

星载大视场多光谱成像光学系统设计

李文轩, 胡源, 张凯, 秦铭泽, 袁夕尧

(长春理工大学 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 大视场、多通道、小型化已成为星载测绘光学系统的迫切需求。根据上述需求, 提出了先用视场分光再用窄带分色片分光的设计方案, 并构建了自动消遮挡和轻小型化优化函数。设计了一款主、次、三镜均为球面的离轴三反四通道光学系统, 其焦距 360 mm、相对孔径为 1/6、视场角 $13^\circ \times 5^\circ$ 、工作波段 0.4~1.1 μm 、地面像元分辨率 5 m、全视场畸变小于 5%。加工、装调后的整机系统实测 MTF (Modulation Transfer Function) 曲线在奈奎斯特频率 100 lp/mm 处均大于 0.25, 同时系统所占空间面积仅为 245 mm \times 423 mm、整机重量仅 13.82 kg, 从而实现了系统大视场、无遮挡、多通道、体积包络的小型化。

关键词: 空间遥感; 离轴三反; 光学设计; 大视场

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)11-1049-06

Design of Spaceborne Large Field of View Multispectral Imaging Optical System

LI Wenxuan, HU Yuan, ZHANG Kai, QIN Mingze, YUAN Xiyao

(Key Laboratory of Opto-electronic Measurement and Optical Informon Transmission Technology

Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A large field of view, multi-channel, lightness, and miniaturization have all become critical requirements for satellite-borne surveying and mapping optical systems. According to the above-mentioned requirements, a design method that uses the field of view to split light and then uses a narrowband dichroic plate to split light is proposed, and an optimization function for automatic de-occlusion, lightness, and miniaturization is constructed. This method was used to design an off-axis three-mirror four-channel optical system with spherical primary, secondary, and tertiary mirrors. For the ground image, the focal length was 360 mm, relative aperture was 1/6, field of view was $13^\circ \times 5^\circ$, and working waveband was 0.4–1.1 μm . The element resolution was 5 m, and the distortion of the full field of view was less than 5%. The entire system installation and adjustment were completed according to the tolerance analysis results. After processing and installation, the measured modulation transfer function (MTF) curve of the 100 lp/mm entire system was greater than 0.25. The system had good image quality and it occupied only 245 mm \times 423 mm and the entire weight was only 13.82 kg. This shows that the system had excellent characteristics of a large field of view, no obstruction, lightness, and miniaturization.

Key words: space remote sensing, off-axis three-mirror, optical design, large field

0 引言

在星载探测光学系统研究中, 大视场、多通道、轻小型化已成其发展的主流方向^[1]。其中反射式光学系统相比与透射式光学系统具有能量利用率较高、无

色差, 光谱响应平坦^[2], 有利于多光谱系统的实现, 同时热稳定性较好、环境适应力较强和不受材料限制, 容易做到大口径、轻小型化等优势特点^[3-5]。

目前反射系统可分为同轴系统和离轴系统两类^[6-8], 同轴系统存在中心遮拦、视场较小、能量相对较低等

收稿日期: 2020-11-15; 修订日期: 2020-12-05.

作者简介: 李文轩 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向光学设计。E-mail: lwxoptical@163.com。

通信作者: 胡源 (1981-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向光学设计。E-mail: hycust@163.com。

基金项目: 装备预研兵器工业联合基金项目。

缺陷。相比于同轴系统，离轴系统具有不存在中心遮挡、可实现大视场、长焦距等优势。两镜系统像质难以满足空间高分辨要求，四镜系统结构相对复杂，装调难度较大，因此在空间光学系统中离轴三镜系统得到了广泛应用。例如美国对地观测 QuickBird 卫星相机、EO-1ALL 卫星样机^[9]，法国 OSIRS 彗星核子观察卫星 NAC 相机^[10]，英国战术光学卫星对地观测相机 TopSat^[11]，印度 IRS-1C 卫星国土资源和环境检测相机^[12]。

本文根据星载多光谱成像系统的大视场、多通道、轻小型化的应用需求和技术指标，提出了先用视场分光再用窄带分色片分光的设计方法；同时在系统优化过程中构建了自动消遮挡和轻小型化优化函数。运用上述方法设计了全视场 $13^\circ \times 5^\circ$ 、主、次、三镜均为球面的离轴三反通道的成像光学系统。

1 系统设计指标

星载成像系统的光学技术指标由卫星系统的轨道高度、幅宽、地面像元分辨率、像元尺寸、光谱范围等相关参数决定。卫星系统的相关参数如下：

①轨道高度：400 km；②像元分辨率：5.5 m；③幅宽：92×35 km；④像元尺寸：5 μm；⑤光谱范围：0.45~1.1 μm；⑥光谱通道：4 个；⑦系统整机：≤15 kg。

其中地面像元分辨率与光学系统焦距 f 、探测器像元尺寸 α 、轨道高度 H 之间存在下列关系：

$$\text{GSD} = H \times \alpha / f \quad (1)$$

光学系统的视场 ω 与卫星系统的幅宽 W 、轨道高度 H 之间存在如下关系：

$$\omega = \arctan(W/2H) \quad (2)$$

同时为保证光学系统像面能量、较高的系统传函、系统小型化，光学系统口径为：1/6。

基于上述卫星系统相关参数，求解得到星载多光谱成像光学系统的设计指标如下：

表1 光学系统指标

Parameter	
Focal length	360 mm
Field of view	$13^\circ \times 5^\circ$
F/#	6
Wave length	0.45-1.1 μm

2 视场分光原理

由光学指标可以看出，系统像面较大且为一个矩形像面，长宽比高达 3:1，由于市面所售探测器的限制，在满足 GSD 的条件下，探测器的空间维度难以满足要求。

因此提出视场分光的方法，原理如图 1 所示，将系统 Y 方向 $6^\circ \sim 11^\circ$ (其中系统 Y 方向中心视场为 8.5°) 视场分为 4 个小型条带视场，分别对应 4 个通道。其中通道 1 通过平面反射镜转折 45° 将该通道像面进行转折；通道 2 直接由离轴三反系统成像；通道 3 与通道 4 首先共用平面反射镜 B 实现光路的向上 90° 转折，其次各自通过反射镜 C1、C2 将各自通道像面再次实现 90° 转折。

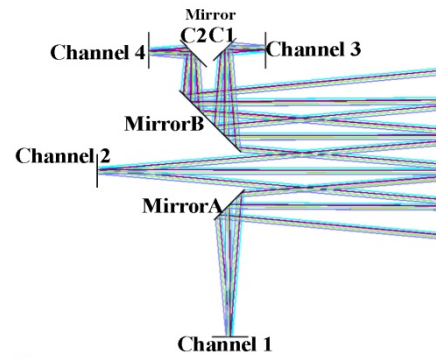


图1 视场分离结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of view field splitter

上述 4 个通道分别对应 4 个线阵相机，同时在线阵相机前端添加不同的窄带分光片从而使系统实现大视场、多波段地面目标信息的获取。则系统四路光谱通道的相关参数如表 2 所示。

表2 各光谱通道指标参数

	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4
Wavelength/nm	450 ± 5	650 ± 3	820 ± 3	1020 ± 5
ω_y	$6^\circ - 7.25^\circ$	$7.25^\circ - 8.5^\circ$	$8.5^\circ - 9.75^\circ$	$9.75^\circ - 11^\circ$
ω_x	$\pm 6.5^\circ$	$\pm 6.5^\circ$	$\pm 6.5^\circ$	$\pm 6.5^\circ$

3 光学系统设计

3.1 初始结构求解

离轴三反系统的设计优化是在同轴三反系统的结构上进行适当光阑离轴、视场离轴的优化得到的，同轴三反系统的初始结构如图 2 所示。

相关结构参数主要包括 3 个反射镜的镜面曲率 R_1, R_2, R_3 ，次镜到主镜的间隔 d_1 ，三镜到次镜的间隔 d_2 。相关轮廓参数主要包括次镜对主镜遮拦比 α_1 ，三镜对次镜遮拦比 α_2 ，次镜放大倍率 β_1 ，三镜放大倍

率 β_2 , 3个镜面的二次曲面系数 e_1^2, e_2^2, e_3^2 。根据三级像差理论, 经推导得到:

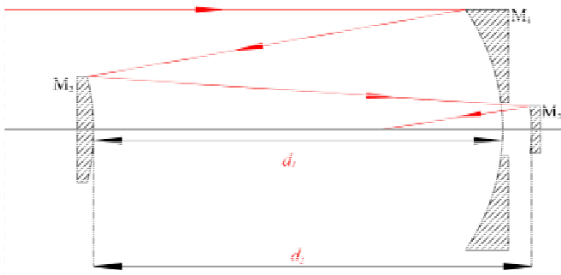


图2 同轴初始结构

Fig.2 Initial structure of on-axis model

$$R_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} f \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1}{(\beta_1 + 1)\beta_2} f \quad (4)$$

$$R_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{(\beta_2 + 1)} f \quad (5)$$

$$d_1 = \frac{1 - \alpha_1}{\beta_1 \beta_2} f \quad (6)$$

$$d_2 = \frac{\alpha_1(1 - \alpha_2)}{\beta_2} f \quad (7)$$

首先根据系统的结构要求确定系统的遮拦比和放大倍率中的任意3个变量, 其次求解3个非球面系数和另一个结构参数使得三级像差表达式中 S_I (球差), S_{II} (慧差), S_{III} (像散), S_{IV} (场曲) 等于零。从而利用式(3)~(7)获得系统的结构参数。此时选取 $\alpha_2=0.998, \alpha_1=0.3, \beta_1=1$ 作为系统初始结构参数, 通过上式求解得到同轴三反系统初始结构参数如表3所示。

表3 初始结构参数

Table 3 Parameters of initial structure

	Radius/mm	Distance/mm	Conic
Primary mirror	-2300	-765	1
Secondary mirror	-884	887	12.4
Third mirror	-309	-144	-0.449

将上述结构参数输入光学设计软件中进行优化得到像质优良的同轴系统作为离轴系统的初始结构。

3.2 系统优化设计

由于同轴系统存在中心遮拦且视场较小, 为实现系统大视场、消除中心遮拦, 因此选择视场离轴和孔径离轴二者结合的形式进行优化设计。在优化过程中为避免系统趋向于同轴化, 根据离轴系统的光线走向, 对主镜和三镜的离轴量进行限制, 为避免各反射

镜对光线遮拦应当满足式(8)中的条件。图3为在YOZ平面的离轴系统。

$$\begin{cases} Y_C > Y_{AB} \\ Y_B < Y_{CE} \\ Y_D < Y_{EH} \end{cases} \quad (8)$$

式中: Y_B, Y_C, Y_D 分别代表主、次、三镜边缘光线的纵坐标; Y_{AB}, Y_{CE}, Y_{EH} 分别代表入射到主、次、三镜上边缘点的光线纵坐标。

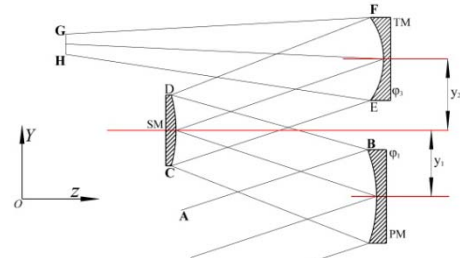


图3 消遮拦示意图

Fig.3 Schematic diagram of elimination obscuration

同时构建离轴三反系统小型化优化算法, 如式(9)所示, 对系统Y方向长度进行优化控制, 其中 Y_F, Y_G 分别代表三镜、像面边缘点纵坐标; y_1, y_2 分别代表主镜、三镜相对于次镜光轴的偏心量; ϕ_1, ϕ_3 分别代表主镜、三镜在Y方向上口径, 从而实现系统体积小、轻量化, 进而实现系统的轻量化。

$$\begin{cases} Y_F \geq Y_G \\ Y = y_1 + y_2 + \frac{\phi_1 + \phi_3}{2} \end{cases} \quad (9)$$

根据上述各光谱通道参数, 利用相关的优化函数实现对系统的消遮拦和小型化优化。针对系统四路光谱通道采用平面反射镜对各光谱通道进行折转分离, 在设计优化时将主、次、三镜 (均为球面) 的半径、间隔、偏心量设计为变量, 进行最终优化, 得到最终的系统结构如图4所示。

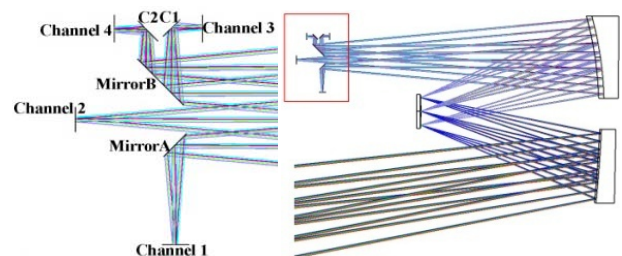


图4 光学系统整体结构图

Fig.4 Layout of the optical system

3.3 结果分析

系统的点列图如图5所示, 可以看出, 系统各视场的弥散斑均位于艾里斑之内, 且艾里斑半径小于系统探测器像元大小; 系统的MTF曲线如图6所示,

可知各个视场的 MTF 曲线在奈奎斯特频率处 100lp/mm 均大于 0.35, 接近系统衍射极限; 系统场曲畸变如图 7 所示, 可知系统各视场畸变均小于 5%, 场曲控制在 ± 0.1 之间。综合而言, 系统具有优良的光学成像质量。

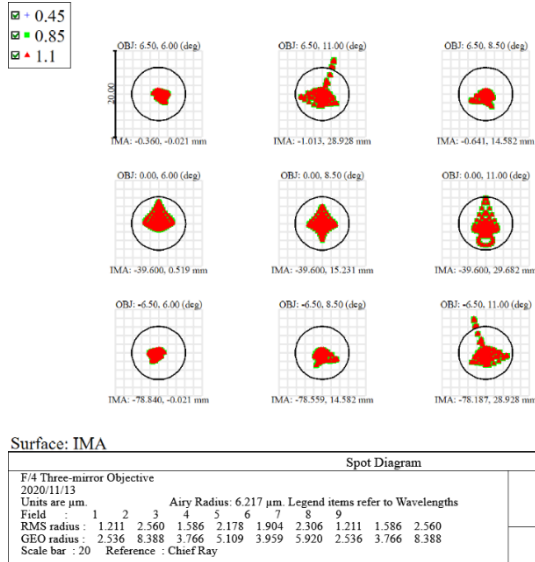


图5 系统各视场点列图

Fig.5 Spot diagram of optical system

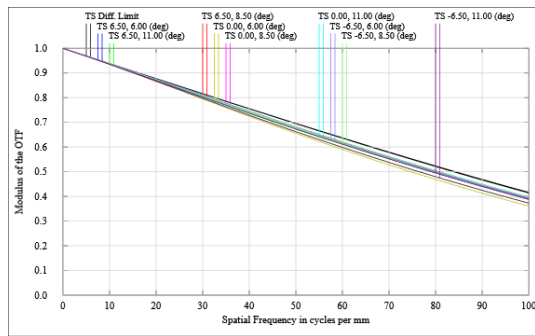


图6 系统 MTF 曲线

Fig.6 MTF of the optical system

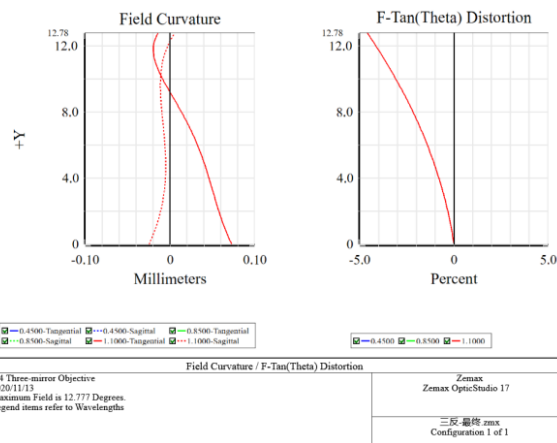


图7 系统场曲畸变曲线

Fig.7 Field curvature and distortion of the system

4 系统测试

采用干涉仪与经纬仪二者相结合的方式对系统整机的不同视场点的波前和光学传函进行测试, 系统整机如图 8 所示, 测试原理如图 9 所示。

首先通过经纬仪将平面反射镜调整到系统相对应的视场点, 其次将 4D 干涉调整到该视场点所对应的像点, 通过 4D 干涉仪测得系统在该视场点下的出射波面与标准波面的干涉图, 通过干涉图得到系统的出射波面的出瞳函数, 利用出瞳函数的自相关特性计算得到光学系统的 MTF 函数曲线。系统 4 个角点视场的干涉图和 MTF 曲线实测值如图 10、图 11 所示。

图 10、图 11 可知, 系统 4 个角点视场的 RMS (Root Mean Square) 值分别为 0.1723λ 、 0.1334λ 、 0.1427λ 、 0.1382λ ; 系统光学传函在奈奎斯特频率 100lp/mm 处均大于 0.25, 表明装调完后的光学系统成像质量优良。对系统的空间尺寸进行测量, 其所占空间面积仅为 $245\text{ mm} \times 423\text{ mm}$ 。

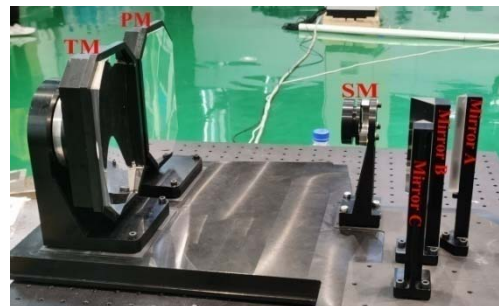


图8 系统整机

Fig.8 The whole system

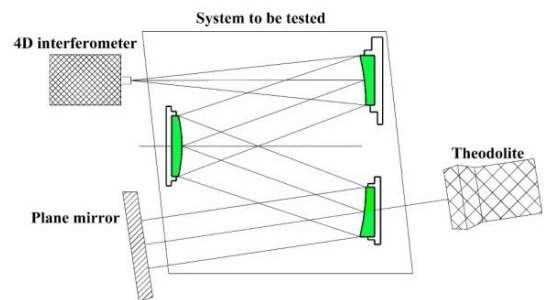
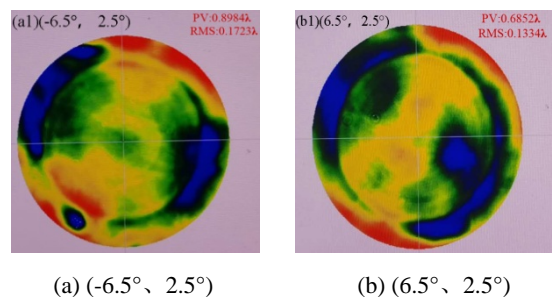


图9 系统测试原理图

Fig.9 System test schematic diagram



(a) (-6.5°, 2.5°)

(b) (6.5°, 2.5°)

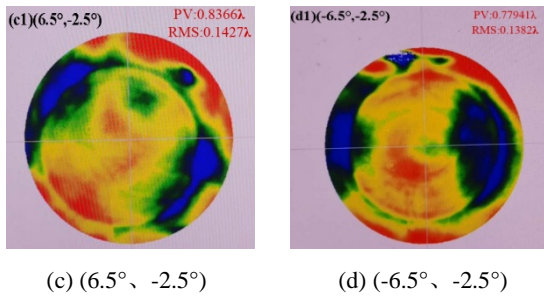


图 10 系统干涉图

Fig.10 Interference figure

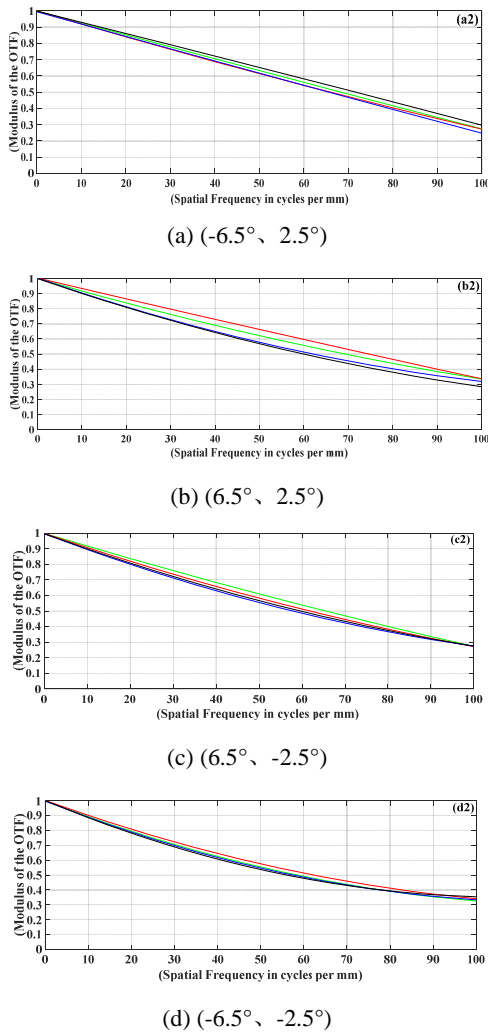


图 11 系统 MTF 测试曲线

Fig.11 System MTF test curves

同时对装调完成的系统进行整机轻量化评估,测量结果如图 12 所示,结果表明系统整机重量为 13.82 kg,系统实现了小型化、轻量化。

5 结论

本文基于星载成像系统相关参数和相关需求,确定了光学系统的设计指标,同时提出了先视场分光后分光片分光实现系统四路光谱通道的设计方案。并详

细分析了视场分光的原理。在离轴系统优化设计过程中为避免系统同轴化,同时实现系统小型化,提出了消遮挡和小型化优化函数。

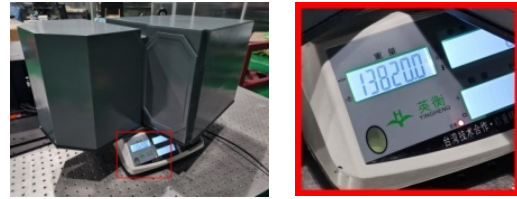


图 12 系统整机重量测量

Fig.12 Weight measurement system

利用上述设计方法设计了一款主镜、次镜、三镜均为球面的全视场 $13^\circ \times 5^\circ$ 、无遮挡的离轴三反四通道光学系统,降低了系统加工成本,最后对系统整机进行了测试,结果表明系统各个视场点的光学传函在 100 lp/mm 处均大于 0.25,成像质量满足要求;系统 Y 方向长度仅为 245 mm、占空间面积仅为: 245 mm × 423 mm、整机重量仅 13.82 kg 并且系统结构相对紧凑,适用于星载平台的应用。

参考文献:

[1] 焦明印, 李元, 肖相国. 一种紧凑离轴反射式多波段共用光学系统[J]. 红外技术, 2014, 36(12): 949-952.
JIAO Mingyin, LI Yuan, XIAO Xiangguo. A compact off-axis reflective Optical System for multispectral application[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(12): 949-952.

[2] 巩盾, 王红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 1-7.
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): 1-7.

[3] 王美钦, 王忠厚, 白加光. 成像光谱仪的离轴反射式光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 167-172.
WANG Meiqin, WANG ZhongHou, BAI Jianguang. Optical design of off-axis three mirror anastigmatic system for imaging spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 167-172.

[4] 曹超, 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(1): 1-9.
CAO Chao, LIAO Sheng, LIAO Zhiyuan, et al. Design of off-axis reflective optical system with large field of view based on freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 1-9.

[5] 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): 1-11.

- LIU Qiang, WANG Xin, HUANG Genghua, 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): 1-11.
- [6] XU Chen, CHENG dewen, CHEN Jinjin, et al. Design of all-reflective dual-channel foveated imaging system based on free form optics[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(9): 2353-2362.
- [7] 黄晓园, 黄铭焯, 陈冠亮, 等. 高分辨率空间遥感卫星的离轴三反射光学系统设计[J]. *光学与光电技术*, 2018, **16**(4): 75-79.
- HUANG Xiaoyuan, HUANG Mingye, CHENG Guanliang, et al. Off-axis three-mirror reflective system for high resolution space remote sensing satellite[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2018, **16**(4): 75-79.
- [8] 姚波, 袁立银, 亓洪兴, 等. 双通道成像光谱仪共用离轴三反射光学系统的设计[J]. *红外技术*, 2013, **35**(7): 419-424.
- YAO Bo, YAUN Liyin, QI Hongxing, et al. Optical design of dual-channel imaging spectrometer sharing the Off-axis TMA system[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(7): 419-424.
- [9] Figoski J W. Quick Bird telescope: the reality of large high-quality commercial space optics[C]//*SPIE*, 1999, **3779**: 22-24.
- [10] Calamai L, Barsotti S, Fossati E, et al. Ring-field TMA for prisma: theory, optical design, and performance measurement[C]//*SPIE*, 2015, **9626**: 5-10.
- [11] ZHU Jun, HOU Wei, ZHANG Xiaodong, 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] 赵文才. 改进的离轴三反射光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(12): 2837-2843.
- ZHAO Wencai. Design of improved off-axis TMA optical system[J]. *Optics and Precising Engineering*, 2011, **19**(12): 2837-2843.