

文章编号 1004-924X(2018)12-2930-10

基于位置敏感探测器的六自由度精密位姿测量系统

高玉娥*, 刘 伟, 吕世猛, 张永康, 董文博

(中国科学院空间应用工程与技术中心空间应用重点实验室, 北京 100094)

摘要:位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)是一种高精度的二维位移测量传感器,利用三片二维 PSD 的组合实现空间六自由度相对运动的位移和角度测量。测量系统主要包括三片 PSD 传感器(包括 PSD 光敏面和发光管)、低噪声的信号调理和 AD 采集电路,采用三片 PSD 正交布局方案,通过 PSD 光敏面的光点位置计算相对运动的位移和角度。设计了六自由度的 PSD 标定测试系统,用于 PSD 测量系统中心偏移和发光管安装误差的标定测试。测试结果表明,PSD 测量系统的测量范围优于位移 ± 10 mm、角度 $\pm 2.5^\circ$,标定后 PSD 测量系统的噪声误差为位移 0.1 mm、角度 0.02° ,测量系统的绝对位移误差小于 0.5 mm、角度误差小于 0.14° ,满足系统 0.5 mm 和 0.5° 的指标要求。此外,对 PSD 传感器的环境适应性进行了评估。PSD 测量系统具有量程宽、精度高、线性度好的优点,成功应用于天舟 1 号货运飞船微重力主动隔振装置的相对运动测量中。

关键词:位置敏感探测器;三维位移测量;运动测量;可靠性评估

中图分类号:TP212.14;TH822 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182612.2930

Six-degree-of-freedom displacement and angle measurement system based on two-dimensional position-sensitive detector

GAO Yu-e*, LIU Wei, LÜ Shi-meng, ZHANG Yong-kang, DONG Wen-bo

(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: yuegao@csu.ac.cn

Abstract: A Position-Sensitive Detector (PSD) was used to measure two-dimensional displacement with high precision. A combination of three two-dimensional PSDs can implement measurements of six-degree-of-freedom relative displacement and angle. The measurement system mainly comprises three PSD sensors (including PSD photosensitive surface and light-emitting tube), low noise signal conditioning, and an Analog to Digital(AD) acquisition circuit. Three PSD orthogonal layout schemes were used to calculate the displacement and angle of relative motion through the spot position of three PSD photosensitive surfaces. A six-degree-of-freedom PSD calibration and test system was designed for the calibration of the PSD measurement system center offset and light tube installation error. The test results show that the measurement range of the PSD measurement system is better than ± 10 mm and $\pm 2.5^\circ$. The noise error of the PSD measurement system after calibration is 0.1 mm and the angle

收稿日期:2018-06-25;修订日期:2018-08-21.

基金项目:载人航天预研课题;载人航天工程-货运飞船应用系统项目

is 0.02° , while the absolute displacement error of the measuring system is less than 0.5 mm and the angle error is less than 0.14° . This proves that the system meets the requirements of 0.5 mm and 0.5° . In addition, the environmental adaptability of the PSD sensor was evaluated. It can satisfy the system requirements of noncontact, online, real-time, higher precision, and rapid speed, as well as strong anti-jamming and stabilization. The system is successfully used in the space microgravity active vibration isolation system of the Tian Zhou 1 cargo ship for relative motion measurement.

Key words: position sensitive detector; three-dimensional displacement measurement; movement measurement; reliability evaluation

1 引 言

位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)是一种常用的光电器件。它根据光斑落在器件感光面的位置输出信号,通过处理输出电信号获得入射光斑在 PSD 的位置。二维 PSD 可以测定光点的平面位置坐标,根据电极位置的设置、单面或者双面分流、光敏面形状等分为四边形结构、二面型结构及枕形结构三类^[1-2]。

PSD 器件具有体积小、响应速度快、电路实现简单的特点,在一些特定的位置测量领域可以作为视觉相机的替代品,实现对光点的二维位置测量,降低系统设计的复杂性。目前,PSD 已经广泛用于光电位置测量^[3-4]、光学微操作^[5-6]、位移和振动的检测和监控^[7-8]、转速测量^[9]、激光跟踪^[10]等方面,在航天航空领域可以用于太阳敏感器^[11]、机械臂形变^[12]、微位姿测量等。

PSD 在应用中的主要问题包括非线性形变的标定、光线干扰等问题。在非线性形变方面,传统方法采用基准位移多个点进行拟合标定的方式^[13-14];也有结合神经网络或遗传算法等的矫正方法^[15-16]。在去除光线干扰方面,可以采用光学法或电学法,光学法即选用和干扰光不同波段的光源和滤光片,从光波段上加以区分;电学法就是给一个主动调制的光源,通过差分方式去除光线的影响^[4,17]。

PSD 除了测量二维位移外,还可以进行物体三维位置和姿态的测量。原理上,利用三片 PSD 即可解算出六自由度的位移。文献^[18]提出的三维位置和角度测量方法及其模型是基于安装在固定端左侧、右侧和后侧的 3 个二维 PSD 来进行解算的。文献^[15]和^[19]采用单目或双目视觉原理进行多自由度位姿测量,将 PSD 等效成特殊的相

机投影模型。实际上,如果将 PSD 前端加上镜头探测单光点,是完全可以采用视觉投影几何模型来进行单目、多目系统解算的。文献^[20]提出只用一片 PSD 即可进行六自由度测量的方法,但需要发光管进行分时工作并在后端进行处理。这种方式本质上还是一种采用 3 个 PSD 的方法,但是采用了系统分时复用的方式。

本文介绍了一种基于三片 PSD 的六自由度相对位姿测量系统,采用三片 PSD 正交的安装方式,测量频率达到 1 000 Hz,满足控制系统的实时性要求。

目前,PSD 属于商用器件,其环境适应性较差。为了将 PSD 的优越性能更好地应用在航天航空等具有高可靠性要求的领域,对 PSD 测量系统进行了改造,并开展了力学振动和温度可靠性摸底试验,最终获得了 PSD 的环境适应条件。

2 工作原理

2.1 应用背景

基于三片 PSD 的六自由度测量系统应用于空间微重力主动隔振装置(Microgravity Active Vibration Isolation System, MAIS)。MAIS 能够有效隔离航天器上的各种扰动,为科学实验载荷提供满足需求的微重力水平。MAIS 通过加速度计感知实验载荷所受的振动加速度,通过 PSD 测量系统来感知实验载荷与隔振平台的相对位移和姿态的变化。加速度和位移信息输送到系统控制器,采取闭环控制策略计算需要施加给电磁作动器的电流,产生与扰动大小相等方向相反的作用力来抵消扰动对载荷的干扰,同时保持浮子与定子不碰撞,起到振动隔离的目的。MAIS 控制系统对六自由度位姿测量的指标要求如表 1 所示。

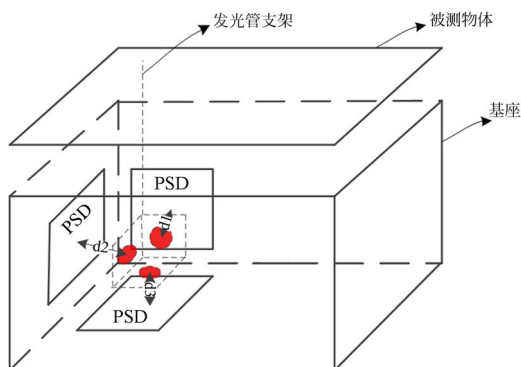
表 1 三维位移测量系统指标

Tab.1 Index of 3D position measurement

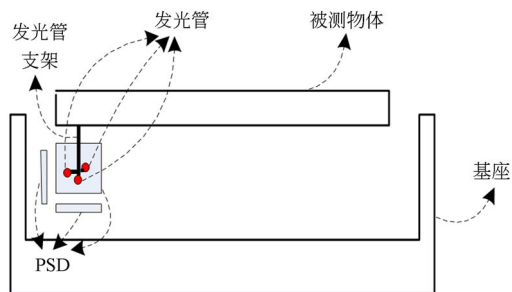
名称	指标
相对位移范围 X/Y/Z	±10 mm
相对转动角度 $s_x/s_y/s_z$	±2.5°
位移绝对误差要求	0.5 mm
转动绝对误差要求	0.5°
位移噪声	0.1 mm
转动噪声	0.1°
带宽	>250 Hz

2.2 安装布局

六自由度位姿测量系统的安装布局如图 1 所示,3 片 PSD 的光敏面立体正交安装在基座上,3 个发光管集中安装在被测物体上,当被测物体运动时,光源照射到 PSD 上的光点位置会发生变化,PSD 4 个引出电极的输出电流响应这种变化,经过信号采集和数据处理后,可以得到光点的运



(a) 立体图
(a) Stereogram



(b) 截面图
(b) Cross-section

图 1 六自由度位姿测量系统的发光管和 PSD 布局图

Fig.1 Layout of LEDs and PSDs of six-freedom position measurement system

动位移。由 3 个 PSD 的光点位置,通过三维位置测量模型可以解算出被测物体变化的位置和转动的角度。其中,PSD 的安装方式如图 2 所示。3 个 PSD 正交安装,PSD 调理电路安装在各 PSD 下面,PSD 的安装采取了加固及点胶处理,能够保证准直度,但由于 PSD 自身有一定的中心和标度系数偏移,实际使用时必须进行标定。

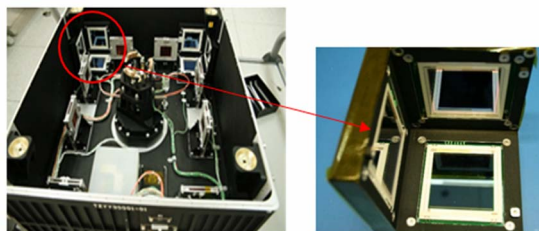


图 2 PSD 模块安装外观图

Fig.2 Overview of PSD installation

发光管安装在浮子上,分布在 3 个正交的方向上。但由于发光管自身以及安装工艺,不可能保证其完全准直。实际安装前必须经过标定,如图 3 所示,安装后也必须进行标定,测量出发光管的偏移角度。

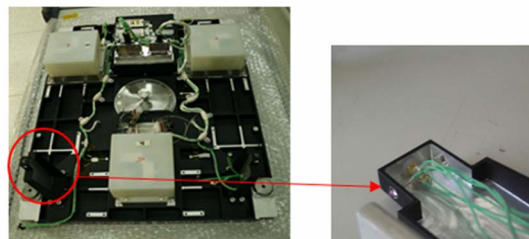


图 3 红外发光管安装及标定图

Fig.3 Overview of installation and correction of LED

2.3 电路实现

PSD 测量系统由 3 块 PSD 调理板和 1 块 PSD 采集板构成,如图 4 所示。PSD 采用集成设计,PSD 敏感器和信号调理电路设计在一块单板上,形成 PSD 调理板;AD 采集电路形成 PSD 采集板。PSD 模块由电源板提供 ±12 V 电源,PSD 模块通过 SPI 接口与主控板连接,直接通过数字信号连接。在主控板上由 DSP 对采集到的 PSD 电压数据进行解算处理。

2.3.1 发光管

发光管的选型要满足准直性好、光功率适合 (PSD 的光敏感度不能超过 1 mW) 等特点。

L10596 小型红外 LED 具有指向性好和均匀

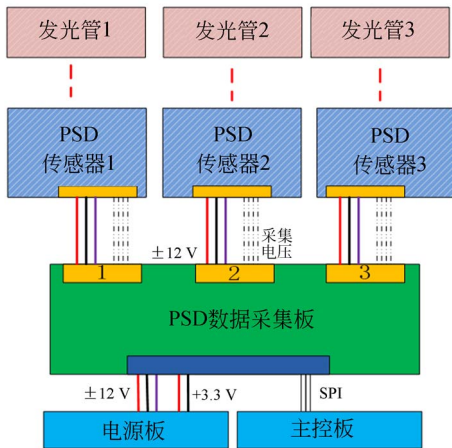


图 4 PSD 测量系统设计

Fig. 4 Design of PSD measurement system

性好的优点,其中 L10596-02 的辐射角在 2°左右,可以在近距离替代激光器使用。

L10596 主波长为 870 nm,属于近红外发光管,光功率最大为 3 mW,实际工作点电流在 5 mA左右,辐射通量为 0.3 mW,线性度较好。

2.3.2 PSD

PSD 选用 SiTek 公司的 PSD(型号 2L45_SU24),其最大感光面积达到 45 mm×45 mm。非线性精度平均误差为 0.3%,最大误差为 1.0%,温度漂移为 40×10⁻⁶/°C。该款 PSD 参数如表 2 所示。

表 2 2L45_SU24 指标参数

Tab. 2 Parameters of 2L45_SU24

名称	典型值	最大值
有效感光面/mm ²	45×45	—
感光波长/nm	380~1 100	—
非线性误差	0.3%	1.0%
暗电流/nA	400	4 000
响应度/(A·W ⁻¹)	0.63	—
响应时间/μs	2	—
结电容/pF	1 600	2 000
反偏电压/V	15	30
温度漂移/(10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹)	40	200

2L45_SU24 是四边形 PSD,4 个电极的电流 I₁, I₂, I₃, I₄ 经过信号处理电路 I/V 转换后电压值为 V_{x1}, V_{x2}, V_{y1}, V_{y2}。选择 PSD 光敏面中心为原点, L_x 和 L_y 为 X 轴和 Y 轴的光敏面长度,入射光斑位置(X, Y)可由公式(1)得出:

$$X = \frac{V_{x2} - V_{x1}}{V_{x2} + V_{x1}} \cdot \frac{L_x}{2}, Y = \frac{V_{y2} - V_{y1}}{V_{y2} + V_{y1}} \cdot \frac{L_y}{2} \quad (1)$$

PSD 的感光波长为 380~1 100 nm,对近红外发光管有较好的响应,并确认仪器内部无其他光源,因此光线干扰影响可以忽略。PSD 的响应时间最大值为 10 μs,所以完全可以响应 1~100 kHz 的位移变化。

2.3.3 信号调理电路

信号调理和 AD 采集处理硬件框图如图 5 所示。信号调理选用 SiTek PSD 专用处理电路,型号为 SE-0010-SPC01,该电路为厚膜集成电路,噪声小于 3 mV_{pp}。电路运算放大器在芯片工艺中采用激光微调技术,可将失调电压和失调电压漂移减至最小。调理电路还具有良好的温度跟随特性,既可以做模拟运算也可以直接输出,此处选择直接输出 Amp X₁, Amp X₂, Amp Y₁, Amp Y₂。

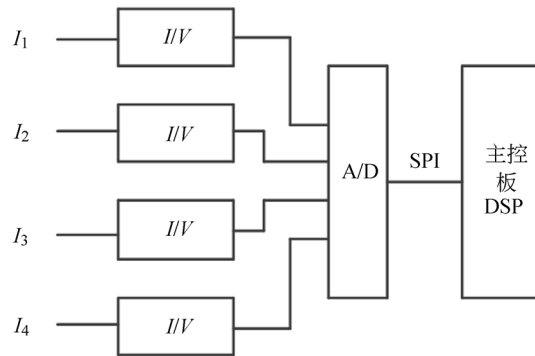


图 5 PSD 调理采集电路方框图

Fig. 5 Block diagram of conditioning and acquisition circuit

PSD 采集板选用 ADS1258 高精度的采集芯片。ADS1258 是一款 24 位分辨率、16 通道的高精度模数转换器,主要由 16 路输入多路复用器、SPI 串行接口、通用输入输出端口、ADC 及基准部分电路等组成。它可进行 16 路单端输入转换和 8 路差分输入转换;能以每通道 1.8~23.7 kS/s 的通道扫描速率提供单周期建立的数据。

3 PSD 测量模型

建立被测物体坐标系 F,与被测物体固联,坐标原点为 F₀,与坐标系三轴构成右手坐标系。发光管基准坐标系 E,与被测物体固联,坐标原点 E₀ 位于三个发光管中心,三轴方向与 F 系三轴方

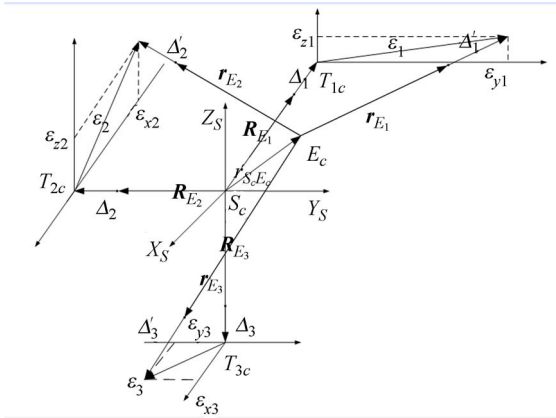


图 6 坐标系定义及运动示意图

Fig. 6 Sketch map of coordinates and movement

向相同。基座基准坐标系 S ，与基座固联，坐标原点为 S_c ；当被测物体位于参考位置时， S_c 与 E_c 重合，并且 S 系三轴方向与 E 系相同。PSD 光敏面

坐标系 T_i (i 表示三片 PSD 的序号) 与基座固联，坐标原点 T_{ic} 为被测物体位于参考位置时发光管照射到敏感面上的光斑位置，三轴方向与 S 系方向相同。坐标系及运动如图 6 所示。

图 6 中， r_{E_i} ($i=1,2,3$) 为 F 系上每个发光管的位置矢量。当被测物体处于参考位置时， R_{E_i} ($i=1,2,3$) 为发光管在 S 系中的位置矢量； Δ_i ($i=1,2,3$) 为发光管到 PSD 敏感面光斑的位置矢量。当被测物体相对基座位置和姿态发生变化时， ϵ_i ($i=1,2,3$) 为 T_i 系内光斑的位置矢量； Δ_i' ($i=1,2,3$) 为发光管到 PSD 敏感面内光斑的位置矢量； $r_{S_c E_c}$ 为坐标原点 E_c 在 S 系下的位置矢量。根据几何关系和矢量算法可得：

$$\Delta_i' = \epsilon_i + \Delta_i + R_{E_i} - r_{S_c E_c} - r_{E_i} \quad (i=1,2,3). \quad (2)$$

将式(2)在 S 系下展开，在小角度转动下求解得到：

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(\epsilon_{2x} + d_1)(\epsilon_{3y} + d_2)(\epsilon_{3y} - \epsilon_{1y}) + (\epsilon_{3x} + d_1)(\epsilon_{2z} + d_3)(\epsilon_{1z} - \epsilon_{2z}) - (\epsilon_{3x} + d_1)(\epsilon_{2x} + d_1)(\epsilon_{2x} - \epsilon_{3x})}{(\epsilon_{1z} + d_3)(\epsilon_{3y} + d_2)(\epsilon_{2x} + d_1) + (\epsilon_{3x} + d_1)(\epsilon_{1y} + d_2)(\epsilon_{2z} + d_3)} \\ \frac{(\epsilon_{1z} + d_3)(\epsilon_{3y} + d_2)(\epsilon_{1z} - \epsilon_{2z}) + (\epsilon_{3x} + d_1)(\epsilon_{1y} + d_2)(\epsilon_{2x} - \epsilon_{3x}) - (\epsilon_{1y} + d_2)(\epsilon_{3y} + d_2)(\epsilon_{3y} - \epsilon_{1y})}{(\epsilon_{1z} + d_3)(\epsilon_{3y} + d_2)(\epsilon_{2x} + d_1) + (\epsilon_{3x} + d_1)(\epsilon_{1y} + d_2)(\epsilon_{2z} + d_3)} \\ \frac{(\epsilon_{1z} + d_3)(\epsilon_{2x} + d_1)(\epsilon_{2x} - \epsilon_{3x}) + (\epsilon_{1y} + d_2)(\epsilon_{2z} + d_3)(\epsilon_{3y} - \epsilon_{1y}) - (\epsilon_{1z} + d_3)(\epsilon_{2z} + d_3)(\epsilon_{1z} - \epsilon_{2z})}{(\epsilon_{1z} + d_3)(\epsilon_{3y} + d_2)(\epsilon_{2x} + d_1) + (\epsilon_{3x} + d_1)(\epsilon_{1y} + d_2)(\epsilon_{2z} + d_3)} \end{bmatrix}$$

$${}^{(S)}r_{S_c E_c}^* = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \theta_z & -\theta_y \\ -\theta_z & 1 & \theta_x \\ \theta_y & -\theta_x & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (k_3 + k_5)/2 \\ (k_1 + k_6)/2 \\ (k_2 + k_4)/2 \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} k_1 = \epsilon_{1y} + \epsilon_{1z}\theta_x + (\Delta_1 + s_1)\theta_z \\ k_2 = \epsilon_{1z} - \epsilon_{1y}\theta_x - (\Delta_1 + s_1)\theta_y \\ k_3 = \epsilon_{2x} - \epsilon_{2z}\theta_y - (\Delta_2 + s_2)\theta_z \\ k_4 = \epsilon_{2z} + \epsilon_{2x}\theta_y + (\Delta_2 + s_2)\theta_x \\ k_5 = \epsilon_{3x} + \epsilon_{3y}\theta_z + (\Delta_3 + s_3)\theta_y \\ k_6 = \epsilon_{3y} - \epsilon_{3x}\theta_z - (\Delta_3 + s_3)\theta_x \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\theta = [\theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T$ 为 E 系相对 S 系的姿态角，也是 F 系相对 S 系的姿态角； $r_{S_c E_c} = [x \ y \ z]^T$ 为 E 系原点 E_c 相对 S 系原点 S_c 的相对位移； d_1, d_2, d_3 为 3 个发光管分别到 3 个 PSD 探测面的距离。为计算得到被测物体任意点 E_h (包括被测物体质心 F_0) 相对 S 系任一点 S_0 的相对位移，根据矢量求和法则可得：

$$\begin{aligned} r_{S_0 E_h} - r_{S_0 S_c}^* &= r_{S_0 S_c} + r_{S_c E_c} + r_{E_c E_h} - r_{S_0 S_c}^* - \\ r_{S_c E_c}^* - r_{E_c E_h}^* &= r_{S_c E_c} + r_{E_c E_h} - r_{E_c E_h}^*. \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)在 S 系下展开，并计算求得：

$${}^{(S)}r_{S_0 E_h} - {}^{(S)}r_{S_0 S_c}^* = {}^{(S)}r_{S_c E_c} + {}^{(F)}r_{E_c E_h} \times \theta. \quad (5)$$

4 性能测试

4.1 单块 PSD 测试

单块 PSD 的性能测试包括噪声测试、非线性度测试和频率响应测试。

4.1.1 噪声测试

精度是在同一条件下对同一位置采集若干点，观察位置的偏移情况。如图 7 所示，测试精度在 0.03 mm 以下。

4.1.2 非线性度测试

PSD 的线性度是指 PSD 的实际位置与测量

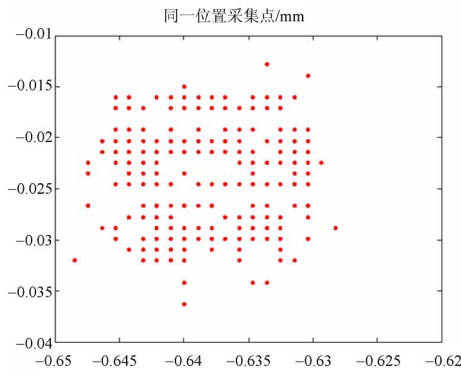
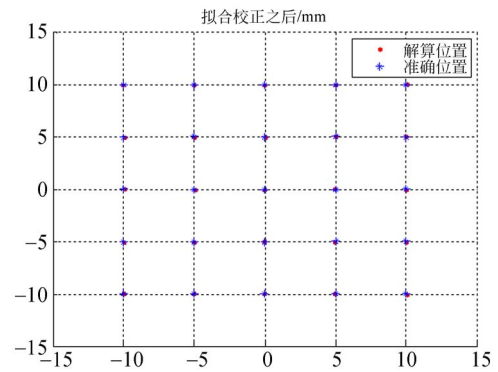


图 7 PSD 精度典型测试结果

Fig. 7 Result of PSD precision test



(b) 拟合校正后值

(b) Fitting correction values

图 8 PSD 线性度典型测试结果

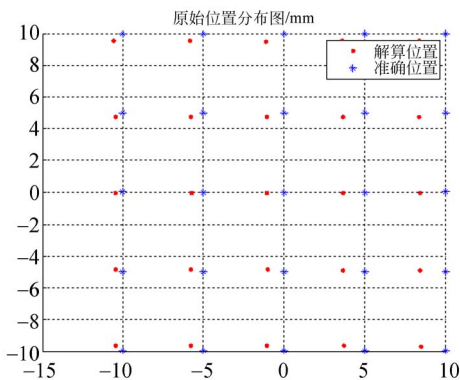
Fig. 8 Result of PSD linearity test

所得位置之间的线性关系程度。一般用均方根非线性误差表示线性度,即有:

$$\begin{cases} \text{均方根非线性误差: } \delta/l \times 100\% \\ \text{均方根位置误差: } \delta = \sqrt{\sum_i^n (x_i - x_{ci})^2 / n} \end{cases}, \quad (6)$$

其中: l 为测量范围, x 为实际位置向量, x_c 为相应测量位置向量。

非线性度是选取一定数量的点阵比较每个点的实际值和测量值并取差值。利用精密位移台移动,生成靠近 PSD 中心位置的 25 个点数据(每隔 5 mm 一个),可以看到标定后的实测结果(红色点)和基准点实际值(蓝色点)之间的差异。综合评价, $\delta = 0.0217$, 线性度在 0.03 mm 以下(或 $<0.3\%$), 结果如图 8 所示。



(a) 原始测量值

(a) Original measurement values

4.1.3 响应测试

实际 PSD 的响应时间为 $10 \mu s$, 而电路采集速率为 1 kHz, 因此系统响应频率为 1 kHz。本文利用振动平台给 PSD 位移加入 1, 5, 10, 50, 100, 250 Hz 振动, PSD 响应为 100%, 说明 PSD 可以满足系统响应速度的要求。

4.2 系统级测试

这里采用五维位移台系统级测试。如图 9 所示, 右边为五维位移台, 它可以进行 5 个自由度的平动和转动, 大于 300 mm, 精度优于 0.05 mm。此外, 为了保证移动精度, 位移台需要辅助数字高度尺和支撑设备。

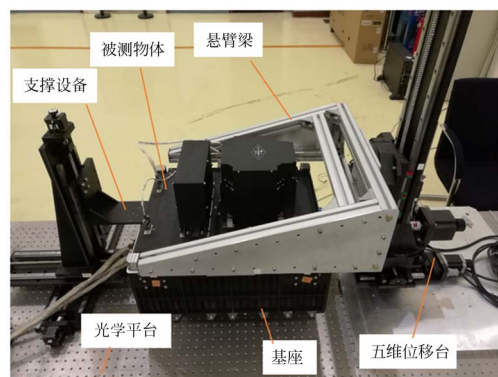


图 9 六自由度位移测量系统标定现场

Fig. 9 Calibration equipment of six-freedom position measurement system

6 个自由度的标定和测试需要选取标定点, 如果每个自由度选取 n 个点, 则测试点为 n^6 个, 数据量巨大, 不可能人工完成。因此, 本文采用极

限测量法选取最有代表性的几个基准点进行标定和测试。

4.2.1 系统标定结果

首先根据测量值对 PSD 及发光管进行标定, 根据 30 个极限值, 采用最小二乘法进行标定。基准点分别取 x 轴、 y 轴的 $0, \pm 8$, z 轴的 $0, \pm 6.5$ 等位置进行测试, z 平面中心点再补测 3 个点, 测试点共 $3 \times 3 \times 3 + 3 = 30$ 个。由于质心无法确定, 所以浮子转动时不能确定质心的位移, 旋转时质心位移只作为测试值, 不作为标定值。标定结果如表 3 所示。

表 3 PSD 参数和系统安装偏差的标定结果

Tab. 3 Calibration results of PSD parameters and system installation bias

参数	值		
PSD 标度因数 L_1	49.830 9	48.374 0	50.117 0
	50.130 8	48.080 1	48.098 6
PSD+红外安装偏差 L_0/mm	0.102 1	1.667 8	1.075 0
	-1.724 7	-0.074 5	-1.211 0
	0.035 5	0.015 0	-0.029 6
发光管偏角	-0.037 1	-0.044 2	
	-0.023 4 (rad)		
	或 2.035 0°	0.859 9°	-1.696 8°
	-2.126 8°	-2.533 8°	-1.341 4°

4.2.2 系统位姿测试结果

代入标定后的值, 再次进行六自由度系统测试, 结果如表 4 所示。

表 4 系统标定后位姿误差结果

Tab. 4 Position deviation results after system calibration

误差	x/mm	y/mm	z/mm	$\theta_x/(\text{°})$	$\theta_y/(\text{°})$	$\theta_z/(\text{°})$
平均误差	0.1179	0.1508	0.1262	0.1218	0.1227	0.1376
最大误差	0.4187	0.4774	0.4382	0.3966	0.4594	0.4794

表中, $(x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 的平均误差分别在 $0.1 \sim 0.15 \text{ mm}$ 和 $0.1 \sim 0.17^\circ$, 比较接近随机噪声, 但在少数几个测试点误差较大, 主要由临时搭建的测试仪器误差等组成, 不过仍满足系统 0.5 mm 和 0.5° 的要求。

需要说明的是, 相对位移是以 PSD 正交模块中心为基准的位移。如果测量其他质点, 则系统

质心位移和角度计算如式 (7), 质心位移误差 (x, y, z) 还需要根据式 (8) 进行变换, 由于耦合了角度误差, 质心到 PSD 正交中心的距离 r 越远, 偏角对系统的影响越大。在设计中应该使 PSD 正交中心接近质心点。

$$\begin{cases} x_C = x_{\text{PSD}} + r_D \theta \\ \theta_C = \theta_{\text{PSD}} \end{cases}, \quad (7)$$

$$\partial x_C = \partial \theta_{r_D} + \partial r_D \theta + \partial x_{\text{PSD}}. \quad (8)$$

4.2.3 噪声测试

噪声水平和 PSD 本身有关, 也和电路与软件有关。解算只能影响系统误差, 不影响噪声。因此测试应该在实际系统接入电路和软件后, 对整体的位移和姿态输出数据进行分析。图 10 分别是系统实际运行时的长时间测量曲线, 可以看出, 系统位移噪声在 0.1 mm 以下, 姿态角噪声在 0.02° 以下。

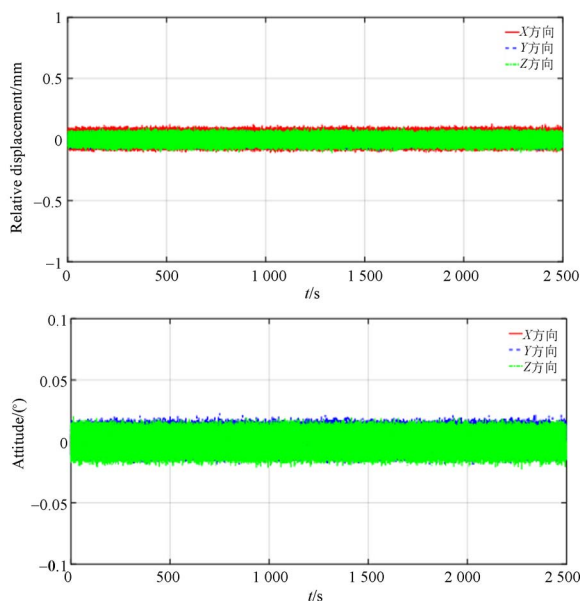


图 10 实际稳定时的位移和姿态角

Fig. 10 Displacement and attitude angle for actual stability

4.3 可靠性评估

为了将该测量系统应用于航空航天, 对发光管和 PSD 进行了器件摸底试验评估。

在温度摸底试验评估中, 随温度上升, 发光管的电流和输出功率变大, 施加电压越小, 温度对电流和输出功率的影响越小, 如图 11 所示; PSD 电压随发光管输出功率的上升而增大, 直至接近饱和 (10 V 左右), 如图 12 所示。图中 V_{xi}, V_{zb} ,

V_{xa}, V_{yb} 分别为 PSD x 方向和 y 方向 a, b 电极输出电流经 I/V 电路转换后的电压。

由于解算值: $X = (V_1 - V_2) / (V_1 + V_2)$, 当 V_1 和 V_2 等比例增大时, X 的值基本不变。除非 V_1 和 V_2 首先达到饱和状态, PSD 电压和发光管的温度近似呈线性关系。因此,在系统温度改变时,最重要的是控制发光管的功率,而并非 PSD。

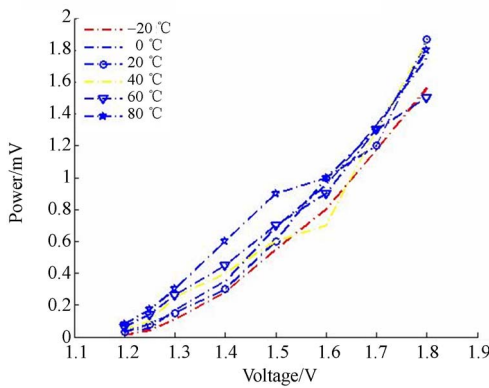
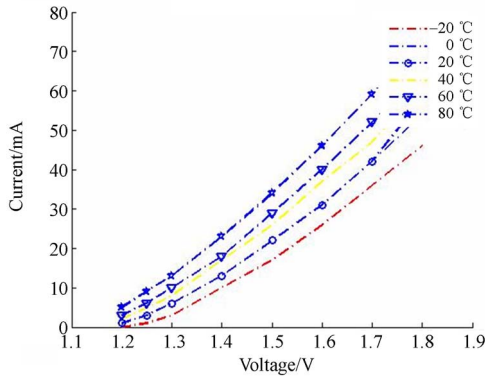


图 11 发光管温度摸底试验结果
Fig. 11 Results of LED thermal test

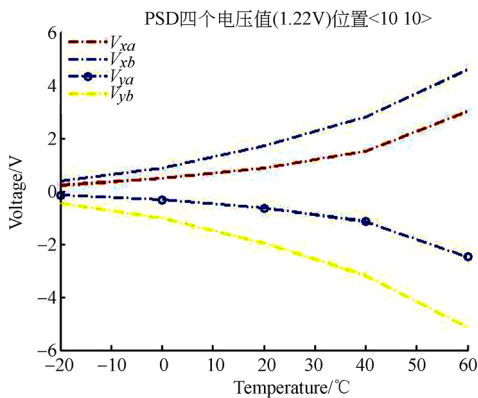


图 12 PSD 电压温度摸底试验结果
Fig. 12 Thermal experiment of PSD's voltage

经过评估,实际测试工作点的发光管功率在 0.3 mW 左右,对应电压在 1.3 V 左右。实际工作温度为 30~40 °C。

在力学振动摸底试验评估中,PSD 靶面大,容易破碎,但经过整体结构加固和点胶后,PSD 经受住了正弦振动和随机振动测试,评估结果如表 5 所示。

表 5 力学振动试验评估结果

Tab. 5 Evaluation result of dynamic vibration test

试验项	振动频率/Hz	最大响应加速度
正弦 X 向	100	4.03 g
正弦 Y 向	60	9.6 g
正弦 Z 向	100	4.1 g
X 向随机	——	18.3 grms
Y 向随机	——	21.7 grms
Z 向随机	——	26.2 grms

5 结 论

本文选择二维 PSD 作为非接触式测量传感器,利用三片 PSD 组成了六自由度位移测量系统,给出了测量系统的 PSD 布局以及测量模型;进行 PSD 测量部分的电路设计及关键器件选型。本文考虑 PSD 和发光管的安装误差,分析它们对系统位姿测量精度的影响,并基于精密位移台搭建了标定测试系统对其进行标定测试。测量结果表明,在单片 PSD 噪声水平为 0.03 mm 和线性度为 0.3% 的性能条件下,受 PSD 传感器误差、电路噪声和系统安装误差等的影响,PSD 测量系统的位移噪声和角度噪声分别为 0.1 mm 和 0.02°, PSD 测量系统的绝对误差均值分别为 0.15 mm 和 0.14°,最大值达到 0.5 mm 和 0.14°。对 PSD 器件进行了性能评估,精度达到 0.02 mm,非线性度小于 0.3%,对 250 Hz 以下的振动均能及时响应。为了验证该传感器在航空航天领域的实用性,进行了热学可靠性摸底试验,以更好控制 PSD 在合适温度下工作。该系统能很好地应用于空间隔振系统,也可以应用于其他三维位置和运动测量系统。

参考文献:

- [1] 黄梅珍. 位置敏感探测器的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2001.
HUANG M ZH. *Study on Position Sensitive Detector*[D]. Hangzhou: Zhe Jiang University, 2001. (in Chinese)
- [2] 林永涛. PSD 综合性能检测系统的研制[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
LIN Y T. *The Development of PSD's Comprehensive Performance Test Systems*[D]. Hangzhou: Zhe Jiang University, 2012. (in Chinese)
- [3] LUO Y D, SHEN Y T, CORDERO J, *et al.*. Enhancing measurement accuracy of position sensitive detector (PSD) systems using the Kalman filter and distortion rectifying[J]. *Sensors*, 2013;1-4.
- [4] 段洁, 孙向阳, 蔡敬海, 等. PSD 在激光位移检测系统中的应用研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(增):281-284.
DUAN J, SUN X Y, CAI J H, *et al.*. Applications research to PSD in the laser displacement detecting system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(suppl.):281-284. (in Chinese)
- [5] IVAN I A, ARDELEANU M, LAURENT G J. The metrology and applications of PSD (position sensitive detector) sensors for microrobotics[C]. 2012 *International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT)*, Paris, 2012:1-2.
- [6] ZHANG L B, SUN F CH, SUN Z Q. Decoupling control of the two-link flexible manipulator[C]. *IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Application (CESA)*, 2006: 2045-2048.
- [7] BEZIUK G, GROBELNY A, WITKOWSKI J S, *et al.*. Implementation of PSD sensor for measurement of vibrations[C]. *International Conference on Signals and Electronic Systems*, September 14-17, 2008:475-478.
- [8] 高经伍, 隋金雪, 赵风华. PSD 在弦振动测量中的应用[J]. *仪表技术与传感器*, 2004(9):30-31.
GAO J W, SUI J X, ZHAO F H. Application of PSD for vibration measure[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2004(9):30-31. (in Chinese)
- [9] 吴鸿, 陈冲, 李超, 等. 一种基于 PSD 的转速测量新方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(9): 1033-1039.
WU H, CHEN CH, LI CH, *et al.*. New method of speed measurement based on PSD[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(9):1033-1039. (in Chinese)
- [10] 刘娇月, 杨聚庆, 董登峰, 等. 激光跟踪仪的光电瞄准与定位系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6):1558-1564.
LIU J Y, YANG J Q, DONG D F, *et al.*. Optoelectronic aiming and orientation system of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1558-1564. (in Chinese)
- [11] SANNY OMAR. An inverse dynamics satellite attitude determination and control system with autonomous calibration[C]. *29th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2015:1-12.
- [12] 谷勇霞, 张玉玲, 赵杰亮, 等. 柔性机械臂动力学建模理论与实验研究进展[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(12):1694-1703.
GU Y X, ZHANG Y L, ZHAO J L, *et al.*. Advances on dynamics modeling and experimental studies for flexible manipulators[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(12):1694-1703.
- [13] 莫长涛, 陈长征. 二维 PSD 非线性修正共轭梯度算法[J]. *东北大学学报*, 2003, 24(5):507-509.
MO CH T, CHEN CH ZH. Conjugate gradient optimum algorithm of non-linear correction of two-dimension PSD[J]. *Journal of Northeastern University*, 2003, 24(5):507-509. (in Chinese)
- [14] 陈虎, 董文博, 吕世猛. 精密 PSD 自动标定测试设备的研制与应用[C]. *中国空间科学学会 2013 年空间光学与机电技术研讨会*, 2013.
CHEN H, DONG W B, LÜ SH M. High-precision instrument for PSD calibration test[C]. *SIM-ETC*, 2013. (in Chinese)
- [15] 郑军, 李文庆. 基于双 PSD 的三维测量系统的标定方法[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2018, 58(4):411-416.
ZHENG J, LI W Q. Calibration of 3-D measurement system based on a double position sensitive detectors[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2018, 58(4): 411-416. (in Chinese)
- [16] 刘春, 马颖. 遗传算法和神经网络结合的 PSD 非线性校正[J]. *电子测量与仪器学报*. 2015, 29(8):1157-1163.
LIU CH, MA Y. Nonlinear correction of PSD with genetic algorithm based on neural network[J]. *Journal of electronic measurement and instrumentation*.

- 2015, 29(8):1157-1163. (in Chinese)
- [17] 杨鲁新,董文博. 空间载荷中利用调制光源去除 PSD 背景光影响的方法[J]. 载人航天. 2018, 24(1):55-60.
YANG L X, DONG W B. Method for mitigating background light influence on PSD by modulating light source in space payloads[J]. *Manned Spaceflight*, 2018, 24(1):55-60. (in Chinese)
- [18] 李宗峰. 空间微重力环境下主动隔振系统的三维位置测量[J]. 宇航学报, 2010, 31(6):1625-1629.
LI Z F. 3D position measurement of active vibration isolation system under space microgravity [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(6):1625-1629. (in Chinese)
- [19] LIU J, YANG H M. Three dimensional attitude measurement of the beacon based on a single PSD [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 144(9):348-356.
- [20] 董文博,张永康,徐振宇,等. 六自由度位姿测量方法及装置:中国,CN107505610A[P]. 2017-02-22.
DONG W B,ZHANG Y K,XU ZH Y, et al.. Six-of-freedom displacement and angle measurement system method and device; Chinese Patent, CN107505610A[P]. 2017-02-22. (in Chinese)

作者简介:



高玉娥(1982—),女,山东人,硕士,工程师,2005年、2008年于西安电子科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间有效载荷、电子学设备的研制以及测量、控制技术的研究。E-mail: yuegao@csu. ac. cn



刘伟(1988—),男,吉林安图人,硕士,助理研究员,2013年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事航天器动力学与控制方面的研究。E-mail: liuwei@csu. ac. cn