

长焦面空间相机调焦机构分析与验证

王忠善^{1,2}, 何欣¹, 崔永鹏¹, 付亮亮¹

- (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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了补偿空间相机由于地面定标环境和在轨工作环境不同及发射时振动冲击引起的焦面离焦, 保证空间相机在轨成像质量, 设计了焦面调焦机构。首先, 针对尺寸超长焦面, 采用增设调焦内框来增加焦面基板刚度, 通过蜗轮蜗杆传动驱动丝杠运动实现机构自锁。其次, 利用有限元分析软件 patran/nastran 建立了调焦机构的有限元模型, 用 mpc 模拟导轨连接, 对调焦机构进行模态分析。最后, 对调焦机构进行了力学试验验证和精度测试。试验及测试结果表明: 设计的调焦机构动态刚度高, 一阶计算模态为 228.7 Hz, 而试验得到一阶模态为 223.9 Hz, 两者相差 2%; 调焦灵敏度达 0.25 μm , 调焦精度达到 6.3 μm , 焦面基板两端同步误差达到 $\pm 4 \mu\text{m}$, 满足航天相机对调焦机构高分辨率、高精度、高可靠性的要求。

关键词: 调焦机构; 调焦灵敏度; 模态分析; 调焦精度

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1206-04

Analysis and validation of large size focal-plane focusing device for space camera

Wang Zhongshan^{1,2}, He Xin¹, Cui Yongpeng¹, Fu Liangliang¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To compensate focusing offset of space camera, which was caused by environment difference between ground and on the track and maybe caused by shock when launching, a focal plane focusing device was designed to ensure image quality. First, for focal plane was so large, focusing frame was designed to enhance focal plane rigidity, self-lock was achieved through worm wheel driving screw. Second, fem model was established and mode analysis was achieved by patran/nastran, in which simulate guide rail by mpc. Finally, carried out dynamic environment testing and precision testing. Test results revealed that focusing device had dynamic frequency, first analysis characteristic frequency was 228.7 Hz, and first test characteristic frequency was 223.9 Hz, the relative error was 2%. Focusing resolution was 0.25 μm , focusing precision was 6.3 μm , synchronization error on focal plane was $\pm 4 \mu\text{m}$. It can meet high resolution, high precision, high reliability needs of space camera.

Key words: focusing device; focusing resolution; mode analysis; focusing precision

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2013-09-03

基金项目: 中国科学院三期创新工程(07423JN70)

作者简介: 王忠善(1983-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事空间光学遥感器结构设计、分析方面的研究。Email: hitwzs@126.com

0 引言

空间相机在轨工作时所处的环境条件如大气压力和温度与地面相机标定时不同,将会造成空间相机的离焦^[1-2]。另外,空间相机在发射阶段要经历冲击和振动,也将导致相机的光学间隔发生变化。这些变化也会最终导致相机的光学像面和相机 CCD 接收器焦面发生相对位移,即造成离焦。离焦将导致相机成像质量下降、分辨率下降甚至成像失败^[3-5]。因此为空间相机配备调焦机构是必要的。目前常用于调焦机构运动形式转化的机构主要包括:凸轮机构、滚珠丝杠及由曲柄滑块机构变异得来的双滑块机构^[6-8]。

随着空间相机的发展,大口径宽覆盖成为空间相机的发展趋势之一。文中涉及的空间相机为实现地面甚宽覆盖要求,共采用多片 CCD 像面接收器进行交错拼接,使得焦面尺寸较长。根据此光学系统后截距短且会聚光束成长条形的特点,采用增加调焦反射镜调焦的方式必然使整个调焦机构质量增加。故文中采用直接移动焦面的调焦方式设计调焦机构。

1 调焦机构设计

调焦机构设计一般需要满足以下条件:(一)调焦机构具有足够的强度和刚度,能够承受卫星发射过程中的冲击和振动;(二)调焦机构为运动机构,必须考虑机构的自锁;(三)具有足够的调焦灵敏度、分辨率和精度。

为满足以上要求,设计了长条形 C 字形内框将焦面基板包裹,连接点选在焦面基板底部,使内框和焦面基板连结在一起成为调焦机构的运动部件,充分增加焦面基板的刚度。同时为调焦机构中移动部件和固定部件的装配提供基准。整个传动链由步进电机经一级齿轮传动,驱动蜗杆轴旋转,蜗杆蜗轮传动带动丝杠轴旋转,丝杠螺母推动焦面基板沿光轴方向的运动。整个机构通过蜗轮蜗杆实现自锁。调焦机构结构见图 1。

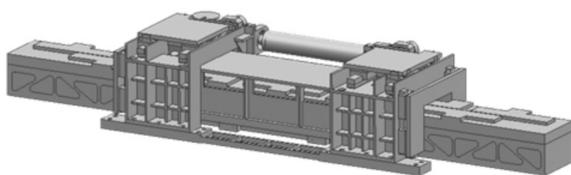


图 1 调焦机构结构图

Fig.1 Structure diagram of focusing device

2 调焦灵敏度分析

调焦灵敏度是指焦面能连续移动的最小量值,指电机每运行一个步距角所对应的焦面移动量值。一般应当小于相机半焦深的 1/5^[9]。根据运动传递路径,电机的转动通过传动比为 40 的蜗轮蜗杆传动传递给导程 4 mm 的滚珠丝杠推动焦面移动。可以计算电机每走一步脚面移动距离及调焦灵敏度为:

$$\Delta l = \frac{\theta \cdot d}{i \cdot 360^\circ} = \frac{0.9^\circ \cdot 4}{40 \cdot 360^\circ} = 0.25 \mu\text{m}$$

式中: Δl 为调焦灵敏度; θ 为电机步距角; d 为丝杠导程; i 为调焦机构传动比。

文中空间相机半焦深为 0.04 mm,满足调焦灵敏度小于相机半焦深 1/5 的要求。

3 调焦机构模态分析

调焦机构必须能够承受卫星发射过程中的冲击和振动,以保证相机入轨后能正常工作。为避开卫星共振频率以降低调焦机构的振动响应,需要提高整个机构的动态刚度。所以在调焦机构设计时,必须对调焦机构的动态刚度进行分析与验证^[10]。

文中采用 MSC.PATRAN 建立了整个调焦机构的有限元模型,整个模型全部采用 10 节点四面体 tet10 单元,螺钉连接采用节点直接粘接。由于蜗轮蜗杆传动具有自锁作用,所以在有限元模型中齿轮和蜗轮蜗杆传动也采用节点直接粘接,锁定传动位置。

由于调焦机构中存在多根不同方向的精密直线导轨,滑块沿导轨方向可自由移动。导轨滑块的连接模型对整体模型刚度影响较大。文中采用滑块和导轨模型上的单点对单点 mpc 连结方式,来解除沿导轨方向滑块可移动的自由度,使有限元模型更接近真实情况。经过分析计算得到文中设计的调焦机构前三阶模态频率及振型图见表 1、图 2、图 3 与图 4。

表 1 前三阶各向计算模态

Tab.1 First three directions analysis mode

	First	Second	Third
Frequency/Hz	228.7	321.0	613.4
Mode of vibration	Around X axis	Around Z axis	Around Y axis

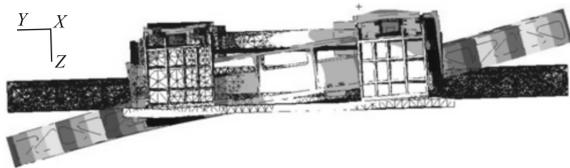


图 2 调焦机构一阶振型图

Fig.2 First vibration form of focusing device

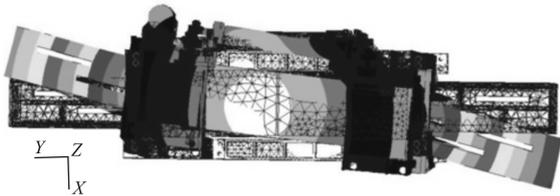


图 3 调焦机构二阶振型图

Fig.3 Second vibration form of focusing device

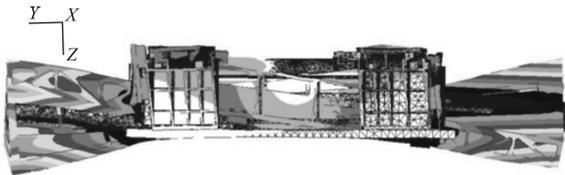


图 4 调焦机构三阶振型图

Fig.4 Third vibration form of focusing device

4 试验验证与测试

4.1 力学试验验证

卫星的发射振动环境较差,因此有必要对调焦机构做相应的力学环境试验,以检验调焦机构具有合适的动态刚度和合理的振动响应。力学试验包括XYZ三个方向的正弦和随机试验,其中X是发射及飞行方向,Z是对地观测方向,Y向按右手定则确定。图5为实验过程图片。表2为试验得到XYZ向一阶特征频率。从表2和表1对比可知,Z向计算特征频率和实际试验仅相差2%,很接近试验值,说明了用mpc连结模拟导轨进行有限元分析是合理可行的。正弦试验随机试验结果见表3、表4。

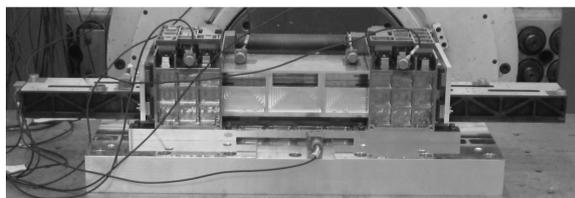


图 5 调焦振动试验

Fig.5 Vibration test of focusing device

表 2 调焦组件的三向一阶特征频率

Tab.2 Three directions first characteristic frequency of focusing device

Direction	X	Y	Z
Characteristic frequency /Hz	347.6	606.5	223.9

表 3 正弦试验结果

Tab.3 Results of sine vibration

Direction	X	Y	Z	
Input acceleration/g	9.8	9.8	9.8	
Characteristic frequency/Hz	99.8	99.9	99.9	
Identification level sine	Output acceleration/g	11.1	10.4	12.9
	Amplified factor	1.13	1.06	1.32

表 4 随机试验结果

Tab.4 Results of random vibration

Direction		Power spectral density/ $g^2 \cdot Hz^{-1}$	Root mean square acceleration/ g_{rms}
	Input	0.019 6	2.4
X	Output	7.44	15.8
	Amplified factor		6.58
	Input	0.019 6	3.6
Y	Output	4.0	14.63
	Amplified factor		4.06
	Input	0.019 6	4.0
Z	Output	4.92	14.83
	Amplified factor		3.71

4.2 精度测试

由于文中的焦面尺寸很长,所以焦面两端的同步误差成为影响调焦机构精度的重要因素。通过数显千分尺测得焦面基板两端同步误差 $\pm 4 \mu m$ 。

根据测试记录数据,调焦电机以 81 步/次带动调焦组件运动,记录每次运动后 CCD 焦平面的位置值,并计算出每次运动位置值与上一次的位置值的差值 H_i , 求出所有差值的平均值 $\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$ 。计算出每次运动差值 H_i 与差值平均值 \bar{H} 的残差 $P_i = H_i - \bar{H}$, 绘制其调焦行程测试范围内 CCD 焦平面运动量残差如图 6 所示。

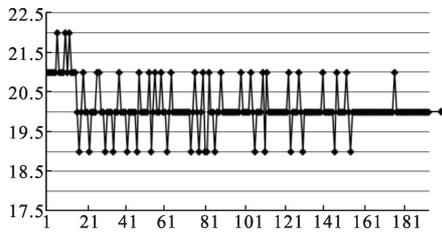


图 6 焦平面运动残差图

Fig.6 Focal plane movement residual error curve

残差标准差为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2} = 2.1 \mu\text{m}$$

当设计变量是工艺尺寸时,误差一般服从正态分布。而文中研究的残差值是由传动链结构尺寸和间隙共同决定的,也满足正态分布。所以根据正态分布的“ 3σ ”原则^[11],残差的标准差可取:

$$\sigma = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{6} = \frac{\Delta x}{3}$$

式中: Δx 是最大误差。由此可反推计算得调焦位置精度 Δx 。数据测试关系见表 5。

$$\Delta x = 3\sigma = 6.3 \mu\text{m}$$

表 5 调焦精度分析结果

Tab.5 Precision analysis result of focusing device

Control mode	Motor step number	Variation of encoder code value (code)	Focal plane displacement/ μm	Accuracy / μm
Open loop	81	33.3	20.3	6.3

5 结论

由以上分析及验证可知,文中设计了超长焦面的调焦机构,调焦灵敏度为 $0.25 \mu\text{m}$ 。通过设计的调焦内框充分增加焦面基板刚度,使整个调焦机构一阶模态达到 223.9 Hz ,具有良好的动态刚度,使其正弦试验的响应和放大倍率都很小,说明其能承受住发射振动条件。另外,振动试验前后都对调焦机构精度进行了测试,从数据可知开环调焦精度为 $6.3 \mu\text{m}$,焦面基板两端同步误差达 $\pm 4 \mu\text{m}$ 。总之,此调焦机构

满足高灵敏度、高精度、高可靠性的要求,可为以后长焦面调焦机构提供有益参考。

参考文献:

- [1] Lv Hengyi, Liu Yang, Xue Xucheng, et al. Intelligent focusing method for the remote sensing cameras[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1261-1265. (in Chinese)
- [2] Wang Shuxin, Li Jinglin, Liu Lei, 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)
- [3] Jia Xuezhi, Wang Dong, Zhang Lei, et al. Optimizing design precision experiment of focusing mechanism in light weight space camera[J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(8): 1824-1831. (in Chinese)
- [4] Wang Zhi, Zhang Liping, Li Chaohui, et al. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera [J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(5): 1051-1056. (in Chinese)
- [5] Shao Mingdong, Guo Jiang, Sun Jiming. Design of focusing mechanism for off-axis TMA mapping cameras [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 373-378. (in Chinese)
- [6] Liu Lei, Cao Guohua. Double cam focusing mechanism of space camera with wide filed and long focal plane [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(9): 1939-1944. (in Chinese)
- [7] Zhang Xinjie, Yan Changxiang, Xie Tao. Design of focusing mechanism of space remote sensor [J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(11): 2757-2761. (in Chinese)
- [8] Lu Zhenghua, Guo Yongfei, Li Yunfei, et al. Realization of auto-focus on APRC using CCD stitching [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(7): 1559-1565. (in Chinese)
- [9] An Yuan, Qi Yingchun. Design of straight line focusing mechanism for space camera [J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(3): 609-614. (in Chinese)
- [10] Wang Yongxian, Wang Bing, Ren Jianyue. Dynamic performance analysis on the focusing mechanism component of the space remote sensor [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(2): 235-243. (in Chinese)
- [11] Yu Jun. Modern Method and Application of Design [M]. Beijing: Chinese Standard Press, 2002. (in Chinese)