

引用格式: ZHOU Xin-ru, SONG Hua-tang, ZHU Run-hui, *et al.* Compact Off-axis Two-mirror Freeform Telescopic Optical System Design with Large Relative Aperture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10): 1022002

周欣茹, 宋华堂, 朱润徽, 等. 结构紧凑型大相对孔径离轴两反自由曲面望远光学系统设计[J]. 光子学报, 2020, 49(10): 1022002

结构紧凑型大相对孔径离轴两反自由曲面望远 光学系统设计

周欣茹, 宋华堂, 朱润徽, 宋真真, 曹兆楼, 郑改革, 叶井飞

(南京信息工程大学 物理与光电工程学院 光电工程系, 南京 210044)

摘 要: 为了克服现有大部分望远光学系统在机载或星载遥测系统等特殊应用中存在的局限性, 基于多优化自由度的光学自由曲面, 设计了一个兼容物理结构紧凑、大相对孔径与宽视场的离轴两反自由曲面望远光学系统. 该自由曲面望远光学系统具有 $1/3.75$ 大相对孔径, 焦距为 300 mm, 全视场角为 2.8° , 整体结构尺寸不超过 $100\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 300\text{ mm}$. 采用孔径离轴的方式, 提高系统的集光能量. 利用分视场拓展优化, 提升各个视场的成像性能. 结合 XY 多项式自由曲面的多优化自由度, 仅用前 4 阶项, 有效地平衡了系统的离轴像差. 在探测器空间截止频率 50 lp/mm 处, 系统的调制传递函数优于 0.4. 各个视场的像点半径均方根值均优于探测器单个像素 $10\text{ }\mu\text{m}$. 设计结果表明, 系统整体成像性能优良, 同时具有结构紧凑与小型化优势, 可用于机载或空间望远光学系统等特定应用的目标遥测中.

关键词: 光学设计; 望远光学系统; 离轴两反; 光学自由曲面; 大相对孔径; 结构紧凑

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204910.1022002

Compact Off-axis Two-mirror Freeform Telescopic Optical System Design with Large Relative Aperture

ZHOU Xin-ru, SONG Hua-tang, ZHU Run-hui, SONG Zhen-zhen, CAO Zhao-lou,
ZHENG Gai-ge, YE Jing-fei

(Department of Optoelectronic Engineering, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: For most telescopic optical systems nowadays, there are a few limitations in the special applications about the onboard or satellite-borne remote sensing systems. An off-axis two-mirror freeform telescopic optical system was designed based on the optical freeform surfaces with multiple optimization degrees of freedom. It has the advantages of compact physical configuration, large relative aperture and wide field of view. The freeform telescopic optical system has a $1/3.75$ relative aperture, 300 mm focal length, and 2.8° full field of view. Its physical size is smaller than $100\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 300\text{ mm}$. In its design, the system energy is enhanced by the aperture off-axis. The imaging quality in different fields are improved by splitting field expansion optimization. The system off-axis aberrations have been balanced effectively by the XY polynomial freeform surface with its first four order terms. At the spatial cutting-off frequency of 50 lp/mm of the detector, the modulation transfer function of the system is better than 0.4.

基金项目: 江苏省自然科学基金(No. BK20180787), 江苏省高等学校自然科学研究项目(No. 18KJB140007), 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(No. 202010300093Y)

第一作者: 周欣茹(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为先进光电系统设计. Email: 1481189231@qq.com

通讯作者: 叶井飞(1988—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为先进光电系统设计与光束调控技术. Email: yjfei1988@gmail.com

收稿日期: 2020-07-16; **录用日期:** 2020-08-12

<http://www.photon.ac.cn>

The root mean square of the imaging spot radius is lower than $10\ \mu\text{m}$ in different fields. The design results show that the designed off-axis two-mirror freeform telescopic optical system has good imaging performance entirely with the superiority of compactness and miniaturization, which can be applied in the specific applications of target remote sensing by the onboard or space telescopic optical systems.

Key words: Optical design; Telescopic optical system; Off-axis two-mirror; Optical freeform surfaces; Large relative aperture; Compact configuration

OCIS Codes: 220.1250; 220.4610; 110.6770; 080.4035; 080.4228; 080.2740

0 引言

望远光学系统在空间遥感与天文观测等诸多领域具有重要应用,当前主要有三种光学结构形式,分别是折射式、反射式与折反射式望远系统^[1-4].相比于折射式望远系统,反射式望远光学系统能够实现宽波段探测与宽光谱成像,并且可适应更为特殊或复杂的探测环境^[5-7].这是由于反射镜的镜坯材料具有热膨胀系数低、弹性模量大以及微观结构均匀等优良特性.因而,现今地基式的大口径或超大口径望远光学系统都采用全反射式的光学结构,其中两反结构的望远光学系统最为典型.从经典的共轴卡塞格林系统与格雷戈里系统,到后来它们的改进型,为增强望远光学系统的观测能力提供了更多的光路结构形式.

离轴反射式望远光学系统克服了共轴系统的中心遮拦问题,使得更多的能量进入光学系统,并且能够进一步提高系统的成像性能^[8-9].对于常规的两反光学系统,其优化自由度相对较少,像差的控制能力有限,在实现宽视场、大相对孔径和高性能的两反望远光学系统方面存在一定的局限性.随着现代光学制造与检测能力的提升,反射式望远光学系统的反射镜面型从二次非球面逐步过渡到高阶非球面,进一步发展到具有丰富优化自由度的光学自由曲面^[10],使得系统的像差平衡能力得到加强^[11-13].李旭阳等^[14]利用光学自由曲面设计了一个长焦距宽视场的三反射式空间相机,用于大宽幅推扫成像,相对孔径较小.刘强等^[6]基于高阶偶次非球面设计了一个大视场离轴三反望远系统,其镜面阶次达到6阶.XIE Y J等^[15]设计并制造了一个基于铝镜的两反自由曲面成像望远系统,采用了高达7阶的XY多项式自由曲面.提高光学自由曲面的阶次有助于校正系统的高阶离轴像差,但是也增加了自由曲面反射镜面的加工与检测难度.另一方面,现有大部分无中心遮拦离轴两反光学系统的 F 数在5到16之间^[16],相对较大,并且其有效视场角在 1° 左右,无法满足大相对孔径与宽视场离轴两反光学系统的发展需求.

为了实现结构紧凑、宽视场与大相对孔径相融合的高性能望远光学系统,本文采用孔径离轴的方式,结合多优化自由度的光学自由曲面,并运用分视场逐步拓展优化的方法,设计了一个无中心遮拦、离轴式的两反自由曲面望远光学系统.所用光学自由曲面面型为XY多项式自由曲面,且仅用了前4阶项.该两反自由曲面光学系统的 F 数为3.75,焦距为300 mm,全视场角为 2.8° .在全视场范围内,各个视场的像点半径均方根值均优于探测器单个像素大小 $10\ \mu\text{m}$;在截止空间频率50 lp/mm处,各个视场的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)值均优于0.4.

1 离轴两反自由曲面望远光学系统设计

1.1 系统设计要求

考虑到结构紧凑、小型化与轻量型的离轴两反望远光学系统,一方面要能够适应诸如舰载、机载或空间载荷等应用领域的特殊要求;另一方面要确保系统具有高性能的光学特性.该望远光学系统的光学设计要求如表1所示,系统 F 数为3.75,相对孔径大.根据其应用特点,该系统的空间物理尺寸约束在 $100\ \text{mm}(X)\times 200\ \text{mm}(Y)\times 300\ \text{mm}(Z)$ 范围内,以保证其结构紧凑与小型化.

表1 离轴两反自由曲面望远光学系统的设计参数
 Table 1 Design parameters of off-axis two-mirror freeform telescopic optical system

Parameters	Value
Working wavelength/nm	486~656
Relative aperture	1/3.75
Entrance pupil diameter/mm	80
Effective focal length/mm	300
Field of view/(°)	2°(H)×2°(V)
Root Mean Square (RMS) radius of spot diagram/ μm	< 10
MTF at 50 lp/mm	> 0.4
Pixel size of detector/ μm	10
Physical size of system(X-Y-Z)/mm ³	< 100×200×300
Optical configuration	Off-axis two-mirror without obstruction

1.2 设计思路分析

为了实现无中心遮拦的两反望远光学系统,通常采用的离轴方式有孔径离轴、光瞳离轴、视场离轴,或者这三种离轴方式的组合形式.相比于其它几种离轴方式,孔径离轴的方式较为简单.以系统孔径光阑位置作为参考,通过有效控制反射镜的偏心量与倾斜量,实现系统无中心遮拦,提高能量利用率.

为了降低望远光学系统的物理结构尺寸,采用折转光路的形式,使得光线在同一空间内进行折转反射,从而压缩系统的物理空间尺寸.离轴两反望远光学系统的光路结构如图1所示,光线经过观察镜反射折转,被会聚镜成像到探测像面上.

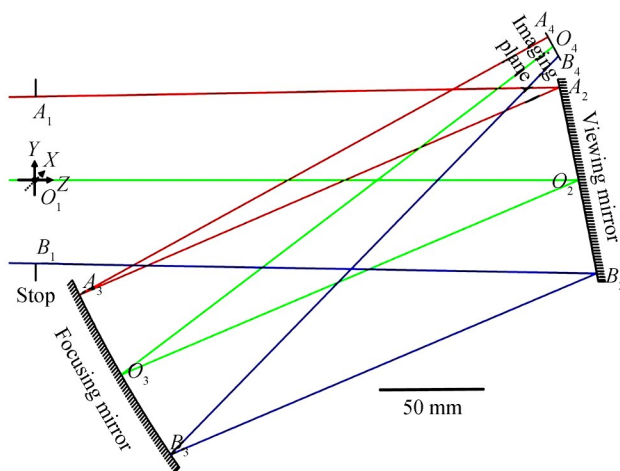


图1 离轴两反望远光学系统结构示意图
 Fig.1 Optical configuration of off-axis two-mirror telescopic optical system

该离轴两反望远光学系统中含有两个反射镜,具有一定的偏心量与倾斜量,这会引入额外的高阶像差.如果仅采用常规的球面型反射镜或二次曲面型反射镜,其优化自由度较少,难以平衡离轴系统带来的高阶像差.为了有效地校正该系统的像差,两个反射镜的面型采用XY多项式自由曲面,其丰富的优化自由度对系统成像质量的提升带来较大的优势.

另一方面,该两反望远光学系统的结构较为简单,因而初始结构的获取相对容易.根据一阶光学的基本原理,可以获得两个反射镜的初始曲率半径,并利用理想反射镜在光学设计软件中初步构建该离轴两反系统.控制镜面的边界条件,避免光线被遮挡.在后续优化过程中,将两个反射镜的面型转换为XY多项式自由曲面,并设置相应的优化变量.由于整个离轴两反系统关于YOZ平面对称,因而仅考虑X正方向的优化,并在X方向上采用分视场拓展优化的方式,从而保证系统各个视场的成像质量满足设计要求.

1.3 结构约束条件

为了避免光线被反射镜与像面遮挡,以及光阑、反射镜与像面之间的干涉,各个光学面的离轴量与倾斜量优化是关键.因而,需要利用光学设计软件的用户自定义函数,构建该系统的光线边界约束条件,有效地控制系统光学面的离轴量与倾斜量大小.另一方面,为了控制整个系统的物理结构尺寸不超过 100 mm (X)×200 mm (Y)×300 mm (Z),同样需要建立物理结构约束条件.

在本系统中对三条特征光线进行分析,分别是主光线 $O_1O_2O_3O_4$ 、上边缘光线 $A_1A_2A_3A_4$ 与下边缘光线 $B_1B_2B_3B_4$,各条特征光线与各个光学面的交点如图 1 所示.相应的光路结构与物理结构约束条件如式(1)~(4)所示,式中 Y 与 Z 是各点相对于光阑中心的坐标值.式(1)限制了光阑与会聚镜的位置关系,并留有一定的尺寸余量用于系统机械结构设计.式(2)约束了像面与观察镜在 Y 方向的位置关系,并且保证在 Z 方向上的位置近似一致,这样可以减少杂散光的影响.式(3)可以避免下边缘光线被会聚镜遮挡.式(4)限制了整个离轴反射式望远光学系统的物理结构尺寸,在保证大相对孔径和高成像质量的基础上,实现结构紧凑与小型化的设计目标.

$$\begin{cases} Y_{B_1} - Y_{A_3} \geq 15 \\ Z_{A_3} - Z_{B_1} \geq 15 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Y_{B_4} - Y_{A_2} \geq 15 \\ Z_{A_2} - Z_{B_4} > 0 \\ Z_{A_2} - Z_{B_4} \leq 2 \end{cases} \quad (2)$$

$$Y_{B_2} - Y_{A_3} \geq 2 \quad (3)$$

$$\begin{cases} Y_{A_4} - Y_{B_3} \leq 200 \\ Z_{B_2} - Z_{O_1} \leq 300 \end{cases} \quad (4)$$

1.4 XY多项式光学自由曲面

在本系统中,观察镜和会聚镜的偏心与离轴所引起的高阶像差是优化设计过程中需要重点关注的.常规的球面光学面仅有一个优化自由度,即曲率半径;二次曲面也仅含有两个优化自由度,分别为曲率半径和二次圆锥系数.此类常规光学面的有限个优化自由度,难以实现高成像质量离轴光学系统的像差平衡,需要扩展光学面的优化自由度.光学自由曲面具有丰富的优化自由度,能够有效校正离轴彗差与像散,有助于提高离轴光学系统的成像质量,在现代反射式离轴光学系统设计中得到了广泛应用.在本设计中,观察镜和会聚镜均采用XY多项式自由曲面,如式(5)所示^[10],与超精密单点金刚石车床的内建自由曲面面型保持一致,有助于快速形成加工路径.在优化设计过程中,XY多项式自由曲面的多项式阶次通常不超过8阶项.如果其阶次过高,会导致光学自由曲面的加工与检测难度增加,难以获得高质量的自由曲面.一般情况下,限定自由曲面各个多项式的系数值在 10^{-10} 量级以内.

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{j=2}^J a_j x^m y^n \quad j = \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2} + 1 \quad (5)$$

式中, c 为顶点曲率半径; k 为圆锥常数; a_j 为 $x^m y^n$ 项的系数; m 和 n 为非负整数,且 $m+n \geq 1$; J 为 $x^m y^n$ 的总项数.

1.5 分视场拓展优化

由于整个离轴两反望远光学系统关于 YOZ 平面对称,因而在优化过程中仅考虑 X 轴正方向的半边视场.从视场角 $X=0^\circ$ 出发,沿着 X 轴正方向进行分视场逐步拓展优化, Y 方向包含了全部视场,如图 2 所示.在分视场拓展优化过程中^[17],对 X 轴正方向的不同视场设置不同的优化权重,中心视场的权重较大,边缘视场的权重相对较小;并且逐步增加XY多项式自由曲面的项数,从而实现该大相对孔径离轴两反望远光学系统的像差平衡.在不同视场的优化权重设置中,优化权重大小与视场位置近似成反比关系.如,中心视场权重为 10,边缘视场权重为 1;那么 0.3 视场对应的权重近似为 7,0.7 视场对应的权重近似为 3.在实际优化过程中,需要分析局部视场的成像效果与全局系统的成像性能,对各个视场的优化权重作合理调整,以满足系统整体性能要求.

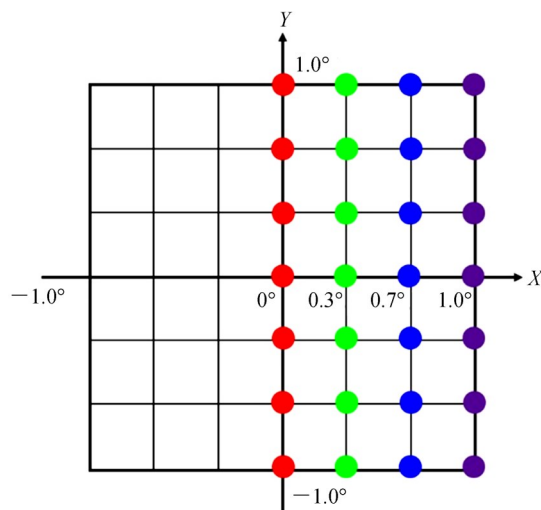


图2 分视场拓展优化示意图

Fig.2 Diagram of a split field with expansion optimization strategy

2 系统设计结果与像质评价

针对该望远光学系统的设计参数要求,并根据设计分析,基于XY多项式光学自由曲面的大相对孔径离轴两反望远光学系统设计结果如图3所示.系统光阑直径为80 mm,焦距为300 mm,相对孔径为1/3.75,满足光学参数要求.观察镜和会聚镜的口径尺寸(X方向)约为90 mm;从像面上边缘到会聚镜下边缘的纵向尺寸(Y方向)约为200 mm;从光阑到观察镜下边缘的横向尺寸(Z方向)约为280 mm;满足该系统的物理结构尺寸要求,整体结构紧凑.利用用户自定义函数对各个光学面(光阑面、观察镜面、会聚镜面与像面)的位置进行了有效约束,也为系统机械结构设计保留了相应的尺寸空间.

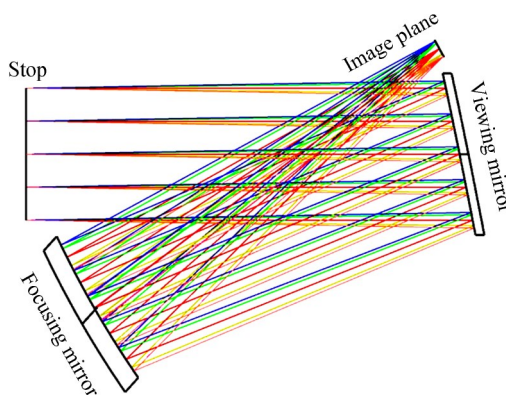


图3 大相对孔径离轴两反自由曲面望远光学系统的设计结果

Fig.3 Design result of off-axis two-mirror freeform telescopic optical system with large relative aperture

在本系统中,观察镜仅含有沿着Y轴负方向的离轴量,无倾斜量,其离轴量大小为90 mm;会聚镜既有离轴量又有倾斜量,沿着Y轴负方向的离轴量大小为280 mm,绕X轴逆时针方向的倾斜量大小为48°.观察镜和会聚镜的孔径离轴与偏心,使得整个系统无中心遮拦,并且结构紧凑.采用XY多项式自由曲面平衡离轴像差,使得系统的成像质量达到设计要求.

进一步分析该系统的成像质量.系统所匹配的探测器像元尺寸为10 μm ,相应的空间频率为50 lp/mm.因而在本设计中考察了空间频率为50 lp/mm的MTF值.如图4所示,在全视场范围内的MTF值均大于0.4.中心视场附近(60%视场)在截止空间频率处的MTF值均优于0.6.各个视场的点列图如图5所示,其像点半径均方根(Root Mean Square, RMS)值均小于10 μm ,并且像点中心的集中度高.图5中像点半径RMS最大值位于边缘视场角(1°, 1°)与(-1°, -1°)处,约为5.5 μm ,小于探测器的单个像元尺寸.另外,系统的最

大畸变值不超过1%,具有很好的成像保真度.整体上该系统具有很好的成像质量.

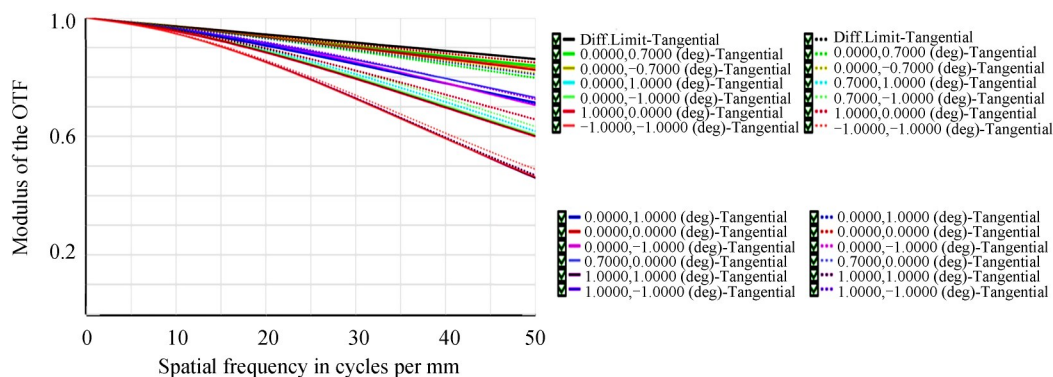


图4 大相对孔径离轴两反自由曲面望远光学系统的MTF曲线
Fig.4 MTF curves of off-axis two-mirror freeform telescopic optical system with large relative aperture

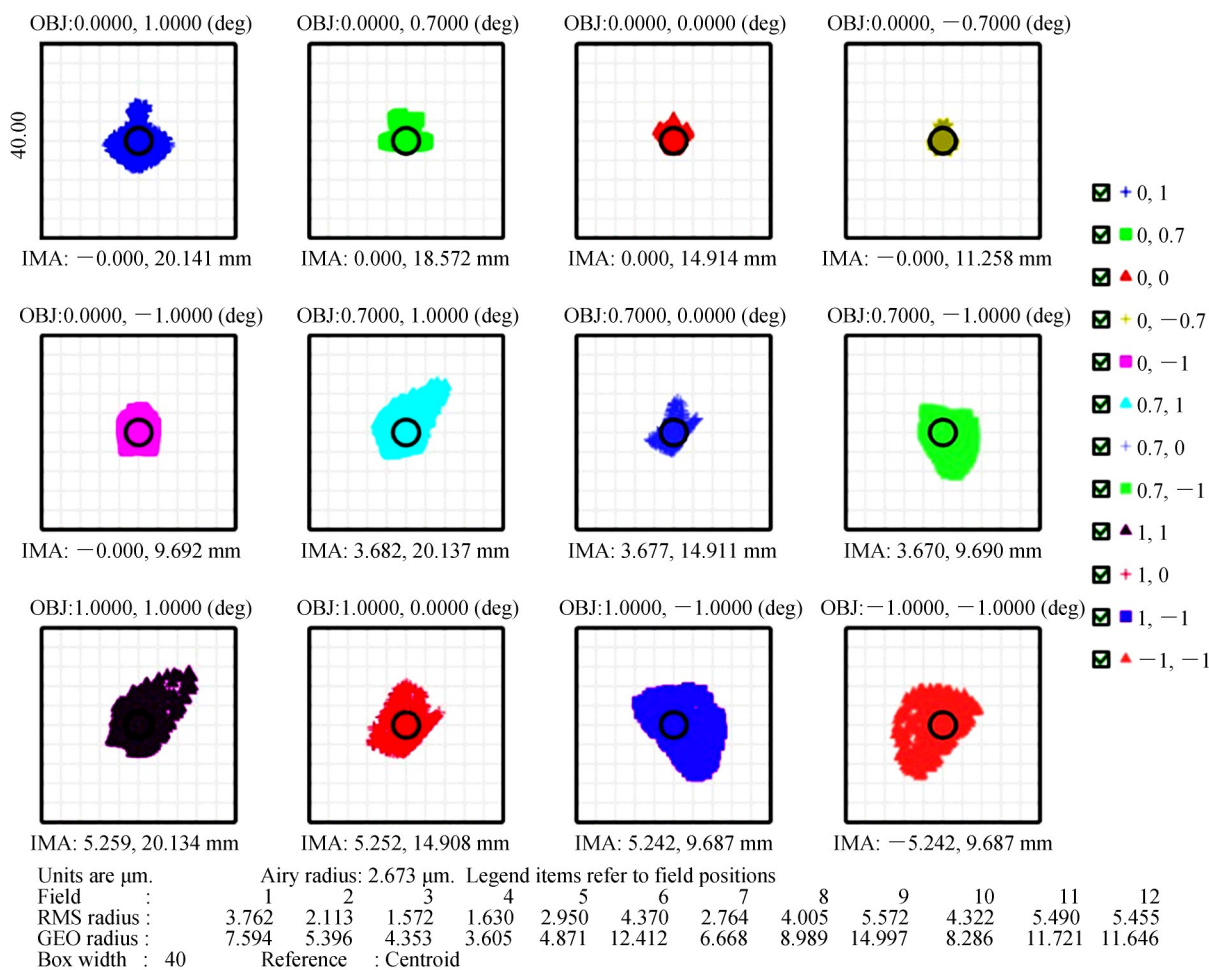


图5 大相对孔径离轴两反自由曲面望远光学系统的点列图
Fig.5 Spot diagrams of off-axis two-mirror freeform telescopic optical system with large relative aperture

3 自由曲面优化及其波前特征分析

如图3所示,该大相对孔径离轴两反望远光学系统关于YOZ平面对称,具有面对称性结构.为了平衡系统的离轴像差,采用式(5)所示的XY多项式自由曲面,具有丰富的优化自由度.相比传统的球面或二次曲面,XY多项式自由曲面所包含的 $x^m y^n$ 项能够校正高阶像差,有助于提高离轴系统的成像质量.在本系统的优化设计过程中,用分视场逐步拓展的视场优化方式,即沿着X轴方向进行扩展,如图2所示.因此,在视场

进行扩展优化时,增加 $x^m y^n$ 项数或其阶次,能够保证轴外视场具有相应的优化自由度.需要注意的是,由于该系统具有面对称性,在自由曲面 $x^m y^n$ 项中关于 x 的奇次项系数设置为0.经过分视场拓展与自由曲面多项式项数增加优化后,该系统的观察镜与会聚镜仅用了 XY 多项式自由曲面的前4阶项,既保证了系统的设计性能要求,又确保了超精密单点金刚石加工的可行性.观察镜与会聚镜所用自由曲面 $x^m y^n$ 项的系数如表2所示.

表2 观察镜与会聚镜自由曲面 $x^m y^n$ 项的系数Table 2 Coefficients of freeform surface terms $x^m y^n$ of viewing and focusing mirrors

$x^m y^n$ terms	Viewing mirror	Focusing mirror
x	0	0
y	-0.190	-0.159
x^2	-4.718×10^{-4}	-3.058×10^{-8}
xy	0	0
y^2	-3.554×10^{-4}	1.294×10^{-4}
x^3	0	0
$x^2 y$	-6.939×10^{-7}	-6.577×10^{-7}
xy^2	0	0
y^3	-8.206×10^{-7}	-2.772×10^{-7}
x^4	1.257×10^{-9}	7.395×10^{-10}
$x^3 y$	0	0
$x^2 y^2$	2.478×10^{-9}	-1.562×10^{-10}
xy^3	0	0
y^4	1.556×10^{-9}	-7.114×10^{-10}

进一步,针对三个视场($0^\circ, 0^\circ$)、($1^\circ, 1^\circ$)与($-1^\circ, -1^\circ$)对应的自由曲面波前,分析自由曲面观察镜与会聚镜的波前特征,如图6所示.以中心波长587 nm为例,整体上无论是观察镜还是会聚镜,各自的自由曲面波前在不同视场处的偏差较小,但是该细微的偏差能够用于平衡各自视场的离轴像差.沿着 Z 轴负方向看去,观察镜呈现凸面状态;会聚镜呈现凹面状态.对于观察镜,最大的自由曲面波前峰谷值在视场角($1^\circ, 1^\circ$)处,

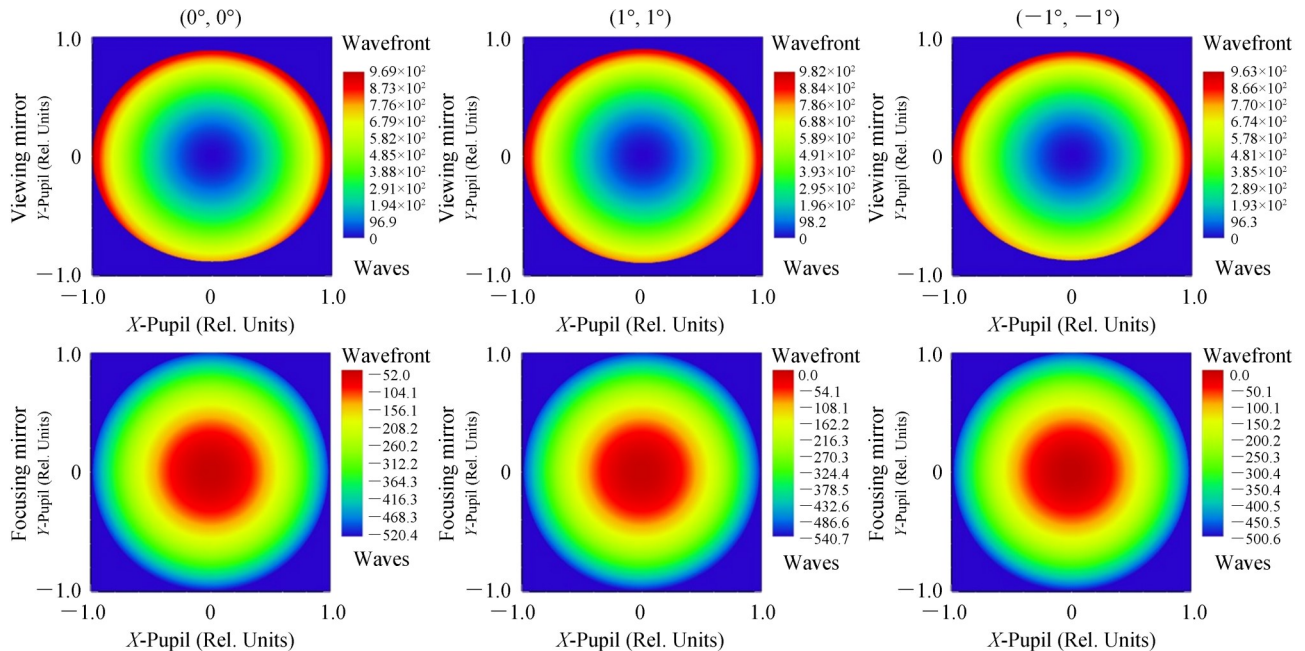


图6 观察镜与会聚镜在三个不同视场的自由曲面波前特征

Fig.6 Freeform wavefronts of viewing mirror and focusing mirror in three different fields

约为 $577\ \mu\text{m}$; 对于会聚镜, 最大的自由曲面波前峰谷值也在视场角 ($1^\circ, 1^\circ$) 处, 约为 $317\ \mu\text{m}$; 二者与各自最佳拟合球面的偏差量相对较大, 但是利用超精密单点金刚石车床能够实现大偏差量的自由曲面加工。

4 结论

本文基于 XY 多项式自由曲面设计了一个大相对孔径宽视场的离轴两反自由曲面望远光学系统, 其相对孔径为 $1/3.75$, 全视场角为 2.8° , 克服了现有大部分离轴两反望远光学系统小相对孔径与小视场的不足。与此同时, 系统的整体物理结构尺寸不超过 $100\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$, 具有结构紧凑、宽视场与大相对孔径相兼容的优势。在全视场范围内, 各个视场在 $50\ \text{lp/mm}$ 的空间截止频率处的 MTF 值大于 0.4 , 像点半径 RMS 值均小于 $10\ \mu\text{m}$, 最大畸变值不超过 1% , 系统整体成像性能优良。将孔径离轴、分视场拓展优化与 XY 多项式自由曲面反射镜融入到系统优化设计中, 既能够提升该离轴反射式自由曲面望远光学系统的成像性能, 又降低了系统的物理结构尺寸, 在机载或空间目标探测与遥感等特殊领域中具有很好的应用前景。后续将进一步研究该系统自由曲面观察镜与会聚镜的单点金刚石刀具加工路径与面形检测等关键技术。

参考文献

- [1] HUI Bin, LI Jing-zhen, PEI Yun-tian, *et al.* Integrated analysis of optics and mechanics in larger aperture catadioptric optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1117-1120.
惠彬, 李景镇, 裴云天, 等. 大口径折反射式光学系统的光机结构分析[J]. 光子学报, 2006, **35**(7): 1117-1120.
- [2] XUE Qing-sheng. Design and study of limb sounder of atmospheric trace gas for spaceborne remote sensing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 271-277.
薛庆生. 空间遥感大气痕量气体临边探测仪设计与研究[J]. 光子学报, 2013, **42**(3): 271-277.
- [3] MA Zi-xuan, LI Xu-yang, REN Zhi-guang, *et al.* Optical detection system with large relative aperture and large field of view based on freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(17): 1722002.
马子轩, 李旭阳, 任志广, 等. 基于自由曲面的大相对孔径大视场光学探测系统[J]. 光学学报, 2020, **40**(17): 1722002.
- [4] WANG Chao, SHI Hao-dong, LI Ying-chao, *et al.* Design of super-resolution telescopic imaging optical system with relative large field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(13): 1322002.
王超, 史浩东, 李英超, 等. 较大视场超分辨望远成像光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, **40**(13): 1322002.
- [5] WEI Lei, ZHANG Lei, XIE Peng, *et al.* Optimization design and test for the front frame of a large off-axis TMA space camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(5): 0522001.
魏磊, 张雷, 解鹏, 等. 大型离轴三反空间相机前框架优化设计与试验[J]. 光子学报, 2017, **46**(5): 0522001.
- [6] LIU Qiang, WANG Xin, HUANG Geng-hua, *et al.* Optical design of wide field view and large relative aperture off-axis three-mirror reflective system with tilted optical axis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(3): 0322002.
刘强, 王欣, 黄庚华, 等. 大视场大相对孔径斜轴离轴三反望远镜的光学设计[J]. 光子学报, 2019, **48**(3): 0322002.
- [7] BEIER M, HARTUNG J, PESCHEL T, *et al.* Development, fabrication, and testing of an anamorphic imaging snapshot freeform telescope[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(12): 3530-3542.
- [8] SHI Guang-wei, ZHANG Xin, ZHANG Jian-ping. Unobscured catadioptric infrared optical systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(8): 1995-2000.
史广维, 张新, 张建萍. 无遮拦折反射红外光学系统[J]. 光学精密工程, 2014, **22**(8): 1995-2000.
- [9] ZHU Hao, CUI Qing-feng, PU Ming-xu, *et al.* Design of circular unobscured three-mirror optical systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1022004.
朱浩, 崔庆丰, 朴明旭, 等. 圆周式无遮拦三反射镜光学系统设计[J]. 光子学报, 2014, **43**(10): 1022004.
- [10] YE J F, CHEN L, LI X H, *et al.* Review of optical freeform surface representation technique and its application [J]. *Optical Engineering*, 2017, **56**(11): 110901.
- [11] SHEN Z X, YU J, SONG Z Z, *et al.* Customized design and efficient fabrication of two freeform aluminum mirrors by single point diamond turning technique[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(9): 2269-2276.
- [12] CAO Chao, LIAO Sheng, LIAO Zhi-yuan, *et al.* Design of off-axis reflective optical system with large field-of-view based on freeform surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(8): 0808001.
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.
- [13] LI Jun-yang, LI Wen-qiang, LONG You, *et al.* Design of off-axis three-mirror optical system based on free-form surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, **57**(9): 092202.
李俊阳, 李文强, 龙尤, 等. 基于自由曲面的离轴三反光学系统设计方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, **57**(9): 092202.
- [14] LI Xu-yang, NI Dong-wei, YANG Ming-yang, *et al.* Design of large field of view space camera optical system based on freeform surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0922003.

- 李旭阳,倪栋伟,杨明洋,等. 基于自由曲面的大视场空间相机光学系统设计[J]. 光子学报, 2018, **47**(9): 0922003.
- [15] XIE Y J, MAO X L, LI J P, *et al.* Optical design and fabrication of an all-aluminum unobscured two-mirror freeform imaging telescope[J]. *Applied Optics*, 2020, **59**(3): 833-840.
- [16] HORTON R F, PECK T, COLGATE A. All reflective 2 mirror unobscured wide field telescope/collimator designs[C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2010, 7733: 77332U.
- [17] YE J F, YU J, SONG Z Z, *et al.* Design of a compact off-axis two-mirror freeform infrared imager with a wide field of view[J]. *Journal of Modern Optics*, 2019, **66**(3): 304-311.