

文章编号 1004-924X(2018)12-2956-07

空间相机透镜调焦机构的设计与测试

姜紫庆^{1,2*}, 贾建军^{1,2}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 高分辨率空间相机受发射段恶劣的力学环境以及空间复杂的温度环境影响, 光学系统会产生微小的离焦量。为保证相机成像质量, 本文设计了一种由蜗轮蜗杆与凸轮滑块机构组成的新型高精度调焦机构来修正离焦量。该设计通过蜗轮蜗杆实现第一级减速, 并且使驱动器旋转轴与光轴正交, 使机构更紧凑。通过凸轮滑块机构进一步进行减速, 同时将旋转运动转化为直线运动, 并通过直线导轨保证滑块的直线运动精度。该机构体积小、精度高, 并且能够实现断电自锁。机构运动副上溅射固体润滑涂层, 防止发生真空冷焊。结合机构自身的特点, 分析了机构调焦的分辨率与误差。对该机构开展了力学与热真空循环试验, 试验前后对机构的精度指标进行了对比测试。试验与测试结果表明: 该机构环境试验后性能参数正常, 其调焦位移误差优于 $5.8 \mu\text{m}$, 线性度优于 0.3% , 偏摆角优于 $14''$ 。在热光试验中通过调整焦面, 成像质量有显著的提升。该调焦机构能够满足光学系统的精度与环境适应性要求。

关键词: 空间相机; 调焦机构; 环境试验; 误差分析; 蜗轮蜗杆

中图分类号: V443.5; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182612.2956

Development of focusing mechanism for space camera

JIANG Zi-qing^{1,2*}, JIA Jian-jun^{1,2}

(1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

2. *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

* *Corresponding author, E-mail: jzq2166@mail.sitp.ac.cn*

Abstract: A small amount of defocus is generated in the optical system of high-resolution space camera as owing to the harsh mechanical environment of the launch section and the complex temperature environment of the orbit. To ensure the image quality of the camera and correct the defocus, a new high-precision focusing mechanism, consisting of a worm gear and a cam slider, was designed. The first stage of deceleration was achieved through the worm gear in this design. The drive's rotary axis was orthogonal to the optical axis, hence, the mechanism was more compact. Further deceleration was performed by the cam slider mechanism, and the rotary motion was converted into a linear motion; the linear motion accuracy of the slider was provided by a linear guide. The mechanism is small, has high precision, and is capable of self-locking in the case of a power failure. The mechanism motion pair was coated with a solid lubricant to prevent vacuum cold welding. According to the characteristics of the mechanism, the resolution and error of the focusing mechanism were analyzed. Mechanical and ther-

收稿日期: 2018-05-09; 修订日期: 2018-06-14.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2017YFA0303900)

mal vacuum cycle tests were carried out on the mechanism. Various precision indicators of the mechanism were compared and tested before and after the experiments. The results show that the mechanism performance is normal after the environmental test, the focus shift error is better than $5.8 \mu\text{m}$, the linearity is better than 0.3% , and the yaw angle is better than $14''$. In the thermo-optical test, the focal plane was adjusted by the focusing mechanism, and the image quality was significantly improved. The focusing mechanism can meet the accuracy and environmental adaptability requirements of the optical system.

Key words: space camera; focusing mechanism; environmental test; error analysis; worm gear

1 引言

随着星载遥感仪器的地面像元分辨率不断提高,仪器的口径与焦距越来越大,对光机稳定性要求也不断提高。在发射阶段复杂的力学振动和温度环境下,遥感设备结构会不可避免地发生微小的变化量。这些变化量会引起一定的光学系统离焦量,导致系统传递函数下降,进而影响设备的成像质量与分辨率。因此,精密成像系统中一般都设计有调焦机构,针对产品发生的微小离焦进行小范围修正,从而保证相机的成像质量。根据光学系统的形式,调焦方法一般有透镜调焦、反射镜调焦和焦面调焦 3 种^[1]。其中,焦面调焦由于涉及探测器以及后续的电子学环节较多,其应用较少。调焦方案在机构实现上有多种形式,最常用的是螺母丝杠^[2-4]机构,通过电机直驱丝杠带动螺母前后移动来实现调焦。在螺母丝杠的基础上,可以进一步增加减速机构来提高调焦的分辨率,如连杆滑块机构^[5-6],利用连杆两端滑块在正交方向上的运动速度不同来实现减速。偏心轮也在一些调焦机构中得到运用^[7-8],采用偏心轮双点支撑机构可将电机的旋转转化为反射镜的前后平移,实现均力输出。文献[9]则采用偏心凸轮结构,利用凸轮导向机构带动像面组件沿光轴作直线位移。

本文结合某光学系统的需求,采用透镜组调焦方式,对系统焦前的一组小透镜进行直线位移调整实现焦面对准。机构实现上,采用步进电机直驱,并进行了两级减速来提高末端单步步进分辨率。第一级采用蜗轮蜗杆减速机构,在获得较大减速比的同时能够尽可能地节约轴向空间。第二级在蜗轮输出轴上设计了凸轮滑槽,通过凸轮滑槽与滑块之间的运动将旋转运动转化为直线运

动,同时实现第二级减速。机构精度测试与例行环境试验表明,上述机构实现方式的精度指标合格,环境适应性良好。

2 调焦机构的设计

2.1 调焦指标与方案设计

图 1 为某光学系统的示意图。望远镜光学系统由主次镜组成,望远镜的汇聚光线通过后继镜组成像在焦面上,在焦面前设置了一组调焦透镜。调焦机构设置在该透镜组上,通过调焦机构带动该透镜组沿光轴方向前后移动,可以小范围地改变光学后截距,进而实现光学系统离焦量的修正,保证焦面对准。

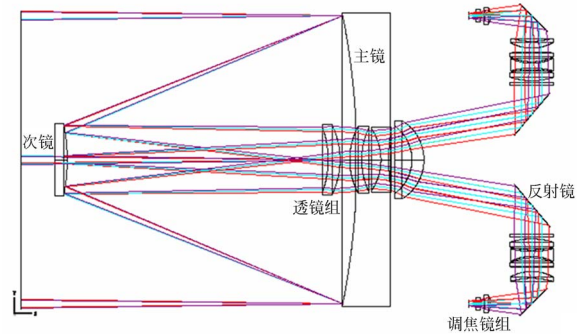


图 1 光学系统示意图

Fig. 1 Sketch of optical system

调焦精度取决于系统焦深。光学系统允许有一定的离焦量,当离焦量小于允许值时,对成像质量的影响较小;当超过允许值时,成像质量下降严重,最大允许离焦量为相机的半焦深。表达式为^[10]:

$$|\pm \delta| = 2\lambda F^2, \quad (1)$$

式中: δ 为系统焦深, F 为系统的 F 数, λ 为系统的中心波长。该光学系统的 $F\# = 4.3$ 。将系统参数代入可知: $|\pm \delta| = 44 \mu\text{m}$ 。

调焦机构的位移定位精度与偏摆角精度对成像质量均有影响^[11]。在所设计的调焦机构中,偏摆角精度是指调焦透镜组在调焦范围内运动时,其透镜组光学轴线与成像主光学轴线夹角的晃动量。按照工程经验,调焦精度应优于 $\delta/4$,即要求机构位移的定位精度 $\Delta \leq 11 \mu\text{m}$ 。通过光学设计,该调焦透镜组的偏摆角精度要求为: $\theta \leq 40''$ 。

针对上述需求,本文采用蜗轮蜗杆与凸轮滑槽机构进行调焦,具体结构如图 2 所示。机构采用步进电机直接驱动蜗杆运转,蜗杆带动蜗轮做圆周方向转动,形成第一级减速。两者的旋转轴正交,调焦镜组光轴、蜗轮回转轴与坐标系 Z 轴平行,蜗杆回转轴与 Y 轴平行。这样蜗杆以及驱动电机可以布置在调焦镜组光轴的侧边,使得机构更加紧凑,节约了 Z 轴向的空间。

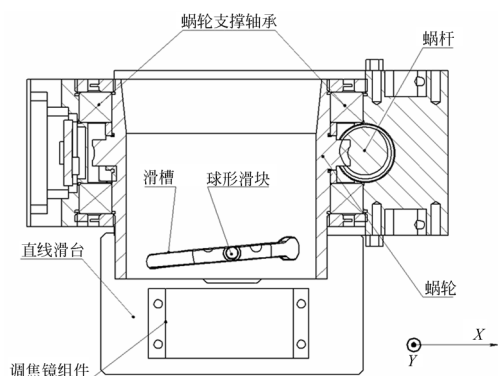


图 2 调焦机构结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of focusing mechanism

在蜗轮上设置有凸轮滑槽,凸轮滑槽设计为螺旋线,随着蜗轮的旋转滑槽螺旋线沿 Z 向升降。在滑槽内配合有球形滑块,运转时滑槽将推动球形滑块沿 Z 向前后移动,形成第二级减速并将旋转运动转换为直线运动。其中,球形滑块与直线滑台通过螺钉固联,调焦镜组件也固定在直线滑台上,球形滑块前后移动时将通过直线滑台带动调焦镜组件运动,实现调焦功能。直线滑台下装有直线导轨,保证滑台的直线运动精度。

机构润滑方式为固体润滑。机构的各个运动副如轴承、蜗轮蜗杆、直线导轨、凸轮滑槽与球形滑块之间均溅射 MoS_2 固体润滑膜,防止真空冷焊。

蜗杆的模数 $m=1$,由于蜗杆处于轻载,蜗杆头数 $Z_1=1$ 。蜗杆的分度圆直径 $d_1=10 \text{ mm}$ 。蜗

轮蜗杆摩擦系数约为 0.12,换算成摩擦角为 6.84° ,要达到自锁蜗杆导程角应当小于该角度。蜗杆导程角的复算公式为^[12]:

$$\tan \gamma = \frac{Z_1 m}{d_1} \quad (2)$$

将蜗杆参数带入式(2),经计算导程角 $\gamma=5.7^\circ$,符合自锁要求。

蜗轮蜗杆的减速比设计为 56:1。蜗轮上滑槽升程设计为 12 mm,滑槽圆周角度范围为 90° ,因此滑槽行程为:

$$s = \frac{\theta}{360} p = 3 \text{ mm} \quad (3)$$

调焦的最大行程为 3 mm,考虑滑槽两端的加工精度会有一些的下降,将调焦行程设计为 $2.5 \text{ mm} (\pm 1.25 \text{ mm})$ 。

2.2 调焦精度分析

调焦机构采用步进电机驱动,步距角为 0.9° ,其分辨率为:

$$\epsilon = \frac{\theta_b \cdot p}{360 \cdot i} = \frac{0.9 \times 12}{360 \times 56} = 0.54 \mu\text{m} \quad (4)$$

调焦机构中偏差主要来自于滑槽与滑块、蜗轮与蜗杆的传动过程。蜗轮蜗杆的齿间间隙将引起蜗轮的回差,在实际装配过程中测试该值为 $4'$ 。凸轮滑槽与滑块之间的间隙误差控制在 $5 \mu\text{m}$ 以内。上述误差带来的是调焦机构的不确定度以及回差。

调焦机构中还存在蜗轮蜗杆的综合齿形误差、滑槽升程的加工误差、步进电机步距角的偏差。这些误差将导致调焦机构直线运动的线性度下降。上述误差实测后通过传动系统折算到调焦直线滑台上,偏差如表 1 所示。

表 1 调焦机构各部分误差

Tab. 1 Errors of focusing mechanism (μm)

齿间 间隙	滑槽 间隙	步距角 偏差	齿形综 合误差	凸轮滑槽 加工误差
2	5	0.086	1.64	6

综上,机构预计的回差为:

$$\Delta_R = \sqrt{2^2 + 5^2} = 5.39 \mu\text{m};$$

$$\Delta_L = \sqrt{2^2 + 5^2 + 0.086^2 + 1.64^2 + 6^2} = 8.22 \mu\text{m}.$$

因此理论线性度应为: $\xi \approx \Delta_L / L = 0.0033$,其中 L 为调焦行程。上述分析表明,所设计的调焦机构精度能够满足光学的需求。

3 调焦机构的试验与测试

3.1 精度测试结果

调焦机构滑台偏摆角误差测试采用基准镜法线测试方案。如图 3 所示,在直线滑台上固定有基准镜 1,用经纬仪测试其法线代表滑台的运动轴线,同时测试固定在基座上的基准镜 2、3 的法线作为基准轴线,设置两个基准轴线是为了确保环境试验前后基准轴线的可靠性。测试时通过测量基准镜 1 的法线与基准法线之间的偏差来考察滑台在全行程内的角度晃动量以及环境试验前后角度的变化量。在整个调焦机构的行程中,选取起点、中间以及终点 3 个典型位置对指向角度进行测量。

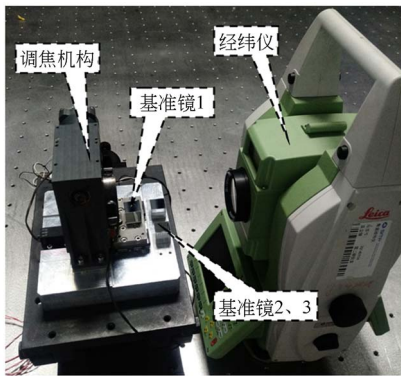


图 3 调焦机构滑台偏摆测试

Fig. 3 Equipment for yaw angle testing of focusing mechanism

按照上述方法在调焦机构环境试验前后均进行了测试,测试数据如表 2 所示。由表 2 可知,环境试验对调焦机构的偏摆晃动量影响较小,在同

表 2 调焦机构偏摆角误差测试结果

Tab. 2 Yaw angle errors of focusing mechanism

测试项目	环境试验前	环境试验后
起点位置基准镜	X:5'43.3"	X:5'42.5"
偏差值	Y:7'56"	Y:7'56.4"
中间位置基准镜	X:5'45"	X:5'44.3"
偏差值	Y:7'47.5"	Y:7'49.8"
终点位置基准镜	X:5'45.1"	X:5'47.8"
偏差值	Y:7'42.1"	Y:7'45.7"
最大偏摆角	X轴:2" Y轴:14"	X轴:5.3" Y轴:10.7"

一位置上,其偏差优于 4"。行程中的晃动量较大,其中 Y 轴(方向如图 2 所示)影响最大,为 14"。

调焦机构步进精度利用直线光栅编码器进行测量,如图 4 所示。光栅编码器的测量头直接与调焦机构滑台联接。通过驱动电机步数可以知道理论上直线滑台行进的距离,通过光栅编码器也可以实测出该距离,从而得到调焦机构直线运动的位置误差。

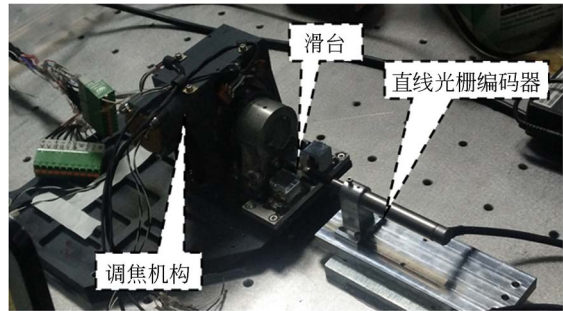


图 4 调焦机构直线位置精度测试

Fig. 4 Equipment for displacement error testing of focusing mechanism

在环境试验前后对调焦机构的实际位移曲线进行测试。在行程内选取 20 个点进行离散测试,其结果如图 5 所示。由图中数据可知:(1)单程测试中位置偏离的最大值为 5.8 μm,因此实测的线性度为 0.002 32,位置偏离值与线性度在分析范围以内;(2)回程测试中通过与去程各点对比,两条曲线之间的回程差约为 2 μm,小于分析的回差结果。

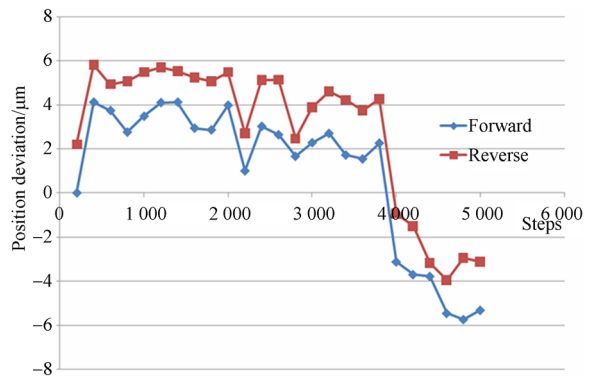


图 5 实测步进距离的直线度

Fig. 5 Linearity of measured stepping distance

环境试验前后对调焦机构的步进精度进行了测试。测试方法如前所述,试验前后均只对去程

进行测试对比,测试结果如图 6 所示。由图 6 数据可知:环境试验前后偏差值的变化趋势基本一致,重复性优于 $2 \mu\text{m}$ 。

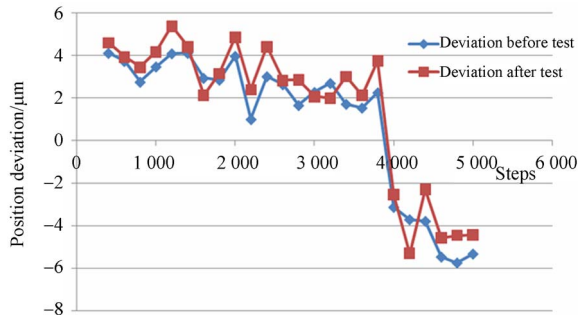


图 6 环境试验前后步进偏差对比

Fig. 6 Comparison of displacement errors before and after enviromental test

3.2 调焦试验

对调焦机构进行了力学振动试验,在试验过程中对机构模块的力学放大情况进行了测试。

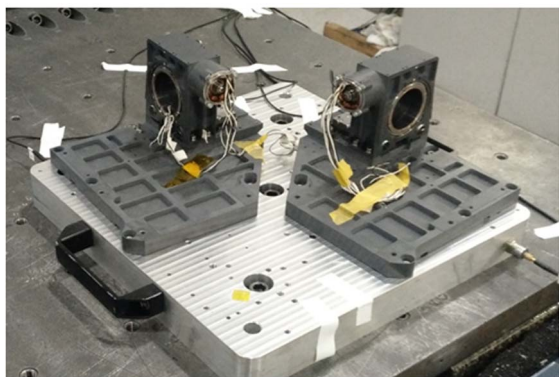


图 7 调焦机构力学振动试验台

Fig. 7 Experiment platform of dynamic vibration of focusing mechanism

力学试验进行了正弦与随机振动,其量级见表 3。力学响应情况见图 8 和图 9。

表 3 调焦机构力学振动试验条件

Tab. 3 Dynamic vibration conditions of focusing mechanism

频率范围/Hz	正弦条件	频率范围/Hz	随机条件
5~11	5.33 mm	20~190	+3dB/oct
11~30	2.6g~7g	190~500	$0.03 \text{ g}^2/\text{Hz}$
30~45	7g	500~750	$0.0225 \text{ g}^2/\text{Hz}$
45~55	7g~3.6g	750~2 000	-9 dB/oct
55~100	3.6g	RMS	5g
扫描速率	4 oct/min	持续时间	1 min

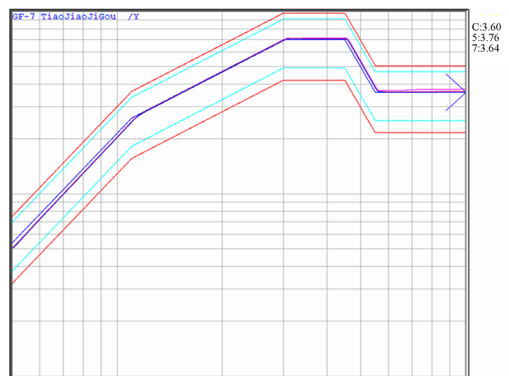


图 8 调焦机构正弦振动响应图

Fig. 8 Sinusoidal vibration response of focusing mechanism

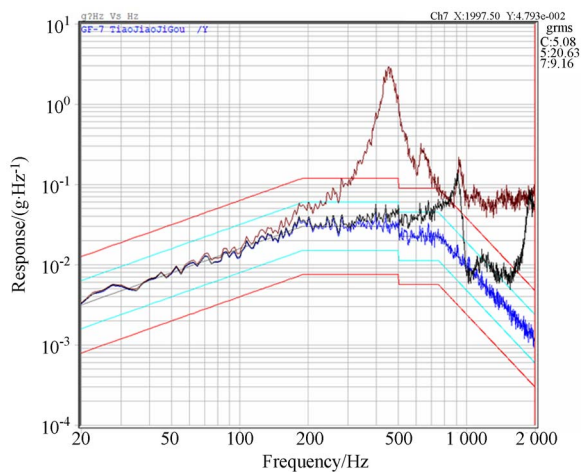


图 9 调焦机构随机振动响应图

Fig. 9 Random vibration response of focusing mechanism

力学试验响应曲线表明:调焦机构在正弦振动中的响应曲线与输入曲线跟随良好,基本无放大;随机响应均方根为 20.63 g ,放大比约为 4,在 5 倍放大率的许可范围内。力学测试前后调焦机构运转正常。

对调焦机构进行了循环次数为 3.5 的热真空通电试验,试验温度为 $0\sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 。遥测数据测试表明在上述温度范围内调焦机构性能与功能均正常。

调焦机构装入整机后,随整机进行了热光学试验(真空下,不同温度点测试光学性能试验),热光试验过程中为弥补光学系统在空气与真空的光程差,采用调焦机构对焦面偏差进行了补偿。补偿前后光学成像条纹如图 10 所示。

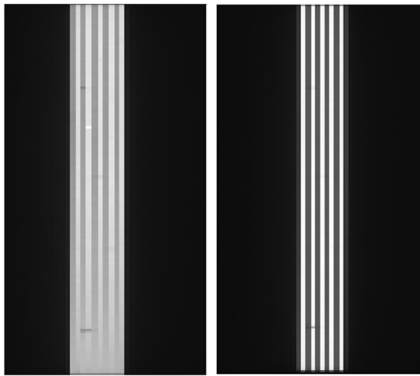


图 10 焦面调整后效果图

Fig. 10 Strip images before and after focal surface adjustment

调焦后,条纹边缘变得更加锐利,黑白条纹更加清晰,系统的调制传递函数从 0.18 提升至 0.30。满足仪器的成像要求。

参考文献:

- [1] 安源,齐迎春.空间相机直线调焦机构的设计[J].光学精密工程,2009,17(3):609-614.
AN Y, QI Y CH. Design of straight-line focusing mechanism for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(3):609-614. (in Chinese)
- [2] 陈洪达,陈永和,史婷婷,等.空间相机调焦机构误差分析[J].光学精密工程,2013,21(2):1349-1356.
CHEN H D, CHEN Y H, SHI T T, *et al.*. Error analysis for focusing mechanism of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (2): 1349-1356. (in Chinese)
- [3] 范洪杰,董吉洪,李威,等.一种空间相机调焦机构的设计与分析[J].长春理工大学学报:自然科学版,2016,39(3):1-4.
FAN H J, DONG J H, LI W, *et al.*. Design and analysis of focusing mechanism for space camera[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2016, 39(3): 1-4. (in Chinese)
- [4] 郭叔锋,董吉洪,李威,等.长焦距空间相机调焦机构设计[J].光机电信息,2010,27(11):105-109.
GUO Q F, DONG J H, LI W, *et al.*. Focusing mechanism design for long focal length space camera [J]. *OME Information* 2010,27(11):105-109. (in Chinese)
- [5] 贾学志,王栋,张雷,等.轻型空间相机调焦机构的优化设计与精度试验[J].光学精密工程,2011,19(8):1824-1830.
JIA X ZH, WANG D, ZHANG L, *et al.*. Optimizing design and precision experiment of focusing mechanism in lightweight space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(8):1824-1830. (in Chinese)
- [6] 贾学志,张雷,安源,等.空间光学遥感器精密调焦机构设计与试验[J].机械工程学报,2016,52(13):26-30.
JIA X ZH, ZHANG L, AN Y, *et al.*. Design and experiment research on precision focusing mechanism of space remote sensor [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52 (13): 26-30. (in Chinese)
- [7] 王书新,李景林,刘磊,等.大尺寸焦平面空间相机调焦机构的精度分析[J].光学精密工程,2010,18(10):2239-2243.
WANG SH X, LI J L, LIU L, *et al.*. Accuracy analysis of focusing mechanism in space camera with long-focal-plane [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(10):2239-2243. (in Chinese)
- [8] 王智,张立平,李朝辉,等.传输型立体测绘相机的调焦机构设计[J].光学精密工程,2009,17(5):1051-1056.

4 结 论

本文针对某光学系统的调焦要求,结合蜗轮蜗杆传动与凸轮滑块机构设计了一种调焦机构,并对其误差与调焦能力进行了分析。对该机构开展了空间环境适应性试验并进行了精度测试。测试与试验结果表明:所设计的调焦机构的位移误差优于 $5.8 \mu\text{m}$,且力学前后趋势基本一致,重复性优于 $2 \mu\text{m}$,位移线性度优于 0.3%。调焦机构行程可达到 2.5 mm,行程内机构最大的偏摆角优于 $14''$,满足系统的使用需求。力学试验表明,机构正弦振动过程中响应基本无放大,随机振动中响应均方根放大约 4 倍,力学前后机构性能参数正常。在整机光学测试试验中,通过调焦机构进行了焦面位置的调整,调整效果显著,实现了预先设计的调焦精度。

- WANG ZH, ZHANG L P, LI CH H, *et al.*. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1051-1056. (in Chinese)
- [9] 苏东风, 贾继强, 刘波, 等. 航空相机偏心凸轮调焦机构中的滚子运动轨迹[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(10):1472-1477.
- SU D F, JIA J Q, LIU B, *et al.*. The trajectory of roller in offset cam focusing mechanism for aerial camera [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(10):1472-1477. (in Chinese)
- [10] 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):948-953.
- YANG H SH, ZHANG Y H, CHAI F M, *et al.*. Design of focusing mechanism for off-axis TMA space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4):948-953. (in Chinese)
- [11] 杨会生, 李志来, 樊延超, 等. 空间相机均力输出式调焦机构[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4):796-803.
- YANG H SH, LI ZH L, FAN Y CH, *et al.*. Focusing mechanism with equal output forces for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4):796-803. (in Chinese)
- [12] 徐灏, 邱宣怀, 巩云鹏, 等. *机械设计手册(第三卷)* [M]. 北京:机械工业出版社, 1992.
- XU H, QIU X H, GONG Y P, *et al.*. *Machine Design Handbook (Volumn 3)* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1992. (in Chinese)

作者简介:



姜紫庆(1980—),男,湖北鄂州人,硕士,副研究员,2003年于华中农业大学获得学士学位,2006年于武汉理工大学获得硕士学位,主要从事航空航天遥感仪器设备的精密机械与机构设计。
E-mail: jzq2166@mail. sitp. ac. cn



贾建军(1972—),男,山西人,研究员,博士生导师,1993年、1996年于西北工业大学分别获得学士、硕士学位,1999年于上海交通大学获得博士学位,主要从事空间遥感、激光通信、量子通信等领域空间仪器的研究。E-mail: jjjun10@mail. sitp. ac. cn