

文章编号 1004-924X(2009)03-0609-06

# 空间相机直线调焦机构的设计

安 源<sup>1</sup>, 齐迎春<sup>2</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 130031;
2. 吉林大学生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对空间相机在使用时受空间环境中重力、温度及压力等因素的影响,引起各光学镜面位置相对变化,从而导致像平面与焦平面不重合的问题,在分析空间相机的 3 种调焦方式及调焦机构设计基本原则的基础上,针对某空间相机的要求设计了一种直线调焦机构。利用滚珠丝杠将旋转运动转化为直线运动,并结合直线导轨约束运动形式,采用绝对式编码器检测位移。该机构具有低摩擦、传动简单等优点,可有效地减少过多的传动环节所带来的传动误差。采取开环控制和闭环控制两种方式检验了该机构的精度,并讨论了误差产生的原因。实验数据的统计分析 & 残差分析表明,直线调焦机构的开环调焦精度为 0.002 5 mm,闭环调焦的精度可达到 0.001 5 mm,满足 0.01 mm 使用要求。

**关键词:** 空间相机;调焦机构;误差分析

**中图分类号:** V475.2; V241.03 **文献标识码:** A

## Design of straight-line focusing mechanism for space camera

AN Yuan<sup>1</sup>, QI Ying-chun<sup>2</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;*
2. *School of Biological and Agricultural Engineering of Jilin University, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** When a space camera is effected by the changes of gravity, temperature, pressure in space environment, the image detector can not be matched with the focal plane for mirror position change. In order to improve the imaging quality, a straight-line focusing mechanism driven by step motor and glided on liner guide is designed based on analysis of several kind of focusing methods and discussion on focusing mechanism. This mechanism uses ball screws to translate the rotation to the line movement, and select an absolute encoder to detect the displacement. It has the advantages of light friction and simple transmission chain and can reduce the transmission error effectively. The precision of this mechanism is checked by open-loop control and closed-loop control. Moreover, the mean value and standard deviation are calculated by statistics analysis, and the residual error curve is plotted based on the test data. The measuring results show that the focusing mechanism has a high precision, the error of closed-loop control is 0.002 5 mm, and the error of open-loop control is 0.001 5 mm, which are less

收稿日期:2008-09-02;修订日期:2008-10-27.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z113)

than the precision of permission.

**Key words:** space camera; focusing machine; error analysis

## 1 引言

空间相机在使用时会由于空间环境中重力、温度及压力等因素的变换,引起各光学镜面位置的相对变化,进而导致像平面与焦平面的不重合,即离焦。为了保证成像质量,空间相机在使用之前应考虑空间的环境参数,依据地面试验时获得的温度调焦曲线,进行自动调焦或遥控调焦,补偿离焦量,从而改善成像质量。

本文分析了空间相机常用的调焦方式,根据调焦机构的设计原则设计了一种直线式调焦机构,介绍了调焦机构的工作特点,检测了该机构的精度,并分析了误差产生原因。

## 2 空间相机调焦机构及设计原则

图 1 为照相光学系统示意图,为了获得清晰的图像,物距、相距和焦距之间必须满足高斯公式  $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ 。若光学系统的焦距为定值,当物距  $u$  发生变化时,像距也必须进行相应的变化才能保证获得清晰图像,在通常的照相系统中,像距  $v$  一般是固定的,所以可通过沿光轴方向改变物镜  $L$  的位置来满足高斯公式的要求。所谓调焦就是指沿光轴方向改变物面(或镜头)的位置,使物像关系满足高斯公式,以获取清晰的图像<sup>[1-2]</sup>。

根据空间相机光学系统的不同形式(折射式、反射式和折反式)可以有 3 种调焦方法:透镜调焦、反射镜调焦和焦面调焦。离焦即为像面与焦面的不重合,因此调整焦平面的位置使之与像面重合是最直接的调焦方式,即焦面调焦。但在实际相机中由于机构运动精度和结构尺寸的限制增加了焦面调焦的难度,所以通常不采取此调焦方式。透镜调焦就是在含有透镜的光学系统中通过调整透镜的位置来改变透镜间的间距,从而实现调焦,一般用于折射式和折反式光学系统。反

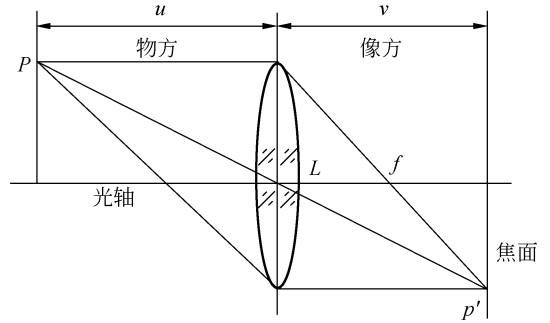


图 1 照相光学系统示意图

Fig. 1 Optical system of camera

射镜调焦即通过调整折转光路的反射镜实现调焦,适用于反射式系统中。

鉴于其特殊的使用环境,空间相机调焦机构必须对重力、温度等变化具备良好的适应性,调焦机构一般应满足以下要求<sup>[3-4]</sup>:

- (a)调焦机构要有足够高的精度,满足微小调整的要求;
- (b)调焦机构要有足够的调焦范围,既要考虑空间温度调焦的要求,也要满足地面成像试验的要求;
- (c)调焦机构要有足够的稳定性,在温度等条件变化的情况下产生的变形很小;
- (d)调焦机构要具有高的灵敏度,保证单步的移动距离远小于精度要求;
- (e)调焦机构要具有高的检测精度,能够及时准确地检测出机构的运动范围。

## 3 直线调焦机构的设计

图 2 为某空间相机的光学系统示意图,为了缩短整个相机的长度,在系统中采用两片反射镜折转光路,有效地降低了相机的质量。因为光学系统中仅有反射镜,同时综合考虑相机外形尺寸、质量等因素,故将第二折叠镜作为调焦镜。

空间相机都有一定的允许离焦量,当离焦量小于允许值时,不会造成图像质量的下降。离焦

量由光学系统的  $F$  数决定,即  $\delta=2F^2\lambda$ 。图 2 所示光学系统的  $F$  数为 13.3,所以其允许的离焦量为 0.212 mm,综合考虑影响离焦量的温度等其它因素,相机调焦机构的精度应优于  $\delta/4$ ,即  $F^2\lambda/2$ ,所以像面移动的精度应优于 0.05 mm。由于采用折叠镜调焦,所以当调焦镜移动  $\Delta l$  距离时,像面移动  $2\Delta l$  距离。综合考虑以上因素及零位误差、热控误差、非线性误差等因素的影响,调焦机构的设计精度选择应优于 0.01 mm。

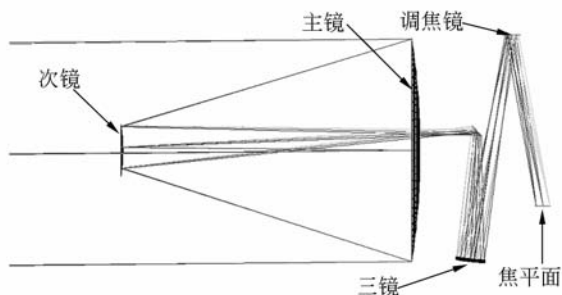


图 2 某空间相机光学系统示意图

Fig. 2 Optical system of space camera

调焦机构采用步进电机为驱动,以多圈绝对式编码器为检测元件,利用滚珠丝杠将旋转运动转换为直线运动,同时配合使用直线导轨,既保证了结构的稳定性,又简化了传动链调焦精度。其中的步进电机及编码器为航天级产品,直线导轨和滚珠丝杠可采用镀  $\text{MoS}_2$  后组装的方式来解决冷焊问题,图 3 为该调焦机构试验件的设计方案图。

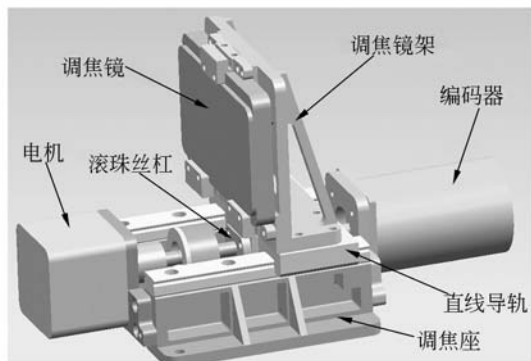


图 3 调焦机构设计方案图

Fig. 3 Scheme of focus structural design

该直线调焦机构具有如下优缺点:

(a)滚动直线导轨具有摩擦系数小、空载小、预压无间隙、维护保养简便的特点,而且滚动直线导轨的运动摩擦阻力较小,驱动功率小、定位精度及重复定位精度较高;

(b)传动链短,直接将旋转运动转换为直线运动,减小了不必要的环节,也减小了增加传递误差的环节。

(c)在检测环节上仍是将直线运动转化为旋转运动用编码器进行检测,如采用光栅尺等直线位移监测装置则可进一步提高检测精度,但目前为止尚无通过航天测试的光栅尺产品。

## 4 直线调焦机构精度检测及误差分析

直线调焦机构检测的主要目的是验证设计和加工的精度是否能满足调焦精度的要求,主要通过相机控制器的开环和闭环两种方式进行测试,开环精度测试可测试调焦机构自身的误差(含编码器误差)和空回,闭环精度测试则测试相机使用时可达到的精度(含编码器误差)。

试验时,调焦机构的行程为  $-5\text{ mm} \sim +5\text{ mm}$ ,利用相机控制器驱动步进电机旋转,可根据滚珠丝杠的导程计算出电机每步对应的直线位移量为  $l_1 = \frac{0.9^\circ \times 1\text{ mm}}{360^\circ} = 0.0025\text{ mm}$ ,采用 16 位绝对式多圈编码器记录电机实际转过的角度,根据选用的编码器类型可计算出编码器的理论分辨力为  $l_2 = \frac{360^\circ \times 1\text{ mm}}{2^{16}} = 0.015\text{ }\mu\text{m}$ ,综合考虑编码器的装调误差等因素,其检测的直线精度优于  $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。

### 4.1 调焦机构开环精度检测

开环检测时,以调焦范围内任意数值为调焦期望值,步进电机驱动滚珠丝杠旋转,调焦结束后用编码器检测实际走过的距离。图 4 为 8 组开环测试时取的 100 个测试值与理论值之差,其中剔除了首步时的空回误差,8 组数据的空回误差均

值为  $5 \mu\text{m}$ 。图 5 为测试值与均值之差的残差曲线。表 1 为开环 8 组数据的分析值<sup>[7]</sup>。

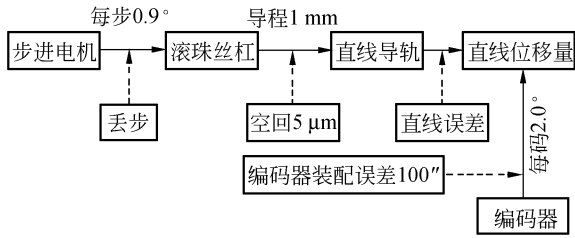


图 4 调焦机构传动链误差组成

Fig. 4 Error of transmission chain



图 5 调焦机构试验图

Fig. 5 Test of focus mechanism

表 1 开环控制数据分析列表

Tab. 1 List of analysis data for open-loop control

( $\mu\text{m}$ )

算数平均值	标准偏差	格罗布斯判据	允许最小值	允许最大值	算数平均值的标准偏差
2.409	0.145	3.282	1.934	2.884	0.014
2.404	0.229	3.282	1.651	3.157	0.023
2.425	0.234	3.282	1.655	3.194	0.023
2.417	0.219	3.282	1.699	3.135	0.022
2.408	0.125	3.282	1.997	2.818	0.013
2.398	0.217	3.282	1.685	3.111	0.022
2.401	0.208	3.282	1.718	3.084	0.021
2.408	0.186	3.282	1.799	3.017	0.019

从图 6、图 7 和表 1 可以看出,综合考虑空回误差时机构精度优于  $0.01 \text{ mm}$ ,并且测试过程中无粗大误差产生。开环测试数据的均值为  $2.4 \mu\text{m}$ ,与步进电机单步产生的位移量  $2.5 \mu\text{m}$  接近,所以认为电机在旋转过程中有丢步现象。

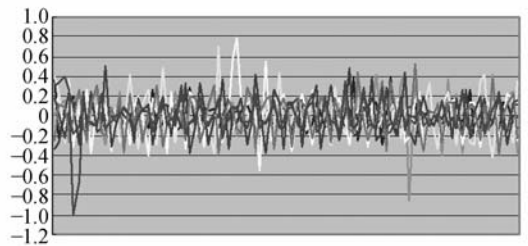


图 7 开环控制残差曲线

Fig. 7 Residual error curve of open-loop control

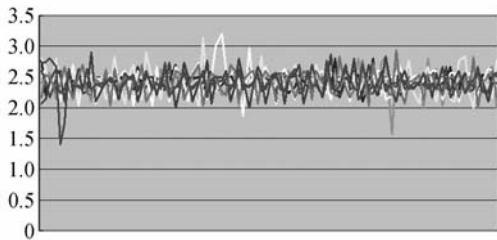


图 6 开环控制测试曲线

Fig. 6 Test curve of open-loop control

## 4.2 调焦机构闭环精度检测

闭环检测时,以调焦范围内任意数值为调焦期望值,步进电机驱动滚珠丝杠旋转调焦期望值的  $1/2$ ,然后编码器检测实际调焦量,并以调焦期望值与实际走过距离之差的  $1/2$  为期望值再次调焦,依次类推,实际调焦量逐渐逼近调焦期望值,最后当实际调焦值与期望值  $< 0.01 \text{ mm}$  时停止

调焦(调焦流程如图 8 所示)。此类算法的优点是可以减小空回等系统固有误差的影响,在第一次调焦的时候即将空回作为调焦量带入下次调焦过程中。

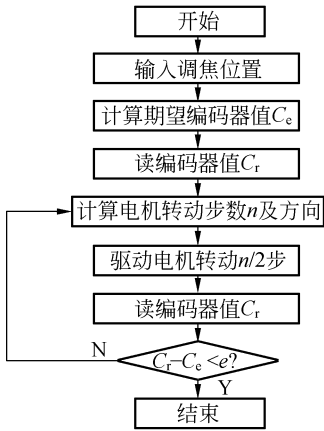


图 8 闭环调焦流程图

Fig. 8 Flow chart of focus in closed-loop control

图 9 为 6 组闭环测试时取的 100 个测试值与理论值之差,由于采用逼近控制算法,有效地消除了机构的空回误差。图 10 为测试值与均值之差的残差曲线。表 2 为闭环 6 组数据的分析值。

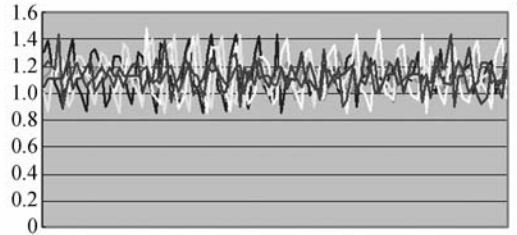


图 9 闭环控制测试曲线

Fig. 9 Test curve of closed-loop control

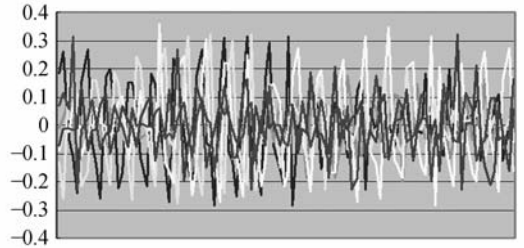


图 10 闭环控制残差曲线

Fig. 10 Residual error curve of closed-loop control

表 2 开环检测数据分析列表

Tab. 1 List of analysis data for closed-loop control

算数平均值	标准偏差	格罗布斯判据	允许最小值	允许最大值	算数平均值的标准偏差
2.409	0.145	3.282	1.934	2.884	0.014
2.404	0.229	3.282	1.651	3.157	0.023
2.425	0.234	3.282	1.655	3.194	0.023
2.417	0.219	3.282	1.699	3.135	0.022
2.408	0.125	3.282	1.997	2.818	0.013
2.398	0.217	3.282	1.685	3.111	0.022
2.401	0.208	3.282	1.718	3.084	0.021
2.408	0.186	3.282	1.799	3.017	0.019

从图 9、图 10 和表 2 中可以看出,调焦机构的精度优于 0.001 5 mm,并且测试过程中无粗大误差产生,完全满足使用要求。

从试验结果来看,影响调焦机构精度的主要因素有:

(a)直线导轨的自身误差。包括两端 V 型槽中心线的直线度、滑轨与滚珠接触部位的尺寸偏差、滚珠直径的偏差等引起的误差,调焦机构中所选用的直线导轨为 THK SRS12M 型 p 级精度的

产品;

(b)步进电机的驱动误差。步进电机的丢步导致滚珠丝杠的旋转度数不准确;

(c)编码器的检测误差。编码器自身存在的装调误差引起的检测误差;

(d)滚珠丝杠的误差。采用的滚珠丝杠为 THK MDK0601,其轴向间隙  $< 5 \mu\text{m}$ ;

(e)直线导轨和滚珠丝杠的安装误差。由于直线导轨和丝杠轴线的不平行度引起的误差。

## 5 结 论

从实际测得的精度数据可以看出,所设计的调焦机构满足高精度、高灵敏度和高检测精度的

要求,实测精度 $>0.01$  mm。同时本直线调焦机构具有模块化程度高、传动方案简单、易于装调等优点,尤其调焦机构中所采用的直线导轨和丝杠的精度要求相对较低,有利于降低防冷焊处理之后的装调精度要求。

### 参考文献:

- [1] 薛实福,李庆祥.精密仪器设计[M].北京:清华大学出版社,1991:225-244.  
XUE SH F, LI Q X. *Precision Instrument Design* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991: 225-244. (in Chinese)
- [2] SUBBARAO M, TYAN J K. The optimal focus measure for passive autofocusing and depth-from-focus[J]. *SPIE*, 1995, 2589: 89-99.
- [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] 张洪文.空间相机调焦技术研究[D].北京:中科院研究生院,2003.

- ZHANG H W. *Research on the auto-focusing technology for space camera* [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [5] REYNOLDS A G, HAMMOND M, BINNS L A. Camera correlation focus: an image-based focusing technique[J]. *SPIE*, 2005, 5752: 1032-1041.
- [6] 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)
- [7] 费业泰.误差理论与数据处理(第四版)[M].北京:机械工业出版社,2003:52-55.  
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing (Fourth Edition)* [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 52-55. (in Chinese)

### 作者简介:



安源(1980—),男,黑龙江安达人,博士,助理研究员,主要从事空间遥感器的结构及机构设计。E-mail: any@ciomp.ac.cn



齐迎春(1979—),女,博士,讲师,主要研究方向为光机电一体化,机械系统设计及数值模拟与分析。E-mail: qiyingchun0304@tom.com