

双波段共口径成像系统光机设计与分析

程志峰¹, 刘福贺¹, 荀显超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. 空军航空大学飞行基础训练基地基础部, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了克服机载光电有效载荷(可见光摄像机和红外热像仪)各自独立、焦距过短的特点, 着重对可见光/红外共口径系统关键技术进行了研究。采用可见光、中波红外双波段共用主次镜的光学结构, 可见光和红外焦距分别为 1 500 mm 和 750 mm。选用合适的光学材料、合理的支撑方式, 对系统反射镜支撑组件进行了静力学、动力学建模, 优化了结构形式。采用光机热集成分析方法, 指导、评价和优化光机系统设计过程, 提高结构固有频率, 增强系统热稳定性适应范围。系统结构设计基频大于 200 Hz, 在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 均匀温变工况和重力作用下, 反射镜面形 PV 值小于 $\lambda/10$, RMS 值小于 $\lambda/40$, 光学系统传递函数(MTF)达到 0.38。结果表明, 采用该方法设计的光机结构固有频率高, 重力及热耦合变形、抗振性能等方面均能满足要求, 系统具有良好的成像质量。

关键词: 双波段共口径; 柔性支撑; 力热耦合分析

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3366-07

Opto-mechanical design and analysis of dual-band sharing aperture imaging system

Cheng Zhifeng¹, Liu Fuhe¹, Xun Xianchao²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Basic Department of Basic Flight Training Base, Air Force Aviation University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the airborne photoelectric payloads (visible light cameras and infrared thermal imager), which has too short focal length and independent with each other, the visible light/infrared sharing aperture system key technology were studied. With visible light and medium wave infrared dual band sharing the primary and secondary mirror, the optical system focal lengths were 1 500 mm and 750 mm respectively for the visible light and infrared wave. By choosing appropriate optical material and the reasonable support method, the system reflector support component's static and dynamic models were designed, the structure form was optimized. The thermal-structural-optical integrated analysis method was used to guide, evaluate and optimize the opto-mechanical systems design process, improve the natural frequency of the structure and enhance thermal stability range. The fundamental frequency of the structure is greater than 200 Hz, the surface precision of the system reflector

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-13

基金项目: 国家自然科学基金-青年科学基金(61405192); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所重大创新资助项目(Y3CX1SS14C); 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室开放基金(Y3HC1SR141)

作者简介: 程志峰(1979-), 男, 副研究员, 主要从事光电仪器结构设计及优化分析等方面的研究。Email: chengzhif@163.com

reaches PV of $\lambda/10$ and RMS of $\lambda/40$. The optical system modulation transfer function (MTF) reaches 0.38 under influence of deadweight and uniform temperature change of $\pm 5^\circ\text{C}$. The results indicate that the proposed design can meet the requirements of high structure natural frequency, the gravity and thermal coupling deformation, vibration resistance, etc, and the system has good imaging quality.

Key words: dual-band sharing aperture; flexible support; thermal-mechanical coupled analysis

0 引言

机载光电侦察系统性能水平是提高现代军机预警、侦察和打击效能的决定性因素,这些系统的有效载荷正朝着长焦距、多波段和宽收容等方向发展,同时高精度稳定并集成了先进传感器和高级图像处理算法,具有远距离、高分辨成像、高精度定位及图像融合、拼接、增强、稳像等功能。国内装载于光电侦察监视预警平台的可见光电视和红外热像仪大多是各自独立的一套系统,焦距本身也大多较短,二者之间的光轴不平行度需要较为复杂的标校且后期并不稳定,最为关键的是多个有效载荷引起光电侦察平台总系统具有较大的体积和重量,即荷载比较低。因此,共口径双光谱关键技术是一个需要重点研究的方向。

国内对双光谱、共口径成像系统方面的研究还非常少,对电视摄像和红外成像共口径、轻型化设计技术,共用窗口及主次镜系统的光机热集成仿真设计等关键技术都没有进行系统化研究。相关领域的研究大多局限于个别单元技术,例如多光合一镀膜工艺性研究、光学窗口一体化热设计等方面。昆明物理研究所的谢启明对电视、激光和红外三波段减反膜技术进行了研究^[1],对比了国内外在三个波段镀膜工艺、镀膜材料等关键技术方面存在的差距;中国科学院光电技术研究所的廖靖宇针对航空相机物镜动态进行了光机热分析与设计;中国科学院长春光机所的李延伟^[3]针对航空遥感器光学窗口进行了光机热一体化设计;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的刘巨针^[4]对空间相机光机热集成设计分析及关键技术进行了研究综述,介绍了光机热集成设计的典型流程。国外在该领域已经具备非常成熟的技术,在 MTS-B 多光谱成像系统和 MX-20 超远距多光谱成像系统中都装备有可见光/和红外双波段成像系统,挂载于美国“捕食者”无人机和 P-8A 海

神反潜机中得到了实际的应用,其光学成像系统采用共享主次镜的方式,有效地增大孔径和焦距,实现了远距识别的功能^[5]。

文中针对双光谱共口径成像系统进行了光机热集成仿真分析与设计,重点对灵巧型双光谱光学系统一体化设计、主次镜支撑结构优化设计、力热耦合对面形影响等方面进行了综合性研究,对系统进行了实际的测试实验及外场成像实验。

1 系统指标及难点分析

1.1 技术指标

这个系统需要兼顾可见光和中波红外两个波段,具体的技术指标要求如表 1 所示。

表 1 技术指标要求

Tab.1 Technical specifications

Serial number	Parameter	Value
Visible light	Working band/ μm	0.4-0.75
	Focal length/mm	1 500
	Viewing angle/ $^\circ$	0.57 \times 0.57
Infrared	Working band/ μm	3.6-4.8
	Focal length/mm	750
	Viewing angle/ $^\circ$	0.7 \times 0.6
1	Weight/kg	≤ 15
2	Working temperature range/ $^\circ\text{C}$	-40-+60
3	Temperature difference/ $^\circ\text{C}$	± 5

1.2 指标分析

由对表 1 的指标分析可知,在光学、结构和热设

计方面给出了比较明确的要求。

(1) 光学系统涵盖两个波段,焦距较长,需要保证成像质量良好,采用双波段共口径的光学设计能够减小光学载荷体积和重量。

(2) 光机结构设计需要考虑材料选择、支撑结构形式选择以及力热耦合作用下镜面变形的分析,尤其需要满足主次镜镜面变形的要求,并且在力热耦合作用下整机传函值在可接受范围之内。

系统设计包含了光机热三个方面,光学设计本身对结构设计提出了主次镜面形精度的保证要求,结构设计依据此约束条件进行针对性设计,并根据力热耦合分析结果确定了温控范围。

2 光学系统设计

双波段共口径成像系统在光学设计方面,充分考虑透射式结构易于实现连续变焦宽视场,反射式结构易于实现可见/红外长焦距小型、轻量化设计,并能保证较高成像质量的特点。将两者有效集成,在有限的空间内,实现可见/红外双波段成像系统一体化成像,同时最大限度地减小系统的体积和重量。

在实际设计过程中,主要采用折反式结构,可见/红外共口径方案,通过分色棱镜分光,后接透射式子成像系统,成像质量接近衍射极限,实现可见/红外双波段一体、小型、轻量化一体化设计。

采用同轴一次成像结构,可见/红外通过共用一个卡赛格林式反射物镜,主镜为抛物面,次镜为双曲面。主镜内侧位置的分光平板反可见光、透中波红外,分光平板材料为 Silicon,在一次成像面后各自后接一个透射式子成像系统,实现长焦距、大口径、双波段成像。利用平面反射镜将光路折叠,进一步压缩系统体积。实际设计中采用二元光学和消色差复合透镜组合进行系统色差和二级光谱的校正,红外波段透镜材料选用 Si 和 Ge,可见光波段透镜材料选用 K9、BAF5、FK61 和 TF3 等。系统具有结构紧凑、体积小、重量轻、加工难度低等特点。

具体设计参数:可见光电视长焦距为 1 500 mm,相对孔径为 1:6,对角线视场 $2\omega=0.82^\circ$,中波红外的长焦距为 750 mm,相对孔径为 1:3,对角线视场 $2\omega=1.2^\circ$,通光口径均为 $\Phi 250$ mm。具体空间布局如图 1 所示。成像质量在 0.7 视场内接近衍射极限。

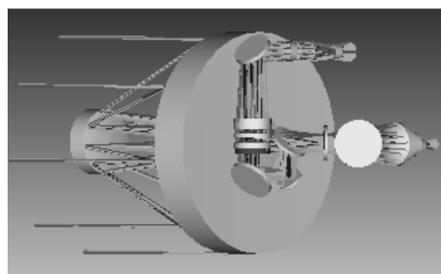


图 1 光学系统布局

Fig.1 Optical system layout

图 2~图 4 分别是可见光 MTF 曲线、可见光点列图和可见光能量集中度曲线。由其可知,传递函数

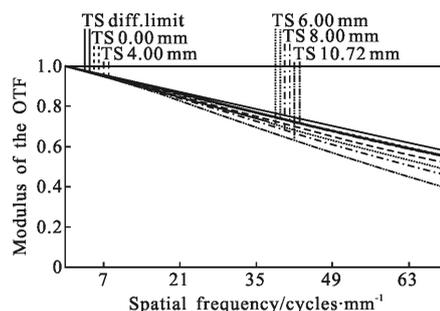


图 2 可见光 MTF 曲线

Fig.2 Visible light MTF curve

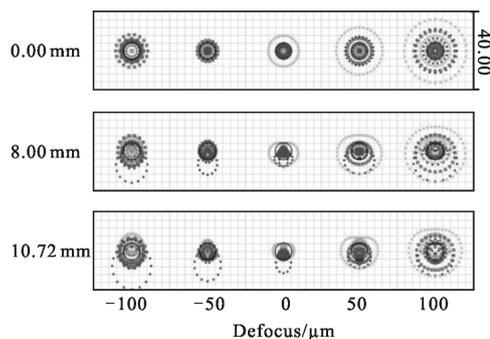


图 3 可见光点列图

Fig.3 Visible light column chart

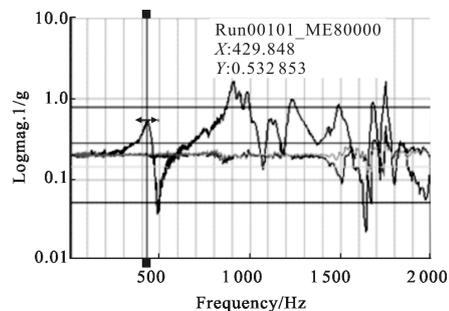


图 4 可见光能量集中度

Fig.4 Visible light energy concentration

高于衍射极限的 80%,从成像点的几何形状来看,像点的对称性比较好。从能量集中度曲线和弥散斑直径来看,整个视场内像点能量都比较集中,80%能量都集中在 2×2 个像元内,成像质量优异。

中波红外光学系统光学传递函数的计算波长为 3.7 μm、4.25 μm、4.8 μm,主波长为 4.25 μm,权重 1:1:1。探测器像元尺寸为 20 μm×20 μm,特征频率为 25 lp/mm。光学传函曲线如图 5 所示,图中虚线为衍射极限。从图中可以看出,各空间频率、各视场的 MTF 值都很高,而且非常接近衍射极限。中波红外光学系统的点列图如图 6 所示;能量集中度曲线如图 7 所示。

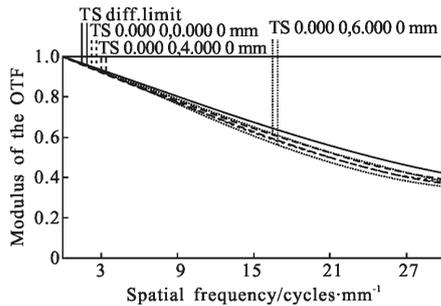


图 5 红外 MTF 曲线

Fig.5 Infrared MTF curve

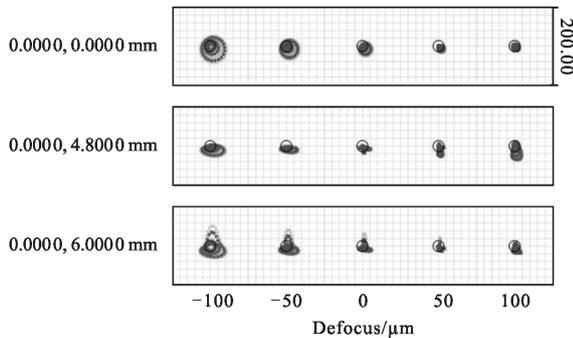


图 6 红外光点列图

Fig.6 Infrared column chart

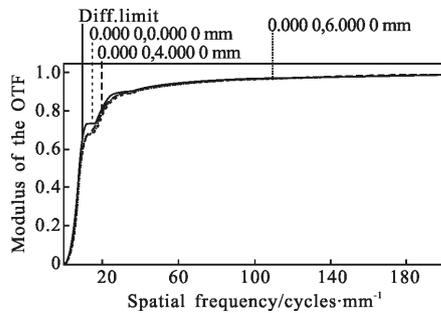


图 7 红外能量集中度

Fig.7 Infrared energy concentration

从成像点的几何形状来看,像点的对称性比较好。考虑像差和衍射的共同作用,从能量集中度曲线和弥散斑直径来看,整个视场内能量都比较集中,全视场内基本一致,80%能量集中在 2×2 个像元以内。

中波红外光学系统的像差已经校正到衍射极限,因此能量集中度主要受限于衍射极限,像差的作用较小。

光学系统设计的最大特点是将焦距分别为 1500 mm 和 750 mm 的可见光和红外波段共用主次镜,从而将 2 个波段的载荷集合到一起,系统布局紧凑,有效地减小了载荷所占空间。

对于共用的主反射镜,其面型精度对系统整体的成像质量影响最大,结合以往的经验以及误差分配关系,给出光机结构设计的约束条件:主次镜组件结构基频大于 200 Hz,在 ±5 °C 温度范围内,反射镜面形 PV 值小于 λ/10(63.2 nm),RMS 值小于 λ/40(15.8 nm)(λ=632.8 nm)。

3 光机结构设计与分析

根据光学设计的结果进行了结构设计,外形尺寸(长宽高)为 480 mm×400 mm×340 mm,主要包括主次镜组件、可见及红外前固定组、可见及红外调焦组件、可见及红外探测器组件和控制电路,完成自动调焦以及焦距实时输出等功能。其中可见及红外透镜组通过 Z 向及 X 向调整垫、Y 向滑槽与支撑板连接,适当修磨调整垫、移动滑槽可以调节后固定组与主次镜的轴向及偏心、倾角等位置关系,满足光学设计要求。光机结构三维图如图 8 所示。

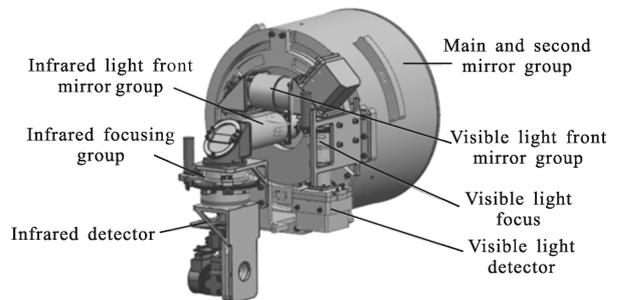


图 8 光机载荷三维图

Fig.8 Opto-mechanical payload three dimensional figure

3.1 材料的选择

根据现阶段反射镜设计、成型、加工、装配的技术成熟程度,反射镜材料性能应满足比刚度大,导热

率高,同时材料本身具有优良的稳定性,并与反射镜支撑结构材料线膨胀系数具有很好的匹配性能。

综合考虑光学元件的机械性能、线膨胀系数、经济合理性等因素,反射镜、柔性支撑和背板材料分别选用碳化硅、铁镍合金(4J32)和铸造钛合金(ZTC4)材料。3种材料的属性如表2所示。

表 2 材料属性

Tab.2 Material properties

Material	Density / $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Modulus of elasticity /GPa	Poisson's ratio	Linear expansion coefficient、 / 10^{-6} K^{-1}
Silicon carbide	3.05	400	0.29	0.55
Titanium alloy	4.5	118	0.29	8
Iron nickel alloy	8.3	145	0.28	0.54

3.2 支撑方式确定

常用的反射镜支撑方式主要有周边支撑、中心支撑和背部支撑3种形式^[6-10]。中心支撑大多采用中心环定位,结构简单,适于较小口径的反射镜。背部支撑适用于较大口径的反射镜,通过反射镜背部的支撑点将重力分配给支撑结构,能够有效降低重力对面形精度的影响。周边支撑将反射镜边缘与镜座通过胶粘连接到一起,结构简单易行。

该系统中主反射镜的支撑联接面包络尺寸为 $\Phi 272 \text{ mm}$,口径较小,且中心有通光要求,同时考虑到主镜支撑结构与支座的连接,选择周边支撑结构。反射镜组件与外固定框架的连接在结构设计方面需要考虑尽可能远离反射镜镜面,这样可有效减小镜面面形的变化。反射镜自身一般通过整体镜框来支撑,二者之间在加工时留出适当的间隙,填充硫化硅橡胶,至少固化72h后,组合成一个整体再对反射镜进行精加工和镀膜。

3.3 柔性支撑设计

柔性设计主要是对其参数的设计,需要辅助以仿真手段进行事先验证,必要的时候需要做出试验件进行摸底,方可得到柔性适宜的支撑件,最终方可兼顾动态刚度与面形误差。

柔性支撑的结构设计由上下两个圆环组成,二者口径大小有一定差别,与反射镜胶粘的上圆环相

对小一些,如图9所示。二者通过三个柔性铰链连接。反射镜背部与上圆环内径胶粘连接,下圆环通过螺钉与连接筒连接在一起。柔性铰链径向自由度低于其他方向自由度,可以产生径向方向的微小变形,温度应力会得到释放,这样装配及热应力不会直接传递到反射镜上,提高镜面的面形精度。

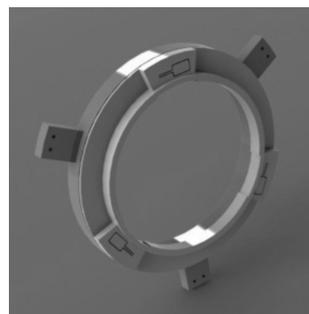


图 9 柔性支撑

Fig.9 Flexible support

3.4 力热耦合分析

表3给出了主反射镜在重力和 5°C 温升共同作用下的光学性能和结构强度^[11-12]。

表 3 主反射镜面形精度

Tab.3 Main reflection mirror surface shape

Item	G+5 $^\circ\text{C}$	Tolerance
RMS/nm	6.2	15.8
PV/nm	33.7	63.2
Rigid body displacement $\Delta X/\mu\text{m}$	1.3	20
Rigid body displacement $\Delta Y/\mu\text{m}$	2.3	20
Mirror angle $\theta_x/(\text{''})$	0.4	20
Mirror angle $\theta_y/(\text{''})$	1.9	20

由表可知,在重力和 5°C 温升共同作用下,结构的PV值为33.7nm,远小于系统要求的63.2nm,系统RMS值为6.2,也在允差15.8nm之内,并且,反射镜刚体位移和镜面倾角都在允差范围内,整体满足光学成像要求。

3.5 动力学分析

航空环境恶劣,有效载荷在载机上受到较大的振动环境影响,为了减弱载荷振动,提高成像质量,

对载荷动态特性有一定要求, 其一阶固有频率应高于 200 Hz。分别对连接筒两侧与内框架连接处施加固定约束, 对主镜组件进行模态分析, 得到结果如表 4 所示。

表 4 模态分析结果

Tab.4 Mode analysis result

Order number	1	2	3	4	5
Natural frequency/Hz	241.7	241.8	252.9	300.1	339.6

组件一阶模态固有频率 241.7 Hz, 振动方向为反射镜绕 X 轴摆动, 二阶模态固有频率 241.8 Hz, 方向为绕 Y 周摆动。组件一阶频率大于要求的 200 Hz, 满足要求。

3.6 系统传函

利用有限元软件进行力热耦合分析, 主要考虑在自重和 5 °C 温差下反射镜的面形。将分析得到的结果利用 Sigfit 软件进行后处理, 去掉刚体位移后方可得到反射镜面形拟合结果^[13]。

将拟合数据及力学、热学影响分析数据输入光学设计软件 Zemax 中, 得到传递函数曲线如图 10 所示。系统在 20 °C 初始温度及重力作用下, 70 线对最

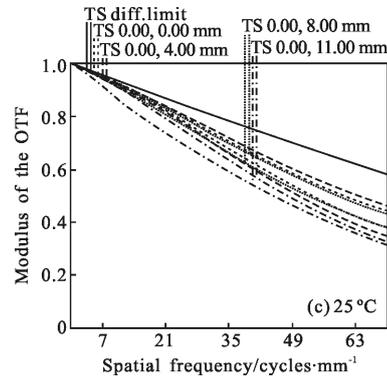


图 10 传函曲线

Fig.10 MTF curve

低值为 0.38, 在 ±5 °C 温度变化时传函为 0.33 和 0.32, 下降较少, 表明系统在力热作用工况下, 柔性支撑有效地吸收了变形, 主次镜面形精度高, 系统整体环境适应性好。

4 结论

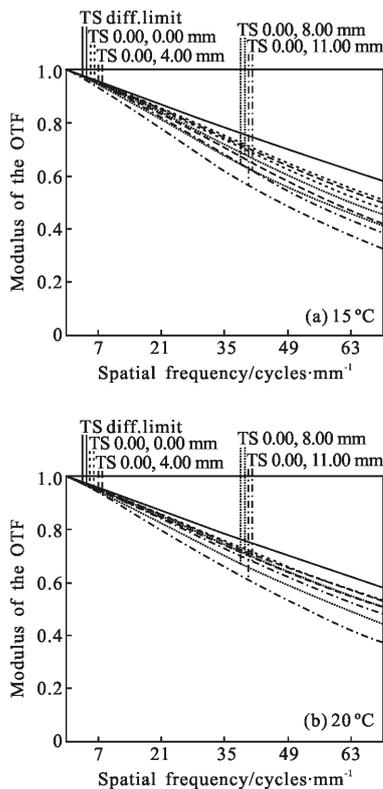
采用了可见光/中波红外双波段共口径的光学结构, 与分口径有效载荷相比, 光学口径加大, 焦距大幅提升, 从而提高了载荷自身对目标的识别距离。共口径长焦距的系统特点, 对反射镜面形要求很高, 因而针对反射镜材料选择、支撑方式选取进行了深入研究。并结合仿真分析, 在力热耦合工况下, 反射镜面形精度在允差范围内, 同时具有良好的动态刚度, 可保证系统在动力学环境下具有良好的成像质量。

参考文献:

[1] Xie Qiming, Pan Shuncheng. Multi-band antireflection coatings for television, laser and infrared applications [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(7): 383-390. (in Chinese)
谢启明, 潘顺臣. 电视、激光和红外三波段减反膜技术[J]. 红外技术, 2013, 35(7): 383-390.

[2] Liao Jingyu, Gao Xiaodong. Dynamic thermal/structural/optical analysis and design for aerial camera lens system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(7): 36-40. (in Chinese)
廖靖宇, 高晓东. 航空相机物镜动态光机热分析与设计[J]. 光电工程, 2010, 37(7): 36-40.

[3] Li Yanwei, Yang Hongbo. Thermal/structural/optical integrated design for optical window in aerial remote sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2102-2106. (in Chinese)
李延伟, 杨洪波. 航空遥感器光学窗口光机热一体化设计



- [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2102-2106.
- [4] Liu Ju, Xue Jun. Review of research on integration design of structural, thermal and optical analysis with key technique of space camera [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(3): 422-427. (in Chinese)
刘巨, 薛军. 空间相机光机热集成设计分析及关键技术研究综述[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 422-427.
- [5] Sehyun Seong, Jinhee Yua. Imaging and radiometric performance simulation for a new high performance dual band airborne reconnaissance camera [C]//SPIE, 2009, 730705: 1-13.
- [6] Li Wei. Technology studying on the supporting structure between primary mirror and second mirror on the space camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
李威. 空间相机主次镜间支撑结构技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [7] Wu Xiaoxia, Li Jianfeng. Active support system for 4 m SiC lightweight primary mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2451-2457. (in Chinese)
吴小霞, 李剑锋. 4 m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2451-2457.
- [8] Zhang Limin, Wang Fuguo. Application of Bipod to supporting structure of minitype reflector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 438-443. (in Chinese)
张丽敏, 王富国. Bipod 柔性结构在小型反射镜支撑中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 438-443.
- [9] Chen Hongda, Chen Yonghe. 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. 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.
- [10] Guo Wangcun, Wu Qingwen. Optimum design of active supporting system for a 2 m primary mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1480-1484. (in Chinese)
郭万存, 吴清文. 2 m 主镜主动支撑优化设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1480-1484.
- [11] Wang Yang, Zhang Jingxu. Optimization and analysis for the support of the large aperture telescope primary mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(1): 107-113. (in Chinese)
王洋, 张景旭. 大口径望远镜主镜支撑优化分析[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 107-113.
- [12] Fan Yanchao, Chai Fangmao. Lightweight design of primary mirror with large aperture for optical remote sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(8): 123-128, 134. (in Chinese)
樊延超, 柴方茂. 大口径光学遥感器主反射镜轻量化方案设计[J]. 光电工程, 2012, 39(8): 123-128, 134.
- [13] Yang Xianwei, Wu Qingwen. Thermal design of space optical remote sensor [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 139-146. (in Chinese)
杨献伟, 吴清文. 空间光学遥感器热设计[J]. 中国光学, 2011, 4(2): 139-146.