

文章编号 1674-2915(2010)05-0462-05

空间相机调焦机构的设计与分析

张新洁, 王树清, 颜昌翔

(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: 设计了一种用于空间相机的调焦机构, 该机构采用步进电机带动的精密步进谐波传动。波发生器由椭圆凸轮与套在其上的柔性轴承组成, 输出端连接滚珠丝杠将旋转运动转化为直线运动, 带动调焦镜沿直线导轨往复运动, 其中输出刚轮与绝对式编码器相连, 检测调焦移动位移。该机构具有传动比大、精度高、结构紧凑、效率高、运转平稳等特点。针对该机构在空间相机的实际应用, 推导出了调焦机构位移与焦面移动的位置关系, 并对该调焦机构进行了误差分析, 用闭环控制的方式对其精度进行了检测。试验数据表明, 该调焦机构传动比为 1 70, 重复定位精度为 2 μm , 满足空间相机使用要求。

关键词: 谐波传动; 调焦机构; 空间相机; 误差分析

中图分类号: V447.3 文献标识码: A

Design and analysis for focusing mechanism of space camera

ZHANG Xin-jie, WANG Shu-qing, YAN Chang-xiang

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

Abstract: A kind of focusing structure of space camera is presented, which adopts a kind of precision harmonic gear drive. The wave generator in the device is combined with an elliptic cam and a flexible bearing and its output shaft connected ball screws translates the rotational motion to the linear motion and drives the focusing mirror repeated moving along a linear guide. The output rigid wheel is connected with an absolute encoder to detect the displacement of focusing movements. It has the characteristics of big transmission ratio, high precision, compact structure, high efficiency, smooth running *etc.* According to the practical application of this harmonic gear drive in the space camera, the location relationship between the displacement of focusing structure and the focal plane movement is derived, and the system error is analyzed. Then, the system accuracy is tested with an open-loop control method. Experimental results show that transmission ratio of the instrument is 1 70, and the repeated positional accuracy is 2 μm , which meets the requirements of practical applications.

Key words: harmonic gear drive; focusing mechanism; space camera; error analysis

1 引言

随着空间技术的快速发展, 对空间相机捕获的图像要求越来越高。因发射条件及工作环境的影响, 成像系统的焦面常会产生离焦现象, 从而要求设计相应的调焦机构来补偿焦面的离焦量。针对空间相机的特殊使用环境, 要求调焦机构具有低速平稳、体积小、重量轻、传动精度高等特点, 而采用刚性件的传统传动方式已难以满足上述要求^[1], 因此, 寻求一种合理、稳定并具备上述特点的传动方式进行调焦十分必要。

本文介绍了一种由精密步进谐波传动带动的空间相机的调焦机构, 详细阐述了谐波传动的结构特性并对其进行了误差分析, 最后对调焦组件做了位移精度检测, 数据表明其精度满足使用要求。

2 精密步进谐波传动结构设计

谐波传动是随着空间遥感新技术的发展而出现的一种新型传动, 它在空间环境下具有其它传动难以达到的特殊性能。

根据空间相机的调焦要求, 采用的调焦组件传动结构如图 1 所示, 精密步进谐波传动同相机的调焦镜相连, 精密谐波传动中的输出刚轮与滚珠丝杠相连, 调焦镜一端与滚珠丝杠的螺母连接, 底部与直线导轨滑块连接, 从而使步进电机的旋转运动转化为调焦机构的直线运动^[2]。

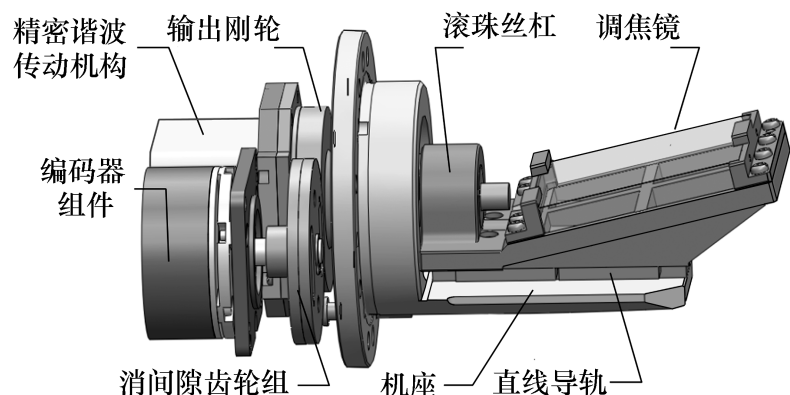


图 1 调焦组件传动结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of focusing device

设带动谐波减速器的步进电机的步距角为 θ , 谐波减速器的传动比为 i , 滚珠丝杠的导程为 L

h 调焦镜沿滚珠丝杠轴线方向的最小位移为 l , 则它们之间的关系为^[3]:

$$i = \frac{\theta \times h}{360 \times l} \quad (1)$$

根据空间相机的技术要求, 选取步进电机的步距角为 $\theta = 0.9^\circ$; 滚珠丝杠的导程为 12 mm, 设步进电机每走一步, 调焦机构的位移为 0.45 μm , 则谐波减速器的传动比为:

$$i = \frac{0.9 \times 12}{360 \times 0.45 \times 10^{-3}} = 66.6. \quad (2)$$

为此, 选用精密谐波传动装置, 传动比为 70。

该传动主要由波发生器、柔轮、刚轮和输出刚轮组成, 如图 2 所示。波发生器由椭圆凸轮与套在其外部的柔性轴承组成, 装入柔轮内部, 柔轮的结构为具有外齿的环形齿圈, 刚轮为具有内齿的环形齿圈, 三者结合后, 可实现减速传动。减速之后的运动, 经柔轮与输出刚轮的内齿轮构成齿啮输出机构传递到输出轴。另外输出刚轮上的外齿轮与装在编码器上的消间隙齿轮构成无间隙的精密传动, 实现编码器实时精确地测定输出轴(滚珠丝杠)。这种结构便于加工、轴向尺寸小、扭转刚度大。

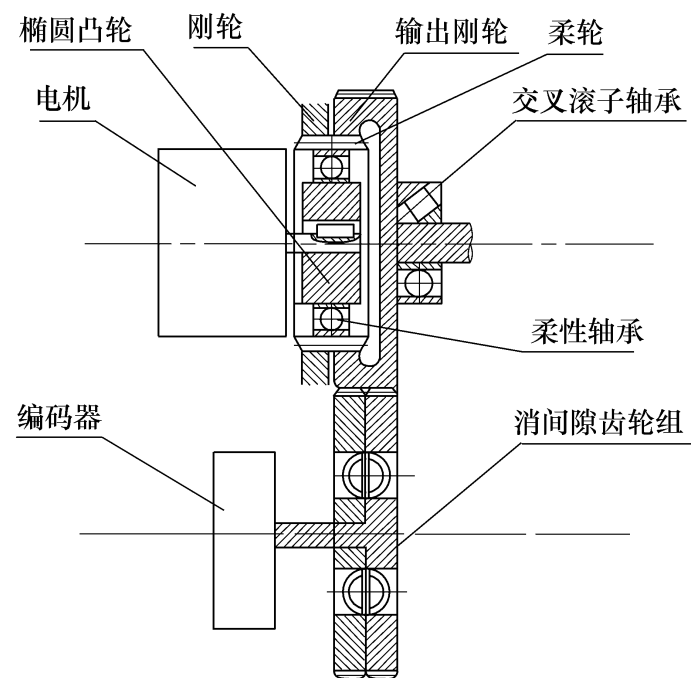


图 2 精密谐波传动结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of precision harmonic gear drive

3 误差分析

对于无侧隙可逆的谐波齿轮传动, 其运动误

差极限随机幅值可用下式计算^[4]：

$$\sigma_1 = \pm \frac{K_B}{Z} [0.25 \cdot (6_1^K T_{6K} + \frac{D_R}{4u_{oi}} 6_1^n) + 0.4 \cdot 6_1^K (T_{6K})^2 + (\frac{D_R}{4u_{oi}})^2 6_1^n (n)^2] \times \frac{412.8}{D_R}, \quad (3)$$

式(1)中, σ_1 为谐波齿轮传动的运动误差()；

T_{6K} 为刚轮(或柔轮)的运动误差； σ_n 为波发生器零件的径向误差； D_R 为柔轮的分度圆直径； u_{oi} 为柔轮的最大径向变形量； Z 为同时参加啮合的齿数； K_B 为运动误差实际测定值与计算值的比值,在预先计算时,一般取 $K_B = 0.9 \sim 1.0$, 本文取 0.95； u 为波发生器的波数； i 为传动比。

已知谐波传动比为 1.70, 柔轮齿数 $Z_R = 140$, 精度为 7 级, 刚轮齿数为 142, 输出刚轮齿数为 140, 精度为 7 级, 模数 $m = 0.3$ 。

根据齿轮精度, 单个齿距极限偏差 $T_6 = 9.5 \mu\text{m}$; 刚轮, 柔轮的不同心度 $e_1 = 3 \mu\text{m}$; 柔轮的径向跳动量 $e_2 = 4 \mu\text{m}$; 波发生器轴系径向跳动量

$$\sigma_1 = \pm \frac{0.95}{42 \sim 56} [0.25(24 + \frac{140 \times 14}{4 \times 1 \times 1.14 \times 70}) +$$

$$0.4 \cdot 9.5^2 + 9.5^2 + 3^2 + 4^2 + (\frac{140}{4 \times 1.14 \times 70})^2 (10^2 + 2^2 + 2^2) \times \frac{412.8}{140} = \pm(7.07 \sim 8.17). \quad (6)$$

柔轮和输出刚轮的综合误差极限幅值为 24 μm , 则输出刚轮和柔轮的运动误差为:

$$\sigma_2 = \frac{24 \times 10^{-3}}{R_G} \times 180 = 3. \quad (7)$$

编码器上采用消间隙齿轮组与输出刚轮啮合, 调整消间隙齿轮组, 可使其与输出刚轮的侧隙为零, 即 $\sigma_3 = 0$ 。

则通过消间隙齿轮组传到编码器的总径向综合误差极限幅值为

$$= \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 = 3. \quad (8)$$

由于步进谐波传动的输出轴通过速比为 1:1 的齿轮传动与绝对式编码器相连, 又知编码器旋转一周, 码值变换 65 536 个码, 丝杠导程为 12 mm, 则单个码值对应滚珠丝杠螺母沿丝杠轴线方向的位移为 $1.831 \times 10^{-4} \text{ mm}$, 由此可计算出误差 将会造成 9 个码值的偏差, 转换成调焦镜沿滚珠丝杠轴线方向的位移误差为 1.65 μm 。

另外滚珠丝杠导程偏差为 $e_2 = 8 \mu\text{m}$, 当在调焦时实际使用的导程为 8 mm, 即滚珠丝杠所对应

的综合误差为 $e_3 = 10 \mu\text{m}$; 柔性轴承的径向跳动 $e_7 < 2 \mu\text{m}$, 同时啮合齿数 Z 为柔轮齿数 Z_R 的 30% ~ 40%, 则 $Z = 42 \sim 56$ 。

当输出轴转动时, 刚轮和柔轮的综合误差极限幅值为:

$$T_{6K} = 2 \times T_6 + e_1^2 + e_2^2 = 24 \mu\text{m}. \quad (4)$$

波发生器零件的径向综合误差极限幅值为:

$$6_1^K \sigma_n = \sigma_H + \sigma_p = 14 \mu\text{m}. \quad (5)$$

将上面求出的值代入式(3), 并取 $K_B = 0.95$, 则谐波齿轮传动运动误差的极限随机幅值为:

的转角为 240°, 则由该相应导程偏差造成的调焦镜沿滚珠丝杠轴线方向位移误差为 $e_s = 5.3 \mu\text{m}$ 。

由上述分析可知, 调焦镜沿滚珠丝杠轴线方向总的位移偏差为:

$$s = 1.65^2 + 5.3^2 = 5.55 \mu\text{m}. \quad (9)$$

4 焦面位移误差计算

为了增加调焦的精度, 将调焦镜的镜面与调焦机构的直线运动方向成 θ 角装配, 如图 3 所示。

则调焦镜法向位移 x 与丝杠位移 s 之间的关系为

$$x = s \cdot \sin \theta. \quad (10)$$

已知该调焦镜与焦面在空间相机光学系统中的位置关系如图 4 所示, 图中光线对焦面的入射角为 α , 对调焦反射镜的入射角为 β , x 为调焦反射镜沿镜面法线方向移动的位移, f 为焦面沿镜面法线方向移动的位移。

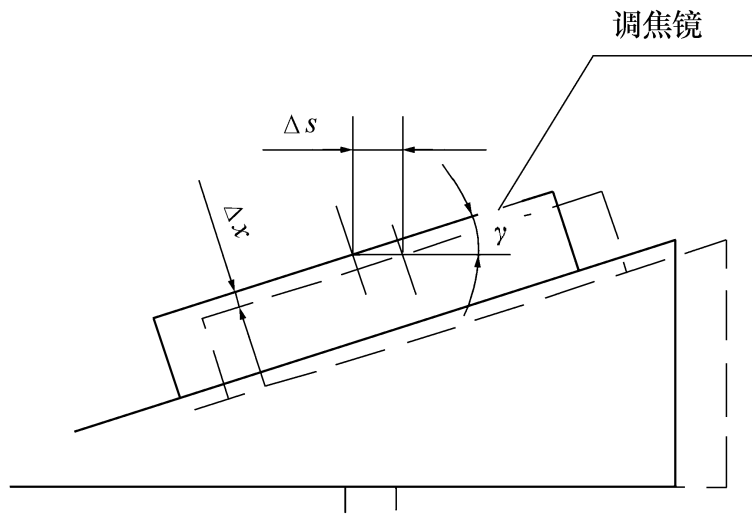


图 3 调焦镜与丝杠运动方向的关系

Fig. 3 Assembly angle between focusing mirror and ball screw moving direction

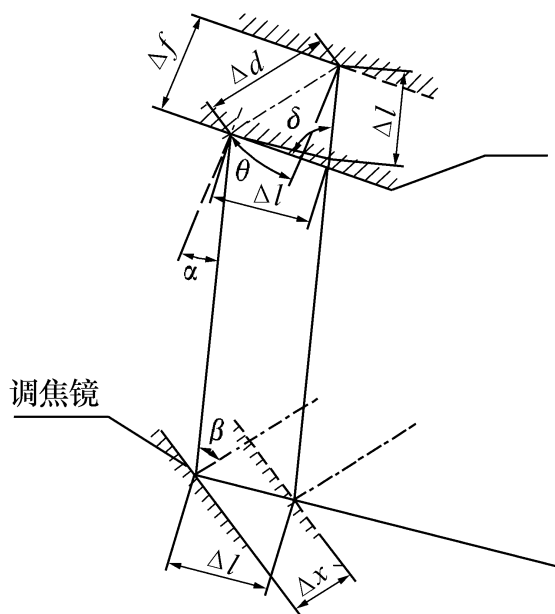


图 4 调焦反射镜与焦面的位置关系

Fig. 4 Location relationship between focusing mirror and focal plane

由对应的几何关系可知:

$$l = \frac{x}{\cos \theta} = 180^\circ - 2\theta$$

$$d = 2 \cdot l \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$f = d \cos \theta = d \cos(180^\circ - 2\theta) =$$

$$2 \frac{x}{\cos \theta} \sin(90^\circ - \theta) \cos(180^\circ - 2\theta), \quad (11)$$

将式(10)代入式(11)中, 则:

$$f = 2 \frac{s \cdot \sin \alpha}{\cos \theta} \sin(90^\circ - \theta) \cos(180^\circ - 2\theta). \quad (12)$$

已知该空间相机光学系统中 $\alpha = 15^\circ$; $\theta = 12^\circ$; $\alpha = 50^\circ$; 则由调焦机构误差 $5.55 \mu\text{m}$ 导致的

焦面位移误差为 $f = 0.342 2 \cdot s = 1.90 \mu\text{m}$, 满足相机使用要求。

5 检调焦工作测试

谐波传动机构中输出刚轮的外齿轮与绝对式编码器的消间隙齿轮组相啮合, 故通过编码器的码值可以检测调焦位移。其调焦控制单元的工作原理图如图 5 所示, 调焦编码器的信号通过编码器信号处理板运算处理, 再将处理结果同理想标定值进行比较, 然后将比较差值送到电控箱中, 控制调焦电机工作^[5]。

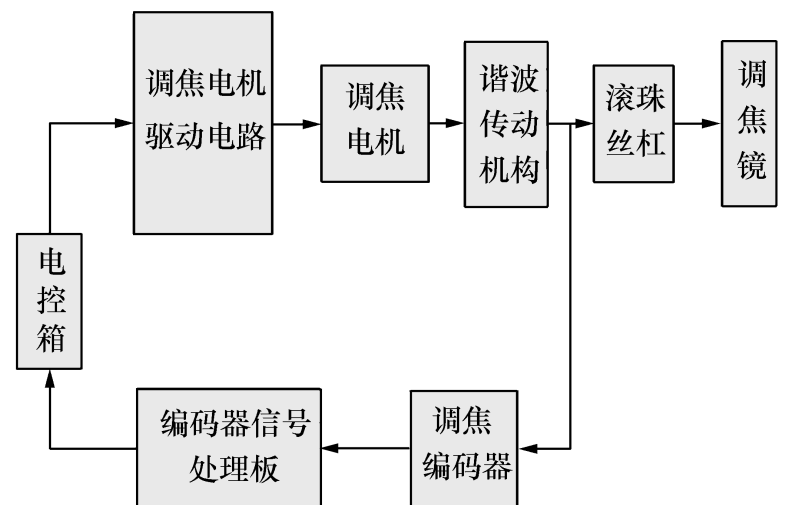


图 5 调焦控制单元原理框图

Fig. 5 Block diagram of focusing structure controller platform

在测试中, 驱动电机每次走 400 step, 用测微仪测量调焦机构的直线位移量, 之后将实际测量值与根据编码器读数计算出的理论位移量进行

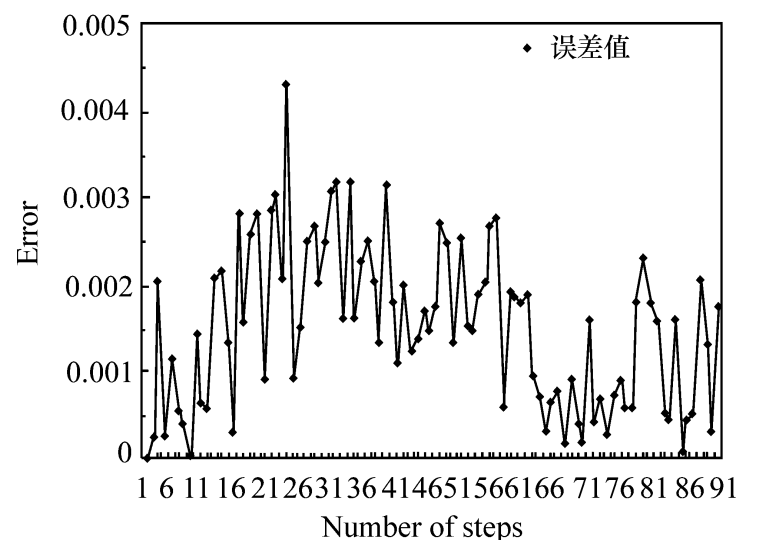


图 6 位移误差(绝对值)曲线

Fig. 6 Curve of displacement errors(absolute value)

比较,即可得出相应位置调焦机构的位移误差,具体测试数据如图6所示。

由图6可知测量结果的算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0.0015 \text{ mm}, \quad (13)$$

标准差为:

$$= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0.00096 \text{ mm}. \quad (14)$$

取置信度为99.7%,则测量的最大极限误差为:

$$\lim x = \bar{x} \pm 3s = 0.0015 \text{ mm} \pm 0.0028 \text{ mm}. \quad (15)$$

式中,0.0015 mm为调焦结构本身的系统误差,0.0028 mm为编码器和测微仪的测量误差,推出

参考文献:

- [1] 辛洪兵,谢金瑞,何惠阳,等.谐波传动技术及其研究动向[J].北京轻工业学报,1999,17(1):30-36
XIN H B, XIE J R, HE H Y, et al. Harmonic drive technology and its research tendency[J]. *J. Beijing Institute Light Industry*, 1999, 17(1): 30-36. (in Chinese)
- [2] 张新洁,颜昌翔,谢涛.星载光学遥感器调焦机构的设计[J].光学精密工程,2009,17(11):2757-2761.
ZHANG X J, YAN CH X, XIE T. Design of focusing mechanism of space remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2757-2761. (in Chinese)
- [3] 张景和.精密谐波传动在三坐标测量机上的应用[J].光学精密工程,1998,6(2):44-48.
ZHANG J H. Application of harmonic gear drive to 3-axes measuring machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(2): 44-48. (in Chinese)
- [4] 徐灏,邱宣怀,蔡春源,等.机械设计手册第三卷[M].北京:机械工业出版社,1992:(24)141-166.
XU H, QIU X H, CAI CH Y, et al. *Machine Design Handbook*[M]. Beijing: Publishing House of Mechanical Industry, 1992. (in Chinese)
- [5] 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):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)
- [6] 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)

作者简介:张新洁(1978—),女,吉林长春人,助理研究员,硕士,主要从事光学遥感器光机结构设计方面的研究。

E-mail: zhangxj78@tom.com

像面的最大极限误差为1.34 μm,满足设计使用要求。

6 结 论

本文设计了一种空间相机的调焦机构,对其进行的检调焦测试表明,误差主要来源是精密步进谐波传动中刚轮、柔轮和输出刚轮的综合误差以及波发生器的综合径向误差,选用高精度齿轮可增加调焦机构的传动精度。位移精度的测量表明,该调焦机构的焦面位移精度高于1.5 μm,证明该调焦机构具有结构紧凑、精度高、稳定性好等优点。综上所述,采用精密步进谐波传动的空间相机调焦机构具备较好的传动稳定性和较高的传动效率,满足空间环境的特殊使用要求。