

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.S.013

## 经纬仪高精度垂直移动系统设计

沈群, 汪亮, 张晓俊, 李圣山, 何振东, 单悌磊

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

**摘要:** 经纬仪高精度垂直移动系统作为自动化精度检测系统的重要组成部分, 主要用于搭载电子经纬仪进行垂直方向的一维运动, 需保证升降过程的稳定性。文中通过合理设计该平台的主承载系统、竖直升降系统、配重系统及控制系统, 保证了整体承载平台的可靠性和稳定性。系统定位精度及直线度等参数的测试结果表明试验数据符合预期指标。该系统已在航天器自动化精度检测系统中投入使用且运行稳定, 有力保证了检测系统的综合误差在允许范围内, 提升了检测系统的可靠性。

**关键词:** 经纬仪; 垂直移动; 定位精度; 可靠性

**中图分类号:** V465; TB22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)S-0078-05

### Design of High-Precision Vertical Moving System for Theodolite

SHEN Qun, WANG Liang, ZHANG Xiaojun, LI Shengshan, HE Zhendong, SHAN Tilei

(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract:** As an important part of the spacecraft automatic precision detection system, the theodolite high-precision vertical movement system is used to carry the electronic theodolite for one-dimensional movement in the vertical direction, and to ensure the stability of the lifting process. In this paper, the main bearing system, the vertical lifting system, the counterweight system and the control system are designed to ensure the reliability and stability of the overall bearing platform. The test results of system positioning accuracy, straightness and other parameters meet the expected indexes. The system has been put into use in the spacecraft automatic precision detection system and operates stably, which effectively ensures that the comprehensive error of the detection system is within the allowable range and improves the reliability of the detection system.

**Key words:** theodolite; vertical movement; positioning accuracy; reliability

航天器总装过程中需要保证各分系统设备坐标系与整星机械坐标系的方位角关系达到理论值要求, 一般通过经纬仪系统进行设备总装过程的精度检测及调整<sup>[1-4]</sup>。传统方法主要通过人工搬站、设站、调平、准直及互瞄等工作采集立方镜的方位角信息, 经软件解算得到姿态关系<sup>[5]</sup>。自动化精度检测系统解决了传统精度检测的缺陷, 减轻了人员劳动强度。

经纬仪高精度垂直移动系统作为卫星自动化精度测量系统的重要组成部分, 主要用于搭载电子经纬仪进行竖直方向的一维运动, 目的是为保证电子经纬仪在升降过程中的稳定性, 提升卫星总装精度测量效率及测量精度。经纬仪高精度垂直移动系统由主承载系统(含支撑底座、主体支撑花岗岩、斜拉杆、经纬仪安装座)、竖直升降系统、配重系统及控制系统等组成, 如图 1 所示。

**收稿日期:** 2021-05-10; **修订日期:** 2021-06-25

**通信作者:** 沈群, 男, 工程师, E-mail: 545516744@qq.com。

**引用格式:** 沈群, 汪亮, 张晓俊, 等. 经纬仪高精度垂直移动系统设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S): 78-82. SHEN Qun, WANG Liang, ZHANG Xiaojun, et al. Design of high-precision vertical moving system for theodolite[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S): 78-82.

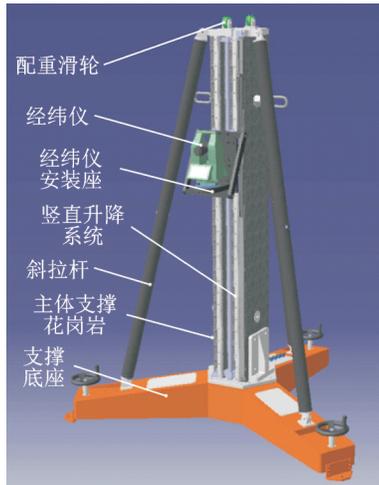


图1 经纬仪垂直移动系统结构示意图

Fig.1 Structure illustration of vertical moving system designed for theodolite

## 1 主承载系统

主承载系统包括支撑底座、主体支撑花岗岩、斜拉杆及经纬仪安装座等。

### 1.1 支撑底座

支撑底座(图2)是整个系统的基础,在其最外侧安装有3个可调整钼脚、用于系统整体调平并稳定支撑底座,保持设备精测时的稳定;在3个支脚处安装有3个万向轮,以方便经纬仪高精度垂直移动的移动;其顶面安装有花岗岩背架、辅助支撑杆及竖直直线导轨等用于实现经纬仪垂直方向移动;系统控制器件通过分体控制箱安装在3个支脚上方,以达到结构紧凑及使用方便的效果。

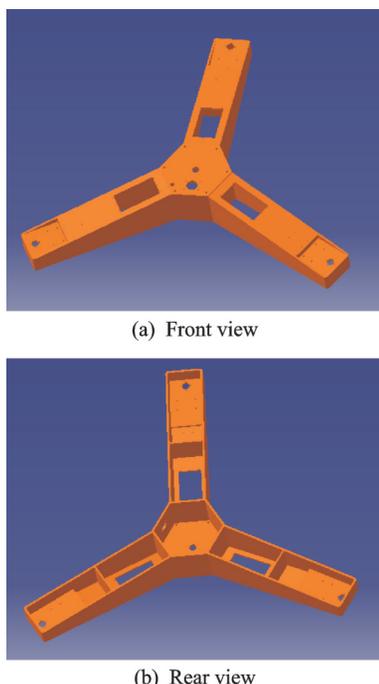


图2 支撑底座整体结构

Fig.2 Structure of support base

支撑底座呈“Y”字结构,相邻两支脚之间的夹角为 $120^\circ$ ,如图2所示,支撑底座采用钢板整体焊接而成,具有较高的强度和稳定性。焊接完成后采用退火人工失效方式消除内应力,以满足使用的稳定性需要。整体框架加工保证安装精度,此外周边角均采用倒圆角方案,以达到防撞措施。为充分利用底座框架的空间位置,其内部预留供电系统及控制系统的安装空间。此种结构设计既能保证结构紧凑又可以使平台框架本身具有较低的高度。

支撑脚组件主要由钼脚手柄、螺纹套及螺杆构成,为保证螺纹持久耐磨,钼脚螺纹采用黄铜材料制作,螺杆采用不锈钢材料制作,钼脚座为增大支撑面积而设计,其与螺杆之间采用球面接触以增加支撑钼脚支撑的灵活性。

### 1.2 主体支撑

为保证经纬仪高精度垂直移动系统的长期稳定性,主体支撑选用优质花岗岩经机械精密加工及手工精研而成。花岗岩具有结构精密质地均匀、稳定性好、强度大及硬度高等优点,且极耐磨损、耐酸、耐碱,有很高的耐腐蚀性,能在重负荷保持稳定,其硬度比铸铁高2~3倍,无磁性反应,也无塑性变形<sup>[6]</sup>。

为保证偏摆精度,主体支撑花岗岩采用单整块花岗岩直接加工而成,安装水平测试要求平面度达到 $4\ \mu\text{m}/\text{m}$ 。为保证细长型花岗岩吊装安全,防止花岗岩由于脆性折断或开裂,花岗岩前面安装导轨的同时,背部同样设计有两条导轨,前端导轨保证精度,后端导轨用于安装配重块并导向,前后4根导轨整体上进一步保证花岗岩的强度。整体花岗岩上设计的吊装部件采用整体圆钢棒结构,以增加吊装的安全。花岗岩底部下方设计有20 mm厚钢板法兰方便与底座安装并在两侧通过L型辅助支撑板增强系统的结构稳定性。花岗岩正面开有丝杠安装槽,上端安装的导向滑轮通过钢丝绳带动配重块运动,整体结构如图3所示。

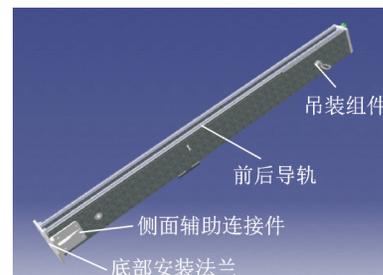


图3 主体支撑花岗岩结构示意图

Fig.3 Structure illustration of main support granite

主体花岗岩两侧安装有吊点及吊环,采用M20倍力特旋转吊点,单个纵向承载4 t,剪向承载2 t,保证了强度需求。

### 1.3 斜拉杆

斜拉杆是为增加经纬仪高精度垂直移动系统的结构稳定性而设计的辅助支撑部件,斜拉杆均采用外径为80 mm,壁厚为5 mm的碳纤维管作为主材料,连接头均采用不锈钢加工,管与两个连接头采用正反螺纹设计,方便调整管的两端连接头上的销孔长度从而实现斜拉锁紧<sup>[7]</sup>。考虑到实际使用的稳定性和可靠性,斜拉杆与底座和支撑筒之间采用销连接。斜支撑杆装配完成后与底座及支撑花岗岩连接,再通过中间销反向锁紧斜支撑杆,保证3个碳纤维杆均受力,增加系统刚度。

### 1.4 经纬仪安装座

经纬仪安装座安装在导轨工作台上,由电机驱动沿导轨垂直方向移动,如图4所示。为了保证系统运行控制的稳定性,经纬仪安装座选用硬铝制作。经纬仪安装座上机械接口满足莱卡TM5100 A、TM6100系列经纬仪接口要求,通过螺纹连接以实现经纬仪和移动的紧固连接,且满足经纬仪360°旋转时,经纬仪镜筒与工作部件无干涉。花岗岩经纬仪安装座的单向水平有效视野范围达170°。

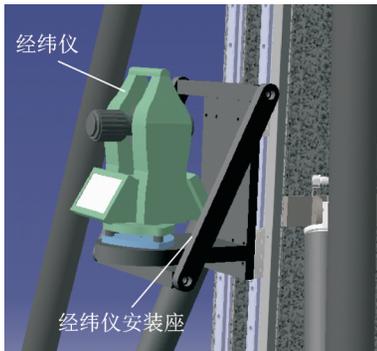


图4 经纬仪安装座

Fig.4 Illustration of theodolite base

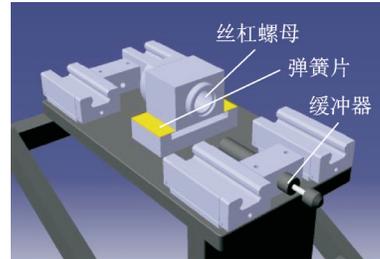
经纬仪安装座上设计有经纬仪电缆安装位置。其运行过程平稳,启动和制动过程中无冲击、噪音;运动到达任意位置后,设计有位置自动微调的功能,微调时间不超过3 s;升降速度具备可调节功能,转速在一定范围内可以任意调节,转速调节范围为0~0.2 m/s;花岗岩经纬仪安装座运动的距离及运动速度等指标可实时测量并显示,且具备限位及相关保护功能。

## 2 垂直升降系统

垂直升降系统由安装在主体支撑花岗岩正面的THK精密导轨、滚珠丝杠、光栅尺及工作台组成。为保证直线度及偏摆精度,安装在花岗岩上的THK导轨采用微预压P级精度,滚珠丝杠采用C3级精密丝杠。用于作为基准的花岗岩采用精密研磨技术,实现其平面度达到4  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。为保证丝杠及光栅尺的安装,花岗岩采用U型结构,内侧面加工一个基准

面,下两端分别装有机械限位和缓冲块<sup>[8]</sup>。

由于采用滚珠丝杠驱动,精密导轨导向,移动具有运行过程平稳,启动和制动过程无冲击和噪音的特点。但丝杠存在正反转扭矩切换问题,为防止正反行程出现偏摆现象,在机械上的保证方法是丝杠与升降台采用弹簧片过渡连接,高度方向提升刚度,扭转方向降低刚度,如图5所示。



(a) Screw thread composition diagram



(b) Screw thread fit

图5 丝杠螺纹安装图

Fig.5 Illustration of screw thread installation

工作台采用铝合金材料,其正面安装有经纬仪安装座,背面安装有4个导向滑台、丝杠连接座及防撞缓冲器,如图6所示。其中滑台与竖轴导轨连接,丝杠连接座与传动丝杠连接。



图6 导向滑台

Fig.6 Guide slide

## 3 配重系统

配重系统由导向滑轮、导轨、配重块和缓冲器等组成,用于平衡移动工作台的重量,如图7所示。其具有两方面功能:一是能够进行配重减少丝杠受力,增加设备使用寿命;二是能够减少上升下降丝杠驱动受力,从而减少偏摆影响。配重块通过4个导向滑台安装在背部导轨上。导向滑轮安装在花岗岩顶端,配重块通过钢丝绳沿背部导轨跟随移动工作台移动,有效防止悬挂钢丝绳的扭动。缓冲器安装在配重块上,防止钢丝绳松断引入的意外撞击。

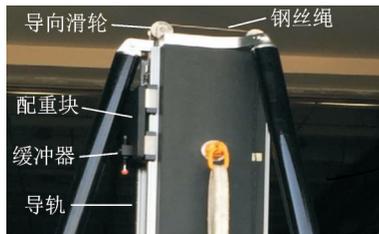


图7 配重系统示意图

Fig.7 Illustration of weight system

## 4 控制系统

运动控制系统箱集成在底座内部,驱动器、接触器、开关电源及空气开关分别集成在底座的3个支脚下方,控制面板固定在底座上方。系统自身的连接电缆(电源线、接地线及控制线等)的电连接器均采用航空接头,确保牢固可靠、插拔方便、允许多次插拔且插拔操作不影响其电器性能,测试过程中无外接电缆。

经纬仪高精度垂直移动系统要求具备在承载状态下能够自动升降和精确位置测量功能,同时具备在任意位置实现负载位置稳定不变的功能,是一种基于交流伺服控制的直线运动机构。

### 4.1 控制系统组成及原理

控制系统主要包含主控单元、执行单元、供电单元、测量反馈单元及人机交互单元。采用全闭环控制,原理如图8所示。其中主控单元选用Com-pax3S系列驱动器,执行单元选用Parker FM系列伺服电机,测量反馈单元选用Renishaw光栅尺。

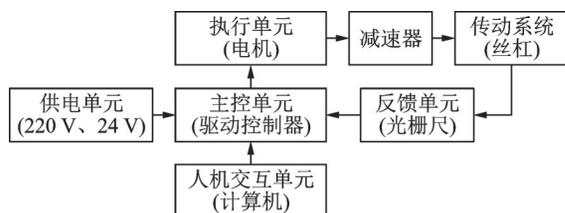


图8 系统控制原理示意图

Fig.8 Schematic diagram of system control principle

### 4.2 控制系统功能

控制系统主要具备如下功能:

- (1) 工作台具有点动和自动两种工作模式;
- (2) 能够对各种运动进行速度、位移参数设置;
- (3) 系统可在任意模式下回到参考零点;
- (4) 点动模式下,可通过上位机或功能按钮,手动控制工作台升降运动;
- (5) 自动模式包括相对运动和绝对运动,通过上位机设置工作台位移量完成相应运动;
- (6) 具有RS232标准通讯接口,可通过上位机对系统进行运动控制,并读取当前位置和状态;

(7) 系统设有紧急停止、限位保护功能,以保证系统运行安全。

## 5 支撑底座受力分析

支撑底座上部承载重量约900 kg,支撑底座下部通过3个支撑脚承力,底座采用钢板整体焊接而成,材料为Q235,底座受力分析显示最大变形在中间部分,变形量为0.069 mm,应力分布相对均匀,应力集中点出现在支脚位置,支脚设计采用法兰设计以减轻应力集中,最大应力10.1 MPa,小于Q235屈服应力,满足强度要求,其应变、应力分析分别如图9,10所示。

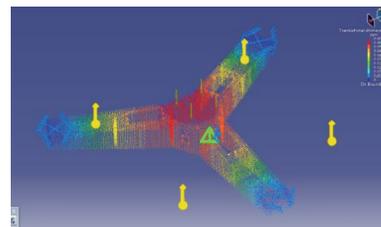


图9 底座应变分析图

Fig.9 Base strain analysis diagram

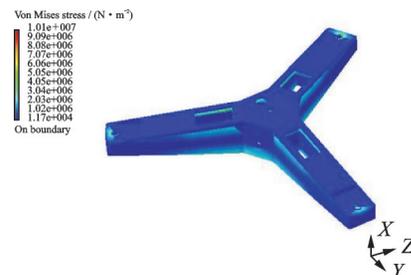


图10 底座应力分析图

Fig.10 Base stress analysis diagram

## 6 垂直运动过程的系统精度测试

该经纬仪垂直移动系统在运行过程中需保证定位精度优于2 mm、直线度优于1 mm。

将经纬仪安置在安装座上并调平,同时在经纬仪安装座上安置跟踪仪1.5"反射镜的目标座。从移动的零位开始,按照100 mm的间隔移动,每移动一个位置对应记录下导轨的光栅值 $L_i$ ,并用跟踪仪记录位于安装座上跟踪仪反射镜的空间坐标值 $P_i$ ,直到走完整个导轨行程。

将跟踪仪所有测量点进行最小二乘直线拟合,并建立以起始点为原点、以拟合直线为Z轴、以导轨底面法向为X轴正向的拟合直线坐标系。将导轨各个位置上的光栅值 $L_i$ 与跟踪仪各测量点在拟合直线坐标系下的Z轴分量值 $Z_i$ 进行比较,得到位移台在导轨各个位置处的定位偏差 $\Delta Z_i = L_i - Z_i$ 。取偏差绝对值的最大值作为位移台的定位误差,用所有定位偏差的标准偏差作为位移台的定位重复

性,用拟合直线的RMS值作为导轨的直线度,拟合直线和水平面夹角作为导轨的垂直度<sup>[9-10]</sup>。试验结果数据如图11~13所示,系统定位误差为0.032 mm,直线度为0.017 mm。

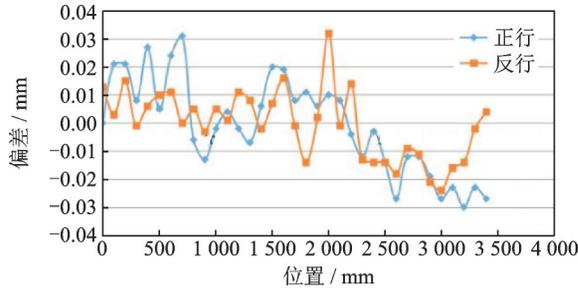


图11 系统垂直运动的定位偏差数据

Fig.11 Positioning deviation data of system vertical motion

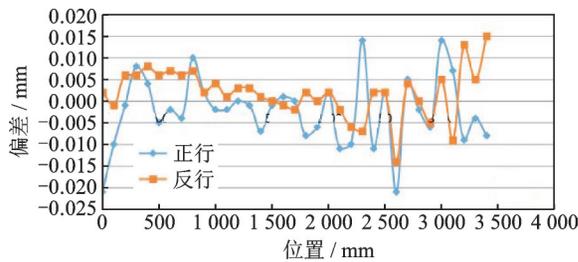


图12 系统垂直运动X方向直线度偏差

Fig.12 Straightness deviation in X direction of system vertical motion

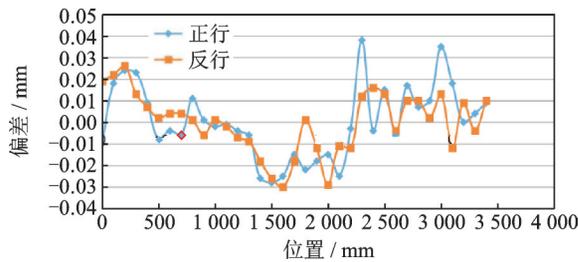


图13 系统垂直运动Y方向直线度偏差

Fig.13 Straightness deviation in Y direction of system vertical motion

## 7 结 论

参数试验结果表明经纬仪高精度垂直移动系统定位精度及直线度等符合预期。该系统已在航天器自动化精度检测系统中投入使用,稳定运行,有力保证了自动精测系统综合误差在允许范围内,提升了测试系统的可靠性。

### 参 考 文 献:

[1] 孙刚,杨再华,万毕乐,等.“高分二号”上相机和星敏感器相对安装姿态的测量[J].光学精密工程,2017,25(11):2931-2938.  
SUN Gang, YANG Zaihua, WAN Bile, et al. High

precision automatic measurement for alignment of camera and star-sensor in GF-2[J].Optics and Precision Engineering, 2017, 25(11):2931-2938.

- [2] 秦远田.微小卫星太敏安装角度测量及精度分析[J].国外电子测量技术,2013,32(3):36-38,42.  
QIN Yuantian. The measurement and precision analysis of the angle for a sun sensor on a microsatellite[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(3):36-38,42.
- [3] 温凯,梁小峰,沙伟.小卫星精测系统分析[J].航天器环境工程,2011,28(1):83-86.  
WEN Kai, LIANG Xiaofeng, SHA Wei. A theodolite-based coordinate system and its application in small satellite alignment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(1):83-86.
- [4] 黄桂平,钦桂勤,马开锋.星载立体测绘相机立方镜间姿态标定[J].宇航计测技术,2013,33(4):17-20.  
HUANG Guiping, QIN Guiqin, MA Kaifeng. Attitude calibration on three-lin array CCD camera of space stereo mapping[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2013, 33(4):17-20.
- [5] 黄桂平,叶声华,李广云,等.经纬仪非接触大尺寸三坐标测量系统的开发及其在航天器检测中的应用[J].上海计量测试,2002,29(3):9-12.  
HUANG Guiping, YE Shenghua, LI Guangyun, et al. Development on non-contacting 3D measurement system of theodolites and its application in aerospace [J]. Shanghai Measurement and Testing, 2002, 29(3):9-12.
- [6] 贾宝贤,胡富强,张勇,等.花岗岩构件的应用与设计[J].机械,2002,29(5):58-60.  
JIA Baoxian, HU Fuqiang, ZHANG Yong, et al. The application and design of granite elements[J]. Machinery, 2002, 29(5):58-60.
- [7] 孙安斌,高廷,乔磊,等.大尺寸测量设备高空精测平台的研制[J].计测技术,2018,38(5):39-42.  
SUN Anbin, GAO Ting, QIAO Lei, et al. Development of high altitude precision measuring platform for large-scale measurement equipment[J]. Metrology and Measurement Technology, 2018, 38(5):39-42.
- [8] 李庆祥,王东生,李玉和.现代精密仪器设计[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [9] 张善锤,于瀛洁,张之江.直线度平面度测量技术[M].北京:中国计量出版社,1997.
- [10] 任顺清,陈海兵,赵洪波.用经纬仪测量大尺寸三维导轨垂直度的方法[J].仪器仪表学报,2012,33(1):188-193.  
REN Shunqing, CHEN Haibing, ZHAO Hongbo. Perpendicularity measurement method of 3-D large guideway with theodolite[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(1):188-193.