

文章编号 1004-924X(2015)10-2870-07

双视场多通道成像仪的光机结构

于向阳

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对环境适应性和探测精度的要求,设计了双视场、多通道成像仪的光机结构,以获取高空间、时间覆盖和高垂直分辨率的大气图像和数据信息。根据光学探测和光学定位精度的要求,设计的光学系统结构以及对应的机械结构采用了天底和临边多方位观测模式。该结构通过柔性系统保证了成像仪在 45°C 的温差范围内能够正常工作。由于温差较大,系统中构建了 CCD 探测器裸片的精密定位与散热系统。为验证光机结构设计正确性,对集成后的成像仪进行了光学系统性能检测。检测实验显示,边界温度状况下 3 个光学通道的分辨率均优于 4 km,达到对地球临边和天底大气进行探测的需求。成像仪的质量为 8.3 kg,其一阶基频大于 100 Hz,最大应力为 52.5 MPa。该光机结构设计合理、紧凑,满足刚度、强度以及目标探测要求,适合空间遥感的应用。

关键词:大气遥感;双视场多通道成像仪;光机结构;临边与天底观测

中图分类号:TP752;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152310.2870

Opto-mechanical structure of imager with two field of views and multiple channels

YU Xiang-yang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yu_ciom@163.com

Abstract: To get the atmosphere images and data information with high spatio-temporal coverages and high vertical resolution, an opto-mechanical structure for the imager with two field of views and multiple channels was designed based on the environmental adaptability and accuracy requirements. In consideration of detection and position accuracy, a nadir and limb multiple-azimuth observation model was used in the optical system and corresponding mechanical structure. A flexible system was taken to allow the imager to operate at a temperature range of 45 °C normally. Duo to a larger temperature range, the precision positioning and cooling system for a CCD bare chip was constructed. To verify the feasibility of the opto-mechanical structure, the performance of the optical system in the imager was tested. The experimental results indicate that the spatial resolutions of the three optical channels are all better than 4 km under boundary temperature, which shows the imager can be used in limb and nadir detections. The imager shows its mass is 8.3 kg, the first order frequency is greater than 100

收稿日期:2015-01-20;修订日期:2015-02-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41074126)

Hz, and the max stress is 52.5 MPa. The designed opto-mechanical structure is reasonable and compact, the opto-mechanical structure satisfies the requirements of strength, stiffness and target detection, and it is suitable for the space remote sensing.

Key words: atmospheric sensing; imager with two field of views and multiple optical channels; opto-mechanical structure; limb and nadir detection

1 引言

卫星遥感具有空间覆盖率高、时间连续和任务多样性等优势,是目前国际上空间遥感探测的主要手段,国内外都进行了相关的研究并研制出了一系列的星载遥感仪器,如 GMT、LLCD、MIRIS、OMI、SCIAMACHY、SPICAM、SBUS、极紫外相机以及声光可调谐滤波器成像光谱仪、凸面光栅成像光谱仪等,它们为遥感领域的发展奠定了理论和应用基础^[1-8]。

光机结构设计是将多学科技术(光学、电子学、环境工程学、材料和结构力学等)紧密集成在一起的过程,目的是对光学、电子学元器件进行定位和支撑以便于装配和检验,确保光学系统在空间热环境作用下所引起的视轴漂移、波前差变化、光谱漂移等在许用范围之内,大功耗电子元器件和 CCD 焦面在较宽的空间温度环境下能够正常工作,设备在发射以及在轨工作等复杂环境条件下的成像质量良好,设计出的结构在保证精度的同时能具有良好光机结构稳定性和优良的环境适应性^[5,9-10]。该成像仪采用非制冷的 CCD 探测器裸片进行成像,需要在固定成像仪的安装舱壁温度为 $-10\sim+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内能够正常工作,完成对探测区域 360° 范围内的大视场、多方位有效观测,且要求质量小、体积小、结构紧凑。

对大气的遥感探测有天底、掩星(掩日/月)和临边 3 种观测方式,但目前利用这些观测模式所形成的观测区域多为带状、视场小,无法满足探测的需求^[4];而且成像用的 CCD 探测器为非制冷的裸片,无对应的精密定位和散热措施,难以直接用于空间光学遥感系统。另外,该成像仪光学系统要能够在较大的温差范围内正常工作。因此,本文基于遥感设备的技术指标和探测需求,开展了对应的光机结构设计,研制出多方位、大视场多通道的成像仪,完成了对目标大气进行临边多方位探测和天底探测。首先对具有双视场、多光学

通道的成像仪进行了光机结构设计,在此基础上,对集成后的成像仪进行了环境试验和试验前后光学性能的空间分辨率检测,用以验证光机结构设计的合理性,保证成像仪对目标探测的有效性。

2 光机结构设计

2.1 光学方案设计

在光学系统设计中,视场角 ω 、焦距 f 、以及相对孔径 $F(f'/D)$ 是光学系统设计的主要技术参数^[11],由于相对孔径越大,灵敏度就越好,但加工难度随之也加大,式(1)给出了物镜的质量因数 C_m 与 f' 、 ω 和 D (入瞳直径)的关系, C_m 越大表明对设计、加工水平的要求越高:

$$C_m = \frac{D}{f'} \cdot \tan \omega \cdot \sqrt{\frac{|f'|}{100}} \quad (1)$$

由于空间大气遥感探测的特殊需要,该成像仪的光学系统需有一个双视场(中心视场和临边视场),表 1 所示为成像仪的光机系统需满足的技术指标。

表 1 主要技术指标

Tab. 1 Main technique requirements

序号	项目	指标
1	整机质量/kg	≤ 9
2	分辨力/km	4
3	基频/Hz	≥ 100
4	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	$-5\sim+30$
5	中心视场/ $^{\circ}$	10
6	环形视场/ $^{\circ}$	$140\sim146$

依据探测视场要求、探测器尺寸、以及光学零件的加工和装调水平,最终其光学结构如图 1 所示。在光学系统入光口处,临边光线斜入射到反射镜的反射面,经反射后再进入透镜组,最终在 CCD 焦面上形成临边视场(图中的正六边形区域);中心光线则不经光学系统反射镜反射而直接进入透镜组在 CCD 焦面上形成中心视场(图中的

中心的圆形区域)。成像仪具有 3 个光学通道且采用共同的光学系统,通过转动滤光片轮,实现不同通道的中心波长的转换。

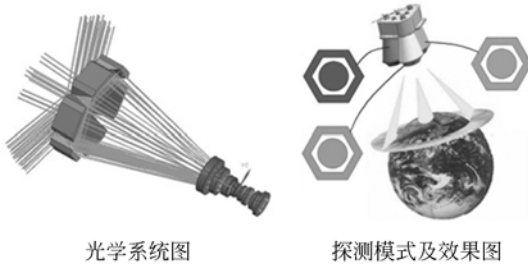


图 1 光学结构图

Fig. 1 Graphs of optical structure

2.2 结构设计

该成像仪主要由反射镜组件、滤光轮组件、透镜组件、CCD 焦面组件以及壳体组件等组成,图 2 所示为对应的光机结构示意图。由于成像仪要在 $-10\sim+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度内正常工作,光机界面间材料热膨胀系数不一致会产生过大的接触应

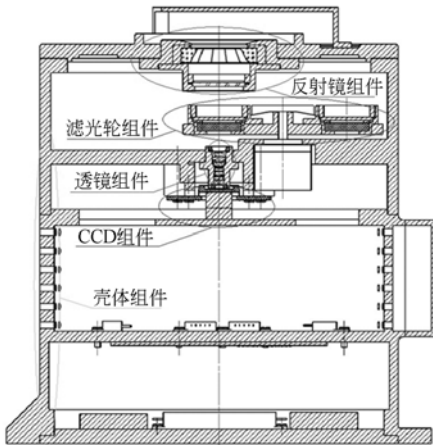


图 2 光机结构图
Fig. 2 Graph of optical-mechanic structure

力,易导致光学元件破碎或者面型被破坏。同时用于成像的 CCD 器件为非制冷的裸片,难以精密定位和散热,如果没有合理的结构设计,难以保证其成像质量。因此,在这些组件中,透镜组件和 CCD 焦面组件(主要是 CCD 器件的精密定位和散热)的设计是结构设计的难点。

在透镜组件的光机结构设计中,光学透镜的轴向定位依靠透镜座靠缘和通过精密机械加工的隔圈实现,为了充分降低轴向的接触应力,使用可更好与凹光学表面配合使用的超环面定位凹透镜,使用相切的光机界面定位凸透镜^[12]。为了增加透镜组件对较大温差工作环境的适应性,防止因轴向接触应力过大导致透镜破碎或成像质量变差,透镜组件采用图 3 所示的结构^[13],利用两端的柔性环螺纹压圈将所有零件夹持到位,防止透镜接触面间产生的应力过大。

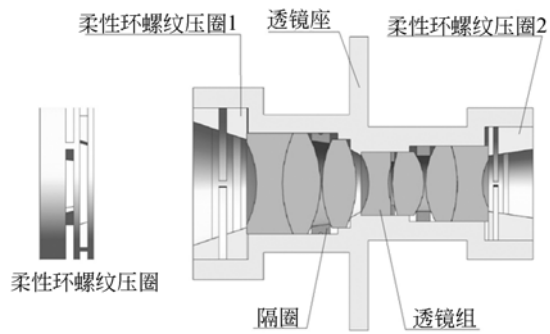


图 3 透镜组件结构图
Fig. 3 Graph of lens assembly structure

为保持各个镜片与光轴中心的对准精度和避免温度变化时产生的径向接触应力过大,在镜片与镜座径向配合间隙中注入环氧胶形成柔性定位连接,考虑镜片弹性变形的镜片径向接触应力 σ_g^E 和胶层最佳厚度(径向间隙) t_e 分别由式(2)和式(3)确定^[12,14]:

$$\sigma_g^E = \frac{\sigma_k}{1 + (r_g^2 + (1 - 2\nu_r)r_m^2(1 - \nu_g)E_r / ((r_m^2 - r_g^2)(1 + \nu_r)(1 - 2\nu_r)E_g))}, \quad (2)$$

$$t_e = \left[\frac{D_G}{2} \right] \frac{(1 - \nu_e)(\alpha_M - \alpha_G)}{[\alpha_e - \alpha_M - \nu_e(\alpha_G - \alpha_e)]}, \quad (3)$$

式中:字母下标 e、M、G 分别表示胶、金属和玻璃材料, ν 是泊松比, D_G 是透镜直径, σ_g 是不考虑镜片弹性变形时镜片的径向接触应力, α 是膨胀系数。

CCD 焦面组件是成像仪的重要组成部分,其主要由 CCD 组件、CCD 组件固定座、导热块和壳体等组成。CCD 组件由基板、CCD 探测器、压板和胶层等组成,由于 CCD 探测器功耗大、热沉小,没有对应的散热和定位措施,在工作中不但会产生高热噪声,严重影响成像质量。而且由于其难

以定位,也容易造成像面的偏离,难以保证成像仪探测到的数据的一致性。因此 CCD 组件的设计任务是保证 CCD 探测器正确、有效地散热和精密定位,并能够应用在空间光学遥感上。

CCD 组件配合界面处材料应具有相同或相近的膨胀系数,以保证结构在工作温度变化范围内的稳定性,该 CCD 探测器基底为 Si,根据文献 [15]给出的材料特性曲线,基板材料最终确定为殷钢,在基板两端分别加工出螺钉孔,基板与探测器配合界面处精加工,得到较高的光洁度和平面度,减小接触面间的热阻,保证探测器热量有效传导至基板。图 4 所示为 CCD 探测器裸片及其组件的实物图,探测器裸片与基板间通过环氧胶黏接,利用基板两端加工出的螺钉孔将 CCD 组件进行固定,达到对探测器固定和散热的目的。

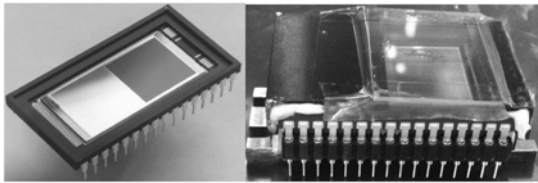


图 4 CCD 及其组件实物图

Fig. 4 CCD detector and its actual subassembly

由于光学系统的像面与 CCD 探测器的有效区几乎重合,为保证像面完全成像在探测器的有效区,考虑到环境、加工及装调误差的存在,最终确定出该探测器的位置精度为 2 个像元大小即 0.026 mm。传统的装调方法难以对 CCD 器件精确定位,因此,建立了如图 5 所示的 CCD 探测器位置检测系统和微调机构,用于提高 CCD 器件的定位精度。先用螺钉将 CCD 组件、导热块固定到 CCD 组件固定座上,组成组件 A,再用螺钉将组件 A 安装到成像仪的上壳体上,在定位 CCD 组件之前,先通过透镜组件的调整机构调整(俯仰和水平)透镜组件的光轴在探测器有效区上的位置,利用图 5 所示的位置检测系统使透镜组件清晰成像于探测器有效区的准中心后,通过修磨透镜组件与上壳体配合处的调整垫片和销钉将透镜组件完全固定于上壳体。接着利用微调机构中的螺旋微调机构调整组件 A 在 x 、 y 方向的平移和绕 z 轴的旋转,同时在显示器上观测像斑在 CCD 像面上的位置,理想情况下,当像斑成像于探测器的 512 pixel \times 512 pixel 位置处时,则认为 CCD 探测

器定位调整完成,再利用定位销和螺钉保证 CCD 探测器的精密定位。在该微调机构中,特别设计了精密 V 型槽限位机构,用以保证组件 A 在绕 x 、 y 坐标轴平移和绕 z 轴的旋转的同时,不发生绕 x 、 y 坐标轴的旋转和绕 z 轴的平移。调整后 CCD 探测器的定位精度约为 0.018 mm,优于要求的位置精度。

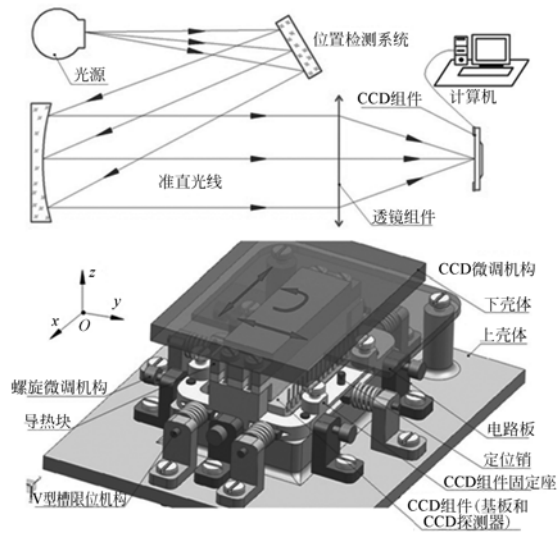


图 5 CCD 组件装调系统图

Fig. 5 Graph of CCD subassembly alignment

在 CCD 组件中,CCD 探测器产生的热量一部分以热辐射形式散热,另外一部分经热传导导热到与其接触的其它零部件,其它零部件再分别以热辐射和热传导的形式散热。热传导的路线是:CCD 探测器工作时产生的热量先传导到基板,基板将自身以热辐射形式散失后剩下的热量分别通过热传导传导到 CCD 组件固定座和导热块,这二者再次将自身以热辐射形式散失后剩下



图 6 成像仪实物图

Fig. 6 Actual picture of imager

的热量传导到与其接触的壳体上后,最终通过壳体上开设的散热面以热辐射的形式散失到冷黑空间。探测器工作温度为 $-5\sim+30\text{ }^{\circ}\text{C}$,当 CCD 探测器与外界环境温度间温差小于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,探测器能够正常工作。经热控制设计后,该探测器与外界温度差约为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足总体设计指标和环境温控指标的要求。集成后成像仪的试验样机体积和质量分别为 $\varphi 240\text{ mm}\times 240\text{ mm}$ 和 8.3 kg ,实物如图 6 所示。

2.3 有限元仿真

星载光学遥感器在发射运载过程中要承受严酷的力学环境(如加速度、冲击振动等),未被正确支撑的零件会相对于其周围零部件发生错位,光学对准可能会暂时或永久地受到损害,易碎的零件(光学零件)可能会产生过应力和破碎^[16,17]。为了确保成像仪在经历了复杂的力学环境后不被破坏和发生永久性弹性形变,对该成像仪的光机结构进行了刚度、强度的有限元分析,考核结构设计是否具有足够的刚度及强度。仿真结果如图 7 所示,分别是成像仪基频和强度的有限元分析结果。从图 7 中可以看出,光机结构的基频大于 100 Hz ,刚度满足要求,最大应力为 52.5 MPa ,发生在成像仪的安装孔处,小于材料的许用应力,结构的安全裕度大于 0.24 ,强度满足要求。

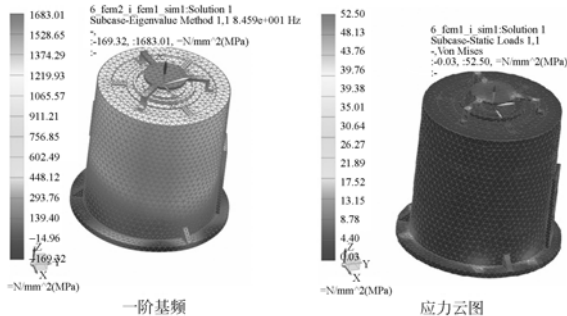


图 7 基频与应力云图

Fig. 7 Nephograms of basic frequency and stress

3 实验验证与分析

为了充分考核结构的尺寸稳定性和环境的适应能力,边界温度状态下的验证分析是评价光机结构设计优劣的重要基础和依据^[18]。搭建了图 8 所示的对应的光机性能检测系统,整套系统主要由热真空罐、计算机数据处理系统和光学分辨率检测系统 3 部分组成,光学检测系统和计算机数

据处理系统位于热真空罐外部,成像仪置于热真空罐内。以氙灯为光源,将氙灯所发出的光经单色仪分光得到所需波长的辐射,再利用漫透射板消除单色仪出射光辐射分布的不均匀性,将得到均匀辐射分布经过位于后续离轴抛物面镜的焦面上的透射式鉴别率板后,再经平面转折镜及离轴抛物面镜的共同作用,可以模拟得到无穷远的分辨率目标。将模拟得到无穷远的分辨率目标通过光学窗口进入成像仪的光学系统,得到无穷远分辨率目标在 CCD 焦面上的像,再经光电转换后将得到图像信息传递输出到计算机的数据处理系统,得到成像仪实际的空间分辨力,最终在计算机显示器上显示。根据检测要求设定热真空罐的真空度和温度对成像仪进行热光学的分辨率检测。

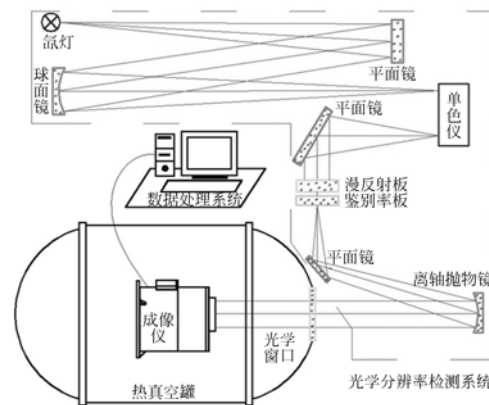


图 8 光机性能检测系统图

Fig. 8 Graph of optical-mechanical check system

表 2 给出了在相同实验室条件下分别对成像仪在 -10 、 $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 边界温度时的分辨率的检测结果。从表 2 可以看出,尽管由于热噪声等各方面的原因,成像仪在高温状况下的分辨率低于低温状况下的分辨率,但 3 个光学通道的分辨率都优于 4 km ,满足技术指标,光机结构设计合理,设计出的成像仪满足应用需求,能够应用于空间光学遥感。

表 2 试验前后分辨率结果

Tab. 2 Resolution results of test fore-and-after

通道	分辨率	
	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+35\text{ }^{\circ}\text{C}$
通道 1	3.71 km	3.85
通道 2	3.74 km	3.88
通道 3	3.68 km	3.76

4 结 论

本文首先根据探测技术和光学定位精度的要求,给出了具有天底和临边多方位观测模式的双视场、多光学通道光学系统结构,在此基础上,通过柔性结构保证了成像仪在 45 °C 的温差范围内能够正常工作,给出了 CCD 探测器裸片的精密定位与散热结构。通过对集成后成像仪的试验表明,其 3 个光学通道的空间分辨力均优于 4 km,

光机结构设计合理,满足光学设计指标的要求。集成后成像仪的质量和体积分别为 8.3 kg 和 $\varphi 240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$,其一阶基频大于 100 Hz,最大应力为 52.5 MPa,体积小、重量轻,是一个结构紧凑的轻小型成像仪。通过成像仪的光机结构设计,在一定程度上不但为空间遥感探测提供了一种新的探测方法,而且为较大温差情况下的光机结构设计以及 CCD 探测器裸片的精密定位与散热提供了设计思路和一定的技术参考。

参考文献:

- [1] STEPHEN A S, TRAVIS P, STEPHEN A. Optomechanical design concept for GMACS, a wide-field, multiobject, moderate resolution optical spectrograph for the Giant Magellan Telescope (GMT) [J]. *SPIE*, 2012, 8446: 84467N-12.
- [2] NEVINT K E, DOYLE K B, PILLSBURY A D. Optomechanical design and analysis for the LLCD space terminal telescope [J]. *SPIE*, 2011, 8127: 81270G-11.
- [3] HAN W Y, LEE D H, PARK Y S, *et al.*. System design of compact IR space imaging system, MIRIS [J]. *SPIE*, 2010, 7731: 77311W-1.
- [4] LEVELTA P F, ORDA VAN G H J O. TROPOMI and TROPOMI: UV/VIS/NIR/SWIR instruments [C]. *SPIE*, 2006, 6296: 629619-1.
- [5] 王智, 李朝辉. 月基极紫外相机光机结构设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2427-2433.
- WANG ZH, LI ZH H. Design of optical-mechanical structure for lunar-based extreme ultraviolet camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2427-2433. (in Chinese)
- [6] 刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格, 等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 52-56.
- LIU Y J, CUI J CH, BAYINHSHG, *et al.*. Design of acousto-optic imaging spectrometer for mars exploration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 52-56. (in Chinese)
- [7] 孔鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 双光栅切换微型平场全息凹面光栅光谱仪[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0105001-7.
- KONG P, TANG Y G, BAYIN H SH G, *et al.*. Double-grating minitype flat-field holographic concave grating spectrograph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0105001-7. (in Chinese)
- [8] 于向阳, 王淑荣, 黄煜, 等. 地球临边/天底同时探测的紫外环形成像仪[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1211004-7.
- YU X Y, WANG SH R, HUANG Y, *et al.*. Development of UV annular imager for earth limb and nadir sounding simultaneously [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1211004-7. (in Chinese)
- [9] 杨会生, 张银鹤, 柴方茂, 等. 离轴三反空间相机调焦机构设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 948-954.
- YANG H SH, ZHANG Y H, CHAI F M, *et al.*. Design of mechanism for off-axis TMA space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 948-954. (in Chinese)
- [10] 王智, 王忠素. 月基极紫外相机反射镜与探测器间支撑结构[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(1): 57-63.
- WANG ZH, WANG ZH S. Supporting structure between reflection mirror and detector in lunar-based extreme ultraviolet camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(1): 57-63. (in Chinese)
- [11] 郑玉权, 高志良. CO₂ 探测仪光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2645-2653.
- ZHENG Y Q, GAO ZH L. Optical system design of CO₂ sounder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2645-2653. (in Chinese)
- [12] YODER P R. *Mounting Optics in Optical Instruments* [M]. Bellingham, Washington USA, SPIE Press, 2006.
- [13] HAN W Y, LEE D H, PARK Y G, *et al.*. System design of compact IR space imaging system, MIRIS [J]. *SPIE*, 2010, 7731: 77311W-1.
- [14] RYABOY V M. Analysis of thermal stress and de-

- formation in elastically bonded optics[J]. *SPIE*, 2007, 6665: 66650K-1.
- [15] BALTAY C, EMMET W, RABINOWITZ D, *et al.*. Space-qualified, abutable packaging for LBNL p-channel CCDs, part I [J]. *SPIE*, 2010, 7742: 77422E-1.
- [16] SCHIPANI P, PERROTTA F, MARTY L. Integrated modeling approach for an active optics system [C]. *SPIE*, 2006, 6271: 627116-1.
- [17] ANGELI G, DUNN J, ROBERTS S, *et al.*. Modeling tools to estimate the performance of the Thirty Meter Telescope: an integrated approach [C]. *SPIE*, 2004, 5497: 237-250.
- [18] 卢鄂, 颜昌翔, 吴清文, 等. 空间光学遥感器环境适应性设计与实验研究[J]. *中国光学与应用光学*, 2012, 20(1): 52-56.
- LU E, YAN CH X, WU Q W, *et al.*. Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(5): 364-375. (in Chinese)

作者简介:



于向阳(1979—),男,河南许昌人,博士,助理研究员,2010年于西北工业大学获得硕士学位,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事于空间光学遥感器的光机系统的结构设计、热设计及其相关仿真分析等方面的研究。E-mail: yu_ciomp@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)