

文章编号 1004-924X(2024)09-1261-12

基于自由曲面光学元件的大视场光学成像系统

熊玉朋^{1,2,3}, 陈适宇^{1,2}, 黄 铖^{1,2,3}, 路文文^{1,2}, 彭小强^{1,2},
陈善勇^{1,2}, 赖 涛^{1,2}, 欧 洋^{1,2,3*}

- (1. 国防科技大学 智能科学学院装备综合保障技术重点实验室, 湖南 长沙 410073;
2. 超精密加工技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;
3. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:面向机载探测系统大视场光学成像的需求,开展了大视场光学成像系统光学设计、自由曲面光学元件超精密加工、形位误差同步检测以及系统集成与成像实验研究。首先,采用视场扩展法进行大视场自由曲面离轴反射光学系统的设计;其次,进行铝合金自由曲面反射镜纳米精度加工和高频抑制工艺探索,并实现了基于计算全息元件的自由曲面形位高精度检测;最后,进行了光学系统的装调集成与成像实验。结果表明,系统的视场角为 $30^{\circ} \times 5^{\circ}$,全视场光学传递函数值大于 0.7,接近衍射极限,最大像元均方根半径为 $2.075 \mu\text{m}$,自由曲面光学元件的面形精度均方根(Root Mean Square, RMS)值优于 20 nm ,位置精度优于 $1 \mu\text{m}$,装配集成后能够满足大视场高分辨的场景使用要求,同时具备稳定可靠和快响制造等特点。

关键词:光学超精密加工;自由曲面;计算全息补偿检测;成像系统

中图分类号:TH703;O435 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20243209.1261

Large field optical imaging system based on freeform surface optics

XIONG Yupeng^{1,2,3}, CHEN Shiyu^{1,2}, HUANG Cheng^{1,2,3}, LU Wenwen^{1,2}, PENG Xiaoqiang^{1,2},
CHEN Shanyong^{1,2}, LAI Tao^{1,2}, OU Yang^{1,2,3*}

- (1. Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Hunan Key Laboratory of Ultra-Precision Machining Technology, College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
3. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

* Corresponding author, E-mail: yang_ou17@163.com

Abstract: To achieve extensive field of view optical imaging, research has been conducted on a system utilizing free-form surface optical components. This research encompasses the optical design of such systems, ultra-precision machining of free-form surfaces, synchronous error detection in form and position, and system integration with imaging experiments. Initially, by studying the mechanism of aberration formation un-

收稿日期:2023-11-14;修订日期:2023-12-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52305520)

der multiple constraints, a precise model for the parametric description of free-form surface optical systems was developed. Subsequently, nano-precision machining and high-frequency suppression techniques were explored for aluminum alloy free-form mirrors, alongside high-precision shape and position detection using computer-generated holographic elements. Comprehensive experiments on system integration and imaging were performed. The results show that the system's field of view is $30^\circ \times 5^\circ$, with an optical transfer function value exceeding 0.7, approaching the diffraction limit, and a maximum pixel root mean square radius of $2.075 \mu\text{m}$. The surface shape accuracy of the free-form optical components has an RMS value better than 20 nm, and position accuracy better than $1 \mu\text{m}$. Post-assembly, the system fulfills the criteria for large field of view and high-resolution applications, also demonstrating stability, reliability, and rapid response in manufacturing.

Key words: optical ultra-precision machining; free form surface; Computer Generated Hologram (CGH); imaging system

1 引 言

光学成像是信息感知的“眼睛”，为了更好地实现对目标的光学探测与跟踪，光学成像系统正逐渐向大视场、高分辨、轻量化和快响制造等方向发展，这对光学系统设计、光学元件加工与检测都提出了更高的要求。传统的平面、球面和非球面光学元件自由度有限，难以满足设计和使用要求，以自由曲面为代表的复杂曲面能够为光学系统提供更多的设计裕度，在校正系统像差、减小元件数量、削减系统体积和质量等方面具有独特优势，有望实现高性能光学系统的设计^[1-4]。近年来，复杂曲面光学成像技术在国内外发展很快，已广泛应用于天文望远、光谱分析、遥感探测和虚拟现实等领域^[5-6]。

光学自由曲面是一种没有旋转对称性的曲面，自由曲面的数学表达式主要包括XY多项式、Zernike多项式、变形非球面和超环面等^[7-8]。自由曲面光学元件没有固定的光轴，不具备旋转对称性，光学元件的制造和系统装调难度都远高于传统光学系统。以单点金刚石车削和计算全息补偿检测为代表的超精密制造技术的发展为自由曲面光学系统的实现提供了可能^[9-14]。

目前，自由曲面在机载成像系统中的应用越来越广泛。王合龙等采用二次成像光路形式和XY多项式自由曲面进行了自由曲面光学成像系统的研究^[15]。李杰等进行了基于谐衍射与自由曲面的机载红外双波段成像光学系统设计^[16]。黄辰旭等进行了基于自由曲面的大视场

离轴四反光学系统设计^[17]。本文以机载探测系统为目标对象，研究了基于自由曲面光学元件的离轴三反大视场成像系统，从自由曲面光学系统设计、光学元件超精密加工、基于计算全息元件的形位误差同步检测方法、系统集成与成像实验等方面开展了研究。

2 光学系统优化

2.1 光学系统的指标需求

机载探测光学成像系统常用折射式、折反式和反射式光学结构。其中，反射式光学系统具备无色差、温度敏感性好、易于轻量化等优势，一般分为共轴反射式和离轴反射式。比较而言，离轴三反结构能够同时满足大视场、长焦距和结构紧凑的特点，采用自由曲面进行光学设计优化能够进一步提升光学系统性能^[18-21]。面向空间遥感成像的系统指标需求如表1所示。

表1 面向空间遥感成像的系统指标需求

Tab. 1 Indicator requirements of spatial remote sensing imaging system

参 数	值
水平视场角/(°)	30
垂直视场角/(°)	5
焦距/mm	90
全视场调制传递函数值	>0.6
弥散斑半径RMS值/ μm	<5
像元尺寸/ μm	5.5
像元数	$8\ 856 \times 5\ 280$

2.2 光学系统的设计与优化

本文采用视场扩展法进行大视场自由曲面离轴反射光学系统的设计,首先选取一个视场较小的离轴反射光学系统,再将系统视场逐步扩大并进行优化,最终得到满足要求的大视场自由曲面光学系统,其示意图如图 1 所示。其中,主镜、次镜和三镜均为自由曲面光学元件,其面形方程均采用扩展多项式的数学形式描述,具体的面形参数如表 2 所示,各面形的扩展多项式参数如表 3 所示。主镜、次镜和三镜的外轮廓均为方形,主镜的外轮廓为 80 mm×35 mm,其对角线为系统入瞳 87 mm,次镜外轮廓为 34 mm×22 mm,三镜外轮廓为 46 mm×35 mm。

系统通过整体 Y 轴偏心和绕 X 轴倾斜,使得主镜与三镜之间保持一定的距离,像面与次镜之间也保持足够的距离,不产生干涉,为反射镜支撑结构设计留出空间。通过增加自由曲面的高次项来提高系统的消像差能力。图 2 为系统优化后的 MTF (Modulation transfer function, MTF) 曲线。可以看出,全视场的 MTF 在奈奎斯特频率 100 lp/mm 处都大于 0.7,接近衍射极限。图 3 为系统弥散斑,其最大 RMS 半径为 2.075 μm,小

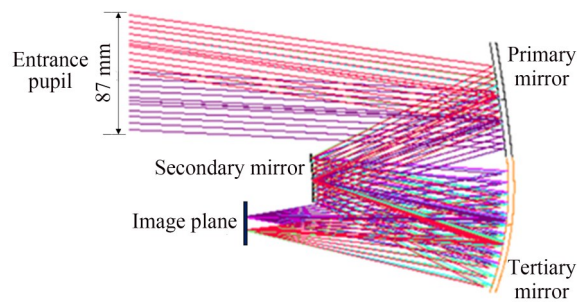


图 1 大视场自由曲面光学系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of large field freeform optical system

表 2 自由曲面系统的主要面形参数
Tab. 2 Major surface parameters of freeform system

镜面	面形	曲率半径/ mm	圆锥系数	归一化半 径/mm
主镜	扩展多项式	-824.836	-12.839	100
次镜	扩展多项式	-144.960	9.203	108.933
三镜	扩展多项式	-162.651	0.163	190.136

于探测器像元尺寸 5.5 μm 的一半,成像质量优良。

表 3 扩展多项式参数
Tab. 3 Extended polynomial parameters

镜面	主镜	次镜	三镜
X_0Y_1	-1.669	0.029	-3.481
X_2Y_0	0.029	-1.785	-0.970
X_0Y_2	-0.641	-2.035	-0.984
X_2Y_1	-0.770	-6.604	-4.976
X_0Y_3	1.378	-2.225	-3.467
X_4Y_0	0.139	36.364	-2.449
X_2Y_2	-0.160	69.651	-5.703
X_0Y_4	-2.887	34.216	-2.382
X_4Y_1	-0.286	-14.173	-2.796
X_2Y_3	0.045	-3.631	-10.600
X_0Y_5	2.524	-12.801	-0.890
X_6Y_0	-0.300	-57.084	-4.173
X_4Y_2	0.311	173.598	-0.143
X_2Y_4	0.095	487.142	-8.761
X_0Y_6	-0.912	173.823	5.763
X_6Y_1	0.425	768.812	-22.896
X_4Y_3	-0.098	-2 084.417	16.416
X_2Y_5	-0.071	432.985	6.815
X_0Y_7	0.014	522.697	8.920
X_6Y_2	-0.372	35 950	-68.717
X_4Y_4	-0.000 928 8	1 457.841	-0.227

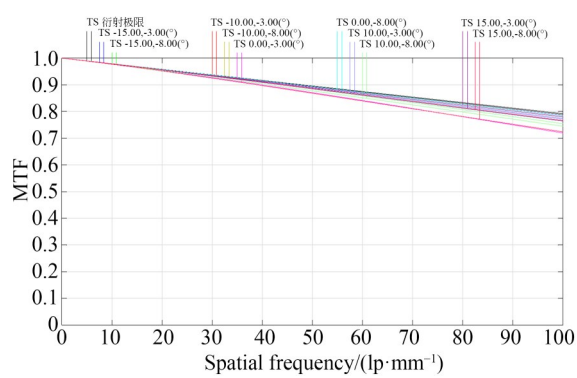


图 2 自由曲面成像系统的光学传递函数曲线
Fig. 2 MTF curves of freeform imaging system

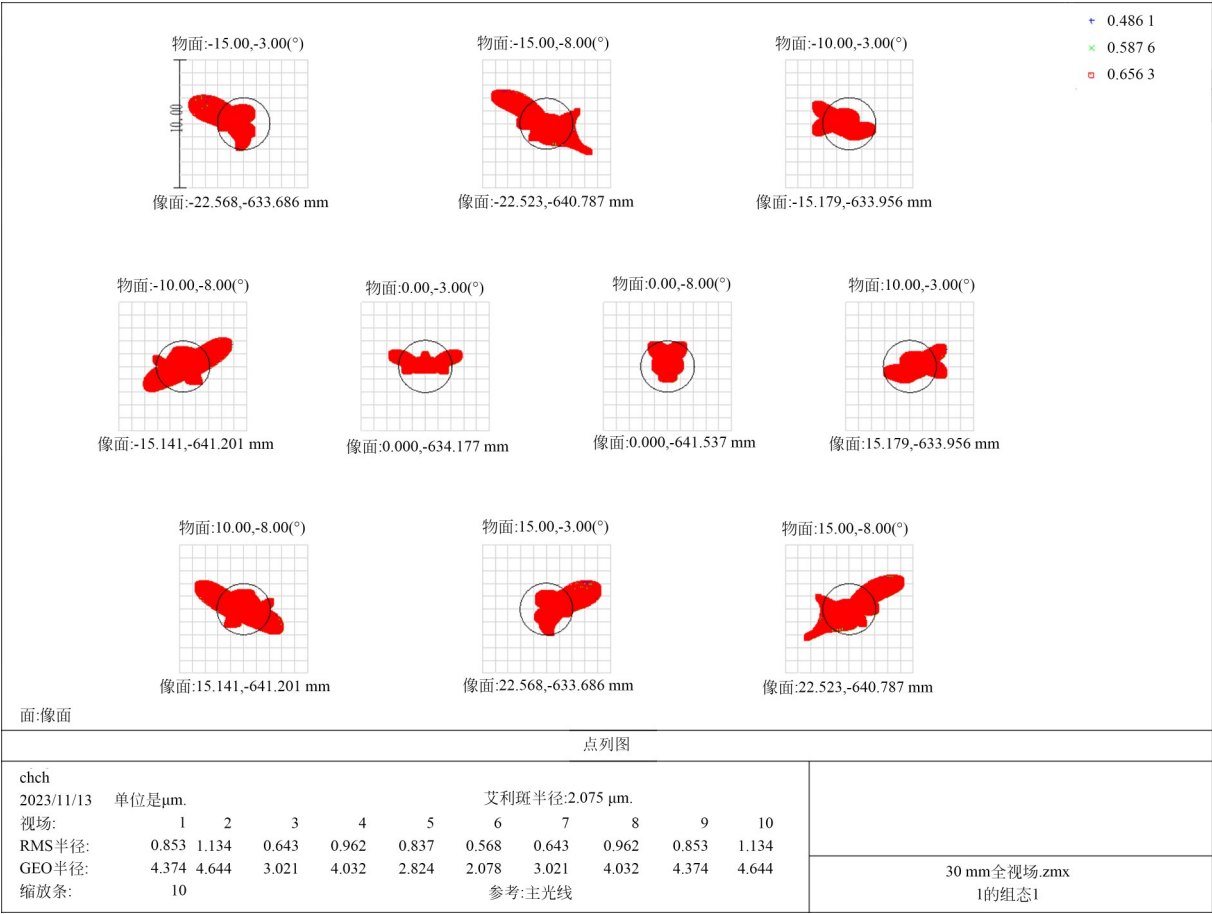


图 3 自由曲面光学系统点列图
Fig. 3 Spot diagrams of freeform optical system

2.3 系统光机设计

该光学系统为矩形光学系统,水平视场较大,垂直视场相对较小,因此,主镜和三镜和横向尺寸较大,质量相对较重,对系统的外轮廓影响大,次镜尺寸则较小。为了使光学系统的结构更加紧凑,降低光学系统的装调难度,本文将主镜、三镜设计成共体光学元件,布置在光学系统的一侧,次镜和 CCD 探测器布置在另一侧,如图 4 所示。主镜、三镜构成光学系统的后框架,后框架为主镜组件、三镜组件和其他结构提供安装基准,保证位置精度;次镜、CCD 探测器共同构成光学系统的前框架,前框架为次镜提供安装基准;中间连接部分主要是连接前后框架,使光学系统成为一个整体,各连接面可通过超精密加工将相对位置精度控制在微米误差内,从而保证三块反射镜的轴向间距和相对位置精度。

光机结构设计完成后,采用灵敏度分析法进行公差分析。选择点列图 RMS 光斑半径小于

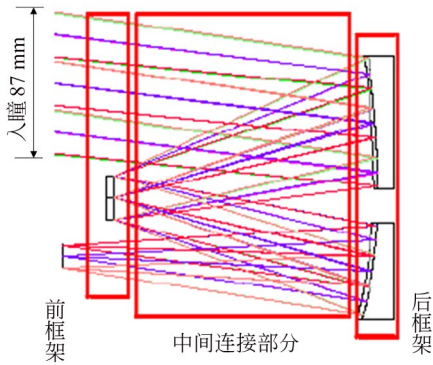


图 4 光机结构设计
Fig. 4 Optical and mechanical design

$2 \mu\text{m}$ 作为公差分配的判据,系统后截距作为补偿量,补偿通过 CCD 探测的对焦来解决,公差分析结果如表 4 所示。根据公差分析结果,顶点曲率半径公差为 $\pm 8 \mu\text{m}$,主镜最敏感;倾斜公差为 $\pm 0.01^\circ$,次镜最敏感;偏心公差为 $\pm 6 \mu\text{m}$,三镜最敏感;各非球面间距公差为 $\pm 3 \mu\text{m}$,次镜与三镜的

表 4 自由曲面成像系统公差分析结果
Tab. 4 Tolerances results of freeform imaging system

镜面公差类型	公差值	点列图 RMS 值 变化/ μm
主镜曲率半径	$-8\ \mu\text{m}$	0.432
	$+8\ \mu\text{m}$	0.444
次镜曲率半径	$-8\ \mu\text{m}$	0.000 2
	$+8\ \mu\text{m}$	0.001
三镜曲率半径	$-8\ \mu\text{m}$	0.000 2
	$+8\ \mu\text{m}$	0.000 3
主镜 X/Y 方向偏心	$\pm 6\ \mu\text{m}$	0.346
次镜 X/Y 方向偏心	$\pm 6\ \mu\text{m}$	0.232
三镜 X/Y 方向偏心	$\pm 6\ \mu\text{m}$	0.419
主镜 X/Y 方向倾斜	$\pm 0.01^\circ$	0.010
次镜 X/Y 方向倾斜	$\pm 0.01^\circ$	0.034
三镜 X/Y 方向倾斜	$\pm 0.01^\circ$	0.032
主镜面形精度 RMS 值	25 nm	0.010
次镜面形精度 RMS 值	25 nm	0.034
三镜面形精度 RMS 值	20 nm	0.032
主镜-次镜间距	$-3\ \mu\text{m}$	0.441
	$+3\ \mu\text{m}$	0.373
次镜-三镜间距	$-3\ \mu\text{m}$	0.672
	$+3\ \mu\text{m}$	0.655
三镜-像面间距	$-3\ \mu\text{m}$	0.435
	$+3\ \mu\text{m}$	0.231

间距最为敏感。标称 RMS 光斑半径为 $1.094\ \mu\text{m}$,估计变化量为 $0.715\ \mu\text{m}$,因此,估计的 RMS 光斑半径为 $1.809\ \mu\text{m}$ 。在公差范围内,所需的后截距补偿范围为 $-14.7\sim+14.7\ \mu\text{m}$ 。

如图 5 所示,为了消除杂散光对系统性能的

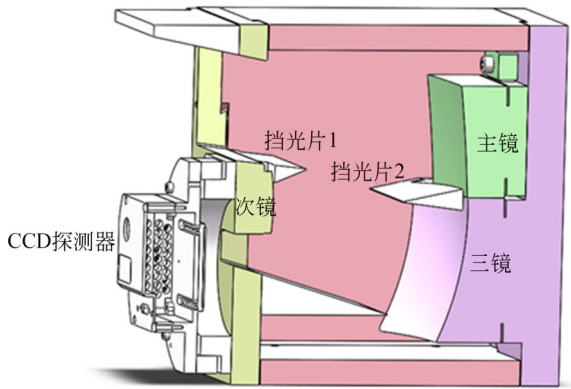


图 5 自由曲面成像系统光机结构
Fig. 5 Optical and mechanical structure of freeform imaging system

影响,在主镜、次镜和主镜、三镜之间装配了遮光片。遮光片依据杂散光分析法设计,防止视场外的杂散光对成像质量造成影响,同时非成像面进行发黑处理,以进一步吸收杂散光。

3 自由曲面光学元件的超精密加工与检测

3.1 高精度确定性加工

玻璃和陶瓷材料在传统光学系统中应用广泛,一般采用磨削、研磨和修形抛光的工艺路线。该工艺路线加工高精度大口径自由曲面光学元件能力有限,在快响制造和轻量化等方面存在着制约。铝合金材料可加工性好,密度低,价格低廉,尽管其膨胀系数大,但安装支撑结构和镜面可采用同质材料,组成无热化光机一体全铝光学系统,从而降低膨胀系数不匹配的影响,避免材料膨胀系数不一致带来的热应力和应变问题,有利于光学系统的长期稳定工作,适合变温环境。单点金刚石车削技术可以实现光学元件和支撑结构的快速响应制造,但制造精度仍难以满足可见光成像系统的需要。为解决上述问题,本文提出了铝合金自由曲面光学元件加工工艺流程,如图 6 所示。首先通过铣削等方式完成外形、轻量化结构的加工,对镜体进行消应力处理,再利用刀具伺服超精密切削技术实现自由曲面光学元件的超精密制造,最后,利用磁流变修形技术来提高自由曲面光学元件的制造精度。

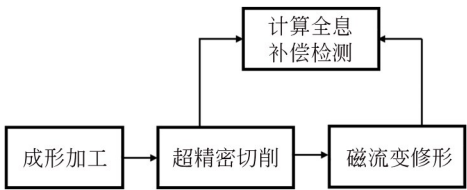


图 6 铝合金自由曲面光学元件加工工艺流程
Fig. 6 Processing of aluminum alloy freeform optical elements

3.1.1 刀具伺服超精密切削

传统的车削加工形式不能满足自由曲面光学元件的超精密加工。为了完成自由曲面的加

工,必须使刀具 Z 向切深位置与横向走刀距离(X)和主轴回转角度(θ)两个参数相关,确保刀尖在极坐标系内形成相对于 C 轴中心的复杂轨迹线。为避免刀具与光学镜面发生干涉,刀具轨迹应满足如下基本要求:刀具路径的各段直线段最大逼近误差相等且不超过给定的逼近误差;相邻刀具路径间的残留高度均不超过给定值。由此生成的刀位点数最少,刀具路径长度最短,可提高加工效率。传统的加工轨迹插补规划方法以位置增量规划运动的方向和位移,不能规划运动的速度和加速度,加工轨迹会出现严重的几何误差、斜率误差和曲率误差,致使运动方向突变,产生惯性冲击。

为防止加工过程中不可控因素对光学面形精度的影响,反射镜的镜面往往在各定位面加工完成后才进行加工。以主镜和三镜加工为例,单点金刚石车削首先加工一体化主镜背面作为后续加工的基准面;然后,以定位面为基准将镜坯与夹具胶结固定,并将镜坯连同夹具一起固定在机床主轴上,保证镜体大致与机床主轴对中。随后,对在主镜体外圆端面(定位面)进行加工,保证其直径尺寸和自身圆柱度以及与定位面的垂直度。完成定位面的加工后对另一安装定位面进行加工,保证其自身平面度以及与定位面的平行度。在完成定位面的加工并将镜坯连同夹具固定在机床主轴后,三镜就再进行二次装夹,这样便将机床自身的加工精度完整映射在三镜上,保证了主镜光学面、定位面1以及定位面2之间的相对位置关系。主、三镜一体化超精密车削如图7所示。

3.1.2 磁流变修形

为了进一步提升超精密车削的自由曲面面形精度,超精密车削后衔接磁流变修形工艺。磁流变修形是一种线性成形过程,成形模型依赖面形误差和材料去除模型的空间线性描述,不仅要求工件在空间上具备线性可展性,而且要求材料去除模型和面形误差的网格模型相互匹配,平面和球面的磁流变修形技术相对成熟。与之不同,自由曲面光学元件磁流变抛光需要解决大梯度曲率变化带来的材料去除非线性

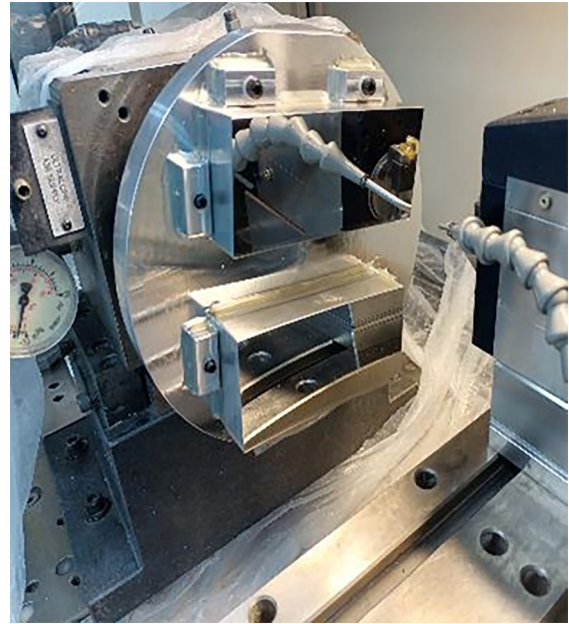


图7 主、三镜一体化超精密车削

Fig. 7 Integrated ultra-precision turning of primary and tertiary mirrors

性畸变难题,关键是曲率变化带来的去除函数变化。

一般材料去除建模均是基于工件的曲率半径的假设前提,无法反映工件曲率半径变化对材料去除的影响规律,因此不能满足复杂曲面磁流变磨抛加工的实际应用需求。如图8所示,自由曲面不具备空间可展性,以最接近球面为拟合面进行线性成形,所形成的投影网格点存在非线性

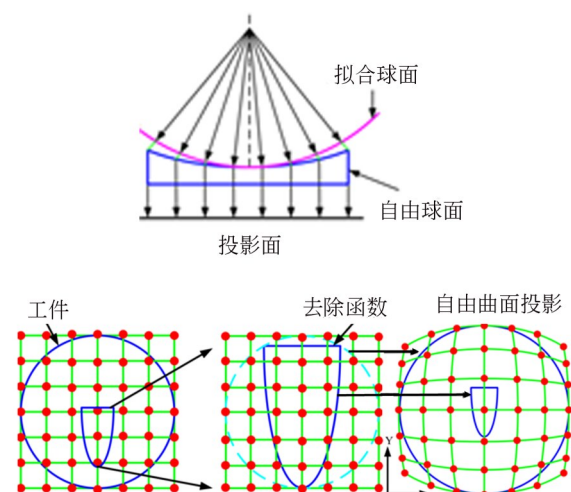


图8 去除函数自由曲面同平面的网格投影

Fig. 8 Mesh projection of freeform equivalent plane removal functions

畸变,面形误差和去除函数之间不能有效匹配,从而导致面形误差线性收敛算法无法满足加工要求,因此,需要引入主动非线性成形控制的面形误差收敛算法。

面形误差线性收敛算法可以描述为空间上的二维卷积过程。在算法中引入主动控制部分,并变换为空间上的数学表述:

$$\mathbf{r}_a = \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

其中: $\mathbf{r}_a$ 为 N_r 维列向量, $\mathbf{r}_a$ 的第 k 个元素为 r_{ak} ; $\boldsymbol{\tau}$ 为 N_r 维列向量, $\boldsymbol{\tau}$ 的第 i 个元素 τ_i ; $\mathbf{B}$ 为 $N_r \times N_r$ 维的去除矩阵,它的第 k 行、第 i 列元素 $A_{ki} = a_{ki}$ 。进行主动非线性成形控制的关键是在计算中引入非线性部分,也就是通过去除矩阵 $\mathbf{B}$ 对所有离散网格点的材料去除量进行定义,再通过线性方程组解算驻留时间,该驻留时间可补偿去除效率非线性带来的误差。

为避免修形过程主镜、三镜之间的干涉,分别对主镜、三镜进行磁流变修形。主镜磁流变修形的具体过程如图9所示。



图9 主镜磁流变修形

Fig. 9 Magnetorheological polishing of primary mirror

3.2 基于CGH的自由曲面光学元件形位误差检测

自由曲面检测技术是自由曲面光学元件制造过程中的重要步骤,是制约自由曲面光学元件精度向更高方向发展最为关键的因素之一。计算全息图(Computer Generated Hologram, CGH)检测法是自由曲面面形精度检测的有效方法,它抵抗外界干扰及噪声的能力非常强,测量不确定度在纳米量级。CGH是一种衍射光学元件,可产生任意复杂曲面波前,具有非接触、纳米

精度和高效率检测的优点,成为光学自由曲面面形检测的主要手段。

为了实现光学复杂曲面的形位精度,首先在复杂曲面上设计制备“光学-机械”基准面,通过加工保证其位置精度,然后,采用CGH检测光学复杂曲面和基准面,检测原理如图10所示。在CGH补偿器上同步制作出复杂曲面像差补偿的主全息区域(A_1)、CGH自身相对于干涉仪的对准全息区域(A_2)和相对基准面定位的基准全息区域($A_3 \sim A_6$),同时检测光学复杂曲面与基准面,完成机械基准位置向光学面形基准位置的传递,实现基于CGH的光学复杂曲面和基准面的形位精度同步检测。

图11为主镜、三镜形位误差同步检测光路

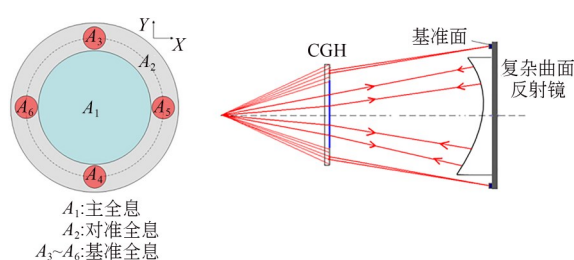


图10 基于CGH的光学复杂曲面形位精度同步检测原理
Fig. 10 Principle for synchronous detection of shape and position accuracy of optical complex surfaces based on CGH

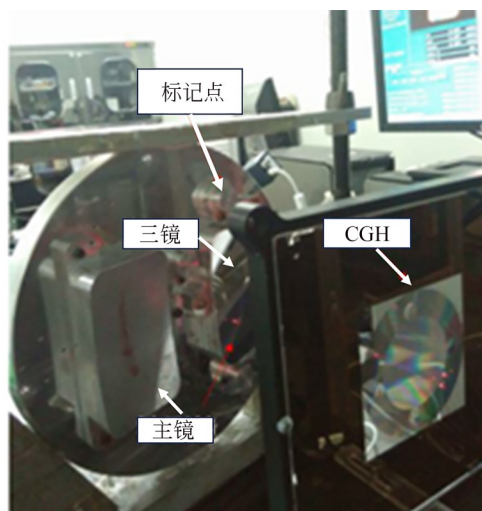


图11 主、三镜形位误差同步检测

Fig. 11 Synchronous detection of shape and position errors for primary and tertiary mirrors

图,通过在 CGH 上设计不同的区域分别对主镜和三镜进行面形精度检测。主镜检测结果如图 12 所示,其面形精度 PV 值为 170.89 nm,RMS 值为 18.28 nm。三镜检测结果如图 13 所示,其面形精度 PV 值为 144.62 nm,RMS 值为 19.62 nm。通过解算主镜和三镜的检测中心位置,得出主镜相对于三镜在 X 方向上的位置误差为 0.5 μm 、Y 方向上的位置误差为 0.7 μm ,在公差要求范围内。主镜和三镜的面形精度和相对位置精度均满足公差要求。

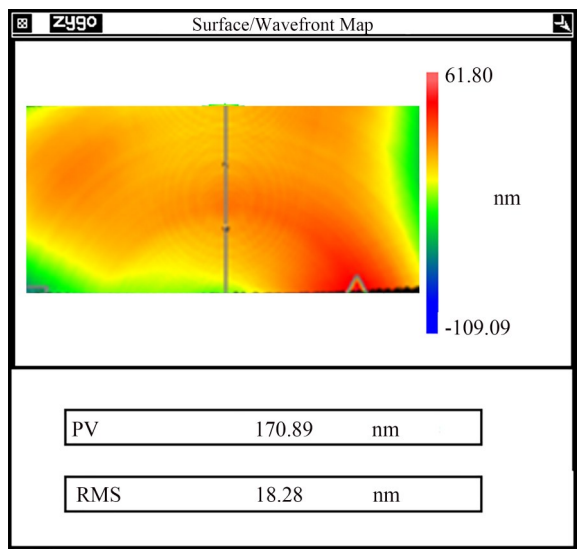


图 12 主镜面形误差检测结果
Fig. 12 Surface errors of primary mirror

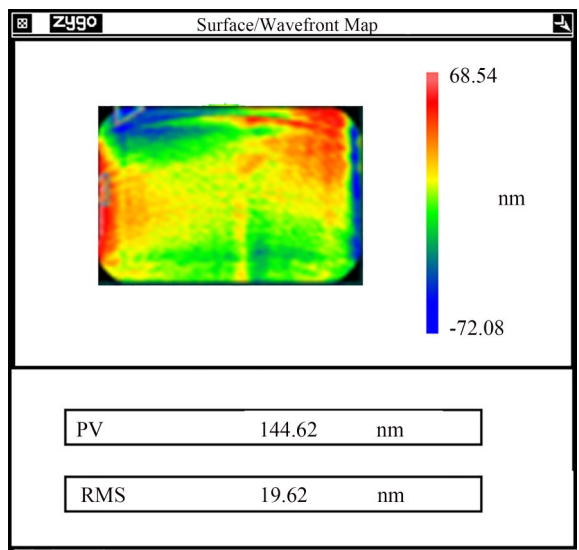


图 13 三镜面形误差检测结果
Fig. 13 Surface errors of tertiary mirror

次镜测量结果如图 14 所示,次镜的面形 PV 值为 130.24 nm,RMS 值为 14.17 nm,满足精度要求。

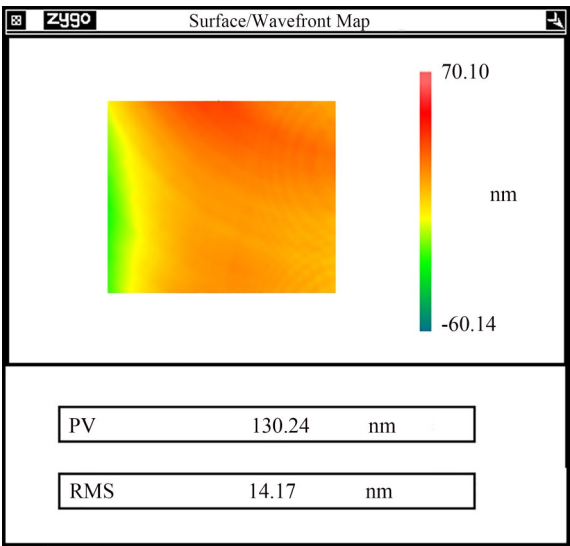


图 14 次镜面形误差检测结果
Fig. 14 Surface errors of secondary mirror

4 实 验

4.1 光学成像系统集成与测试

将加工好的光学元件按照如图 15 所示的方式进行装配,其中主镜和三镜为多面共体光学元件,二者的位置关系通过超精密加工保证。为了防止杂散光对成像效果的影响,在主镜和三镜之间安装挡光板,同时将非成像表面进行发黑处理。主、三镜和次镜之间的装配面为单点金刚石超精密车削的高精度表面,通过螺栓

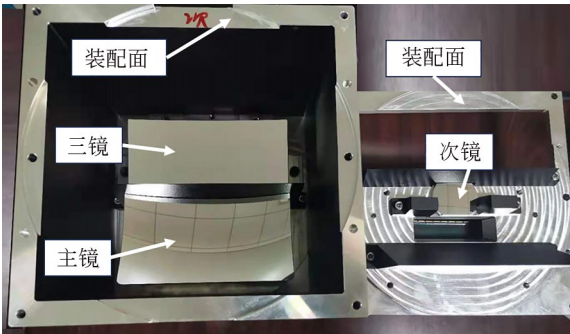


图 15 主、三镜和次镜装配图
Fig. 15 Assembly drawing of primary, tertiary and secondary mirrors

的连接即可保证主镜与次镜、次镜与三镜之间的相对位置关系,为了防止螺栓应力过大导致镜面受应力变形,采用扭矩扳手控制各螺钉的安装应力平衡。光学系统装配结果如图 16 所示。

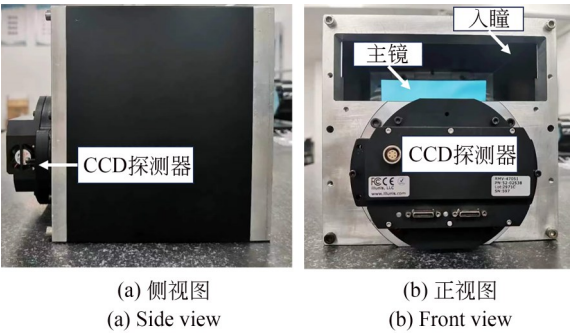


图 16 光学系统实物图
Fig. 16 Physical object of optical system

系统装配完成后,拟采用干涉法测量波像差来评价系统的成像质量,以 $(0^{\circ},-5.5^{\circ})$ 视场为基准进行波像差测量的仿真设计,如图 17 所示。从 f 数为 1.5 的球面干涉镜头出射的汇聚激光光束经过像点后,再经三镜、次镜和主镜反向传输后平行于光轴出射,出射光束经平面镜反射返回系统,在干涉仪上形成干涉图,即为系统波像差。基于上述原理构建的测量现场如图 18 所示,选用 4 英寸干涉仪完成测量实验,得到的干涉测量结果如图 19 所示,可知系统的波像差为 0.085λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),满足成像系统需求。

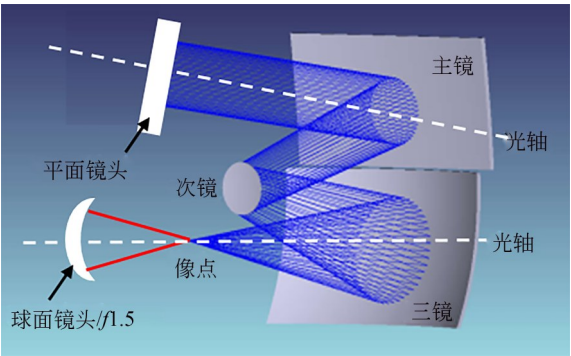


图 17 光学系统波像差测量原理
Fig. 17 Principle for wavefront aberration measurement of optical system

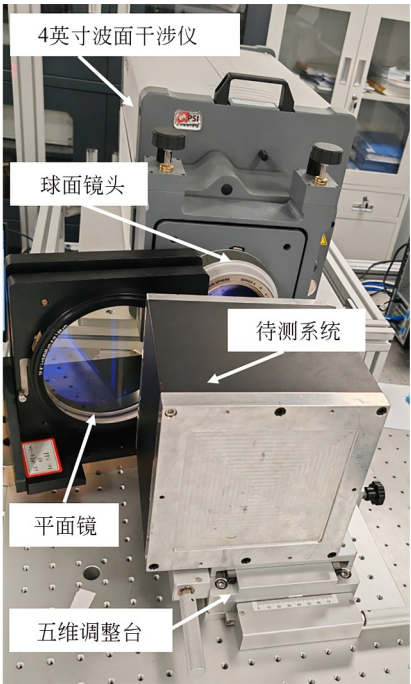


图 18 光学系统波像差测量实验装置
Fig. 18 Experimental setup for wavefront aberration measurement

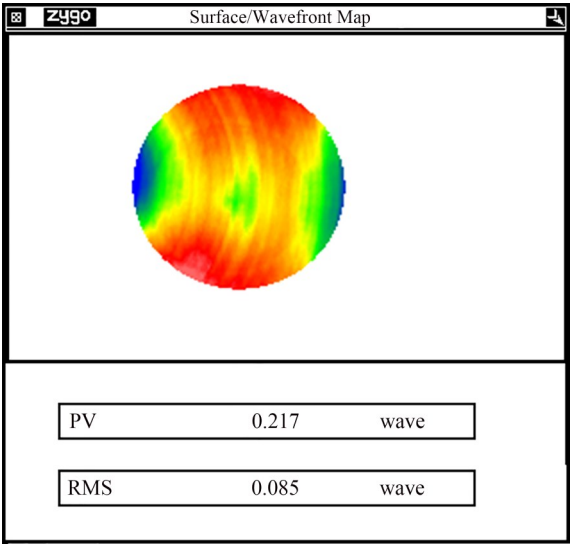


图 19 光学系统波像差测量结果
Fig. 19 Measurement result of wavefront aberration

4.2 光学系统成像实验

在系统集成装配的基础上,对 5 km 以外的目标进行成像实验,实验现场和成像效果如图 20 所示。可以看出,该光学系统能在较大的范围内实现整体清晰成像,典型目标局部放大后清晰度更高,达到了光学系统设计的预期目的。

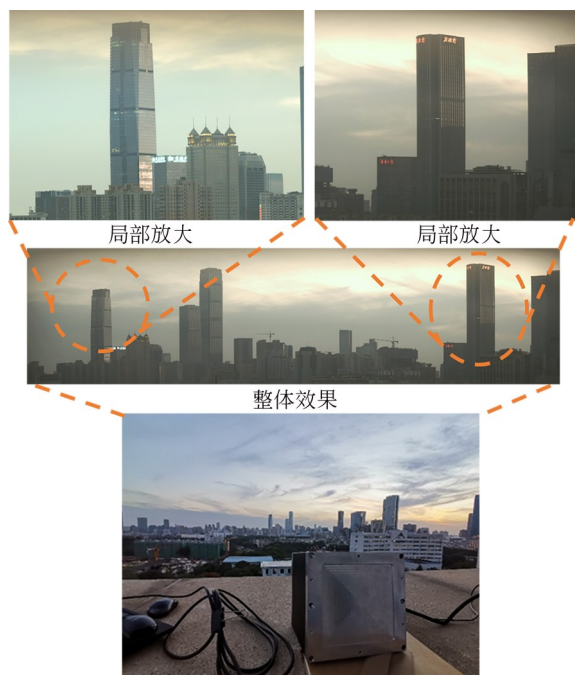


图 20 光学系统成像现场与效果展示

Fig. 20 Imaging experiment and effect demonstration

5 结 论

本文根据自由曲面光学成像系统大视场、高分辨和快响制造的要求,完成了自由曲面系统光学设计、自由曲面光学元件超精密制造,以及系统集成与成像实验。首先,通过解析多变量约束下的像差形成机理,建立了自由曲面光学系统参数的精确函数化表达模型,优化设计得到光学系统的视场角为 $30^\circ \times 5^\circ$,全视场光学传递函数值大于 0.7,逼近衍射极限,最大像元均方根半径为 $2.075 \mu\text{m}$ 。然后,进行了铝合金自由曲面反射镜纳米精度加工和高频抑制工艺研究,实现了基于计算全息元件的自由曲面高精度检测。最后,进行了光学系统的装调集成与成像实验。自由曲面光学元件的面形精度 RMS 值优于 20 nm ,位置精度优于 $1 \mu\text{m}$,装配集成测试得到光学系统的波像差为 0.085λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$),不仅满足大视场高分辨场景的使用要求,同时具备稳定可靠和快响制造等特点。

参考文献:

- [1] 薛栋林, 郑立功, 张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2813-2820.
XUE D L, ZHENG L G, ZHANG F. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2813-2820. (in Chinese)
- [2] 张峰. 高精度离轴凸非球面反射镜的加工及检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2557-2563.
ZHANG F. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2557-2563. (in Chinese)
- [3] 王梦晖, 赵高兴, 时其然, 等. 自由曲面成像光学系统的设计方法及其应用[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 3788/AOS221925.
WANG M H, ZHAO G X, SHI Q R, *et al.* Design methods and applications of freeform surface imaging optical systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 3788/AOS221925. (in Chinese)
- [4] 杨通, 段理哲, 程德文, 等. 自由曲面成像光学系统设计: 理论、发展与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0108001.
YANG T, DUAN Y ZH, CHENG D W, *et al.* Freeform imaging optical system design: theories, development, and applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0108001. (in Chinese)
- [5] 许宁晏, 陈露, 黄静, 等. 自由曲面成像光学系统的初始结构设计方法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(2): 3788/IRLA20210852.
XU N Y, CHEN L, HUANG J, *et al.* Review of design methodology for starting-point of freeform surface imaging optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2): 3788/IRLA20210852. (in Chinese)
- [6] 张艺蓝, 史浩东, 王超, 等. 基于自由曲面的空间光学系统偏振像差分析[J]. 光学精密工程, 2021, 29(12): 2783-2796.
ZHANG Y L, SHI H D, WANG CH, *et al.* Analysis of polarization aberration of space optical system based on freeform surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(12): 2783-2796. (in Chinese)
- [7] ROLLAND J P, DAVIES M A, SULESKI T J, *et al.* Freeform optics for imaging [J]. *Optica*, 2021, 8(2): 161.
- [8] BAUER A, SCHIESSER E M, ROLLAND J P.

- Starting geometry creation and design method for freeform optics[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1756.
- [9] 于慧娟. 光学自由曲面单点金刚石超精密车削理论与技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
YU H J. *Theoretical and Technological Research on Optical Freeform Surface of Single Point Diamond Ultra-precision Turning*[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [10] 王之岳, 陈灶灶, 朱利民, 等. 微透镜阵列单点金刚石车削补偿技术[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(7): 813-820.
WANG ZH Y, CHEN Z Z, ZHU L M, *et al.* Single point diamond turning and compensation for micro-lens array[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(7): 813-820. (in Chinese)
- [11] 朱德燕, 唐骏伟, 国成立, 等. 计算全息板干涉检测工业镜头凸自由曲面(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(9): 3788/IRLA20220456.
ZHU D Y, TANG J W, GUO CH L, *et al.* Interferometric testing of convex freeform surface in industrial lens based on Computer-Generated-Hologram (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 3788/IRLA20220456. (in Chinese)
- [12] 李雯研, 程强, 曾雪锋, 等. 计算全息补偿检测自由曲面的高精度位姿测量[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(11): 1581-1592.
LI W Y, CHENG Q, ZENG X F, *et al.* High-precision posture measurement for measuring free-form surface with computer generated hologram compensation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(11): 1581-1592. (in Chinese)
- [13] 熊玉朋, 路文文, 黄钺, 等. 可见光/近红外成像系统共轴折叠反射镜干涉检测技术(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(6): 3788/IRLA20230175.
XIONG Y P, LU W W, HUANG CH, *et al.* Interferometric test of coaxial folded mirrors for visible/near-infrared imaging systems(invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(6): 3788/IRLA20230175. (in Chinese)
- [14] XIONG Y P, DAI Y F, TIE G P, *et al.* Engineering a coaxial visible/infrared imaging system based on monolithic multisurface optics[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(34): 10036-10043.
- [15] 王合龙, 陈建发, 黄浩阳, 等. 基于自由曲面的离轴三反光学系统研制[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(3): 3788/IRLA20220523.
WANG H L, CHEN J F, HUANG H Y, *et al.* Development of off-axis three-mirror system based on free-form surface[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 3788/IRLA20220523. (in Chinese)
- [16] 李杰, 罗辉, 李金钺, 等. 基于谐衍射与自由曲面的机载红外双波段成像光学系统设计[J]. *光子学报*, 2021, 50(12): 1222004.
LI J, LUO H, LI J CH, *et al.* Design of airborne infrared dual-band imaging optical system based on harmonic diffraction and free-form surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(12): 1222004. (in Chinese)
- [17] 黄辰旭, 刘欣, 潘枝峰, 等. 基于自由曲面的大视场离轴四反光学系统设计[J]. *激光与红外*, 2016, 46(3): 325-328.
HUANG CH X, LIU X, PAN ZH F, *et al.* Design of off-axis four-mirror optical system with wide field of view based on free-form surface[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(3): 325-328. (in Chinese)
- [18] 巩盾. 空间遥感测绘光学系统研究综述[J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 714-724.
GONG D. Review on mapping space remote sensor optical system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 714-724. (in Chinese)
- [19] 王庆雷, 孙世君, 姜宏佳, 等. 光学遥感器光机结构热变形的高精度测量[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(8): 948-959.
WANG Q L, SUN SH J, JIANG H J, *et al.* High-precision thermal deformation measurement of optical remote sensor optical-mechanical structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(8): 948-959. (in Chinese)
- [20] 张学军, 樊延超, 鲍赫, 等. 超大口径空间光学遥感器的应用和发展[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2613-2626.
ZHANG X J, FAN Y CH, BAO H, *et al.* Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2613-2626. (in Chinese)
- [21] 马铭泽, 何煦, 王金鑫, 等. 离轴三反望远镜主镜和三镜面形误差补偿机理[J]. *红外与激光工程*,

2023, 52(4): 3788/IRLA20230053.

MA M Z, HE X, WANG J X, *et al.* Compensation mechanism of primary mirror and the third mir-

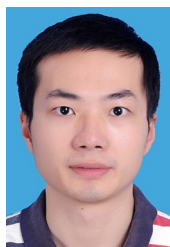
ror figure error of off-axis three-mirror telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(4): 3788/IRLA20230053. (in Chinese)

作者简介:



熊玉朋(1987—),男,吉林榆树人,博士,副教授,2012年、2019年于国防科技大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光学系统设计、复杂曲面光学元件超精密制造技术的研究。E-mail: yulinlang521@163.com

通讯作者:



欧 洋(1994—),男,湖南武冈人,博士,讲师,2018年、2023年于国防科技大学分别获得硕士和博士学位,主要从事复杂曲面光学系统的设计与制造研究。E-mail: yang_ou17@163.com