

# 长焦距空间相机调焦机构设计

郭权锋<sup>1,2</sup>, 董吉洪<sup>1</sup>, 李威<sup>1</sup>, 王克军<sup>1</sup>, 李延春<sup>1</sup>, 王海萍<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:**长焦距空间相机容易因环境变化产生离焦现象,引起相机成像质量下降。根据空间相机不同的结构特点和工作环境,需要设计相应的调焦机构。从保证相机成像质量和结构空间要求的角度出发,阐述了调焦机构的工作原理和组成,进行了调焦机构的方案选择,分析了调焦机构误差分布,提出了一种由精密滚珠丝杠和直线轴承实现导向和运动方向转换的调焦机构。对调焦机构进行了力学试验和分析。试验结果表明,调焦机构较强的结构刚度和稳定性能够满足空间相机在复杂环境条件下精确可靠调节调平面位置的要求。

**关键词:**调焦机构; 机构设计; 长焦距; 空间相机

中图分类号: V248.3

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102711.0105

## Focusing Mechanism Design for Long Focal Length Space Camera

GUO Quan-feng<sup>1,2</sup>, DONG Ji-hong<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, WANG Ke-jun<sup>1</sup>, LI Yan-chun<sup>1</sup>, WANG Hai-ping<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The focal plane of long focal length space camera is easily changed by changes of environment. An accuracy focusing system for adjusting the offset of the focal plane is provided in this paper. The makeup of focusing system is described, the scheme of focusing system is selected, and the precision distribution of focusing system is analyzed in order to assuring the image quality and meeting the requirements of structure. It is confirmed that the focusing system is mainly made of precision screw ball and linear bearing, which achieves guidance and conversion of movement. The structure stability is tested through mechanical tests. The results show that the focusing system can meet the requirements of space camera, which refer to adjusting the position of the focal plane accurately.

**Keywords:** focusing system; mechanism design; long focal length; space camera

## 1 引言

空间相机用于对地球资源的详查和普查,为获得高清晰度的图像,在相机摄像时,地面景物应准确地成像在 CCD(或胶片)的感光面上。由于空间相机所处飞行器轨道高度的变化,温度、大气压力变化以及运载过程中相机受冲击和振动的影响,都有可能造成相机的离焦现象,影响成像质量。为了保证成像质量,需要在相机系统中加入调焦机构,以修正这种离焦。调焦机构的调焦量是根据环境条件和控制精度的要求确定的,通过绝对式编码器的反馈和对步进电机的控制使调焦镜移动来补偿因各种因素造成的离焦,从而使相机能得到高清晰度的图像。

近年来,航天技术发展非常迅速,然而,国内外对相关技术的报道多局限在对大口径空间相机的机械性能和动力学性能研究方面,且一般为综述性的文献。有关调焦机构设计方面的技术,由于涉及军事保密,国外文献报道的都较少,且没有实质性的内容。出于同样的原因,国内文献关于调焦机构设计方面的报道也比较少,且多为针对特殊相机的调焦机构<sup>[1-7]</sup>。本文介绍了一种应用于长焦距空间相机上的调焦机构。根据调焦量和相机特点进行了方案设计,介绍了调焦机构的工作原理,并根据外部条件对调焦机构的特殊要求分别对相机进行了精度、可靠性等方面的试验和分析。

## 2 调焦方案的选择

### 2.1 调焦方式的选择

调焦方式主要由光学系统的特点及相机工作的环境条件决定。一般相机的光学系统,常通过移动镜头机构中的光学元件来改变焦距,从而实现调焦的目的。对于空间相机的光学系统来说,由于对镜头处的主镜、次镜间距要求得很严格,且它们所处的空间位置和支撑方式非常特殊,不宜用来调焦<sup>[8]</sup>。

空间相机光学系统中的焦平面组件和校正镜组

件常用来实现调焦。焦平面组件调焦的原理是通过移动成像介质(胶片或 CCD)感光面的位置进行调焦,适用于焦距较短的相机。通过校正镜组件调焦时,校正镜的移动能够显著调整像面的位置,而这种移动又对成像质量影响较小;然而,校正镜的尺寸和重量不能过大,否则难以实现稳定调焦<sup>[9]</sup>。

对于本文介绍的空间相机来说,由于大口径、长焦距、高分辨力是其主要特点,通过上文分析,镜头组件和焦面组件处的光学元件都不宜用来调焦。光学系统中,位于焦面前的校正镜尺寸小、重量轻,且为球面反射镜,最适宜用作调焦镜。

### 2.2 调焦机构的选择

由于调焦镜需要沿光轴方向在一定距离范围内移动,通常由丝杠螺母或凸轮机构将电机的回转运动转换为直线运动,然后再通过一系列的减速机构实现精确调焦。凸轮机构的结构比较简单,抗冲击能力强,适宜用作重载机构的运动方向转换,但凸轮曲线的加工要求较高,且凸轮机构和其减速机构的空间要求也较大。丝杠螺母机构的抗冲击能力较差,但其结构简单,运动灵活。由于相机调焦镜组件的重量较轻,故冲击力较小,适宜选用容易实现的丝杠螺母结构,同时选用轻便灵活的直线轴承作导向元件<sup>[10]</sup>。

### 2.3 调焦机构的组成

调焦机构主要由步进电机、滚珠丝杠、调焦镜组件、运动方向转换机构、蜗轮箱和编码器等组成,结构简图如图 1 所示。

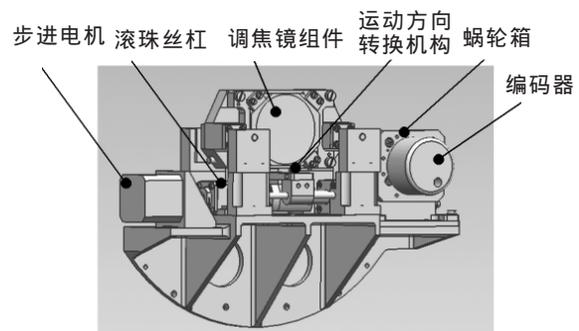


图 1 调焦机构结构简图

### 3 调焦机构设计

#### 3.1 运动方向转换设计

调焦机构的主要功能是实现调焦镜沿着光轴方向的高精度运动。由于调焦镜是球面镜，因此调焦镜的运动必须保证沿着光轴做直线运动。设计思想是利用斜面运动原理将垂直于光轴的运动转化为光轴方向的直线移动。具体运动方式为：调焦机构主运动轴线与光轴成  $90^\circ$  夹角，步进电机通过联轴器与滚珠丝杠相连，将回转运动转化成直线运动。调焦镜固定在镜座上，镜座沿光轴的移动由两对直线轴承副导向，镜座与丝母之间用一对直线轴承副联接，其中轴相对轴承的运动方向与调焦镜运动方向成  $84^\circ$  夹角，如图 2 所示。

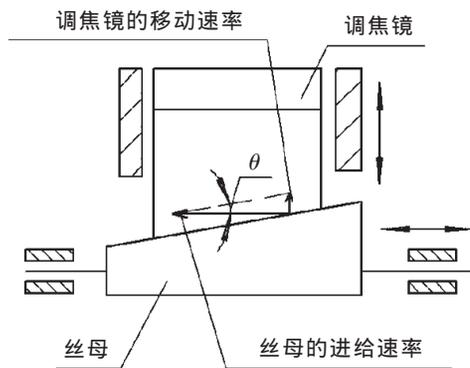


图2 斜面进给传动示意图

当直线轴承随丝母做直线运动时，会带动与镜座连在一起的轴运动，由于镜座上垂直于丝母运动方向还有两对直线轴承副导向，从而可以将丝母的直线运动转换到垂直方向上，实现调焦镜在光轴方向上的移动，达到相机调焦的目的。由于轴承副运动方向与调焦镜运动方向成  $84^\circ$  夹角，因此调焦镜沿光轴方向的移动距离约为丝母沿滚珠丝杠轴线方向移动距离的  $1/10$ ，即调焦镜的运动精度是滚珠丝杠运动精度的 10 倍，大幅提高了调焦精度。

#### 3.2 装配性设计

本机构最大的特点是运用简单的斜面机构实现了运动方向的转化和精度的细分。然而，机构原理

的简单化给装配带来了困难，必须通过合理的装配性方面的设计降低和简化对装配的要求，才能保证调焦机构的精度。

图 2 所示的传动示意图中，丝母的直线运动可以通过一组与丝杠轴线平行的直线导轨保证，调焦镜沿光轴的直线运动也可以通过一组直线导轨保证。但是，上述两个运动在空间上的平行性很难保证。两个运动在空间上的不平行不仅会影响机构的运行精度，严重时还会引起机构阻力矩增大，使机构卡滞。为降低两个运动在空间上的平行性要求，缓解两个运动间微小的不平行引起的机构干涉，调焦机构中加入了弹性连接片。弹性连接机构如图 3 所示。

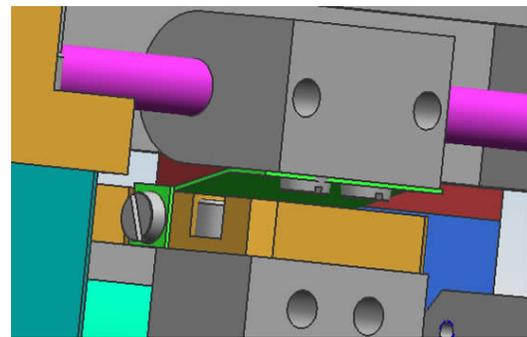


图3 调焦机构中的弹性连接结构

调焦机构运行时，如果丝母的运动与调焦镜的运动不平行，弹性连接片就会受力产生变形释放能量，从而减小机构间的干涉，保证机构的调焦精度和阻力矩的稳定。需要注意的是，弹性连接片的尺寸和安装位置必须严格保证，否则弹性连接片不仅不能发挥缓解机构干涉的作用，还会加剧机构干涉，引起机构卡滞。

#### 3.3 可靠性设计

根据太空环境对长焦距空间相机的特殊要求，分别从力学振动和空间环境适应性等方面进行了相应的可靠性设计。

结构设计阶段采用了冗余设计，加强了关键传动部件的强度和刚度。然后，建立有限元模型，利用工程分析和热分析软件对两组件进行力学分析和热分析，在充分考虑结构强度和各结构件间热匹配的基础上对结构进行优化，设计出比较理想的机械

结构和传动方式。

为防止金属传动件在空间真空条件下发生冷焊,对所有运动副采取了防冷焊处理。其中,对滚动轴承进行了表面固体润滑处理,直线轴承和滚珠丝杠则选用可在温度范围为 $-35\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和真空条件下使用的产品。同时,各运动副在固体润滑的基础上使用少量的真空润滑脂,以改善活动部件的润滑状态。通过模拟空间环境试验验证,表明上述环境适应性设计比较合理,机构具有较好的空间环境适应性。

### 3.4 精度分析

由于经调焦系统调整后,像面的离焦量必须小于光学系统的焦深。综合考虑空间环境条件、加工装配误差和调焦控制误差等因素,光学设计确定调焦镜的行程不小于 $\pm 2\text{ mm}$ 。

根据相机的 $F$ 数和工作时的中心波长 $\lambda$ ,由半焦深公式 $|\pm\Delta l|=2F^2\lambda$ ,确定像面的离焦量应控制在 $\pm 0.04\text{ mm}$ 以内。因为调焦反射镜的移动量与像面的移动量之间有2倍的关系,要求调焦反射镜沿光轴移动的实际控制精度达到 $\pm 0.02\text{ mm}$ 以内。考虑调焦机构的调焦精度(包括机构精度、控制系统的控制精度)以及相机热控精度范围内像面位置的允许波动等误差因素,确定调焦机构的调焦量为 $\pm 2.5\text{ mm}$ ,运行精度在 $\pm 0.01\text{ mm}$ 以内。

为满足长焦距空间相机可靠性高、精度高的设计要求,选用受环境因素影响小的步进电机作为驱动元件。由公式(1)可以计算出调焦机构的精度:

$$\alpha = \frac{e}{p} \tan\theta = 0.5\ \mu\text{m} \quad (1)$$

其中, $e$ 为滚珠丝杠导程,取 $2\text{ mm}$ ;  $p$ 为步进电机每转脉冲数,取步距角为 $0.9^{\circ}$ ,则每转脉冲数为400;  $\theta$ 为运动轴线与导向直线轴承轴线的夹角,取整为 $6^{\circ}$ 。

该调焦机构的理论调焦精度可达 $\pm 0.0005\text{ mm}$ 。调焦镜的实际运行精度还受电机、丝杠、直线轴承、加工装配精度影响。步进电机的误差主要为步距角误差,常用的步进电机步距角误差约等于1个步距角,转换为调焦镜的运动误差为 $\pm 0.0005\text{ mm}$ 。滚珠丝杠的误差主要是由滚珠和丝杠之间的间隙产生的,本机构

滚珠丝杠的行程约为 $80\text{ mm}$ ,高精度滚珠丝杠在 $100\text{ mm}$ 行程内误差 $<0.02\text{ mm}$ ,转换为调焦镜的运动误差为 $\pm 0.002\text{ mm}$ 。根据直线轴承的技术参数和精密仪器的加工装调经验,直线轴承的误差和加工装调的误差引起的调焦镜的运动误差约为 $\pm 0.002\text{ mm}$ 。

综上所述,该调焦机构的实际运行精度优于 $\pm 0.005\text{ mm}$ ,满足设计指标要求。

## 4 试 验

为检验调焦机构的结构稳定性,对机构进行了力学振动试验。试验时,为保证试验数据的有效性,必须将调焦机构牢固地固定在工装上,再将调焦机构和工装作为一个整体固定到力学振动试验台上。力学试验状态如图4所示。

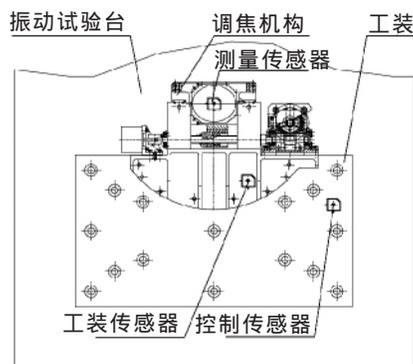


图4 调焦机构力学试验状态示意图

力学试验中所用传感器均为加速度传感器。试验共用9个通道,其中3个通道用作控制,其余6个通道用作测量。控制用传感器粘贴在振动台台面上,测量用传感器粘贴在调焦机构和工装板上,其中调焦镜座上3个( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向各1个),工装板上3个( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向各1个),如图4所示。调焦机构力学试验结果见表1。

表1 调焦机构力学试验结果

序号	振动方向	振前特征频率(Hz)	振后特征频率(Hz)
1	$X$	478	455
2	$Y$	151	138
3	$Z$	478	455

## 5 结 论

调焦机构是未来大口径、长焦距、高分辨力空间相机的关键构件,直接影响空间相机的成像质量。本文从相机的实际需要出发,设计了一套适合球面

调焦镜调焦、由滚珠丝杠和直线轴承机构导向、通过直线轴承巧妙实现运动方向转换的调焦机构。试验结果表明,机构的特征频率超过 100 Hz,具有较高的特征频率和调焦精度,能够适应复杂空间环境下的调焦要求。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 胡君, 吴伟平. 光学成像传感器调焦控制电路仿真测试 [J]. 光学 精密工程, 2007, 15(10): 03-08.
- [3] 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): 1051-1055.
- [4] 李延春, 董吉洪, 陈立恒, 等. 紧凑型多光谱空间光学传感器焦平面的设计与拼接[J]. 光机电信息, 2010, 27(8): 47-52.
- [5] 李威. 空间光学传感器振动夹具的设计与研究[J]. 光机电信息, 2010, 27(9): 16-22.
- [6] 谷松, 王绍举. 空间相机调偏流机构的设计与控制[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 616-620.
- [7] 董吉洪. 大孔径光学反射镜球铰支撑设计与分析[J]. 光机电信息, 2010, 27(9): 29-34.
- [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.
- [9] 张运海, 赵改娜, 张中华, 等. 免散瞳眼底照相机的精密调焦[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(5): 1014-1018.
- [10] 张新洁, 颜昌翔, 谢涛. 星载光学传感器调焦机构的设计[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2757-2761.

作者简介: 郭权锋(1979-), 男, 河南禹州人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事空间相机光机结构方面的研究。

E-mail: viking2000@sohu.com