

文章编号 1004-924X(2013)05-1349-08

空间相机调焦机构误差分析

陈洪达^{1,2*}, 陈永和¹, 史婷婷¹, 郑庚¹, 刘晓华¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:空间高分辨率遥感仪器的发射过程和复杂温度环境条件会使其光学焦平面发生偏离, 从而影响相机的成像质量。为补偿相机焦平面位置的变化, 本文根据高分辨红外相机的在轨应用环境以及光学设计要求, 对相机的调焦机构进行了方案设计和误差分析。计算了结构误差对系统精度的影响, 对不同类型结构的精度进行了归类, 并利用齐次坐标变换矩阵建立了误差分析模型。同时, 详细分析了误差源的特性、概率分布和变换矩阵参量间的关系。利用 Monte Carlo 法进行了仿真, 结果表明该机构设计合理, 满足仪器的使用要求。样机测试表明, 该机构行程内轴向位置误差为 (-0.01 ± 0.0036) mm, 透镜最大倾斜角为 $25''$, 最大离轴量为 0.005 mm。目前, 该机构已成功在轨使用。

关键词:空间遥感; 空间相机; 调焦机构; 误差分析; 误差建模; Monte Carlo 法

中图分类号: V443.5; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1349

Error analysis for focusing mechanism of space camera

CHEN Hong-da^{1,2*}, CHEN Yong-he¹, SHI Ting-ting¹, ZHENG Geng¹, LIU Xiao-hua¹(1. *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;*2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*** Corresponding author, E-mail: chenhongda@mail.sitp.ac.cn*

Abstract: The position of optical focal plane for a space remote sensing instrument will be changed in severe launching process and complex working thermal environments, which effects the imaging quality of the remote sensing instrument seriously. To compensate the displacement of the optical focal plane and to ensure good imaging quality consequently, this paper illustrated the design scheme for a focusing mechanism and analyzed its error sources aiming to the working environments and accuracy demands for an infrared camera. The effect of structure error on the system accuracy was analyzed and the precisions of different structures were classified. An error analysis model was established based on homogeneous transformation matrixes which described the relation between topology structure and coordinate transformation. In addition, the characteristics and distribution of error sources were analyzed in detail, and the relationship between matrix parameters was discussed. The results of numerical calculation by Monte Carlo method demonstrate that the design mechanism is reasonable and satisfies remote sensing requirements. The measurements show that the axial position accuracy of focusing

收稿日期: 2013-01-03; 修订日期: 2013-02-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40776100)

mechanism is (-0.01 ± 0.0036) mm with a tilt less than $25''$ and a displacement of 0.005 mm through travel distance. The focusing mechanism has been implemented in the space flight.

Key words: space remote sensing; space camera; focusing mechanism; error analysis; error modeling; Monte Carlo method

1 引言

空间高分辨率遥感相机是搭载在卫星上用于获取地球信息的设备,其核心是精密光学系统。在微重力、高真空环境、温度交变的工作环境影响下,系统的焦平面位置会产生变化,因此需要配置在轨调焦机构进行补偿。依据调焦元件的不同,空间调焦机构有调节焦平面、单透镜、透镜组和反射镜等多种形式,且均有成功应用的案例^[1-4]。某型号空间相机采用同轴光学系统,工作环境温度在 $8 \sim 28$ °C 间变化,为保证相机的成像质量,探测器位置的光学传递函数(MTF)需大于 0.4。温度变化主要影响下列光学系统参数:(1)光学元件轴向间隔、径向位置;(2)反射面、透射面的曲率半径;(3)材料折射率,如金属 Ge,其折射率对温度非常敏感,对本系统影响较大;(4)光学元件的受力变形等。计算调焦量时,首先根据机械结构、光学材料的杨氏模量、热膨胀系数等参数,计算出不同温度下光路结构及参数的变化量;然后带入到系统中,以 $MTF > 0.4$ 作为判据依据,计算调焦元件所需的移动量。最终选定后光路中的单片透镜作为调焦原件,调焦量为 ± 1.2 mm。

基于此,本文针对该相机使用的调焦机构进行了误差分析,计算了机构误差对系统的影响,同时对机构不同类型的精度进行了归类,并利用齐次坐标建立机构的误差模型,详细分析了误差来源,使用 Monte Carlo 方法计算出机构的精度,并通过试验进行了验证。

2 调焦机构及其误差

2.1 空间调焦机构

图 1 所示的是某型号空间相机使用的透镜调焦机构。机构分为驱动、执行 2 个部分:驱动部分的电机位于调焦支撑筒内,通过柔性联轴器与丝杆连接;执行部分的调焦元件透镜安装于调焦透镜动环内,动环与调焦镜静止环通过高精线性滑台连接;调焦连接架连接两部分,起传动作用。步进电机的步距角为 1.8° ,滚珠丝杆螺距为 2 mm,步进电机每转

一步,透镜移动 $2 \text{ mm}/360^\circ \times 1.8^\circ = 0.01 \text{ mm}$ 。

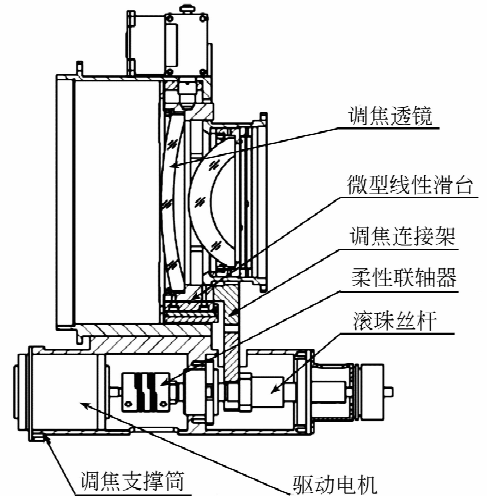


图 1 调焦机构结构图

Fig. 1 Structural diagram of focusing mechanism

2.2 机构误差

2.2.1 机构误差类型

调焦机构误差分为装配误差、动态误差。装配误差也称静态误差,它表示在选定的零部件和加工、装配水平下,机构装配完成后的误差概率分布情况。其中调焦透镜处于机构末端,它初始的位置、角度误差可以通过光校消除,但是轴系角度误差将影响机构的运动。动态误差是机构的运动精度,反映运动过程中的位置、角度误差,包含动态定位误差、动态离轴和角度误差,是评定机构精度的最终指标。

2.2.2 动态定位精度

调焦透镜沿轴向移动的距离误差称为动态定位精度。它应小于系统要求的调焦步长 0.05 mm,这与调焦透镜能否到达所需的位置,将光学焦面调整到位密切相关。

2.2.3 动态离轴和角度倾斜误差

在调焦透镜轴向移动时,会产生一定量的径向位移和角度倾斜变化,影响光学系统精度,故需控制在许用范围内。为衡量误差大小,作如下定义:调焦透镜有前后 2 个面(Surface1、Surface2),两球面球心 C_1 、 C_2 的连线即为透镜光轴(Optical

axis of the lens),如图 2 所示^[5]。角度倾斜误差为该透镜光轴与参考轴(Reference axis)间的角度(θ),离轴即透镜顶点到参考轴的距离(a)。对于调焦机构计算时的参考轴是系统光轴。以 MTF 为判据计算系统误差允许量为离轴小于 0.05 mm,倾斜小于 $3'$,此时 $MTF > 0.41$ 。

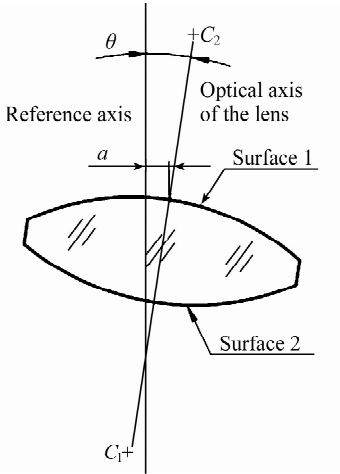


图 2 透镜倾斜和离轴

Fig. 2 Schematic diagram of displacement and tilt errors of a lens

2.3 误差建模

本文以驱动机构建立误差模型,原因是:(1)装配过程中,根据驱动机构运动轨迹调整执行机构,减小运动干涉。(2)当产生干涉时,微型线性滑台的刚度远小于滚珠丝杆,变形更大,因此调焦透镜运行更贴近驱动机构确定的轨迹。

误差建模采用齐次坐标变换方法,便于计算机处理,它在工业机器人、指向机构等方面应用广

泛^[6]。首先要在各运动部件上建立坐标系。坐标系的原点选择在构件的力系交汇处,深沟球轴承支撑端的原点位于轴承中心,角接触轴承支撑端原点位于沿接触角直线与轴系中心线交点处。坐标轴 Z 轴正向为电机、丝杆正向转动, Y 轴垂直于纸面向内, X 轴依右手坐标系规则确定。

图 3 表示了调焦机构的坐标系和它们之间的关系,图中包含 5 个坐标系,分别为 {M} 电机、{S} 丝杆、{ST} 丝杆动态、{N} 螺母、{F} 透镜,其中 {ST} 是丝杆转动时轴系的动态误差,轴系整体窜动、晃动和角运动误差。坐标系间沿 X、Z 轴平移用 d, l 表示,绕 y 轴旋转的角度用 α 表示。

根据齐次坐标变换原理,各个坐标的变换关系如下:

$${}^M_S T = Trans(d_s, 0, l_s) Rot(y, \alpha_s), \quad (1)$$

$${}^S_{ST} T = Trans(-d_s, 0, l_s) Rot(y, \alpha_s), \quad (2)$$

$${}^{ST}_N T = Trans(d_n, 0, 28 + ph_0 g_m + l_n) \times Rot(y, \alpha_n), \quad (3)$$

$${}^N_F T = Trans(d_f, 0, l_f) Rot(y, \alpha_f), \quad (4)$$

$${}^M_F T = {}^M_S T {}^S_{ST} T {}^{ST}_N T {}^N_F T. \quad (5)$$

其中: $Trans(a, b, c)$ 表示沿 X、Y、Z 轴移动 a, b, c 距离, $Rot(n, \alpha)$ 表示沿 $n(n=X, Y, Z)$ 轴旋转 α 角度。式(5)即是从电机输出转动轴原点到调焦透镜顶点的齐次坐标变换矩阵,它包含了每个参与运动构件间的距离和角度,这些距离和角度不但包含理论上的尺寸还含有零件加工和装配的误差^[7]。

2.4 误差源分析

齐次坐标变换的参量是坐标系之间的距离和角度,需与零件加工、装配误差建立联系,并分析误差源的特点。机构误差源的分析是基于该机构高精度、低速、行程短的特点进行的,其概率分布模型依据国家标准和工程经验确定。在大批量生产条件下,稳定工艺过程中,工件尺寸趋近正态分布;偏心 and 径向跳动趋近瑞利分布;没有任何参考的统计数据的尺寸与位置误差一般可当作均匀分布^[8]。

2.4.1 系 {M} 到系 {S} 坐标误差

影响滚珠丝杆轴系安装误差的有丝杆轴、轴承、轴承座的配合间隙以及丝杆轴、轴承座的同轴度。依据轴系配合的特点,轴系最大角运动误差有如下关系:

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta f_k + \Delta f_z + \frac{1}{2} \Delta f_{s1} + \frac{1}{2} \Delta f_{s2}}{L}. \quad (6)$$

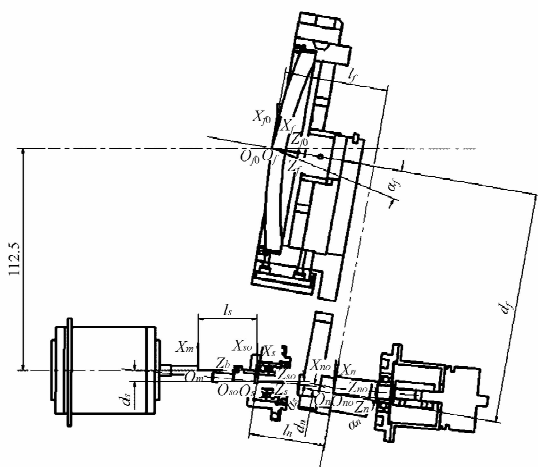


图 3 运动构件坐标系定义

Fig. 3 Coordinate definition of focusing mechanism

Δf_k 、 Δf_z 分别是孔、轴的同轴度误差, Δf_{s1} 、 Δf_{s1} 是两端轴孔的配合间隙, L 是轴系跨距^[9]。丝杆轴固定端安装角接触轴承, 自由端安装深沟球轴承。轴颈与轴承内圈采用过盈配合, 无间隙。轴承与轴承座的配合间隙分别是 Δs_{g1} 和 Δs_{g2} 。 Δst_1 、 Δst_2 是丝杆轴和轴承座的同轴度。依式(6)可得 $\alpha_s = (0.5 \times \Delta s_{g1} + 0.5 \times \Delta s_{g2} + \Delta st_1 + \Delta st_2) / L$, 其中跨距 $L = 78$ mm。传动第一级坐标系 {S} 和最后一级坐标系 {F} 的两维位置坐标参量 d_s 、 l_s 、 d_f 、 l_f 仅影响最终坐标系的位置, 在装配时可通过光校修订, 所以取理论值计算, 转动分量 α_s 、 α_f 影响调焦运动轨迹, 误差部分需计入。

2.4.2 系 {S} 到 {ST} 坐标误差

滚珠丝杆转动时产生的动态误差用系 {ST} 描述, 其中 l_s 、 d_s 、 α_s 分别表示轴系窜动、晃动和角度变化, 其误差值主要取决于轴承。轴系采用 P4 级、消游隙固体润滑轴承, 重要精度指标包括 K_{ia} 、 K_{ea} ——成套轴承内圈、外圈径向跳动; S_{ia} 、 S_{ea} ——成套轴承内圈、外圈轴向跳动。本轴系中轴承外圈固定内圈转动, 内圈决定了轴系运动精度, 即令 $l_s = S_{ia}$; $d_s = K_{ia}$; $\alpha_s = K_{ia} \times 2 / L$, $L = 78$ mm 为轴承跨距。

2.4.3 系 {ST} 到 {N} 坐标误差

机构行程 3 mm, 对应滚珠丝杆 3π 弧度转动

范围, 属小位移量, 此时定位误差主要影响因素为 $V_{2\pi p}$ ——丝杆转动一圈螺母行程最大变动量, 通过对丝杆进行筛选保证螺母轴向位置误差 $l_n = V_{2\pi p}$ 。 d_n 是在丝杆转动时, 丝杆轴固定端轴颈与螺母安装接口面之间的径向跳动, 在运动过程中产生, 由 t_{6p} 轴颈相对转动轴的径向跳动, t_{10p} 螺母安装端面对转动轴径向跳动计算得到的^[10], t_{6p} 、 t_{10p} 均为丝杆有效行程上最大值, 但调焦机构工作行程占有效行程的 7%, 据此结合测试结果确定 $d_n = 0.5 \times (t_{6p} + t_{10p})$ 。 α_n 是丝杆轴与螺母轴的夹角, 与 t_{6p} 、 t_{9p} 、 t_{10p} 和丝杆螺母预紧程度有关, 无法利用误差源确定, 经测试为 $10'' \sim 20''$, 因没有大量样本进行统计, 所以用平均概率分布评估。机构所用电机为混合式步进电机, 步距角误差 10%, 每转动一步产生 10% 以内的误差, 不累积, 即电机转动误差 $gm = \pm 0.18^\circ$ 。

2.4.4 系 {N} 到 {F} 坐标误差

F 坐标系原点位于透镜左侧球面与透镜光轴的交点处。误差 d_f 、 l_f 仅影响透镜最终位置, 取理论值, α_f 涉及多个零件如调焦连接架等, 所以装配后直接测量并调整 α_f , 使其处于 $10'' \sim 20''$ 。

上述的齐次坐标转换的参数与误差源如表 1 所示, 至此将误差源带入到式(5), 得到以误差源为参量的机构误差模型 $M_F^M T$ 。

表 1 误差源分析

Tab. 1 Error source analysis

坐标系	坐标参量	说明	误差源	实际值	概率分布
M 电机	θ_m	电机输入转动	$\Delta\theta_m$ 转动误差, 均匀分布	10%	均匀分布
	d_s	丝杆与电机输出轴的对中误差	Δd_s 同轴度	3 μm	光校消除误差
	l_s	电机输出轴与丝杆轴承支撑点的距离	Δl_s 电机输出轴与丝杆轴承支撑点的距离及误差	28 mm	光校消除误差
S 滚珠丝杆			Δst_2 丝杆轴同轴度	2.5 μm	瑞利分布
			Δst_3 孔同轴度	2.5 μm	瑞利分布
	α_s	电机输出轴与丝杆轴的夹角	Δs_{g1} : 固定端配合间隙	2 μm	正态分布
			Δs_{g2} : 自由端配合间隙	3 μm	正态分布
	d_s	轴系径向晃动	K_{ia} : 成套轴承内圈径向跳动 Δsr_1 丝杆轴圆度	2 μm 1.25 μm	瑞利分布 瑞利分布
ST 滚珠丝杆动态	l_s	轴系轴向窜动	S_{ia} : 成套轴承内圈轴向跳动	2 μm	正态分布
	α_s	轴系角度变动	K_{ia} : 成套轴承内圈径向跳动 Δsr_1 丝杆轴圆度	2 μm 1.25 μm	瑞利分布 瑞利分布

续表

坐标系	坐标参量	说明	误差源	实际值	概率分布
N 螺母	d_n	螺母的转动中心与丝杆的转动中心的径向误差	$t_{6\rho}$:轴颈相对转动轴的径向跳动(重要参数,在行程内测量)	12 μm (6 μm)	瑞利分布
			$t_{10\rho}$:螺母安装端面对转动轴径向跳动(重要参数,在行程内测量)	12 μm (6 μm)	瑞利分布
	l_n	螺母移动的距离	$V_{2\pi\rho}$:转动 2π 产生的误差 2~6 μm	均匀分布	
F 透镜	α_n	丝杆轴与螺母轴的夹角	与 $t_{6\rho}$ 、 $t_{10\rho}$ 、 $t_{9\rho}$:螺母安装端面对转动轴端面跳动相关,但需进行测量	10''~20''	均匀分布
	d_f	调焦镜中心与螺母转动中心的径向距离	调焦镜中心与螺母转动中心的径向距离及误差	112.5 mm	光校消除误差
	l_f	调焦镜中心与螺母转动中心的距离	调焦镜中心与螺母转动中心的距离及误差	-48 mm	光校消除误差
	α_f	调焦镜中心与螺母转动轴的夹角	涉及多零件,装配时测量调整	10''~20''	均匀分布

3 基于 Monte Carlo 的误差计算

分别计算装配误差和动态误差,计算动态误差时,静态系的参量以常量形式带入,取 3σ 边界值,原因是(1)装配误差影响机构动态定位误差;(2)装配完成后,静态系中的参量已固定,参量方差不影响动态定位误差概率分布。依如图 4 所示,上述方法计算的结果包含了以 3σ 边界确定的装配误差最大值,因此最终的调焦机构定位精度 $dX_4 = dX_3 - dX_2; \theta Y_4 = \theta Y_3 - \theta Y_2; dZ_4 = dZ_3 - dZ_2$ 。其中 dZ_4 均值部分是行程 3 mm 的累计总误差。

的大样本伪随机数。

(2)将随机数输入到齐次坐标变换模型中,产生透镜位置信息;

(3)统计透镜坐标系的位置和角度信息的均值和方差,分析结果。

由图 5 是装配误差和动态定位误差的概率分布。表 2 为处理后的误差。其中,1~4 分别是装配误差、 3σ 边界确定的装配误差最大值、包含装配误差的定位误差、最终定位误差。根据表 2 可得出定位误差极值:电机每转动一步,透镜轴向运行距离为 0.005 11~0.014 93 mm;透镜在 3 mm 行程内的任意位置,离轴和倾斜误差处于 $\pm 6.08 \mu\text{m}$ 和 $\pm 29.62''$ 内。

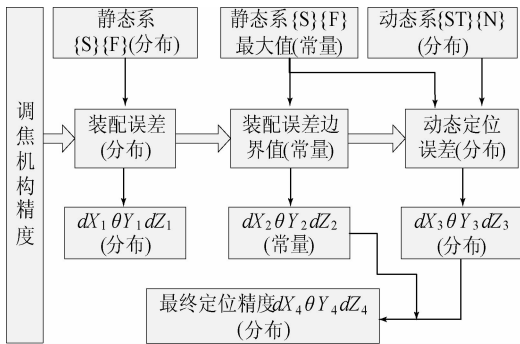


图 4 调焦机构精度计算流程

Fig. 4 Calculating process of accuracy of focusing mechanism

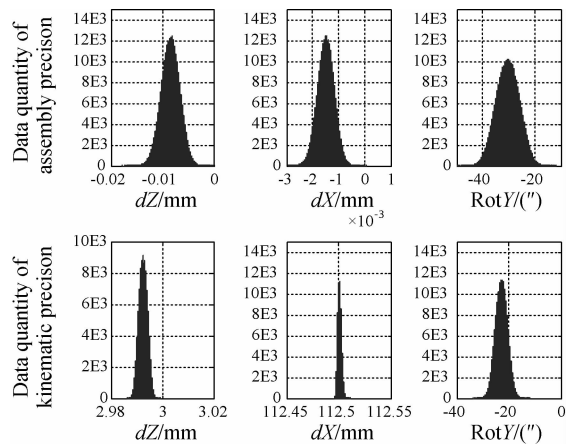


图 5 误差概率分布

Fig. 5 Distribution of position

Monte Carlo 方法是通过大量随机试验,利用概率论解决问题的一种数值方法,具体步骤为:

(1)依据误差源分布特性,产生与其分布一致

表 2 误差计算结果 ($P=99.7\%$)

Tab. 2 Calculated results of position error ($P=99.7\%$)

No.	$dX/\mu\text{m}$	$\theta Y/(\text{''})$	$dZ/\mu\text{m}$
1	$-1.492 \pm 0.962 2$	$-30.388 \pm 13.168 5$	$-8.391 \pm 5.410 0$
2	$-2.454 \pm 0.000 0$	$-48.970 \pm 0.000 0$	$-13.801 \pm 0.000 0$
3	$-1.460 \pm 5.089 6$	$-71.759 \pm 6.829 4$	$-21.231 \pm 4.910 3$
4	$-0.995 \pm 5.089 6$	$22.789 \pm 6.829 4$	$7.430 \pm 4.910 3$

根据定位误差的最大值和线性滑台 A 的三维刚度,计算出个方向载荷小于三维扭矩许用值和基本额定载荷 $C_0=1\ 800\ \text{N}$ 。

4 实验验证

4.1 调焦步长测量

对研制完成的调焦机构进行了误差检测,测试原理如图 6 所示。首先检测调焦步长,将调焦机构固定在高精度测高仪底座平台上,并调整机构的基准 B 使其与测高仪平台基准 A 垂直,之后在每个运动步后探针伸出测量的透镜位移变化,信息处理单位读取并输出数据,结果如图 7 所示。

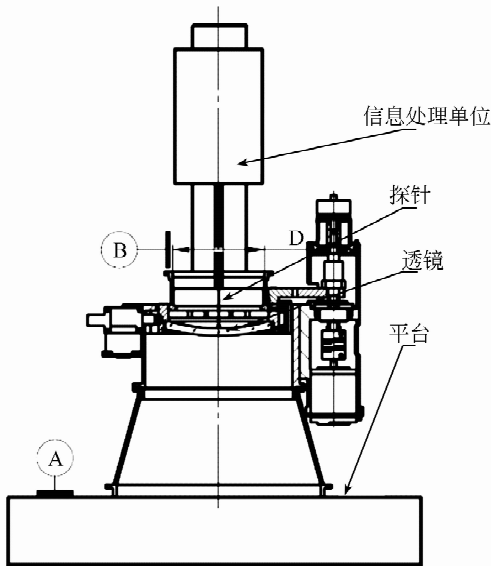


图 6 调焦步长测量原理图

Fig. 6 Schematic diagram of step length measurement

数据处理后表明该测试机构的轴向位置误差 $dZ=(-0.01 \pm 0.003\ 6)\text{mm}$,调焦步长为 $0.006 \sim 0.013\ 6\ \text{mm}$ 。

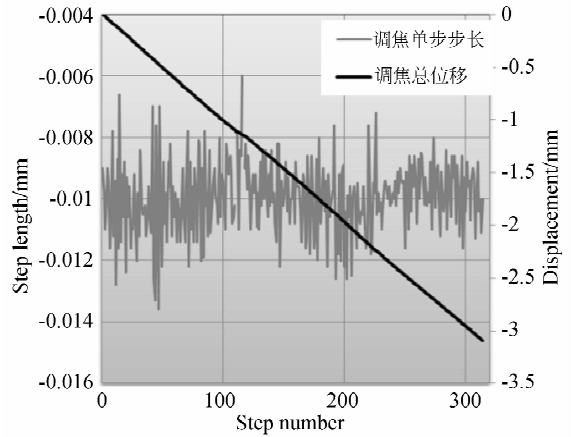


图 7 调焦步长实验数据

Fig. 7 Experimental results of step length measurement

4.2 动态离轴和角度倾斜误差测试

透镜完成装校后,测量运行过程中的倾斜和离轴误差,利用的是双光路对中仪,它包含 2 个中心偏差测量组件 (Centering Errors Measurement Component, CEMC),测量原理如图 8 所示。

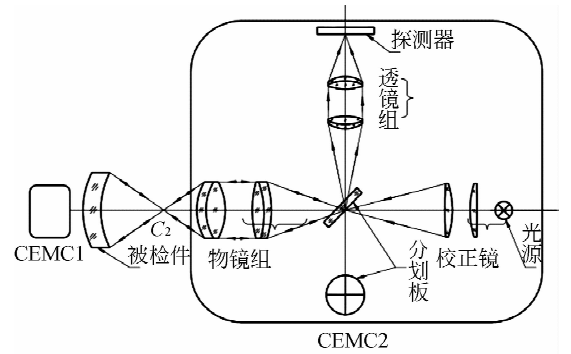


图 8 调焦透镜中心偏差测量

Fig. 8 Schematic diagram of centering error measurement

光源发出的光经校正镜投射到分划板上,分划板上刻有透明的十字标记,该标记通过物镜组成像

于焦面 C_2 处, C_2 为被检件一侧面的球心, 反射后 C_2 像点经物镜组再次投射到分划板上, 分划板上即包含两个像点, 经透镜组成像在探测器上, 通过计算即可得到透镜一面球心相对参考轴偏移的距离。同理可得另外一面的球心 C_1 偏移量, 根据测量值和透镜参数可计算出透镜的倾斜量和顶点离轴量。最后测得调焦镜等效倾斜量小于 $\pm 25''$, 离轴量小于 0.005 mm 。

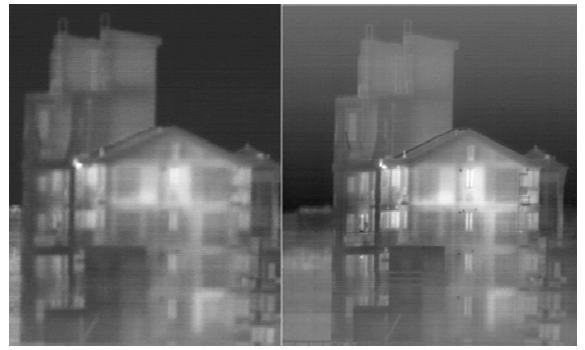
4.3 外场成像实验

图9是调焦机构样机, 集成于相机后进行成像实验, 通过对不同距离的物体成像来验证机构精度。系统装调时探测器对准对无穷远物体像面, 拍摄近处物体最佳焦面位置变化, 此时图像较为模糊如图10(a)所示, 调焦后重新成像如图10(b), 图像中的景物清晰、边缘锐利。多次成像、计算的结果表明调焦机构运行有效, 精度满足仪器要求。



图9 调焦机构样机

Fig. 9 Focusing mechanism



(a)调焦前图像

(a)Before focusing

(b)调焦后图像

(b)After focusing

图10 调焦成像实验

Fig. 10 Image from focusing experiment of space camera

5 结论

调焦机构是高分辨率空间相机的重要部件, 本文针对某型号调焦机构的误差进行了误差分析。Monte Carlo 仿真计算结果表明, 根据机构现有设计和滚珠丝杆、轴承、微型线性滑台的选型、筛选以及装配工艺, 机构的装配和定位精度可以满足高精度遥感仪器的需求。样机检测结果表明, 该调焦机构轴向单步步长为 $(0.01 \pm 0.0036) \text{ mm}$, 在行程内, 调焦透镜的等效倾斜角小于 $\pm 25''$, 离轴量小于 0.005 mm , 符合理论分析的预测。目前该调焦机构已在轨运行, 满足仪器需求。

参考文献:

[1] 丁亚林, 田海英, 王家骥. 空间遥感相机调焦机构设计 [J]. 光学精密工程, 2001, 9(1): 36-38.

DING Y L, TIAN H Y, WANG J Q. Design on the focusing mechanism of space remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1): 36-38. (in Chinese)

[2] ZAGO L, SCHWAB P, GALLIENI D. Development and testing of a high-precision, high-stiffness linear actuator for the focus-center mechanism of the SOFIA secondary mirror [J]. *SPIE*, 2002, 4014:392-398.

[3] WITHERSPOON B, HUFF L, JACOBY M, *et al.*. Results of environmental testing the focus and alignment mechanism of the near infraRed camera on the james webb space telescope [J]. *SPIE*, 2011, 8150:81500H-1-12.

[4] 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.

WANG ZH, ZHANG L P, LI ZH H, *et al.*. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1051-1056. (in Chinese)

[5] ISO 10110-6-1996. Optics and optical instruments.

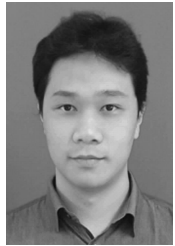
Preparation of drawings for optical elements and systems. Part6:centring tolerances [S].

- [6] 周晓尧,范大鹏,张智勇. 升降式光电探测平台定位原理与误差分析 [J]. 宇航学报, 2011, 32(6): 1416-1422.
ZHOU X Y, FAN D P, ZHANG ZH Y. Positioning principle and error analysis for lift electro-optical detection platform [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(6):1416-1422. (in Chinese)
- [7] 王涛,朱明超,阎胜利,等. 稳定平台轴系精度对视轴指向误差的影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2265-2269.
WANG T, ZHU M CH, YIN SH L, *et al.*. Analysis of LOS pointing error derived from precision of shafting in stabilization mechanism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11):2265-2269.

(in Chinese)

- [8] GB/T 5847-2004. 中华人民共和国国家标准, 尺寸链计算方法 [S].
GB/T 5847-2004. National Standards of the People's Republic of China, Dimensional chain-Methods of calculation [S]. (in Chinese)
- [9] 马宏,王金波. 仪器精度理论 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009.
MA H, WANG J B. *Theory of Instrument Accuracy*[M]. Beijing: Beihang University Press, 2009. (in Chinese)
- [10] GB/T 17587.3-1998. 中华人民共和国国家标准, 滚珠丝杆副-第3部分:验收条件和验收检验 [S].
GB/T 17587.3-1998. National Standards of the People's Republic of China, Ball screws-Part3:Acceptance conditions and acceptance tests [S]. (in Chinese)

作者简介:



陈洪达(1983—),男,内蒙古包头人,助理研究员,2006年于东华大学得学士学位,现为中国科学院上海技术物理研究所机械设计师,主要从事空间遥感器的结构设计工作。E-mail: chenhongda@mail. sitp. ac. cn



郑庚(1987—),男,上海人,助理工程师,主要从事精密结构、运动部件装配方面的工作。E-mail: zhenggeng@mail. sitp. ac. cn



陈永和(1982—),男,福建永春人,博士研究生,副研究员,2006年于中国科学院上海技术物理研究所取得硕士学位,现为光学设计师,主要从事空间遥感仪器的光学系统设计工作。E-mail: chen-yonghe@mail. sitp. ac. cn

导师简介:



刘晓华(1971—),男,上海人,研究员,博士,现主要从事光学精密机械、光学遥感仪器方面的研究。E-mail: xhliuz@mail. sitp. ac. cn



史婷婷(1983—),女,新疆乌鲁木齐人,硕士,助理研究员,2009年于东华大学取得硕士学位,现为中国科学院上海技术物理研究所机械设计师,主要从事空间遥感仪器的设计工作。E-mail: shitingting@mail. sitp. ac. cn