

文章编号 1004-924X(2012)09-1939-06

大视场长焦面光学遥感器双凸轮式焦面调焦机构

刘 磊^{1,2*}, 曹国华¹

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为保证焦面长度大于 600 mm 的大视场空间光学遥感器在空间环境下的成像质量,设计了一套在 ± 2 mm 调焦范围内焦面组件倾斜小于 $7''$ 、定位精度优于 0.01 mm 的焦面调焦机构。针对系统对调焦精度、力学环境、真空环境的要求,该调焦机构采用双凸轮驱动技术来满足调焦精度要求;采用失电制动器自锁技术,使相机经发射等力学环境冲击后像面位置仍保持稳定。此外,采用高刚度导轨和轴承使调焦机构具有较高的动态刚度。设计分析及实验证明,该套焦面调焦机构具有较高的调焦精度和可靠性,能够在复杂的空间环境下完成调焦任务,提高遥感器的成像质量。

关键词:空间相机;双凸轮机构;焦面调焦;成像质量

中图分类号:V447.3;V443.5 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20122009.1939

Double cam focusing mechanism of space camera with wide field and long-focal-plane

LIU Lei^{1,2*}, CAO Guo-hua¹

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: ccliul@163.com

Abstract: A focusing mechanism with a tilt of focusing plane assembly less than $7''$, positioning accuracy better than 0.01 mm in the ± 2 mm focusing range was designed to ensure the best image quality for a wide field space camera with a focal plane length more than 600 mm. To meet the requirements of the focusing mechanism for focusing accuracy, mechanical environments and the vacuum environments, the dual-cam drive technology was used to complete the accurate focusing, and the loss of power brake self-locking technology allowed the camera to be a stable image plane position under the impact of mechanical environments. Furthermore, the high stiffness rail and bearings were used in the focusing mechanism to obtain a high dynamic stiffness. The design analysis and experimental results show that the dual focal plane cam-driven focusing mechanism has high focusing precision and high re-

收稿日期:2012-02-16;修订日期:2012-03-18.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

liability and is able to complete the focusing and improve the image quality of space cameras in the complex space environments.

Key words: space camera; double cam mechanism; focal plane focusing; image quality

1 引言

在空间对地遥感观测技术领域里,离轴三反光学系统具有大视场、高分辨率、体积小、无色差、平像场等优势。文中采用该系统设计的空间光学遥感相机焦面形状为矩形,长度大于 600 mm,宽 40 mm,适用于线阵的 TDI-CCD 接收器通过推扫方式实现宽幅成像。

由于空间相机受所处发射力学环境(如冲击、振动、过载)、在轨运行环境(如压力、温度、微重力等)及相机结构材料稳定性等因素的影响,其 CCD 靶面会偏离焦平面,从而降低成像质量。因此,相机需用调焦机构来补偿上述原因引起的 CCD 靶面位置的变化,校正离焦的 CCD 靶面位置以提高相机的成像质量。

不同的光学系统,其调焦方式也不相同,由于离轴三反光学系统中光学元件(如主镜、次镜)的相对位置受到非常严格的限制,不可能采用光学元件实现调焦;如果采用调焦镜调焦,调焦镜的长度至少要大于 600 mm,再加上调焦机构,其庞大的体积将大幅增加相机的总质量。因此,需要设计一套结构紧凑的焦面调焦机构以解决大视场长焦面空间光学遥感器准确调焦这一技术难题^[1-6]。

双凸轮驱动焦面调焦方式不仅不影响光学系统性能,而且精度高,机构紧凑,工作可靠性高。但双凸轮运动是非线性的,需要高位数编码器反馈凸轮轴的转角才能准确换算焦面组件的直线运动位置,故本文基于双凸轮驱动焦面调焦技术,采用失电制动器和高刚度导轨制作了一套焦面调焦机构。

2 焦面调焦的要求及组成

焦面调焦是指调焦机构推动带有 CCD 感光器件的焦面组件沿着焦面入射光线方向前后移动,使 CCD 的靶面与相机焦平面重合(见图 1)。

经过分析计算,并赋予调焦量一定裕度,本文

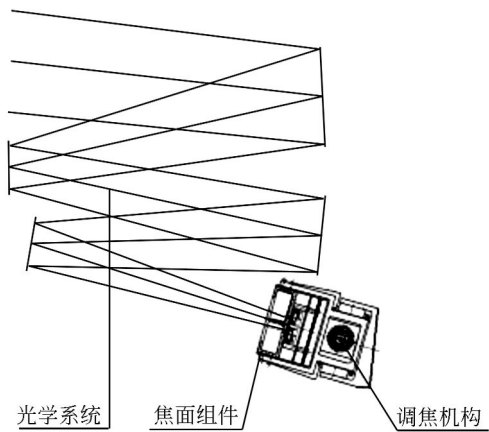


图 1 焦面调焦机构

Fig. 1 Focal plane focusing mechanism

将 CCD 靶面沿焦面入射光方向移动的调焦量定为 ± 2 mm,定位精度为 0.01 mm。

虽然相机的光学系统都允许有一定的离焦量,即在允许离焦量的范围之内,图像质量不会明显下降,但是为了满足焦面调焦机构的精度对光学系统传递函数的影响小于 5% 的指标要求,调焦机构在调焦过程中造成的焦面组件倾斜需要小于 $7''$ 。对于 600 mm 长的焦面, $7''$ 倾斜量对应的离焦量是 0.02 mm,加上 0.01 mm 的定位精度,总的离焦量是 0.03 mm。

确定离焦传递函数为:

$$MTF(\rho) = \frac{2J_1(\pi\rho D)}{\pi\rho D}. \quad (1)$$

式中: ρ 为空间频率, D 为离焦引起的弥散圆直径。令 $\rho = 50$ lp/mm, $D = 0.003$ mm, J_1 为一阶贝塞尔函数,得离焦传递函数 $MTF(50) = 97\%$,满足设计指标要求。

调焦机构主要由步进电机、减速器、偏心凸轮、支架组件、制动器、编码器、滚珠导轨机构等组成,如图 2 所示。电机通过联轴器与偏心凸轮左端连接,将转动力矩传给凸轮;凸轮的右端挂有制动器,限制凸轮的自由转动,在制动器的右侧装有编码器,反馈凸轮的转角位置,使调焦机构形成闭环控制。

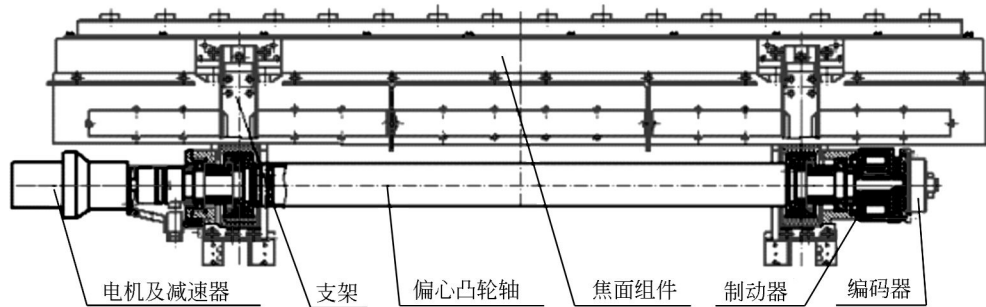


图 2 调焦机构的组成

Fig. 2 Composition of focusing mechanism

调焦机构本身不自锁,卫星在发射状态下,相机断电,靠电机上电无法实现调焦机构的制动。因此需要安装常闭式制动器,当断电情况下制动器制动,将调焦机构抱住,防止焦面组件在外力的作用下窜动。调焦机构工作前,制动器上电,解除制动后调焦电机再工作。

调焦时制动器上电解除制动,步进电机带动偏心凸轮转动的同时凸轮带动焦面组件上下直线运动,将焦面组件带到指定位置后,制动器下电制动,完成调焦。

由于相机在轨运行时,每绕地飞行 1 圈即有 15 min 的时间可以调焦,焦面组件调焦的速度不用很快,为了使步进电机工作在最佳状态,电机转速定在 200 n/min,焦面组件可以在 0.5 min 内走完全部行程。

焦面组件的质量为 5 kg,调焦机构在地面工作时的主要阻力是焦面组件的重力载荷及运行摩擦力。经过计算,调焦机构的地面负载力矩小于 0.2 N·m。由于在轨期间,运行阻力主要来自摩擦力,负载小于地面负载,考虑到制动力矩为 1 N·m 时制动器失效情况下,电机能够克服制动器的制动力矩带动调焦机构转动,总的负载力矩增加至 1.2 N·m。因此,选择额定力矩为 0.045 N·m 的电机,经过速比 $i=100$ 的减速器减速后,调焦机构最终的转动力矩为 4.5 N·m,接近阻力矩的 4 倍。

为了提高调焦机构的抗冲击振动能力,导轨及轴承的珠子均选用圆柱滚子,其接触面是直线,较以往球形点接触珠子有更大的刚度。导轨及轴承的润滑需要选用挥发性小的真空润滑脂,润滑

脂的用量需要严格控制,以防止润滑脂过多产生的挥发物污染相机镜头与 CCD 的感光面。由于相机在轨期间调焦次数有限,设计调焦次数为一万次,该次数在导轨及轴承的使用寿命范围内。

3 调焦机构原理

支架滑道内的凸轮绕支撑点转动的同时,带动焦面组件与支架滑道一起沿滑道做上下直线运动,即凸轮的旋转运动转化为焦面组件的直线运动,最终实现焦面调焦功能(见图 3)。

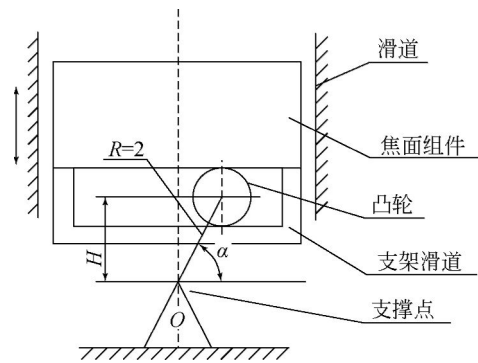


图 3 调焦机构原理

Fig. 3 Principle of focusing mechanism

焦面组件位移公式:

$$H = R \times \sin \alpha \quad (2)$$

式中: H 为焦面组件位置, R 为凸轮的偏心量, α 为凸轮转角。

当凸轮的偏心量 $R=2$ mm, 凸轮从 -90° 转到 $+90^\circ$ 时,焦面组件即可实现 ± 2 mm 的调焦。

在一根轴上,同轴的偏心凸轮 1 与偏心凸轮 2 与基准轴中心线 A、B 平行,其偏心量为 2 mm,两段凸轮绕基准轴中心线 A、B 转动的同时推动焦面组件上下直线运动,即可实现双凸轮驱动调

焦(见图 4)。双凸轮可以限制长焦面组件在调焦过程中的倾斜量,与单凸轮单点限制焦面组件在调焦过程中的倾斜量相比,其限制焦面组件倾斜的效果更明显,重复性更好。

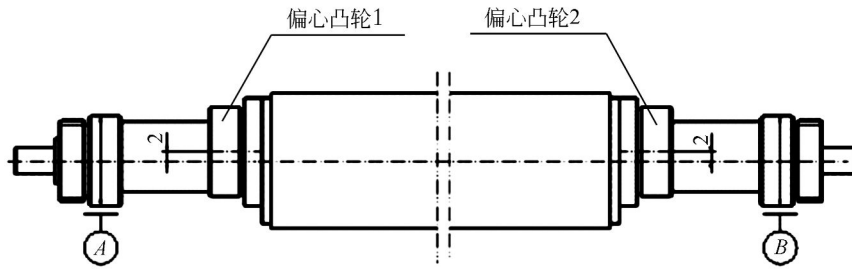


图 4 双凸轮调焦机构

Fig. 4 Double cam focusing mechanism

4 调焦机构的精度分析

调焦机构的精度最终表现在焦面组件在调焦过程中的倾斜量及定位精度上^[7-9]。

4.1 调焦机构定位精度

14 位绝对式编码器角的分辨率为 $1.4'$,电机步进角为 1.8° ,经速比为 100 的减速器减速后,凸轮轴可获得最小进给转角为 $1'$ 。虽然步进电机有失步,减速器有空回现象,但是编码器可以直接反馈凸轮轴的转角位置,将转角位置值反馈给控制系统,不断修正发给步进电机的指令,直至到达指定位置。

调焦机构的定位精度为:

$$\Delta_H = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial R}\right)^2 \Delta_R^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \alpha}\right)^2 \Delta_\alpha^2} \\ = \sqrt{(\sin \alpha)^2 \Delta_R^2 + R^2 (\cos \alpha)^2 \Delta_\alpha^2}. \quad (3)$$

式中:凸轮的偏心量 $R=2 \text{ mm}$;凸轮偏心量的测量误差 $\Delta_R = \pm 0.003 \text{ mm}$;编码器定位误差 $\Delta_\alpha = \pm 11.2$ 。当 $\alpha = 90^\circ$ 时,定位精度有最大值,即 $\Delta_{H\max} = \pm 0.0065 \text{ mm}$,满足设计指标的要求。

4.2 焦面组件倾斜

调焦机构的精度主要由两侧的凸轮组件(包括凸轮、轴承)精度所决定,基准轴每端有 1 个轴承、每个凸轮上有 1 个轴承,调焦机构上共 4 个轴

承。假定两侧的凸轮组件误差方向相反,得到凸轮相对基准轴中心线的平行度: $\Delta_1 = \pm 0.005 \text{ mm}$;轴承径向跳动: $\Delta_2 = \pm 0.004 \text{ mm}$;每侧凸轮组件的传动间隙: $\Delta_3 = \pm 0.005 \text{ mm}$ 。

算得调焦机构双凸轮组件的误差: $\Delta = \pm 2 \times \sqrt{\Delta_1^2 + 2 \times \Delta_2^2 + \Delta_3^2} = \pm 0.018 \text{ mm}$;转化成焦面组件倾斜: $\varphi = \pm 6''$ 。

5 调焦机构的动态力学性能与试验验证

随着火箭的发射,调焦机构要经历冲击、振动、加速度等力学环境的考验。如果调焦机构与火箭、卫星发生共振,调焦机构将受到很大破坏,进而破坏调焦的精度、降低调焦功能。为了降低调焦机构的振动响应,就必须提高其一阶共振频率,也就是要求调焦机构必须具有高的动态刚度^[10]。

5.1 调焦机构有限元分析

调焦机构有限元模型采用 8 节点 HEX 单元和 4 节点 QUAD 单元划分,共 44 363 个节点,30 053 个单元。

对调焦机构进行约束模态分析,前三阶结果如表 1 所示,变形云图如图 5 所示。

表1 调焦机构约束状态下的模态分析结果

Tab.1 Modal analysis results of focusing mechanism in bound state

阶数	f_n/Hz	振型描述
一	265	焦平面沿图中 x 方向摆动
二	289	焦平面绕两支架前后转动
三	350	焦平面沿图中 z 方向摆动

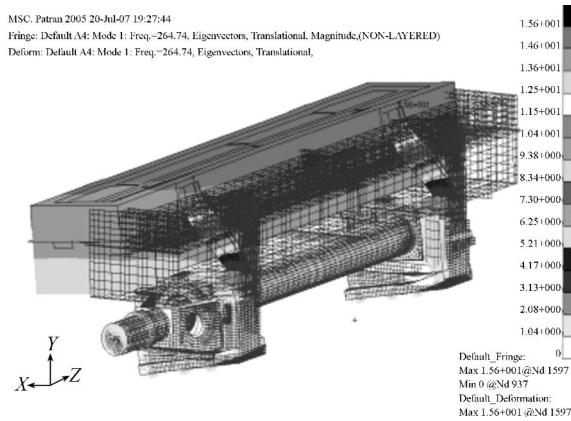


图5 调焦机构1阶模态变形云图

Fig. 5 The first order mode of focusing mechanism

5.2 试验结果

调焦机构一阶约束模态的试验结果是 146 Hz, 高于振动试验输入的上限 100 Hz, 最大响应放大倍率仅为 1.93 倍。以上试验证明, 该套调焦机构具有较高的力学动态刚度, 其低力学响应放大性可以有效降低外界力学环境对调焦机构的破坏。

调焦机构一阶约束模态试验结果低于分析结

果, 其主要原因是调焦机构中有许多活动环节, 如轴承、导轨等, 其活动接触面不能按固定面计算, 接触面的刚度需要通过实验测出后重新修改有限元模型。

5.3 振动试验后焦面组件直线运动精度检测

在焦面组件上表面粘一块平面反射镜, 用自准直平行光管对准平面反射镜后检测焦面组件在全行程直线运动时的倾斜量。经检测, 在焦面长方向倾斜 $\pm 5.8''$ 、宽方向倾斜 $\pm 2.5''$; 在焦面组件的中部架一块电子千分表, 检测焦面组件在全行程直线运动时的定位精度, 检测结果中减去编码器零点与调焦机构机械零点之间的系统角度误差值后, 调焦机构的定位精度达到 $\pm 0.008 \text{ mm}$, 满足设计指标的要求。正弦振动试验前后, 调焦机构的运行精度基本保持一致。

6 结论

设计的焦面调焦机构采用双凸轮调焦技术, 600 mm 长焦面组件在调焦过程中倾斜小于 $7''$; 采用编码器闭环控制, 调焦机构定位精度优于 0.01 mm; 采用失电制动器自锁技术, 相机经发射等力学环境冲击后, 像面位置保持稳定; 采用高刚度导轨的支撑导向设计, 提高调焦机构动态刚度。实验证明, 该套焦面调焦机构实现了所需要的调焦精度, 同时满足力学环境和真空环境的使用要求, 能够保证大视场长焦面空间光学遥感器在复杂环境条件下的成像质量。

参考文献:

- [1] 常军, 翁志成. 宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 55-57.
CHANG J, WENG ZH CH. Design of optical system in wide cover, off-axial space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 55-57. (in Chinese)
- [2] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(1): 35-38. (in Chinese)

- [3] 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)
- [4] VERHOEFF P, van MIERLO H A, BRAAM B C, *et al.*. Development of an in-orbit refocusing mechanism for the meteosat second generation weather satellites[J]. *SPIE*, 1998, 3439: 92-103.
- [5] 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)
- [6] 张洪文. 空间相机调焦技术的研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
- ZHANG H W. *Research on the auto focusing technology for space camera* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2003. (in Chinese)
- [7] 岳建如, 关富玲, 杨玉龙. 空间望远镜成像镜调焦机构改进设计与分析[J]. *空间科学学报*, 2003, 23(2): 155-159.
- YUE J R, GUAN F L, YANG Y L. Modified design and structural analysis for adjustment mechanism of the imaging lens's focal length of a space solar telescope[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2003, 23(2): 155-159. (in Chinese)
- [8] ZHANG X J, YAN CH X. Application of precision harmonic gear drive in focusing mechanism of space camera[J]. *SPIE*, 2010, 7659: 76590M-76590M-7.
- [9] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- MAO Y T. *Error Theory and Precision Analysis* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982. (in Chinese)
- [10] 王永宪, 王兵, 任建岳. 空间遥感器调焦机构组件动特性分析[J]. *光学技术*, 2009, 35(2): 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)

作者简介:



刘 磊(1972—),男,吉林长春人,副研究员,1994年于大连理工大学获得学士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事空间相机的结构设计。E-mail: ccliul@163.com



曹国华(1965—),男,黑龙江佳木斯人,教授,博士生导师,2008年于长春理工大学获得博士学位,主要从事光电在线检测、机电一体化产品设计、机电系统控制技术的研究。E-mail: caoguohua@cust.edu.cn