

一种大型单轴转台的研制

于夫男 徐抒岩 匡也

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:为配合机器人对1m口径在轨组装空间望远镜地面演示原理验证样机中主镜阵列的子镜模块组装,研制了一套大型单轴转台。首先,简要介绍转台的应用场景,并对单轴转台的系统总体构成做详尽的说明,确定了转台主要零部件的材料。其次,依据光学系统的光学元器件的接口需求,对转台的关键零件——台面进行了详细的结构设计,利用有限元模拟仿真方法分析了台面在负载下的力学变形。结果表明:在1g、-2℃工况及1g、2℃工况下,台面的最大变形量为0.04mm,能够满足最大变形控制在0.1mm的光学指标要求。最后,对转台中的传动部件蜗轮蜗杆进行理论计算、设计,并对转台中的相关元器件进行了选型,依托结构设计结果,完成了单轴转台的加工、装调。最终结果表明,转台能够很好地满足使用要求,结构设计合理。

关键词:在轨组装空间望远镜 子镜 转台 有限元分析

DOI:10.16107/j.cnki.mmte.2020.0567

在轨组装空间望远镜(On-orbit Assembly Space Telescope)是将模块化设计的超大口径望远镜组件通过一次或多次发射送入预定轨道,并在轨道上完成整机组装。超大口径望远镜的组装机建造方式能够突破单体大口径主镜的制造瓶颈和火箭运载能力的制约。为突破在轨组装望远镜的关键技术,研制了1m口径在轨组装空间望远镜的地面演示原理验证样机,机械人在单轴转台的配合下可完成主镜中子镜模块的组装。

根据不同的应用场景,采用不同的转台设计方案。例如,对于精密跟踪指向功能的转台,通常采取直驱力矩电机+编码器的形式^[1-4]。直驱的优点在于反应灵敏、驱动力矩大、无需配套相关减速器、结构简单以及低速稳定性高,编码器则实现跟踪转轴的位置信息反馈。又如:对于要求具备定点、定位功能的转台,一般采用步进电机+减速器(如蜗轮蜗杆、谐波减速器等)+编码器的方式^[5-6]。步进电机的脉冲数和频率直接决定输出转速、停止位置,每接收到一个脉冲信号,电机轴便转动一个步距角,因此能够达到准确定位的作用。配备减速器既可以放大输出力矩,又能够提高驱动精度。对于要求实现自锁功能的转台,减速器优先选择蜗轮蜗杆。依据样机中子镜模块的组装流程特点,围绕主要零部件的结构设计、传动组部件的理论计算、元器件选型等方面,研制了一种大型单轴转台。

1 总体方案

1m口径在轨组装空间望远镜的地面演示原理验证样机主要包括望远镜分系统和机械人分系统两大部分。机械人通过与单轴转台配合对望远镜系统中的子镜模块进行组装。如图1所示,机器人分系统由机械臂、抓取机构和手眼相机组成。其中,机械臂采取工业机械臂,抓取机构和手眼相机通过自研完成。抓取机构上集成有力矩传感器,与手眼相机一起实现机械人的“手眼”功能。望远镜采取同轴反射式系统,主要由拼接式主镜、次镜组件、校正透镜组件、

单轴转台、定位锁紧机构以及主动光学波前传感组件等构成,其中主镜由机械人组装拼接而成。单轴转台是望远镜模块组装的基础,也是装配光学元器件和后端主动光学检测组件的基准。通过单轴转台的120°转动,配合机械臂对3组子镜模块进行手眼智能一体化组装。它的主要功能有:为主镜阵列的子镜模块提供支撑;为次镜支撑杆组件提供装配支撑平台;为校正透镜组支撑提供安装平台接口和基础;满足光学系统组件的整体旋转功能。

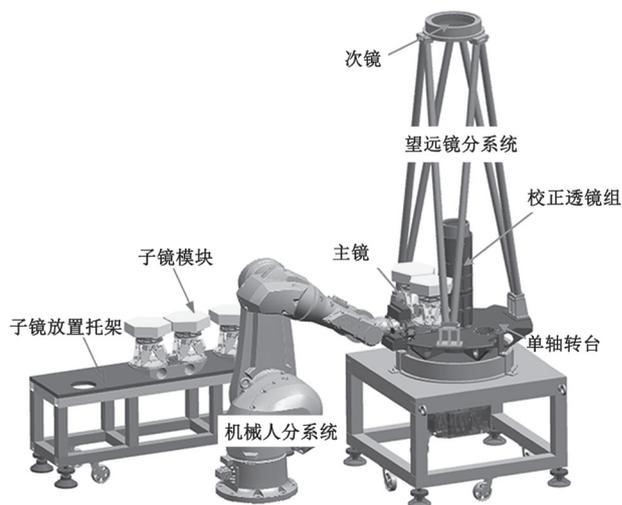


图1 系统总体

转台结构系统如图2所示。综合考虑系统整体运行的稳定性、光学元器件装调空间布局分配、驱动性能以及经济性,采用步进电机配合蜗轮蜗杆减速机构的方式为转台提供动力源。蜗轮蜗杆提供转台运转到指定方位后的自锁功能,通过转台和机械手臂配合能够使得机械手臂上的手眼相机定位转台上的靶标即可。转台系统不需要高精度编码器等高精度定位元器件,采取光电开关实现转台转角的反馈。

系统主要由支撑平台、转台轴承、蜗轮蜗杆、步进电

机、遮尘罩、支撑框架、支撑地脚和万向轮等组成。其中，支撑平台作为系统光学元器件的装配基准，采取铸铝材料加工而成；遮尘罩采用铝合金；连接件（轴）和支撑件由 45 钢制成；支撑框架通过直角方管钢焊接而成，其顶部焊接厚钢板作为支撑的基准；步进电机选取 MOTEC 公司生产的两相混合式步进电机 SM2-985；轴承选用大型混合轴承，其相当于由两个圆柱滚子推力轴承和一个圆柱滚子普通轴承构成，能够承受旋转转台轴向、径向力以及各项弯矩，保证系统的平稳运行，支撑地脚和万向轮能够实现转台系统的平稳放置和自如移动，同时框架两侧设置吊环，易于位置的大范围转移。

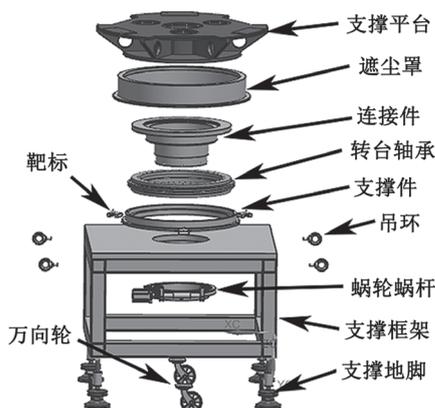


图 2 1m 单轴转台构成

2 结构设计

2.1 台面设计

转台中支撑平台是所有光学元器件安装的基准，为主镜子模块、次镜、前透镜组、后透镜组、模块锁紧机构以及后端主动光学检测组件等提供装配接口。在保证足够强度的基础上，需要进行轻量化设计，减小其重量。为满足光学元器件间空气间隔要求以及给予子镜模块锁紧机构留出装配空间，支撑平台采用两层设计，采取铸铝材料铸造而成，如图 3 所示。

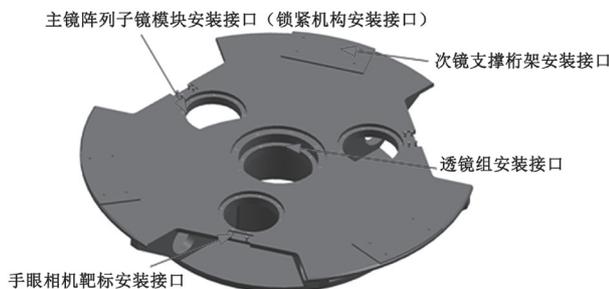
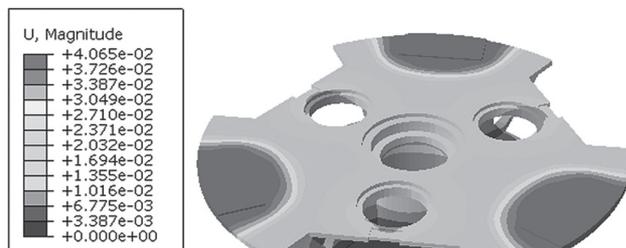


图 3 支撑平台

转台台面在上述光学元器件组件重力负载作用下的结构变形应控制在 0.1mm 内，以满足组装后的各子镜初始状态位于系统波前传感的捕获范围内，实现主动光学的初始调测反馈。利用有限元仿真方法分析载荷下的台面变形，计算在光学元器件组件重力载荷和 $\pm 2^\circ\text{C}$ 温度载荷下的变形情况，评价支撑平台结构设计的合理性。光学元器件组件

的重力载荷通过 MPC 耦合模拟，以集中力的形式施加到装配面上。有限元变形云图^[7-8]如图 4 所示。



(a) 光学元器件组件重力载荷、+2°C 温度载荷下变形



(b) 光学元器件组件重力载荷、-2°C 温度载荷下变形

图 4 支撑平台变形结果

从图 4 分析结果可知，两种工况下的最大变形量约为 0.04mm，满足小于 0.1mm 变形的指标要求，支撑平台结构设计合理。

2.2 传动设计

转台的意义在于配合机械臂进行主镜子镜模块安装。主镜子镜模块呈 120° 均布，假设初始位置处于一个安装位置上，则转台的运动范围在 $0^\circ \sim 240^\circ$ 即可。假设从一个拼接配合点至另一个拼接配合点的运动时间为 1min，则其平均速度约为 0.03490rad/s 。设在 5s 内整体旋转机构能够从静止状态达到平均速度，则其加速度 $\alpha=0.006981\text{rad/s}^2$ 。

因转台负载为旋转对称形式，故在其运动过程中所需的扭矩主要由：旋转加速度和滚动摩擦两部分组成。

旋转加速度所引起的力矩为：

$$M_a = I \times \alpha \quad (1)$$

式中， I 为负载惯性矩，转台的负载主要为：主镜、次镜以及校正透镜等组件。由 UG 计算，得其值为 $70.0059\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ； α 为角加速度，故 $M_a=0.4887\text{N}\cdot\text{m}$ 。

整体旋转的摩擦力矩主要在系统转台轴承处产生。根据转台轴承的特性参数，它的启动摩擦力矩不大于 $140\text{N}\cdot\text{m}$ 。由于在运行过程中的摩擦力矩要低于启动摩擦力矩，因此系统选用 $140\text{N}\cdot\text{m}$ 作为摩擦力矩参与设计。

综合上述考虑，取电机的安全系数为 1.5，蜗轮所需的扭矩为：

$$M = k(M_a + M_f) = 210.733\text{N}\cdot\text{m} \quad (2)$$

故蜗轮输出功率为：

$$P = T\omega = 210.7331\text{N}\cdot\text{m} \times 0.03490\text{rad/s} = 7.3546\text{W} \quad (3)$$

由于蜗轮蜗杆传递功率适中且运动较为平缓，所以选

取蜗杆材料为45钢做调质处理,硬度为28~32HRC,蜗轮材料选取ZQSn10-1即ZCuSn10Pb1^[9]。设计蜗轮蜗杆预期使用寿命4000h,蜗轮转速为 $n_2=0.33r/min$,则应力循环次数 $N_2=79200$ 。转台需提供自锁功能,因此选定蜗杆头数 $Z_1=1$ 。考虑到负载功率,选取蜗轮齿数 $Z_2=120$ 。按照齿面接疲劳强度计算:

$$m^2 d_1 \geq 9KT_2 \left(\frac{Z_E}{Z_2 [\sigma]_H} \right)^2 \quad (4)$$

式中,载荷系数 $K=K_A K_V K_\beta=1$, $T_2=210.7N \cdot m$, $Z_E=155\sqrt{MPa}$ 。带入式(4),得 $m^2 d_1 \geq 11.62mm^3$ 。根据

接触强度要求,选择 $m=4$, $d_1=40$,则 $d_2=mz_2=480mm$ 。

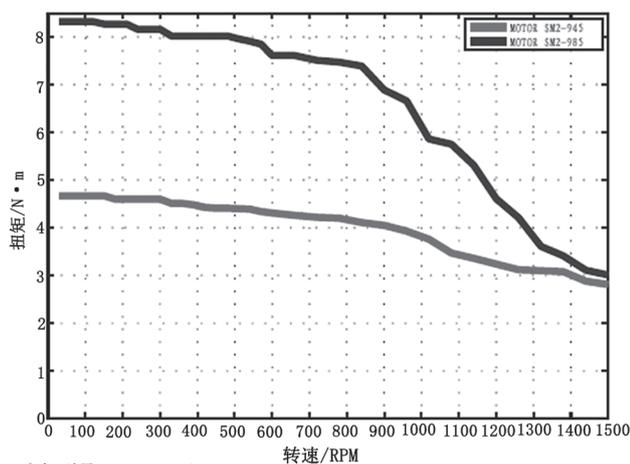
齿根弯曲疲劳强度验算如下:

$$\sigma_F = \frac{1.6KT_2 Y_{Fa2} Y_\beta}{m^2 d_1 z_2} < [\sigma]_F \quad (5)$$

式中,计算并根据标准得 $Y_{Fa}=2.063$, $Y_\beta=0.9524$, $[\sigma]_F=39.7635MPa$,计算得 $\sigma_F=8.6260MPa < [\sigma]_F$,验证结果表明合格。由于涡轮蜗杆在工作过程中功率较低且相对运动速度较慢,因此散热不予考虑。根据以上的计算可得,蜗杆输入参数为 $T_1=3.37N \cdot m$, $n_1=40r/min$, $P=14.12W$,据此选取MOTEC公司生产的两相混合式步进电机SM2-985。它的参数如表1所示,矩频曲线如图5所示。

表1 SM2-985电机参数

电机型号	法兰盘/mm	保持扭矩/N·m	额定电流	转动惯量/(g·cm ²)	重量/kg	电机长度L/mm	配套驱动器
SM2-985	86	8.5	4.5	3200	4.4	120	SD2118/2228/2228B



电机型号: SM2-985/945
驱动器型号: SD2228
供电电压: 220VAC
测试条件: 细分设置1000P/R
驱动器电流: 5.6A

图5 电机矩频曲线

基于转台的结构设计及其相关电子元器件的选型,经过近两个月的零部件加工和转台系统的装配、测试,结果表明,转台运动平顺、无卡滞现象,光电定位反馈正常工作,最终完成了单轴转台的研制,如图6所示。

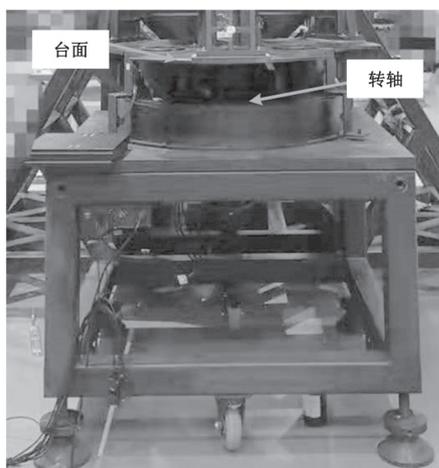


图6 单轴转台

4 结语

本文依据1m口径在轨组装望远镜地面演示原理样机的组装特点,研制了一套大型单轴转台,用以配合机器人对子镜模块的组装。对转台中的关键零部件台面进行结构设计与分析,并通过有限元模拟验证了其结构设计的合理性。基于理论计算对转台中的传动部件蜗轮蜗杆进行结构设计,最终确定了传动部件的结构参数。最终实物试验结果表明,转台能够很好地满足使用要求,结构设计合理。

参考文献

- [1] 宋兴, 杨建峰. RC光学系统的精密装调[J]. 光子学报, 2017, (S1): 1-4.
- [2] 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, (10): 2427-2433.
- [3] 王志. 小型双轴精密伺服转台设计研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.
- [4] 张玉良. 双轴转台伺服系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [5] 赵敏, 刘振兴. 基于嵌入式Linux的步进电机驱动程序设计[J]. 微计算机信息, 2008, (13): 113-114.
- [6] 刘明, 高辉文. 基于步进电机的转台驱动系统WDM驱动程序设计[J]. 测控技术, 2013, (8): 111-114.
- [7] 李秋红. 三轴转台有限元结构分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [8] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] 鄂中凯. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

Development of a large Single-axis Turntable

YU Funan, XU Shuyan, KUANG Ye

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

Abstract: A large single-axis turntable is developed to

collaborate closely with the robot to assemble the sub-mirrors of the Primary mirror array in the On-orbit assembly space telescope validation prototype. Firstly, the application scenario of the turntable is introduced briefly, and the structural system of the single-axis turntable is explained in detail, and the material of the main parts of the turntable is determined; Secondly, according to the interface requirements of the optical components of the optical system, a structural design of the table top, which is the key part of the turntable, is carried out in detail. The deformation of the table top under load is analyzed by using the finite element simulation method, the results show that the maximum deformation of the table top is 0.04mm under the working conditions of 1g, -2°C and

1g, 2°C, which can meet the optical index requirement that the maximum deformation is controlled within 0.1mm; Finally, the theoretical calculation and design of the transmission parts (worm and gear) in the turntable are carried out, and the relevant standard components in the turntable are selected, relying on the structural design results, the processing and installation of the single-axis turntable are completed, the final result shows that the turntable can meet the use requirements well and the structural design is reasonable.

Key words: On-orbit Assembly Space Telescope, sub-mirror, turntable, finite element analysis

(上接第 98 页)

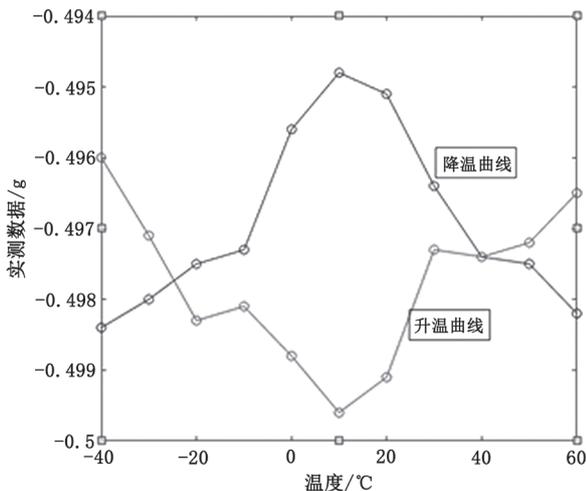


图 14 双补偿输出曲线

4 结语

通过升温与降温实验,找出加速度计样机零偏温漂效应与标度因数温漂效应,并通过升温、降温模型单独补偿的方式,有效减小了温漂误差。通过升温、降温过程判断,对样机做升降温双模型补偿,发现该补偿方法不仅可以有效减小温漂误差,还能较好地补偿温漂滞环对全温温漂误差的影响。受测试环境变化和样机敏感结构设计诱发应力延迟的存在,补偿函数模型具有一定的漂移特性。下一步准备通过探究优化结构设计和标准化测试环境等方式进一步提高补偿函数模型的标定精度,以期实现更高质的补偿。

参考文献

- [1] Xianshan Dong, Qinwen Huang, Wei Xu, et al. Research on Temperature Characteristic of Parasitic Capacitance in MEMS Capacitive Accelerometer[J]. Sensors and Actuators A, 2019,

(285): 581-587.

- [2] 黎飞. 封装胶的不均匀性对微加速度计零位温漂的影响研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [3] 刘云峰, 夏彭波, 董景新, 等. 一种电容式微加速度计标度因数温漂抑制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2018, (3): 366-369.
- [4] 董景新. 微惯性仪表——微机械加速度计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] 刘云峰, 方文斌, 董景新. 两位置法快速测定近钻头惯性测量模块的温漂模型[J]. 中国惯性技术学报, 2017, (2): 231-235.

Digital Processing of Temperature Drift of MEMS Closed-loop Accelerometer

YANG Xietian, LIU Yunfeng, DONG Jingxin

(Key Laboratory of High Precision Inertial Instrument and System Technology, Ministry of Education, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Due to the influence of temperature, the sensitive structure of MEMS capacitive accelerometer is easy to produce structural parameters and stress changes, and the circuit is easy to produce drift. The combination of the two causes the change of output voltage of the accelerometer, which makes the measurement of acceleration appear temperature drift error and temperature rise and fall hysteresis error. The key to improve the performance of the accelerometer is to suppress temperature drift. In this paper, based on the existing MEMS accelerometer sensitive structure chip and circuit, digital compensation after closed-loop is carried out. Experiments show that the method can effectively reduce the temperature drift error, reduce the amplitude of temperature drift hysteresis, and improve the performance of accelerometer.

Key words: MEMS capacitive accelerometer, temperature drift error, temperature drift hysteresis, digital compensation