

DOI : 10.3901/JME.2016.13.025

空间光学遥感器精密调焦机构设计与试验*

贾学志^{1,2} 张雷^{1,2} 安源^{1,2} 金光¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033 ;

2. 长光卫星技术有限公司 长春 130033)

摘要 : 外界环境变化会引起空间光学遥感器产生离焦现象, 导致遥感器成像质量下降, 需要设计调焦机构来解决离焦问题。从保证遥感器成像质量和轻小型化的角度出发, 详细介绍调焦机构的调焦方案、工作原理和系统组成, 提出由双滑块机构实现调焦功能的新型调焦机构; 对调焦机构的精度进行理论计算, 得到该机构的定位精度和调焦镜的倾斜角度误差均满足设计指标要求。对环境试验前后的机构进行精度测试, 试验结果表明, 机构定位精度 0.006 mm, 调焦镜的最大倾斜角为 16.5", 满足光学设计指标要求。理论分析和环境试验结果充分表明, 该调焦机构具有结构稳定, 定位精度高, 环境适应性广泛等特性, 在复杂多变的环境条件下能够满足空间光学遥感器精确调焦的目的。

关键词 : 空间光学遥感器; 调焦机构; 双滑块机构

中图分类号: V475

Design and Experiment Research on Precision Focusing Mechanism of Space Remote Sensor

JIA Xuezhì^{1,2} ZHANG Lei^{1,2} AN Yuan^{1,2} JIN Guang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033;

2. Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd., Changchun 130033)

Abstract : The space optical remote sensor will generate the out of focus which leading the decrease of the quality of the remote sensor imaging, so a focusing mechanism is designed to solve the problem. In order to ensure the remote sensor imaging quality and the perspective of light miniaturization, the focusing scheme, working principle and system composition are introduced particularly, and then the double-slider mechanism is proposed to realize the focusing function. The position precision and focusing mirror tilt angle error can satisfy the requirement of the design index by the theoretical calculation to get the precision of the focusing mechanism. The data before and after testing indicate that the displacement error is less than 0.006 mm and the line tilt is less than 16.5", which meets the requirement for use. Theoretical calculation and experimental results prove that this focusing structure has stable structure, high positioning accuracy, environment adaptability extensive features to meet the purpose of precise focus of space optical remote sensor.

Key words : space remote sensor ; focusing mechanism ; double-slider mechanism

0 前言

空间光学遥感器是获取地面图像信息的重要手段之一, 其核心任务是获取清晰目标区域的详查和普查图像。为达到此目的, 在对目标区域进行摄像时, 目标区域应准确地成像在 CCD (或胶片) 的感光面上。但是, 由于空间光学遥感器光学系统焦距

较长, 并且在卫星发射过程中产生的振动、冲击以及所遥感器所处轨道高度的变化, 温度、大气压力变化等因素会导致相机的 CCD 靶面偏离焦平面从而降低成像分辨率, 直接影响相机的成像质量^[1-3]。为了提高遥感器光学系统的适应性, 同时也为了得到高质量的地面图像, 需要在遥感器结构中设计调焦机构, 以修正由环境变化引起的离焦问题。

本文以保证遥感器的成像质量为出发点, 设计了一种应用于长焦距遥感器的调焦机构, 介绍了其组成和工作原理, 并对该机构进行了精度分析, 详细阐述了误差的来源, 最后通过试验验证了调焦机

* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 2007AA12Z113)。20150803 收到初稿, 20160503 收到修改稿

构的精度。

1 调焦方案的确定

1.1 引起离焦的主要因素

大气压力和温度的变化使空气的折射率发生变化,同时光学系统中透镜的折射率、曲率半径、厚度、透镜之间的间隔变化、透镜材料内的应力变化、金属框架的伸缩等,都会导致相机后截距的变化,造成离焦。另外还有轨道高度、火箭发射飞行时的冲击、过载及振动等^[4-5]。

(1) 大气压力变化对离焦的影响。空间相机对地成像时,随着轨道高度的变化大气压力也随之变化,大气压力变化会使相机产生离焦。高度增加,大气压力减小,空气密度变小,空气的折射率发生变化,必然会使像面产生位移^[2,5]。单一透镜焦距随大气压力变化的计算公式为

$$\Delta f(P \ 24^\circ \text{C}) = \frac{f n_g (n_a - 1)(P - P_0)}{(n_g - 1)P_0} \quad (1)$$

式中 f ——镜头焦距;

n_g ——玻璃折射率;

n_a ——空气折射率;

P ——周围环境大气压力;

P_0 ——标准大气压力。

在波长为 600 nm,一个标准大气压力下,温度为 24 时,空气折射率随温度的变化量 $n_a - 1 = 268 \times 10^{-6}$ 。

由式(1)可知,大气压变化引起的焦距变化为

$$\Delta f = -0.000 \ 268 f \frac{n_g}{n_g - 1} \quad (2)$$

大气压力变化不仅会造成相机后截距空气折射率的变化,而且也还会使镜头零件间隔的空气折射率发生变化,这些都是大气压力变化造成焦面位移的原因。

(2) 温度变化对离焦的影响。温度的变化使不同线膨胀系数的零部件产生应力和变形;玻璃零件的曲率半径、厚度和直径也随温度的变化而变化;温度变化还会造成玻璃部件周围空气折射率的显著变化^[3,7],以上都是温度变化引起相机离焦的原因。

温度变化引起单片透镜焦点的位移量变化如式(3)所示

$$\Delta f = \Phi f \Delta T \quad (3)$$

$$\Phi = a_g + \frac{n_g P}{(n_g - 1)P_0} \eta_a - \frac{\eta_g}{n_g - 1} \quad (4)$$

式中 ΔT ——温度变化量;

Φ ——温度变化引起的离焦系数。

a_g ——玻璃线膨胀系数;

η_a ——一个大气压时空气折射率随温度的变化量($\eta_a = 1.8 \times 10^{-6}$);

η_g ——玻璃折射率随温度改变的绝对变化量。

(3) 轨道高度变化引起的离焦。根据成像公式

$$\frac{1}{l} - \frac{1}{l'} = \frac{1}{f'} \quad (5)$$

当成像距离减小时,焦面向远离镜头方向位移,成像时,如果 CCD 焦面的位置不能随之变化,就导致了离焦,使图像清晰度和分辨力下降。当相机在不同轨道高度成像时,其焦面位置也不同,要想得到高清晰度和分辨力的图像,必须对焦面位置进行调整^[5]。

对于本课题所研究的空间相机所在轨道高度大于 200 km,摄像距离的变化对相机焦面的影响很小,只有几微米,可以忽略不计。

1.2 调焦方式的选择

决定遥感器调焦方式的因素主要包括光学系统特点、遥感器结构组成、工作环境及调焦精度^[3,6]。常用的调焦方式有以下三种。

(1) 镜组移动方式:通过移动光学镜头中的透镜改变焦距,从而达到调焦目的,该方式普遍应用于小型普及型遥感器或望远镜镜头中。

(2) 反射镜移动方式:在遥感器光学系统的焦面前增加一块反射镜改变光路方向,通过移动该反射镜改变焦面位置从而达到调焦的目的,常用于镜头后截距较长、调焦精度要求较高的长焦距遥感器。

(3) 焦面移动方式:通过调整遥感器焦面的位置进行调焦,适用于装机空间小,焦距较短的遥感器。

本课题遥感器光学系统的主镜、次镜、三镜均为非球面反射镜,三者间有着严格的位置精度要求,调整其中任何一个均会对像质产生较大影响,因此本课题遥感器不宜选择镜组移动方式调焦方案;由于遥感器 CCD 焦平面结构比较复杂,且有多达十几路的电缆,调整起来非常困难,也不宜选择焦面移动式调焦方案。综合考虑上述原因,为使遥感器总体结构更加合理、调焦方便,本遥感器采用在第三镜与焦面间增加一块反射镜的方案达到调焦的目的。

1.3 调焦方案的确定

空间光学遥感器的调焦方案因光学系统而异，主要有两种：丝杠螺母调焦和凸轮调焦。丝杠螺母调焦方式结构简单、成本低，但在遥感器在轨工作环境中(真空、低温等)容易产生卡滞现象，抗振动冲击能力差；凸轮调焦方式精度高，结构也比较简单，其运动件(齿轮、凸轮、蜗轮、蜗杆等)经过防冷焊处理后不会产生冷焊、卡滞现象，但对凸轮曲线的加工要求较高^[6-7]。本课题遥感器总体对调焦机构的尺寸进行了严格约束，为缩短传动链长度，调焦方式最终选定了丝杠螺母和连杆配合使用的方案，该方案相对于传统的丝杠螺母机构和凸轮机构精度更高^[8]，并且节约空间。

本课题调焦机构结构简图如图1所示，通过丝杠螺母和连杆组成的双滑块机构将电机的圆周运动转化为沿调焦镜沿其法线方向的运动。调焦镜借助直线运动机构固定在基座上，可沿其光轴方向自由移动。调焦镜的位置由编码器反馈。经周密设计，该调焦机构外形尺寸186 mm×137 mm×125.5 mm，质量仅2.5 kg。

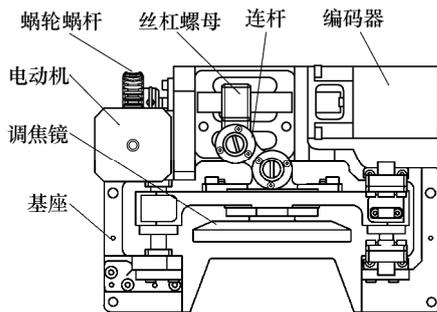


图1 调焦机构结构示意图

2 调焦机构设计

2.1 调焦机构原理

调焦机构的运动原理简图如图2所示，建立直角坐标系如下：以丝杠的轴向为坐标系的x轴，调焦镜的光轴方向为坐标系的y轴，螺母、调焦镜座和连杆构成了典型的双滑块机构^[6,9]。

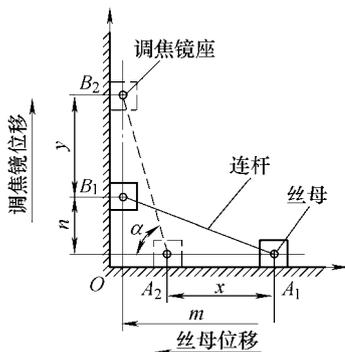


图2 调焦机构原理示意图

对于双滑块机构，采用位移矢量代替连杆，建立闭环矢量模型。以两个滑块轨道的交点为坐标原点，原点到滑块1的位移为位移矢量 R_1 ，坐标原点到滑块2的位移为位移矢量 R_2 ，连杆为位移矢量 R_3 ，得到的双滑块机构的矢量图如图3所示^[9]。从图3中可以得到闭环矢量方程

$$R_1 + R_2 = R_3 \tag{6}$$

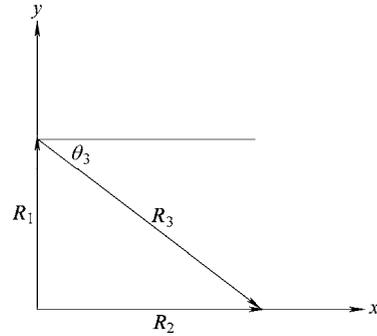


图3 双滑块机构矢量图

将矢量方程式(6)向x和y轴分解得到两个标量方程

$$r_3 \cos \theta_3 = r_2 \tag{7}$$

$$r_1 + r_3 \sin \theta_3 = 0 \tag{8}$$

对式(7)、(8)求导得到滑块1和滑块2之间的速度和加速度公式如下。

滑块间速度公式

$$-\omega_3 r_3 \sin \theta_3 = r_2' \tag{9}$$

$$-\omega_3 r_3 \cos \theta_3 = r_1' \tag{10}$$

滑块间的加速度公式

$$-\alpha_3 r_3 \sin \theta_3 - \omega_3^2 r_3 \cos \theta_3 = r_2'' \tag{11}$$

$$-\alpha_3 r_3 \cos \theta_3 + \omega_3^2 r_3 \sin \theta_3 = r_1'' \tag{12}$$

在本课题调焦机构方案中，滑块2为主动件，滑块1为从动件，即 r_2'' 是已知量， r_1'' 和 α_3 是未知量，将式(11)、(12)转化为矩阵方程得到双滑块机构的运动方程如下

$$\begin{pmatrix} r_3 \cos \theta_3 & 1 \\ -r_3 \sin \theta_3 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ r_1'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_3^2 r_3 \sin \theta_3 \\ r_2'' + \omega_3^2 r_3 \cos \theta_3 \end{pmatrix} \tag{13}$$

利用 Matlab 编程求解，得到双滑块调焦机构运动仿真曲线如图4、5所示。

2.2 调焦机构精度分析

本课题对调焦机构的精度有两方面的要求，一方面为调焦后调焦镜前后位置的稳定性，即调焦机构的定位精度，光学设计要求该精度优于0.01 mm；另一方面为调焦过程中镜面的运动偏角，光学设计

要求此精度优于 30"。

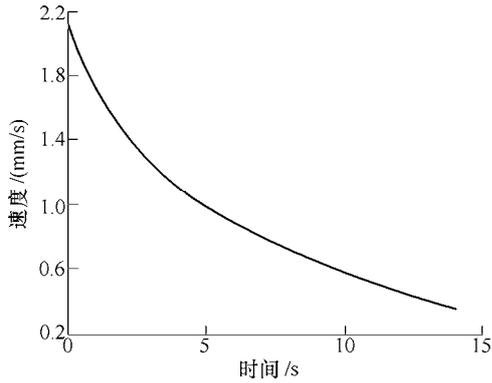


图 4 滑块 2 匀速运动时滑块 1 的速度曲线

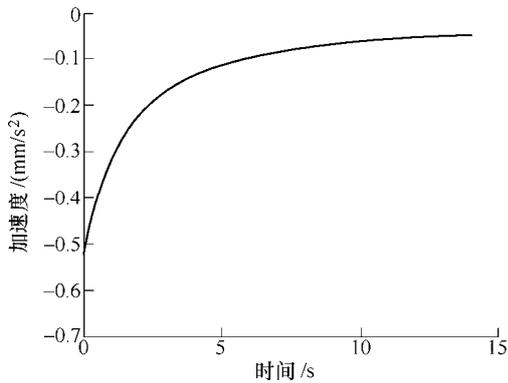


图 5 滑块 2 匀速运动时滑块 1 的加速度曲线

影响调焦机构定位精度的因素主要有螺旋传动机构及滑动导轨组件的传动误差与空回。螺旋传动的误差是指螺母相对螺杆的实际位移与其理论值之间的最大差值。经计算,主要传动误差 Δl 为 $0.0034 \text{ mm}^{[6]}$ 。

本文中调焦机构的传动误差与滑块位置有关,经分析,在极限位置 B_2 (图 2)传动误差取得最大值,此时连杆与丝杠轴轴向的夹角 α 为 32.7° ,则误差 Δl_{mc} 为

$$\Delta l_{mc} = l \sin 32.7^\circ - \sqrt{l^2 - (l \cos 32.7^\circ + \Delta l)^2} \quad (14)$$

可算得传动误差为

$$\Delta l_{mc} = 5.3 \mu\text{m} \quad (15)$$

调焦机构的空回主要是由连杆机构的连杆传动引起的,铰链转轴存在间隙是空回的主要原因。为减小空回,在加工过程中对各零部件进行了严格的质量控制,并在装配中进行试配调整^[9]。根据装配经验,取定空回误差为

$$\Delta l_0 = \pm 6 \mu\text{m} \quad (16)$$

按照上述误差计算公式, Δl_0 引起的调焦精度误差为

$$\Delta l_{mk} = \Delta l_0 \sin 32.7^\circ = 3.24 \mu\text{m} \quad (17)$$

根据误差合成原理,传动误差和空回误差相互独立,综合误差取极值^[10],即

$$\Delta l_m \text{ max} = \sqrt{\Delta l_{mc}^2 + \Delta l_{mk}^2} = 6.2 \mu\text{m} \quad (18)$$

总体要求调焦机构的精度为 $10 \mu\text{m}$,大于 $6.2 \mu\text{m}$,因此所设计的调焦机构精度满足总体设计要求。

3 调焦机构精度试验

3.1 调焦机构精度测试试验

为检测调焦机构精度,搭建了如图 6 所示的测试平台,在测试过程中用相机下位机控制调焦机构的电机转动,利用之前拟合的调焦机构运动控制公式来实现调焦机构的运动^[6],同时利用数显千分表测量调焦镜的实际位移,对两组数据进行对比,就可以得到调焦机构定位精度误差^[10-13]。

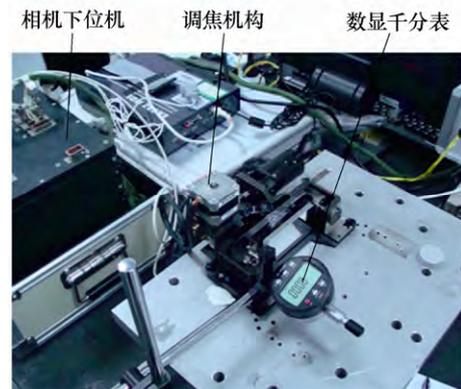


图 6 调焦机构定位精度检测现场图

为考验调焦机构的稳定性,对调焦机构开展了力学和热学环境试验,并对调焦机构环境试验前后的定位精度进行了测试,测试结果对比如图 7 所示。

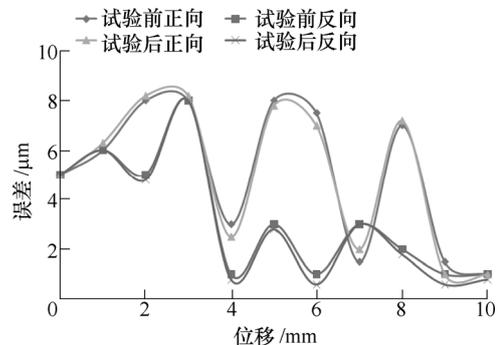


图 7 环境试验前后调焦机构定位精度对比

从图 7 可知,测试结果的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (19)$$

根据 Bessel 公式，检测数据的标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (20)$$

根据经验，在精密测量中，取置信水平为 0.997 3^[8]，此时置信区间的半宽度为 $\Delta=3\sigma$ ，则测量的最大极限误差为

$$\delta_{limx} = \bar{x} \pm 3\sigma \quad (21)$$

将数据处理结果列于表 1。表 1 可以看到，在整个行程内，环境试验前后调焦机构精度分布趋势基本无变化，且试验后机构最大位移误差为 0.006 mm，优于 0.01 mm 的设计指标，满足调焦精度设计要求。

表 1 试验前后机构精度检测数据统计表(mm)

误差计算结果	试验前 正方向	试验前反 方向	试验后正 方向	试验后反 方向
算术平均值	0.005 1	0.003 3	0.005 1	0.003 1
标准差	0.000 28	0.000 24	0.000 29	0.000 25
最大极限误差	0.005 1±	0.003 3±	0.005 1±	0.003 1±
	0.000 84	0.000 72	0.000 87	0.000 75

3.2 位移偏角检测试验

位移偏角测试主要检测的是调焦镜运动的直线性，测量调焦镜在整个行程范围内的偏摆情况^[2, 14]。为了检测该指标，搭建了如图 8 所示的光学检测平台，该检测平台主要由调焦机构、相机下位机、编码器检测电箱、经纬仪等组成。具体检测方法为：在调焦镜座上粘贴面形精度很高平面反射镜，作为方位基准，用经纬仪自准直的方法来获得平面镜法线方向，通过相机下位机驱动机构运动，测量全行程内调焦机构运动的倾斜角。

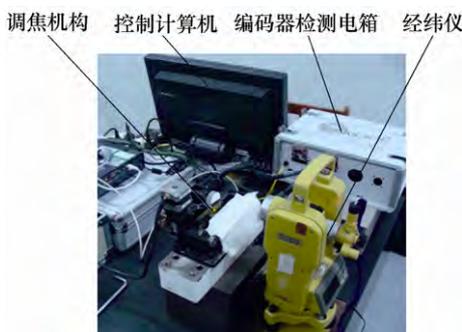


图 8 调焦机构位移偏角检测现场图

环境试验前后机构倾斜角测试结果如图 7 所示。

从图 9 可知，调焦机构试验前后位移偏角分布趋势基本无变化，对图 7 数据进行数据处理列于表 2 中。试验后调焦机构的最大倾斜角为 16.5"，满足光学设计要求 30"的设计指标要求。

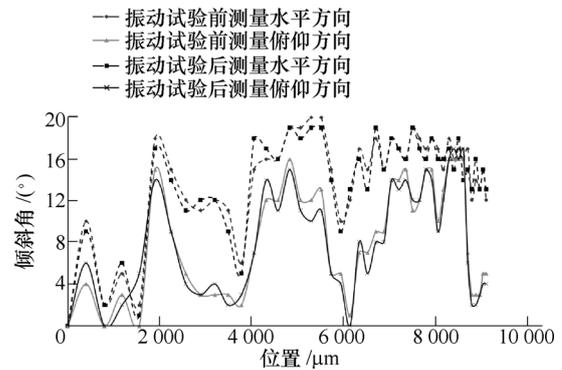


图 9 环境试验前后调焦机构位移偏角对比

表 2 试验前后机构位移偏角检测数据统计表(")

误差计算结果	试验前水 平方向倾 角	试验前俯 仰方向倾 角	试验后水 平方向倾 角	试验后俯 仰方向倾 角
算术平均值	8.1	5.5	7.8	5.2
标准差	2.8	2.3	2.6	2.2
最大极限误差	8.1±8.4	5.5±6.9	7.8±7.8	5.2±6.6

4 结论

针对环境变化使空间光学遥感器产生离焦而影响成像质量的问题，在满足光学设计指标的要求下设计了双滑块调焦机构。经过方案设计、理论推导、精度分析，试验验证得到如下结论。

- (1) 选择双滑块机构实现调焦功能方案合理，技术可行。
- (2) 精度分析列举了影响机构定位精度和倾斜角度精度的因素，分析结果表明机构定位精度 0.006 2 mm，理论上可较好地满足设计指标要求。
- (3) 环境试验结果表明，调焦机构环境适应能力优良，环境试验对机构的定位精度和位移偏角影响不大，试验前后的结果曲线一致性没有明显变化。试验后精度检测结果为：定位精度 0.006 mm，倾斜角度精度 16.5"，均满足设计指标要求。
- (4) 环境试验前后检测结果表明该调焦机构具有结构紧凑、质量轻、环境适应能力优良、运行平稳、位移精度高等特点，能够很好地满足轻型光学遥感器的使用要求。

参 考 文 献

[1] 安源，齐迎春. 空间光学遥感器直线调焦机构的设计[J]. 光学精密工程，2009，17(3)：609-614.
AN yuan ,QI Yingchun. Design of straight—line focusing mechanism for space camera[J]. Opt. Precision Eng. , 2009，17(3)：609-614.

[2] 张新洁，颜昌翔，谢涛. 星载光学遥感器调焦机构的设

- 计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2757-2761.
ZHANG Xinjie, YAN Changxiang, XIE Tao. Design of focusing mechanism of space remote sensor[J]. Opt. Precision Eng., 2009, 17(11): 2757-2761.
- [3] 陈世平. 空间光学遥感器设计与试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
CHEN Shiping. Design and experiment of space camera[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003.
- [4] 谷勇霞, 赵杰亮, 阎绍泽, 等. 考虑谐波传动滞后的柔性空间机械臂运动精度[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 74-79.
GU Yongxia, ZHAO Jieliang, YAN Shaoze, et al. Kinematic accuracy of the flexible space manipulator with harmonic drive[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 74-79.
- [5] 胡乃岗, 保宏, 连培园, 等. 大型相控阵天线结构与调整机构一体化设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 196-202.
HU Naigang, BAO Hong, LIAN Peiyuan, et al. Synthetic design of structure and adjustment mechanism of large phased array antennas[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 196-202.
- [6] 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.
XU Zhitao, LONG Kehui. Design of focusing control system for three-line stereo mapping camera[J]. Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(10): 899-903.
- [7] 杨永彬. 空间光学相机调焦技术研究[J]. 航天器工程, 2011, 20(2): 20-24.
YANG Yongbin. Study on focusing technique for space optical camera[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(2): 20-24.
- [8] 金国光, 魏展, 秦凯旋, 等. 高速凸轮机构动力学分析及模态截断[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 227-234.
JIN Guoguang, WEI Zhan, QIN Kaixuan, et al. Dynamic analysis and modal truncation of high-speed cam mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 227-234.
- [9] 贾学志, 王栋, 张雷, 等. 轻型空间光学遥感器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 Xuezhi, WANG Dong, ZHANG Lei, et al. Optimizing design and precision experiment of focusing mechanism in lightweight space camera[J]. Opt. Precision Eng., 2011, 19(8): 1824-1830.
- [10] 罗阿妮, 邓宗全, 刘荣强, 等. 考虑运动副间隙的双滑块机构运动分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(3): 355-360.
LUO Ani, DENG Zongquan, LIU Rongqiang, et al. Analysis of a root lock mechanism within a two-slider mechanism with backlash[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(3): 355-360.
- [11] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
MAO Yingtai. Error theory and precision analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982.
- [12] 刘慧玲, 曾韬, 刘建湘. 数控机床定位精度的测量和评定[J]. 机械研究与应用, 2005, 18(6): 38-39.
LIU Huiling, ZENG Tao, LIU Jianxiang. Measurement and assessment of the error of the numerical control machine tool[J]. Mechanical Research & Application, 2005, 18(6): 38-39.
- [13] 冷涵涛. 数控机床定位精度和重复定位精度的检验[J]. 机床与液压, 2008, 36(8): 191-199.
LENG Xiongtao. Testing of positioning accuracy and repeated positioning accuracy of CNC machine tool[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(8): 191-199.
- [14] 许志涛, 刘金国, 龙科慧, 等. 高分辨率空间光学遥感器调焦机构精度分析[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0728001-1-0728001-6.
XU Zhitao, LIU Jingguo, LONG Kehui, et al. Accuracy analysis of focusing mechanism of high resolution space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0728001-1-0728001-6.

作者简介: 贾学志, 男, 1980 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为空间光学遥感器结构设计与分析。

E-mail: xuezhi0817@163.com