

文章编号 1004-924X(2023)14-2019-12

二维大视场离轴反射式光学系统设计

于亚琼^{1,2}, 王灵杰^{1*}, 赵尚男^{1,2}, 张建萍¹, 张新^{1,2}

(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)

摘要: 宽视场光学成像系统可以增大光学传感器观测范围、提高探测效率。近年来, 基于自由曲面的光学系统设计和制造取得了重大进展, 为设计大视场、大相对孔径、高分辨率、高成像质量、无遮挡离轴反射系统提供了可能性。首先, 分析了大视场离轴反射系统的像差特性, 指出当不断增加系统视场角, 尤其是子午方向视场角时, 与视场相关的非对称高级像差量将剧烈增加; 像场连续性要求更加凸显。接着, 提出了一种二维大视场长焦距离轴光学系统设计方法: 在常规光学系统初始结构基础上, 采用多重结构形式, 使子午方向视场角离散化, 光学系统特定曲面分解为两个子曲面; 并构建系统约束条件, 通过约束系统外形尺寸、优化系统结构形式进而完成系统优化设计。最后, 基于提出的方法, 设计了一款焦距为 1 000 mm, 像方 F 数为 10, 视场角为 $40^\circ \times 16^\circ$ 的自由曲面离轴四反光学系统。设计结果表明: 该系统全视场范围内成像质量较好, 50 lp/mm 的特征频率下, 400~750 nm 可见光波段内光学调制传递函数优于 0.26, 证明该方法切实有效。

关键词: 光学设计; 离轴反射系统; 自由曲面; 二维大视场; 曲面分解

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233114.2019

Optical design of the off-axis reflective system with wide fov

YU Yaqiong^{1,2}, WANG Lingjie^{1*}, ZHAO Shangnan^{1,2}, ZHANG Jianping¹, ZHANG Xin^{1,2}

(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: wanglingjie@126.com;*

Abstract: Generally, the observation ranges and detection efficiencies of optical remote sensors can be enhanced using wide-field optical imaging systems. Accordingly, the design and manufacturing of freeform-surface-based optical systems have achieved significant progress recently, making the construction of wide-field, rapid, higher-quality-resolution and -imaging, and obstacle-free off-axis reflection systems feasible. The first part of this paper presents a detailed analysis of the aberration characteristics of an off-axis reflection system. This asymmetric higher level aberration increases dramatically as the field of view (FOV), specifically the meridional FOV, of the system increases. These characteristics place a prominent requirement on image field continuity. The second part of this paper presents a new design approach for two-dimensional (2-D) large FOV optical systems with long focal lengths. First, we built multiple structural forms based on conventional optical systems, leading to a discretized meridional field angle, and with cer-

收稿日期: 2023-02-06; 修订日期: 2023-03-02.

基金项目: 青年科学基金资助项目 (No. 62005271)

tain specific surfaces of the optical system decomposed into two sub-surfaces. Following this, system optimization was achieved by constraining the system size and improving its structural form. Finally, we designed the off-axis reflective freeform surface optical system. The imaging quality was good within the entire FOV, realizing 2-D large-field imaging of $40^\circ \times 16^\circ$, a focal length of 1 m, and an F-number of 10. The test results prove that the proposed design is good, yielding an optical modulation transfer function of better than 0.26, particularly in the visible spectrum of 400-750 nm with a characteristic frequency of 50 lp/mm.

Key words: optical design; off-axis reflection system; freeform surface; wide field-of-view; surface decomposition

1 引言

光学遥感利用可见光、近红外和短波红外传感器对地物进行特定电磁谱段的成像观测^[1]。大视场、高分辨力、大相对孔径、高成像质量、结构紧凑的光学遥感器是对地观测光学遥感器的重要发展方向。离轴反射式自由曲面光学系统具有高透过率、光谱范围宽、无色差、结构布局灵活、成像质量高等特点,在光学遥感器中得到了广泛应用。

针对大视场离轴反射式自由曲面光学系统设计,国内外学者已开展广泛研究并取得一定成果^[2-15]。2012年,Zhang等^[3]设计了一款焦距为550 mm,F数为6.5,视场角为 $76^\circ \times 2.8^\circ$ 的自由曲面超大视场离轴反射光学系统,系统的次镜和四镜集成在同一元件上,已得到成功的工程应用。2017年,Muslimov等^[4]应用方域内正交的勒让德多项式描述的自由曲面设计了一款焦距250 mm,F数为2.5,视场角为 $7.2^\circ \times 7.2^\circ$ 的高性能离轴三镜消像散(Three-Mirror Anastigmats,TMA)望远镜系统,采用超环面探测器显著提升了系统性能。同年,Chrisp等^[5]应用NURBS(非均匀有理B样条)自由曲面设计了一款焦距200 mm,F数为2,视场角 $40^\circ \times 40^\circ$ 的离轴四反望远镜,系统几何角度分辨率达到4弧秒。2018年,Tang等^[6]提出一种多曲面扩展的高性能自由曲面成像系统设计方法,设计了焦距150 mm,F数2.5,视场角 $60^\circ \times 1^\circ$ 的离轴三反系统,证明该方法的有效性。2019年,Meng等^[9]提出在设计过程中逐步扩大视场,并基于系统成像质量和一些约束条件逐步增加自由曲面多项式项的方法,设计了焦距1 000 mm,F数为10,视场角为 $80^\circ \times 4^\circ$ 超

宽离轴自由曲面光学系统,RMS波前误差值为 0.040λ ($\lambda=0.633\ \mu\text{m}$)。同年,Wu等^[10]提出一种视场扩展构造(FEC)设计方法,成功设计出一款焦距为9.3 mm,F数为1.39,视场角为 $40^\circ \times 30^\circ$ 的反射式自由曲面红外摄影仪,成像质量在远红外波段接近衍射极限水平,最大相对畸变为5.5%。2020年,操超等^[11]基于矢量像差理论和费马原理直接获得像质较好的无遮挡自由曲面初始结构,经过优化得到工作波长8~12 μm ,焦距200 mm,F数为2,视场角 $30^\circ \times 3^\circ$ 的离轴三反光学系统。同年,刘璐等^[12]设计了一款焦距500 mm,F数3.5,视场角为 $18^\circ \times 10^\circ$,工作谱段2.70~7.50 μm 的二维大视场紧凑型离轴四反光学系统。2021年,Ni等^[14]提出一种基于高斯径向基函数的自由曲面宽视场成像系统设计方法,以焦距160 mm,F数为4,视场角 $60^\circ \times 0.6^\circ$ 的高成像质量、小畸变的离轴三反系统为设计案例,验证了方法的有效性。2022年,谢运强^[15]设计了一款焦距2 000 mm,相对孔径为1/5,视场角 $30^\circ \times 12^\circ$ 的宽视场长焦距离轴三反光学系统。

通过对上述国内外研究成果进行分析可知,现有的研究主要集中在二维大视场光学系统设计,即在弧矢方向实现了较大视场,子午方向视场角则较小,使得系统通常以推扫模式成像,无法实现对大范围区域凝视成像或进行视频拍摄^[15];或者系统虽然具备了二维大视场,但系统焦距较短,无法实现对目标的高分辨率观测。

为此,本论文分析了大视场离轴反射系统的像差特性,并在此基础上提出一种二维大视场长焦距离轴光学系统设计方法。同时,利用提出的方法,设计了一款焦距1 000 mm、视场角 $40^\circ \times 16^\circ$ 的宽视场离轴四反自由曲面光学系统,系统

工作在可见光波段, F 数为 10, 系统的均方根 (Root Mean Square, RMS) 波前误差平均值为 $0.110\lambda (\lambda=632.8 \text{ nm})$ 。

2 离轴反射式系统像差分析

离轴反射光学系统失去了旋转对称性, 像差场不再关于视场中心对称, 表现出与视场相关的多节点(零点)特性, 且每种像差类型都有其特有

$$W = \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m (W_{klm})_j [(H - \sigma_j) \cdot (H - \sigma_j)]^p (\rho \cdot \rho)^n [(H - \sigma_j) \cdot \rho]^m. \quad (1)$$

由曲面失去了旋转对称性, 离轴自由曲面光学系统的像差场特性更加复杂。传统的像差曲线、光瞳图等像质评价方法已不能准确评价系统全视场范围成像性能。Kevin P. Thompson 等提出了一种全视场显示评价方法, 可较为全面地评价离轴自由曲面系统像场连续性, 分析全像面是否存在突变点。

全视场显示评价方法, 如图 1 所示。首先, 选择特定像差类型, 而后, 对有效视场进行离散化采样, 分别计算每个采样点像差值, 最后, 进行全视场显示。

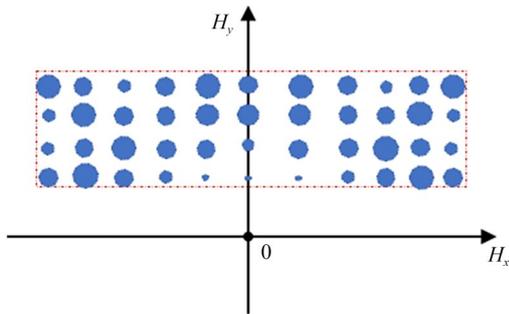


图 1 全视场显示评价方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of full field display evaluation method

本文主要采用全视场显示的 RMS 波前误差和 Zernike 多项式系数来评价系统成像性能。其中, RMS 波前误差计算如公式(2)所示:

$$RMS(h_i, h_j) = \sqrt{\frac{(W(x_p, y_p))^2}{N} - \left[\frac{W(x_p, y_p)}{N} \right]^2}, \quad (2)$$

其中: $W(x_p, y_p)$ 为视场点 (h_i, h_j) 的光瞳位置

的像差场行为。美国亚利桑那大学的 Rolland V. Shack 和 Kevin P. Thompson 将传统的波像差公式展开成矢量形式, 引入像差场中心偏移矢量 σ_j , 形成矢量波像差理论, 如公式(1)所示。并对三阶和五阶矢量波像差形式进行了推导和归纳^[16-19]。这种像差理论应用于基于旋转对称球面、圆锥曲面或非球面(或其离轴部分)的光学表面的成像光学系统。

(x_p, y_p) 的波像差值, N 为该视场点光瞳的有效采样数。

Zernike 多项式系数计算如公式(3)所示:

$$W(\rho, \theta) = \sum_j C_j Z_j = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n C_{nm} R_n^{n-2m}(\rho) \cdot \left\{ \frac{\sin}{\cos} \right\} (n-2m)\theta, \quad (3)$$

其中: C_j 为 Zernike 项 Z_j 的系数。将各视场的波前误差展开为 k 阶 Zernike 多项式的线性组合, 利用 Zernike 多项式各项与波前像差形式的对应关系, 分解出每一对 Zernike 项系数进行全视场显示。有利于分析系统现存主要像差类型, 进而有针对性的进行像差校正。Zernike 项对系数的全视场矢量显示, 如图 2 所示。依据矢量表示法则, 将每一对 Zernike 项拟合系数写作矢量形式, 如公式(4)所示:

$$C_j = C_j^x + i \cdot C_j^y = C \cdot e^{i\theta}, \quad (4)$$

其中: C_j^x 为特定 Zernike 像差类型的 x 方向像差, C_j^y 为特定 Zernike 像差类型的 y 方向像差。

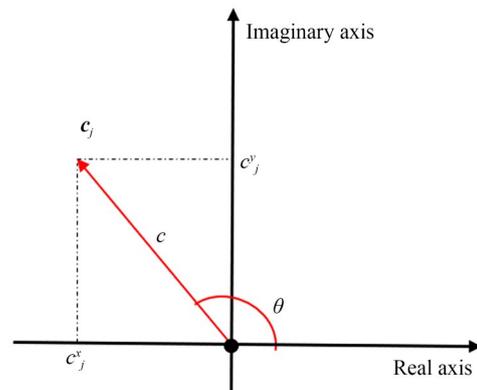


图 2 Zernike 项对系数的矢量显示示意图

Fig.2 Vector display of the coefficient of Zernike term

大视场离轴系统主要像差类型有初级像散、初级彗差、初级球差、三叶草像差(又称椭圆彗差)、二级像散、二级彗差、四叶草像差等,相应条纹 Zernike 多项式表达式如表 1 所示,相应条纹 Zernike 多项式波前图如图 3 所示。

对于二维大视场离轴自由曲面系统,当不断增加系统视场角,尤其是子午方向视场角时,需要引入更多的偏心和(或)倾斜量消除遮挡,与视

场相关的高级像差量剧烈增加,高级像差的增加使光学系统波面引入更多的非轴对称高频特性^[20]。此外,成像面更大,像场连续性要求将更加凸显。每个视场点的像差是多种复杂像差场的初级分量与高级分量叠加、平衡的结果,无法提前预测;可能出现系统整体成像质量较好,单个或几个视场点突变,成像恶化问题。设计中必须保证全像面内成像质量趋于一致,无突变点。

表 1 条纹 Zernike 多项式表达式

Tab. 1 Expression of fringe Zernike polynomial

条纹 Zernike 项	拟合系数	多项式表达式	像差类型
Z_5	C_5	$R^2 \cdot \cos 2\theta$	初阶像散(0° 或 90° 方向)
Z_6	C_6	$R^2 \cdot \sin 2\theta$	初阶像散($\pm 45^\circ$ 方向)
Z_7	C_7	$(3R^3 - 2R) \cdot \cos \theta$	初阶彗差(x 方向)
Z_8	C_8	$(3R^3 - 2R) \cdot \sin \theta$	初阶彗差(y 方向)
Z_9	C_9	$6R^4 - 6R^2 + 1$	初阶球差
Z_{10}	C_{10}	$R^3 \cdot \cos 3\theta$	初阶三叶草像差(x 方向)
Z_{11}	C_{11}	$R^3 \cdot \sin 3\theta$	初阶三叶草像差(y 方向)
Z_{12}	C_{12}	$(4R^4 - 3R^2) \cdot \cos 2\theta$	二阶像散(0° 或 90° 方向)
Z_{13}	C_{13}	$(4R^4 - 3R^2) \cdot \sin 2\theta$	二阶像散($\pm 45^\circ$ 方向)
Z_{14}	C_{14}	$(10R^5 - 12R^3 + 3R) \cdot \cos \theta$	二阶彗差(x 方向)
Z_{15}	C_{15}	$(10R^5 - 12R^3 + 3R) \cdot \sin \theta$	二阶彗差(y 方向)
Z_{17}	C_{17}	$R^4 \cdot \cos 4\theta$	初阶四叶草像差(x 方向)
Z_{18}	C_{18}	$R^4 \cdot \sin 4\theta$	初阶四叶草像差(y 方向)

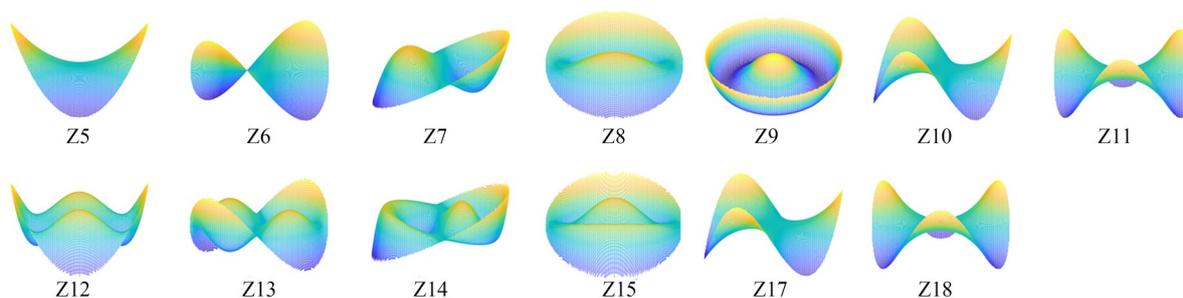


图 3 条纹 Zernike 多项式波前图显示

Fig. 3 wavefront diagram of fringe Zernike polynomial

3 基于分解曲面的设计方法

本文提出一种基于分解自由曲面的二维大视场离轴系统设计方法。在常规初始结构基础上,采用多重结构形式,将子午方向视场角离散化,进而将光学系统特定曲面分解为两个子曲

面,增加优化设计自由度,增强系统像差校正能力;优化设计过程中,构建约束条件,约束系统外形尺寸、优化系统结构形式,从而获得二维大视场系统。设计流程图如图 4 所示。

3.1 构建系统结构

采用前端负光焦度反射镜+TMA 的四反结

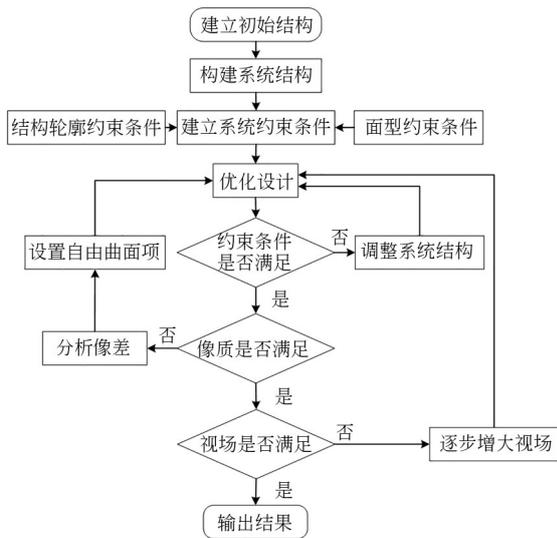


图 4 基于分解自由曲面的设计方法流程图

Fig. 4 Flow diagram of design method based on decomposition of freeform surface

构形式。将光阑面设置在系统三镜(即 TMA 次镜)上,二镜和四镜关于光阑面对称,有利于轴外像差的平衡;前端负光焦度反射镜(即主镜)用于校正和补充大视场离轴系统场曲和畸变像差。

在此初始结构基础上,采用多重结构形式,将子午方向视场角离散化为两个子视场单元。由于主镜远离光阑面,各视场光路在主镜面上交叠最小,将主镜曲面分解为两个子曲面,即子主镜曲面一和子主镜曲面二。子视场一光路通过子主镜曲面一,子视场二光路通过子主镜曲面二。系统优化设计过程中,两个子主镜曲面采用多重结构同时进行设计,面型参数独立变化。两个子视场共用系统二镜、三镜和四镜。概念性示意图如图 5 所示。

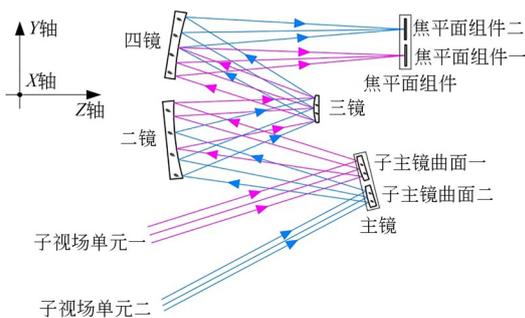


图 5 概念性光学系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of a conceptual optical system

像面为两个子像面拼接形式,即子视场一成像于焦平面组件一,子视场二成像于焦平面组件二,两个子视场成像质量单独评价。通过优化两个子像面倾斜角度,在一定程度上补偿系统场曲像差。

3.2 建立系统约束条件

离轴系统优化设计过程中,建立合理的约束条件非常重要。本论文约束条件设立在系统子午截面内,主要分为两类:第一类是结构轮廓约束条件,用于消除光线遮挡、曲面之间相互干扰,约束系统外形尺寸;第二类是面型约束条件,避免子视场光路交叠,优化系统结构,以便主镜两个子曲面、系统二镜曲面和四镜曲面分别可以加工在在在一块工件上,增加系统集成性。

3.2.1 结构轮廓约束条件

通过定义特定点到线的有向线段、两特定点之间相对距离等方式,建立了系统结构轮廓约束条件,如图 6 所示。

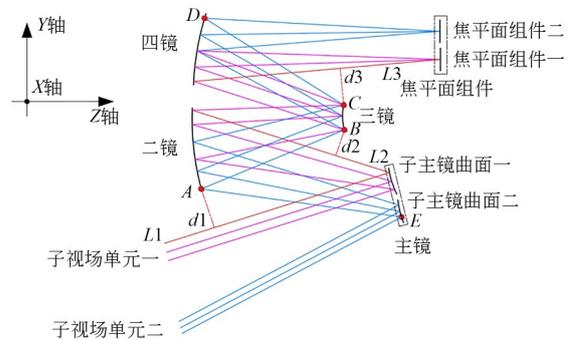


图 6 结构轮廓约束条件示意图

Fig. 6 Structural constraints diagram

入射到子主镜曲面一的上边缘光线记为 $L1$,入射到二镜下边缘光线与二镜交点记为 A ,点 A 到线 $L1$ 的距离记为 $d1$;同理入射到二镜的上边缘光线记为 $L2$,入射到三镜的下边缘光线与三镜交点记为 B ,点 B 到线 $L2$ 的距离记为 $d2$;入射到三镜上边缘光线与三镜交点记为 C ,入射到焦平面组件一的下边缘光线记为 $L3$,点 C 到线 $L3$ 距离记为 $d3$;入射到主镜子曲面二的下边缘光线与主镜交点记为 E ,四镜上边缘光线与四镜交点记为 D 。通过控制有向线段 $d1, d2, d3$ 的范围,消除反射镜之间的光路遮挡;限

定点 A, E 和点 A, D 之间的相对距离, 约束系统长度、高度方向外形尺寸, 如公式(5)所示:

$$\begin{cases} \alpha 1 \leq d 1 \leq \alpha 2 \\ \beta 1 \leq d 2 \leq \beta 2 \\ \gamma 1 \leq d 3 \leq \gamma 2, \\ |y_D - y_E| \leq H \\ |z_E - z_A| \leq W \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\alpha 1, \alpha 2, \beta 1, \beta 2, \gamma 1, \gamma 2, H, W$ 是系统优化设计过程中设置的具体数值。

3.2.2 面型约束条件

避免子主镜曲面一和子主镜曲面二孔径出现重叠, 以及二镜曲面和四镜曲面出现干涉, 分别控制主镜子曲面和二四镜在 Y 方向的空间间隔; 同时分别约束子主镜曲面和二四镜边缘光线矢高, 避免出现矢高突变, 如图 7 所示。记入射到子视场单元一下边缘光线与主镜交点为 N , 子视场单元二上边缘光线与主镜交点记为 M ; 二镜的上边缘光线与二镜交点记为 Q , 四镜的下边缘光线与四镜交点记为 P ; 系统优化设计过程中, 分别约束 PQ 和 NM 两点在 Y 方向的空间间隔和相对矢高, 如公式(6)和(7)所示:

$$\begin{cases} g 1 \leq y_N - y_M \leq t 1 \\ g 2 \leq sag_N - sag_M \leq t 2, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} g 3 \leq y_P - y_Q \leq t 3 \\ g 4 \leq sag_P - sag_Q \leq t 4, \end{cases} \quad (7)$$

式中, y 为相应点的 Y 方向坐标; sag 为相应点的矢高值; $g 1, t 1, g 2, t 2, g 3, t 3, g 4, t 4$ 是设置的具体数值。

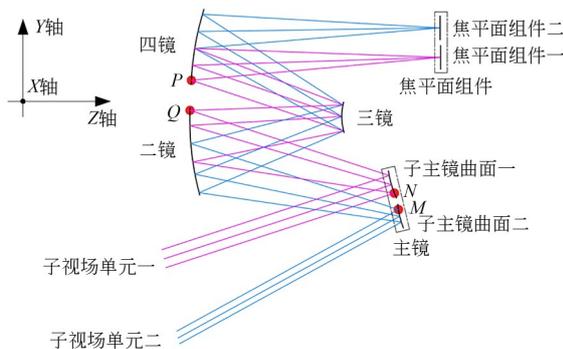


图 7 面型约束条件示意图

Fig. 7 Surface constraints diagram

3.3 优化设计

借助光学设计软件进行系统优化时, 从小视场角、简单面型开始设计。优化设计过程中, 首先监测系统结构形式, 判断约束条件是否满足, 如果不满足, 调整系统结构, 例如增加反射镜的偏心距离或(和)倾斜角度等使其满足系统约束条件。其次, 评价系统成像质量, 利用 RMS 波前误差的全视场显示, 评判系统有效视场范围内各视场及整体成像质量; 利用基于 Zernike 多项式系数的全视场显示, 分解系统像差类型, 分析系统存在的主要像差类型, 有针对性的增加自由曲面项, 充分协调、利用面型优化和反射镜曲率半径、空气间隔及曲面倾斜等结构变量优化。然后, 逐步扩大系统视场角, 完成系统设计。

4 光学系统设计与性能评价

4.1 系统设计

在一维大视场自由曲面光学系统^[3]结构基础上, 按照第 3 节介绍的设计方法, 设计了一款长焦距、二维大视场离轴四反自由曲面光学系统, 主要技术指标如表 2 所示。

表 2 光学系统主要技术指标
Tab. 2 Specifications of optical system

参数	数值
波段/nm	400~750
焦距/mm	1000
相对孔径	1/10
视场角/(°)	40×16
探测器像元尺寸/ μm	10
畸变	$\leq 18\%$

系统光路图如图 8 所示, 弧矢方向视场角为 40° , 范围为 $-20^\circ \sim 20^\circ$; 子午方向视场角为 16° , 包含 $5.5^\circ \sim 13.5^\circ$ 和 $18.5^\circ \sim 26.5^\circ$ 两个子视场。系统关于 YOZ 平面对称, 孔径光阑位于三镜 (M3), 结构参数如表 3 所示。

光学系统主镜 (M1) 面型为偶次非球面, 如公式(8)所示:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + \dots, \quad (8)$$

表 3 光学系统结构参数列表
Tab. 3 Structural parameters of optical system

表面名称	M1		M2	M3	M4	像面	
	子曲面 1	子曲面 2				子像面 1	子像面 2
表面类型	非球面		标准 Zernike 自由曲面	标准 Zernike 自由曲面	标准 Zernike 自由曲面		
曲率半径/mm	2 062.92	2 072.23	2 637.85	4 034.44	3 563.98		
间隔/mm	-1 231.79		808.20	-808.20	1 423.52 1 428.40		
圆锥常数	-1.948	-1.609	-0.544	-14.920	-22.475		
倾斜/(°)	-8.250	-7.680	-9.280	-3.254	-9.330	-14.690	-14.608
偏心/mm	-38.769	-78.408	322.608	-65.818	165.329		

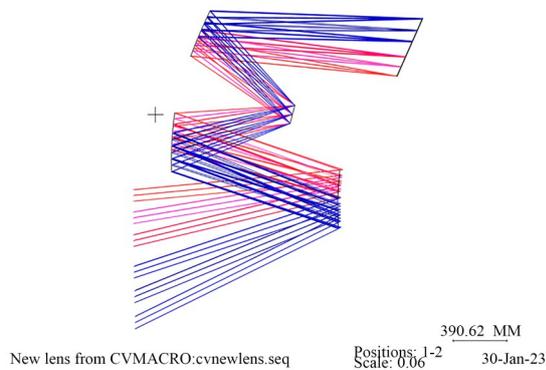


图 8 光学系统光路图

Fig. 8 Optical path diagram of optical system

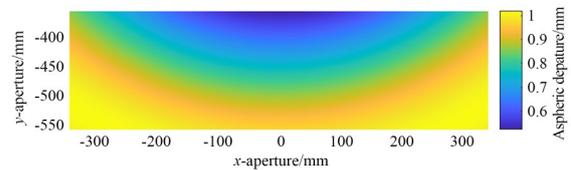
其中: c 为曲率, k 为圆锥常数; A, B, C, D, \dots 为非球面系数。M1 面型参数如表 4 所示;相对于最佳拟合球面的矢高偏离如图 9 所示,子主镜曲面一的矢高偏离的 PV 值为 0.497 mm,子主镜曲面二的矢高偏离的 PV 值为 1.186 mm,非球面偏离量较小,变化平缓,没有呈现出震荡起伏波纹,易于加工;采用计算机控制小磨头加工(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)、磁流变抛光(Magnetorheological Fluid, MRF)和离子束抛光(Ion Beam Figuring, IBF)组合的加工方式,可以实现表面粗糙度 $RMS \leq 12 \text{ nm}$ 的加工精度。

二镜 ~ 四镜(M2-M4)的面型为标准 Zernike

表 4 M1 非球面项系数列表

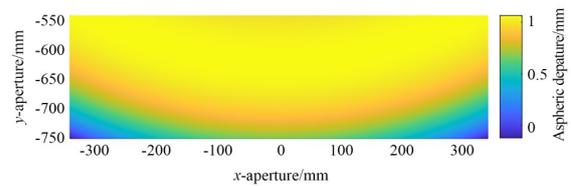
Tab. 4 Aspheric term coefficients of M1

	4 阶非球面系数	6 阶非球面系数	8 阶非球面系数
M1 子曲面 1	2.36×10^{-11}	-2.37×10^{-18}	-3.45×10^{-24}
M1 子曲面 2	2.13×10^{-11}	-6.49×10^{-18}	-1.11×10^{-24}



(a) 子主镜曲面一

(a) Subprimary mirror surface one



(b) 子主镜曲面二

(b) Subprimary mirror surface two

图 9 M1 非球面相对于最佳拟合球面的偏离

Fig. 9 Aspheric departures from best-fitting sphere of M1

自由曲面,如公式(9)所示:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + \sum_j A_j ZP_j, \quad (9)$$

其中: ZP_j 为第 j 项 Zernike 项, A_j 为相应项系数。目前自由曲面成像系统的矢量像差理论主要是讨论 Zernike 多项式面型引入的像差^[21-22],使用 Zernike 曲面有利于依据矢量像差理论有针对性的校正系统像差^[23]。M2-M4 面型参数如表 5 所示,相对于最佳拟合球面的自由曲面矢高偏离如图 10 所示,自由曲面偏离的梯度如图 11 所示。M2 自由曲面偏离的 PV 值为 4.873 mm,自由曲面偏离的最大梯度为 0.655° ;M3 自由曲面偏离的 PV 值为 0.367 mm,自由曲面偏离的最大梯度为 0.482° ;M4 自由曲面偏离的 PV 值为 5.395 mm,自由曲面偏离的最大梯度为 2.261° 。M2-M4 的 R 数大,非球面偏离量变化平缓,加工工件

(如小磨头)与镜面贴合较好,加工难度降低;镜 IBF 加工方式,可实现表面粗糙度 $RMS \leq 12 \text{ nm}$ 子口径未超过 1 m ;采用常用的 CCOS, MRF, 的高精度加工。

表 5 M2-M4 标准 Zernike 项系数列表

Tab. 5 Standard Zernike term coefficients of M2-M4

	A_4	A_5	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
M2	3.361	-2.561	-4.104	-1.737	-2.134×10^{-1}	-4.465×10^{-1}
M3	-9.017×10^{-2}	-1.279×10^{-1}	-6.180×10^{-3}	-1.697×10^{-3}	1.626×10^{-5}	-8.837×10^{-5}
M4	-5.833	3.877×10^{-1}	-1.393	-5.535×10^{-1}	-3.903×10^{-2}	-7.145×10^{-2}
	A_{13}	A_{19}	A_{20}	A_{21}	A_{22}	A_{23}
M2	-1.782×10^{-1}	5.861×10^{-2}	-2.152×10^{-1}	-3.941×10^{-1}	1.215×10^{-1}	3.464×10^{-2}
M3	-8.294×10^{-6}	1.886×10^{-6}	1.407×10^{-5}	—	—	1.064×10^{-5}
M4	2.457×10^{-1}	-2.513×10^{-2}	-2.609×10^{-2}	2.612×10^{-2}	6.035×10^{-3}	-2.638×10^{-3}
	A_{24}	A_{25}	A_{33}	A_{34}		
M2	-4.616×10^{-2}	4.967×10^{-2}	3.045×10^{-2}	3.950×10^{-3}		
M3	-2.498×10^{-6}	—	—	—		
M4	4.843×10^{-3}	-3.888×10^{-2}	1.770×10^{-3}	-1.005×10^{-3}		

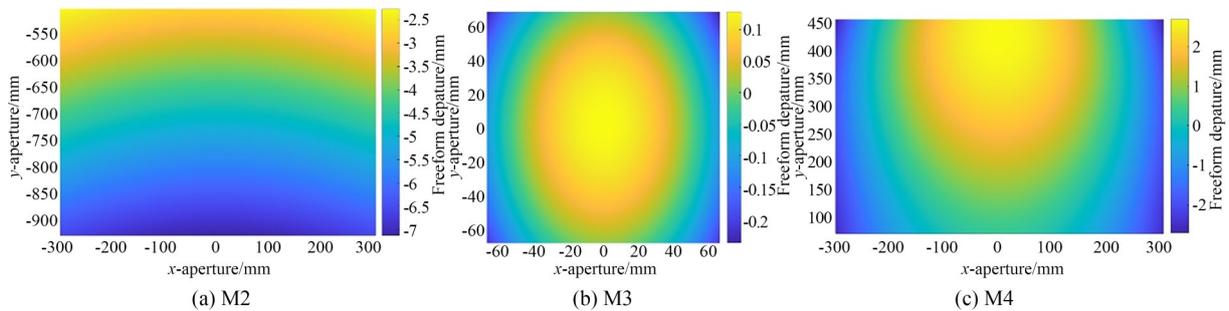


图 10 M2-M4 自由曲面相对于最佳拟合球面的偏离

Fig. 10 Freeform departures from the best-fitting sphere of M2-M4

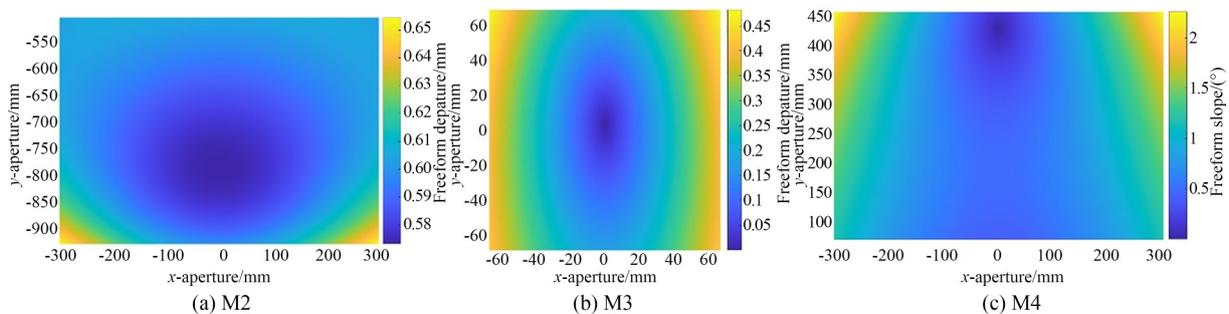


图 11 M2-M4 自由曲面偏离的梯度

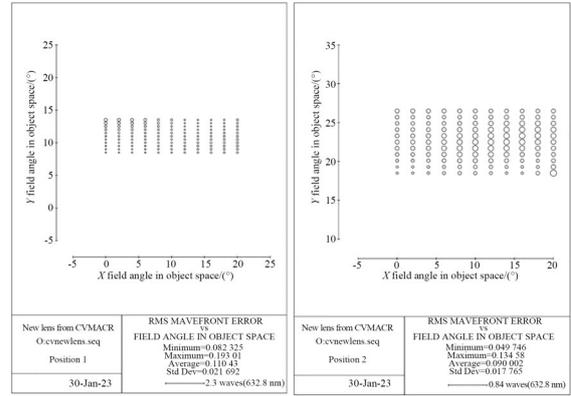
Fig. 11 Gradient of the freeform departure of M2-M4

4.2 性能评价

分别在每个子视场全像面内进行 11×11 个视场点离散采样,显示每个采样视场点的 RMS 波前误差,如图 12 所示。设计结果给出,系统 RMS 波前误差平均值为 0.110λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$),其中子视场单元一的 RMS 波前误差的平均值为 0.110λ ,最大值为 0.193λ ,最小值为 0.082λ ;子视场单元二的 RMS 波前误差的平均值为 0.090λ ,最大值为 0.134λ ,最小值为 0.050λ ;子视场单元一的最大值与最小值相差 0.111λ ,子视场单元二的最大值与最小值相差 0.084λ ;证明全视场范围内无突变点,成像质量一致性较好。利用条纹 Zernike 多项式拟合系统波前像差,分解出系统主要存在像差类型为初级像散、初级彗差、三叶草像差和四叶草像差,相应条纹 Zernike 多项式系数的全视场矢量显示如图 13 所示。系统在特征频率 50 lp/mm 处,光学传递函数 MTF 优于 0.26 ,如图 14 所示,满足系统设计要求。

由于设计中采用了视场离轴,系统垂直放大率不仅与视场角相关,而且随轴外点的离轴角变化,畸变图像不再关于光学中心对称^[24],因此使用标定焦距 f_c 计算系统畸变更有意义。标定焦距为中心视场角对应焦平面附近图像高度 Δh 除以相应视场角 $\Delta\omega$ 的正切^[4],如公式(10)所示:

$$f_c = \frac{\Delta h}{\tan(\Delta\omega)}. \quad (10)$$

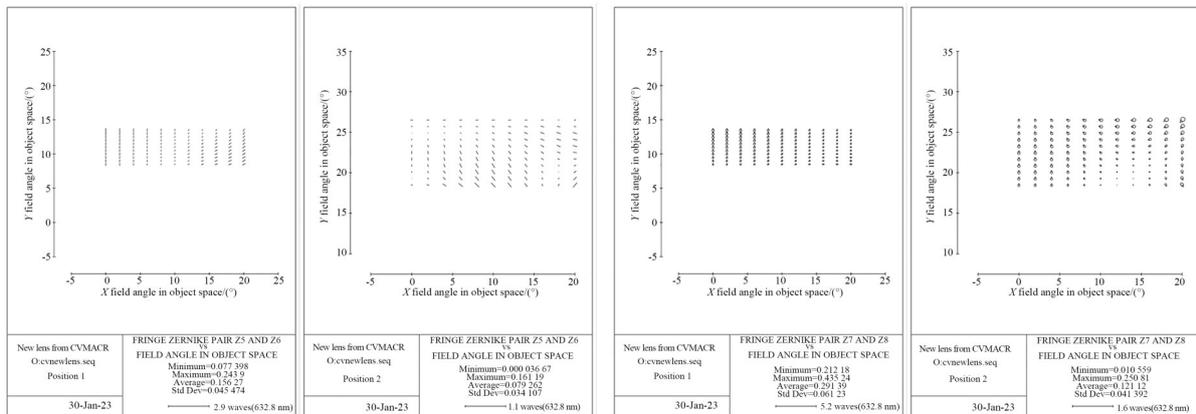


(a) 子视场单元一 (a) Subfield unit one
(b) 子视场单元二 (b) Subfield unit two

图 12 光学系统均方根波前误差

Fig. 12 RMS wavefront error of optical system

定义子视场单元一的中心视场角为 $(0^\circ, 9.5^\circ)$,子视场单元二的中心视场角为 $(0^\circ, 22.5^\circ)$ 。在有效矩形视场内,各选取 105 个视场点,计算系统网格畸变如图 15 所示,子视场单元一的 X 方向最大相对畸变为 -4.40% ,Y 方向最大相对畸变为 -15.20% ;子视场单元二的 X 方向最大相对畸变为 -3.45% ,Y 方向最大相对畸变为 16.49% 。本论文系统主要用于凝视成像或视频拍摄的观测方式,光学系统的畸变影响像的变形;畸变在系统制造阶段可以准确测量,根据测量值,通过图像处理对系统畸变进行校正,可以满足使用要求。



(a1) 子视场单元一 (a1) Subfield unit one
(a2) 子视场单元二 (a2) Subfield unit two
(b1) 子视场单元一 (b1) Subfield unit one
(b2) 子视场单元二 (b2) Subfield unit two

(a) Z5, Z6

(b) Z7, Z8

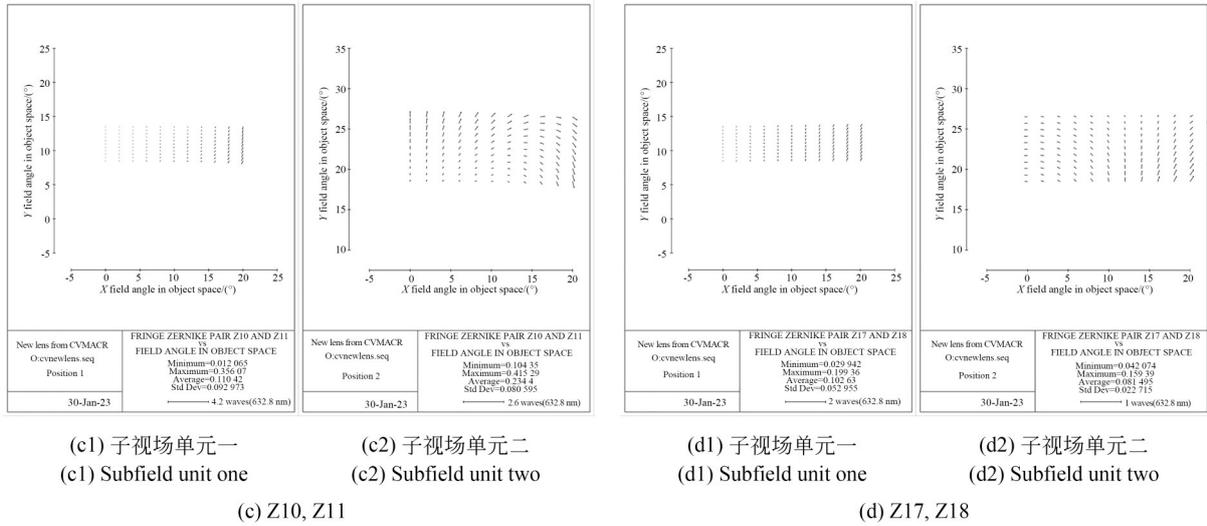


图 13 光学系统的全视场波前多项式系数矢量显示

Fig. 13 Full-field wavefront polynomial coefficient vector display of optical system

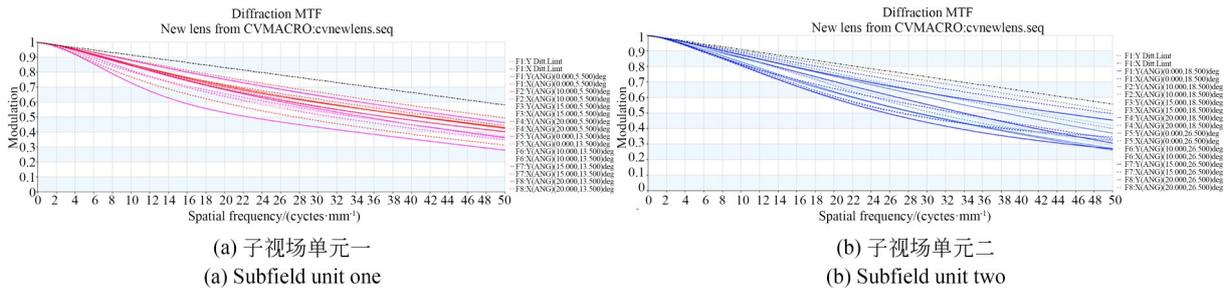


图 14 光学系统调制传递函数曲线

Fig. 14 Modulation transfer function curve of optical system

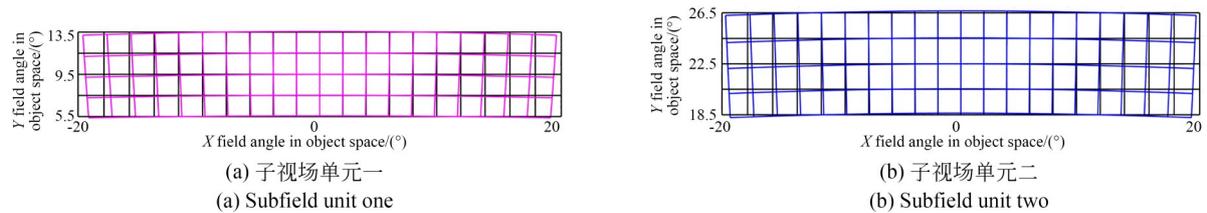


图 15 光学系统网格畸变

Fig. 15 Optical system grid distortion

5 结 论

针对空间遥感探测中,对目标进行高分辨率、大范围区域凝视成像或视频拍摄的观测需求,本文提出了一种基于分解曲面的二维大视场离轴光学系统设计方法,补偿和校正大视场离轴系统像差,增大子午方向视场角。利用该方法进行系统实例设计,实现了视场角为 $40^\circ \times$

16° 、焦距为 1 000 mm 的二维大视场成像。对二维大视场离轴自由曲面光学系统设计研究具有重要价值。

本论文系统作为 16 m 高分宽覆盖相机的探索性研究,实现了面阵成像,提高了地面像元分辨率,具有与 16 m 相机相近的成像质量。最终系统 RMS 波前误差的平均值为 0.110λ (工作波长 $\lambda=632.8$ nm),全像场范围内无突变;在特征

频率 50 lp/mm 处,光学传递函数 MTF 优于 0.26;全像面畸变小于 16.5%;太阳同步轨道高

度处,地面像元分辨力可达 6 m,具有一定的应用潜力。

参考文献:

- [1] 张兵. 光学遥感信息技术与应用研究综述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(1): 1-5.
ZHANG B. A survey of developments on optical remote sensing information technology and applications [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 10(1):1-5. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] ZHANG X, ZHENG L G, HE X, *et al.* Design and Fabrication of Imaging Optical Systems with Freeform Surfaces [C]. *SPIE Optical Engineering + Applications. Proc SPIE 8486, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIII, San Diego, California, USA.* 2012, 8486: 46-55.
- [4] MUSLIMOV E, HUGOT E, JAHN W, *et al.* Combining freeform optics and curved detectors for wide field imaging: a polynomial approach over squared aperture [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14598.
- [5] CHRISP M P. Wide Angle Reflective Telescopes with NURBS Freeform Surfaces [C]. *Optical Design and Fabrication 2017 (Freeform, IODC, OFT). Denver, Colorado. Washington, D. C. : OSA*, 2017.
- [6] TANG R R, ZHANG B Q, JIN G F, *et al.* Multiple surface expansion method for design of freeform imaging systems[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2983.
- [7] 姚艳霞, 袁群, 陈露, 等. 结合面型和视场优化策略的自由曲面设计方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1018001.
YAO Y X, YUAN Q, CHEN L, *et al.* Freeform surface design method combined with surface and field-of-view optimization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1018001. (in Chinese)
- [8] 赵宇宸, 何欣, 张凯, 等. 轻小型大视场自由曲面离轴光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1218001.
ZHAO Y C, HE X, ZHANG K, *et al.* Optical design of miniaturized and large field of view off-axis optical system based on freeform surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1218001. (in Chinese)
- [9] MENG Q Y, WANG H Y, LIANG W J, *et al.* Design of off-axis three-mirror systems with ultra-wide field of view based on an expansion process of surface freeform and field of view [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(3): 609-615.
- [10] WU W, JIN G, ZHU J. Optical design of the freeform reflective imaging system with wide rectangular FOV and low F-number [J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102688.
- [11] 操超, 廖胜, 廖志远, 等. 基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0808001.
CAO C, LIAO S, LIAO Z Y, *et al.* Design of off-axis reflective optical system with large field of view based on free-form surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0808001. (in Chinese)
- [12] 刘璐, 胡斌, 周峰, 等. 二维大视场紧凑型离轴四反光学系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(1):73-84.
LIU L, HU B, ZHOU F, *et al.* Design of compact off-axis four-mirror optical system with two-dimensional large field of view [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(1): 73-84. (in Chinese)
- [13] 陈炳旭, 廖志远, 操超, 等. 大视场大相对孔径自由曲面成像系统设计[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(8): 3788/IRLA20200005.
CHEN B X, LIAO Z Y, CAO C, *et al.* Design of freeform surface imaging system with large field of view and large relative aperture [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 3788/IRLA20200005. (in Chinese)
- [14] NI J, YANG T, CHENG D, *et al.* Design method of wide field-of-view imaging systems using Gaussian radial basis functions freeform surfaces

- [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(15): 4491-4501.
- [15] 谢运强. 基于矢量像差理论的宽视场离轴反射系统的研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.
- XIE Y Q. *Research of Off-axis Reflected System with Wide Field of View Based on Vector Aberration Theory* [D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [16] THOMPSON K. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(7): 1389.
- [17] THOMPSON K P. Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: the comatic aberrations[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(6): 1490.
- [18] THOMPSON K P. Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: spherical aberration[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(5): 1090-1100.
- [19] THOMPSON K P. Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: the astigmatic aberrations[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(5): 821.
- [20] MAHAJAN V N. Zernike Polynomials and Aberration Balancing[C]. *Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meeting. Proc SPIE 5173, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IV, San Diego, California, USA. 2003, 5173: 517302.*
- [21] FUERSCHBACH K, ROLLAND J P, THOMPSON K P. Theory of aberration fields for general optical systems with freeform surfaces[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26585.
- [22] YANG T, CHENG D W, WANG Y T. Aberration analysis for freeform surface terms overlay on general decentered and tilted optical surfaces[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7751.
- [23] BAUER A, SCHIESSER E M, ROLLAND J P. Starting geometry creation and design method for freeform optics [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1756.
- [24] 程强, 胡海翔, 李龙响, 等. 离轴光学系统的畸变分析及焦距测量[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(22): 2839-2846.
- CHENG Q, HU H X, LI L X, *et al.* Distortion analysis and focal length testing of off-axis optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(22): 2839-2846. (in Chinese)

作者简介:



于亚琼(1990—),女,甘肃民勤人,硕士研究生,2014年于湖南大学获得学士学位,主要从事自由曲面光学系统设计研究。E-mail: yaqiongyu@163.com

通讯作者:



王灵杰(1979—),男,江苏金坛人,研究员,硕士生导师,2002年于天津大学获得学士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事自由曲面光学系统设计、红外光学系统设计、空间光学载荷等方面研究。E-mail: wanglingjie@126.com