

高分辨率空间相机调焦机构精度分析

许志涛^{1,2} 刘金国¹ 龙科慧¹ 吕世良^{1,2} 郭 疆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 针对某型高分辨率空间遥感相机的性能特点,设计了一种调焦机构以补偿相机的离焦量。从传动机构、光电编码器和调焦控制系统等部分对调焦机构的精度进行了分析,论述了误差大小及产生的原因,计算了调焦机构总误差的理论值。采用闭环控制方式对机构的调焦精度进行测试,运用比对方法——分别处理调焦镜的直线位置变化数据和与之对应的光电编码器角度位置变化数据——得到调焦机构的精度为 $\pm 3.1127 \mu\text{m}$,与理论分析一致,验证了调焦机构设计的有效性。最后对测试方法及结果进行了分析,论述了两者产生差异的原因。实验数据表明,调焦机构的精度满足相机对调焦机构 $\pm 10 \mu\text{m}$ 的精度要求。

关键词 遥感; 空间遥感相机; 调焦机构; 误差分析; 传动机构; 光电编码器; 闭环

中图分类号 V19 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0728001

Accuracy Analysis of Focusing Mechanism of High Resolution Space Camera

Xu Zhitao^{1,2} Liu Jinguo¹ Long Kehui¹ Lü Shiliang^{1,2} Guo Jiang¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In accordance with the characteristics of a high resolution space remote sensing camera, a focusing mechanism is designed to compensate for defocusing. The accuracy of focusing mechanism is analyzed from the transmission mechanism, the photoelectric encoder and the focusing control system. Before calculating the total errors of the focusing mechanism, all of the causes and values of error are discussed. After testing the accuracy of the focusing mechanism with closed-loop control mode, the data of the encoder codes and the focusing mirror displacements are processed respectively. Contrasting the results, the accuracy of the focusing mechanism is obtained, equal to $\pm 3.1127 \mu\text{m}$, which is in accordance with the theoretical value, and it proves that the design of the focusing mechanism is effective. Finally, the reason of differences between the accuracy results of the encoder codes and the focusing mirror displacements is obtained after analyzing the testing method. The experiments show that the accuracy of the focusing mechanism meets the camera's accuracy requirement of $\pm 10 \mu\text{m}$.

Key words remote sensing; space remote sensing camera; focusing mechanism; error analysis; transmission mechanism; photoelectric encoder; closed-loop

OCIS codes 280.4788; 280.4991; 120.0280

1 引 言

随着空间遥感技术的发展,高分辨率空间相机在军事防御及打击等方面扮演着越来越重要的角色,主要体现在情报搜集、目标指引等方面的应用。

发射前,相机内 CCD 靶面按要求置于光学系统像面处。但是相机在发射过程中会受到冲击、过载振动等影响,导致 CCD 靶面偏离初始位置;在轨运行时,相机所处环境的不断变化直接影响了相机光学系统

收稿日期: 2012-11-16; 收到修改稿日期: 2012-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(61108066)、总装备部“十一五”计划重点型号项目“XX-1”相机项目

作者简介: 许志涛(1987—),男,博士研究生,主要从事空间遥感图像处理及空间相机调焦控制机构设计等方面的研究。

E-mail: xuzhitao2008@126.com

导师简介: 龙科慧(1958—),女,硕士,研究员,主要从事空间遥感成像技术方面的研究。E-mail: long_kh@163.com

中透镜折射率、曲率半径、厚度及透镜之间间隔等参数的变化,使得光学系统的焦距发生变化。上述多种原因导致相机产生离焦,为了保证相机的成像质量,获得最佳分辨率图像,必须对离焦进行补偿^[1-5],即通过调焦机构将 CCD 靶面调到光学系统像面处。

目前,常用的调焦方式有三种:调焦镜调焦、像面移动式调焦和镜头移动式调焦。其中调焦镜调焦方式是在光学系统后增加一块反射镜改变光路方向,通过移动反射镜改变焦面位置。这种方式精度高,适用于高分辨焦距相机^[6-7]。例如,美国火星勘测轨道器的载荷——高分辨率成像科学试验相机采用了调焦镜方式调焦,其焦距为 12 m。传统方式中,调焦镜与其位置检测元件通常通过齿轮等传动机构相连,容易产生测量误差。本文对一种新型高分辨率相机调焦机构进行了精度分析,讨论了误差产生的原因。采用闭环调焦控制方式,对调焦机构进行测试,最后对测试数据及其处理结果进行了分析,为调焦机构的设计提供参考。

2 调焦机构组成及精度要求

2.1 调焦机构组成

图 1 为相机光路图,视场范围内地面景物经离轴三反光学系统后,由调焦镜反射成像在 CCD 靶面上。当像面与 CCD 靶面脱离产生离焦时,相机所成的像将不能满足像质要求,因此,需要设计一套调焦机构来调节像面与 CCD 靶面的相对位置,从而保证相机获取高质量的图像。根据相机的使用特性及要求,选择调焦镜调焦方式,即在离轴三反光学系统和 CCD 靶面之间放置一个反射镜,通过调节反射镜与

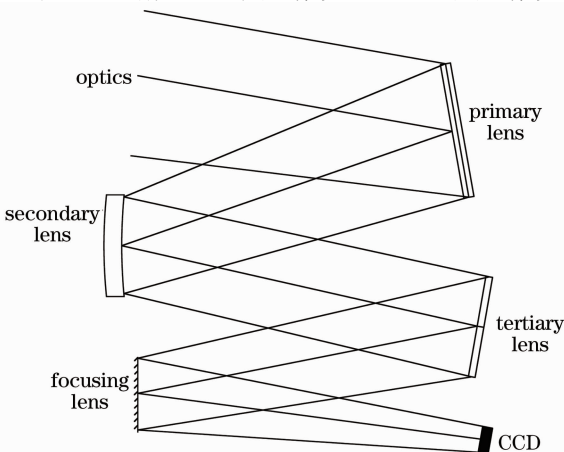


图 1 光路图

Fig. 1 Optical path chart

CCD 靶面的相对位置来完成调焦。

相机调焦机构主要由步进电机、传动机构、调焦镜和位置检测元件(即光电编码器)组成^[8],而传动机构又包括两级传动齿轮副、一级传动蜗轮蜗杆副和滚珠丝杠副。调焦的控制主要由下位机主控系统和调焦控制系统来完成。工作原理如图 2 所示:调焦时,主控系统发出命令,调焦控制系统接收到调焦指令后,控制步进电机驱动传动机构带动调焦镜沿光轴方向移动,同时带动编码器旋转。编码器实时反馈角度位置信息,该角度位置与调焦镜的直线位置一一对应。其中,步进电机工作方式是四相八拍,步距角为 0.9° ,机构减速比是 62.5:1,编码器为 14 位航天级编码器,分辨率和精度分别是 $79.1''$ 和 $100''$,调焦镜行程全长 5 mm。当调焦镜从导轨的一端移动到另一端时,编码器旋转 360° 。

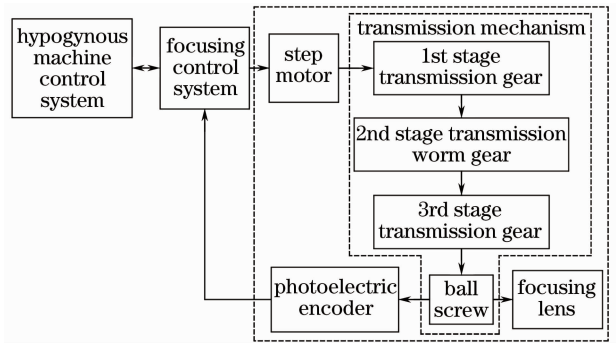


图 2 调焦机构组成图

Fig. 2 Parts of focusing mechanism

2.2 调焦机构精度要求

CCD 的像元决定了相机的分辨率,只要相机分辨率内景物的像能够完全落在 CCD 的一个像元上,则所拍摄的图像就能满足像质要求。也就是说,CCD 靶面在光学系统高斯像面的前后某一区间范围内都可清晰成像^[9],这一范围就是相机的焦深,焦深使得相机允许有一定的离焦量。通过半倍焦深公式^[10-11] $|\pm\Phi| = 2F^2\lambda$,可求得相机的半焦深,即被允许的离焦量为 $\pm 95.2 \mu\text{m}$ 。考虑到环境等多种因素的影响,调焦精度的设计值应控制在 $\pm 20 \mu\text{m}$ 范围内,由于调焦镜移动时,像面的位移量是调焦镜位移量的 2 倍,所以相机调焦机构的调焦精度须优于 $\pm 20 \mu\text{m}/2 = \pm 10 \mu\text{m}$ 。

3 调焦机构精度分析

相机调焦机构的误差来源主要为传动机构的传动误差、光电编码器的测角误差和调焦系统的控制误差。

3.1 传动机构误差

相机要求调焦机构具有较高的灵敏度,保证单步移动距离远小于精度要求,而步进电机步距角较大,因此需要减速装置将电机单步移动距离微小化。传动机构减速比设计为 62.5:1,主要由两级齿轮副、一级蜗轮蜗杆副和滚珠丝杠副组成,如图 3 所示。工作时,步进电机作为动力源驱动一级齿轮副和二级蜗轮蜗杆副带动三级齿轮副,而滚珠丝杠副将三级齿轮副的圆周运动转换为直线运动,从而推动导轨上的滑动部件带动调焦镜沿光轴方向移动,完成精密调焦。滚珠丝杠副的螺母与调焦镜镜座之间通过螺钉紧密相连,与丝杠之间为无间隙配合。光电编码器安装在丝杠端部,所以调焦镜镜座与编码器之间为刚性连接。通过测量光电编码器的旋转角度,即可计算出调焦镜运动的实际位移,即调焦量。

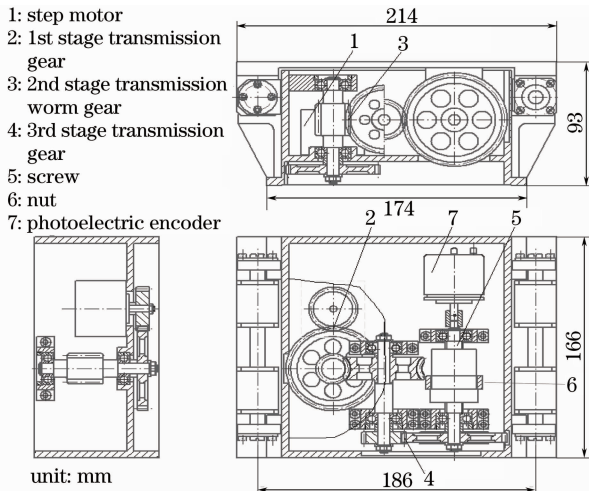


图 3 传动机构结构图

Fig. 3 Structure of transmission mechanism

相机离焦后,通过图像质量计算出调焦量,并根据实时反馈的调焦镜位置,下位机发送指令控制调焦系统完成调焦。由于采用了闭环控制方式,将调焦镜的实时位置作为系统的反馈量,因此,齿轮副和蜗轮蜗杆副等中间链路对调焦精度没有影响。光电编码器是调焦镜的直线位置检测元件,其检测误差是影响传动机构精度的一个因素,但调焦镜镜座与编码器之间为刚性连接,即两者严格同步,所以误差为 0。

编码器旋转角度 C 与调焦量 Δx 的关系为

$$C = \frac{\Delta x}{L} \times 2^{14}, \quad (1)$$

式中 L 是调焦镜直线行程。加工过程中, L 并不严格等于设计值,会引入加工误差,该误差值为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。综合分析知,传动机构的误差为 $\sigma_1 = \pm 1 \mu\text{m}$ 。

3.2 光电编码器误差

光电编码器误差来源主要为长周期误差和短周期误差,长周期误差是在编码器码盘加工和装调过程中引入的,可以通过平差和产品的标定予以修正。而短周期误差是由细分信号扫描的质量和信号周期的大小决定的,无法补偿。对于中低精度编码器而言,影响精度的主要因素为细分信号的直流分量误差、幅值误差、正交相位误差以及量化误差。其中,直流分量、幅值和相位的影响为^[12-13]

$$d\theta = \frac{1}{2^8} \left\{ \arctan \left[\frac{\sin(\theta - \varphi)}{r / \sqrt{a^2 + b^2} + \cos(\theta - \varphi)} \right] + \arctan \left[\frac{\sin 2\theta}{\cos(2\theta) + 2r/dr - 1} \right] + \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \delta_\theta \right\}, \quad (2)$$

式中 θ 是细分信号的理论角度, $\varphi = \arctan(b/a)$, a 、 b 分别是正弦和余弦细分信号的直流分量偏差, r 是正余弦信号的理论幅值, dr 是正余弦信号之间的幅值偏差, δ_θ 是细分信号的相位偏差。

调试细分信号时,通过示波器观察两路信号的波形调整直流分量,并用其组成的李萨如图形来调整两者的幅值和相位差。所以 $a = b = dr = 0.05r$, $\delta_\theta = 3^\circ$, 因此(2)式可简化为

$$d\theta = \frac{1}{2^8} \left\{ \arctan \left[\frac{\sin(\theta - \pi/4)}{10\sqrt{2} + \cos(\theta - \pi/4)} \right] + \arctan \left[\frac{\sin 2\theta}{\cos(2\theta) + 39} \right] + \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \frac{\pi}{60} \right\}. \quad (3)$$

对(3)式进行求导并计算可得最大值为

$$d\theta_{\max} = 84.6'', \quad (4)$$

所以细分信号的直流分量、幅值和正交相位对编码器误差影响为

$$\delta\theta_{\max} = \pm d\theta_{\max} = \pm 84.6''. \quad (5)$$

量化是将连续的信号离散化,用若干个离散数值来表示连续信号,用某一数值来代替连续信号相应区间的方法。用特定值来表示某一个数值区间就构成了误差,此误差是量化误差。编码器量化误差为

$$\delta = \pm \xi/2 = \pm 360^\circ/2^{15} = \pm 39.55''. \quad (6)$$

采用标准差合成原理^[14],将(5)式和(6)式合成,得到编码器的误差为

$$\Delta = \pm \sqrt{\delta\theta_{\max}^2 + \delta^2} = \pm 93.39''. \quad (7)$$

编码器 360° 对应调焦镜行程为 5 mm,所以编码器测角误差引起的调焦镜线位移误差为

$$\sigma_2 = \frac{5 \text{ mm}}{360^\circ} \Delta = \pm 0.36 \mu\text{m}. \quad (8)$$

3.3 调焦控制误差

闭环调焦时,由于惯性等原因,调焦镜到达目标位置后不能立即停止,可能会越过目标位置。之后,系统控制调焦镜往回移动,此过程不断重复,直至达到目标位置。为此引入阈值来控制调焦镜的停止位置,调焦镜在目标位置前后某个范围内都可停止。所以调焦镜最终并不一定停在目标位置,从而产生了调焦控制误差。程序设计时,设置控制阈值为±10个码值,对应的调焦镜直线位移为

$$l = \pm \frac{5 \text{ mm}}{360^\circ} \times 10 \times 79.1'' = \pm 3.05 \text{ } \mu\text{m}. \quad (9)$$

所以调焦机构的调焦控制误差为 $\sigma_3 = \pm 3.05 \text{ } \mu\text{m}$ 。

3.4 误差合成

由传动机构误差、光电编码器误差以及调焦控制误差合成的调焦机构误差^[14]为

$$\sigma = \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} = \pm 3.23 \text{ } \mu\text{m}, \quad (10)$$

满足总体提出的±10 μm的精度要求。

4 实验数据及结果分析

采用闭环调焦控制方式对调焦机构进行精度测试。测试原理如图4所示,下位机地面仿真系统给调焦控制系统发送指令,控制调焦机构的调焦过程。每测试一次,编码器返回的角度位置由调焦系统处理后在下位机仿真系统上显示出来,同时用数字千分尺测量调焦镜的直线位置。令调焦镜导轨的中间位置为零点,靠近 CCD 的区间为正区间,远离 CCD 的区间为负区间,并且调焦镜处于导轨中间位置时,编码器返回的角度值为 0。在调焦镜靠近 CCD 移动时,编码器角度增加,远离 CCD 移动时,编码器角度减小。

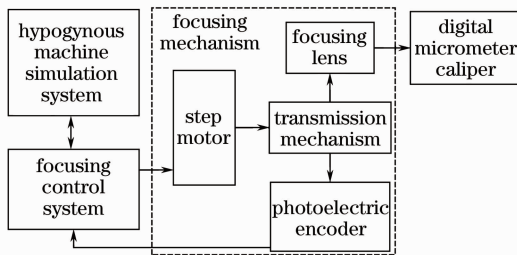


图4 调焦机构精度测试图

Fig. 4 Focusing mechanism accuracy test chart

测试时,下位机仿真系统发送指令,先使调焦镜反向移动,编码器角度位置每次减少 512 个码值,测量若干次之后再使调焦镜正向移动,编码器角度位置每次增加 512 个码值,记录下编码器返回角度值和数字千分尺显示的直线位置,测试数据结果如

表1所示。

表1 闭环调焦测试结果

Table 1 Test results of closed-loop focusing

<i>i</i>	PE	C_θ	PL / μm	x / μm
0	1700		1805	
1	1501	-511	1649	-156
2	1301	-512	1493	-156
3	1101	-512	1336	-157
4	F01	-512	1179	-157
5	D01	-512	1024	-155
6	B00	-513	869	-155
7	901	-511	712	-157
8	701	-512	555	-157
9	501	-512	398	-157
10	300	-513	241	-157
11	101	-511	85	-156
12	FF00	-513	-71	-156
13	FD00	-512	-227	-156
14	FB01	-511	-381	-154
15	F900	-513	-537	-156
16	F700	-512	-694	-157
17	F500	-511	-851	-157
18	F300	-512	-1009	-158
19	F100	-512	-1163	-154
20	F300	512	-1011	152
21	F500	512	-857	154
22	F6FF	511	-701	156
23	F900	513	-546	155
24	FB00	512	-391	155
25	FD00	512	-235	156
26	FF00	512	-80	155
27	100	512	76	156
28	300	512	233	157
29	500	512	389	156
30	700	512	546	157
31	900	512	703	157
32	B00	512	858	155
33	D00	512	1015	157
34	F00	512	1170	155
35	1100	512	1328	158
36	1300	512	1484	156
37	1500	512	1640	156
38	1700	512	1796	156

Note: *i* is the index of testing; PE is the angle code of the photoelectric encoder; C_θ is the changing angle code of the encoder; PL is the place of the focusing lens; x is the movement of the focusing lens.

分别以编码器码值变化量和调焦镜直线位置变化量为研究对象,对测试数据进行处理分析。

4.1 以编码器码值变化量为研究对象

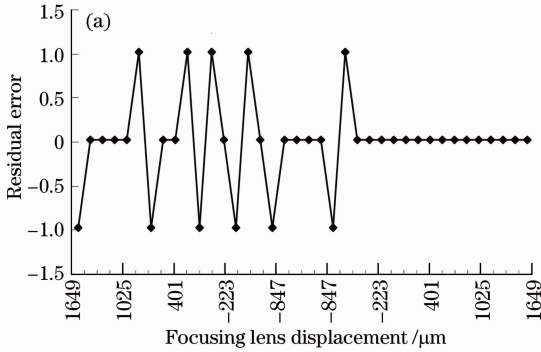
根据格拉布斯准则可知,所测量的 38 组编码器码值变化量无粗大误差,均值为

$$\bar{C}_\theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_\theta^i| = 511.9737. \quad (11)$$

码值变化量的残差为

$$\nu_i = |C_\theta^i| - \bar{C}_\theta, \quad (12)$$

根据(12)式得编码器码值变化量残差曲线如图 5(a)所示,其中横坐标表示测试过程中调焦镜的正反



向移动位置。标准差为

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \nu_i^2}{(n-1)}} = 0.5446. \quad (13)$$

因此闭环调焦测试时,编码器码值变化量误差为

$$\sigma'_c = \pm 3\sigma_c = \pm 1.6338. \quad (14)$$

编码器分辨率是 $79.1''$,所以由编码器码值变化量精度求得调焦机构精度为

$$\sigma_a = \frac{\sigma'_c \times 79.1''}{360^\circ} \times 5 \text{ mm} = 0.4986 \mu\text{m}. \quad (15)$$

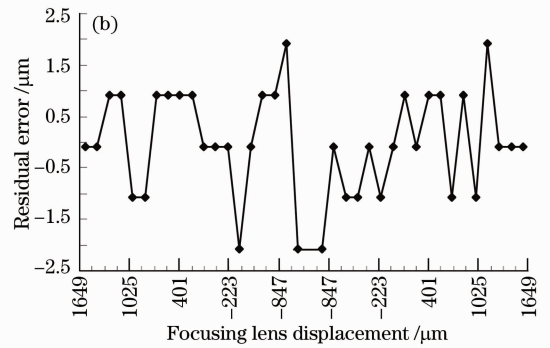


图 5 调焦机构残差曲线。(a)编码器码值变化量残差曲线;(b)调焦镜位置变化量残差曲线

Fig. 5 Residual error curves of focusing mechanism. (a) Angle residual error of photoelectric encoder; (b) displacement residual error of focusing lens

4.2 以调焦镜直线位置变化量为研究对象

由格拉布斯准则知 x_{20} 是粗大误差,将其剔除之后求得调焦镜位置变化量的均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i| = 156.0811 \mu\text{m}. \quad (16)$$

调焦镜位置变化的残差为

$$\nu_i = x_i - \bar{x}, \quad (17)$$

根据(17)式求得调焦镜位置变化量残差曲线如图 5(b)所示。标准差为

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \nu_i^2}{(n-1)}} = 1.0376 \mu\text{m}. \quad (18)$$

所以由调焦镜直线位置变化量求得的调焦机构精度是

$$\sigma_x = \pm 3\sigma' = \pm 3.1127 \mu\text{m}. \quad (19)$$

对测试数据处理过程及结果进行分析,得到如下结论。

1) 图 5(a)显示,调焦镜反向移动时残差曲线波动较大,正向移动时波动较小,说明编码器码值变化量中随机误差占主要成分。图 5(b)显示,反向移动和正向移动时,调焦镜位置变化量残差曲线波动都较大,并且导轨同一位置处两次测量的残差正负号基本相同,所以确定存在系统误差。编码器与调焦镜镜座是刚性连接,两者误差性质相同,而调焦镜位

置是由数字千分尺测量所得,因此系统误差是由数字千分尺等组成的测试系统引入的。

2) 粗大误差 x_{20} (第 20 个点)处是调焦镜的返回位置,此处位移值比单方向移动的位移值小。经过多次测量,这一现象仍然存在,说明系统存在空回。但是由编码器返回的角度数据可知,调焦机构不存在空回。分析认为,空回是由数字千分尺与调焦镜镜座之间连接不紧密以及材料形变等原因造成的。

3) 调焦镜直线位置变化量所求误差 σ_x 比编码器码值变化量所求得的误差 σ_a 大的原因为:由 σ_c 求 σ_a 的计算公式有误差,因为公式是在理想状态下得到的,即调焦镜移动全程 5 mm 的时候,认为编码器恰好转过 360° ,事实上,调焦镜移动全程,而编码器对应转过的角度并不严格等于 360° ,存在偏差,从而引入计算误差;此外,测量调焦镜位置的数字千分尺也存在误差,即测试系统存在检测误差。因为调焦机构的误差最终体现在调焦镜位置误差上,所以选取调焦镜位置精度 $\pm 3.1127 \mu\text{m}(\sigma)$ 作为调焦机构的精度,满足相机调焦精度要求。

5 结 论

运用闭环调焦方式,可消除传动机构中间链路

对精度的影响,因此降低了对传动机构各部件的加工精度要求;采用调焦镜镜座和光电编码器刚性连接技术,消除了传统方式中位置检测元件对调焦镜位置的测量误差,提高了机构精度。经分析可知,调焦机构的误差来源主要是调焦控制误差。

采用闭环方式对调焦机构进行测试,处理测试数据得到调焦机构精度为 $\pm 3.1127 \mu\text{m}(\sigma)$,误差实测值与理论设计值基本一致,调焦机构设计合理,满足精度要求。在对测试数据的处理分析过程中发现:根据编码器码值变化量求出的调焦机构精度和由调焦镜直线位置变化量计算出的精度存在一定的偏差。它的主要来源是检测误差,是由数字千分尺等组成的测试系统引入的。此外,由于数字千分尺与调焦镜镜座之间连接不紧密,使测量过程中产生了空回现象。

参 考 文 献

- 1 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.
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.
- 2 Chen Shiping. Design and Experiment of Space Camera[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003. 27-28.
陈世平.空间相机设计与试验[M].北京:中国宇航出版社,2003.27-28.
- 3 Lu E, Yan Changxiang, Wu Qingwen, *et al.*. Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments[J]. Chinese J Optics and Applied Optics, 2009, 2(5): 364-376.
卢镔,颜昌翔,吴清文,等.空间光学遥感器环境适应性设计与试验[J].中国光学与应用光学,2009,2(5):364-376.
- 4 Lan Gongpu, Wang Xuan, Liang Wei, *et al.*. Optical design and thermal analysis for the active-focusing aerial camera objective[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322006.
蓝公仆,汪旋,梁伟,等.主动调焦式航空相机物镜光学设计及温度仿真分析[J].光学学报,2012,32(3):0322006.
- 5 Zhao Zhibin, Liu Jinghong. Power spectra-based auto-focusing method for airborne optoelectronic platform[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3495-3500.
赵志彬,刘晶红.基于图像功率谱的航空光电平台自动检焦设计[J].光学学报,2010,30(12):3495-3500.
- 6 Yang Yongbin. Study on focusing technique for space optical camera[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(2): 20-24.
杨永彬.空间相机调焦技术研究[J].航天器工程,2011,20(2):20-24.
- 7 Li Chaohui, Wang Zhi, Qiao Ke, *et al.*. Focusing technique for three-line stereo mapping camera and realization[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(10): 41-46.
李朝辉,王智,乔克,等.三线阵立体测绘相机高精度调焦技术及实现[J].光电工程,2009,36(10):41-46.
- 8 Xu Zhitao, Long Kehui. Design of focusing control system for three-linear stereo mapping camera[J]. J Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(10): 899-903.
许志涛,龙科慧.三线阵立体测绘相机调焦控制系统设计[J].电子测量与仪器学报,2012,26(10):899-903.
- 9 Shi Shunxiang, Wang Xueen, Liu Jinsong. Physical Optics and Applied Optics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008. 406-407.
石顺祥,王学恩,刘劲松.物理光学与应用光学[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008.406-407.
- 10 Zhou Jiufei, Zhai Linpei, Zhou Gang, *et al.*. Autofocus method of aerial imaging device[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 105-108.
周九飞,翟林培,周刚,等.航空成像设备自动调焦方法[J].光学学报,2010,30(1):105-108.
- 11 Jia Xuezhi, Wang Dong, Zhang Lei, *et al.*. Optimizing design and precision experiment of focusing mechanism in light weight space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1824-1831.
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):1824-1831.
- 12 Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(8): 379-386.
王显军.光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J].光学精密工程,2012,20(8):379-386.
- 13 Ye Shengxiang. Accurate Measurement about Photoelectric Shift[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003.
叶盛祥.光电位移精密测量技术[M].成都:四川科学技术出版社,2003.
- 14 Ma Hong, Wang Jinbo. Error Theory and Precision of Instrument[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2007. 75-76.
马宏,王金波.误差理论与仪器精度[M].北京:兵器工业出版社,2007.75-76.

栏目编辑:张腾