

文章编号 1004-924X(2010)10-2239-05

# 大尺寸焦平面空间相机调焦机构的精度分析

王书新<sup>1,2</sup>, 李景林<sup>1</sup>, 刘磊<sup>1</sup>, 齐光<sup>1,2</sup>, 任建岳<sup>1</sup>

- (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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 由于大尺寸焦平面空间相机调焦机构的焦平面两端存在的不可消除的同步运动误差会直接影响相机调焦精度, 因此对焦平面两端同步运动精度进行了分析。首先, 研究了大尺寸焦平面空间相机调焦机构的特点, 提出了焦平面两端同步运动误差是影响其调焦精度的主要因素; 其次, 分析了影响同步运动精度的主要误差来源, 建立了同步运动误差的数学模型, 并采用蒙特卡罗仿真算法对数学模型进行了仿真分析; 最后, 通过测试焦平面两端同步运动精度对仿真结果进行了验证。仿真结果显示, 同步运动精度为 0.02 mm, 与试验数据分析结果 0.023 mm 一致, 说明此方法能够比较准确地确定焦平面两端同步运动精度, 为后续在轨调焦策略的确定以及同类产品的研制提供技术支持。

**关键词:** 空间相机; 大尺寸焦平面; 调焦机构; 精度分析; 蒙特卡罗算法

**中图分类号:** V475.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101810.2239

## Accuracy analysis of focusing mechanism in space camera with long-focal-plane

WANG Shu-xin<sup>1,2</sup>, LI Jing-lin<sup>1</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>, QI Guang<sup>1,2</sup>, REN Jian-yue<sup>1</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** The synchronous motion accuracy at both ends of focal plane of a focusing mechanism in a space camera was analyzed, for it was difficult to be eliminated and would affect on the focusing accuracy of the camera directly. The characteristics of the focusing mechanism of the camera with a long focal plane were researched, then it pointed out that the synchronous motion error at both ends of focal plane is the major factor that effects on the focusing accuracy of the camera. By analyzing main error sources of synchronous motion error, a mathematical model was established, and Monte Carlo Method was used to simulate the error model. Finally, the synchronous motion accuracy was tested to verify the validity of the simulation result. Simulation results indicate that synchronous motion accuracy is 0.02 mm, which is coincident with the test data well. It is concluded that the method can estimate accurately the synchronous motion accuracy, and can support the determination of focusing strat-

收稿日期: 2010-05-12; 修订日期: 2010-06-25.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 86325113B)

egy on orbit.

**Key words:** space camera; long focal plane; focusing mechanism; accuracy analysis; Monte Carlo method

## 1 引言

空间相机地面装调环境和在轨运行环境的差异以及相机在发射段时所处的力学环境会引起相机焦平面产生一定程度的离焦<sup>[1-2]</sup>,为获得清晰的图像,空间相机采用调焦机构在轨进行相机焦平面位置的调整以及相机离焦量的补偿;根据相机的焦深来分配检焦器的允许误差、调焦机构的调焦精度以及相机热控精度范围内焦面位置的允许波动等误差因素。因此,调焦机构精度直接反映焦平面的调整精度<sup>[3]</sup>。空间相机焦距一般较长,调焦精度远小于相机焦深;调焦误差造成的残余离焦量可根据在轨测量装置的反馈数据采用逐渐累加的方法加以消除。为了达到宽幅盖的目的,空间相机常常采用 CCD 交错拼接的形式构成大尺寸焦平面<sup>[4]</sup>,导致调焦机构较长,调焦机构的支撑形式、机构运动转化方式、制造误差以及装调误差等因素易使焦平面两端产生同步运动误差。而由于调焦机构采用单一驱动方式或运动传动机构,焦平面两端同步运动误差不可消除,从而直接影响相机调焦精度。因此,对于这些大尺寸焦平面空间相机,焦平面两端的同步运动误差是影响调焦机构精度的主要因素。

本文从焦平面两端运动同步性角度出发,分析了影响大尺寸焦平面两端同步运动精度的主要原因,建立了同步运动误差的数学模型,采用蒙特卡罗仿真算法对同步运动误差的标准偏差进行了仿真分析,并通过试验数据进行了验证。

## 2 焦平面两端同步运动精度分析与误差模型建立

空间相机调焦机构有多种调焦方式<sup>[3,5-8]</sup>。对于某大尺寸焦平面空间相机,调焦机构采用双凸轮驱动焦平面的调焦方式。该机构(机构简图如图 1 所示)主要由步进电机、减速器、双凸轮轴、调焦机构座、滑块、焦平面支架、焦平面、轴承、直线导轨、制动器以及编码器组成。步进电机通过减

速器减速后驱动双凸轮轴;再由滑块和焦平面支架将双凸轮轴转动分解为两相互垂直方向的运动,其中焦平面支架在导轨上沿光轴方向移动,实现调焦运动。

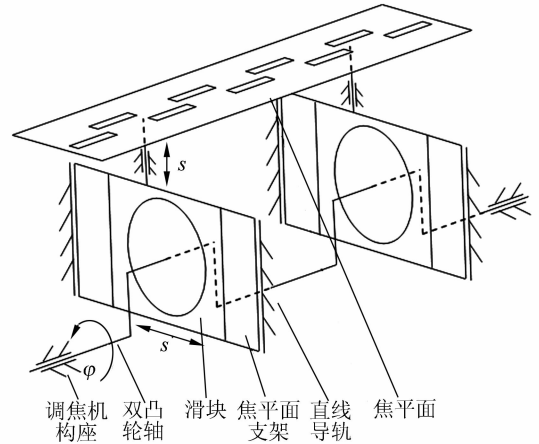


图 1 大尺寸焦平面调焦机构简图

Fig. 1 Structural diagram of focusing mechanism with long-focal-plane

速器减速后驱动双凸轮轴;再由滑块和焦平面支架将双凸轮轴转动分解为两相互垂直方向的运动,其中焦平面支架在导轨上沿光轴方向移动,实现调焦运动。

焦平面两端同步运动误差是指沿光轴方向的焦平面两端同步运动误差。误差来源主要有零件制造误差、装调误差以及相机在轨的真空环境和高低温交替变化环境要求的各运动副配合间隙;具体包括两偏心轮的偏心误差、两偏心轮偏心矢量方向的角度误差、轴系零件的尺寸误差和形位误差、滑块与焦平面的配合间隙等。

首先考虑单凸轮驱动的调焦机构,调焦机构焦平面位移为:

$$H(\varphi) = \sum_{i=1}^n l_i(\varphi) + \sum_{i=1}^m r_i(\varphi), \quad (1)$$

其中, $H$  为焦面位移; $\varphi$  为转角; $l_i$  为零件尺寸; $r_k$  为运动副配合间隙。

由于存在制造误差和装调误差,使  $l_i$ 、 $\varphi_i$  有微小误差  $\Delta l_i$ 、 $\Delta \varphi_i$ ,造成焦面位移误差  $\Delta H$ ,即

$$H + \Delta H = \sum_{i=1}^n (l_i + \Delta l_i) + \sum_{i=1}^m r_i. \quad (2)$$

当采用双凸轮驱动时,考虑两偏心轮偏心矢量方向角度误差  $\Delta \varphi_0$ ,可得到焦平面两端运动误差为:

$$\Delta H_{syn} = k[\Delta H_{left}(\varphi) - \Delta H_{right}(\varphi + \Delta\varphi_0)] = k[\sum_{i=1}^n \Delta l_{lefti}(\varphi) - \sum_{i=1}^n \Delta l_{righti}(\varphi + \Delta\varphi_0) + \sum_{i=1}^m r_{lefti}(\varphi) - \sum_{i=1}^m r_{righti}(\varphi + \Delta\varphi_0)], \quad (3)$$

其中,  $k$  为焦平面长度与支撑间距的比值;当采用贝塞尔点支撑方式时,  $k=1.7876$ 。

对已定系统误差(如初始转角误差以及反向运动空程等)进行补偿,则有校正后的焦面位移误差

$$\Delta \hat{H}_{syn} = \Delta \bar{H} + \sum_{i=1}^p a_i + \sum_{i=1}^q b_i, \quad (4)$$

其中,  $a_i$  为定值系统误差;  $b_i$  为变符号定值系统误差。

### 3 蒙特卡罗算法应用及仿真结果

由于制造误差、运动副配合间隙、力学环境、温度环境等因素具有随机性,用解析法或数值法难以计算焦平面两端同步运动误差,对待这一类问题可采用数值模拟方法来求解。因此,本文采用一种广泛应用的数值模拟方法——蒙特卡洛法对问题进行求解。

蒙特卡洛算法的基本思想是通过构造与描述该类问题有相似性的概率分布模型,将分布模型的某些特征(如随机事件或随机变量的均值等)与问题的解答联系起来;并通过分布模型进行随机模拟或抽样试验来计算这些特征的统计值,最后给出所求解的近似值。

为了确定调焦精度,取焦平面两端同步运动误差  $\Delta \hat{H}_{syn}$  的标准差  $\sigma(\Delta \hat{H}_{syn})$  作为研究对象,即

$$\sigma(\Delta \hat{H}_{syn}) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta \hat{H}_{syn}^i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta \hat{H}_{syn}^i)^2}. \quad (5)$$

根据制造装调条件,确定尺寸误差  $\Delta l_i$ , 运动副配合间隙  $r_i$  等误差分布。其中,零件尺寸误差  $\Delta l_i$ 、偏心轮偏心矢量以及两偏心轮偏心矢量方向角度误差  $\Delta\varphi_0$  由加工和装调条件确定,且服从正态分布;运动副配合间隙由加工、装调条件确定,且服从反正弦分布,即

$$f(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{r^2-x^2}}, \quad -r \leq x \leq r. \quad (6)$$

通过对各误差进行多次随机采样,并计算同步运动误差  $\Delta \hat{H}_{syn}$ , 即可得到标准差  $\sigma(\Delta \hat{H}_{syn})$ 。

图 2 为采用蒙特卡洛算法得到的焦平面两端同步运动误差  $\Delta \hat{H}_{syn}$  标准差  $\sigma(\Delta \hat{H}_{syn})$  曲线。此时,  $\sigma_{max}(\Delta \hat{H}_{syn})=0.0068 \text{ mm}$ ; 根据  $3\sigma$  原理,焦平面两端同步运动精度  $\pm 3\sigma_{max}(\Delta \hat{H}_{syn}) = \pm 0.020 \text{ mm}$ 。

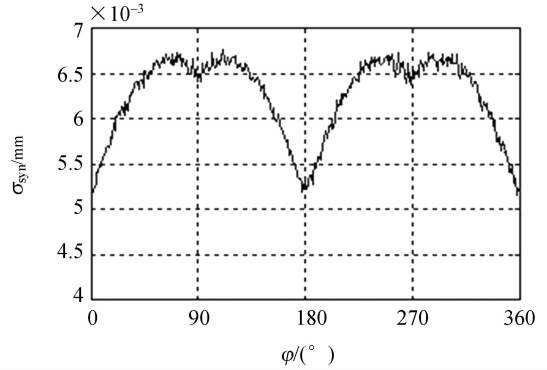


图 2 焦平面两端同步运动误差标准差曲线

Fig. 2 SD curve of synchronous motion error of focal plane at both ends

### 4 试验验证

根据某大尺寸焦平面空间相机的需求,设计并制造了一套采用双凸轮驱动焦平面的调焦机构。频率测试表明,调焦机构 3 个方向上的一阶谐振频率均高于  $150 \text{ Hz}^{[9]}$ ; 振动试验和热真空试验前后检测到的焦平面两端同步精度均未发生变化,同步运动误差在  $\pm 0.015 \text{ mm}$  以内,说明该机构具有高刚度、高稳定性。由最大误差法<sup>[10]</sup>,有  $\sigma_{lab} = K_n |\delta_i(\Delta \hat{H}_{syn})|_{max} = 0.0078 \text{ mm}$  ( $n$  为取样次数,取  $n=16$ ,则  $K_n=0.52$ ),则焦平面两端同步运动精度  $\pm 3\sigma_{lab} = \pm 0.023 \text{ mm}$ 。该精度仅为长焦距空间相机光学系统半焦深的  $1/5 \sim 1/10$ ,满足相机在轨环境下工作的要求。图 3 为试验室某次焦平面两端同步运动误差  $\Delta \hat{H}_{syn}$  的测量曲线(已去除反向运动空程和初始转角误差)。

对仿真结果与试验曲线进行分析可以看出,此方法能够确定焦平面两端同步运动精度,与实际测量结果一致。分析时剔除了反向运动空程、初始转角误差等误差,使仿真数据更加接近调焦机构的实际情况。由于未考虑各原始误差的相关性,导致仿真结果与实际测量值存在一定差异。

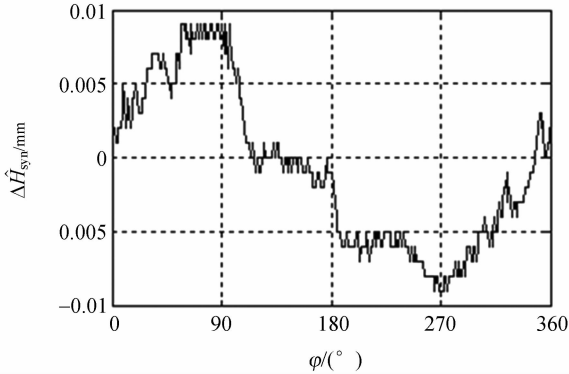


图 3 焦平面两端同步运动误差测量曲线

Fig. 3 Curve of synchronous motion error of focal plane at both ends



图 4 相机调焦试验成像照片

Fig. 4 Photo of focusing test for camera

将此调焦机构安装到其空间相机内,利用专用转台实现空间相机对近距离目标成像。试验结果表明,调焦机构调焦精度高,并具有良好的稳定性。图 4 为调焦试验成像照片。

## 5 结 论

空间相机向宽幅盖成像的发展趋势,使得高精度、高稳定性、大尺寸焦平面的调焦问题成为亟待解决的关键技术之一。正确分析大尺寸焦平面两端同步运动误差的影响有助于提高相机调焦精度。本文从焦平面两端运动同步性角度出发,分析了影响大尺寸焦平面两端同步运动精度的主要原因,建立了同步运动误差的数学模型,采用蒙特卡罗仿真算法对同步运动误差的标准偏差进行了仿真分析。仿真结果显示同步运动精度为 0.02 mm。通过焦平面两端同步运动精度测试验证了方法的有效性,说明此方法能够比较准确地确定同步运动精度,为后续在轨调焦策略的确定以及同类产品的研制提供了理论支持。

## 参考文献:

- [1] 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.  
CHEN SH P. *Design and Experiment of Space Camera* [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003: 27-28. (in Chinese)
- [2] 卢铿, 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.  
LU E, YAN C X, WU Q W, *et al.*. Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(5): 364-376. (in Chinese)
- [3] 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): 35-38.  
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): 35-38. (in Chinese)
- [4] 张星祥, 任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接[J]. 光学学报, 2001, 26(5): 740-745.  
ZHANG X X, REN J Y. Mechanical Interleaving Assembly of TDICCD Focal Plane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 26(5): 740-745. (in Chinese)
- [5] 黄和平, 夏寅辉, 安成斌, 等. 大口径、长焦距红外系统调焦机构设计[J]. 激光与红外, 2005, 35(10): 745-747.  
HUANG H P, XIA Y H, AN CH B, *et al.*. Design on the focusing mechanism of long focus IR system[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(10): 745-747. (in Chinese)
- [6] 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 X J, YAN CH Y, XIE T. Design of focusing mechanism of space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2757-2761. (in Chinese)

- [7] 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)
- [8] 安源,齐迎春.空间相机直线调焦机构的设计[J].光学精密工程,2009,17(3):609-614.  
AN Y, QI Y CH. Design of straight-line focusing mechanism for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(3):609-614. (in Chinese)
- [9] 王永宪,王兵,任建岳.空间遥感器调焦机构组件动态特性分析[J].光学技术,2009,35(02):235-243.  
WANG Y X, W B, REN J Y. Dynamic performance analysis on the focusing mechanism component of the space remote sensor[J]. *Optical Technique*, 2009,35(2):235-243. (in Chinese)
- [10] 毛英泰.误差理论与精度分析[M].北京:国防工业出版社,1982:27-28.  
MAO Y T. *Error Theory and Precision Analysis* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982:27-28. (in Chinese)

## 作者简介:



王书新(1981—),男,吉林白城人,博士研究生,助理研究员,主要从事空间相机机械结构的研究。E-mail: surray@139.com



刘 磊(1972—),男,吉林人,副研究员,主要从事空间光学仪器的研究。E-mail: ccliul@163.com



齐 光(1981—),男,吉林白城人,硕士研究生,助理研究员,主要从事空间相机机械结构的研究。E-mail: qiguang007@yahoo.com.cn



任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为空间光学及光机电系统。E-mail: zxx-iang488@sina.com

## 通讯作者:



李景林(1963—),男,吉林长春人,研究员,硕士生导师,主要从事空间相机光机结构的研究。E-mail: aq0183@126.com

(本栏目编辑:李树军)