

大口径反射光学系统调焦机构设计

伞 兵,李景林

(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: 当空间光学遥感器所处的环境条件发生变化时,遥感器的焦平面会产生不同程度的偏移,为保证遥感器的成像质量,需要对偏移的焦平面进行校正,因此设计了一套柔性丝杆丝母与弹性导向机构相结合的机构来实现调焦的目的。该结构加工简单,不易发生卡滞现象,可实现对变化的焦面进行校正。从保证空间遥感器光学系统的成像质量出发,介绍了大口径反射光学系统调焦机构方案的选取及确定调焦机构的组成,并对该调焦机构在调焦范围内的调焦精度给出了初步分析。通过分析调焦精度可达 $\pm 0.0025\text{ mm}$,可以满足设计指标的要求。

关键词: 丝杆丝母; 弹性导向机构; 调焦机构

中图分类号: V447.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)S2-0329-04

Focusing device design of the large aperture optics system

San Bing, Li Jinglin

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

Abstract: The focus plane of a space remote sensor will decenter and defocus under the condition of space environment, which is changeable and complicated. It is necessary to compensate the defocusing effectively for the space remote sensor to improve the adaptabilities and to get a high quality image. A set of device which is made up of screw bolt & screw nut and flexible guide rail was designed. This set of device was easy to be made. Firstly, the project and the constitutes of focusing device were taken into account in the design. Secondly, the results of t analysis suggest the focusing device has a precision of $\pm 0.0025\text{ mm}$. Finally, experimental results demonstrate that the designs of screw bolt & screw nut are reasonable, which can meet the requirements of space applications.

Key words: screw bolt & screw nut; flexible guide device; focusing device

收稿日期: 2013-08-10; 修订日期: 2013-09-25

基金项目: 国家 863 项目(863-2-5-1-13B)

作者简介: 伞兵(1978-), 女, 主要从事空间相机光机结构设计。Email: san_bing@163.com

导师简介: 李景林(1963-), 男, 研究员, 主要从事空间相机光机结构的研究工作。Email: aq0183@126.com

0 引言

反射式光学系统具有不存在任何色差,可用于宽波段成像;光路折叠,缩短筒长,结构紧凑;采用非球面,减少零件数,易实现轻量化;光学材料容易解决,稳定性好,易实现大口径和超大口径等优点而应用于空间遥感领域。

长焦距、大口径反射式成像光学系统焦距在 5 m 以上,口径在 500 mm 以上,并由多块反射镜组成。

文中所研究的是由多块反射镜组成的、最大口径超过 500 mm 光学系统的调焦机构。当大口径反射光学系统所处的发射环境条件和在轨工作环境条件发生变化时^[1-2],光学系统的焦平面也将相应的产生不同程度的离焦,为了保证光学系统高分辨力的成像质量,就要求光学系统在离焦时能够对发生变化的焦平面进行校正,因此需要设计一套对大口径反射光学系统离焦的焦平面调整补偿的机构—调焦机构。文中从保证大口径反射光学系统成像质量出发,介绍了调焦机构方案的选取、确定及机构的设计、组成及精度分析。

1 调焦的必要性

大口径反射光学系统是否需要调焦机构,应根据其自身的结构和大口径反射光学系统的技术要求来决定。文中中的大口径反射光学系统相对孔径较小,允许的离焦量较大,同时光学系统中的光学元件均采用低膨胀系数的材料,在技术指标要求的温度条件下,经 CAD 分析计算得知,大口径反射光学系统本体中 TDICCD 焦平面组件的 TDICCD 器件光敏面偏移量小于 $\pm 5 \mu\text{m}$,不会偏出光学系统的焦深范围。如果在发射的力学条件及其他因素影响下,TDICCD 焦平面组件等不发生轻微的松动现象,不致于偏出大口径反射光学系统焦深范围,则可以考虑不设置调焦机构。但从安全的角度出发,为了预防意外问题的出现,以便有一个在空间调整的手段,需考虑设置调焦机构。

2 调焦方式的选取

不同的光学系统,应根据各自自身的特点选取不同的调焦方式^[3-4]。大口径反射光学系统调焦机构主要有两种方式,一种是凸轮调焦,而另一种是丝杆丝母调焦。对于凸轮调焦机构只要适当地设计出凸轮的轮廓

曲线,就可以得到各种预期的运动规律,而且机构简单紧凑,抗冲击振动能力很好,但这对凸轮曲线的加工提出了较高的要求;而丝杆丝母调焦机构结构简单,易于加工,同时丝杆丝母中采用柔性结构,能够使其在发射等振动的恶劣条件下避免发生卡滞现象,经过二者对比,选用柔性丝杆丝母调焦方式。

3 调焦机构设计

相机允许的离焦误差与相机的焦深有关,当焦平面的直线位移量在相机的焦深范围内时,相机的光学系统所成的像仍然是清晰的,当焦平面的直线位移量超出相机的焦深范围时,光学系统所成像的质量就明显下降^[5-6]。焦深由相机镜头的相对孔径决定,其计算公式如下:

$$\delta = 4F^2\lambda \quad (1)$$

式中: δ 为光学系统的焦深; F 为镜头相对孔径的倒数; λ 为入射光波长。

相机镜头相对孔径为 1/9,焦深即允许的离焦误差为 0.21 mm。综合考光学元件加工误差、装配误差、热控误差及非线性误差等各种因素的影响^[7],文中所研究的相机的调焦范围为 $\pm 2 \text{ mm}$,调焦机构的设计精度应优于 0.01 mm。

调焦机构主要由调焦电机、调焦镜组件、柔性丝杆丝母组件及弹性导向机构等组成。结构如图 1 所示。

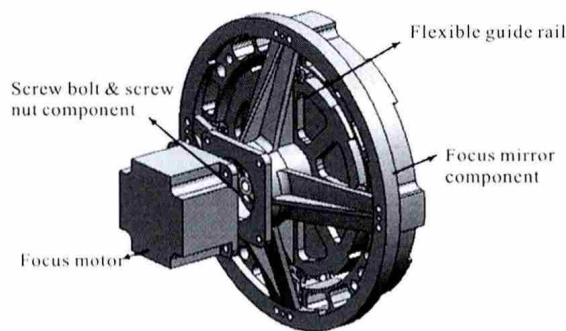


图 1 调焦机构组成

Fig.1 Constitutes of focusing device

3.1 调焦镜组件的设计

调焦镜组件由调焦镜、镜座、压圈 3 部分组成。为减小材料热特性不匹配产生的影响,选择导热系数和比刚度均较大的 SiC 作为调焦镜材料,选择线膨胀系数与 SiC 材料非常接近的殷钢作为调焦镜镜座材料。

反射镜组件材料性能如表 1 所示。

表 1 材料属性表

Tab.1 Performance parameters of materials

Material	ρ /10 ³ kg/m ³	E / GPa	μ	α /×10 ⁻⁶ K ⁻¹
SiC	3.05	400	0.25	2.5×10 ⁻⁶
4J32	8.1	141	0.25	2.5×10 ⁻⁶

由于调焦镜尺寸不大,故采用周边支撑方式,通过压圈将调焦镜固定在镜座中。为减轻组件重量,反射镜及镜座采用一定形式的轻量化结构设计。

3.2 丝杆丝母机构的设计

丝杆丝母机构是将电机轴的回转运动转化为调焦镜组件沿光轴方向直线运动的关键,是调焦机构中的重要环节。丝杆丝母机构主要由丝杆、丝母组成。二者均不同于常见的丝杆、丝母,在设计中采用了柔性环节。采用此种设计后可减少恶劣环境条件(如发射过程中的冲击、振动等)对自身的影响,防止二者在运动极限位置产生卡滞现象的出现。

丝杆与电机轴相联,其位置相对固定,丝母固定在调焦镜的镜座上。借助丝杆丝母,将电机轴的回转运动转化为调焦镜组件沿光轴方向的直线运动。

3.3 调焦镜弹性导向机构

镜座与外框通过开有弹性口的弹性联接片联接在一起,外框装在与电机固定在一起的支架上,当电机工作时,丝杆随之转动,通过丝母将运动传递给镜座,由于外框相对固定,因此可以实现调焦镜组件沿光轴方向的直线运动,从而实现调焦。

3.4 柔性铰链设计^[8-9]

弹性铰链是一种带有切口的一体化结构的新型铰链。其具有体积小、无机械摩擦、无间隙、运动灵敏度高等优点,广泛应用于精密加工、精密测量、微纳米技术等领域。

弹性铰链按切口形状可分为圆弧形、矩形、椭圆形等。其中圆弧形切口形状是迄今使用最为广泛的形状,矩形切口其次。在轴向刚度相同时,矩形弹性铰链较圆弧形弹性铰链弯曲率要高,但矩形弹性铰链存在着根部应力集中的缺点。日本大岩孝彰等人对矩形切口的根部进行修形处理后,矩形切口的弹性铰链的各项力学性能大大改善。在所受应力相同情况下,以圆形切口弹性铰链作为参考标准,修形后

的矩形铰链转角要大 20%,而未修形的矩形铰链要小 30%。因此,在材料的弹性范围内,修形后的矩形弹性铰链的弯曲性最好。文中丝杆丝母机构中采用的就是根部为圆弧形的弹性铰链结构,如图 2 所示,联接镜座与外框的弹性联接片则采用的是单轴双圆弧结构,如图 3 所示。

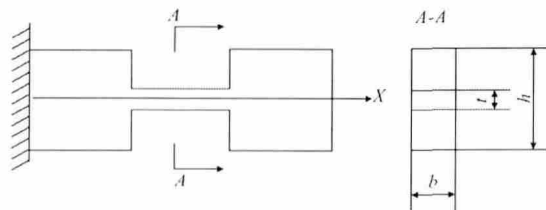


图 2 矩形切口弹性铰链

Fig.2 Flexible hinge with rectangle notch

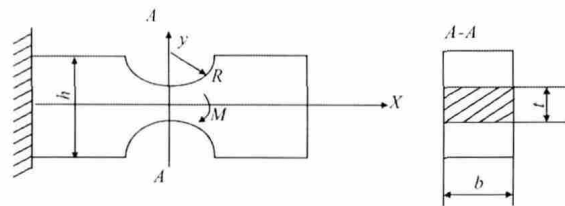


图 3 单轴双圆弧弹性铰链

Fig.3 Double arcs flexible hinge

当沿 X 轴方向施加拉力 F 时,铰链沿此方向的位移变化量为:

$$\Delta x = \int_x \frac{F_x}{EA(x)} dx = \frac{F_x}{2Eb} \int_x \frac{1}{f(x)} dx \quad (2)$$

拉伸刚度:

$$k_x = 2Eb / \int_x \frac{1}{f(x)} dx \quad (3)$$

式中: $f(x)$ 为弹性铰链形状的表达函数; E 为材料的弹性模量。

4 检/调焦机构工作原理

检/调焦机构控制原理如图 4 所示,该控制系统由主/副控制回路两部分组成。主回路为一闭环控制电路,检焦器检测出大口径反射光学系统像面位置后,通过 A/D 转换器,将模拟量转化为数字量送入存储器中,检/调焦控制器从存储器中读取数据后通过运算,把处理后的结果与理想标定值进行比较,比较后的差值将控制调焦电机工作,电机通过丝杆丝母机构将运动传递给调焦镜组件,使景物像正确地成像在光学系统的焦

平面上。副回路为一开环控制电路,根据实际图像的质量通过指令对光学系统进行调焦。

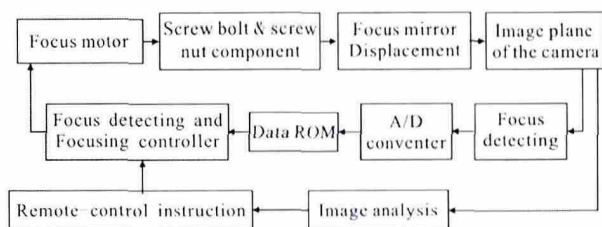


图 4 系统控制原理图

Fig.4 Principle of the control system

5 精度分析及实验验证

由光学系统的焦深来分配检焦器的允许误差、调焦机构的调焦精度(包括机构精度、控制回路的控制精度)以及光学系统热控精度范围内焦面位置的允许波动等误差因素,可知调焦机构的调焦精度直接反映焦面的调整精度,在调焦电机控制精度为一个步距角时,对应焦面移动量为 0.002 5 mm,即该调焦机构的调焦精度为 $\pm 0.002\ 5\ \text{mm}$,该精度能够满足设计指标的要求。

该大口径遥感相机在整机装配完成后,进行了成像实验。由于相机光学系统在实验室装调时,是按无穷远确定的焦面,因此在有限远距离时,将会产生离焦,影响相机的像质。产生离焦量 $\Delta l'$ 用应用光学公式计算如下式所示:

$$\Delta l' = \frac{f'}{l} \quad (4)$$

式中: $\Delta l'$ 为离焦量; f' 为光学系统焦距; l 为相机到成像目标的距离。

根据公式(4)计算出的离焦量 $\Delta l'=1.44\ \text{mm}$,该离焦量在调焦机构的设计调焦范围内,可以通过调焦保证成像时,像面准确,成像清晰,图 5 为距相机一定距离的避雷针所成的像。

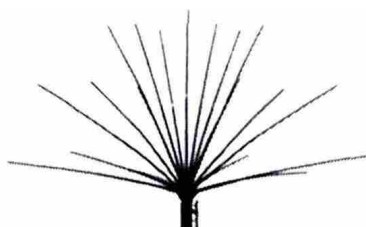


图 5 避雷针所成的像

Fig.5 Image of lightning nod

6 结 论

欲保证大口径反射光学系统在复杂的环境条件下能够高质量的成像,就要求有一套补偿光学系统焦平面变化的调焦机构对其进行校正,因此设计一套能够满足性能指标要求、安全可靠并且适用的调焦机构是必不可少的。经过实验证明,采用柔性丝杆丝母方式调焦,调焦精度可以达到 $\pm 0.002\ 5\ \text{mm}$,该精度满足设计要求,可以放宽对光学系统各光学反射镜安装位置及其变化的要求,有利于大口径反射光学系统在恶劣的环境下可靠地工作。

参考文献:

- [1] Xiu Jihong, Zhai Linpei. Main factors affecting the quality of aerial images [J]. *Infrared*, 2005, 8 (8): 10-16. (in Chinese)
 - [2] Dong Bin, Tian Haiying, Zheng Lina, et al. Design of auto-focusing gear on airborne reconnaissance camera [J]. *OME Information*, 2010, 27(12): 73-76. (in Chinese)
 - [3] Lin Weicai. Theodolite focal system design [J]. *OME Information*, 2010, 27(12): 88-92. (in Chinese)
 - [4] Wang Bo. The driving technology in optical lens [J]. *Design and Calculation*, 2007(2): 84-86. (in Chinese)
 - [5] Ding Yalin, Tian Haiying, Wang Jiaqi. Design on the focusing mechanism of space remote-sensing camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(1): 35-38. (in Chinese)
 - [6] Zhang Hongwen. Research on the auto-focusing technology for space camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003.
 - [7] Lv Shiliang, Liu Jinguo, Jia Ping. Accuracy analysis of the focusing precision for multispectral CCD space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 392-397. (in Chinese)
 - [8] Xin H B, Zheng W Zh, Zhao F. Research on flexible hinges [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 89-93. (in Chinese)
 - [9] Xin Hongwei, Yang Jinsong, Gao Minghui, et al. Support design for secondary mirror of high resolution space telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1724-1729. (in Chinese)
- 辛宏伟, 杨近松, 高明辉, 等. 高分辨力空间遥感器次镜支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1724-1729.