

文章编号 1004-924X(2009)05-1051-06

传输型立体测绘相机的调焦机构设计

王 智¹, 张立平¹, 李朝辉¹, 荀显超²

(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. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

摘要: 提高立体测绘相机地面像元分辨率和地面目标的定位精度, 相机需设计调焦环节用以补偿 CCD 靶面的离焦量。本文根据立体测绘相机光学结构的特点以及相机的焦深, 设计了一种基于凸轮导向的调焦机构。在设计中采用了可靠性设计和消空回措施, 以保证结构的强度和刚度以及调焦精度。对传动误差的分析及精度验证试验表明: 该调焦机构的传动误差为 $\pm 1.71 \mu\text{m}$; CCD 靶面的直线性精度在 X 方向为 $11.2''$ 、Y 方向为 $11.8''$; 在调焦行程内 CCD 靶面绕光轴旋转 $4.7''$, 满足用户提出的精度要求。

关键词: 立体测绘相机; CCD 靶面; 调焦机构

中图分类号: TP73 **文献标识码:** A

Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera

WANG Zhi¹, ZHANG Li-ping¹, LI Zhao-hui¹, XUN Xian-chao²

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

2. *Aeronautical University of Airforce, Changchun 130022, China*)

Abstract: In order to improve the ground pixel resolution and positioning accuracy of ground targets, the focusing control systems should be designed to compensate the defocusing of the CCD plane in a tridimensional mapping camera. According to the optical structure and focal depth of the camera, a focusing mechanism based on a cam is designed, and focusing schemes and focusing quantity are confirmed. Moreover, the reliability design and a removing return stroke error method is used to guarantee the strength and rigidity of the mechanism and to improve the focusing accuracy. Analysis of transmission error and validated tests indicate that the error of this focusing mechanism is $\pm 1.71 \mu\text{m}$; linearity of CCD plane is $11.2''$ in the X direction and $11.8''$ in the Y direction; and the circumaxis angle of CCD plane is $4.7''$. The result of precision analysis shows that the focusing mechanism can meet the requirements of the users.

Key words: Tridimensional mapping camera; CCD plane; focusing mechanism

收稿日期: 2008-07-30; 修订日期: 2008-08-15.

基金项目: 中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金”资助项目

1 引言^[1]

利用三线阵 CCD 相机进行立体测绘是 80 年代德国科学家首先研究并应用的,国外传输型立体测绘相机的发展已经相当成熟,并开发出一系列成型产品,尤其以德国、法国、美国和日本为代表。我国传输型立体测绘相机的研究工作虽然刚刚起步,但是已成功发射的探索 1 号及嫦娥 1 号表明我国传输型立体测绘相机已取得突破性进展。传输型立体测绘相机包括多项关键技术,其中精密检调焦技术是星载长焦距、高分辨立体测绘相机必不可少的关键技术之一。由于传输型立体测绘相机光学系统焦距较长,卫星发射过程中的振动、冲击以及复杂多变的在轨温度、压力等环境的影响,会使相机的 CCD 靶面偏离焦平面,从而降低成像分辨率,直接影响到测绘的精度。因此,相机需有调焦机构来补偿上述原因引起的 CCD 靶面位置的变化。

传输型立体测绘相机由具有独立镜头的 3 个线阵 CCD 相机组成,3 个相机之间保持一定位置关系,3 个线阵 CCD 空间相互平行,其平行性要求转化到 CCD 靶面处能在在调焦行程内 CCD 靶面绕光轴旋转 $\leq 5''$;相机主点的位置是立体测绘工作所必须的参数条件,主点的位置精度要求转化到 CCD 靶面处能在在调焦行程内为:CCD 靶面的直线性精度在 X 方向为 $60''$;在 Y 方向为 $60''$ 。

2 调焦方案及调焦量的确定^[2-3]

2.1 调焦量的确定

传输型立体测绘相机的光学系统为准像方远心光路,调焦环节采用沿光轴移动 CCD 靶面的方式。相机的光学系统都有一定的允许离焦量,在允许离焦量的范围之内,不会造成图像分辨率的下降。允许离焦量的最大值等于相机的半倍焦距,半焦距计算公式如下:

$$|\pm\Delta| = 2F^2\lambda, \quad (1)$$

式中: $\pm\Delta$ 为半焦距;

F 为 F 数;

λ 为相机工作的中心波长。

测绘相机的半焦距为:

$$|\pm\Delta| = 2F^2\lambda = 2 \times 5^2 \times 0.5876 \mu\text{m} = \pm 29.38 \mu\text{m}.$$

传输型立体测绘相机的离焦主要是因为环境条件变化引起的,经过分析计算,需调整 CCD 靶面沿光轴方向移动 $\pm 1 \text{ mm}$ 即可以得到补偿,但在结构设计时,应在结构允许的空间范围内尽量增加调焦范围,使调焦量有一定裕度。调焦量的大小由凸轮曲线决定,在结构允许的空间内并满足要求的凸轮的强度、刚度条件下,设计调焦量为 $\pm 2 \text{ mm}$ 。

2.2 具体调焦方式的选择

相机的调焦方式因光学系统的不同而不同,应用于航天相机的调焦机构主要有两种:一种是丝杠螺母调焦;另一种是凸轮调焦。这两种调焦方式各有优缺点,丝杠螺母调焦方式结构简单,成本低,但在相机在轨工作环境中(真空、低温等)容易产生卡滞现象,抗振动冲击能力差;而凸轮调焦方式精度高,结构也比较简单,其运动件(齿轮、凸轮、蜗轮、蜗杆)经过防冷焊处理后不会产生冷焊、卡滞现象,但对凸轮曲线的加工要求较高。由于航天立体测绘相机的工作环境及精度要求,本文选择了双凸轮曲线调焦方式。

3 检调焦机构的工作原理

传输型立体测绘相机检调焦机构的控制原理框图如图 1 所示。控制系统主要由两个回路组成,主回路是一个闭环控制回路,主要由检焦元件检测出 CCD 靶面的位置,将其位置数据经过数模转换后存储在存储器中,调焦控制器读取存储器中的数据并进行运算处理,并与理想标定值进行比较,然后将比较差值(靶面离焦量)传给功率驱动器,以控制调焦电机工作,调焦电机输出的转矩经过齿轮传动机构传递给凸轮执行机构,移动 CCD

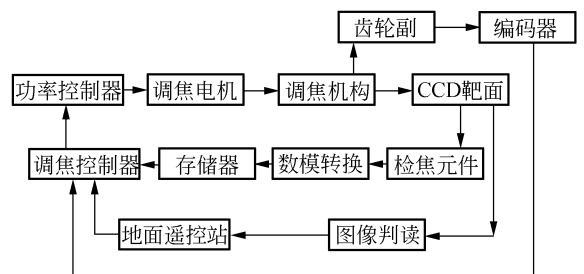


图 1 检调焦工作原理框图

Fig. 1 Work principle of focusing mechanism

靶面,使景物像清晰的成在相机的焦平面上。副回路是一个开环控制回路,地面遥控站根据相机下传的实际图像质量,通过对相机注入遥控指令对相机进行调焦。

4 调焦机构的结构与传动误差分析^[2-7]

4.1 调焦机构的结构设计

传输型立体测绘相机调焦机构主要由减速机构、凸轮导向机构、像面组件及编码器检测组件组成,结构设计图如图 2 所示。步进电机驱动减速机构,带动凸轮导向机构从而带动像面组件沿光轴作直线运动。

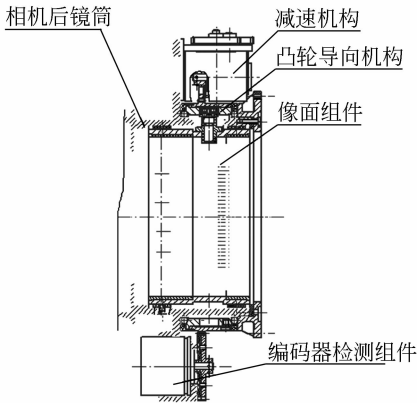


图 2 调焦机构设计图

Fig. 2 Design scheme of focusing mechanism

4.1.1 调焦机构中的可靠性设计

调焦机构是传输型立体测绘相机的关键组件之一,CCD 靶面偏离像面的偏移量通过调焦机构来补偿。在进行调焦机构设计时,不但要保证其精度,而且还要保证其强度和刚度,因此调焦结构中的关键件采取冗余设计,如双凸轮曲线、像面镜筒上的双轴座设计。

4.1.2 调焦机构中的消空回措施

空回在齿轮传动的调焦机构中很难避免,为此,本文在调焦机构设计时采取了一些消空回的措施:1. 在与凸轮曲线槽接触的过渡轴上采用两个轴承,安装时,使两个轴承分别与凸轮曲线槽的两边接触,以消除正反转时的空回;2. 在进行调焦动作时,CCD 靶面的移动量由编码器检测组件检

出,此处的传动齿轮设计成消间隙齿轮以保证检测数据的准确性。

4.2 传动误差分析

调焦机构的传动误差主要是齿轮的传动误差,是由齿轮固有误差和装置跳动误差引起的。由于齿轮误差是随机的连续变量,各种误差源的分布都是相互独立的,齿轮误差分布遵循正态分布,因此可以用数理统计的计算方法对各部分误差进行计算。

$$E_{dri} = E_{intri} + E_{device},$$

$$E_{intri} = \frac{1}{2}(F'_i - f'_i) \sin \theta + \frac{1}{2}f'_i \sin \theta, \quad (2)$$

式中: F'_i 为齿轮切向综合误差 $\Delta F'_i$ 所给公差, f'_i 为齿间切向综合误差 $\Delta f'_i$ 所给公差。

由式(2)计算可得齿轮固有误差均值和方差分别为:

$$M(E) = 0, \quad (3)$$

$$D(E) = \frac{1}{36}[(F'_i - f'_i)^2 + f_i'^2], \quad (4)$$

$$T_Z = \sum_{i=1}^k e_i \sin \theta. \quad (5)$$

当置信概率为 99.7% 时,式(5)经计算可得装置跳动引起的传动误差的均值和方差分别为:

$$M(T_Z) = 0, \quad (6)$$

$$D(T_Z) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^k e_i^2, \quad (7)$$

式中: T_Z 为装置跳动产生的传动误差;

e_i 为装置的各跳动量。

根据齿轮的设计参数及精度等级,根据各齿轮的装置误差我们可以得出:

啮合 M-1:

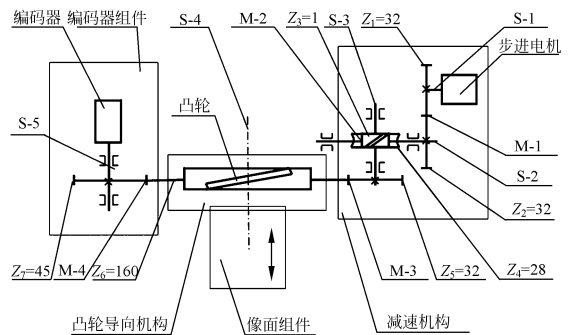


图 3 调焦机构的传动原理

Fig. 3 Driving principle of focusing mechanism

啮合 M-1 中齿轮 1 和齿轮 2 的传动比 $i < 2$,

$$M(T_f)_1 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{M^2(T_d)_1 + M^2(T_d)_2 + D(T_d)_1 + D(T_d)_2} = 4.12,$$

$$D(T_f)_1 = \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) [M^2(T_d)_1 + M^2(T_d)_2 + D(T_d)_1 + D(T_d)_2] = 4.64,$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } ({}_a T_f)_1 &= \pm \frac{180 \times 60 \times 60}{\frac{m_2 Z_2}{2} \pi \times 1000} (T_f)_1 = \\ &\pm \frac{180 \times 60 \times 60}{\frac{m_2 Z_2}{2} \pi \times 1000} \cdot \end{aligned}$$

$$[M(T_f)_1 + 3\sqrt{D(T_f)_1}] = 136.42''.$$

啮合 M-2 蜗轮蜗杆副传动误差计算:

$$M(T_f)_2 = 0$$

$$\begin{aligned} D(T_f)_2 &= \frac{1}{36 \cos^2 \lambda} f_h^2 + S_1^2 + C_1^2 + \\ &\frac{1}{36} \left(F_i^2 + \frac{S_1^2 + C_1^2}{\cos^2 \alpha} \right) = 20.8, \end{aligned}$$

$$\text{所以 } ({}_a T_f)_2 = \pm \frac{180 \times 60 \times 60}{\frac{m_4 Z_4}{2} \pi \times 1000} (T_f)_2 =$$

$$\pm \frac{180 \times 60 \times 60}{\frac{m_4 Z_4}{2} \pi \times 1000} \cdot \sqrt[3]{D(T_f)_2} = 403.16''.$$

啮合 M-3 传动误差的均值和方差为:

$$M(T_f)_3 = M(T_d)_5 + M(T_d)_6 = 0,$$

$$D(T_f)_3 = D(T_d)_5 + D(T_d)_6 = 10.3 + 56.03 = 66.33,$$

$$({}_a T_f)_2 = \pm \frac{180 \times 60 \times 60}{\frac{m_6 Z_6}{2} \pi \times 1000} (T_f)_3 =$$

$$\pm \frac{180 \times 60 \times 60}{\frac{m_6 Z_6}{2} \pi \times 1000} \cdot \sqrt[3]{D(T_f)_3} = 62.996''.$$

表 1 在轴 S-4 上度量的步进电机到 CCD 靶面之间的传动误差

Tab.1 Transmission error between step motor and CCD target measured on axis S-4

传动轴序号	各传动轴角值传动误差 $({}_a T_f)''$	各传动轴对轴 S-4 速比	在轴 S-4 上度量的角值传动误差 (\prime)
S-2	136.4	140	0.9
S-3	403.2	5	80.6
S-4	63	1	63

在轴 S-4 上度量的角值总传动误差 $({}_a T_f)_{\text{total}}$ 144.6

将轴 S-4 上的角值总传动误差转化为线值总传动误差 $({}_a T_f)_{\text{total}}$:

$$({}_a T_f)_{\text{total}} = ({}_a T_f)_{\text{total}} \frac{m_6 Z_6 \pi \times 1000 / 2}{180 \times 60 \times 60} = \pm 56.08 \mu\text{m}.$$

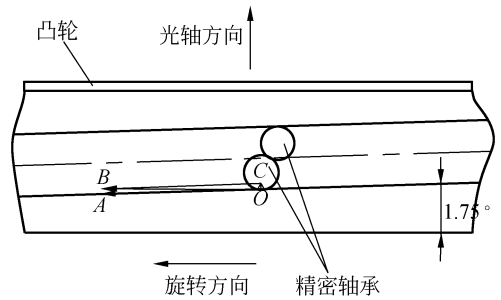


图 4 凸轮运动转化原理图

Fig. 4 Transforming principle of cam

由图 4 可知:

$$OB = (T_f)_{\text{total}},$$

$$\gamma = 1.75^\circ,$$

$$OB = OC + OA,$$

$$\text{且 } OC = OB \tan \gamma,$$

所以:

$$OC = OB \tan \gamma = \pm 56.08 \times \tan 1.75^\circ = \pm 1.71 \mu\text{m}.$$

经以上分析可知,调焦机构 CCD 靶面与步进电机之间的总传动误差为 $\pm 1.71 \mu\text{m}$ 。

在 S-4 轴上,由于凸轮的存在,将绕 S-4 轴的旋转运动转化为沿 S-4 轴向的直线运动。

CCD 靶面线性精度以及绕光轴的旋转量的检测原理如图 5 所示。

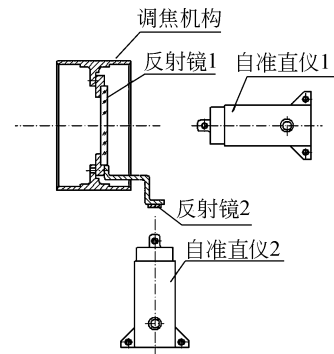


图 5 调焦精度验证试验原理图

Fig. 5 Validate test principle of focusing precision

在像面组件 CCD 靶面处安装反射镜 1 和反射镜 2 如图 5 所示,在调焦过程中,自准直仪 1 (精度 $0.1''$) 和自准直仪 2 (精度 $0.1''$) 分别实时监

测反射镜1和反射镜2,这样就可以得到CCD靶面在两个方向的直线性精度,以及CCD靶面绕光轴的旋转。由验证试验可以得到CCD靶面的直

线性精度(X 、 Y 两个方向)以及CCD靶面的旋转精度如表2所示,由表中数据可知其精度远远大于用户提出的技术指标。

表2 直线性精度试验数据

Tab.2 Test data of linearity precision

序号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CCD靶面直	X	0.96	-9.27	0.85	1.75	2.80	2.94	3.03	-0.55	2.26	1.88
线性精度(")	Y	-0.56	-0.21	-3.16	-4.07	-4.31	-3.06	-2.49	-3.62	-6.39	-3.87
CCD靶面旋转精度(")		0.83	1.25	2.06	1.84	3.05	3.64	2.61	3.56	4.7	2.31

5 结 论

调焦机构是传输型立体测绘相机的关键组件之一,是为了补偿因发射过程及空间复杂环境引起的相机CCD靶面位置的变化而设计的。根据用户提出的技术指标和调焦量的大小,本文设

计了一种基于凸轮导向的调焦机构。为了保证结构的强度和刚度以及调焦精度,在设计中采用了可靠性设计和消空回措施。对该调焦机构的误差分析和试验表明,该调焦机构传动误差为 $\pm 1.71 \mu\text{m}$ 、CCD靶面的直线性精度(X 方向、 Y 方向)、CCD靶面绕光轴的旋转精度远远优于用户提出的指标要求。

参考文献:

- [1] 金光. 立体测绘小卫星有效载荷—传输型三线阵CCD摄影测量相机[J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(3): 34-37.
JIN G. Payload of stereo mapping small satellite-three-line CCD stereo mapping camera[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, 14(3): 34-37. (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): 35-37.
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): 36-37. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 黄江, 吴开成, 关富玲. 空间太阳望远镜成像镜调焦机构设计与分析[J]. 工程设计学报, 2003, 10(6):

341-344.

HANG J, WU K CH, GUAN F L. Design and structural analysis for adjustment mechanism of imaging Len's focal length of space solar telescope[J]. *Journal of Engineering Design*, 2003, 10(6): 341-344. (in Chinese)

- [5] 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)
- [6] 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.
- [7] 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)

作者简介:



王 智(1978—),男,山东寿光人,博士,副研究员,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事航天遥感的研制工作。E-mail: wz070611@126.com



张立平(1957—),男,吉林长春人,研究员,主要从事航天遥感的研制工作。E-mail: zhang_lp2005@163.com



李朝辉(1969—),男,吉林双辽人,博士后,副研究员,2001年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获机械制造及自动化博士学位,现主要从事空间光学遥感的研制工作。E-mail: lizh_ciom@yahoo.com.cn



苟显超(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,助教,2008年于吉林大学物理学院获硕士学位,主要从事空军作战与航空武器装备应用的研究。E-mail: re-alxxc-2001@163.com

● 下期预告

阿基米德螺旋线的低 g 值微惯性开关

陈光焱,吴嘉丽,赵 龙,王 超

(中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621900)

低 g 值惯性开关是一种敏感线加速度并在施加的加速度作用下完成闭合的惯性装置。由于微小尺寸的限制,低 g 值惯性开关只能设计为微质量块和低刚度支撑梁的结构。为了获得低刚度,设计了基于阿基米德螺旋线的平面螺旋梁结构。微开关由一个带触点的基座、一个惯性敏感单元以及框架和封盖组成。惯性敏感单元由一个居中的质量块和支撑它的螺旋梁组成。在加速度作用下可动的质量块发生位移,与其下的触点接触,实现开关的闭合。惯性敏感单元采用有限元软件 ANSYS 进行分析,采用 UV-LIGA 工艺制作。进行了离心试验以获得低 g 值惯性开关的闭合门限。经三次测试,闭合门限值分别为 21.22, 21.39 和 21.20g,平均值为 21.27g。测试结果表明低 g 值惯性开关具有 0.5g 的闭合精度,多次测试重复性较好。