

风云四号气象卫星辐射成像仪在轨温度环境适应性

王淦泉¹, 沈霞¹, 王伟成¹, 王保勇¹, 胡炳亭²

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 上海卫星工程研究所空间机热一体化技术实验室, 上海 200240)

摘要: 风云四号是地球静止三轴稳定平台气象卫星, 装载其上的辐射成像仪受剧烈的外热流日周期和年周期变化的影响, 扫描机构和主光学系统等关键部件的温度每天波动可达 40℃ 以上. 光学及支撑结构如何适应剧烈的环境温度变化, 并保证良好的像质, 是地球静止三轴稳定平台遥感仪器系统设计的国际性难题. 多种特性材料的匹配性设计以及适当支撑结构形式的采用, 是避免和减少因温度大幅波动引起的光机变形及成像质量下降的良好策略. 在轨数据表明, 辐射成像仪克服了昼夜温差大的不利影响, 敏感恒星时的弥散斑几乎仅覆盖一个像素, 而且正午和子夜结果差别不大.

关键词: 地球静止三轴稳定平台; 辐射成像仪; 温控技术; 热适应技术; 恒星敏感

中图分类号: V19 **文献标识码:** A

On board adaptation of temperature of the FY-4 meteorological satellite radiation imager

WANG Gan-Quan¹, SHEN Xia¹, WANG Wei-Cheng¹, WANG Bao-Yong¹, HU Bing-Ting²

(1. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology,

Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;

2. Laboratory of Space Mechanical and Thermal Integrative Technology,

Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: FY-4 is a geostationary three-axis stable platform meteorological satellite. The radiation imager loaded on it is affected by the dramatic daily and periodic changes of the external heat flow. The temperature of key components such as the scanning mechanism and the main optical system fluctuates over 40℃ per day. How the optical and supporting structures adapt to severe environmental temperature changes and ensure good image quality is an international problem in the design of remote sensing instrument systems for geostationary triaxial stabilization platforms. The matching design of various materials and the adoption of appropriate supporting structure forms are good strategies to avoid and reduce the deformation of the optical machine and the degradation of imaging quality caused by large temperature fluctuations. The on-orbit data indicates that the radiation imager overcomes the adverse effects of large temperature difference between day and night. The diffuse plaques of sensitive stars cover only one pixel, and the noon and midnight results are not much different.

Key words: geostationary three-axis stable satellite platform, radiation imager, temperature control technology, thermal adaptation technology, star sensing

PACS: 95.40.+s

引言

地球静止卫星三轴稳定平台相比地球静止自旋

稳定平台可以装载更多的遥感仪器, 并获得了观测时间效率提高和目标驻留时间延长为主的好处. 但与此同时, 也承受了日周期变化 5 700 K 太阳辐射和

收稿日期: 2018-01-17 修回日期: 2018-05-10

Received date: 2018-01-17 revised date: 2018-05-10

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2016YFB0500101)

Foundation items: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0500101)

作者简介(Biography): 王淦泉(1962-) 男, 上海市人, 研究员, 长期从事地球同步轨道可见红外航天遥感仪器的研制. E-mail: wganquan@mail.sitp.ac.cn

4 K 冷空辐射交替作用的代价^[1-2]. 外热流的日周期性变化会引起仪器温度较大幅度的周期性波动. 相对来说, 自旋稳定平台外热流的秒周期变化引起的温度变化效应要比三轴稳定平台温和许多. 仪器温度的大幅波动, 特别是光机头部温度的大幅波动, 会导致仪器光机结构变形, 并直接影响成像质量及其稳定性. 为了获得稳定的高质量图像, 除了需要研究能减少仪器温度波动的热控技术, 还需研究能适应一定温度变化的系统技术, 特别是光机温度环境的适应性技术.

地球静止三轴稳定平台遥感仪器的热适应能力是一个国际性的难题, 是制约地球静止三轴稳定气象卫星发展的重要技术障碍. 至今也只有美国和中国独立研制并发射了相关气象卫星. 韩国和日本虽然也先后发射了同类气象卫星, 但其核心载荷——辐射成像仪均由美国研制. 美国于 1994 年发射了世界上第一颗地球静止三轴稳定气象卫星, 配置的辐射成像仪最高空间分辨率仅 1 km^[3]. 由于采用单扫描镜成像技术, 遮光罩尺寸较小, 太阳直射的能量相对较少, 引起的温度波动也相应较小. 单扫描镜方案会产生大视场像旋效应, 但在空间分辨率不高的情况下也不至于产生太明显的影响^[4]. 时隔 22 年, 美国于 2016 年 10 月又发射了第二代地球静止三轴稳定气象卫星, 配置的辐射成像仪 (ABI) 最高空间分辨率相比第一代产品提高了一倍, 达到 500 m. 我国于 2016 年 12 月也成功发射了是我国第一颗地球静止三轴稳定气象卫星——风云四号, 配置的辐射成像仪最高分辨率也达到了 500 m. 能否连续 24 小时稳定地获得高质量图像, 是地球静止轨道三轴稳定平台光学载荷是否成功的重要标志, 更是载荷热适应技术是否成功的重要标志. 图像分辨率越高, 对光机热适应技术的要求也越高. 各国对载荷如何适应剧烈变化外热流的温控技术和温度变化适应技术虽略有报道, 但技术方案描述都很简单, 更不涉及技术细节. ABI 采用了复杂先进的温控技术, 实现了接近恒温的温控目标^[5], 有力地保障了 ABI 连续 24 小时稳定地获得高质量图像. 风云四号辐射成像仪在尽可能降低仪器温度波动水平的基础上, 通过光机材料匹配组合, 以及采用适当的结构形式, 将辐射成像仪因温度波动引起的结构和光学元件变形降到了最低程度, 也获得了连续 24 小时的高质量图像和高质量的恒星敏感图像.

1 辐射成像仪的温度环境

风云四号辐射成像仪是一台要求高空间分辨率

及定位精度、高辐射分辨率及定标精度的光学遥感仪器. 辐射成像仪配置了从可见光 (0.45 μm) 至甚长波红外 (13.8 μm) 的 14 个探测波段, 其中 0.55 ~ 0.75 μm 波段光学分辨率达到 14 μrad (对应星下点 500 m 空间分辨率). 辐射成像仪采用线列阵探测器结合双扫描镜系统方案实现对地球圆盘的二维成像, 扫描镜匀速成像运动时的动态指向精度优于 1" (2σ). 与我国第一代地球静止气象卫星——风云二号不同的是, 风云四号采用了三轴稳定姿控方式, 而风云二号采用自旋稳定姿控方式. 安装在自旋稳定平台的风云二号辐射成像仪温度的日周期波动仅 1 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 但安装在三轴稳定平台的风云四号辐射成像仪的温度波动却剧烈的多. 其中扫描机构南北扫描镜支架在轨实测温度每天在 5 ~ 40 $^{\circ}\text{C}$ 范围波动, 东西扫描镜支架实测温度每天在 10 ~ 40 $^{\circ}\text{C}$ 范围波动, 扫描镜二侧轴承支架平均相对温差在轨实测小于 5 $^{\circ}\text{C}$; 望远镜镜体及支撑、后光路镜体及支撑在轨实测温度每天在 -4 ~ 17 $^{\circ}\text{C}$ 范围波动. 扫描机构和望远镜在轨相比地面光校时 20 $^{\circ}\text{C}$ 左右的温度, 增加了 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 的波动, 这是一种恶劣的温度环境. 图 1 分别是 UTC 时间 2017 年 2 月 26 日扫描支架的一天 24 小时温度变化曲线, 6 时 ~ 15 时, 辐射成像仪面对地球和冷空, 部件相对低温且平稳; 17 时 ~ 次日 1 时, 太阳逐渐进入视场, 扫描机构部件相对高温, 最高可到 40 $^{\circ}\text{C}$; 图 2 是 UTC 时间 2017 年 2 月 24 日三反射系统一天 24 小时温度变化曲线, 17 时 ~ 次日 4 时经历一个低温至高温的循环, 最低 -4 $^{\circ}\text{C}$, 最高 17 $^{\circ}\text{C}$, 且基本呈现白天低温、晚上高温的变化规律. 外热流的周期性变化是导致各部件高低温周期性变化, 及同一部件各测点呈现梯度的直接原因. 图 3 是辐射成像仪太阳高度角 -8.8 $^{\circ}$ 时, 光学入口的外热流 24 小时仿真周期性变化曲线^[6], 白天和夜晚进入遮光罩开口外端的外热流功率峰值变化超过 900 W, 进入遮光罩内端的外热流峰值变化达到 300 W. 进入光学入口的太阳辐射功率主要取决于遮光罩开口尺寸、内表面形状和吸收特性^[7]. 由于太阳相当于绕卫星转动, 除了光学入口的外热流变化, 仪器的其余外露部分也会交替经受太阳和冷空的周期性变化辐射^[8]. 只不过进入光学入口的辐射会更直接地影响仪器的温度场, 并对仪器的温度波动程度会产生决定性的作用.

2 辐射成像仪热适应技术

2.1 辐射成像仪热适应设计

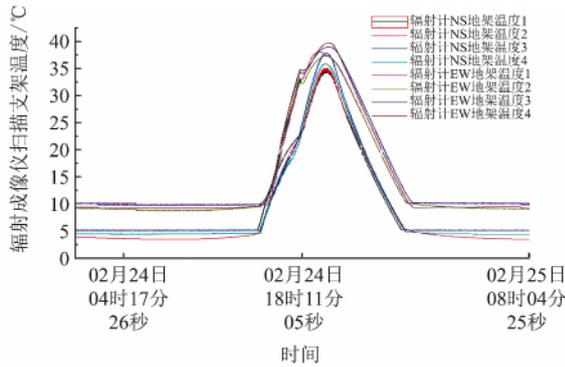


图1 风云四号辐射成像仪扫描支架太阳 - 8.8° 工况 24 小时温度曲线
Fig. 1 Temperature of the scanning frame when solar elevation angle is about 8.8°

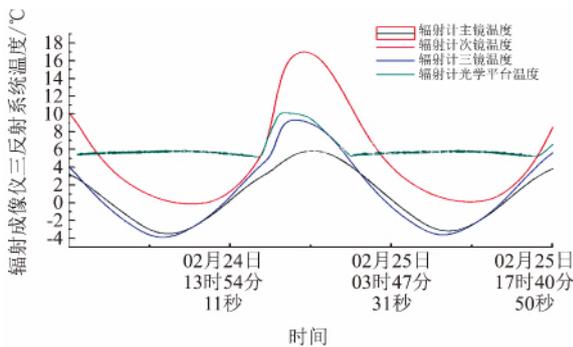


图2 风云四号辐射成像仪三反射系统太阳 - 8.8° 工况 24 小时温度曲线
Fig. 2 Temperature of the telescope when solar elevation angle is about 8.8°

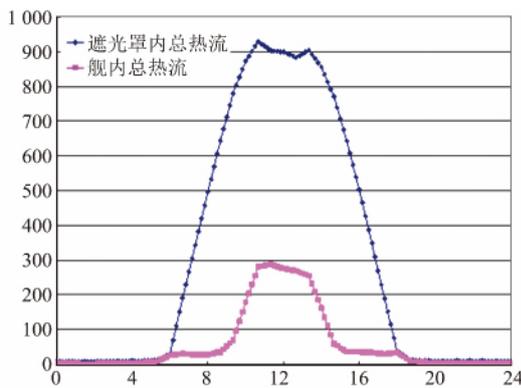


图3 风云四号辐射成像仪太阳 - 8.8° 工况 24 小时外热流曲线
Fig. 3 External heat flux of the radiation imager when solar elevation angle is about 8.8°

辐射成像仪系统设计时,除了加强热控设计和效果验证外,还在光机设计和系统设计上采取了避免和减少因温度波动引起的结构变形的有效措施.扫描机构是辐射成像仪的关键部件,它的精度将决定图像配准和定位的精度^[9].过大的支架温度梯度

将导致扫描镜转轴倾斜,不仅影响图像定位精度,而且会增大扫描镜运动的阻力矩,甚至会致使扫描转轴卡死,辐射成像仪失效^[10].同时过高的温度也会由于镜体与支撑材料不匹配导致扫描镜变形,不利于获得高质量的像质^[11-12].减少扫描镜、望远镜和其它光学镜体变形,是辐射成像仪热适应设计的重要研究内容.

系统设计考虑到辐射成像仪每天温度变化的特点,在结构和光学选材时充分考虑材料热导、热容、线胀系数等特性及其多种材料的特性匹配^[13-14],并采取特殊的结构形式消除和降低不同材料间的线胀不一致导致的温度应力^[15].

- (1) 采用低线胀系数的碳纤维复合材料做辐射成像仪箱体,以减少箱体变形对光学系统的影响^[16];
- (2) 采用高刚度高热导、低线胀系数材料做光学平台,降低三反射光学的尺寸敏感性^[17];并使光学平台与复合材料箱体隔离安装,可以进一步消除光学平台与箱体膨胀系数不一致引起的变形;
- (3) 采用柔性结构连接光学平台与三反射望远镜,隔离光学平台热变形对三反射光学的影响^[18-19];
- (4) 采用与光学平台材料一致的材料做后光路支架,降低光学系统整体的温度敏感性;
- (5) 采用一端用深沟球轴承,另一端用精密角接触轴承的轴承支撑方案,并结合弹性环抵抗扫描机构支架热变形对镜面的影响以及转轴的变形^[20].

2.2 辐射成像仪热适应试验

风云四号辐射成像仪研制过程中,重点进行了扫描机构和主光学的热适应试验以及辐射成像仪的热平衡试验,试验温度范围和梯度的原则是高于地面真空试验结果 5℃ 以上,这也是航天仪器试验的基本要求.

(1) 扫描机构温度环境适应性试验

扫描机构在常压条件下进行了南北扫描镜和东西扫描镜温度梯度试验、扫描支架温度梯度试验,扫描支架最高温度试验.其中,扫描支架极端温度高到 50℃,同时在东西扫描镜和南北扫描镜两侧形成 10℃ 的极端温度差.

图 5 是扫描支架加热试验时扫描镜面型测试原理图,点光源经平行光管后形成平行光,东西扫描镜与南北扫描镜构成自准直光路;返回光在点光源处汇聚成点像,此点像包含了平行光管、东西扫描镜、南北扫描镜的波相差,并由 4D 干涉仪检测;东西扫描镜及南北扫描镜受热、受力变形等镜面面形的变

化都会在干涉仪检测波前上反映出来。

测试设备用 Zygo 干涉仪。加热试验前,环境温度 20.8°C , rms 值为 0.11λ ; 当南北扫描镜面产生 8°C 温差梯度时,面形 rms 值为 0.12λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$); 当东西扫描镜产生 4°C 温差梯度时,面形 rms 值为 0.11λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$); 当扫描支架由室温均匀加热至 50°C , 双扫描镜面形 rms 值为 0.15λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$); 当扫描支架东西镜和南北二侧分别加热至 50°C 和 40°C , 使得东西扫描镜和南北扫描镜两侧各形成 10°C 温度差时,双扫描镜面形 rms 值为 0.12λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)。试验结果表明辐射成像仪扫描镜对温度变化表现出了很强的适应性,极端温度时的双扫描镜面形 rms 值也达到 0.15λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) 的设计要求,能够适应在轨温度环境,满足系统要求。在轨测试的结果也验证了扫描机构热适应方案的有效性。由于系统一般以 MTF 作为主要考核指标,该指标反映了多个光学元件共同作用的结果,并且 MTF 与面形精度之间并无严格、准确的对应关系,这里干涉仪测试数据主要作为相对变化的参考。

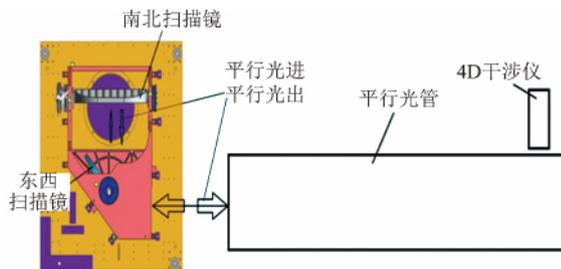


图4 辐射成像仪扫描支架加热试验扫描镜面型检测光学原理图

Fig.4 Schematic of the scanning mirror heating test

(2) 主光学系统温度环境适应性实验

主光学系统是三反射形式,视场达到 $1^{\circ} \times 0.8^{\circ}$ 。为了验证在轨适应性,也进行了温度环境适应性试验。由于平台与望远镜镜体及支撑结构的线胀系数差异较大,重点进行光学平台温度变化对三反射望远镜综合面形精度的影响试验。试验在大气环境中进行,测试了平台温度从室温 (20.5°C) 加热至 33°C 主光学系统热变形情况。测试设备用 Zygo 干涉仪,光学平台 20.5°C 时, rms = 0.159λ ; 光学平台 33°C 时, rms = 0.152λ 。试验结果表明,望远镜面形几乎不受光学平台温度影响, RMS 值变化量淹没在气流影响造成的试验误差中。对试验结果的趋势进行分析,预料望远镜能够适应 $20^{\circ}\text{C} \pm 30^{\circ}\text{C}$, 甚至更大

的温度变化环境,光学平台温度变化不会对像质产生明显影响。辐射成像仪的在轨测试结果验证了这种预测。

(3) 真空热平衡试验

为了验证热控设计的符合性,辐射成像仪专门在真空环境中进行了热平衡试验。试验在 KM5 的真空管内进行,用大口径太阳模拟器作为高温热源,并用 100K 以下真空热沉模拟太空冷背景。试验结果不仅用于验证热设计的符合性,还用于扫描机构和望远镜地面模拟温度试验的温度范围依据。

2.3 辐射成像仪在轨运行结果

风云四号(01)星入轨后,在地面站的配合下,辐射成像仪进行了仪器温控符合性试验、恒星敏感试验(用于高精度光轴修正和图像定位)、MTF 测试、定标试验等重要测试和试验。迄今为止的在轨运行测试数据表明,辐射计克服了午夜太阳直射引起的杂散和温度瞬变不利影响,实现了连续 24 小时成像的用户期望目标,满足用户要求的定标精度要求。白天恒星敏感时弥散斑几乎仅覆盖一个像素,午夜最不利时也仅仅略微增大; 500m 分辨率波段系统传函达到 0.2。优异稳定的连续 24 小时成像质量表明,辐射成像仪的在轨热适应技术取得了重大的成功。图 9 是辐射成像仪在轨恒星敏感响应曲线,响应波段是 $0.55 \sim 0.75 \mu\text{m}$, 光学瞬时视场为 $14 \mu\text{rad}$ 。图 5(a) 是正午时分(北京时间 2017 年 4 月 23 日 12 时 58 分 30 秒)的恒星敏感响应曲线,图 5(b) 是子夜时分(北京时间 2017 年 4 月 24 日 0 时 58 分 30 秒)的恒星敏感响应曲线,图中横坐标表征的是像元号,纵坐标是响应强度。图 5(a) 和图 5(b) 的强度差异是积分时间的差异所致。从图 5(a) 曲线中可以看出,辐射成像仪对恒星响应的主要能量几乎集中在第 120 号像元(该波段探测器共有 128 元),最大跨度 2 个像元; 5(b) 曲线则表明主要能量集中在第 48 号像元,最大跨度 3 个像元,二者差异很小。这个综合扫描镜、望远镜、后光路、探测器等部件系统成像结果表明,高分辨率的辐射成像仪克服了白天和夜间温度巨大差别的不利影响,获得了稳定的高质量像质。

3 结论

风云四号卫星辐射成像仪经过近一年的在轨测试,已顺利交付给了最终用户——国家气象局。辐射成像仪能连续 24 小时提供优质图像,并且能连续 24 小时稳定地获取恒星敏感数据。测试数据表明,

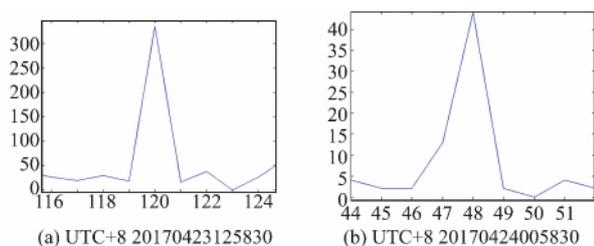


图5 风云四号辐射成像仪恒星敏感响应曲线(a) 北京时间 20170423125830 (b) 北京时间 20170424005830

Fig.5 Detector response of the radiation imager in star sensing mode (a) UTC + 8 20170423125830 (b) UTC + 8 20170424005830

尽管辐射成像仪主要光机部件的温度出现了较剧烈的波动: 扫描机构南北扫描镜支架在轨实测温度每天在 5 ~ 40℃ 范围波动, 东西扫描镜支架实测温度每天在 10 ~ 40℃ 范围波动, 扫描镜二侧轴承支架平均相对温差在轨实测小于 5℃; 望远镜镜体和支撑、后光路镜体和支撑在轨实测温度每天在 - 4 ~ 17℃ 远范围波动. 辐射成像仪依然表现出了很好的温度环境适应能力, 500 m (14 μrad) 分辨率波段系统传输函数达到 0. 2, 恒星敏感能量几乎集中在一个像元之内, 并且白天和夜间差别不大, 表明辐射成像仪的热适应技术取得了重大的成功.

References

- [1] LIU Zhen-yu, CHENG Hui-er, SUN Jing-liang. Thermal design and thermal analysis of synchronous orbit remote sensing [J]. China space science and technology(刘振宇, 程惠尔, 孙敬良. 同步轨道遥感器热设计和热分析. 中国空间科学技术), 2009, (3): 29-35.
- [2] Benny Ghaffarian, Kent Sprunger. Thermal analysis of solar interference [C]SPIE, 1994, **2812**: 259.
- [3] Kathleen A Hursen, Robert Ross, GOES imager: overview and evolutionary development [C]Proc. SPIE, 1996, **2812**: 160-173.
- [4] David E. Neuberger, James C. Bremer, Margo Mehoke. Advanced Geosynchronous Studies Imager Thermal Design [C]Proc. SPIE, 1999, **3750**: 68-78.
- [5] Paul C. Griffith, ABI's Unique Calibration and Validation Capabilities [C], 12th Annual Symposium on New Generation Operational Environmental Satellite Systems AMS Annual Meeting, 11-14 January 2016.
- [6] HU Bing-ting, XU tao, JIANG Shi-chen, et al. Thermal design of multi-channel scanning imaging radiometer [J]. Infrared technology(胡炳亭, 徐涛, 江世臣等. 多通道扫描成像辐射计热设计. 红外技术), 2011, **33**(3): 141-146.
- [7] HOU Zeng-qi, HU Jin-gang. Spacecraft thermal control technology [M]. Beijing: China science and technology press, 2007. (侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术. 北京: 中国科学技术出版社), 2007.
- [8] GUO Yong-fu. Study on the variation rule of orbital temperature parameters of geostationary satellites [J]. Spacecraft engineering, (郭永富. 静止轨道卫星在轨温度参数变化规律研究. 航天器工程), 2011, **20**(1): 76-81.
- [9] ZHANG Qiang, WANG Gan-quan, CHEN gui-lin. Study on improving image registration accuracy of fy-4 multi-channel scanning imaging radiometer [J]. Infrared technology(张强, 王淦泉, 陈桂林. 提高 FY-4 多通道扫描成像辐射计图像配准精度的研究. 红外技术), 2005, **27**(3): 223-226.
- [10] HUANG Zhen. Advanced space architecture [M]. Advanced education press, (黄真. 高等空间机构学. 高等教育出版社), 2014.
- [11] Onaka T, Salama A. AKARI: space infrared cooled telescope [J]. Experimental Astronomy, 2009, **27**(1-2): 9-17.
- [12] Mark Schwalm, Dan Dibiase, Dave Landry, Brian Rider, Virginia Ugolini. Silicon Carbide Pointing Mirror and Telescope for the Geostationary Imaging Fourier Transform Spectrometer (GIFTS) [C]//Proc. SPIE, 2005, 5868: 31-38.
- [13] LIU Tao, ZHOU Yi-ming, JIANG Yue-song. Analysis on materials and applications of foreign space mirrors [J]. Space return and remote sensing, (刘韬, 周一鸣, 江月松. 国外空间反射镜材料及应用分析. 航天返回与遥感) 2013. (5): 90-99.
- [14] James L, Bell Jr, Milutin Pavlov. Design and Analysis of a Beryllium Three-Mirror Anastigmat Telescope for the Japanese Advanced Meteorological Imager (JAMI) [C]//Proc. SPIE, 2005, **5658**: 91-102.
- [15] G. E. Zurmehly, R. A. Hookman. Thermal and structural design constraints for radiometers operating in geostationary orbits [C]Proc. SPIE, 1992, **1693**: 304-312.
- [16] GUO Quan-feng. Study on structural stability of coaxial SLR space camera [D]. Graduate school of Chinese academy of sciences, (郭权锋. 同轴三反空间相机结构稳定性研究. 中国科学院研究生院), 2012.
- [17] ZHANG li-min, WANG Fu-guo, AN Qi-chang, et al. Application of Bipod flexible structure in small mirror support [J]. Optical precision engineering (张丽敏, 王富国, 安其昌等. Bipod 柔性结构在小型反射镜支撑中的应用. 光学精密工程), 2015, **23**(2): 438-443.
- [18] TAN Jin-guo, HE Xin, LIU Qiang. Small mirror peripheral support technology [J]. Laser and infrared (谭进国, 何欣, 刘强. 小型反射镜周边支撑技术. 激光与红外), 2011, **41**(10): 1136-1139.
- [19] YU Jing-jun, PEI Xu, BI Shu-sheng, et al. Research progress of flexible hinge mechanism design methods [J]. Journal of mechanical engineering (于靖军, 裴旭, 毕树生等. 柔性铰链机构设计方法的研究进展. 机械工程学报) 2010, **46**(13): 2-13.
- [20] CHEN Zhao-bin, GOU jin, WANG Bin, et al. Structural design and optimization of pendulum IRST reflector bracket [J]. Journal of Chinese academy of sciences university, (陈兆兵, 郭劲, 王兵等. 摆镜式 IRST 反射镜支架结构设计及优化. 中国科学院大学学报), 2011, **28**(2): 155-160.