

文章编号: 1002-1582(2022)05-0562-04

空间相机调焦机构同步性精度分析

高洋*, 王书新, 齐光, 孙斌, 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: 调焦机构是空间相机获得良好成像质量的重要保障。由于调焦机构焦平面两端的同步性误差不可避免, 会对成像质量造成影响, 因此对双凸轮和丝杠螺母调焦机构同步性误差进行了分析。介绍了两种调焦机构工作原理; 分析了两种调焦机构同步性误差的来源并对其同步性误差进行了计算; 对两种调焦机构的同步性进行了测试验证。两种调焦机构采用统计法和蒙特卡罗法计算同步性误差, 验证结果与之相符。满足调焦机构同步性误差的最大允许值 $\pm 20\mu\text{m}$, 完全满足现阶段使用要求。

关 键 词: 空间相机; 调焦机构; 同步性误差; 统计法; 蒙特卡罗法

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2022.05.001

Synchronous accuracy analysis of focusing mechanism in space camera

GAO Yang*, WANG Shuxin, QI Guang, SUN Bin, SAN Bing, LI Jinglin

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

Abstract: The focusing mechanism is an important guarantee to acquire remote sensing images for space camera. Synchronous accuracy on both ends of the focal plane is difficult to be eliminated, and it will affect sensing images. So synchronous accuracy analysis of double cam focusing mechanism and screw female focusing mechanism is important. First, it introduces working principle of two types of focusing mechanism, and then analyzes the sources of the synchronous error on both ends of the focal plane of two types of focusing mechanism, in the end, the synchronous accuracy of two types of focusing mechanism is tested. The calculation results show that the error of synchronous motion on both ends of the focal plane of two types by Statistical Method and Monte Carlo Method. Test results accord with the results of calculation. And the maximum error of synchronism is $20\mu\text{m}$, the focusing mechanism of two types meets the requirements of practical application quite well.

Key words: space camera; focusing mechanism; synchronous error; Statistical Method; Monte Carlo Method

0 引 言

空间相机装调环境为地面装调, 但是其在轨工作环境(温度、大气压、卫星姿态、力学条件等)发生改变, 同时发射阶段的力学环境也会使相机焦面发生一定程度的离焦^[1,2]。所以空间相机需要对焦平

面位置进行离焦量的补偿, 通常采用的方法是调焦机构。调焦机构作为相机的核心部件之一, 稳定性以及精度直接影响相机的成像质量^[2,3]。常用的调焦方案通常有镜组调焦、焦平面调焦以及反射镜调焦^[4-6], 本文分析的是焦平面调焦。焦平面调焦机构有多种形式, 但大体上可以总结为两种, 丝杠螺母

收稿日期: 2022-03-05; 收到修改稿日期: 2022-05-11

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(86325113B)

作者简介: 高洋(1991—), 男, 研究实习员, 硕士, 从事空间相机光机结构设计方面的研究。

* 通讯作者: gy1991@mail.ustc.edu.cn

和双凸轮传动机构^[7]。丝杠螺母机构简单,易加工,易装配,但是抗冲击能力差,平面两端同步性不一致。调焦机构同步性是影响焦平面成像的主要因素之一。

本文通过对双凸轮和丝杠螺母调焦机构支撑焦平面两端同步性误差进行分析,并通过试验进行验证,得到两种调焦机构的同步性精度。

1 调焦机构模型和工作原理

1.1 双凸轮调焦机构

双凸轮调焦机构主要由步进电机、减速器、联轴器、双凸轮轴、滑块组件、支撑焦平面部件、制动器和编码器组成,其机构如图1所示。其工作原理为:步进电机通过减速器后驱动双凸轮轴转动,而后通过滑块组件将双凸轮转动量分解为水平和竖直两个垂直方向的运动,其中支撑焦平面部件沿轴向运动,实现调焦。调焦机构工作时,编码器反馈双凸轮轴转动角度,从而换算出焦平面组件位置,实现调焦位置的实时反馈^[8]。

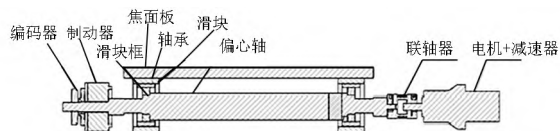


图1 双凸轮调焦机构结构示意图

1.2 丝杠螺母调焦机构

丝杠螺母调焦机构主要由步进电机、减速器、联轴器、丝杠螺母组件、直线传动块组件、支撑焦平面部件和编码器组成,其机构如图2所示。其工作原理为:步进电机通过减速器驱动丝杠旋转,丝杠带动螺母组件直线运动,再通过传动块组件将水平运动转换为垂直运动,使得焦平面沿轴向运动,实现调焦,同时编码器反馈实时位置^[9]。

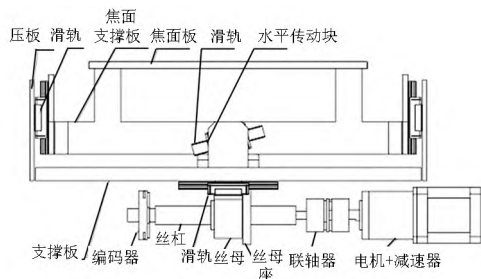


图2 丝杠螺母调焦机构示意图

2 调焦机构同步性误差分析

调焦机构同步性误差主要由零件制造误差和组件装配误差产生;零件的加工精度和组件的装配质量直接决定了调焦机构的精度。

2.1 双凸轮调焦机构同步性误差来源

零件制造误差主要有双凸轮轴轴向尺寸加工误差、滑块组件(滑块、滑块框、轴承)轴向尺寸误差。其中滑块和滑块框轴向尺寸误差可由修研等方法消除,但是双凸轮轴和轴承误差无法避免,因此双凸轮轴和轴承误差是零件制造误差的主要影响因素。双凸轮轴示意图如图3所示。装配误差主要有滑块组件配合间隙(滑块框与滑块、滑块与轴承)、轴承与双凸轮轴配合间隙。



图3 双凸轮轴结构示意图

2.2 丝杠螺母调焦机构同步性误差来源

零件制造误差主要有丝杠、螺母加工误差,直线导轨径向跳动,螺母座、水平传动块等零件的轴向尺寸误差。其中螺母座和水平传动块误差可由修研等方法消除。装配误差主要有丝杠与螺母、螺母座与直线导轨、水平传动块与斜面导轨的配合间隙。其中丝杠螺母运动副误差构成较为复杂;丝杠螺母零件加工误差、螺纹啮合处间隙、运动时丝杠中心距轴向跳动、螺母反向运动时的滞后、丝杠的安装误差都会对同步性造成影响。

3 调焦机构同步性误差计算

由于零件制造和装配误差随机出现,满足正态分布,而且各误差分布又是相互独立的,因此可以用数理统计方法和蒙特卡罗法对误差进行计算。

3.1 数理统计法同步性误差计算

双凸轮调焦机构同步性误差主要由双凸轮轴偏心距误差、相位误差、轴径误差组成。偏心距误差和偏心轴相位差在轴向共计为 $\pm 3\mu\text{m}$;轴径误差由双凸轮轴轴径误差、轴承误差、滑块和滑块框误差组成;偏心轴与轴承配作,配作间隙为 $\pm 3\mu\text{m}$,因此偏心轴与轴承配合间隙为 $\pm 3\mu\text{m}$;查询产品技术手册,轴承径向跳动精度为 $4\mu\text{m}$;轴承与滑块,滑块与滑块框也分别配作,配作间隙也分别为 $\pm 3\mu\text{m}$ 。以上误差随机出现,出现概率满足正态分布,记为 $T(A_i)$,同步性误差记为 $T(A_0)$

$$T(A_0) = \sqrt{\sum_{i=1}^n T(A_i)^2} \quad (1)$$

按照 4σ (标准差)要求

$$\omega(A_0) = 4\sigma(A_0) \quad (2)$$

取

$$T(A_i) = \omega(A_i), T(A_0) = \omega(A_0) \quad (3)$$

可得

$$T(A_0)=\sqrt{\sum_{i=1}^n\omega(A_i)^2}\tag{4}$$

求得 $T(A_0)=\pm 7.21\mu\text{m}$;

各误差影响占比为

$$\varepsilon=\sqrt{\frac{T_i^2}{T_0^2}}\tag{5}$$

计算求得各误差影响占比如表 1 所示,轴承对于同步性的影响最大,提高机构同步性精度必须要提高轴承精度,由于轴承为采购件,需要筛选出高精度轴承。

表 1 双凸轮调焦机构误差对同步性影响

误差来源	误差/ μm	计算误差影响占比/%
偏心轴偏心距与相位	± 3	17.31
偏心轴与轴承配合间隙	± 3	17.31
轴承径向跳动	± 4	30.76
轴承与滑块配作	± 3	17.31
滑块与滑块框配作	± 3	17.31

丝杠螺母调焦机构同步性误差来源主要有:丝杠螺母运动副误差,斜面导轨误差和直线导轨轴向跳动误差。丝杠螺母运动副和导轨为外购件,查询产品技术手册,丝杠螺母运动副误差为 $\pm 5\mu\text{m}$;直线导轨轴向精度为 $5\mu\text{m}$;水平传动块与斜面导轨配合间隙为 $\pm 3\mu\text{m}$ 。采用统计法计算, 4σ 要求,求得 $T(A_0)=\pm 7.68\mu\text{m}$;各误差影响占比如表 2 所示。

3.2 蒙特卡罗法同步性误差计算

蒙特卡罗算法是以数理统计、概率论作为基础,采取随机变量抽样的方式,求出问题的近似解。基本思想是通过构造与描述问题有相似性的概率分布模型,将分布模型的某些特征(例如微分、积分方程的解,随机变量均值等)与问题的解答联系起来;并通过对分布模型进行随机模拟或抽样试验来计算这些特征的统计值最后给出所求解的近似值。

$$T(A_0)=\sum_{i=1}^nT(A_i)\tag{6}$$

双凸轮调焦机构的双凸轮轴偏心距误差、相位误差、轴径误差组成、轴承与滑块配作误差、滑块与滑块框配作误差;其误差如表 1 所示。丝杠螺母调焦机构的丝杠螺母运动副误差,斜面导轨误差和直线导轨轴向跳动误差由上述分析可以得到,其误差如表 2 所示。通过对误差进行多次随机采样,即可得到同步性误差。

表 2 丝杠螺母误差对同步性影响

误差来源	误差/ μm	计算误差影响占比/%
丝杠与螺母配合误差	± 5	42.37
直线导轨轴向跳动误差	± 5	42.37
水平传动块与斜面导轨配合间隙误差	± 3	15.26

根据蒙特卡洛算法,使用数据分析软件 Matlab 编写代码求解同步性误差。设置随机迭代次数为 10000 次,在 4σ 公差下,得到双凸轮机构调焦误差为 $\pm 7.44\mu\text{m}$,丝杠螺母调焦机构误差为 $\pm 7.52\mu\text{m}$ 。

4 测试与结果

4.1 双凸轮调焦机构同步性误差测试结果

根据某大型空间相机需求,为焦平面设计并制造了一套双凸轮调焦机构,该调焦机构装配完成后对其同步性误差进行了测试,其测试方法为采用数显表记录两侧位置,偏心轴每转动 1° 控制系统采集一次数显表数据并自动记录(测试采用的数显表精度为 $0.5\mu\text{m}$),测试现场如图 4 所示。调焦机构转动一周后将数显表记录的数据做差,即为调焦机构的同步性误差^[10-13],测试结果如图 5 所示。测试同步性误差为 $\pm 7\mu\text{m}$,与计算结果相符。

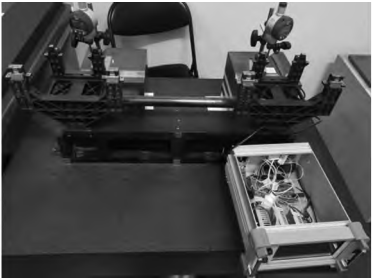


图 4 双凸轮调焦机构同步性误差测试现场

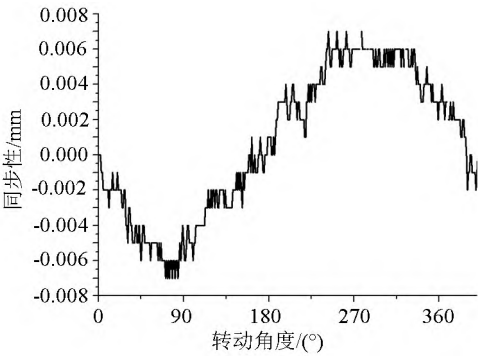


图 5 双凸轮调焦机构同步性误差测试结果

4.2 丝杠螺母调焦机构同步性误差测试结果

根据某多光谱相机需求,为焦平面设计了一套丝杠螺母调焦机构,采用与双凸轮调焦机构相同的

方法和设备对其同步性进行测试,在有效行程内共测量 36 组数据,测试现场如图 6 所示,测试结果如图 7 所示。测试同步性误差为 $-7 \sim +6 \mu\text{m}$,与计算结果相符。

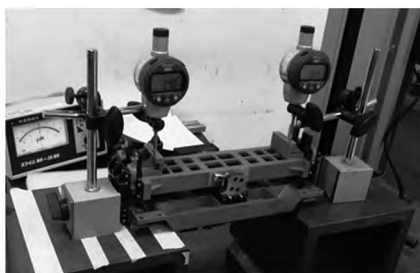


图 6 丝杠螺母调焦机构同步性误差测试现场

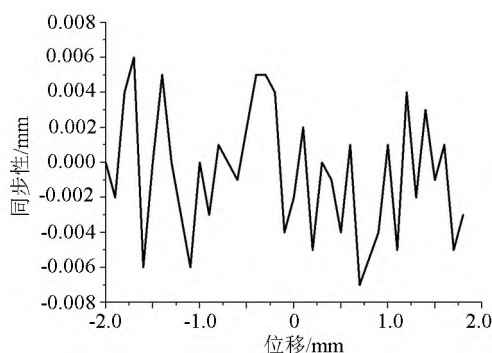


图 7 丝杠螺母调焦机构同步性误差测试结果

5 结 论

根据空间相机的发展趋势,调焦机构的高精度成为关键问题之一。本文通过数理统计法和蒙特卡罗法两种方法对双凸轮和丝杠螺母调焦机构同步性误差进行理论分析,并通过试验对两种调焦机构同步性误差进行测试。计算与测试结果表明两种调焦机构的同步性精度都很高;都满足现阶段空间相机的需求。两种调焦机构又各有优缺点,双凸轮机构质量轻、抗冲击能力强、不存在卡死问题,但是加工、装调要求高;丝杠螺母机构结构简单,装调容易但是抗冲击能力差、两端易卡死、重量略大,增加了相机发射成本;两种调焦机构各有优缺点,要根据实际情况选择合适的机构。

参考文献:

- [1] 陈世平. 空间相机设计与试验[M]. 北京:中国宇航出版社, 2003:27—28.
Chen Shiping. Design and experiment of space camera[M]. Beijing:China Astronautic Publishing House, 2003:27—28.
- [2] Hong D G, Hwang J H. Fabrication and performance test of small satellite camera with focus mechanism[J]. Journal of Aerospace System Engineering, 2019, 13(4): 26—36.
- [3] 占潜, 高云国, 于萍. 光电探测器调焦机构的设计与精度分析[J]. 激光与红外, 2014, 44(11): 1238—1243.

- Zhan Qian, Gao Yunguo, Yu Ping. Design and analysis on focusing mechanism of photoelectric detector and its precision[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(11): 1238—1243.
- [4] 王凯, 徐明林, 解鹏, 等. 空间高光谱相机调焦机构精度分析与试验[J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 29—36.
Wang Kai, Xu Minglin, Xie Peng, et al. Precision analysis and experiment of focusing mechanism of space hyperspectral camera[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 29—36.
- [5] 贾学志, 张雷, 安源, 等. 空间光学遥感器精密调焦机构设计与试验[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 25—30.
Jia Xuezhi, Zhang Lei, An Yuan, et al. Design and experiment research on precision focusing mechanism of space remote sensor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13): 25—30.
- [6] 浦前帅, 翟岩, 文大化, 等. 星载红外探测器调焦机构设计与分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(2): 25—28.
Pu Qianshuai, Zhai Yan, Wen Dahua, et al. Design and analysis of focusing mechanism for space borne infrared detector[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 38(2): 25—28.
- [7] 杜一民, 贾学志, 安源, 等. 高分辨率空间相机调焦机构设计与分析[J]. 红外技术, 2019, 41(4): 305—310.
Du Yimin, Jia Xuezhi, An yuan, et al. Design and analysis of focusing mechanism for a high resolution space camera[J]. Infrared Technology, 2019, 41(4): 305—310.
- [8] 卢钊, 颜昌翔, 吴清文, 等. 空间光学遥感器环境适应性设计与试验[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(5): 364—376.
Lu e, Yan Changxiang, Wu Qingwen, et al. Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(5): 364—376.
- [9] 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 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.
- [10] 刘磊, 曹国华. 大视场长焦面光学遥感器双凸轮式焦面调焦机构[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1939—1944.
Liu Lei, Cao Guohua. Double cam focusing mechanism of space camera with wide field and long-focal-plane[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(9): 1939—1944.
- [11] 王书新, 李景林, 刘磊, 等. 大尺寸焦平面空间相机调焦机构的精度分析[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2239—2243.
Wang Shuxin, Li Jinglin, Liu Lei, et al. Accuracy analysis of focusing mechanism in space camera with long-focal-plane[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(10): 2239—2243.
- [12] 惠守文, 远国勤, 丁亚林, 等. 等径共轭调焦凸轮机构的精度分析及优化设计[J]. 光电工程, 2010, 37(5): 133—138.
Hui Shouwen, Yuan Guoqin, Ding Yalin, et al. Accuracy analysis and optimization design of constant-diameter conjugate focusing cam[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(5): 133—138.
- [13] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京:国防工业出版社, 1982.
Mao Yingtai. Error theory and precision analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982.