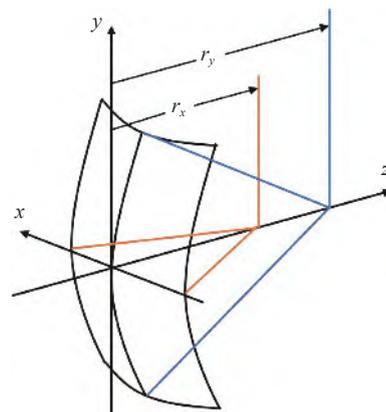


图 1 双曲率表面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double curvature surface

由于光焦度与系统表面曲率有关,因此,变形光学系统在不同的主平面内有不同的光焦度,成像时形成变形的图像。

相比于旋转对称系统,变形光学系统的基本光线数量及一阶像差数量均有所增加。旋转对称光学系统中有主光线,边缘光线共两条基本光线,5 项一阶像差。变形光学系统作为双平面对称系统,基本光线包括两对称面上的主光线及边缘光线共 4 条,共 16 项一阶像差,变形光学系统的一阶像差如表 1 所示。

变形光学系统的 16 个一阶像差可分为 3 部分:4 个像差系数与 X 对称面有关,独立于 Y 对称面;4 个像差系数与 Y 对称面有关,独立于 X 对称面;剩余像差系数用于描述偏斜光线导致的像差^[11]。

根据变形系统的一阶像差特性,设计思路如下:预先设计两个元件间距相同、光阑位置相同、后截距相同但有效焦距不同的旋转对称光学系统 (Rotational Symmetric Optical System, RSOS),以分别校正两系统的一阶像差。将两系统合并后的集成系统作为变形光学系统的初始结构,再对该集成系统进行进一步优化。

表 1 变形光学系统一阶像差

Tab. 1 Primary aberration of anamorphic optical system

Term	Polynomial	Aberration name
1	$D_1\rho_x^4$	X-Spherical aberration
2	$D_2\rho_y^4$	Y-Spherical aberration
3	$D_3\rho_x^2\rho_y^2$	SKEW-Spherical aberration
4	$D_4H_x\rho_x^3$	X-Coma
5	$D_5H_y\rho_x^2\rho_y$	SKEW-Coma
6	$D_6H_x\rho_x\rho_y^2$	SKEW-Coma
7	$D_7H_y\rho_y^3$	Y-Coma
8	$D_8H_x^2\rho_x^2$	X-Astigmatism & FC
9	$D_9H_y^2\rho_y^2$	Y-Astigmatism & FC
10	$D_{10}H_x^2\rho_x^2$	SKEW-Astigmatism & FC
11	$D_{11}H_x^2\rho_y^2$	SKEW-Astigmatism & FC
12	$D_{12}H_xH_y\rho_x\rho_y$	SKEW-Astigmatism & FC
13	$D_{13}H_x^3\rho_x$	X-Distortion
14	$D_{14}H_y^3\rho_y$	Y-Distortion
15	$D_{15}H_xH_y^2\rho_x$	SKEW-Distortion
16	$D_{16}H_x^2H_y\rho_y$	SKEW-Distortion

在变形光学系统中,仅由某一对称面上的基本光线参数所表述的像差项,其特点与旋转对称光学系统所具有的一阶像差相同。若像差项内同时出现两对称面的基本光线参数,则该像差为变形光学系统特有的一阶像差。对于轴上点,旋转对称光学系统仅有球差,而变形光学系统不仅有球差还有特有的四叶像差 $D_3\rho_x^2\rho_y^2$ 。图 2 所示为变形光学系统的轴上点波前图,可见,其具有明显的四叶像差。同样地,在轴外点处变形光学系统存在 7 种特有的一阶像差。

像散和场曲项是限制变形光学系统离轴视场光学性能的主要因素,这是由于变形光学系统在不同方向的光焦度不同所造成的固有像差特征^[12]。

通过分别设计两个轴对称光学系统再进行合并,能够有效控制 X、Y 方向的像差,剩余的斜像差则留至集成系统中进行校正。这样可有效分配各阶段的像差抑制目标,最终设计得到具有大变形比且成像质量良好的变形光学系统。

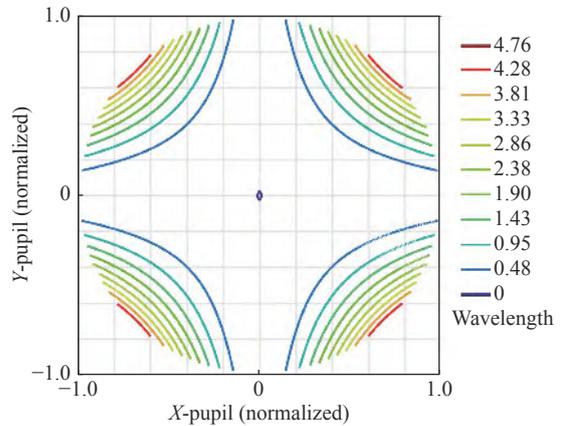


图 2 变形光学系统轴上点波前图

Fig. 2 Anamorphic optical system on-axis wavefront map

3 系统设计与优化

使用旋转对称的折反式光学系统作为初始结构,在该光学系统的基础上设置两个多重结构,对各个结构的焦距分别进行优化,使其各自达到目标值。完成后将所得两个分系统合在一起,再对集成系统进行优化。图 3 为光学系统设计流程图。

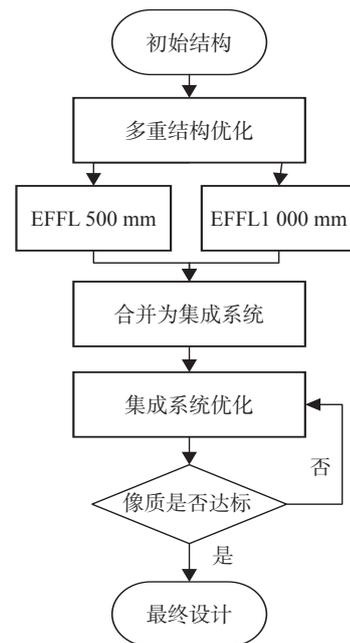


图 3 光学系统设计路线

Fig. 3 Design route of optical system

3.1 分系统结构设计

选取入瞳直径为 100 mm, 焦距为 750 mm, 半视场角为 0.5°, 工作波段为可见光波段, 设计参考波长为 F,d,C 光的折反式变形光学系统作为分系统的初始结构。图 4 为初始系统结构示意图。

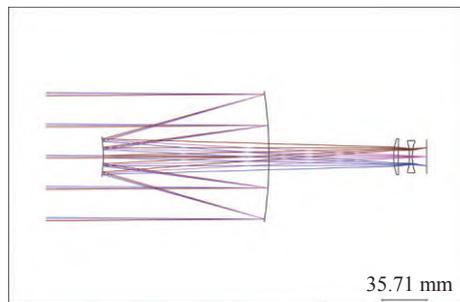


图 4 光学系统初始结构图

Fig. 4 Schematic diagram of the initial structure of the optical system

设置两反射面及两透镜的 4 个面曲率和圆锥系数。通过改变面型曲率及圆锥系数使各分系统实现不同的焦距目标。各分系统的目标参数见表 2, 具体参数取决于最终设计的变形系统。集成系统在 XOZ、YOZ 截面的参数分别与分系统一、分系统二的参数相匹配。

表 2 分系统参数

Tab. 2 Subsystem parameters

参数	分系统一	分系统二
系统孔径/mm	50	100
视场角 2ω/(°)	1	1
系统焦距/mm	500	1000
系统 F-number	10	10

对于同轴两反式光学系统, 可通过系统参数计算出系统的基本几何结构^[13]。作为望远镜系统, 可假定: 物体位于无穷远, 光阑位于主镜上。如图 5 所示, 系统主镜曲率为 C₁, 次镜曲率为 C₂, 两反射镜之间的间隔为 D, 系统后截距为 B, 系统的组合焦距为 F, 系统主次镜遮拦比为 α, 主镜的半直径为 h₂, 次镜的半直径为 h₁。则有:

$$C_1 = \frac{B - F}{2DF}, \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{B + D - F}{2DF}, \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{h_1}{h_2} \approx \frac{1 - 2DC_1}{DC_1}. \quad (3)$$

利用上述公式, 可将系统的遮拦比、光学系统总长及后截距控制在合理范围内, 得到结构更加紧凑合理的光学系统。

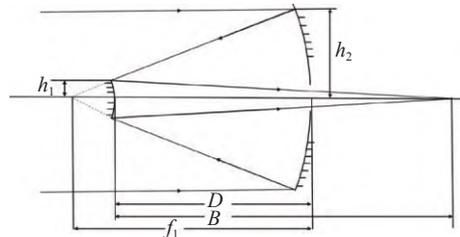


图 5 R-C 光学系统结构

Fig. 5 Structure of R-C optical system

3.2 系统集成

选取自由度较高的面型, 有助于系统的设计与优化。Toroidal, Biconic, X-Y polynomial, anamorphic asphere, toroid-based asphere, Biconic Zernike 面型都可用于变形光学系统的设计^[14]。本文采用双锥面(Biconic surface)用于设计折反式变形光学系统的面型。

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x) c_x^2 x^2 - (1 + k_y) c_y^2 y^2}}, \quad (4)$$

式中: c_x、c_y、k_x、k_y分别为曲面在 x 方向和 y 方向的曲率以及圆锥系数。该面型中的参数能够匹配多重结构中各分系统的参数, 因此, 进行系统集成时较其他面型更加简单。变形光学系统需要将两对称面上的焦距约束至特定值, 且需保证系统后截距一致, 从而形成唯一像面, 这将至少需要 4 个自由度。变形光学系统具有 16 项一阶像差以及两项色差。控制系统的遮拦比, 确保两反系统后截距足够长可以容纳后续的透镜组, 这将需要 4 个自由度。为了获得一个成像质量良好的变形光学系统, 系统的所有面型均采用 Biconic Surface。这可以使系统拥有足够的自由度, 从而在满足各项参数规定的同时, 抑制初级像差以及平衡一定量的高级像差。

新建一个光学系统作为集成系统, 将其面型全部选定为 Biconic Surface。设置关于子午面、弧矢面对称的视场, 参考波长与多重结构优化中的一致。将分系统参数传递至集成系统, 集成系统具体参数见表 3。

表 3 集成系统参数
Tab. 3 Parameters of integrated system

参数	X-Z symmetric plane	Y-Z symmetric plane
系统孔径/mm	50	100
视场角 $2\omega/(\circ)$	1	1
焦距/mm	500	1000
F - number	10	10

集成系统的主、次反射镜均为椭圆形,系统在 XOZ、YOZ 对称面处的 F-number 一致,以保证像面照度的均匀性。图 6 为集成系统的三维示意图。

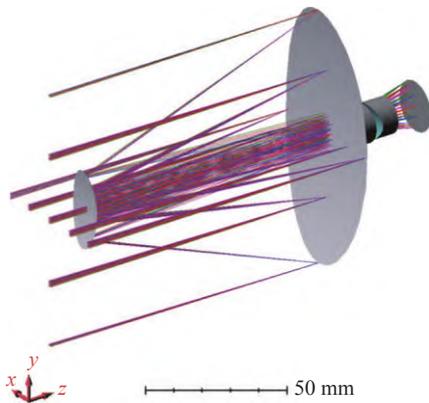


图 6 集成系统等轴侧视图

Fig. 6 Isometric side view of the integrated system

3.3 集成系统像质分析与优化

图 7 为集成光学系统点列图,集成光学系统的爱里斑半径为 $7.154 \mu\text{m}$,除了轴上视场点列图 RMS 半径在系统艾里斑半径以内,轴外视场的点列图质量均较差。这主要是由变形光学系统的像散特性引起的。像散是限制变形光学系统成像质量的主要因素^[15]。图 8 展示了系统的 MTF 曲线,除了轴上点 MTF 下降较为平缓外,轴外视场的 MTF 急剧下降且出现了对比度反转的情况。

影响集成系统成像质量的主要因素为场曲与像散。以集成系统作为起点,将其作为变形光学系统的初始结构进行优化。优化过程中需严格控制子午方向与弧矢方向,使它们的像面重合,否则将引起较大的像散,严重影响成像质量。将系统中各表面的曲率和圆锥系数以及表面之间的距离设置为变量。变量设置完成后,进入评价函数编

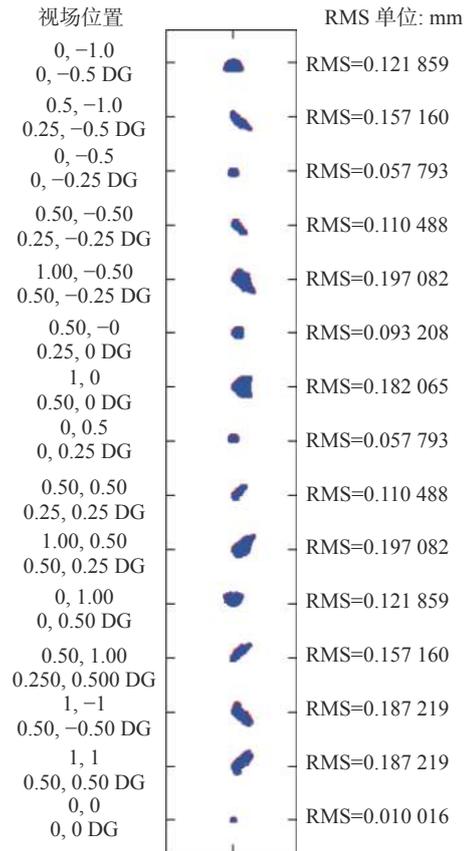


图 7 集成系统点列图

Fig. 7 Spot diagram of the integrated system

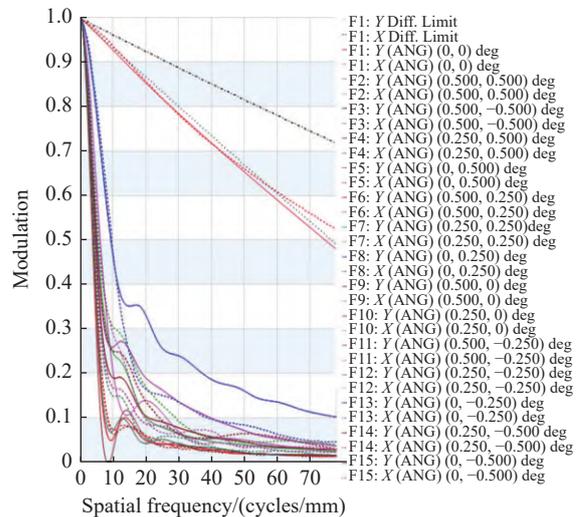


图 8 集成系统 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curve of the integrated system

编辑器内对评价函数进行设置,约束系统的次镜尺寸以使得系统遮拦比不大于 0.3,将光学系统在 XOZ、YOZ 平面的有效焦距设置为目标优化量,提前约束子午成像面与弧矢成像面之间的位置关系,保证像面的唯一性。

在优化前期选取点列图作为优化函数,在系

统质量优化至一定程度后再选取波前作为优化函数进行进一步优化。不同于旋转对称光学系统,变形光学系统的像质评价需要更多的采样点。该类系统在归一化视场 $H_x = H_y$, $H_x = -H_y$ 处的像质劣化较其他地方严重,优化时需针对该区域做权重较高的约束,并额外添加评价参数。同时还要平衡其他位置的成像表现。在进行点列图、MTF分析,畸变分析时,需选用更多的采样点,评判系统的全视场像差特性,从而确保整个像面性能指标都达到要求。

4 设计结果与像质评价

4.1 设计结果

对集成系统进行优化后得到了满足设计要求的设计结果,系统的结构如图9所示。图9(a)为YZ平面系统结构图,图9(b)为XZ平面系统结构图。变形光学系统总长为156.8 mm,系统F-number为10,系统全视场角为 1° ,孔径光阑为主反射镜,光阑形状为椭圆形。系统结构参数见表4。

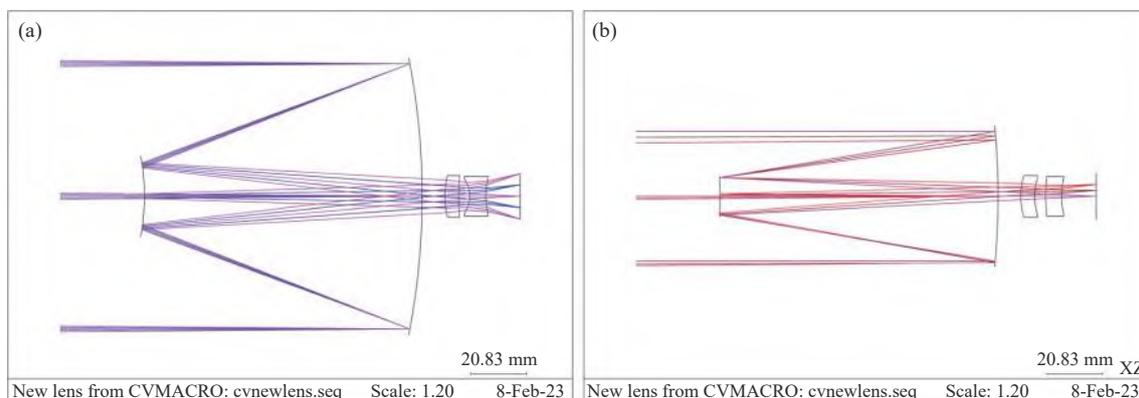


图9 (a) YZ平面二维结构图及(b)XZ平面二维结构图

Fig. 9 2D layouts in (a) YZ plane and (b) XZ plane

表4 光学系统结构参数表

Tab. 4 Configuration parameters of the optical system

Surface	Type	Thickness	Material	C_x	C_y	k_x	k_y
1	Biconic surface	-104.117	mirror	-0.03431	-0.03704	-1.159	-1.139
2	Biconic surface	112.651	mirror	-0.08445	-0.012	-5.249	-3.948
3	Biconic surface	5.213	ZF50	0.041	0.032	-2.747	-4.336
4	Biconic surface	4.123	-	0.048	0.011	-1.941	-86.885
5	Biconic surface	6.000	H-BAK3	0.016	-0.103	25.940	-1.823
6	Biconic surface	12.952	-	0.032	0.044	2.986	-11.632

该光学系统的变形比为 $EFLX:EFLY = 1:2$, 正方形视场的图景经过该变形光学系统成像后,所成的像是长宽比为2:1的变形图像。图10为光学系统的成像模拟图,图10(a)为源图像,是长宽比为1:1的正方形图片,源图像经光学系统仿真之后输出模拟图像,模拟结果为图10(b)。由模拟图可以看出图片经过光学系统成像模拟后,水平方向被压缩。原图长宽比为1:1,测量模拟图像的长宽比为2:1,结果表明系统的变形比符合理论设计值。



图10 系统成像模拟。(a)源图像;(b)模拟图像

Fig. 10 Imaging simulation of the system. (a) Source image; (b) simulated image

4.2 像质评价

图 11(a) 为变形光学系统的场曲, 当前光学系统的整体场曲控制在 0.3 mm 以内。图 11(b) 为系统的网格畸变, 系统最大畸变出现于边缘视场 (0, -0.5°) 处, 其值为 2.02%。图 11(c) 为所设计系统的点列图, 系统的艾里斑直径为 7.154 μm 。可见, 各视场点列图 RMS 半径均小于艾里斑半径, 说明系统像差得到了较好的抑制。图 11(d) 为系统的 MTF 曲线, 在 80 lp/mm 处的全视场 MTF 均大于 0.3。系统匹配长光辰芯公司的 GMAX-3809 型 CMOS 图像传感器, 可将正方形的物方视

场进行压缩, 成像于传感器感光范围内, 拓宽成像视野。

对该系统进行公差分析, 发现该系统相比于旋转对称光学系统, 在采用相同公差标准的情况下, 像质劣化较为严重。导致出现该现象的原因如下: (1) 变形光学系统为双平面对称系统, 元件旋转会产生非对称像差^[16]; (2) 变形光学系统不具有唯一中间像面, 元件轴向位移的像差累加传递效应强, 系统对元件纵向位移较为敏感。对于变形光学系统的公差分析及对应降敏方法有待更进一步研究^[17]。

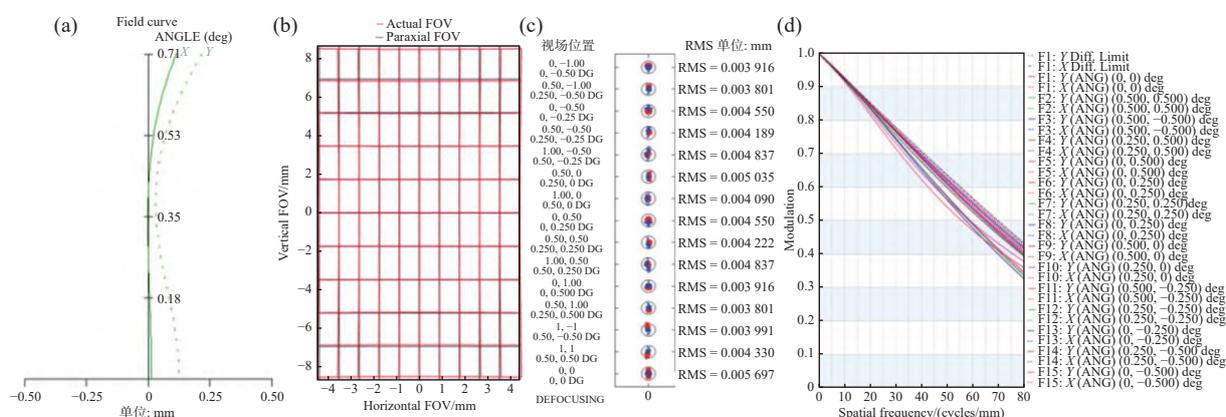


图 11 光学系统的 (a) 场曲; (b) 网格畸变; (c) 最终系统点列图; (d) 最终系统 MTF 曲线

Fig. 11 (a) Field curve; (b) grid distortion; (c) spot diagram; (d) MTF curve of the designed optical system

5 结论

本文提出了一种折反式变形光学系统设计方法。依据变形光学系统参数, 利用多重结构设计分系统, 从而找到一个合理的初始结构, 再进行系统集成与优化。分阶段对光学系统像差进行抑制与平衡, 有效抑制了折反式变形光学系统像差, 提高了系统成像质量。设计了一个变形比为 2:1 的

折反式变形光学系统, 该系统能够记录大视场的变形图像, 系统总长 156 mm, 结构紧凑。根据点列图、MTF 曲线以及系统成像模拟结果可知该系统成像质量良好。

对于该类变形光学系统, 未来工作将着重探究其整体初级像差与分系统初级像差之间的关系, 深入理解变形光学系统的像差特性。对所提出的设计方法进行进一步的改进与优化。

参考文献:

- [1] HENRI C. Anamorphic lens system and method of making the same: US, 1962892A [P]. 1934-06-12.
- [2] MIGURA S, KNEER B, NEUMANN J T, *et al.*. Anamorphic high-NA EUV lithography optics [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9661: 96610T.
- [3] 钟志坚, 李琛毅, 李世光, 等. 先进光刻中的聚焦控制预算(I)-光路部分 [J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1104-1119.
ZHONG ZH J, LI CH Y, LI SH G, *et al.*. Budget analysis of focus control in advanced lithography (I) -optical path [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1104-1119. (in Chinese)
- [4] TAN Q W, GUO Y D, LI Y, *et al.*. Primary aberration optimization for double-plane symmetric beam shaping systems using a pair of curved reference surfaces [J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7664-7676.
- [5] KASHIMA S, HAZUMI M, IMADA H, *et al.*. Wide field-of-view crossed Dragone optical system using anamorphic

- aspherical surfaces[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(15): 4171-4179.
- [6] DEHOOG E A. Anamorphic zoom lens based on rotating cylindrical lenses[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 12206-12214.
- [7] XU CH, SONG W T, WANG Y T. Design of a miniature anamorphic lens with a freeform front group and an aspheric rear group[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(6): 065104.
- [8] WYNNE C G. The primary aberrations of anamorphic lens systems[J]. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1954, 67(7): 529-537.
- [9] ROGERS J R. *Aberrations of unobscured reflective optical systems*[D]. Tucson: University of Arizona, 1983.
- [10] ZHANG J K, CHEN X B, LI F J, *et al.*. Paraxial lens design of anamorphic lenses with a fixed anamorphic ratio[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(4): 1430-1454.
- [11] YUAN SH, SASIAN J. Aberrations of anamorphic optical systems. I: the first-order foundation and method for deriving the anamorphic primary aberration coefficients[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(13): 2574-2584.
- [12] YUAN SH, SASIAN J. Aberrations of anamorphic optical systems. II. Primary aberration theory for cylindrical anamorphic systems[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(15): 2836-2841.
- [13] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- PAN J H. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces*[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. (in Chinese)
- [14] 朱浩, 崔庆丰, 朴明旭. 无遮拦三反射镜变形光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1222005.
- ZHU H, CUI Q F, PIAO M X. Design of unobscured three-mirror anamorphic optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222005. (in Chinese)
- [15] YUAN SH. *Aberrations of anamorphic optical systems*[D]. Tucson: University of Arizona, 2008.
- [16] 白晓泉, 郭良, 马宏财, 等. 离轴三反望远镜轴向与横向失调量像差耦合特性[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(4): 747-760.
- BAI X Q, GUO L, MA H C, *et al.*. Aberration coupling characteristics of axial and lateral misalignments of off-axis three-mirror telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 747-760. (in Chinese)
- [17] 孟庆宇, 秦子长, 任成明, 等. 光学系统降敏设计方法综述[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(5): 863-877.
- MENG Q Y, QIN Z CH, REN CH M, *et al.*. Review of optical systems' desensitization design methods[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 863-877. (in Chinese)

作者简介:



吴庆(1998—),男,四川凉山人,硕士研究生,2021年于天津大学获得学士学位,主要从事光学系统设计理论与方法研究。E-mail: wuqing21@mails.ucas.ac.cn



张建萍(1974—),女,黑龙江宝清人,学士,副研究员,主要研究方向光学系统设计理论与方法研究。E-mail: zhjpy@ciomp.ac.cn