

文章编号:1004-4213(2010)12-2215-5

月基对地观测跟踪转台设计与分析

李朝辉,陈波

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

摘 要:针对登月过程严酷的力学条件、月球表面复杂的环境特征以及严格的重量要求,设计了一种可适用于月基观测的跟踪转台.该转台主要由水平轴系及驱动机构和垂直轴系及驱动机构组成,采用霍尔元件作为位置检测元件,其综合指向准确度 $\leq 0.1^\circ$.基于有限元分析方法确定转台结构方案、优化主要支撑件结构及合理选材,并对驱动机构与轴系对转台刚度、温度适应性和指向准确度的影响做了深入分析与计算.同时进行了整机的力学模拟试验和运动机构的高低温试验,一阶谐振频率为 49 Hz,在 $-40^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$ 温度范围内工作正常.结果表明转台各项性能指标满足工程任务要求,具有结构紧凑、可靠性高、重量轻的特点.

关键词:跟踪转台;月基;对地观测

中图分类号:TP702

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103912.2215

0 引言

嫦娥工程需完成一系列工程目标和科学目标,其中包括:1)开展月球科学探测;2)构建月球探测航天系统;3)获取月球表面三维影像;4)探测地月空间环境,等等^[1-2].其中,对地球等离子体层极紫外辐射进行探测是非常重要的一个科学目标,这对于地球天气和空间天气研究具有非常重要的意义.

月基对地观测极紫外(Extrem Ultraviolet, EUV)相机,将对地球周围等离子体层产生的 30.4 nm 辐射进行全方位、长期的观测研究.由于地月轨道的相对变化,为确保 EUV 相机成像单元的对地指向,需要采用二维转动机构来实现对地球的跟踪.国内外关于深空探测应用的跟踪平台研制的报道非常少.

EUV 相机二维跟踪指向转台的设计首先必须考虑航天环境的影响.月球距离地球为 35.64×10^4 km(近地点) $\sim 40.67 \times 10^4$ km(远地点),探月卫星需要飞行 10 天左右,要经历发射段、地月转移段、环月段和着陆段的剧烈冲击与振动,因此它的力学环境条件非常严峻,EUV 相机必须要有经受多次加速、减速的能力;同时,温度环境条件也非常恶劣,月表受光照时温度最高超过 130°C ,背光时最低降至 -180°C ,而且还要经历月蚀低温的考验;另外,月基观测仪器对重量要求非常苛刻.

本文充分比较和分析了 EUV 相机二维转动机

构的不同方案,对转动机构进行了环境适应性设计,同时对于转台轴系、结构件、传动系统等各环节进行了轻量化设计考虑.

1 二维转台结构形式

1.1 技术指标

1) EUV 相机整机质量: ≤ 14 kg; 2) 谐振频率:整机 ≥ 70 Hz(发射方向), ≥ 47 Hz(垂直发射方向); 3) 俯仰转动范围: $\pm 45^\circ$; 4) 方位转动范围: $\pm 50^\circ$; 5) 存储温度范围: $-110^\circ\text{C} \sim +110^\circ\text{C}$; 工作温度范围: $-50^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$; 6) 工作方式与寿命:每天调整 0.5° ,提供到位信号,工作一年; 7) 综合指向准确度: 0.1° .

1.2 结构形式确定

二维指向机构要实现成像系统俯仰和方位两自由度的调整.综合考虑工程总体对 EUV 相机的技术要求,采用传统的地平式俯仰、方位转动轴系,其综合性能(体积、可靠性、重量、指向跟踪)较好,是跟踪指向机构的首选结构^[3-4].

地平式跟踪转台结构模式又称俯仰-方位模式^[5],是两轴地基式结构,由绕水平线和垂直线旋转的俯仰轴系和方位轴系统组成.地平式跟踪转台又分为基本地平式结构和复合轴地平式结构.基本地平式适用于中等准确度的跟踪或者低速目标的跟踪,复合轴地平式适用于高准确度快速跟踪. EUV 相机二维转台采用基本地平式方案足以满足综合指向准确度的要求.整机结构如图 1.

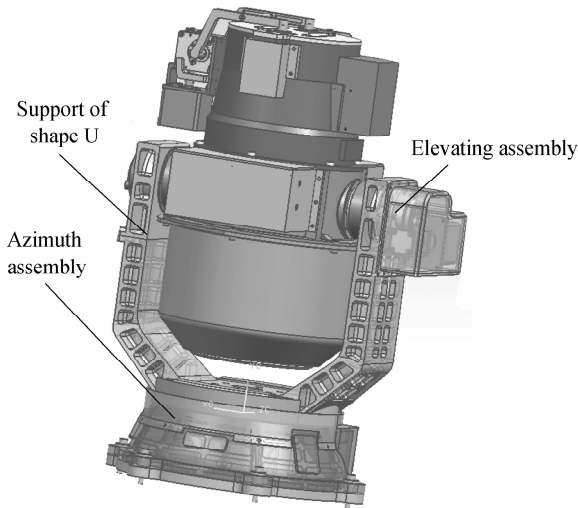


图1 EUV相机总体布局
Fig.1 Configuration of the EUV platform

对于整机的结构布局,应尽量使相机的质量分布靠近安装平台,使质心降低;同时,还要采取对称结构和合理布置各组件,使相机转动惯量尽量小,以增加相机结构的稳定性,提高相机的动态特性。

1.3 转台轴系环境适应性设计

转台系统设计的主要约束是温度、力学和重量,三者在一定程度上互相矛盾,温度变化范围大要求在材料选择上相互匹配;力学工况要求材料的强度和比刚度高,以及增加结构的重量;质轻要求选择密度小的材料并轻量化设计,这无疑会损失强度与刚度。因此,需要折中考虑以实现最优的转台系统。

转台的垂直轴系承载整机的自重和外载荷,直接决定方位转动的谐振频率。其轴系和传动系统是影响结构刚度和跟踪性能的关键环节,需要合理选材和确定结构方案。

垂直轴系可在非标准散装轴系和标准轴承轴系二者之间选择。散装轴系由于内外圈可根据使用要求选择合适的材料,并可进行高精度加工,因而刚性好,回转准确度高;标准滚动轴承轴系具有装配工艺性好,结构简单,对温度变化不敏感的优点。

EUV相机转台的跟踪准确度要求不是特别高,采用标准轴承轴系可满足技术指标要求。但需要选用特殊设计制造的低温轴承,经防冷焊固体润滑处理,以满足月基环境条件下的使用要求。

标准轴承轴系又有不同的结构形式:1)径向限位的深沟球轴承与轴向止推轴承;2)同时具有径向和轴向限位的一对角接触球轴承;3)交叉滚子轴承。

其中,第2)方案结构紧凑、重量轻、摩擦力矩小、温度适应性好,如图2。为进一步提高径向刚度,在轴的下端放置一个辅助支撑轴承。该轴承可自由移动,以补偿温度变化带来的影响。

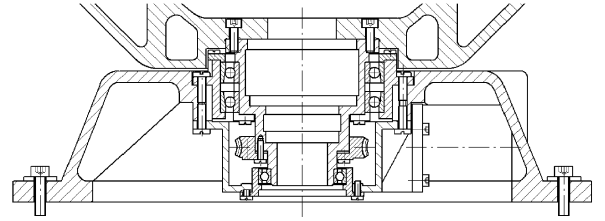


图2 垂直轴系结构
Fig.2 Design of the vertical axis

增大轴承直径可提高抗倾覆力矩,提高整机的谐振频率,但重量也相应增加。在强度、刚度和重量之间综合考虑,确定了轴承内径 $d=75\text{ mm}$ 。

在材料选择上,与轴承内、外环接触的部分用钛合金,其线胀系数与轴承钢接近,可在大温差下运转顺畅。垂直轴底座采用镁合金,以满足重量的要求。

俯仰转动机构由水平轴系、传动机构和支撑框架组成。水平轴系与垂直轴系结构形式相同,一端采用一对角接触球轴承支撑,另一端采用深沟球轴承,可沿轴线自由移动,以补偿温度变化的影响。

支撑框架采用U形支架结构形式,外形尺寸最小。U形支架是承受EUV相机主体和水平轴组件的主要受力部件,并且还用于保证EUV相机成像单元正确工作的空间位置。因此,U形支架选择镁合金,其优点是密度小,缺点是弹性模量低,线胀系数大。在结构设计上要克服其缺点,优化U形支架横截面,采用方形加强肋,尽量提高U形支架本身的特征频率。

2 传动机构设计

俯仰、方位旋转传动机构方案有力矩电机、谐波减速器、齿轮副、蜗轮副四种结构形式可供选择。

2.1 电机选择

力矩电机由于质量大,并难以实现对EUV相机指定位置的锁定,决定采用步进电机作为动力源,其优点是不受电压、电流和环境温度变化的影响。电机输出力矩越大,体积和重量越大。因此,应准确计算负载力矩,做到力矩储备合理。

选用空间应用型的四相步进电机,俯仰转矩需求最大,其主要由四部分构成:

1)启动力矩

$$M_s = J_1 \epsilon K \quad (1)$$

式中, J_1 为俯仰转动惯量 $\leq 0.03\text{ Kg} \cdot \text{m}^2$, ϵ 为角加速度 $\leq 5^\circ/\text{s}^2$, K 为余量系数,取5计算得 $M_s = 0.015\text{ N} \cdot \text{m}$

2)摩擦力矩

$$M_f = P_1 f_1 d_1 \quad (2)$$

P_1 为俯仰回转部位重量 10 kg ; f_1 为摩擦系数

0.004; d_1 为轴承滚道直径 60 mm.

计算得 $M_l = 0.024$

3) 镜筒静平衡误差带来的负载转矩

如果转动中心误差 20 mm, 则负载转矩 (N·m) 为

$$M_l = F \cdot l = 5 \cdot 0.02 = 1 \quad (3)$$

4) 总的转矩

$$M_1 = M_s + M_s + M_l = 1.04 \quad (4)$$

考虑速比和力矩应具有一定的储备, 确定电机的保持转矩为 1.0 kg·cm (100 mN·m). 该型号电机重量 ≤ 0.3 kg.

2.2 传动机构温度适应性设计

蜗轮蜗杆副传动结构紧凑, 工作平稳可靠, 冲击小, 负载能力大, 能获得较大传动比, 并且可以实现 EUV 相机主体在任意指定位置的锁定, 而谐波减速器在极端温度条件下的可靠性还有待试验和实际应用来检验, 所以采用蜗轮副传动机构. 为防止啮合点的真空冷焊, 需要做固体润滑处理. 通过合理选择几何参量、变位系数、节点位置, 以改善其啮合特性.

蜗轮蜗杆副的设计主要考虑如何保证在较大的温度变化范围下机构正常运转, 以及在 ± 110 °C 的存储温度范围内机构中的部件不失效. 另外, 还要有足够的强度和刚度, 能够满足冲击、振动条件下机构自锁的要求. 设计上从以下几方面采取措施.

在加工和装配过程中, 对蜗轮蜗杆副的啮合侧隙、中心距、径向跳动等技术指标要严格控制, 以保证温度变化对运转机构产生均匀的影响. 一方面蜗轮副的侧隙要尽量小, 有利于提高机构的刚度, 另一方面还要保证温度变化后不卡死, 能够正常运转. 为此, 从材料匹配考虑, 蜗轮蜗杆采用同一种材料制造, 固定蜗轮蜗杆的箱体采用钛合金, 钛合金与蜗轮蜗杆材料的线胀系数接近, 相差 2×10^{-6} mm/°C, 这样, 在 ± 100 °C 温差范围内, 俯仰和方位蜗轮副的中心距变化分别为: 0.007 mm, 0.004 5 mm. 该变化量处于加工装配的误差范围之内, 不会对转动的平稳性、灵活性带来较大影响.

2.3 轴系刚度分析与设计

竖直轴和水平轴组件的性能在很大程度上决定了整机的谐振频率. 由于跟踪转台主要在振动冲击、大温差、低速条件下工作, 因此要求轴系具有较高的刚度和低摩擦的特性.

竖直轴和水平轴均采用一对角接触球轴承面对面配对安装, 与深沟球轴承组合使用, 提高整个轴系抗倾覆力矩的能力.

采用定位预紧来提高轴系的旋转准确度和刚度. 预紧载荷的大小, 应根据载荷情况和使用要求确

定. 预紧过轻, 轴系刚度不足; 预紧过重, 将使轴承的摩擦增大, 温度升高, 轴承寿命降低.

在轴向预紧力作用下, 角接触球轴承的轴向刚度可按式(5)近似计算^[8]

$$K_a = 6.86 (Z^2 D_w \sin^5 \alpha_0)^{1/3} F_{a0}^{1/3} \text{ (N/}\mu\text{m)} \quad (5)$$

径向刚度为

$$K_r = 1.716 4 D_w^{1/3} Z^{2/3} \frac{\cos^2 \alpha}{\sin^{1/3} \alpha} F_{a0}^{1/3} \quad (6)$$

式中: F_{a0} 为轴向预紧力 (N); Z 为单套轴承刚球数目; D_w 为刚球直径 (mm); α 为初始接触角 (°). 轴向预紧力按 10 kg 计算, 轴向刚度为 $K_a = 57$ (N/ μ m), 径向刚度为 $K_r = 176$ (N/ μ m).

实际应用中, 由于轴承座、轴、结构件和装配准确度的影响, 计算值会偏高. 实际经验对于装配很重要, 通过修磨垫片, 保证配对轴承间受力均匀, 实现等刚度的要求, 当轴系装配好以后, 转动手感有明显阻力, 但无发滞停顿或时松时紧的感觉, 此时为最佳状态.

2.4 综合指向准确度

影响指向准确度主要因素有: 轴系的晃动误差, 步进电机步进误差, 蜗轮副的传动误差和霍耳元件的到位误差.

1) 轴系的晃动误差

采用 C 级轴承, 同时考虑到 U 形支架的变形, 以及加工同心度、配合间隙等因素, 俯仰轴系的最大晃动误差为

$$\Delta_{a_1} = (0.01/L_1) \times \rho = 8.5''$$

总的径向间隙小于 0.02 mm, 两轴承跨度 $L = 240$ mm.

方位轴系的最大晃动误差为

$$\Delta_{e_2} = (0.01/L_2) \times \rho = 34''$$

2) 步进机误差

电机按四相八拍方式工作, 步距角为 0.9°. 如果传动机构的速比为 60, 则转动控制准确度为: $\Delta_{a_2} = \Delta_{e_2} = 0.015^\circ$.

3) 蜗轮副的传动误差

影响蜗轮副传动准确度的误差主要有蜗轮副切向综合误差、装置的加工误差和蜗轮副圆周侧隙引起空回误差.

考虑转台跟踪指向准确度要求不是很高, 采用 6 级准确度的蜗轮蜗杆, 蜗轮副的传动误差 ≤ 0.01 mm, 则俯仰、方位指向误差分别为 $\Delta_{a_3} = 79''$ 和 $\Delta_{e_3} = 54''$.

4) 霍耳元件的到位误差

霍耳元件的到位误差 ≤ 0.1 mm, 通过采用多个霍耳元件提供位置反馈信号和软件细分补偿后, 根

据摆放直径的不同,霍耳元件在俯仰、方位的定位准确度为 $\Delta_{a_1} = 240''$ 和 $\Delta_{e_1} = 162''$

因此俯仰方向指向准确度为

$$\Delta_e = \sqrt{\Delta_{e_1}^2 + \Delta_{e_2}^2 + \Delta_{e_3}^2 + \Delta_{e_4}^2} = 0.07^\circ \quad (7)$$

同理,方位方向指向准确度为 $\Delta_a = 0.05^\circ$,因此可满足综合指向准确度 $\leq 0.1^\circ$ 的技术指标要求。

3 工程分析

3.1 模型建立

在建立有限元模型时,将镜筒及成像单元的总重量当作集中质量处理,去掉一些对分析影响作用小的结构,将水平、垂直轴的轴承内、外圈连接关系假设为刚体,结构间的间隙也做了一定的简化处理。

3.2 模态分析

将材料密度、弹性模量和泊松比等相关参量代入有限元模型,得出 EUV 相机跟踪转台的前三阶频率及振型,如表 1 和图 3。从结果可以看出,相机基频远离着陆器基频 (< 17 Hz),不会与发射时的振动频率相耦合而产生共振。

表 1 EUV 相机结构基频

Table 1 Natural frequencies and the vibration models of EUV platform

Frequency /Hz	Description of vibration model	Nephogram of vibration model
1	Rotation for axis z	Fig. 3 (a)
2	Rotation for axis y	Fig. 3 (b)
3	Rotation for axis x	Fig. 3 (c)

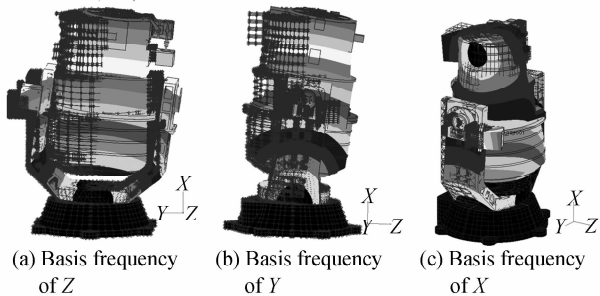


图 3 EUV 相机三个方向基频振型

Fig. 3 Basis frequency of three directions for EUV

表 2 和表 3 分别给出了 EUV 相机在三个方向正弦、随机振动载荷作用下的最大应力及最大加速度响应情况。计算安全裕度 M. S. 采用材料的微屈服极限 $\sigma_{0.2}$,并要求 $M. S. > 0$ 。X 代表发射方向,Y、Z 为垂直于发射方向。

从计算结果可以看出,正弦振动时结构输出响应较大,这一方面是由于有限元模型对于转动机构和间隙结构的仿真还不是很准确;另一方面,接触应力存在于非常小的区域,即使它的计算应力值达到材料的流动极限,也只不过在这局部区域内发生塑性变形,结构零部件不能被破坏。所以,尽管在 Y、Z

表 2 三方向正弦响应

Table 2 Response to sine amplitudes of three directions

Loading direction	Input acceleration (30~100 Hz)/g	Position of max stress	Safety Margin M. S.	Zoom of output acceleration
X	15	Top of U support	3.35	1.39 \times
Y	6	Connecting of U support and azimuth axis	0.60	24.67 \times
Z	6	Connecting of U support and azimuth axis	0.75	26.40 \times

表 3 三方向随机响应

Table 3 Response to random amplitudes of three directions

Loading direction	Input acceleration ($g \cdot \text{rms}^{-1}$)	Position of max stress	Safety Margin M. S.	Zoom of output acceleration
X	20.3	Top of U support	2.36	2.92 \times
Y	16	Connecting of U support and azimuth axis	1.07	1.27 \times
Z	16	Connecting of U support and azimuth axis	1.50	2.07 \times

方向正弦振动载荷作用下,结构响应相对较大,但材料安全裕度值 $M. S. > 0$,满足某空间探测器设计与建造规范的要求。

3.3 试验验证

3.3.1 力学试验

将力学试验件放置在振动台上,按空间环境实验条件进行振动量级逐增的 3 个方向的正弦扫描振动。在实验过程中最大响应发生在 U 形支架上部,最大响应为 150 g,放大倍率为 25 倍,力学试验件三个方向的基频分别为 49.3 Hz、53.7 Hz 和 77.6 Hz,力学模拟件完好无损。

3.3.2 温度适应性试验

为测试其温度适应能力,高、低温箱的试验温度范围为 $-50^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$,每 5°C 进行一次运转测试。试验结果为俯仰轴系和方位轴系在 $-40^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$ 范围内运转正常,在 $-50^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$ 运转略有卡滞。

4 结论

EUV 相机跟踪转台是月基对地观测极紫外相

机的关键部件之一。根据任务要求和技术指标,设计了一种由俯仰转动组件和方位转动组件组成的二维跟踪转台。分析和环境模拟试验表明:在力学性能方面该转台具有较好的刚度,一阶谐振频率大于 49 Hz;在温度特性方面可在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内正常工作;在强度、刚度和体积、重量之间合理优化。该转台还适用于深空探测中对光学成像系统光轴指向的调整。

参考文献

- [1] YE Pei-jian, SUN Ze-zhou, RAO Wei. Research and development of chang'e21 [J]. *Spacecraft Engineerin*, 2007, **16**(6):9-15.
叶培建,孙泽洲,饶伟.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.
- [2] OU-YANG Zi-yuan, LI Chun-lan, ZOU Yong-liao, et al. The scientific object of the first phase project of Chinese lunar exploration[J]. *Spacecraft Engineering*, 2005, **14**(1): 1-5.
欧阳自远,李春来,邹永廖,等.我国月球探测一期工程的科学目标[J]. *航天器工程*,2005,**14**(1):1-5.
- [3] CHEN Bo, NI Qi-liang. Development of a space soft X-ray and EUV normal incidence telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(4): 315-319.
陈波,尼启良.空间软 X 射线/极紫外波段正入射望远镜研究[J]. *光学精密工程*,2003,**11**(4):315-319.
- [4] ZHANG Rui, CHEN Zhi-yuan, YANG Shi-mo, et al. Optimize and redesign the primary mirror supporting system of space solar telescope[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 23-26.
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.
- [5] CHEN Tao, CHEN Juan, WANG Xu-chao. A simple analysis on the gimbal modes in the optoelectronic tracking system[J]. *Journal of Jilin Institute of Technology*, 2002, **23**(3): 19-22.
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.
- [6] HU Peng-hao, FEI Ye-tai, HUANG Qi-sheng. The determination of optimum working windage about rolling bearing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, **23**(5): 33-35.
胡鹏浩,费业泰,黄其圣.滚动轴承最佳工作游隙的确定[J]. *仪器仪表学报*,2002,**23**(5):33-35.
- [7] HAO Bin, WANG Hu-shun. Development of high-precision two-D sewing mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001,**30**(1): 117-119.
郝斌,王胡顺.高准确度二维指向摆镜的研制[J]. *光子学报*, 2001,**30**(1):117-119.
- [8] CHEN Rong-li, ZHAO Xin-min, XIE Yong-jie, et al. Engineering analysis on high resolution space camera[J]. *Acta Photonica Sinica* 2005, **34**(2):267-271.
陈荣利,赵信民,解永杰,等.高分辨率空间相机的工程分析[J]. *光子学报*,2005,**34**(2):267-271.
- [9] GAN Zhi-hong, ZHANG Bao, HAN Wan-jiu. Engineering analysis of airborne optoelectronic platform frame structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2441-2446.
甘至宏,张葆,撤芑芑.机载光电稳定平台框架结构工程分析[J]. *光学精密工程*, 2008,**16**(12):2441-2446.

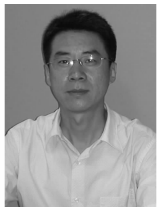
Design and Analysis of Lunar-based Tracking Turntable for Earth Observation

LI Zhao-hui, CHEN Bo

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

Abstract: Aiming at the mechanical condition during the moon landing, complex environment lunar surface features, and strict weight requirements, a tracking turntable for lunar-based earth observation was designed which consists of two main components: horizontal shaft & elevation actuator modules, and vertical shaft & azimuth actuator modules. In addition, Hour sensors were selected as the rotation position detector of elevation and azimuth shafts, and the pointing accuracy is better than 0.1° . An effective tracking turntable design configuration, optimized structure of supporter and selection of material were performed based on the finite element analysis method, and the stiffness of axis system and transmission accuracy of actuator module were analyzed to obtain the trade-off design with better capabilities of deep space environmental adaptability. To qualify the design for the specific mission requirements, the vibration and thermal vacuum tests were carried out with the result of 41 Hz eigenfrequencies and the required running temperature changing range ($-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +80\text{ }^{\circ}\text{C}$). The experimental results show that the proposed design has advantages of compact volume, light weight and high reliability.

Key words: Tracking turntable; Lunar-based; Earth observation



LI Zhao-hui received the Ph. D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, in 2001. Now he is an associate research fellow and his research interests focus on optoelectricity instrument design and analysis.