

离轴三反测绘相机调焦机构的设计

邵明东*, 郭 疆, 孙继明

(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:针对测绘相机对相机成像质量和内方位元素稳定性的要求,在分析3种调焦方式特点的基础上,确定了符合离轴三反测绘相机需要的调焦方式。设计了滚珠丝杠驱动的直线导轨式调焦机构,计算得到调焦机构的灵敏度为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。对该调焦机构进行了精度检测和试验验证,结果显示其指向精度 $<2''$,定位精度 $<3\ \mu\text{m}$ 。得到的结果表明:该空间调焦机构具有结构紧凑、刚度高、位移精度高等特点,能够满足离轴三反测绘相机的调焦要求。

关键词:离轴三反测绘相机;调焦机构;调焦精度;光学设计

中图分类号:V245.6; TH703 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120504.0373

Design of focusing mechanism for off-axis TMA mapping cameras

SHAO Ming-dong*, GUO Jiang, SUN Ji-ming

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

* Corresponding author, E-mail: shaomingd@tom.com

Abstract: Based on the requirements of mapping cameras for imaging quality and the stability of inner orientation elements, the characteristics of three focusing strategies are analyzed in detail, and the strategy which is most suitable for the mapping cameras is confirmed. A ball screw driving linear-guide-type focusing mechanism is designed, and its focusing sensitivity is calculated to be $0.2\ \mu\text{m}$. Precision testing and test validation are performed, which shows that the pointing accuracy of the focusing mechanism is superior to $2''$ and the positioning accuracy of the focusing mechanism is better than $3\ \mu\text{m}$. Test results demonstrate that the designed focusing mechanism has the characteristics of compact structure, high stiffness and high displacement precision and it can meet the focusing requirements of off-axis TMA mapping cameras.

Key words: off-axis Three Mirror Anastigmat(TMA) mapping camera; focusing mechanism; focusing accuracy; optical design

1 引言

测绘相机在轨飞行时必须保证其主点、主距的变化在允许的范围内,否则会造成测绘精度的下降。测绘相机原则上不允许或无需进行在轨调焦,但相机在运载过程中会受到冲击、振动、过载等影响,在轨运行时也会受到温度、高度、大气压力等变化的影响,因此会产生离焦现象^[1-6]。通常在地面试验(如外景成像试验、热试验等)需要进行调焦才能找到最佳像面,达到试验的目的,因此,为了保证相机的成像质量和研制过程的可实施性,须对测绘相机设计一套调焦机构,使相机具有调焦功能。

本文在分析常用的3种调焦机构的基础上设计了适用于离轴三反测绘相机的调焦机构,计算了调焦机构的灵敏度,并对其进行了精度检测和实验验证。

2 调焦方式的选择

空间相机有3种常用的调焦方式:镜组调焦、平面反射镜调焦和焦面调焦^[7]。

(1)镜组调焦:借助于调整光焦度最小的反射镜位置来实现调焦。本光学系统的主镜、次镜、第三镜均为离轴非球面反射镜,三镜间光学间隔有严格的要求,调整其中任一个镜都会对像质产生较大影响,且光学系统的参数也会随之改变,因此不宜做调焦光学元件。

(2)平面反射镜调焦:在光路中加入一平面反射镜,用于折转光路使光学结构紧凑,通过调整反射镜的前后位置实现焦面位置调整。但是由于离轴三反光学系统有离轴角,在平面反射镜前后运动时,主光线会在像面上产生移动,即会导致主点位置的变化,其原理如图1所示。主点位置的变化量:

$$\Delta X = 2 \times S \times \tan \alpha, \quad (1)$$

式中: S 为调焦量, α 为倾斜角。

本相机的倾斜角约为 5° ,一次调焦量一般为 $1/4$ 半焦深,即 $S = F^2/\lambda$,根据相机相对孔径 $1:9$,CCD像元尺寸为 $7 \mu\text{m}$,计算一次调焦量主点位移

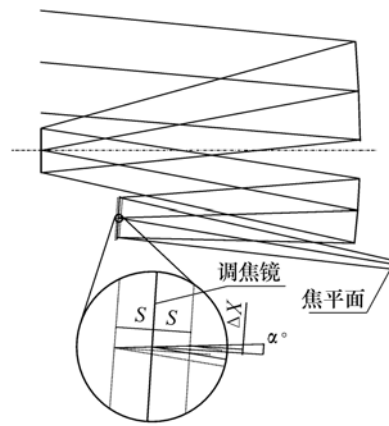


图1 平面反射镜调焦原理

Fig. 1 Schematic diagram of focusing by plane mirror

情况,得:

$$\Delta X = 8.84 \mu\text{m}. \quad (2)$$

在一次调焦后,主点位移量为 1.26 pixel ,远大于测绘相机主点几何标定值 0.2 pixel ,无法满足测绘要求。因此,在测绘相机的设计过程中应充分考虑调焦机构位置对相机主点的影响。

另外,在做调焦运动时,调焦机构的直线运动误差也会导致主点位置的偏移,当折叠镜距焦平面距离为 $1\ 300 \text{ mm}$,调焦机构直线度为 $2(\prime)/\text{mm}$, (假设直线度线性变化)全调焦行程为 0.1 mm 时,计算主点偏移量:

$$\Delta X = 1\ 300 \times \tan(0.1 \times 2 \div 3\ 600) = 1.2 \mu\text{m}. \quad (3)$$

调焦机构的直线度误差对相机主点位置的影响较小,虽然可以满足要求,但不是很理想。因此,通过平面反射镜对离轴三反测绘相机进行调焦也是不可取的。

(3)焦面调焦:通过调整焦平面位置来实现像面位置的校正。只要调焦机构沿主光线运动即可避免调焦对主点位置的影响。

综上,为使相机总体结构更加合理、调整方便,本文采用焦面调焦来实现相机的调焦功能。

3 调焦机构的要求

测绘相机调焦机构的精度对相机能否找到最佳像面,相机主点位置的稳定性以及测绘精度有

着重要影响,因此,以上方面对调焦机构的设计精度提出了具体的要求。

(1)清晰成像对调焦精度的要求^[8]

根据计算公式 $\pm 2f^2\lambda$, 求得半焦深为 $\pm 102 \mu\text{m}$, 调焦精度应 $\leq \pm 10 \mu\text{m}$ 。考虑到由装调误差、温度引起反射镜曲率变化和光学零件轴向间隔误差引起的焦距变化量,相机光轴方向的调焦行程设计为 $\pm 2 \text{ mm}$ 即可满足调焦要求。

(2)测绘精度对调焦精度的要求^[8-9]

相机的焦距是影响测绘高程精度的主要因素,根据文献^[9]给定的参数,可算出焦距误差对相对高程误差和绝对高程定位精度的影响,如图2和图3所示。从图中可以看出,焦距误差对

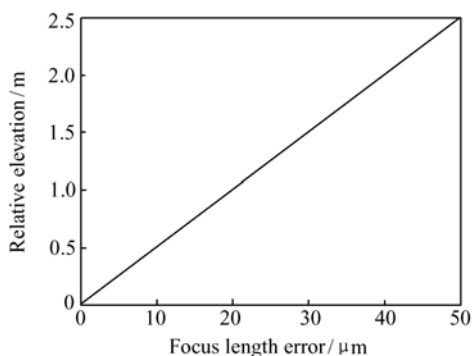


图2 焦距误差对相对高程的影响

Fig. 2 Influence of focal length error on relative photogrammetric elevation

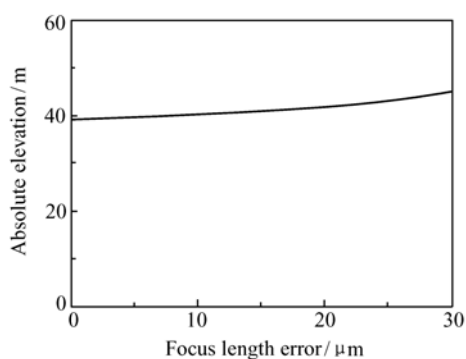


图3 焦距误差对绝对高程的影响

Fig. 3 Influence of focal length error on absolute photogrammetric elevation

相对高程有较大的影响,对绝对高程定位精度影响权重更大,从而影响地面点的综合绝对定位精

度。若相机焦距的标定精度要求 $\leq \pm 10 \mu\text{m}$, 则调焦机构的调焦精度应 $\leq \pm 3 \mu\text{m}$ 。

(3)主点位置稳定性对调焦系统的要求

由于该测绘相机的主点标定精度为 $\pm 1.6 \mu\text{m}$, 设定调焦机构的行程为 $\pm 2 \text{ mm}$, 则在该调焦行程内要求调焦机构的直线度 $< 2 \mu\text{m}$ 。

4 调焦机构设计

4.1 结构设计

针对本相机的特点,将调焦机构设计为通过步进电机驱动两级齿轮副传动和一级蜗轮蜗杆副传动,从而带动端部装有绝对式光电轴角编码器的滚珠丝杠副,推动导轨上的滑动部件带动焦平面组件沿其法线方向前后运动。由于蜗轮蜗杆副具有自锁功能,故该结构具有自锁功能。在该结构中选用了具有较高直线度和平行度的导轨和丝杠,并在装配完成后对该结构进行一定时间的反复跑合试验,使相应的传动部件进行磨合,以保证

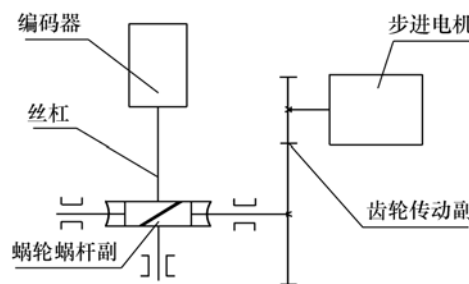


图4 调焦组件传动结构示意图

Fig. 4 Transmission structure diagram of focusing device

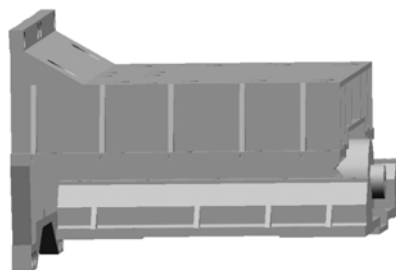


图5 调焦机构结构图

Fig. 5 Structure diagram of focusing mechanism

在使用中机构运动的顺畅性和稳定性。调焦组件

传动结构示意图和调焦机构结构图分别如图4和图5所示。

经分析计算得到,相机焦平面组件质量为8.6 kg,驱动的滑动部件质量为1.2 kg,驱动载荷按照10 kg计算来选择步进电机。

4.2 调焦灵敏度

齿轮副和一级蜗轮蜗杆副总传动比 $i = 62.5$, 步进电机步距角 $\alpha = 0.9^\circ$, 滚珠丝杠导程 $s = 5 \text{ mm}$ 则步进电机每走一个步距角, 调焦机构的直线位移灵敏度为:

$$\varepsilon = \frac{(a/i) \cdot s}{360} = \frac{0.9 \times 5 \times 1000}{360 \times 62.5} = 0.2 \mu\text{m}. \quad (4)$$

即步进电机每走一个步距角, 像面移动 $0.2 \mu\text{m}$ 。

5 试验验证

为检验调焦机构设计的合理性, 检验其承受热真空环境的能力, 对该调焦机构进行了力学环境试验和热真空试验。

(1) 力学环境试验

由于星载遥感器在运载过程会受到冲击、振动等力学环境的影响, 需对遥感器整机进行力学环境模拟试验。对此调焦机构随同整机进行了X、Y、Z 3个方向的正弦振动试验和随机振动试验, 并在调焦支架上表面安装加速度传感器。其中X轴为飞行方向, Z轴为对地地方, Y轴按右手定则确定。试验结果如表1所示。

表1 3个方向的正弦振动和随机振动响应

Tab.1 Responses to sine vibration and random vibration in three directions

加载方向	X	Y	Z
正弦输入/g	3	3	3
正弦响应/g	12.4	7.7	8.8
发生频率/Hz	99.8	55.6	56.9
随机输入 PSD (g^2/Hz)/g(rms)	0.15 ~ 0.032/ 5.81	0.2/4.74	0.32/4.74
随机输出 PSD (g^2/Hz)/g(rms)	5.5/19.1	0.06/2.8	2.0/14.5
发生频率/Hz	127.2	66.1	132.2

根据该星环境与可靠性通用技术条件, 结构组件在力学环境试验中正弦振动的放大倍率 < 10 , 随机振动的放大倍率 < 5 , 表明该结构能够经受住该振动环境的考验。表1的数据表明, 该调焦机构具备经受该力学环境模拟试验的能力。

(2) 热真空试验

此调焦机构随整机一起进行了热真空试验, 温度为 $13.5 \sim 22.5 \text{ }^\circ\text{C}$; 压力 $\leq 1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 试验结果表明调焦机构工作正常, 性能稳定。

6 调焦精度检测

6.1 调焦步距精度检测

在调焦机构滑动部件上粘贴平面反射镜, 精确调光电自准直仪, 保证平面反射镜法线与其光轴重合, 从而检测调焦机构的指向精度; 用数字千分表打在滑动部件的一平面处, 用于检测调焦镜移动量, 如图6所示。



图6 精度检测图

Fig. 6 Test diagram of accuracy

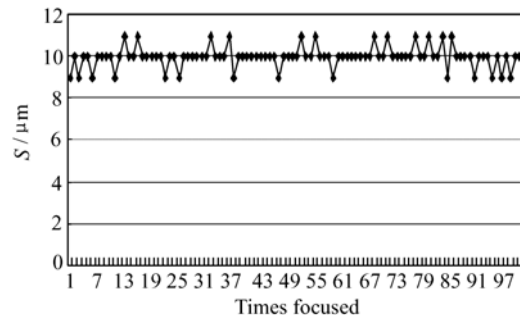


图7 正向控制测试曲线

Fig. 7 Test curve of forward control

表2 正向控制检测数据分析

Tab.2 Analysis of test data for forward control

(μm)

算术平均值(\bar{x})	标准偏差(s)	格拉布斯判据(g_0)	允许最小值(g_{\min})	允许最大值(g_{\max})	算术平均值的标准偏差(δ_x)
9.7	0.48	3.17	0.63	1.46	0.048
10.1	0.57	3.17	1.58	1.93	0.057
9.8	0.42	3.17	0.48	1.90	0.042
10.1	0.57	3.17	1.58	1.93	0.057
9.9	0.32	3.17	0.31	2.81	0.032
10.1	0.57	3.17	1.58	1.93	0.057
10.1	0.32	3.17	0.31	2.81	0.032
10.3	0.48	3.17	0.63	1.46	0.048
10	0.67	3.17	1.49	1.49	0.067
9.7	0.48	3.17	0.63	1.46	0.048

表3 反向控制检测数据分析

Tab.3 Analysis of test data for backward control

(μm)

算术平均值(\bar{x})	标准偏差(s)	格拉布斯判据(g_0)	允许最小值(g_{\min})	允许最大值(g_{\max})	算术平均值的标准偏差(σ_x)
9.9	0.56	3.17	0.18	1.61	0.057
9.9	0.73	3.17	0.14	1.23	0.073
9.8	0.43	3.17	0.46	1.86	0.043
10.2	0.43	3.17	0.46	1.86	0.043
10.1	0.33	3.17	0.31	2.73	0.033
10.4	0.53	3.17	0.75	1.13	0.053
10.1	0.56	3.17	1.61	1.96	0.057
10.1	0.56	3.17	1.61	1.96	0.057
9.6	0.53	3.17	1.13	2.64	0.053
9.6	0.70	3.17	0.86	2.00	0.070

按步进电机走50步进行一次检测,对调焦步距设计行程进行检测。图7为电机正转检测100次的的数据,图8为电机反转检测100次的的数据,表2为10组正转检测数据的分析值,表3为10组反转检测数据的分析值^[10]。从结果可以看出,测

试数据没有较大误差,调焦步距最大误差 < 3 μm ,满足调焦精度要求。

6.2 调焦指向精度检测

调焦机构的指向精度主要与导轨的精度有关,本结构选用了具有较高直线度和平行度的导

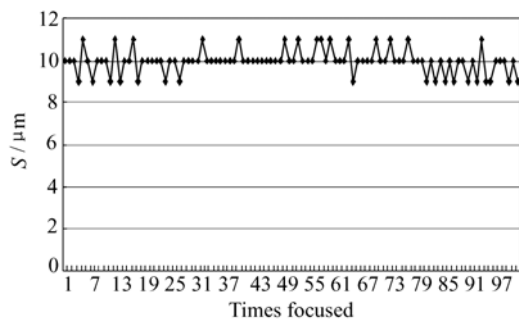


图8 反向控制测试曲线

Fig.8 Test curve of backward control

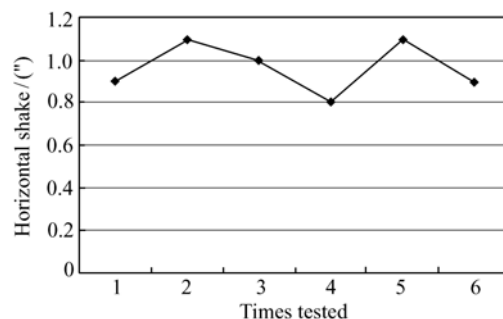


图9 水平晃动曲线

Fig.9 Curve of horizontal shake

轨,有利于提高机构的指向精度。用0.1"的自准直仪对其进行检测,如图6所示。从图9、图10可以看出,在调焦行程范围内其水平晃动最大值

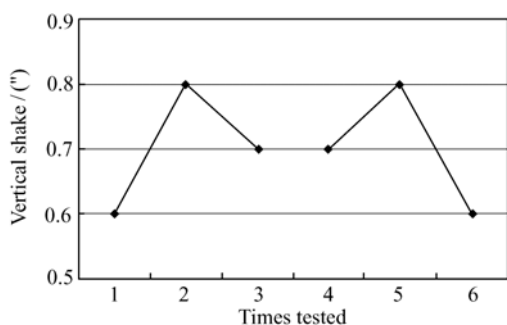


图10 垂直晃动曲线

Fig. 10 Curve of vertical shake

为1.1",垂直晃动最大值为0.8"。因此,只要在调焦机构安装时,将其运动方向与光轴方向保持一致,就能满足主点位置的偏移在其误差允许范围之内。

6 结 论

在详细分析了3种调焦方式特点的基础上,确定了符合离轴三反测绘相机需要的调焦方式,设计了由涡轮蜗杆、滚珠丝杠和直线导轨配合传动的调焦机构;对该机构进行了精度检测和试验验证,结果表明:该调焦机构指向精度 $<2''$,定位精度 $<3\ \mu\text{m}$,具有结构紧凑、质量轻、承载能力大、位移精度高、运行平稳、可靠性高等特点,能够满足离轴三反空间相机调焦的要求。

参考文献:

- [1] 丁亚林,田海英,王家琪.空间遥感相机调焦机构设计[J].光学精密工程,2001,9(1):36-38.
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): 36-38. (in Chinese)
- [2] 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.
ZHANG X J, YANG CH X, XIE T. Design of focusing mechanism of space remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2757-2761. (in Chinese)
- [3] 胡君,王栋,孙天宇.现代航天光学成像遥感器的应用与发展[J].中国光学与应用光学,2010,3(6):520-526.
HU J, WANG D, SUN T Y. Application and development of recent space optical imaging remote sensors[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(5): 520-526. (in Chinese)
- [4] 卢铎,颜昌翔,吴清文,等.空间光学传感器环境适应性设计与试验研究[J].中国光学与应用光学,2009,2(5):365-370.
LU E, YAN CH X, WU Q W, *et al.*. Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2009, 2(5): 365-370. (in Chinese)
- [5] 张新洁,王树清,颜昌翔.空间相机调焦机构的设计与分析[J].中国光学与应用光学,2010,3(5):462-465.
ZHANG X J, WANG SH Q, YANG CH X. Design and analysis for focusing mechanism of space camera [J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(5): 462-465. (in Chinese)
- [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] 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)
- [8] 李朝晖,王智,乔克,等.三线阵立体测绘相机高精度调焦技术及实现[J].光电工程,2009,36(10):41-46.
LI ZH H, WANG ZH, QIAO K, *et al.*. Focusing technique for three-line stereo mapping camera and realization[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2009, 36(10): 41-46. (in Chinese)
- [9] 胡莘,曹喜滨.三线阵立体测绘卫星的测绘精度分析[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(5):695-699.
HU X, CAO X B. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD images[J]. *J. Harbin*

Institute Technology, 2008, 40(5): 695-699. (in Chinese)

[10] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 4版. 北京:机械工业出版社, 2003.

FEI Y T. *Error Theory and Data Processing*[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:邵明东(1983—),男,山东曹县人,助理研究员,主要从事空间遥感成像技术方面的研究。

E-mail: shaomingd@tom.com

郭 疆(1976—),男,新疆石河子人,副研究员,主要从事空间遥感成像技术等方面的研究。

E-mail: guojiang001@yahoo.com.cn

孙继明(1982—),男,吉林市人,助理研究员,主要从事光机结构设计等方面的研究。

E-mail: mingjisun@163.com

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价:50.00 元/册