

文章编号 1004-924X(2014)08-2173-07

月基光学天文望远镜反射镜转台的设计

黄 静*, 刘朝晖, 谢友金, 李治国, 王振宇
(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要:为了在月球上完成天文观测任务,对月基反射镜二维跟踪转台进行了热力学分析及结构设计。采用航天轻量化法设计反射镜的二维转动机构以减少载荷重量;采用外转子机构实现垂直轴系以大大提高系统沿发射方向的一阶模态。由于水平轴系跨度较大,设计中采用了一端固定另一端游动的精密轴系,并通过合理设计深沟球轴承游隙有效解决了温度变化导致的转动机构卡死的问题,进一步提高了机构的可靠性。为了满足精度要求,系统采用蜗轮蜗杆十步进电机驱动方式,严格控制蜗轮蜗杆的加工及安装工艺。在控制中以光电开关为位置定位元件,使得转台的单轴指向精度优于 $60''$ 。验证试验显示:系统发射方向的一阶谐振频率达到 81 Hz,它可在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下正常工作,其指向精度(方位及俯仰) $\leq 60''$ 。结果表明该转台具有精度高、力学性能好、可靠性高、重量轻等特点。

关键词:月基天文望远镜;反射镜转台;轻量化设计;指向精度

中图分类号:V476.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2173

Design of 2-D reflection mirror gimbal for lunar based astronomy optical telescope

HUANG Jing*, LIU Zhao-hui, XIE You-jin, LI Zhi-guo, WANG Zhen-yu

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: huang@opt. ac. cn.

Abstract: To implement the astronomical observation on the moon, the thermal analysis and structure design of a 2D reflection mirror gimbal for the lunar based astronomy optical telescope were performed. The 2D rotary structure of reflection mirror was designed based on lightweighting method to reduce the load mass. Because an external rotor mechanism was used for the vertical shaft, the first order mode of the system along the emission direction was greatly improved. For a larger span in the horizontal shaft, a shaft system with one fixed end and another free end was adopted. Moreover, the clearance of deep groove ball bearings was designed rationally to eliminate the block of the rotary structure caused by temperature changes on the moon. In order to meet the high accuracy, the reflection mirror gimbal used a worm gear and a step motor to drive the gimbal and to control the machining in a strict technology. In addition, an optics switch was used to achieve high accuracy position and make the accuracy of gimbal be better than $60''$. Experiments show that the first order resonant frequency of the system can reach 81 Hz along the rocket-firing track, the mechanism works well at

收稿日期:2013-09-23;修订日期:2013-11-20.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA7080303)

-25 °C to +60 °C without stuck phenomenon and its direction accuracy is less than 60". These results demonstrate that the system is characterized by high accuracy, high reliability and light weight.

Key words: Lunar based astronomy optical telescope ; reflection mirror gimbal; lighting design; position accuracy

1 引 言

月基天文观测用月基光学望远镜充分利用月球自转缓慢和没有大气干扰的优势,通过在近紫外波段对一批有重要科学价值天体的光变进行长期的连续监测来完成地面无法实现的观测任务^[1-3]。

通过将反射镜转台和月基望远镜搭载在着陆器-Y 舱可以实现 3 种不同的月基天文观测模式:天体定点观测、定标观测、巡天观测。搭载反射镜的月基反射镜转台通过二维转动来完成对指定空域的扫描观测、对目标的精确指向和跟踪,使目标经反射镜后进入望远镜视场。目前转动机构在空间领域的应用已经越来越广泛,类似的有成像系统中的扫描镜机构、二维转动机构、HJ 星中的扫描摆镜机构等,但它们的温度、力学等环境条件要远远优于月球。月球上昼夜温差很大,月昼期间的温度高达 120 °C,月夜期间可降至-180 °C,并且昼夜过渡期间温差变化极快,达 2 °C/min^[4-6]。另外,由于发射轨道以及卫星构型的不同,主动段的力学条件大幅增加,其中:冲击量高达 600 g,随机振动为 13.8 g,正弦振动为 8 g。最后,转台的结构设计还必须满足苛刻的质量要求:在外包络尺寸不超过 320 mm×207 mm×191 mm 的条件下质量要优于 5.0 kg。由于国内外关于月基成像观测用跟踪平台研究的报道非常少,本文根据上述限制条件,对其进行结构设计。采取外转子机构使得系统的质量为 4.71 kg 时,模态大幅提高,同时,在无主动热控的条件下,通过选材及对轴系的巧妙设计保证了机构对热环境的适应性,大大提高了系统的可靠性;另外,严格控制了对蜗轮蜗杆+步进电机的结构设计、加工及安装工艺,并采用光电开关作为位置定位精度,从而保证系统的指向精度不大于 60"。最后,通过热、力学仿真软件结合实际试验对其进行了热、力学验证及精度检测。

2 月基二维转动机构设计

2.1 传统二维转动机构设计

传统二维转动机构由垂直轴系及水平轴系组成。由于垂直轴系搭载整机自重和外载荷,从而决定了整机的谐振频率。轴系和传动系统是影响结构刚度和跟踪性能的关键环节^[7],传统设计中均采用内转子结构,如图 1 所示。这种方式依靠增大轴承直径的方式提高抗倾覆力矩和提高整机谐振频率,但其体积、重量也相应增加。水平轴系结构由左、右轴轴系组成,因为左右轴跨距较大,该结构一端采用一对角接触球轴承支撑,另一端采用深沟球轴承固定,深沟球轴承可沿轴线自由移动。该结构依靠深沟球轴承的游隙以补偿温度变化的影响^[8],另外,也经常通过温控方式解决温度变化导致的卡死问题。

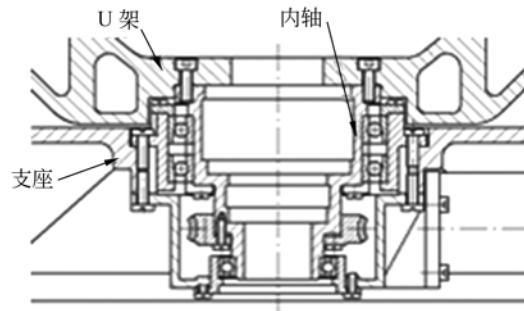


图 1 内转子垂直轴系结构图

Fig.1 Structure schematic of vertical shaft for inner rotor

2.2 月基反射镜二维转动机构设计

2.2.1 转台结构设计

与传统的二维转台结构相同,月基二维转动机构分为方位及水平轴系 2 个部分,两个转轴正交^[9],2 种力分别实现 2 个自由度的转动。方位轴系采用外转子结构,如图 2 所示。这种结构支撑面大,同等质量条件下系统模态较内转子系统

高。轴承选用 719 轻系列角接触球轴承,背对背使用,这种结构可承受轴向及径向载荷,且精度较其它形式高。

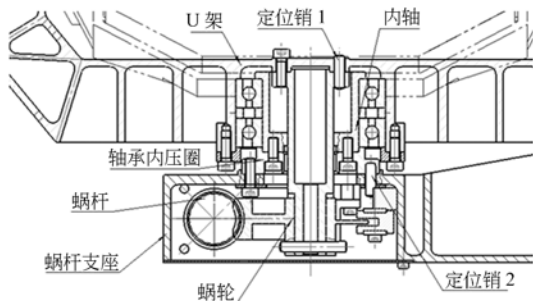


图 2 外转子垂直轴系结构图

Fig. 2 Structure schematic of vertical shaft for external axis

水平轴系采用典型的温度补偿结构,即设置一个游动支点,采取一端固定一端游动的支承形式,右端为固定支点,承受双向轴向力;左端为游动支点,只承受径向力,当轴受热伸长时,其可做轴向游动。通过计算轴向游隙、设计专用轴承将游隙控制为 0.28~0.35 mm,可适应-25~60 °C 的温度变化,满足系统使用要求。

2.2.2 蜗轮蜗杆安装工艺

系统采用蜗轮蜗杆十步进电机开环驱动方式,因此蜗轮蜗杆机构成为影响转台精度的关键部件。蜗轮蜗杆的安装方式如图 2 所示。其中蜗轮蜗杆的加工精度分别为 6 级和 5 级,已属国内目前最高加工水准。

蜗轮蜗杆的中心距直接影响转台的传动精度及可靠性,结构设计中依靠加工工艺保证中心距。首先在三坐标仪上测出配对好的蜗轮蜗杆的中心距尺寸 L_0 ;然后将 L_0 作为蜗杆支座中决定中心距的关键尺寸,精度要求为 $(L_0 + 0.05) \pm 0.005$;最后通过定位销固定各零部件的相对位置。这样可以避免反复调整蜗轮蜗杆中心距,既解决了蜗轮蜗杆副跑合前后中心距一致的问题,同时也保证了精度及可靠性。

2.2.3 误差分析

轴承采用 P4 级精度轴承,水平轴系误差约为 6",垂直晃动误差约为 2",视轴误差约为 10",转台方位与俯仰的静态定向误差分别为 5.06" (0.001 4°) 和 1.41" (0.000 39°),如表 1 所示,其中视轴误差指的是反射镜法线方向与水平轴的垂直度误差。

表 1 转台静态定向误差

Tab. 1 Static directional error of turntable

误差来源	要求	关系式	方位误差		俯仰误差			
			0°	35°	关系式	0°	35°	
静态误差	垂直轴误差	2"	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sin E$	0	0.81"	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	1.41"	1.41"
	水平轴误差	6"	$\sin E$	0	3.45"	0	0	0
	视轴误差	20"	$1 - \cos E$	0	3.62"	0	0	0
	静态定向误差总和		$\sqrt{\sum \sigma_i^2}$	0	5.06"	$\sqrt{\sum \sigma_i^2}$	1.41"	1.41"

蜗轮蜗杆空回误差为系统误差,其可用软件消除。因此总体误差分配中可以不考虑此项误差。若蜗轮蜗杆之间的空回为 0.015 mm,则角度误差为:

$$\frac{0.015 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} \times \frac{180}{3.14} = 0.028^\circ. \quad (1)$$

步进电机的步距误差是由步进电机的齿距制造误差造成的,根据技术协议和实测结果,此误差在 8% 以内,按照 1/60 减速比,该误差在 8.64" 以内,即 0.002 4° 以内。

蜗轮蜗杆传动误差:蜗轮加工精度选用 6 级,查表可知,蜗轮齿距极限偏差为 0.01 mm。则蜗轮蜗杆的传动误差为:

$$\frac{0.01 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} \times \frac{180}{3.14} = 0.019^\circ, \quad (2)$$

则转台的总体误差为:

$$\frac{0.028}{\sqrt{2}} + \sqrt{0.0014^2 + 0.0024^2 + 0.019^2} = 0.038^\circ. \quad (3)$$

表 2 转台总体误差分配

Tab. 2 Overall error distribution of turntable (°)

名称	方位误差值	俯仰误差值
空回误差	0.028	0.028
转台静态定向误差	0.001 4	0.000 39
步进电机驱动误差	0.002 4	0.002 4
蜗轮蜗杆传动误差	0.019	0.019
合计	0.038	0.038

3 热变形及力学仿真分析

3.1 力学仿真分析

对月基二维转动机构反射镜及转台各个部件进行网格划分:薄板部分使用板壳单元,较厚的部位使用六面体单元和四面体单元,零部件间的装配使用多点约束关系,电机采用质量单元模拟,轴承采用弹簧单元模拟。依据大量计算经验值,转台的阻尼系数定为 0.05。包含约束和载荷的有限元模型如图 3 所示。本文分别对外转子及内转子的结构进行了模态分析,如表 3 所示。计算结果显示:同体积、同质量的内转子结构的一阶模态要远远小于外转子结构。

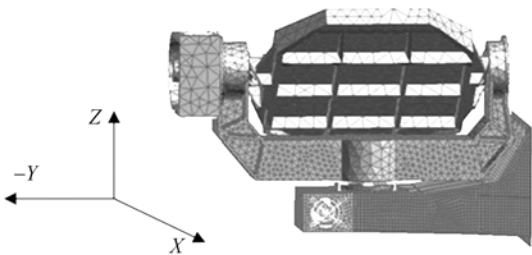


图 3 有限元模型图

Fig. 3 Finite element model of gimbal

表 3 X、Y、Z 3 个正交方向上的前两阶频率

Tab. 3 The first two frequency bands on three orthogonal directions (Hz)

方向	外转子结构	内转子结构
	第一阶频率	第一阶频率
X	81	60
Y	62	41
Z	62	42

3.2 热变形分析

结构变形分析主要包含俯仰轴左端轴承和垂直轴轴承。对系统进行建模,并分别对俯仰轴左端轴承,垂直轴轴承在不同条件下用 IDEAS/TMG 软件进行了变形分析^[11],所得结果及所受的轴向载荷和径向载荷如表 4 所示。

表 4 各轴承不同工况下的轴向载荷和径向载荷

Tab. 4 Axial and radial loads of each bearing under different conditions

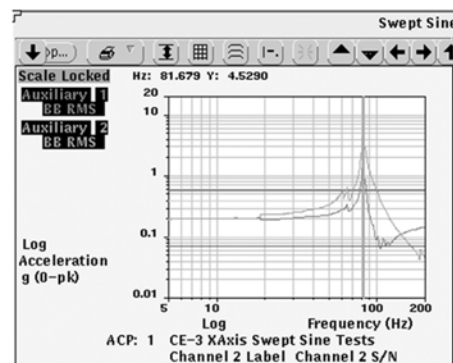
温度/(°C)	左轴承		垂直轴轴承	
	轴向/N	径向/N	轴向/N	径向/N
-20	卸载	2 958	卸载	4 920
55	270	卸载	卸载	卸载
-50	卸载	5 178	卸载	8 620
70	336	卸载	卸载	卸载

分析结果表明,反射镜及转台无需采取被动热控措施,该结构在无需热控措施及外包覆的情况下可适应在-25~60 °C下工作。

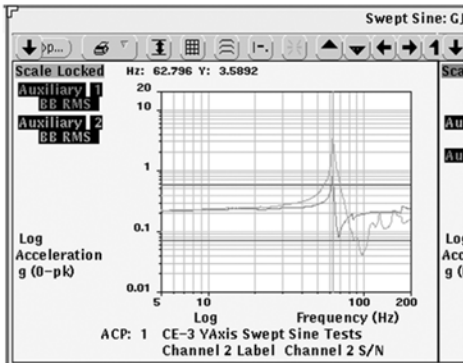
4 试验验证

4.1 力学试验

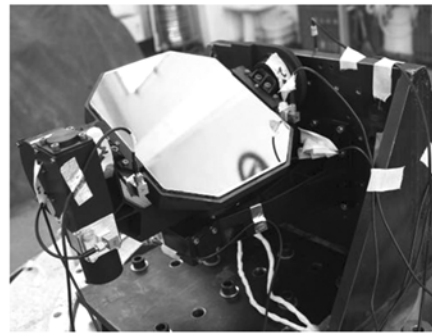
对转台分别进行了扫频、正弦及随机振动试验,在试验结束后进行目测及加电检查。结果显示:整机 3 个方向的一阶模态分别为:81.6、62.2 和 64.3 Hz,如图 4 所示。结果显示,该结构完好无损,在加电后可正常工作。



(a) X-axis



(b) Y-axis

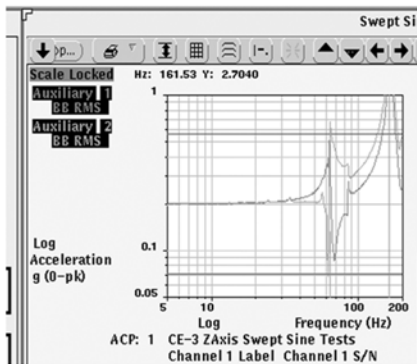


(b) 振动试验

(b) Vibration test

图 5 环境试验示意图

Fig. 5 Schematic diagram of environmental tests



(c) Z-axis

图 4 3 个方向的正弦扫频试验曲线

Fig. 4 Sine-swept curves in three directions

4.2 温度适应性试验

通过高低温试验可知,二维跟踪转台工作温度为 $-25\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,存储温度为 $-50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在工作温度范围内,对转台进行加电检查可知其运转正常,如图 5 所示。

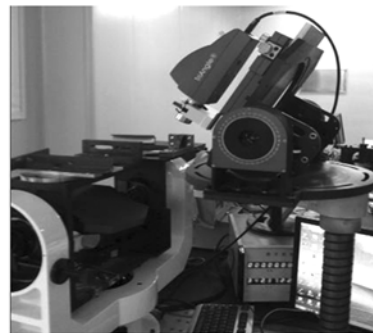


(a) 热真空试验

(a) Thermal vacuum experiment

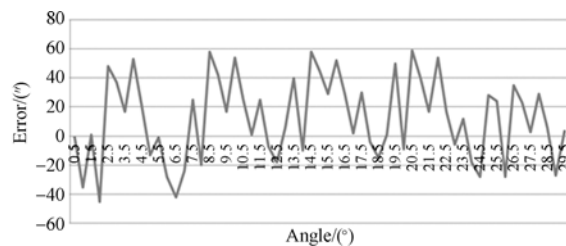
4.3 精度测试结果

将转台放置在精度为 $20''$ 的地检转台上,利用精度为 $2.5''$ 的 TriAngle[®] TA 100-38 电子自准直仪搭建检测装置,如图 6 所示。图中横坐标表示以 0.5° 为步距的转角,纵坐标表示指向精度,光电开关的零位定位重复精度为 $1''$ 。以 0.5° 为单步转动角度可得,方位及俯仰轴系精度均不大于 $\pm 60''$ 。



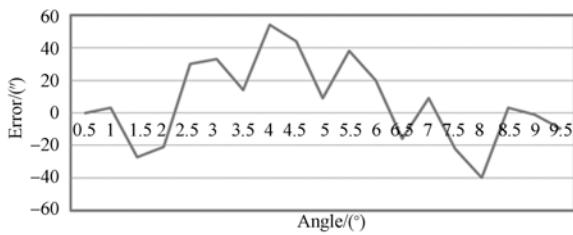
(a) 精度检测装置

(a) Equipment of accuracy detection



(b) 方位轴系单步累计误差

(b) Single-step cumulative errors of orientation shaft



(c) 俯仰轴系单步累计误差

(c) Single-step cumulative errors of pitch shaft

图 6 精度检测装置及方位、俯仰轴系精度检测结果
Fig. 6 Equipment of accuracy detection and their accuracy results of two shafts

5 结 论

本文根据月基的复杂环境及严格的质量限制,首次对月基反射镜二维跟踪转台进行了详细

的热力学分析及结构设计。在轻量化设计中,通过采用内转子结构既保证了结构的刚度,同时也大大减轻了结构的重量;另外,考虑到精度以及可靠性设计,在蜗轮蜗杆的加工及安装工艺上采取合理可行的方法,从而解决了反复拆装造成的中心距不一致问题,同时提高了转台的精度;在无主动热控情况下,通过合理控制深沟球轴承的游隙值,克服了因较大温差造成的转台结构变形和卡滞的问题。最后结合大量试验数据验证了转台设计的合理性及可靠性。结果显示,当质量仅为 4.71 kg 时转台沿发射方向的一阶模态高达 81 Hz;该转台具有优于 60" 的指向精度。在无主动热条件下可在 $-25 \sim 60$ °C 正常工作,满足月球表面特殊温度环境的工作要求。另外,该结构具有力学性能好、可靠性高、重量轻的特点。

本文为月基转动机构的设计提供了大量详实可靠的数据,并且为空间高精度、高可靠性二维转动机构的设计提供了充分可靠的数据。

参考文献:

- [1] 叶培建,孙泽洲,饶炜. 嫦娥一号月球探测卫星研制综述[J]. 航天器工程,2007,16(6):9-15.
YE P J, SUN Z ZH, RAO W. Research and development of chang'e1 [J]. *Space Craft Engineering*, 2007,16(6):9-15. (in Chinese)
- [2] 叶培建,肖福根. 月球探测工程中的月基环境问题[J]. 航天器环境工程,2006,23(1):1-11.
YE P J, XIAO F G. Issues about lunar environment in lunar exploration project [J]. *Space Craft Environment*, 2006,23(1):1-11. (in Chinese)
- [3] 张锐,陈志远,杨世模,等. 空间太阳望远镜主镜支撑结构的优化设计[J]. 光学技术,2007,33(1):23-26.
ZHANG R, CHEN ZH Y, YANG SH M, et al.. Optimize and redesign the primary mirror supporting system of space solar telescope [J]. *Optical Technique*, 2007,33(1):23-26. (in Chinese)
- [4] 李朝辉,陈波. 月基对地观测跟踪转台设计与分析[J]. 光子学报,2010,39(12):2215-2219.
LI ZH H, CH B. Design and analysis of lunar-based tracking turntable for earth observation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010,39(12):2215-2239. (in Chinese)
- [5] 王智,李朝辉. 月基极紫外相机光机结构设计[J]. 光学精密工程,2011,19(10):2427-2433.
WANG ZH, LI ZH H. Design of optical-mechanical structure for Lunar-based extreme ultraviolet camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(10):2427-2433. (in Chinese)
- [6] 王智,王忠素. 月基极紫外相机反射镜与探测器间支撑结构[J]. 仪器仪表学报,2013,34(1):57-64.
WANG ZH, WANG ZH S. Supporting structure between reflection mirror and detector in lunar-based extreme ultraviolet camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013,34(1):57-64. (in Chinese)
- [7] 李治国,高立民,张博妮,等. 空间光电跟踪系统动量平衡设计与试验[J]. 光学精密工程,2013,21(1):62-68.
LI ZH G, GAO L M, ZHANG B N, et al.. Design and experiment of momentum balance wheel for optoelectric tracking gimbals [J]. *Opt. Precision*

- Eng. ,2013,21(1):62-68. (in Chinese)
- [8] 陈涛,陈娟,王旭超. 光电经纬仪跟踪架结构模式浅析[J]. 吉林工学院学报,2002,23(3):19-22.
CHEN T, CHEN J, WANG X CH. A simple analysis on the gimbal modes in the optoelectronic tracking system [J]. *Journal of Jilin Institute of Technology*, 2002, 23(3): 19-22. (in Chinese)
- [9] 张景旭. 大型跟踪架方位轴系的研制[J]. 光学精密工程, 1996, 4(2): 73-77.
ZHANG J X. Development of vertical axial system for large tracking and pointing mount [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(2): 73-77. (in Chinese)
- [10] 李为民,王海涛. 轴向定位预紧轴承刚度计算[J]. 河北工业大学学报, 2001, 30(2): 15-19.
LI W M, WANG H T. Rigidity calculation of axial position preload bearings[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2001, 30(2): 15-19. (in Chinese)
- [11] 李书胜,吴文清,杨献伟. 月基望远镜热设计及热分析[J]. 光学技术, 2011, 37(1): 80-84.
LI SH SH, WU W Q, YANG X W. Thermal design and thermal analysis for the moon-landed telescope [J]. *Optical Technique.*, 2011, 37(1): 80-84. (in Chinese)

作者简介:



黄 静(1978—),女,陕西西安人,博士,副研究员,主要研究方向为光电检测技术及精密机械设计。E-mail: huang@opt. ac. cn.



刘朝晖(1965—),男,陕西西安人,研究员,博士生导师,主要从事光学工程方面的研究工作。lzh@opt. ac. cn.

(版权所有 未经许可 不得转载)