

文章编号:1001-5078(2023)06-0900-06

· 光电技术与系统 ·

铝基离轴三反系统光机一体化设计

杨加强,刘宏旭,刘秋佐,冯位欣,李江勇
(中电科光电科技有限公司,北京 100015)

摘要:针对红外成像领域离轴三反系统在批产中存在生产效率低、产品一致性差、抗振动和无热化等工程化要求高的问题,本文舍弃传统的手动抛光等加工工艺,以高精度精密数控加工技术为基础,确定零件的形位公差、尺寸公差和面型等参数的加工工艺,采用光机一体化设计方法设计一款用于中长波红外成像的铝基离轴三反系统。系统指标为有效口径 150 mm,扩束比 4 倍,视场角 $2.8^\circ \times 2.4^\circ$,工作波段 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 和 $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$ 。分别介绍了系统的 光学设计 、 无热化设计 、 消应力设计 和 轻量化设计 结果,并在常温和高低温下对成像效果进行了测试。实验表明,该系统能够满足中长波红外系统的成像需求。

关键词:离轴三反;铝基反射镜;光机一体化;消应力设计;无热化

中图分类号:TN214;TP73 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.014

Optical-mechanical integrated design of aluminium-based off-axis three-mirror anastigmat system

YANG Jia-qiang, LIU Hong-xu, LIU Qiu-zuo, FENG Wei-xin, LI Jiang-yong
(CETC Electro-Optics Technology Co. Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: Aiming at the problems of low production efficiency, poor production consistency and high engineering requirements such as vibration resistance and athermalization in the batch production of off-axis three mirror anastigmat system (TMA) in the field of infrared imaging, the traditional manual polishing and other processing techniques are abandoned. In this paper, based on high-precision CNC machining technology, the shape and position tolerance, dimension tolerance, surface shape tolerance of elements and other parameters of the machining process are determined. An aluminium-based off-axis three mirror anastigmat system for mid-wave infrared (MWIR) and long-wave infrared (LWIR) using an integrated optical-mechanical design approach is designed. The system optical parameter are 150 mm effective aperture, $4 \times$ beam expansion ratio, $2.8^\circ \times 2.4^\circ$ field of view, $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ and $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$ operating bands. The results of optical design, athermalization design, stress relief design and lightweight design of the system are presented respectively, and the imaging results are tested at room temperature and high and low temperatures. The experiments show that the TMA can meet the imaging requirements of medium and long wavelength infrared systems.

Keywords: TMA; aluminum based mirror; optical-mechanical integrated design; stress relief design; athermalization design

1 引言

在机载光电成像、空间对地成像等领域^[1-4],为了获得更多的目标信息,更好的成像效果,系统的使

用波段越来越多,同时对于体积和重量的要求也越来越高。传统透射式系统受限于材料种类以及系统色差等方面的问题已经很难满足这些越来越高的需

求,因此反射式系统,尤其是离轴反射式系统逐渐成为光学系统研究的热点。离轴反射式系统没有波段选择性,不需要校正色差,因此工作波段宽。相比于同轴反射系统,由于没有中心遮拦问题,因此光能利用率高。此外,反射式系统能够有效折叠光路,压缩系统的体积和重量。

离轴反射式系统本身也有缺点,离轴反射镜由于离轴量的存在,加工和检测均比较困难^[5-6]。诸如碳化硅、微晶玻璃等材料,由于材料本身硬度高,加工难度大、周期长,加工费用昂贵,在工程应用中很难做到大批量生产。而铝合金 6061 等材料硬度低,可加工性好,比较适合通过数控机床进行加工。数控加工具有加工成本低、生产效率高、产品一致性好的特点,比较适合批量生产。目前国内主流的超精密单点金刚石车削加工工艺对铝合金加工的面型精度可以做到 $0.2\ \mu\text{m}$ 以下^[7-9],由于红外系统的工作波长较长,完全可以满足红外系统的成像需求。因此,铝基离轴反射式系统在红外成像领域非常适合工程应用,具有大规模批量生产的应用潜力。

本文采用光机一体化设计方法,研制一款应用于红外成像领域的离轴三反系统,并分别在常温和高低温的工作环境下随系统成像性能进行了测试。

2 光学设计

2.1 技术指标

系统设计指标参数如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数要求

Tab. 1 Optical system design specifications

Entrance pupil diameter/mm	150
beam expansion ratio	4 ×
Wavelength band/ μm	3.7 ~ 4.8; 7.7 ~ 10.3
Field of view/ $^{\circ}$	2.8 × 2.4
Working temperature/ $^{\circ}\text{C}$	-40 ~ +60
Temperature compensation mode	Optical passive mode

2.2 光学设计结果

根据以上设计指标要求,采用光学设计软件 CODEV,在合理的初始结构基础上进行光学系统的优化设计。设计过程中坚持以下几个原则:第一,系统尺寸最小且具有实出瞳。设计过程中选择具有实中间像面的 Rug 型光学结构,保证在入光侧和出光侧分别具有实入瞳和实出瞳,既保证

了主镜尺寸最小,同时又能够与后续光路合理连接。第二,尽量降低实际加工、检测和装调的难度,提高系统的工程化程度。光学系统选用三片二次曲面反射镜。主镜选用标准的抛物面、次镜选用双曲面,主次镜组合形成中间像面。三镜选用近似抛物面的二次曲面,补偿主镜和次镜组合后的残留像差。最终设计结果如图 1 所示,系统尺寸 $330\ \text{mm} \times 225\ \text{mm} \times 160\ \text{mm}$ 。

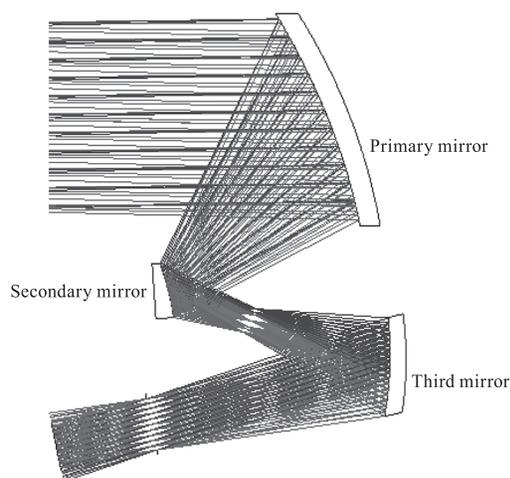
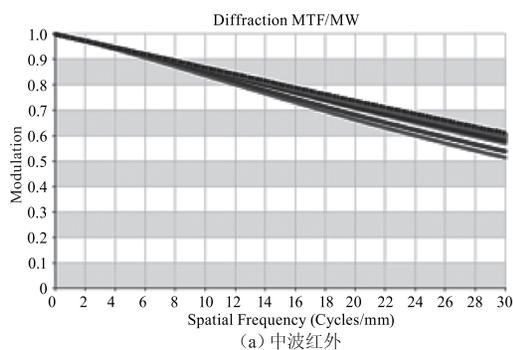


图 1 离轴三反无焦系统光路图

Fig. 1 System optical path diagram of TMA

对于无焦系统成像质量的评价,通常是在出瞳位置处设置无任何像差引入的虚拟成像镜头,组合成会聚系统。本文设计中波 F 数为 4,虚拟镜头焦距 150 mm,全系统焦距 600 mm;长波 F 数为 2,虚拟镜头焦距 75 mm,全系统焦距 300 mm。

光学传递函数 MTF 是反映光学系统综合性能的重要指标。该系统在常温 $20\ ^{\circ}\text{C}$ 下的中波光学传递函数如图 2 所示。从图中可以看出,中波 MTF 在特征频率 33 lp/mm 时轴上视场大于 0.6,轴外视场均大于 0.5,长波 MTF 在特征频率 20 lp/mm 时轴上和轴外视场均大于 0.5,能够保证系统的清晰成像。



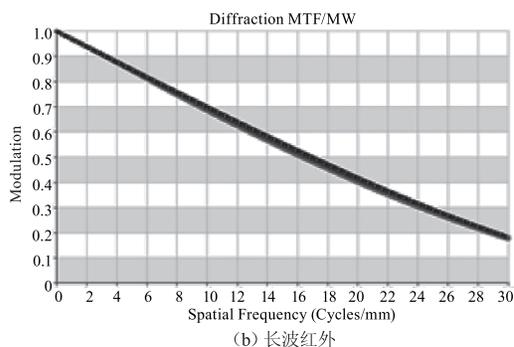


图2 离轴三反系统的光学传递函数 MTF

Fig. 2 MTF curves of TMA

图3给出了中波和长波的畸变网格图。从图中可以看出,在全视场范围内,系统的畸变值不超过1%,能够保证系统成像不失真。

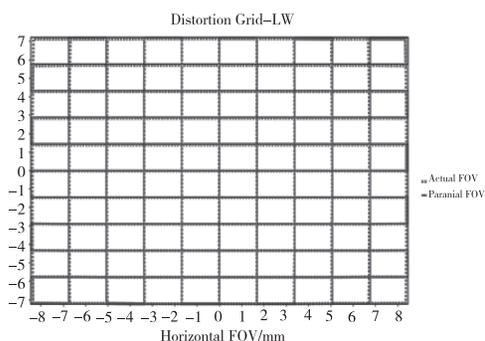


图3 离轴三反系统的畸变网格图

Fig. 3 Distortion mesh of TMA

3 光机一体化设计

对于全铝基离轴三反系统,光机一体化设计对于系统的加工精度、装配精度、抗振动冲击性能等各方面都至关重要。光机一体化设计主要包括无热化设计、消应力设计、轻量化设计等多个方面。

3.1 无热化设计

无热化设计是保证系统能够在较宽的温度范围内均具有良好成像质量的基础。无热化方案主要包括机械主动补偿无热化、机械被动无热化和光学被动无热化等。离轴三反系统由于镜片数量少,不适合应用机械主动补偿无热化方案。离轴三反系统的无热化方式通常有两种,一种是基于低热膨胀系数的镜片和结构支撑组合,保证在温度变化时镜片自身变化以及镜片之间的相对位置关系变化不超过允许的公差范围,从而保证系统的成像性能。例如镜片材料选用微晶玻璃,结构支撑选用殷钢^[10];另一

种是镜片和支撑结构选用热膨胀系数相同或相近的组合方式,保证在温度变化时镜片和结构达到一种整体等比例缩放的效果,从而保证系统的成像质量不下降。例如结构件和镜片均选用铝合金^[11]或碳化硅、镜片选用石英玻璃同时搭配结构件选用钛合金框架等方式。

在红外应用领域,尤其是对重量体积等要求较高的红外系统,由于红外系统的工作波长相比于可见光更长,系统的面型精度等指标要求更低,铝合金 6061 作为镜片的加工精度完全能满足系统的使用要求。因此本文选用镜片材料为铝合金 6061 和支撑结构材料为铝合金 7075 的无热化方案。

3.2 镜片消应力设计

镜片消应力设计的目的是保证镜片在与支撑结构通过螺钉连接的同时,不会因为镜片的局部安装受力变形导致镜片面型质量的下降。在设计过程中需要考虑以下几个方面的因素:第一,保证镜片安装结构的局部变形尽量小。在成本可接受的前提下,选用高精度的加工设备和工艺方法对镜片和支撑结构进行加工,保证镜片安装面及其接触面的尺寸精度和形位精度,特别是平面度要足够高,从而确保镜片安装到位以后,镜片的局部受力变形比较小。第二,保证镜片安装结构的局部变形对镜面面型的影响尽量低。在保证镜片安装的牢固性和可靠性的同时,简化镜片安装结构,设计多级多维消应力结构,降低局部结构刚度,减小安装结构局部变形的传递效果,直至到镜面的影响可忽略不计。

遵循以上设计思路,本文镜片的消应力设计结果如图4所示。主镜、次镜和三镜均采用三点固定的支撑方式,其中次镜和三镜预留另外三个安装结构作为调试工艺孔。以次镜为例,目前的机加工精度可以实现平面度在 0.005 mm 以内,因此本文镜片和支撑结构安装面的平面度要求为 0.005 mm。镜片采用两级消应力结构,第一级对三处安装结构进行优化设计,沿轴向对安装结构与镜体连接处进行“收腰”处理;第二级对镜片主体进行优化设计,沿径向设计消应力槽,进一步降低局部变形对镜片面型的影响。

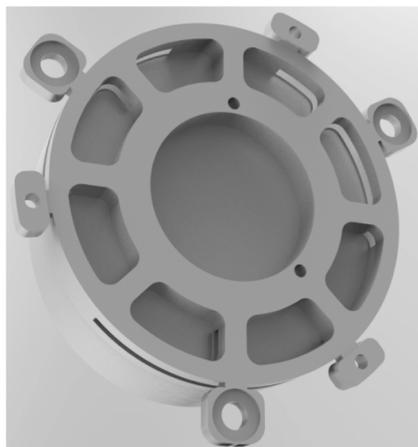


图4 离轴三反镜片消应力设计结果

Fig.4 Stress relief design results of TMA lens

通过仿真分析,最终确定各级消应力结构的宽度和深度。各镜片的消应力效果仿真结果如图5所示,各镜片的消应力效果仿真结果如图5所示,各镜片由安装应力变形引入的面型改变RMS值均不超过三十分之一波长,其检测波长为632.8nm,转换至红外波段,其影响可以忽略不计。

在仿真设计的基础上,利用超精密单点金刚石快刀伺服车削加工工艺对各镜片进行加工,并通过干涉仪进行面型测量,各镜片最终实测精度为主镜RMS值0.129波长,次镜RMS值0.049波长,三镜RMS值0.024波长,其中波长为632.8nm,对于中长波红外成像具有足够高的面型精度。

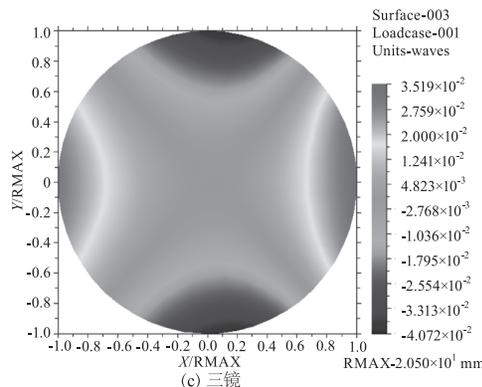
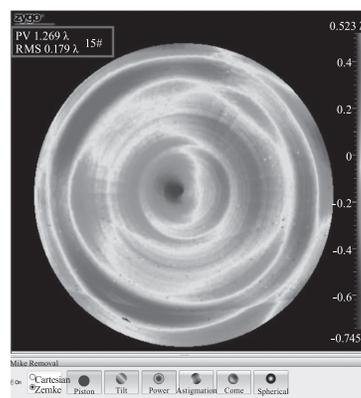


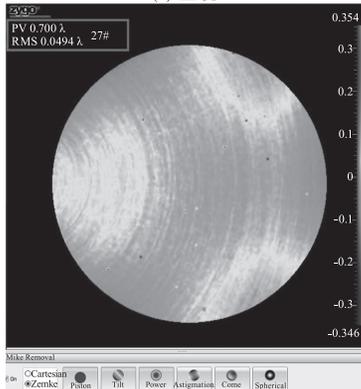
图5 离轴三反各镜片安装应力对面型变化的仿真图

Fig.5 Influence simulation diagram of installation stress on

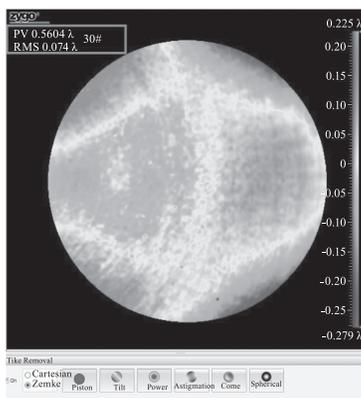
surface shape for each lens of TMA



(a) 主镜



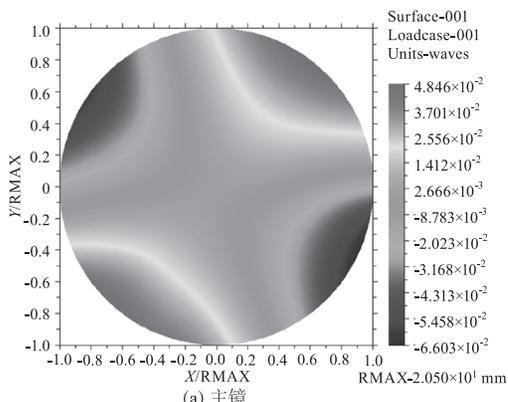
(b) 次镜



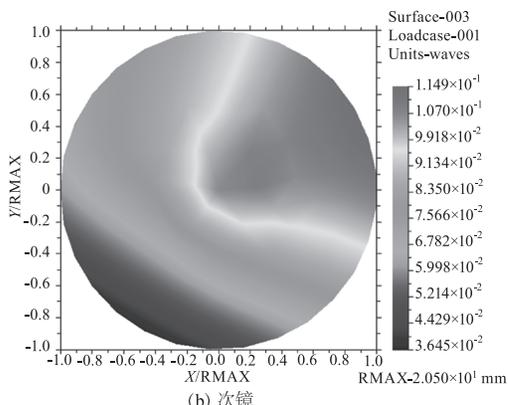
(c) 三镜

图6 镜片实际加工面型数据

Fig.6 Actual processing surface shape data of lens



(a) 主镜



(b) 次镜

3.3 轻量化设计

对于重量敏感的应用平台,镜片的轻量化设计是在保证系统可靠性的前提下有效降低系统重量的重要手段。反射镜的轻量化设计遵循相互适应原则^[12],根据不同镜片的尺寸、外形、光学指标和使用环境确定所适用的轻量化结构形式,利用形状优化和拓扑优化方法,分别对镜片背面采用三角形、梯形、腰形等形式的减重结构进行优化设计,通过有限元仿真分析,评估其综合性能,最终确定各镜片的轻量化方式如图 7 所示,主镜、次镜、三镜的重量分别为 963 g、73 g 和 236 g,轻量化率分别为 30%、35% 和 38%。

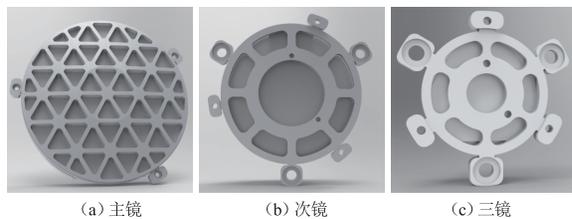


图 7 离轴三反各镜片轻量化设计结果

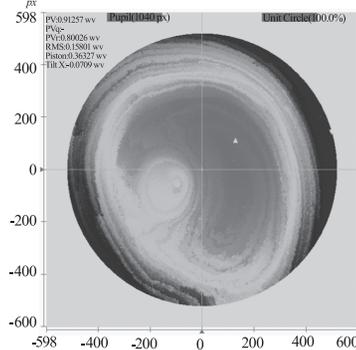
Fig. 7 Light weight design results of TMA lens

4 实验验证

实际完成装调的样机实物及实测系统波前像差如图 8 所示,系统实测波前像差 RMS 值为 0.15 波长,满足红外系统的成像需求。在此基础上,将离轴三反系统与中波成像热像仪组合并分别在常温及高低温下对系统成像性能进行验证。



(a) 实物照片



(b) 实测波前像差图

图 8 离轴三反组装实物图及系统实测波像差图

Fig. 8 TMA physical photos and measured wavefront aberration diagram

常温下分别在实验室进行分辨率测试及对室外场景进行成像测试,均能够清晰成像,如图 9 所示。

在低温 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及高温 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别在实验室进行分辨率测试,均能够清晰成像,如图 10 所示。

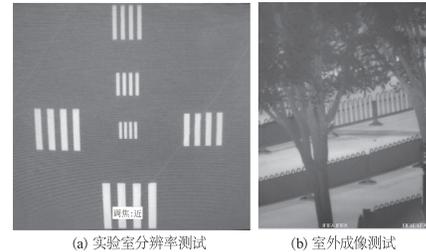


图 9 常温离轴三反成像效果

Fig. 9 Room temperature imaging photos of TMA

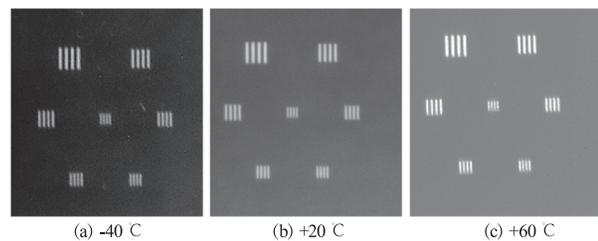


图 10 高低温离轴三反成像效果

Fig. 10 High and low temperature imaging photos of TMA

5 结论

本文介绍了一种用于红外成像领域的离轴三反系统光机一体化设计方法,包括光学设计、镜片无热化设计、消应力设计、轻量化设计等。该方法以精密数控加工技术为工艺基础,解决了系统在批量生产中存在生产效率低、产品一致性差、抗振动和无热化等工程化要求高的问题。该方法确定的加工精度能够满足红外成像系统的精度要求,对于红外成像系统具有普适性。通过在不同温度下的实验测试,验证了设计方法的有效性。后续设计改进主要有两个方向:其一是在设计中引入自由曲面,进一步扩大视场角、缩小尺寸重量;其二是通过改进加工工艺、更换镜片基底材料等手段提高面型加工精度、将使用波段向可见光波段进一步扩展。

参考文献:

- [1] Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Research of broad width off-axis three mirror optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 722002. (in Chinese)
林晶, 崔庆丰, 朱浩. 宽幅离轴三反光学系统研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 722002.
- [2] Liu Xiaomei, Xiang Yang. Research and design of telecentric off-axis three-mirror system with real entrance pupil

- [J]. Acta Optical Sinica, 2011, 31(11): 1122002. (in Chinese)
- 刘晓梅, 向阳. 具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1122002.
- [3] Sha Wei, Chen Chengzheng, Xu Yanjun, et al. Integrated primary and tertiary mirror components from common base line of off-axis TMA space camera [J]. Opt. Precision Eng, 2015, 23(6): 1612 - 1619. (in Chinese)
- 沙巍, 陈长征, 许艳军, 等. 离轴三反空间相机主三镜共基准一体化结构[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1612 - 1619.
- [4] Li Yuang, Li Yan, He Yulan, et al. Design of compact freeform off-axis three-mirror system [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(6): 780 - 784. (in Chinese)
- 李元, 李艳, 何玉兰, 等. 紧凑型自由曲面离轴三反系统设计[J]. 应用光学, 2015, 23(6): 1612 - 1619.
- [5] Zhang Feng. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror [J]. Opt. Precision Eng, 2010, 18(12): 2557 - 2563. (in Chinese)
- 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.
- [6] Yang Xiaofei, Han Changyuan. Study on decision of alignment priority using mirror tolerance in a three mirror off-axis optical system [J]. Optical Technique, 2005, (2): 173 - 176. (in Chinese)
- 杨晓飞, 韩昌元. 利用离轴三反镜光学系统确定各镜的装调公差[J]. 光学技术, 2005, (2): 173 - 176.
- [7] Xie Qiming, Yang Jing, Xu Fang, et al. Manufacturing and test technology for metal aspherical reflector [J]. Infrared Technology, 2015, 37(2): 119 - 123. (in Chinese)
- 谢启明, 杨静, 徐放, 等. 金属非球面反射镜的加工和检测技术[J]. 红外技术, 2015, 37(2): 119 - 123.
- [8] Wang Xiaokun, Xue Donglin, Zhang Xuejun. Fabrication and testing of large aspheric system based on common reference [J]. Opt. Precision Eng, 2018, 26(4): 743 - 748. (in Chinese)
- 王孝坤, 薛栋林, 张学军. 大口径非球面系统的共基准加工与检验[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 743 - 748.
- [9] Liu Xianlei, Zhang Xiaodong, Xu Hangyu, et al. Machining error analysis of freeform surface off-axis three-mirror system based on optical performance evaluation [J]. Acta Optical Sinica, 2017, 37(8): 0812005. (in Chinese)
- 刘现磊, 张效栋, 徐航宇, 等. 基于光学性能评价自由曲面离轴三反系统加工误差分析[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0812005.
- [10] Li Zongxuan, Xing Lina, Xie Peng. Design of the $\Phi 330$ mm primary mirror assembly of spaceborne video camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 18 - 23. (in Chinese)
- 李宗轩, 邢利娜, 解鹏. 视频空间相机 $\Phi 330$ mm 口径主镜组件设计[J]. 光子学报, 2016, 45(7): 18 - 23.
- [11] Li Quanchao, Li Lei, Tan Songnian, et al. Design and analysis for large aperture primary aluminum mirrors [J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(3): 37 - 341. (in Chinese)
- 李全超, 李蕾, 谭淞年, 等. 大口径铝合金主反射镜设计与分析[J]. 应用光学, 2016, 37(3): 37 - 341.
- [12] Chen Hongda, Chen Yonghe, Shi Tingting, et al. Lightweight and mounting design for primary mirror in space camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 535 - 540. (in Chinese)
- 陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间反射镜的轻量化及支撑设计研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 535 - 540.