

姿态敏感器地面标定精密调整机构设计

陈启梦^{1,2,3}, 张国玉^{1,2,3}, 王哲¹, 张健¹

(1. 长春理工大学 长春 130022; 2. 光电测控与光电信息传输技术教育部重点实验室 长春 130022;
3. 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心 长春 130022)

摘要:为了满足光学姿态敏感器地面标定更高精度的应用需求,针对当前敏感器地面测试设备的标定精度与设计值不一致的实际问题,提出了一种分辨率高、稳定性好的五自由度精密调整机构设计方案。分析了光轴一致性误差对星点位置误差的影响,结合姿态敏感器技术指标,采用搭积的调整层结构形式及合理的消除方法,设计符合敏感器标定要求的调整架机械结构并进行力学分析。仿真结果与测试数据表明:调整机构的实测位移分辨率优于 $0.1\ \mu\text{m}$,角分辨达到 $0.1''$,在对星图的反复测试中,降低了光轴一致性误差对测试结果的影响,星点位置误差比使用常规调整机构时提高了 $5''$ 以上,达到了敏感器地面标定的精度要求。

关键词: 姿态敏感器;光轴一致性;精密调整;高分辨率;星点位置误差

中图分类号: V524.7 TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design of accurate adjustment mechanism for the attitude sensor

Chen Qimeng^{1,2,3}, Zhang Guoyu^{1,2,3}, Wang Zhe¹, Zhang Jian¹

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Key Laboratory of Optical Control and Optical Information Transmission Technology, Department of Education, Changchun 130022, China; 3. Optical Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the current practical problem that the calibration precision of ground test equipment of sensors is inconsistent with the design value, a design scheme for a precision adjusting mechanism is presented with high resolution, high stability and five degree of freedom, in order to meet the higher precision application demand of ground calibration of optical attitude sensors. At first, the influence of conformity error of optical axis on position error of star point is analyzed. With a combination of the technical indicators of attitude sensors, we adopt the independent control method of stacked adjusting hierarchy. Then, the gap elimination method is determined according to the gap form within the mechanism. Besides, an adjusting mechanism structure meeting the calibration requirements for sensors is designed. After that, statics analysis and modal analysis are carried out. Simulation results and test data show that the actual measurement displacement resolution of the adjusting mechanism is better than $0.1\ \mu\text{m}$, and the angular resolution is 0.1 second of arc. During the stability test of star point position, star point position error decreases more than $5''$ compared with the error value in the test which adopts conventional adjusting mechanisms. It may reduce the influence of conformity error of the optical axis on the calibration precision of sensors and improve reliability of calibration results.

Keywords: ground calibration; optical axis consistency; accurate adjustment; high resolution; star position error

0 引言

卫星在轨运行时,利用姿态敏感器识别和提取的

姿态信息实时控制其运行指向和运行轨迹^[1]。随着深空导航技术的深入发展,如何进一步提高精度是姿态敏感器研制的必然要求。制约姿态敏感器向更高精度发展的重要原因之一,是其地面标定系统在实际试验

中难于达到技术指标要求^[2-3],测试数据与设计值存在偏差。五自由度调整机构是高精度姿态敏感器地面标定系统的关键设备,为保证标定精度与理论值相一致,就需设计出定位精度高、稳定性好的精密调整机构,这对于运动控制、机构锁紧、间隙消除等技术都提出了更高的要求。

五自由度调整机构承载地面标定设备的光学系统,使其与传感器的光学系统精确对接,为传感器性能测试提供可靠保障。然而,现有的调整机构分辨力和稳定性都较低,测试时引起的标定设备与传感器光学系统的光瞳衔接误差为 $\pm 1 \text{ mm}$,光轴对准误差为 $5''$,且可能与外界振动引起共振^[46],这就增大了对准误差,降低了传感器提取标定设备所模拟星像点位置的精度,影响了标定结果的可信度。本文研究了光学系统光轴一致性误差对传感器精度测试结果的影响,详细阐述了高精度调整机构设计的必要性;针对调整机构的功能要求和设计目标,采用搭积的结构形式,重点对调整机构的机械结构进行详细设计;利用软件建模和实验数据验证了设计的合理性、可行性。

1 姿态敏感器地面标定原理及光轴一致性对标定结果的影响

1.1 姿态敏感器地面标定原理

姿态敏感器地面标定原理如图 1 所示。标定设备可以模拟来自“无穷远”深空的仿真星图,调整机构精确调整标定设备光学系统位置使其与传感器的光学系统对接^[7-9],传感器接收来自标定设备的平行光束,根据光线会聚位置提取星点并解算姿态信息,从而实现地面标定。

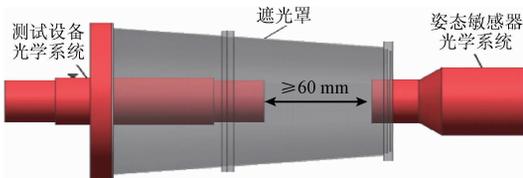


图 1 姿态敏感器地面标定原理

Fig. 1 Diagram for the calibration test principle of the attitude sensor on ground

1.2 光轴一致性对标定结果的影响

根据标定原理,测试设备与姿态敏感器的理想模型为小孔成像模型,且保证二者的光学系统光瞳衔接且光轴一致,如图 2 所示。

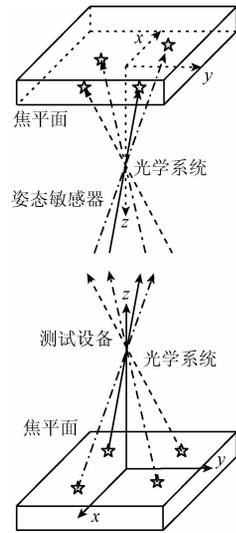


图 2 测试设备与姿态敏感器对接理想模型

Fig. 2 Ideal docking model between the attitude sensor and the test equipment

但是真实情况下,光轴一致性误差不可避免。结合实际情况,光轴对接误差表现为方向偏移、倾斜偏差和既有方向偏移又有倾斜偏差 3 种形式。这些误差不但使传感器接收到的来自于测试设备的出射光产生偏差,降低星点位置标定精度,还会使辐照度发生漂移,造成弱星等判断不准确,最终影响敏感器地面标定结果。

1.2.1 光轴偏移偏差对星点位置精度的影响

设光轴偏移量为 Δl ,构建光轴偏移偏差模型如图 3 所示。

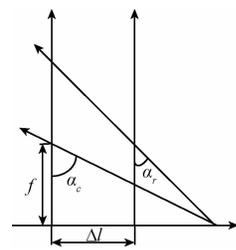


图 3 光轴偏移偏差模型

Fig. 3 Deviation model of optical axis offset

光轴偏移引起星点位置的角度误差如式(1)所示。

$$\Delta\alpha = \alpha_r - \alpha_c = \arctan \frac{f \cdot \tan\alpha_c - \Delta l}{f} - \alpha_c \quad (1)$$

式中: α_r 为星点位置的实际值, α_c 为星点位置的理论值, $\Delta\alpha$ 为星点位置误差值, f 为测试设备光学系统的焦距。

1.2.2 光轴倾斜偏差对星点位置精度的影响

设光轴倾斜角度为 $\Delta\theta$,构建光轴倾斜偏差模型如图 4 所示。

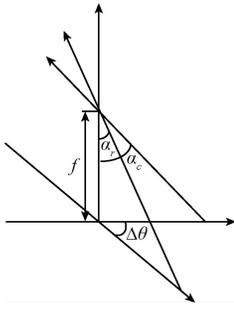


图4 光轴倾斜偏差模型

Fig. 4 Deviation model of optical axis tilted

光轴倾斜引起星点位置的角度误差见如式(2)所示。

$$\Delta\alpha = \alpha_r - \alpha_c = \arctan \frac{\tan\alpha_c \cdot \cos\Delta\theta}{1 + \tan\alpha_c \cdot \sin\Delta\theta} - \alpha_c \quad (2)$$

1.2.3 偏移和倾斜同时存在对星点位置精度的影响

当光轴偏移和倾斜误差同时存在时,构建综合偏差模型如图5所示。

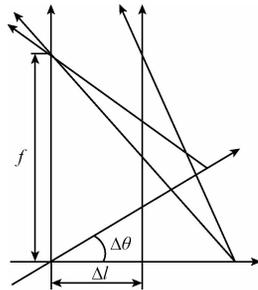


图5 综合偏差模型

Fig. 5 Deviation model of comprehensive error

偏移和倾斜引起星点位置的角度误差见如式(3)所示。

$$\Delta\alpha = \alpha_r - \alpha_c = \arctan \frac{(f \cdot \tan\alpha_c - \Delta l) \cdot \cos\Delta\theta}{(f \cdot \tan\alpha_c - \Delta l) \cdot \sin\Delta\theta + f} - \alpha_c \quad (3)$$

综上所述,必须设计具有高分辨力水平的五自由度调整机构,减小光轴一致性误差,确保敏感器标定结果与测试设备理论精度的一致性。

2 调整机构机械结构设计

2.1 调整机构设计要求与技术指标

课题来源于航天科技集团某研究所委托项目“××姿态敏感器地面标定设备研制”,根据星点位置模拟精度和设计误差理论值,利用式(1)~(3)计算五自由度精密调整机构的技术指标,主要参数和设计要求如表1所示。

表1 五自由度调整机构主要技术指标
Table 1 Main specifications of five-degrees-freedom adjustment mechanism

技术参数	指标要求
分辨力	位移分辨力:0.3 μm, 倾斜分辨力: ±0.5"
调整范围	±5 mm, ±3°
载重	≥7 kg
稳定性	具有锁紧保持力矩,标定中无漂移

2.2 机械结构设计方案

传统的机械式微位移结构分辨力较高,缺点是存在机械间隙、容易出现爬行现象^[10-13],难于保证稳定性。因此改变滑动摩擦为滚动摩擦,选择高精度滚珠丝杆、滑动摩擦型楔形块等构件,采用搭积的结构形式,将调整机构分为平移层和偏转层,实现5个自由度独立性调整,达到设计目标对其调整能力的要求。调整机构总体结构框图如图6所示。

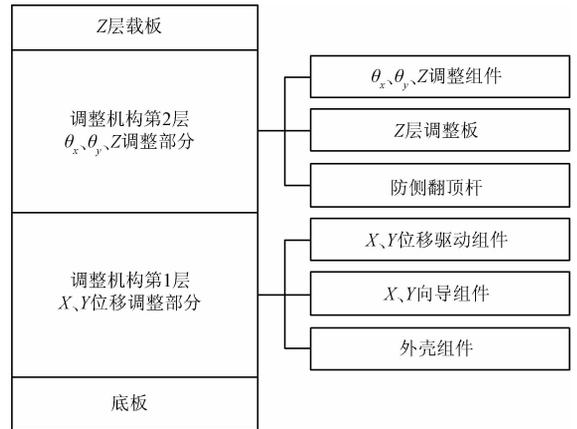


图6 调整机构总体结构框图

Fig. 6 Flow chart of overall structure

2.2.1 平移层结构设计

平移层设计结构简图如图7所示,联轴器将电机与滚珠丝杆固定连接在一起,将螺母固定在大楔形块外边缘,大楔形块与小楔形块的承接方式为导轨副连接。定位时,滚珠丝杆通过联轴器在电机的带动下发生转动,大楔形块在沿轴方向上产生位移;由于外壳组件的位置限定,小楔形块只产生竖直方向的位移,从而完成二维平移调整。

平移层精密导向组件结构简图如图8所示,直线导轨分别连接在转接板上,安装时确保导向组件的垂直度,避免运动干涉。

平移层设计的技术优点在于主动单元的着力位置是调整平面,导向组件连结处有精密轴承,克服了机械爬行,可以实现位移微调整。

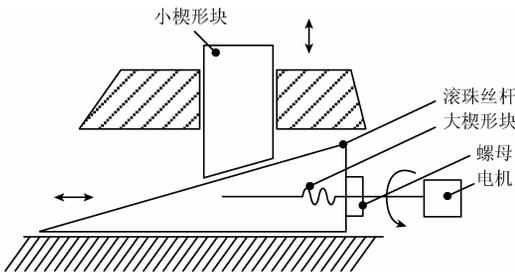


图 7 平移层结构简图

Fig. 7 Structure diagram of translation layer

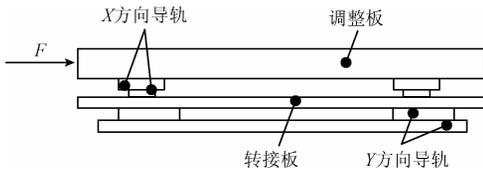


图 8 平移层精密导向组件结构简图

Fig. 8 Structure diagram of precision-oriented components

2.2.2 偏转层结构设计

偏转层设计结构简图如图 9 所示,角度调整的基本单元由顶杆和拉簧构成,3 个基本单元和调整平面有 3 个连结点,连线构成等腰直角三角,这样就组成了典型的三拉三顶形式。两条直角边分别独立地构成旋转轴,使偏转层进行微角度调节时转动和倾斜不互相干扰;偏转层的平动调整原理与平移层类似,顶杆与小楔形块接触,依靠接触点的竖直运动就可以完成偏转层整体的竖直微调。

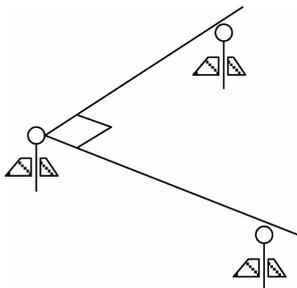


图 9 偏转层设计结构简图

Fig. 9 Structure diagram of deflection layer

2.2.3 消除间隙方案

对于一个微调整机构,为确保其精度必须考虑空回^[14]。为此要尽力控制甚至消除间隙,机构设计上的有效措施是采取让组元精密接触的办法,合理利用预紧力,最终实现消除间隙的效果。针对本文调整机构的结构设计方案,系统内存在的间隙及相对应的消除方案如表 2 所示。

表 2 系统内存在的间隙及消除方法

Table 2 Gaps existing in the system and elimination methods

存在间隙的结构	解决方案
偏转层电机自身	依靠拉簧拉力和自身重力
平移层电机自身	沿电机输出轴架拉簧
长直导轨与平移组件	依靠自身重力、用拉簧的预紧力
丝杠与法兰之间	沿丝杆轴向架拉簧
楔形块与挡板之间	依靠自身重力、用拉簧的预紧力
其他组件	依靠螺钉固定连接

2.2.4 设计结果与分辨力计算

步进电机、滚珠丝杠、直线导轨是调整机构的关键组件,结合机械结构两个层级的设计方案,选用 S42D110B-MA100S2 型步进电机、导程精度 0.008ec 的滚珠丝杠和 MR·3WN 精密导轨,则设计的调整机构配图如图 10 所示,调整机构总体中空设计、结构紧凑、载重大、自重轻。

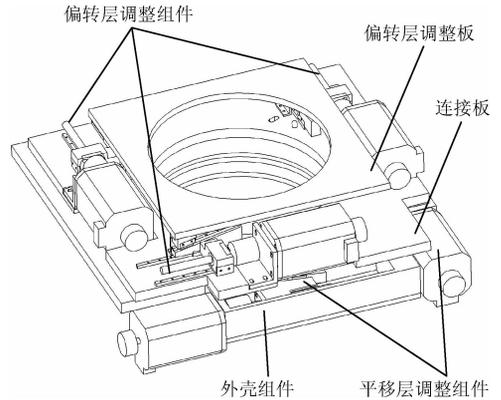


图 10 调整机构设计结果装配图

Fig. 10 The overall three-dimension model

选用的电机减速比为 1:100,步距角为 1.8°,楔形块夹角 $\theta = 10^\circ$,大楔形块移动范围为 40 mm,第 2 层级上 3 个支撑点构成的直角三角形直角边边长为 160 mm,则调整机构的核心参数位移分辨率、位移范围、角分辨率、角调整范围的设计理论值为:

$$l' = (1.8^\circ/100) \times \frac{1}{360^\circ} \times \tan\theta = 0.0088 \mu\text{m} \quad (4)$$

$$L = l' \times \sin\theta = 9.64 \text{ mm} \quad (5)$$

$$\theta' = \text{arctan}(l'/160) = 0.001'' \quad (6)$$

$$\Psi = \text{arctan}(L/160) = 3.4^\circ \quad (7)$$

3 调整架力学分析

调整机构在工作过程中的自身变形量和抗振动能力,分别通过静力学有限元分析和动力学模态分析完成^[15-17]。

对调整机构与支撑架整体结构施加重力载荷,用软件仿真分析的自重变形分析结果如图 11 所示。

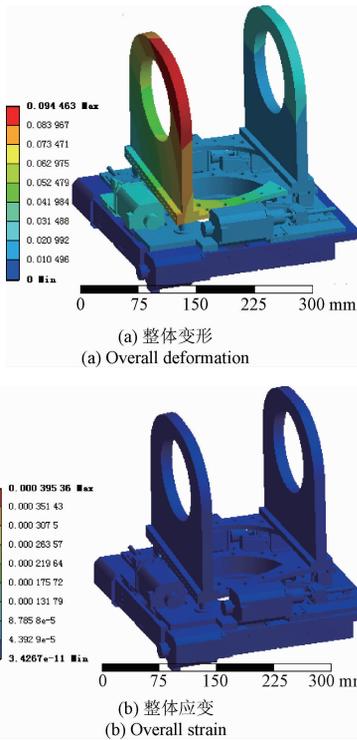


图 11 调整机构与支撑架自重变形云图

Fig. 11 Deformation cloud diagram of the adjustment mechanism and support frame self-weight

从图 11 中仿真结果来看,该调整机构的自重变形最大值不超过其位移分辨率,不会造成光轴一致性误差带来的敏感器标定精度下降。

由于标定实验实际工作环境为要求较高的光学暗室,而且在标定实验时非工作人员将远离测试系统,因此要求在约束调整机构全部 6 个自由度的前提下,固有频率均大于光学平台隔离频率 100 Hz 即可,软件分析的模态固有频率如表 3 所示。

表 3 调整机构 6 阶模态分析结果

Table 3 Six order modal analysis results of the adjustment

阶数	固有频率/Hz	振动形式
1	180.55	沿 X 轴水平振动
2	236.22	沿 Y 轴水平振动
3	256.58	沿 Z 轴水平振动
4	332.43	绕 Y 轴扭转
5	682.81	绕 X 轴扭转
6	723.31	绕 Z 轴扭转

表 3 结果表明调整机构在正常工作状态下,不会与外界人为引起的振动产生共振,保持较高的稳定性,可以确保标定结果的可信度。

4 调整机构的分辨力计算与测试结果

4.1 测试实验与测试结果

五自由度精密调整架的分辨力通过 ZYGO 干涉仪测试,其测试情况如图 12 所示。

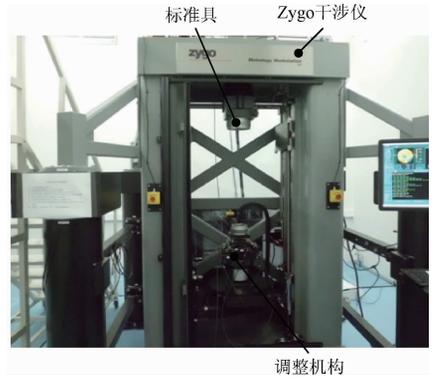


图 12 调整机构测试过程

Fig. 12 Testing picture of adjustment mechanism

精密调整机构分辨力的检测结果可以由干涉条纹图样给出。采用波长为 550 nm 的可见光进行检测,经过 4 次输入脉冲的变化,测试结果如图 13、14 所示,求解得到精密调整机构测试位移精度约为 90 nm、角度精度为 0.1",与光轴一致性调整精度 300 nm 的要求对比可知,调整机构位移分辨力满足其使用要求。

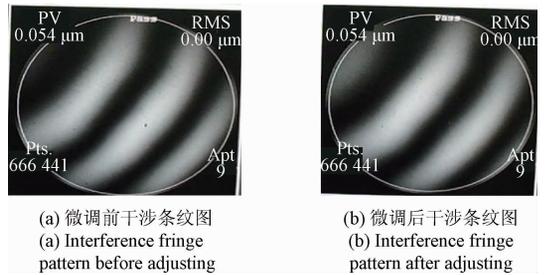


图 13 调整机构位移分辨力检测结果

Fig. 13 Displacement resolution test results of the mechanism

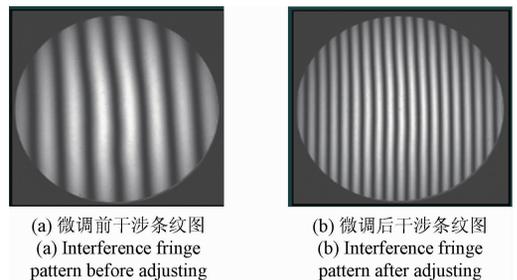


图 14 调整机构角度分辨力检测结果

Fig. 14 Angle resolution test results of the mechanism

4.2 姿态敏感器的标定精度测试

对标定设备进行精度测试,对一幅星图进行的星点位置误差反复测试 10 组,测试数据取平均值。具体方法为用经纬仪读取被测星点的方位角 α_i 和俯仰角 β_i ,根据式(8)计算星点位置实测值,与星点位置理论值比较,由式(9)做差得到星点位置误差。

$$\gamma_{\text{实测}} = \arccos[\cos\beta_i\cos\beta_j\cos(\alpha_i - \alpha_j) + \sin\beta_i\sin\beta_j] \quad (8)$$

$$\Delta = (\gamma_{\text{实测}} - \gamma_{\text{理论}}) \times 3600'' \quad (9)$$

将求得的星点位置误差平均值与使用常规调整机构的测试结果相对比,误差分布曲线如图 15 所示。

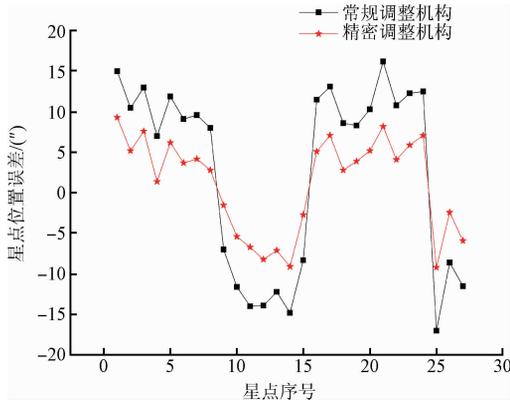


图 15 星点位置实测误差分布

Fig. 15 Test results of star's positional accuracy

图 15 结果表明,使用本文设计的精密调整机构以后,所有星点位置误差比使用常规调整机构的标定结果提高至少 5",星点位置误差均优于 10",达到了实测精度几秒的标定水平

5 结 论

本文针对高精度姿态敏感器地面标定试验测试精度难于达到设计值的实际问题,设计了标定设备五自由度精密调整机构。分析了测试设备与姿态敏感器的光学系统光轴一致性对关键参数测试结果的影响,深入研究了调整机构的结构分布、调整原理,分别对其机械机构、消除方法进行了设计,并对设计结果进行了力学分析。实际测试结果表明,所设计的精密调整机构的分辨力高、承载力大、稳定性好,平移层位移精度为 90 nm,偏转层角度精度达到 0.1";减小了光轴一致性误差的影响,星点位置误差测试结果提高到 10 s 以内,使测试结果与设计精度相一致,保证了测试结果的可信度,可以用于高精度姿态敏感器地面标定工作中。

参考文献

[1] 孙向阳, 张国玉, 王大铁, 等. 大尺寸高精度星模拟器

光机结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(9): 2121-2126.

SUN X Y, ZHANG G Y, WANG D Y, et al. Optomechanical structure design of large-scale and high precision star simulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9): 2121-2126.

[2] 郑茹, 张国玉, 高越, 等. 基于 LCOS 拼接技术的动态星模拟器光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 2144-2150.

ZHENG R, ZHANG G Y, GAO Y, et al. Optical system design of dynamic star simulator based on LCOS splicing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 2144-2150.

[3] 孟遥, 张国玉, 刘石, 等. 基于 LCOS 拼接的高精度高动态星模拟器设计[J]. 吉林大学学报:工学版, 2016, 46(2): 621-626.

MENG Y, ZHANG G Y, LIU SH, et al. Design of high-precision and high-dynamics star simulators based on LCOS splicing [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2016, 46(2): 621-626.

[4] 王智, 吴国栋. 测绘相机立方镜与星敏立方镜转换矩阵的标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 96-101.

WANG ZH, WU G D. Calibration of transition matrix on cubic prisms in mapping camera and star sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 96-101.

[5] 赵晨光, 谭久彬, 刘俭, 等. 用于天文导航设备检测的星模拟装置[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1326-1332.

ZHAO CH G, TAN J B, LIU J, et al. Star simulator for testing celestial navigation equipment [J]. Optics Precision Engineering, 2010, 18(6): 1326-1332.

[6] 王楠. 卧式重载二维高分辨力倾斜电动调整架结构设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.

WANG N. Structure design of electric adjusting mount of horizontal overloaded two-dimensional high resolution tilt [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.

[7] 高越, 张国玉, 郑茹, 等. 光学积分器对太阳模拟器辐照均匀性的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 185-190.

GAO Y, ZHANG G Y, ZHENG R, et al. Solar simulator irradiation uniformity based on optical integrator [J] Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 185-190.

[8] 易日. 使用 ANSYS 6.1 进行结构力学分析[M]. 北京: 北京大学出版社 2002.

YI R. The use of ANSYS 6.1 analysis of structural mechanics [M]. Beijing: Peking University Press, 2002.

- [9] 罗勇. 多维精密光学调整架坐标解耦分析[J]. 光电工程, 2011, 38(4):37-40.
LUO Y. Coordinates decoupling of multidimensional precision optical adjusting frame [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(4):37-40.
- [10] KOYAMA H, KURII T, TAKAHASHI F. Commercialized space use earth sensor assembly [J]. NEC Research & Development, 2001, 42(1): 210-214.
- [11] MARK E PITTELKAU. Kalman filter for spacecraft system alignment calibration [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2001, 24(6): 1187-119.
- [12] 叶树亮, 谭久彬. 具有纳米分辨率二维超精密定位系统的研制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(11): 1472-1475.
YE SH L, TAN J B. Development of a two-dimensional ultra precision positioning system with nanometer resolution [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(11): 1472-1475.
- [13] 王生怀, 陈育荣, 王淑珍, 等. 三维精密位移系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1):69-71.
WANG SH H, CHEN Y R, WANG SH ZH, et al. Design of 3D precision displacement system [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1):69-71.
- [14] BERANEK M W, CHAN E Y, CHEN C C, et al. Passive alignment optical subassemblies for military/aerospace fiber-optic transmit term receiver applications[C]. IEEE Proceedings of 49th Electronic Components and Technology Conference, 1999:188-196.
- [15] 邹媛媛, 赵明扬, 张雷, 等. 结构光视觉传感器误差分析与结构分析[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12): 2605-2610.
ZOU Y Y, ZHAO M Y, ZHANG L, et al. Error analysis and structural analysis of structured-light visual sensor for seam tracking [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12): 2605-2610.

- [16] 赵成强, 徐文东. 航空透明件光学角偏差测试仪的光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 437-441.
ZHAO CH Q, XU W D. Optical system design of optical angular deviation tester for transparent parts in aviation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 437-441.
- [17] 李朝辉. 月基对地观测极紫外相机光机结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10):2352-2356.
LI CH H. Opto-mechanical design of lunar based EUV camera for imaging the earth [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(10):2352-2356.

作者简介



陈启梦, 2015年于长春理工大学获得博士学位, 现为长春理工大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为航天器地面标定与检测。

E-mail: qmchen1989@163.com

Chen Qimeng received her Ph. D. degree from Changchun University of Science and Technology (CUST) in 2015. Now she is a lecturer and master supervisor in CUST. Her main research direction is spacecraft ground calibration and measurement.



张国玉(通讯作者), 2005年于长春理工大学获得博士学位, 现为长春理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为空间科学与技术、光电仪器与检测技术等。

E-mail: zh_guoyu@163.cm

Zhang Guoyu (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Changchun University of Science and Technology (CUST) in 2005. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in CUST. His main research interests include space science and technology, photoelectric instrument and measurement technique and etc.