

doi:10.3788/gzxb20184709.0922003

基于自由曲面的大视场空间相机光学系统设计

李旭阳¹,倪栋伟^{1,2},杨明洋^{1,2},任志广³

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 空间光学应用研究室,西安 710119)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

(3 陕西师范大学 物理学与信息技术学院,西安 710119)

摘 要:运用自由曲面设计一款大视场离轴三反光学系统,该系统焦距为 2 000 mm, F 数为 12,视场角为 $35^\circ \times 1^\circ$,主镜和三镜采用 XY 多项式自由曲面设计,且主镜设计为凸面,使子午视场达到 35° ,进一步拓宽了成像视场.基于优化后的 XY 多项式系数,利用 Matlab 软件仿真出主镜和三镜的 XY 自由曲面面型.设计结果表明,全视场内该系统的光学传递函数在 63 lp/mm 处优于 0.4,弥散斑直径小于一个像元尺寸,最大相对畸变小于 3%,波像差均优于 $\lambda/14$,系统能量集中度高,成像质量接近衍射极限.可见自由曲面在提升离轴反射式光学系统的成像视场和成像质量方面具有很大优势,该系统克服了传统离轴反射式光学系统子午方向视场角小的缺点,适合大幅宽推扫成像.

关键词:光学设计;大视场;自由曲面;XY 多项式;离轴三反

中图分类号:O439; TH703

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)09-0922003-9

Design of Large Field of View Space Camera Optical System Based on Freeform Surfaces

LI Xu-yang¹, NI Dong-wei^{1,2}, YANG Ming-yang^{1,2}, REN Zhi-guang³

(1 Space Optics Lab, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Freeform surface is applied to design a large field of view off-axis three-mirror optical system. The focal length of the system is 2 000 mm, the F -number is 12, and the field angle is $35^\circ \times 1^\circ$. In the system, XY polynomial freeform surfaces are applied as the primary mirror and the tertiary mirror surfaces, and the primary mirror is designed as a convex surface, so that the meridional field of view reaches 35° , further widening the imaging field of view. Based on the optimized XY polynomial coefficients, Matlab software is used to simulate the XY freeform surfaces of the primary mirror and the tertiary mirrors. The design results show that the optical transfer function of the system in the full field of view is better than 0.4 at 63 lp/mm, the diameter of the diffusion spot is less than one pixel size, the maximum relative distortion is less than 3%, and the wavefront error value is better than $\lambda/14$. The system has high energy concentration and the imaging quality is close to the diffraction limit. It can be seen that the freeform surface has great advantages in improving the imaging field of view and imaging quality of the off-axis reflection optical system. The system overcomes the shortcoming of the small field of view in the radial direction of the conventional off-axis reflective optical system, and it is suitable for wide swath imaging.

Key words: Optical design; Large field of view; Freeform surface; XY polynomial; Off-axis three-mirror

OCIS Codes: 220.4830; 080.4035; 120.4820; 350.6090

基金项目:国家自然科学基金(No.61427811)资助

第一作者:李旭阳(1981-),男,副研究员,博士,主要研究方向为空间相机总体设计、光学设计及光学检测. Email:lixuyang2004@126.com

收稿日期:2018-06-04;录用日期:2018-06-19

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

0 引言

随着空间遥感光学领域的不断发展,高分辨率、大视场光学系统已成为空间光学领域的重要研究内容.反射式光学系统因不产生色差,有良好的抗热特性,可实现长焦距、大孔径,被广泛地应用到空间光学领域^[1-2].离轴三反光学系统因无中心遮拦,可以做到较大视场,已逐渐取代传统的同轴三反光学系统.印度的遥感卫星 Cartosat-1 号搭载的测绘相机,美国“中段空间试验”卫星 MSX 上搭载的天基可见光相机 SBV,日本对地测绘型 ALOS-PRISM 卫星搭载的测绘相机等均采用离轴三反式光学系统^[3-5].

现代空间光学系统需要拥有更大的视场角和成像幅宽,而采用简单面型的离轴反射式光学系统已很难实现.为了满足空间遥感光学领域发展需求,必须增大光学系统的成像视场角,同时还要保证光学系统的成像质量,因此增加设计自由度成为解决大视场离轴反射式光学系统的关键.近年来,随着计算机技术及光学元件制造技术的不断提升,具有更高设计自由度的自由曲面成为研究的热点,被越来越多地应用到空间遥感光学系统中^[6].

国外知名研究机构对自由曲面在空间光学系统中的研究做了大量工作:HUBBLE 望远镜在其修复光学系统中采用了一块自由曲面反射镜;国际著名光学系统制造商 Leica 公司为欧空局研制的新型离轴三反相机也采用了自由曲面^[7].国内相关科研机构在自由曲面设计方面也开展了很多工作:清华大学与天津大学合作研制了一款自由曲面离轴三反红外成像系统,该系统的焦距为 138 mm,视场角为 $4^\circ \times 5^\circ$,工作中波和长波红外波段^[8];中国科学院长春光机所成功研制了一款长焦距大视场离轴三反空间光学系统,系统焦距为 4 500 mm,成像视场角为 11° ^[9].

为实现大视场成像,本文设计了基于 XY 自由曲面的大视场离轴三反空间光学系统,该系统的主镜和三镜均采用 XY 多项式自由曲面,次镜为二次曲面,设计实现了 $35^\circ \times 1^\circ$ 的大视场,有利于大幅宽推扫成像.

1 光学系统结构的选择设计

1.1 初始结构选择

空间遥感光学系统一般采用全反射式结构,由于两镜系统优化变量少,成像质量不能满足要求,四镜以上的多镜系统结构复杂,因此主要采用三镜系统^[10].三镜系统包含离轴三反和同轴三反两类,离轴三反通常又包括有中间像面的 Rug 型和无中间像面的 Cook 型两种形式.同轴三反和两种形式的离轴三反结构如图 1 所示.

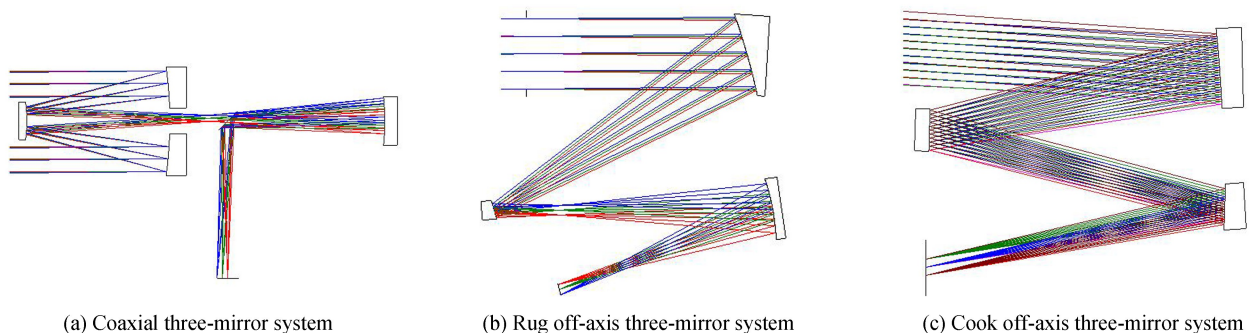


图 1 三反射镜光学系统主要结构分类

Fig.1 The main structural classification of the three-mirror optical system

同轴三反光学系统因存在中心遮拦,进入光学系统的能量降低,导致系统分辨率有所降低.Rug 型离轴三反光学系统因为系统会先成一次像,轴外点成像质量不会很好,而用三镜对其补偿也很困难,其视场不会做到很大.而 Cook 型离轴三反光学系统接近对称分布,系统成像质量优于有中间像面的离轴三反,可以做到较大视场,适用于对目标进行推扫成像.因此为实现大视场成像,本文将基于 Cook 型离轴三反光学系统进行设计.

1.2 初始结构设计方法

离轴三反光学系统是在同轴三反光学系统初始结构基础上通过光阑离轴、视场离轴或镜面倾斜后进一步优化得到的.同轴三反光学系统初始结构如图 2 所示.

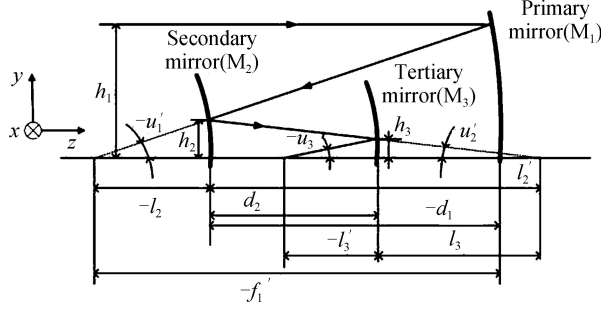


图 2 同轴三反初始结构

Fig.2 Initial configuration of coaxial three-mirror

φ 为系统的光焦度, c_1 、 c_2 和 c_3 分别是主镜、次镜和三镜的曲率, d_1 、 d_2 分别为主镜和次镜、次镜与三镜间的距离, l'_3 为后截距.由近轴光学理论可得^[11-12]

$$u'_1 = 2c_1 h_1 \quad (1)$$

$$u'_2 = h_2 / l'_2 \quad (2)$$

$$h_2 / h_1 = l_2 / f'_1 \quad (3)$$

由次镜成像公式得

$$\frac{1}{l'_2} + \frac{1}{l_2} = \frac{2}{r_2} \quad (4)$$

间距满足

$$l_2 = f'_1 - d_1 \quad (5)$$

$$u'_2 = -2h_1(c_1 - c_2 + 2d_1c_1c_2) \quad (6)$$

$$h_2 = h_1(1 - 2d_1c_1) \quad (7)$$

此外

$$u'_3 = (h_2 - u'_2d_2) / l'_3 \quad (8)$$

$$1/f' = \varphi = u'_3/h_1 \quad (9)$$

因此,可得

$$l'_3\varphi = 1 - 2d_1c_1 - 2d_2c_2 + 2d_2c_1 + 4d_1d_2c_1c_2 \quad (10)$$

对于三镜,有

$$u'_3l'_3 = u'_2l_3 \quad (11)$$

$$l'_3 = l_3(2l'_3/r_3 - 1) \quad (12)$$

此外

$$u'_3 = 2c_3l'_3u'_3 - u'_2 \quad (13)$$

将式(6)、(9)带入式(13)整理得

$$\varphi = 2c_3l'_3\varphi + 2c_1 - 2c_2 + 4d_1c_1c_2 \quad (14)$$

场曲 $S_{IV} = 0$,由初级像差理论知

$$S_{IV} = c_1 - c_2 + c_3 = 0 \quad (15)$$

从式(10)、(14)和(15)可以看出,主镜、次镜和三镜的半径由系统光焦度 φ 和镜间距离决定.一般而言,传统面型的离轴三反式结构很难实现较大视场,系统视场角一般不超过 10° ,为进一步拓宽系统的视场,将具有更多设计自由度的自由曲面运用到主镜和三镜的设计中.同时选择合适的镜间距离,使主镜设计为凸面,进一步拓宽成像视场.

1.3 自由曲面的描述应用

自由曲面具有非旋转对称特性,没有统一的光轴,通常不能用球面或者非球面系数来描述.与传统的球

面和非球面相比,自由曲面具有可提供更多的优化自由度、简化系统结构、校正离轴非对称像差、提高系统成像质量等优点,被越来越多地应用到成像和非成像光学系统设计中。

自由曲面的描述方法通常可以分为两类:一类是利用离散点拟合来描述自由曲面,被称为参数化描述方法;另一类是利用多项式组合来描述自由曲面,被称为多项式描述方法^[13]。参数化描述方法是通过离散点拟合表征较为复杂,无法用常规多项式描述的自由曲面,这类曲面包括贝塞尔曲面、B样条曲面及非均匀有理B样条(Non-Uniform Rational B-Splines, NURBS)曲面。参数化描述方法表征的曲面可以是任意形状的,但它在构建面形、加工检测等方面还存在很多问题,并且其精度不高,相比成像领域高精度的面形要求来说,精度还需提高。而多项式描述方法具有较高的表示精度,用它描述的自由曲面面型是连续光滑的,而且便于加工和检验。

在成像领域的设计优化中,多使用多项式描述方法,其中XY多项式曲面和Zernike多项式曲面是最常用两种的自由曲面面型^[14]。用多项式描述自由曲面面型,通常具有以下形式^[15]

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^N A_j P_j(\rho, \varphi) \quad (16)$$

式中, $\frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}$ 为圆锥曲面方程, c 为曲面顶点处的曲率, k 为圆锥曲面系数; $\sum_{j=1}^N A_j P_j(\rho, \varphi)$ 是用多项式描述的曲面部分, N 为多项式项数, A_j 为第 j 项多项式的系数, P_j 为所使用的多项式。

XY多项式是以二次曲面为基底,叠加泰勒多项式形成的,其表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=2}^N C_j x^m y^n \quad (17)$$

其中

$$j = \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2} + 1 \quad (18)$$

式中, C_j 为第 j 项多项式系数,上标 m 和 n 为非负整数,分别代表 x 和 y 的阶数,在光学设计软件中,对XY多项式阶数有一定限制,通常是取10阶以内的多项式表征自由曲面,即 $m+n \leq 10$ ^[16]。

XY多项式自由度高,适合校正非对称像差,并且与数控光学加工的表达形式一致,最适合确定式加工。结合像差校正能力及与实际加工的联系程度,选用XY多项式表征的自由曲面进行光学系统设计。

2 含自由曲面的光学系统设计

系统的光焦度 $\varphi = 1/2\ 000\ \text{mm}^{-1}$, 利用求解初始结构的方法,合理选择各反射镜间的距离,使主镜设计为凸面,各反射镜间距的选择及由此求出的各镜半径如表1所示。

表1 光学系统初始结构参数

Surface	Radius/mm	Thickness/mm
Primary mirror	4 936.077 8	-1 150
Secondary mirror	2 579.846 2	1 150
Tertiary mirror	-5 404.529 0	-1 250

系统的初始结构为同轴三反光学系统,如图3(a)。以此为设计起点,将光阑置于次镜上并将次镜设置为二次曲面,再将视场偏置添加 -5° 的离轴角后,通过元件偏心和倾斜得到离轴三反系统初始结构,如图3(b)。

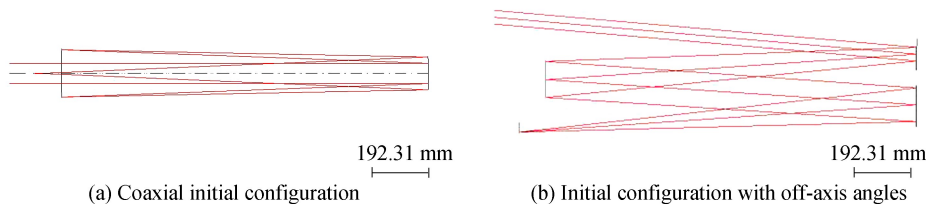


图3 系统的初始结构

Fig.3 Initial configuration of the system

为了进一步拓宽成像视场,再将 XY 自由曲面运用到主镜和三镜的面型设计中.

将离轴三反光学系统和 XY 自由曲面相结合进行优化,控制好主镜和三镜的 XY 多项式系数,再逐渐增加采样视场,防止自由曲面发生局部突变,同时优化过程中严格控制系统的畸变,最终设计得到了系统焦距为 2 000 mm,相对孔径为 1 : 12,视场角为 $35^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的大视场成像光学系统.系统光路如图 4 所示.

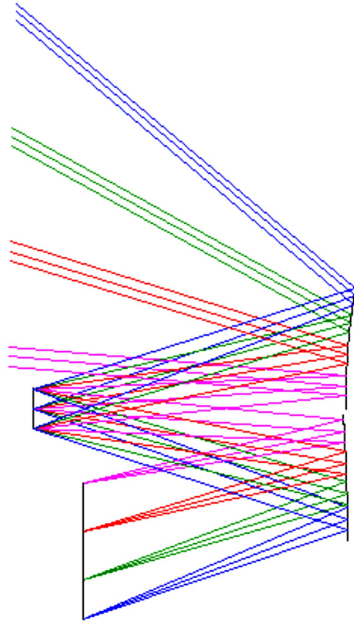


图 4 光学系统结构

Fig.4 Layout of optical system

优化后的主镜和三镜 XY 自由曲面系数见表 2、表 3.

表 2 主镜的 XY 自由曲面系数

Table 2 XY coefficients of primary mirror

Item	Coefficient	Item	Coefficient
Y	0.271 909 056 324 392	Y^3	$4.166\ 323\ 203\ 240\ 54 \times 10^{-8}$
X^2	$6.476\ 650\ 029\ 468\ 38 \times 10^{-5}$	X^4	$1.462\ 830\ 993\ 045\ 53 \times 10^{-11}$
XY	$1.990\ 730\ 800\ 686\ 04 \times 10^{-8}$	X^3Y	$-3.562\ 522\ 198\ 386\ 97 \times 10^{-14}$
Y^2	$7.668\ 892\ 109\ 447\ 69 \times 10^{-5}$	X^2Y^2	$3.523\ 239\ 346\ 284\ 45 \times 10^{-11}$
X^3	$3.263\ 488\ 896\ 901\ 39 \times 10^{-11}$	XY^3	$-2.221\ 276\ 199\ 604\ 82 \times 10^{-13}$
X^2Y	$3.938\ 784\ 488\ 795\ 21 \times 10^{-8}$	Y^4	$2.675\ 846\ 242\ 938\ 11 \times 10^{-11}$
XY^2	$-2.513\ 830\ 752\ 903\ 83 \times 10^{-10}$	X^5	$-8.362\ 691\ 394\ 541\ 03 \times 10^{-15}$

表 3 三镜的 XY 自由曲面系数

Table 3 XY coefficients of tertiary mirror

Item	Coefficient	Item	Coefficient
Y	-0.009 957 904 889 505 01	X^4Y	$-4.878\ 360\ 137\ 250\ 71 \times 10^{-15}$
X^2	$2.169\ 553\ 213\ 513\ 76 \times 10^{-5}$	X^2Y^3	$-1.419\ 613\ 617\ 771\ 87 \times 10^{-14}$
Y_2	$3.102\ 735\ 972\ 212\ 73 \times 10^{-5}$	Y^5	$-4.777\ 288\ 410\ 869\ 99 \times 10^{-16}$
X^3Y	$-6.731\ 458\ 212\ 562\ 93 \times 10^{-9}$	X^6	$7.226\ 272\ 783\ 628\ 55 \times 10^{-17}$
Y^3	$-7.302\ 689\ 704\ 844\ 14 \times 10^{-9}$	X^4Y^2	$9.521\ 476\ 713\ 073\ 41 \times 10^{-18}$
X^4	$1.717\ 415\ 392\ 652\ 01 \times 10^{-12}$	X^2Y^4	$1.096\ 457\ 827\ 956\ 37 \times 10^{-17}$
X^2Y^2	$6.313\ 485\ 047\ 550\ 42 \times 10^{-12}$	Y^6	$1.026\ 435\ 731\ 489\ 14 \times 10^{-19}$
Y^4	$2.438\ 724\ 661\ 815\ 61 \times 10^{-12}$		

基于优化后的主镜和三镜 XY 自由曲面系数,利用 MATLAB 仿真出主镜和三镜的曲面面型,曲面面型的二维和三维仿真如图 5、6 所示.

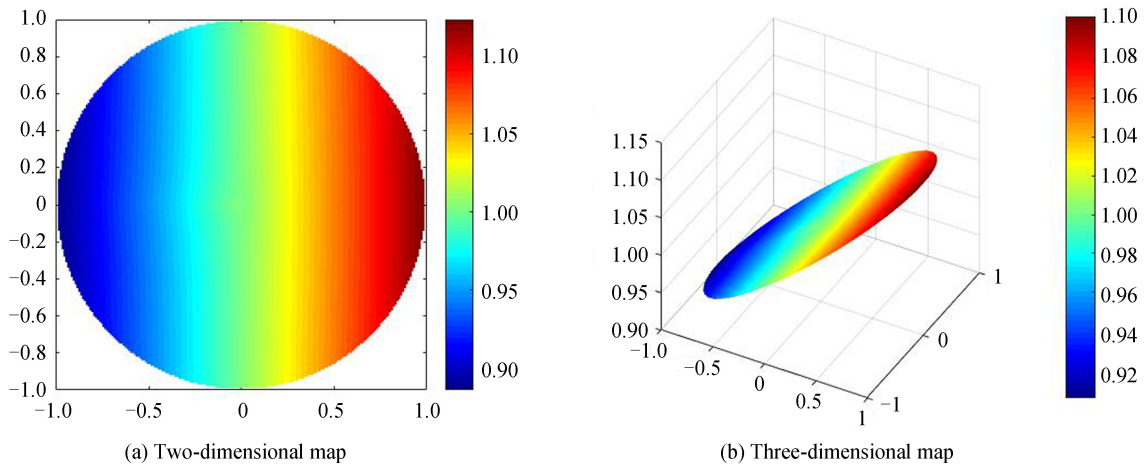


图 5 主镜 XY 自由曲面的二维和三维面型图

Fig.5 XY freeform surface of the two-dimensional and three-dimensional map in primary mirror

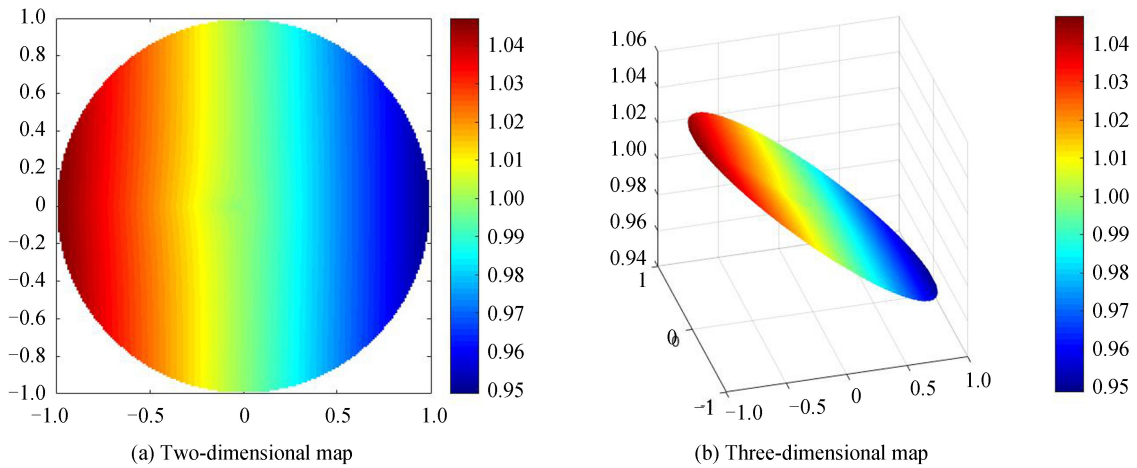


图 6 三镜 XY 自由曲面的二维和三维面型图

Fig.6 XY freeform surface of the two-dimensional and three-dimensional map in tertiary mirror

自由曲面的检测与加工技术是制约其应用的最重要因素,目前对自由曲面的检测仍采用非球面检测方法,其中计算全息法(Computer-Generated Hologram,CGH)被广泛应用到自由曲面面型测量中^[17].该方法适用于小梯度变化的光学自由曲面元件,对于梯度变化非常大的自由曲面,加大了加工难度和误差,使得检测精度下降.

自由曲面的梯度即自由曲面面型与最佳比较球面偏离量的切线斜率值,从图5和图6的面型图中可以

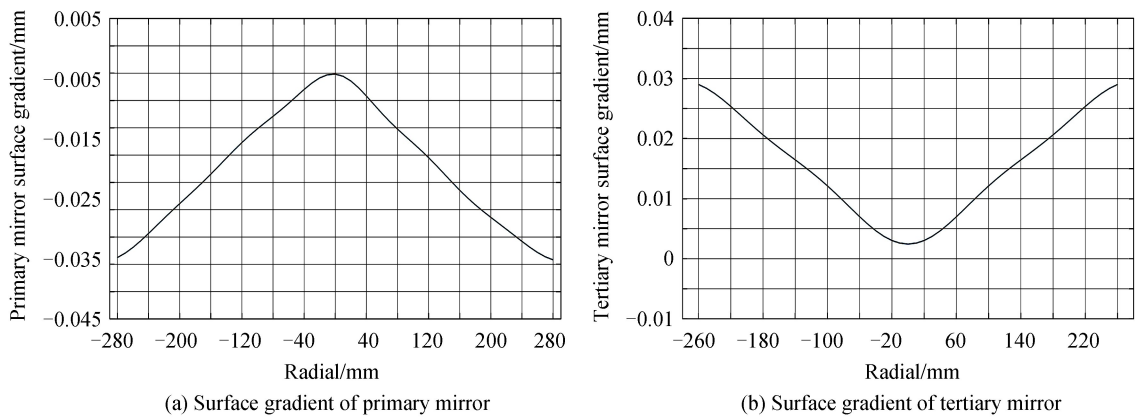


图 7 主镜和三镜的面型梯度

Fig.7 Surface gradient of primary mirror and tertiary mirror

看出,主镜和三镜的面型变化相对平缓,没有局部突变.通过对曲面径向处偏离量每隔 5 mm 进行采样计算,得到主镜和三镜的面型梯度如图 7 所示.

其中主镜的最大面型梯度为 38.8 μm ,三镜的最大面型梯度为 28.4 μm .边缘处的面型梯度变化相对较慢,没有局部的突起,对于该大口径反射镜来说,主镜和三镜的面型梯度相对较小,适用于目前的检测加工.

3 成像质量分析

探测器像元尺寸为 8 μm ,可以得出系统的奈奎斯特频率 $f_N = 1/2a = 62.5 \text{ lp/mm}$,选取 63 lp/mm 处进行评价,系统的光学传递函数 MTF 如图 8 所示.从图中 MTF 曲线可以看出,各视场下系统的 MTF 值大于 0.4,接近衍射极限.

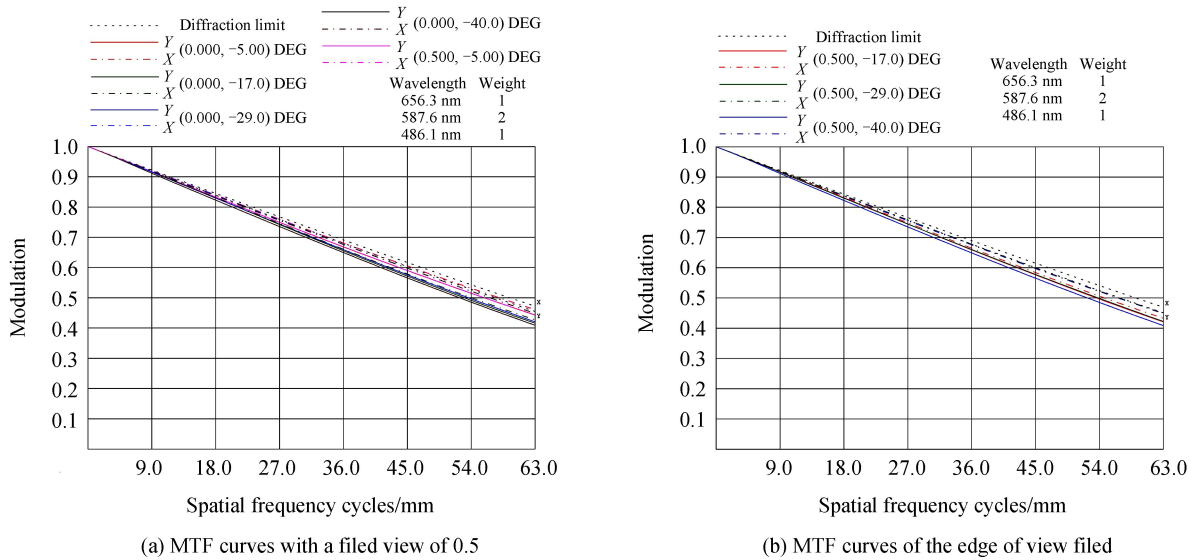


图 8 系统 MTF 曲线
Fig.8 MTF of the system

系统的点列图分布如图 9 所示,系统艾里斑直径为 17 μm ,各视场下弥散斑最大直径为 6.934 μm ,均小于爱里斑直径,且小于一个像元尺寸.

系统的畸变如图 10 所示,经过优化设计,边缘视场处畸变控制在 3%以内,对于大视场成像光学系统来

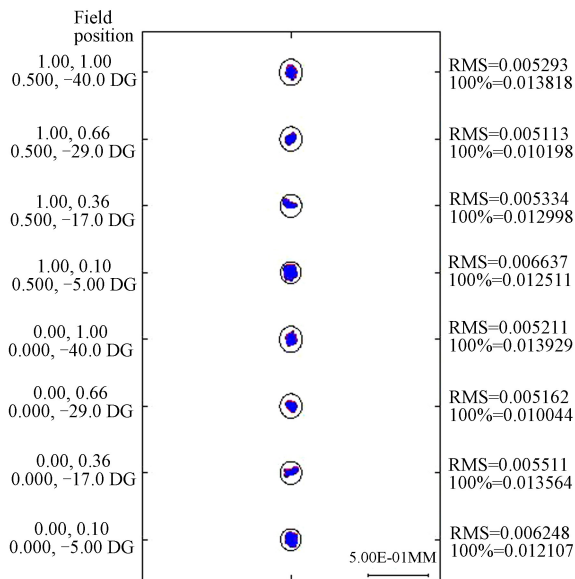


图 9 系统点列图
Fig.9 Spot diagram of the system

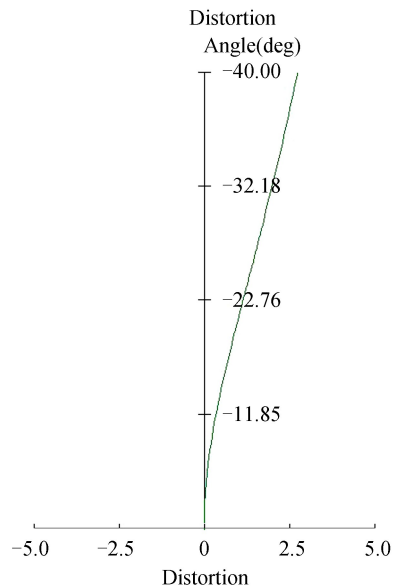


图 10 含自由曲面的系统畸变曲线
Fig.10 Distortion curve of the system with freeform surface

说,畸变得得到良好的校正.

系统的波像差见表 4,从表中可以看出系统的最大波像差为 0.0705λ ,各视场波像差均优于 $\lambda/14$.

表 4 光学系统波像差(参考波长 $\lambda=0.5876\mu\text{m}$)
Table 4 Wavefront error(reference wave $\lambda=0.5876\mu\text{m}$)

X-Field	Y-Field	Design value/ λ
0°	-5°	0.068 617
0°	-15.5°	0.057 944
0°	-26°	0.070 526
0°	-36.5°	0.061 658
0°	-40°	0.029 889
0.5°	-5°	0.070 394
0.5°	-15.5°	0.062 449
0.5°	-26°	0.065 647
0.5°	-36.5°	0.062 335
0.5°	-40°	0.029 109

4 结论

本文基于 XY 多项式自由曲面设计了焦距为 2 000 mm、沿轨方向视场角为 1° 、垂轨方向视场角为 35° 的大视场离轴三反光学系统,自由曲面的应用及主镜为凸面的设计,使子午方向达到 35° 的大视场,克服了传统离轴三反子午方向视场小的缺点.所设计的主镜和三镜的自由曲面面型相对连续光滑,面型梯度较小,适合检测和加工.经过设计优化,系统的成像质量接近衍射极限,最大相对畸变小于 3%,弥散斑直径小于一个像元尺寸,全视场内波像差均优于 $\lambda/14$,实现了像质优良的大视场成像光学系统.可见自由曲面的应用,不仅扩大了视场,提升了光学系统的成像质量,也有效地校正了系统畸变.该大视场空间光学系统对地覆盖范围广,可以实现大幅宽成像.

参考文献

- [1] LI Xu-yang, YANG Hong-tao, HE Tian-bing, *et al.* Design of a new type on-axis three-mirror-anastigmat optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 31-35.
李旭阳, 杨洪涛, 贺天兵, 等. 新型三反射光学系统设计[J]. 光子学报, 2012, **41**(1):31-35.
- [2] CHEN Zhe, ZHANG Xing-xiang, CHEN Chang-zheng, *et al.* Coaxial and off-axial hybrid three-mirror optical system with long focal length[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(4): 0416002.
陈哲, 张星祥, 陈长征, 等. 长焦同轴混合式三反光学系统[J]. 中国激光, 2016, **43**(4): 0416002.
- [3] HARIHARAN V K, SUNDARAM N S, DAYASHANKARA K S, *et al.* Assembly, integration and testing of CARTOSAT-1[C]. Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility. IEEE, 2006: 60-66.
- [4] OHGI N, IWASAKI A, KAWASHIMA T, *et al.* Japanese hyper-multi spectral mission[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2010: 3756-3759.
- [5] 郭永祥. 长焦距宽视场航天测绘相机光学系统研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2010: 4-5.
- [6] ZHU Hao, CUI Qing-feng, PIAO Ming-xu, *et al.* Design of circular unobscured three-mirror optical systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 161-166.
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):161-166.
- [7] WANG Ling-jie, ZHANG Xin, ZHANG Jian-ping, *et al.* Free-form surface space optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(6): 1040-1046.
王灵杰, 张新, 张建萍, 等. 自由曲面空间光学系统设计研究[J]. 应用光学, 2012, **33**(6):1040-1046.
- [8] ZHU Jun, WU Xiao-fei, HOU Wei, *et al.* Application of freeform surfaces in designing off-axis reflective space optical imaging systems[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, **37**(3): 1-8.
朱钧, 吴晓飞, 侯威, 等. 自由曲面在离轴反射式空间光学成像系统中的应用[J]. 航天返回与遥感, 2016, **37**(3):1-8.
- [9] XUE Dong-lin, ZHENG Li-gong, ZHANG Feng. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(12): 2813-2820.
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.
- [10] GONG Dun, WANG Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(7): 0722001.

- 巩盾,王红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, **34**(7): 0722001.
- [11] ZHU J, HOU W, ZHANG X, *et al.* Design of a low F-number freeform off-axis three-mirror system with rectangular field-of-view[J]. *Journal of Optics*, 2015, **17**(1): 015605.
- [12] HOU W, ZHU J, YANG T, *et al.* Construction method through forward and reverse ray tracing for a design of ultra-wide linear field-of-view off-axis freeform imaging systems[J]. *Journal of Optics*, 2015, **17**(5): 055603.
- [13] 林晶. 宽幅离轴三反光学系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013:15-24.
- [14] WANG Qing-feng, CHENG De-wen, WANG Yong-tian. Description of free-form optical curved surface using two-variable orthogonal polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0922002.
王庆丰, 程德文, 王涌天. 双变量正交多项式描述光学自由曲面[J]. 光学学报, 2012, **32**(9): 0922002.
- [15] 刘军. 自由曲面在成像光学系统中的研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016: 18-20.
- [16] 王伟. 自由曲面离轴反射式光学系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2016:11-12.
- [17] ZHANG Lei, LIU Dong, SHI Tu, *et al.* Optical free-form surfaces testing technologies[J]. *Chinese Optics*, 2017, **10**(3): 283-299.
张磊, 刘东, 师途, 等. 光学自由曲面面形检测技术[J]. 中国光学, 2017, **10**(3):283-299.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No.61427811)

引用格式: 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