轻小型空间遥感相机精密调焦机构设计与试验

王 凯[1,2],闫 勇[1],徐明林[1],左玉弟[1,2],金 光[1],陶淑苹[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:空间遥感相机在发射过程中及其在轨运行时,由于大气压力、温度、力学环境等的变化,导致焦面离焦。为了满足成像质量要求,相机在空间投入使用之前必须对偏离的焦面进行校正。针对轻小型空间相机的使用特性及要求,设计了一套调焦范围±3 mm 的像面移动式调焦机构,质量仅为 3.25 kg。利用蜗杆传动的自锁性,防止焦面组件在外力作用下发生窜动。选用微型精密级直线滚动导轨保证 CMOS 靶面的直线性精度。同时利用光电编码器(16 位)实时反馈靶面的位置信息,以保证其定位精度。对调焦机构进行了理论分析、动力学分析及试验验证、精度测试及分析、焦面标定试验等。试验结果表明:调焦机构的一阶固有频率为 182.7 Hz,可以有效地避免共振现象;CMOS 靶面的直线性精度优于 20″,定位精度优于±4.2 μm,满足调焦精度要求;焦面标定试验验证了调焦机构设计的有效性,满足了空间遥感相机的成像质量要求。

关键词:空间相机; 调焦机构; 焦面离焦; 动力学; 精度分析

中图分类号:TH12;V443+.5 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.1218004

Design and experiment of precision focusing mechanism of space remote sensing camera with lightweight and miniaturization

Wang Kai[1,2], Yan Yong[1], Xu Minglin[1], Zuo Yudi[1,2], Jin Guang[1], Tao Shuping[1]

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

Abstract: Space remote sensing camera in the launch process and its in-orbit operation, due to environment change of atmospheric pressure, temperature, mechanics, results in focal plane defocus. In order to meet the requirements of imaging quality, the focal plane must be corrected before putting it into use. For meeting the features and imaging quality requirements of lightweight and miniaturization space camera, the focusing mechanism was designed, the motion displacement was in the range of ±3 mm, and the weight was only 3.25 kg. The self-locking property of the worm drive mechanism was used to prevent the movement of focal plane in the external forces. Micro-precision linear rolling guideway was selected to ensure the linearity accuracy of CMOS target plane. At the same time, photoelectric encoder (16 bit) was used to real-time feedback the positioning information of target plane, forming a closed-

收稿日期:2018-02-11; **修订日期**:2018-03-01

基金项目:吉林省自然科学基金(20170101164JC);吉林省优秀青年人才基金(20180520193JH);吉林省重点科技攻关项目(20170204049GX)

作者简介:王凯(1992-),男,硕士生,主要从事空间光学精密机械方面的研究。Email: wangkaiciomp@163.com

导师简介(通讯作者):闫勇(1981-),男,副研究员,硕士生导师,博士,主要从事空间精密光学仪器方面的研究。Email: cclyy911@163.com

loop control to ensure its positioning accuracy. And, the theoretical calculations, dynamic analysis and experimental verification, accuracy testing and analysis, calibration test of focal plane were worked out. Experimental results indicate that the first natural frequency of focusing mechanism is 182.7 Hz, it can effectively avoid the resonance phenomenon. And the linearity accuracy of CMOS target plane is better than 20″, the positioning accuracy is better than ±4.2 μm, meeting the focusing accuracy. Simultaneously, calibration experiment of focal plane verifies the designed effectiveness of the focusing mechanism, meeting the imaging quality of space remote sensing camera.

Key words: space camera; focusing mechanism; deviation of focal plane; dynamics; precision analysis

0 引 言

空间对地观测视野广阔、覆盖范围大,是获取地面信息的重要手段，其基本方式是利用空间遥感相机对地成像,并向用户提供清晰、直观的图像信息。随着航空航天产业的持续发展，遥感技术在国民经济的各行各业都得到了广泛的应用。空间遥感相机在发射的过程中会受到冲击、振动、过载等复杂环境的影响，以及相机所处轨道高度的变化及其在轨运行时,由于大气压力、温度等与相机在地面标定时相比发生了变化，使得相机的焦平面产生不同程度的偏离,直接导致成像质量下降。为了满足成像质量的要求，相机在空间投入使用之前必须对其偏离的焦面进行校正[1-3]。

空间遥感相机的光学系统不同，其调焦方式也不相同。常用的调焦方式有三种:光学元件调焦、调焦镜调焦、像面移动式调焦。目前,调焦机构的研究多针对于大口径、长焦面或高分辨率空间相机[4-9],而对于轻小型空间相机调焦机构的研究较少[10]。为满足轻小型空间遥感相机的使用特性及成像质量要求,设计了一套结构紧凑的像面移动式调焦机构,详细阐述了调焦机构的工作原理、传动理论计算、定位精度理论计算等，并对调焦机构进行了有限元分析及试验验证,闭环精度测试(直线性精度、定位精度)及数据分析，最后通过焦面标定试验验证了调焦机构设计的有效性。

1 调焦方案

图 1 所示为相机光路图，视场范围内地面景物经光学系统后成像在 CMOS 靶面上。当焦平面与靶面偏离时，相机所成的像将不能满足成像质量的要求。因此,根据轻小型空间遥感相机的使用特性及要求，设计了一套像面移动式调焦机构来调节 CMOS 靶面与焦平面的相对位置，即通过推动带有 CMOS 感光器件的焦面组件沿着焦面入射光线的方向前后移动,使 CMOS 靶面与相机焦平面重合[11],从而满足相机成像质量的要求。

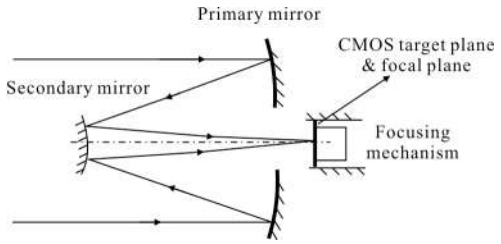

图 1 相机光路图

Fig.1 Optical path diagram of camera

相机光学系统具有一定的允许离焦量，在允许离焦量的范围内不会造成图像分辨率下降。允许离焦量的最大值等于相机的半倍焦深：

$$\Delta=2F^{\#2}\lambda=2\times5^{2}\times0.58=29\ \mu\text{m} \tag{1}$$

式中:$F^{\#}$ 为 F数;λ 为相机工作的中心波长。

同时考虑到空间复杂环境的影响，设计精度定为±10 μm。经过分析计算,CMOS 靶面的调焦范围应为±2.5 mm，结构设计时应使调焦量有一定的裕度[12],故将调焦量的设计值定为±3 mm。

2 调焦机构设计及理论分析

2.1 调焦工作原理

如图 2 所示,调焦机构主要由步进电机、蜗杆传动机构、丝杠螺母机构、齿轮传动机构、编码器(16位)、直线导轨、焦面箱、支撑框架等组成。电机通过联轴

器与蜗杆连接,将转动力矩传给蜗轮,蜗轮轴的下部攻有螺纹,与丝杠形成螺旋副,焦面箱与丝杠通过螺钉连接,从而带动焦面箱移动。为保证直线性精度,在焦面箱的两侧安装有直线滚动导轨。同时,蜗轮轴通过齿轮传动机构与编码器连接,实时反馈 CMOS 靶面的位置信息,使调焦机构形成闭环控制。

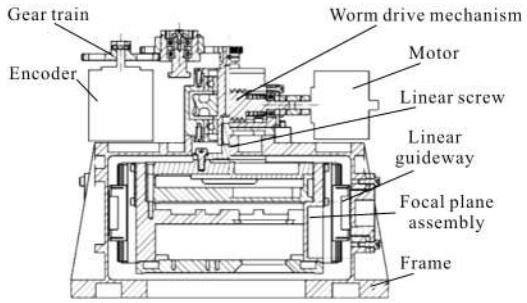

图 2 调焦机构

Fig.2 Focusing mechanism

2.2 调焦机构可靠性设计

2.2.1 蜗杆传动设计

所选蜗杆(ZA)、蜗轮基本参数如表 1、表 2 所示。

表1 蜗杆基本参数

Tab.1 Basic parameter of worm

Module	Pressure angle α/(°)	Number of thread	Reference diameter d_1/mm	Lead angle γ/(°)
1	20	1	18	3.18

表 2 蜗轮基本参数

Tab.2 Basic parameter of worm gear

Module	Pressure angle α/(°)	Number of thread	Reference diameter d_2/mm
1	20	42	42

蜗杆传动时滑动速度:

$$v_s=\frac{v_1}{\cos\gamma}=\frac{\pi d_1 n_1}{60\times 1\ 000\cos\gamma}\approx 0.5\ \text{m/s} \tag{2}$$

式中:v_1 为蜗杆分度圆圆周速度;n_1 为蜗杆转速。

由滑动速度 v_s=0.5 m/s,查表可知当量摩擦角 φ_v=3.72°。此时,导程角 $\gamma<\varphi_v$。由蜗杆传动原理可知,机构的反行程具有自锁性。空间遥感相机受到冲击、振动、过载等复杂环境的影响时,蜗轮蜗杆机构的自锁性可以有效地防止焦面组件在外力的作用下发生窜动,同时蜗杆传动具有冲击载荷小、传动平稳、噪声低等优点。

2.2.2 直线导轨设计

调焦机构的精度最终表现在 CMOS 靶面移动过程中的直线性误差及定位误差上,为保证其直线性精度,选用微型精密级直线滚动导轨,行走平行度为 1 μm,可以有效地限制靶面在移动过程中发生倾斜。

2.2.3 防冷焊设计

为了避免调焦机构在真空环境中发生冷焊效应,在运动构件表面涂抹航天专用润滑脂。

2.3 传动理论分析

图 3 所示为调焦机构传动原理图。蜗轮、蜗杆机构传动比:

$$i_{12}=\frac{z_2}{z_1}=\frac{42}{1}=42 \tag{3}$$

式中:z_1 为蜗杆头数;z_2 为蜗轮齿数。

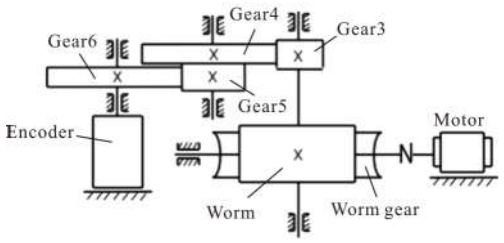

图 3 调焦机构传动原理图

Fig.3 Transmission schematic of focusing mechanism

齿轮系传动比:

$$i_{36}=\frac{z_4 z_6}{z_3 z_5}=\frac{95\times 95}{30\times 50}=\frac{361}{60} \tag{4}$$

式中:z_3、z_4、z_5、z_6 分别为齿轮 3、4、5、6 的齿数。

丝杠螺纹的导程:

$$P_h=nP=1\times 1=1\ \text{mm} \tag{5}$$

电机轴旋转一圈 (400 步),CMOS 靶面的位移量:

$$\Delta x=\frac{1}{i_{12}}P_h=\frac{1}{42}\times 1=\frac{1}{42}\text{mm} \tag{6}$$

即调焦机构灵敏度:

$$\Delta x_{\min}=\frac{1}{400}\Delta x=0.06\ \mu\text{m} \tag{7}$$

电机轴旋转一圈,编码器的码值变化量:

$$\Delta y=\frac{1}{i_{12}i_{36}}\times 2^{16}=\frac{655\ 360}{2\ 527} \tag{8}$$

斜率：

$$k=\frac{\Delta y}{\Delta x}=\frac{655\ 360}{2\ 527}\times 42=10\ 892.41 \tag{9}$$

从而得到编码器码值 y 与 CMOS 靶面位移 x 的理论关系曲线：

$$y=10\ 892.41x+b_0 \tag{10}$$

式中：b_0 为靶面位于零位时编码器的码值。

2.4 定位精度理论分析

调焦机构工作时采用闭环控制方式，编码器实时反馈 CMOS 靶面的位置信息。由于编码器与靶面之间存在传动误差，使编码器不能反映靶面的实际位置，由此引入的定位误差：

$$\sigma_1=\pm(E_1+E_2)=\pm 3.20\ \mu\text{m} \tag{11}$$

式中：E_1、E_2 分别为传动固有误差（齿轮的实际齿廓与理想齿廓的偏差）、跳动误差(实际旋转中心与理想旋转中心的偏差)。

所选光电编码器的分辨率为 20″，因此编码器转一圈[13]，引入的定位误差：

$$\sigma_2=\pm\frac{20''}{360^\circ}\times\frac{2^{16}}{k}\approx\pm 0.10\ \mu\text{m} \tag{12}$$

程序设计时，调焦机构的控制阈值设置为±10 个码值，因此引入的定位误差：

$$\sigma_3=\pm\frac{\Delta y}{k}=\frac{10}{10\ 892.42}\approx\pm 0.92\ \mu\text{m} \tag{13}$$

由传动机构误差、编码器误差、控制误差合成，得到调焦机构 CMOS 靶面的定位精度：

$$\sigma=\pm\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2}=$$
$$\pm\sqrt{3.20^2+0.10^2+0.92^2}=\pm 3.34\ \mu\text{m} \tag{14}$$

理论定位精度远优于±10 μm 的调焦精度要求。

3 有限元分析及试验验证

3.1 模态分析

调焦机构有限元模型如图 4 所示，共包含 27 965 个单元。其中，支撑框架、焦面箱、直线导轨采用 3D 体单元，传动机构、编码器、电机等采用质量点进行模拟，并通过 MPC 将质量点与支撑框架安装点进行刚性连接。对调焦机构进行模态分析，计算得出其前三阶固有频率及振型如表 3 所示，一阶模态位移云图如图 5 所示。

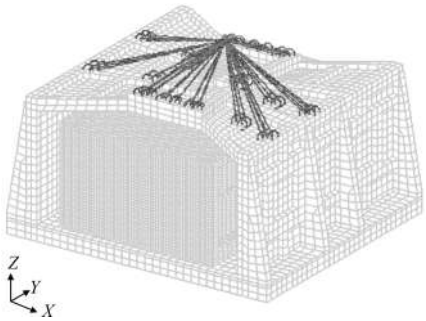

图 4 调焦机构有限元模型

Fig.4 Finite element model of focusing mechanism

表 3 调焦机构前三阶模态

Tab.3 First three-order modes of focusing mechanism

Order	Frequency/Hz	Vibration characteristics
1	153.24	Swing in *Y* direction
2	228.09	Swing in *X* direction
3	419.02	Swing in *Z* direction

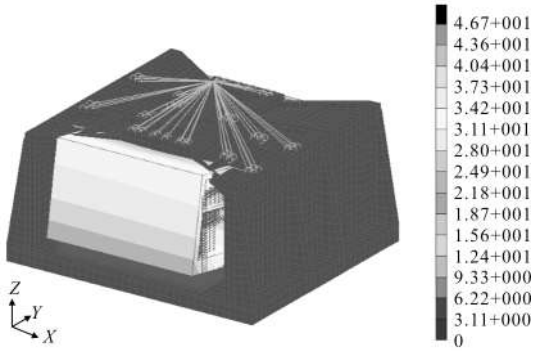

图 5 一阶模态位移云图

Fig.5 First order displacement fringe

3.2 振动试验

如图 6 所示，对调焦机构 X、Y、Z 三个方向分别进行扫频振动试验。得到其固有频率如表 4 所示，其中 Y 向响应曲线如图 7 所示。由于传动机构等采用质量点进行了近似模拟以及体单元划分时对复杂特征也进行了部分简化，导致有限元分析的前三阶固有频率与试验得到的固有频率存在一定的误差，分别为 16.1%、0.4%、11.6%。试验得到的一阶固有频率达到 182.7 Hz，说明调焦机构刚度分布合理，可以有效地避免其在发射过程中发生共振现象。

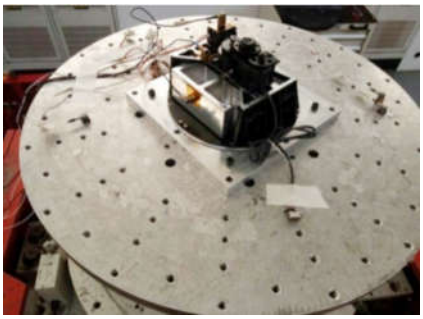

图 6 调焦机构扫频振动试验

Fig.6 Sweep frequency test of focusing mechanism

表 4 调焦机构固有频率

Tab.4 Natural frequency of focusing mechanism

Direction	Frequency/Hz
Y	182.7
X	227.2
Z	375.4

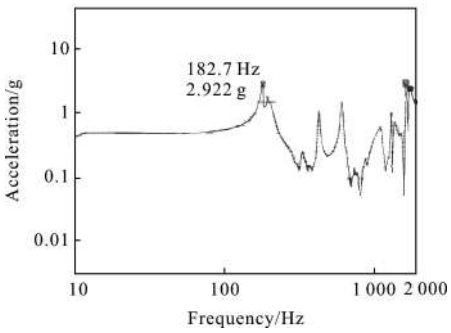

图 7 *Y* 向频率响应曲线

Fig.7 Frequency response curve of *Y* direction

4 精度测试及分析

如图 8 所示,对调焦机构进行精度测试:利用计算机控制焦面组件移动、读取编码器的码值;利用千分表读取 CMOS 靶面的位置信息;同时利用经纬仪测量靶面在移动过程中绕 *X* 轴、*Y* 轴的转角(令 *Z* 向为焦面组件移动方向,*X*、*Y* 向由右手定则确定)部分测试数据如表 5 所示。

以焦面组件位移为横坐标,绘制位移变化量残差曲线、码值变化量残差曲线如图 9、图 10 所示。由图可知位移变化量、码值变化量残差符号大体正负相同,并且没有显著的变化规律,所以判定测量数据无系统误差存在。根据格罗布斯准则,计算可知不存在粗大误差。

图 8 调焦机构精度测试

Fig.8 Accuracy test of focusing mechanism

表 5 调焦机构闭环测试数据

Tab.5 Closed loop test data of focusing mechanism

Number	Displacement /mm	Code value	Angle /(″)	
			X	*Y*
1	−2.363	12 241	0.00	−4.80
2	−1.894	17 430	9.72	6.20
3	−1.428	22 616	8.36	5.08
4	−0.951	27 802	5.80	−6.96
5	−0.475	32 989	7.28	3.32
6	0.000	38 179	10.60	−2.92
7	0.470	43 368	6.64	−10.52
8	0.948	48 557	5.20	9.08
9	1.423	53 743	8.80	−5.84
10	1.903	58 932	9.80	−6.16
11	2.375	64 120	5.44	4.48

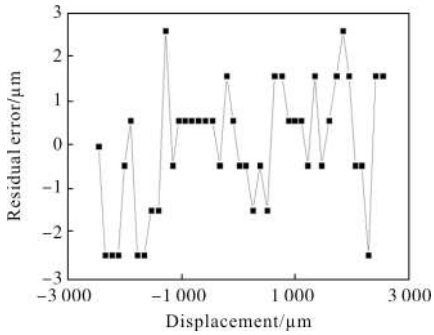

图 9 位移变化量残差曲线

Fig.9 Residual curve of displacement variation

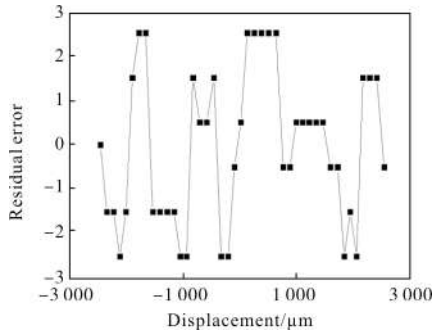

图 10 码值变化量残差曲线

Fig.10 Residual curve of code value variation

4.1 数据拟合分析

令 CMOS 靶面的位移为变量 x，编码器的码值为变量 y，对测试数据进行线性拟合，得到：

$$y=10\ 936.595\ 33x+38\ 173.408\ 96 \tag{15}$$

与理论关系曲线公式(10)相比，斜率 k 的相对变化率：

$$\delta_k=\frac{\Delta k}{k}=\frac{44.185\ 10}{33\ 892.41}=0.406\% \tag{16}$$

同理得，截距 b 的相对变化率 $\delta_b=0.015\%$，说明两条曲线可以很好地吻合，如图 11 所示。同时验证了理论计算、数据拟合的正确性以及闭环控制程序设计的有效性。

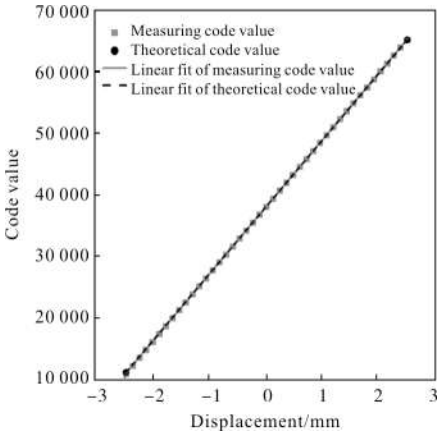

图 11 码值与位移关系曲线

Fig.11 Curve of code value and displacement

4.2 定位精度分析

位移变化量的标准差：

$$s=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}v_i^2}{n-1}}=1.4\ \mu\text{m} \tag{17}$$

式中：v_i 为位移变化量的残差；n 为试验样本总数。故调焦机构的定位精度 $\sigma=\pm3s=\pm4.2\ \mu$m。由于测量环境、人员操作、千分表自身的测量误差等因素的影响，由测量数据分析得到的定位误差±4.2 μm 略高于理论定位误差±3.34 μm。同时满足了±10 μm 的调焦精度要求。

4.3 直线性精度分析

CMOS 靶面绕 X 轴转角变化量的标准差 $s_x=4.2''$，绕 Y 轴转角变化量的标准差 $s_y=6.1''$，故调焦机构 CMOS 靶面的直线性精度：在 X 方向为 $\sigma_x=3s_x=12.6''$，Y 方向为 $\sigma_y=3s_y=18.3''$，满足用户提出的优于 30″的精度要求。同时验证了直线滚动导轨可以有效地限制靶面在移动过程中绕 X 轴、Y 轴转动的作用。

5 焦面标定试验

焦面标定试验：利用平行光管将光源发出的光准直为平行光束进入相机光学系统中，使物体成像在 CMOS 靶面上。利用计算机读取图像信息，根据图像的清晰程度来控制调焦机构前后移动，从而确定相机焦面位置。再通过修整垫片使靶面的零位与

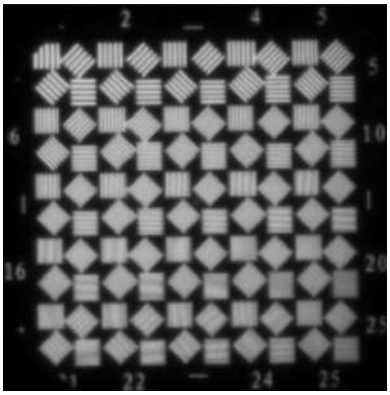

图 12 相机焦深范围外的图像

Fig.12 Image beyond the depth of focus

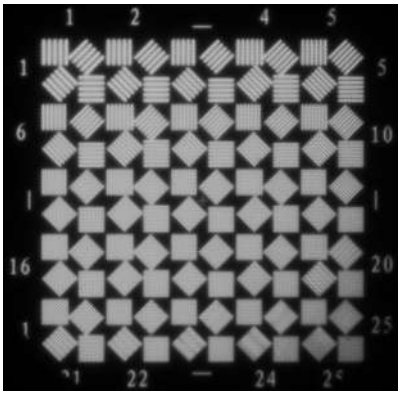

图 13 相机焦深范围内的图像

Fig.13 Image within the depth of focus

相机光学系统的焦平面重合。图 12、图 13 所示分别为 CMOS 靶面在相机焦深范围外、焦深范围内的图像信息,验证了调焦机构设计的有效性。

相机在空间投入使用之前,必须利用调焦机构对偏离的焦面进行校正, 以确保 CMOS 靶面在焦深范围内, 从而满足空间遥感相机的成像质量要求。

6 结 论

文中针对轻小型空间遥感相机的使用特性及要求, 设计了一套结构紧凑的像面移动式精密调焦机构,调焦范围±3 mm,质量仅为 3.25 kg;定位精度理论分析结果为±3.34 μm,优于±10 μm 设计指标;扫频振动试验表明,一阶固有频率为 182.7 Hz,与有限元模态分析结果吻合,刚度分布合理,可以有效地避免共振现象的发生;精度测试试验表明,CMOS 靶面的直线性精度:X 方向为 12.6″、Y 方向为 18.3″,定位精度优于±4.2 μm,略高于理论分析结果,且运行平稳,满足了调焦精度要求;最后,焦面标定试验验证了调焦机构设计的有效性, 满足了空间遥感相机的成像质量要求。

参考文献:

[1] Jiang Hao. Research on ultra-light SiC mirrors and support techniques [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)

[2] Ding Yalin, Tian Haiying, Wang Jiaqi. Design on the focusing mechanism of space remote-sensing camera [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2001, 9(1): 35-38. (in Chinese)

[3] Zhang Hongwen. Research on the auto-focusing technology for space camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)

[4] Lv Shiliang, Liu Jinguo, Jia Ping. Accuracy analysis of the focusing precision for multispectral CCD space camera [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42 (2): 392-397. (in Chinese)

[5] Xu Zhitao, Liu Jinguo, Long Kehui, et al. Accuracy analysis of focusing mechanism of high resolution space camera [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2013, 33(7): 0728001. (in Chinese)

[6] Wang Shuxin, Li Jinglin, Liu Lei, et al. Accuracy analysis of focusing mechanism in space camera with long-focal-plane [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2010, 18(10): 2239-2243. (in Chinese)

[7] San Bing, Li Jinglin. Focusing device design of the large aperture optics system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(S2): 329-332. (in Chinese)

[8] Wang Zhongshan, He Xin, Cui Yongpeng, et al. Analysis and validation of large size focal-plane focusing device for space camera [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43 (4): 1206-1209. (in Chinese)

[9] Hui Shouwen. Study of automatic focusing technique for long focus oblique real-time aerial camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)

[10] Jia Xuezhi, Wang Dong, Zhang Lei, et al. Optimizing design and precision experiment of focusing mechanism in lightweight space camera [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2011, 19(8): 1824-1831. (in Chinese)

[11] Liu Lei, Cao Guohua. Double cam focusing mechanism of space camera with wide field and long-focal-plane [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2012, 20(9): 1939-1944. (in Chinese)

[12] Wang Zhi, Zhang Liping, Li Chaohui, et al. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2009, 17(5): 1051-1056. (in Chinese)

[13] Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2012, 20(2): 379-386. (in Chinese)