

基于 PSD 的非接触式二维动态角度精密测量系统

李波^{1,2},董文博^{1,2,3},肖爱民^{1,3},于梦溪^{1,3},葛文奇^{2,4},何建国^{2,4}

(1. 中国科学院空间应用工程与技术中心,北京 100094;2. 中国科学院大学,北京 101408;
3. 中国科学院太空应用重点实验室,北京 100094;中国科学院空天信息研究院,北京 100094)

摘要:非接触式角度测量广泛用于机械制造、精密测量、航空航天等领域。在一种高速振镜的二维角度测试装置中,需要大范围($\pm 10^\circ$)、高速率(80 kHz)、高精度的非接触式二维角度测量方式,传统的动态角度测量方式都不能满足要求。基于 PSD 的高速响应特性,设计了光电反射式二维动态角度高精度测量系统,可以取得更好的技术指标。首先,采用高精度的 PSD 检测器和激光器等光学器件,可以实现高精度、大范围的非接触式角度测量;此外,利用坐标系变换得到二维机械角度与 PSD 输出二维位移的关系,并通过 FPGA 和高速 AD 采集板实现了高速数据采样,利用数字滤波的方法,大程度的降低了系统的噪声;通过数据插值的方法,对测量数据进行矫正,极大的降低了系统的误差,实现了大范围二维角度的系统误差都在较低水平。通过实验测试,系统可以实现 $\pm 10^\circ$ 摆角范围的测量,采样频率可达到 125 kHz,噪声达到 0.001° ,系统误差最大 0.007° 。满足了大范围、高速率、高精度的角度测量要求。

关键词:PSD;精密测量;二维角度测量;高速采样;数据插值

中图分类号:TP212.9 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.06.016

High-precision non-contact two-dimensional dynamic angle measurement system based on PSD

LI Bo^{1,2}, DONG Wen-bo^{1,2,3}, XIAO Ai-min^{1,3}, YU Meng-xi^{1,3}, GE Wen-qi^{2,4}, HE Jian-guo^{2,4}

(1. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3. Key Laboratory for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Non-contact angle measurement is widely used in machinery manufacturing, high-precision measurement, aerospace and other fields. In a high-speed galvanometer two-dimensional angle measurement device, a large range ($\pm 10^\circ$), high rate (80 kHz), and high-precision non-contact two-dimensional angle measurement method is required. The traditional dynamic angle measurement method cannot meet the requirements. Based on the high-speed response characteristics of PSD, a photoelectric high-precision non-contact two-dimensional dynamic angle measurement system is designed, which can achieve better measurement performance. First, the use of high-precision PSD detectors and lasers and other optical devices can achieve high-precision and large-wide non-contact two-dimensional angle measurement; in addition, the relationship between 2D mechanical angle and 2D displacement of PSD is obtained by

作者简介:李波(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向为精密测量和机器视觉。E-mail:libo181@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:董文博(1980-),男,博士,副研究员,主要研究方向为空间综合电子,空间精密仪器,计算机应用。

E-mail:wbdong@csu.ac.cn

收稿日期:2020-09-08;**修订日期:**2020-10-26

coordinate system transformation, and a high-speed data sampling through FPGA and high-speed AD acquisition board is achieved. The use of digital filtering greatly reduces the noise of the system; through the method of data interpolation, the measurement data is corrected, which greatly reduces the error of the system. The system error of large-scale two-dimensional angle is at a low level. Through experimental testing, the system can achieve $\pm 10^\circ$ swing angle measurement, the sampling frequency can reach 125 kHz, the noise and resolution can reach 0.001° , and the maximum system error is 0.007° . It meets the requirements of large range, high speed and high precision angle measurement.

Keywords: PSD; high-precision measurement; two-dimensional angle measurement; high-speed sampling; data interpolation

1 引言

非接触式角度测量广泛用于机械制造、精密测量^[1]、运动控制、航空航天^[2]等领域。在一种用于二维高速摆镜的研发和测试系统中,要实现范围 $\pm 10^\circ$ 、精度 0.001° 、采样速率大于 80 kHz 量级的角度动态测量指标。其关键问题在于系统不仅需要能测量大范围的二维角度,而且在大角度范围区间内要满足 0.001° 的精度要求,同时,系统需要实现高速率的角度测量。目前,尚没有成熟的方案可以满足以上的要求,必须进行创新设计,实现基于光电测量和视觉测量的大范围高精度高速率的动态角度测量。

通过调研,角度的测量技术已经发展的较为完备。角度的测量可分为静态角度测量和动态角度测量两种^[3]。传统的角度测量方法主要包括机械式和电磁式,虽然应用于很多场合,但是大部分都是接触式测量,测量精度也受到限制。随着光电技术的发展,传统光学方法与光电接收器件相结合的光电测角方法,由于其精度高、可靠性高、实现简单、体积小、质量轻、可维护性好,在测角领域中得到了广泛的应用^[4]。动态光电测量一般有以下几种方式:基于 PSD 的测量、基于四象限的测量和基于 CCD 的测量。

2019 年,上海科学院^[5]采用 PSD 测量,指标可以达到 $\pm 2^\circ$ 范围内 0.02° 左右精度,频率达到 200 Hz,其应用也是用于类似场合。文献[6]中等利用二维 PSD 激光自准直原理动态测量三自由度转角,结果表明,测量范围为 $\pm 1^\circ$,响应频率为 4 kHz,静态测试误差为 $0.35'$,动态测试误差为 $0.36'$ 。2016 年,文献[7]中利用 PSD 实现了测量范围 ± 1200 arcsec,分辨率达到 0.473 % 和 0.632 %,其只测量了静态精度,且没有频率指标。

2018 年,中科院空间应用中心,文献[8]中对空

间运动体的六自由度测量,达到角度范围 2.5° ,精度 0.1° ,速率 250 Hz 的水平。2017 年,中科院空间应用中心公开了《六自由度位姿测量方法及装置》的专利。其他近年也未发现专门用于激光雷达二维转角测量的专利或论文。

浙江大学在文献[9]中采用四象限方法进行角度测量,测量范围 ± 500 arcsec,分辨率达到 0.1 arcsec。2005 年、2006 年,日本 Niigata 大学 Takamasa Suzuk^[10-11],采用和浙江大学论文类似的方法。

文献[12]中提出了一种基于 CCD 成像的检测光学系统测角精度的方法。其精度达到亚像素级,标定误差小于 0.0167° 。文献[13]利用特定的二维衍射光栅贴附于被测平面上,CCD 得到平面倾角变化前后的衍射图像,通过条纹分析得到被测面倾角的变化,其测量准确度可达 0.06° ,可测量 20° 范围内的二维平面倾角。

总之,四象限的测量可以实现大范围二维角度测量,但是四象限测量要求激光器为圆形光斑,而 PSD 测量对光斑无严格要求,其只与光的能量中心位置有关,且四象限探测器象限之间存在死区,而 PSD 光敏面无需分割,不存在死区,可实现连续的光斑位置测量,位置分辨率高。CCD 可以实现高精度角度测量,但是 CCD 测量需要逐帧采集图像,而系统需要达到至少 80KHz 的采样速率,显然 CCD 无法实时采集和处理如此庞大数据量的图像。

因此,四象限探测器可以高精度地反映光斑中心的位置变化,常用于定位对准;CCD 测量适用于在采样速率要求较低的场合实现高精度的动态角度测量。而需要实现大范围的连续角度测量,且满足高速率高精度的要求,二维 PSD 是最合适的探测元件。而过去的二维 PSD 的测量虽然能够达到较高的速率,但其测量精度有待提高。

本课题设计了创新方法,采用 PSD 方式实现了

大动态范围的高精度角度测量。首先,采用高精度的激光器和 PSD,保证系统精度,PSD 大面积的光敏面保证能测量大角度范围,通过光路聚焦方法,提高 PSD 敏感精度;其次采用 FPGA 和高速 AD 采集板实现了 125 kHz 高速数据采样,再利用数字滤波的方法保证 300 Hz 工作频率达到 0.001° 的低噪声,满足随机误差指标;对于任何测量系统都不可避免存在系统误差,本文用极高精度的位移台对测量系统进行 $\pm 10^\circ$ 连续的矩形角度范围进行标定,采用二维插值算法,实现了在 $\pm 10^\circ$ 的连续角度范围内,系统误差都能满足精度要求。

2 系统设计和工作原理

测量系统主要由光机系统、电路系统组成,下面详细描述了角度测量系统的原理和工程实现。

2.1 精密光机系统设计

如图 1 所示,为系统的光路结构,光路系统主要由激光器、PSD、衰减片、滤光片以及外部的反射镜(或自标定镜)组成。

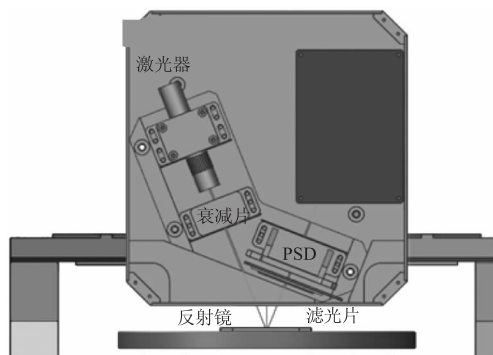


图 1 光路系统

Fig. 1 Optical system

激光器的稳定性对系统的精度影响较大,应选择漂移小且光源稳定的激光器,通过比较,选用美国 Coherent 公司的 STR-655-1-CW-P-D01 型激光器,其发出波段 655 nm 的红光,功率为 1 mW,其光束稳定性小于 $10 \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$,发散角小于 3 mrad。实际测试中,为了避免杂光和振动造成的影响,需加上遮光外罩并在隔振平台上测试。

PSD 作为光电探测器件,主要用于精确的测量其上光斑的位置。PSD 需要具有二维位移的检测能力,光谱需与激光器适应,且为了保证 $\pm 10^\circ$ 的大角度测量,其检测面积需要符合要求。通过对比,选择 Sitek 公司 2L45_SU24 型 PSD,其为双面型 PSD,光敏面积 $45 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$,温度漂移为 $40 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$,线

性度 $\pm 0.3 \%$,响应灵敏度为 0.4 A/W 。该 PSD 是目前市场上靶面最大的高精度 PSD,原则上,PSD 需要对其非线性进行校正,但选用的 PSD 非线性误差较小,可不必进行非线性校正。

激光器的输出能量较大,不能直接照射到 PSD 探测器上,需要加入衰减片。衰减片选用 Thorlabs 公司型号 NE510B 的吸收型中性密度产品,其只会造成一定的散射,对光斑影响小。为了防止近红外光线等对系统造成杂光干扰,需选用合适的滤光片,滤光片选择吸收衰减型滤光片,通过比较分析,考虑选用 $655 \pm 10 \sim 20 \text{ nm}$ 窄带滤光片。

经过光路计算,反射镜中心距 PSD 平面为 45 mm,激光入射角为 20° ,可保证反射镜 $\pm 10^\circ$ 转动,光斑都能在 PSD 的靶面上。激光器、滤光片、衰减片和 PSD 安装在一块高精度的平板上,采用固定销的方式保证安装精度。衰减片贴出光口安装,滤光片安装于 PSD 前,结构设计紧贴,不易受杂光的影响。激光器、PSD 采用定制加工的夹具,保证平面度、粗糙度以及孔的尺寸公差。

图 2 为测试系统的工装图,其中,测量工装主要用于安装和测试反射镜,为了便于系统的标定,其可以更换为包含六自由度位移台的标定工装。标定工装的反射镜安装位置必须与测量工装一致,且需要通过设置位移台的参数,保证位移台带动反射镜的运动能准确反映测量工装中反射镜的运动,最终经过标定后的系统能准确应用于实际的测量工装中。

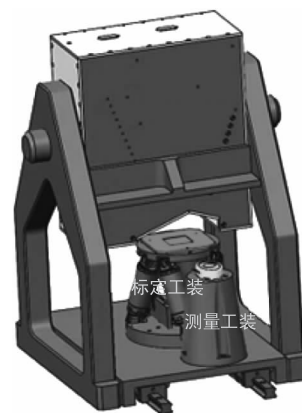


图 2 工装图

Fig. 2 Mechanical tooling diagram

为了保证标定的精度,需要采用高精度的六自由度位移台。选择 PI 公司的 H-811. I2 六自由度平台。其在二维旋转角度的范围和精度如表 1

所示,二维转角均可达到 $\pm 10^\circ$,最小位移和重复精度均在 μrad 数量级,可以满足标定的范围和精度需求。

表 1 位移台参数

Tab. 1 Parameter of the displacement platform

运动和定位	数值	单位
θ_x 和 θ_y 的行程	± 10	($^\circ$)
θ_x 和 θ_y 的最小位移	2.5	μrad
θ_x 和 θ_y 的重复精度	± 2	μrad

2.2 高带宽电路系统设计

电路系统主要包括 PSD 信号处理子系统、数据传输子系统和数据处理子系统,电路原理如图 3 所示。

PSD 信号处理子系统主要包含 PSD 器件、调理芯片及 AD 采集电路。数据传输子系统主要包含 FPGA 数据传输板,其与 PSD 的 AD 采集电路连接,可以实现 AD 的采集和发送控制,通过以太网与上位机连接,可以实现高速数据传输功能,同时 FPGA 还和反射镜进行电源和数据连接,可以采集反射镜自身的外部电压值,将电压值和反射镜角度值对应存储,一起传输给上位机。数据处理子系统包含上位机的数据采集、滤波、二维角度计算、系统标定等功能。

为了满足高速采样的需要,AD 采集板选用美国 TI 公司的 ADS1258IRTCR 型器件,24 Bit 字长,采样速率可达到 125 ksp/s。主控芯片使用 Xilinx 公司的 Zynq7000 系列的芯片,型号为 XC7Z020 - 2CLG400I,400 个引脚的 FBGA 封装,芯片的处理器系统集成了两个 ARM Cortex™ - A9 处理器,实现高速的数据处理。

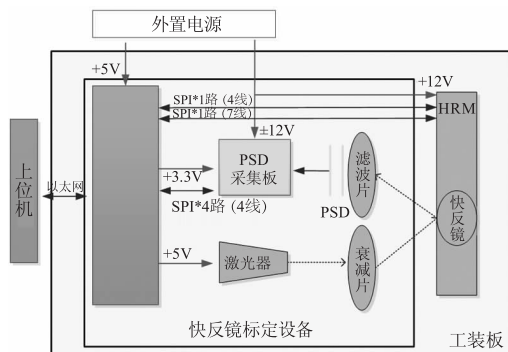


图 3 电路原理
Fig. 3 Circuit principle

3 二维角度解算和精密标定方法

如图 4 所示,为系统采集到的 PSD 四路数字电压信号通过一系列计算得到精密的二维角度值的流程图。

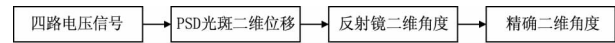


图 4 精密角度计算流程

Fig. 4 Angle calculation process

选择 PSD 靶面的中心作为坐标原点,四路数字电压信号为 V_{x1} 、 V_{x2} 、 V_{y1} 、 V_{y2} , L_x 、 L_y 为两个方向光敏面的长度,入射到 PSD 上的光斑二维位移为:

$$\begin{cases} x = \frac{V_{x2} - V_{x1}}{V_{x2} + V_{x1}} \cdot \frac{L_x}{2} \\ y = \frac{V_{y2} - V_{y1}}{V_{y2} + V_{y1}} \cdot \frac{L_y}{2} \end{cases} \quad (1)$$

根据系统的光路建立相应的数学模型,得到光斑二维位移与反射镜的二维旋转角度的函数关系。此时得到的角度值误差往往偏大,需要对其滤波和校正,以降低其随机误差和系统误差,最终得到精确的角度测量值。

3.1 二维位移与角度关系求解

如图 5 所示,为系统的光路模型简图,世界坐标系设置于平面镜中心。反射镜处于零位时,光线以 20° 入射角照射到反射镜的中心位置,经反射后垂直打在 PSD 靶面上。

由于在实际测试中,反射镜的两个旋转轴并不通过反射镜的中心,而是存在一定的偏移 dx 和 dy ,计算出的角度与位移关系是二维非线性耦合的关系,即 $\theta_x = f(X, Y)$, $\theta_y = g(X, Y)$,求解相应的函数解析解较困难,本文将根据实际的光路参数得到相应的数值解,并通过拟合的方法得到 f 和 g 的近似解。

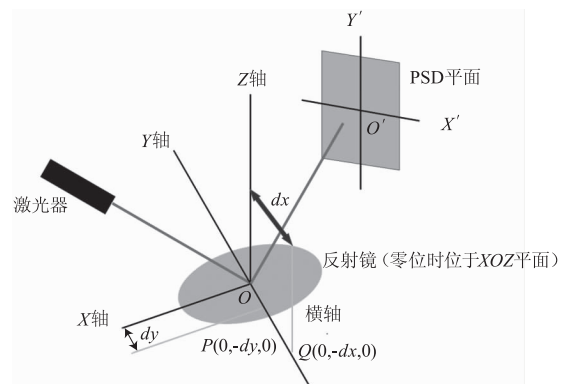


图 5 光路示意图

Fig. 5 Optical path diagram

如图 6 所示,假设 $O_1 - X_1Y_1Z_1$ 为世界坐标系, 旋转直线 L 通过点 $P(x_1, y_1, z_1)$, 直线的方向向量为 $\vec{n}_1 = (\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$, 世界坐标系绕直线 L 旋转 θ 角度后得到坐标系 $O_4 - X_4Y_4Z_4$, 将两个坐标系的原点平移到 P 点得到坐标系 $O_2 - X_2Y_2Z_2$ 和坐标系 $O_3 - X_3Y_3Z_3$ 。

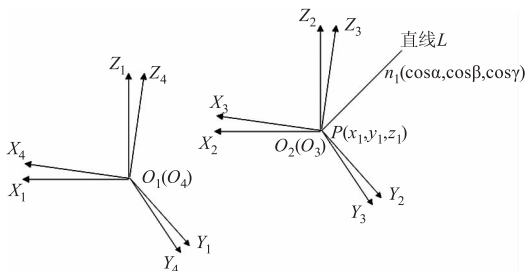


图 6 坐标系变换

Fig. 6 Coordinate transformation

那么坐标系 $O_1 - X_1Y_1Z_1$ 到坐标系 $O_4 - X_4Y_4Z_4$ 的变换矩阵可表示为:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & y_1 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_1 \\ 0 & 1 & 0 & -y_1 \\ 0 & 0 & 1 & -z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, $T_{3 \times 3}$ 为坐标系绕经过其原点的直线旋转 θ 角的变换矩阵:

$$T_{3 \times 3} = \begin{pmatrix} \vec{n}_1 \\ \vec{n}_2 \\ \vec{n}_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{n}_1 \\ \vec{n}_2 \\ \vec{n}_3 \end{pmatrix}^{-1} \quad (3)$$

其中, $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$ 为一组标准正交基。

根据式(2)和(3)可求得反射镜绕横轴和纵轴旋转 θ_x 和 θ_y 后的平面方程:

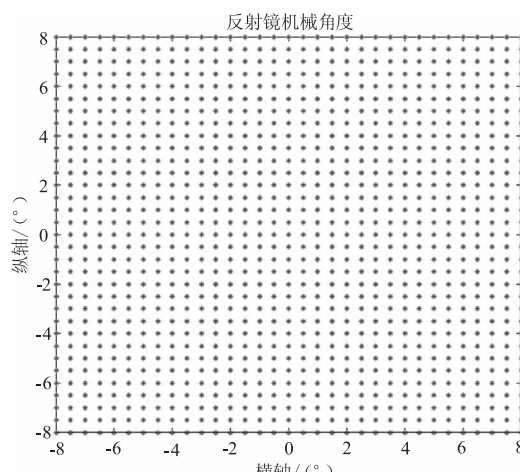
$$\begin{pmatrix} \sin\theta_x \cos\theta_y \\ \cos^2\theta_y \\ \sin\theta_y \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos\theta_y - 1 \\ \cos\theta_y - \cos^2\theta_y \\ 0 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \quad (4)$$

利用以下两个约束条件可求解反射光线并得到 PSD 上的二维位移:

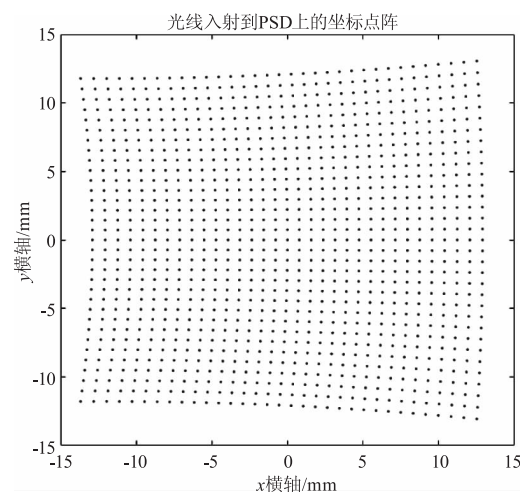
- ①入射角等于反射角;
- ②入射光线方向向量、反射镜法向量、反射光线方向向量共面。

如图 7(a) 所示,为一系列 (θ_x, θ_y) 构成的面点阵,计算得到相应光斑位移的数值解 (X, Y) 构成的

点阵如图 7(b) 所示。



(a) 角度点阵



(b) 位移点阵

图 7 位移和角度关系

Fig. 7 Relationship between displacement and angle

采用二次多项式拟合的方法,利用得到的一系列对应的数值解,拟合 $\theta_x = f(X, Y), \theta_y = g(X, Y)$, 最终得到以下关系:

$$\begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ X \\ Y \\ x^2 \\ xy \\ y^2 \end{pmatrix}$$

只要计算出 PSD 输出的二维坐标,根据上面的关系式即可得到反射镜的二维转角。

3.2 二维角度全局标定方法

由光斑位移计算出的角度值受光学和机械安装等因素的影响,存在一定的误差,需进行角度标定。标定是得到一组实际测量的角度与理论角度之间的对应,

对实际测量的角度值进行校正,使测量值经过校正后得到的估计值与理论值接近,以降低系统误差。

标定设备为六自由度精密位移台,以位移台角度作为理论角度值,测量系统输出的角度值作为测量值,标定时位移台的移动方式如图 8 所示,采用“弓”型扫描的方式直至遍历所有的需标定角度值,位移台扫描前,需设置位移台的位置参数和两个转轴的参数,保证其与测量工装的反射镜参数一致性。位移台处于每一角度位置时都需采集一定量的测量角度数据,将采集的角度数据求平均值作为该位置的角度测量值。

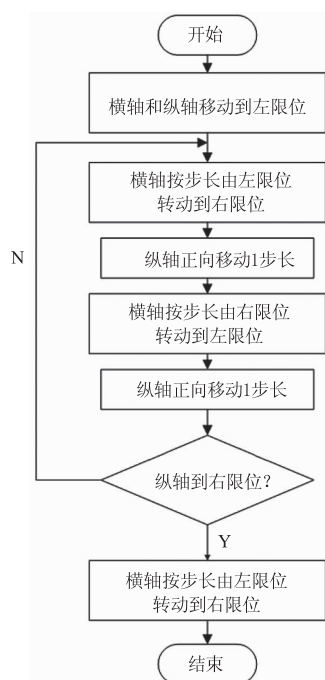


图 8 位移台移动过程

Fig. 8 Moving process of displacement platform

角度校正算法可采用数值拟合、插值以及神经网络等方法^[14]。由于 PSD、光源等非线性因素的影响,采用拟合的方法系统误差较大,且非线性拟合关系难以确定,神经网络的方法可以解决非线性的问题,但模型相对复杂,容易造成过拟合,插值的方法利用了被插值点与其临近点相关性较大的原理,插值后的结果的系统误差较小,且模型相对简单,本文采用的方法为线性插值的方法。

如图 9 所示,对处于四边形 $ABCD$ 中的二维点 X 进行插值操作, X 的测量值 (x, y) 满足以下关系:

$$x = x_A + (x_B - x_A) \cdot u + (x_D - x_A) \cdot v + (x_A - x_B + x_C - x_D) \cdot u \cdot v$$

$$y = y_A + (y_B - y_A) \cdot u + (y_D - y_A) \cdot v + (y_A -$$

$$y_B + y_C - y_D) \cdot u \cdot v$$

其中, $x_A \sim x_D, y_A \sim y_D$ 均为相应点的测量值, u 和 v 为待求插值系数。由以上两个方程可解出 u 和 v (选择 $[0, 1]$ 区间的解), X 点的插值估计为:

$$X = X_A + (X_B - X_A) \cdot u + (X_D - X_A) \cdot v + (X_A - X_B + X_C - X_D) \cdot u \cdot v$$

$$Y = Y_A + (Y_B - Y_A) \cdot u + (Y_D - Y_A) \cdot v + (Y_A - Y_B + Y_C - Y_D) \cdot u \cdot v$$

其中, $X_A \sim X_D, Y_A \sim Y_D$ 均为相应点的理论值,将计算得到的 u 和 v 带入上式即可求出点 X 的两个二维插值估计。

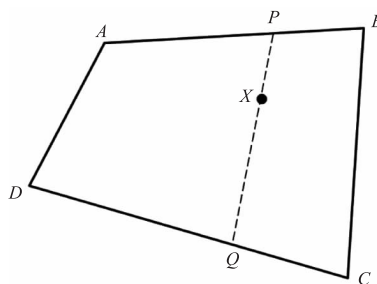


图 9 四边形插值

Fig. 9 Quadrilateral interpolation

4 实验测试和分析

本文所设计的基于 PSD 的二维动态角度高精度测量系统的整体结构如图 10 所示。整个设备呈垂直放置,反射镜放置在精密的位移台上,可进行标定测试,激光器、PSD、FPGA 采集板以及 AD 转换芯片集成于黑箱内。采集到的数据在上位机用户界面上显示,软件同时集成标定功能,下面将对系统的指标进行实验测试。

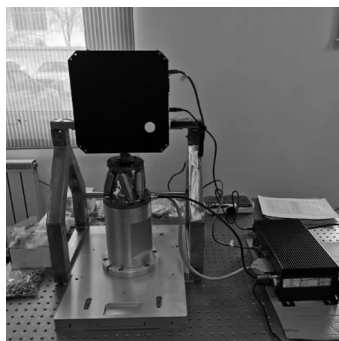


图 10 测量系统实物图

Fig. 10 Physical picture of the measuring system

4.1 静态测试实验

静态测试时,设备上电,反射镜转动到某一位置后保持静止状态,激光器和 PSD 等器件经安装后位置固定,记录一段时间后系统测量的角度值(经过

数字滤波后)的漂移,其对应散点如图 11 所示,表 2 为对应的角度漂移。

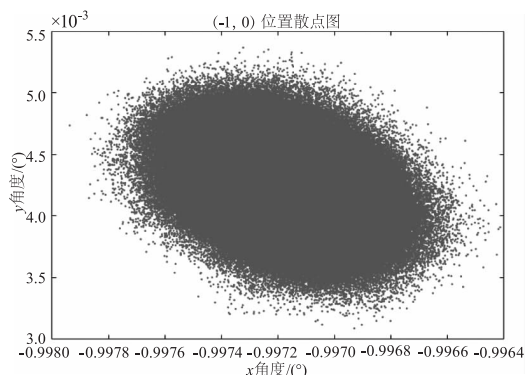


图 11 散点图

Fig. 11 Scatter plot

表 2 角度漂移

Tab. 2 Angle drift

	最大值	最小值	波动范围	平均值
X/(°)	-0.9966	-0.9978	±0.0006	0.9972
Y/(°)	0.0051	0.0033	±0.0009	0.0042

由表 2 可以看出, X 和 Y 两个方向的波动范围均在 ±0.001° 以内, 可以达到精度指标。反射镜放置于六自由度位移台上, 控制位移台带动反射镜移动到不同的 (U, V) 角度位置, 在相应的位置分别进行静态测量, 得到 X 和 Y 方向的角度波动如表 3 所示。

表 3 不同位置的角度波动

Tab. 3 Angle drift in different positions

(U, V)/(°)	(1, 0)	(4, 0)	(0, 3)	(0, 6)
X/(°)	±0.0008	±0.001	±0.0006	±0.0007
Y/(°)	±0.0009	±0.001	±0.0006	±0.001

由表 3 可以看出, 在测试的几个不同角度位置, 角度的漂移均在 ±0.001° 以内, 满足相应的精度指标。并且, 在大角度位置 (0, 6), 其角度漂移并未呈现明显的增加趋势, 表明测量系统在大的角度范围内也可以保证较高的精度。

4.2 动态测试实验

动态测试时, 反射镜两个转轴以一定的频率转动, X 轴频率设置为 320 Hz, Y 轴频率设置为 10 Hz, 采样频率为 125 kHz, 记录并保存一段时间内系统计算出的二维角度数据, 经软件绘制出二维角度的时域曲线如图 12 所示。

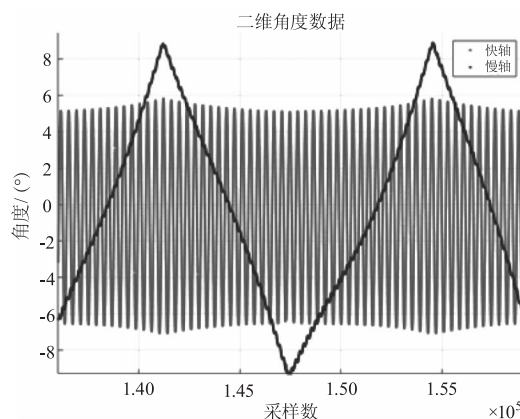


图 12 时域图

Fig. 12 Time domain diagram

从图 12 中可以看出, 快轴每个周期采样约 390 个点, 慢轴每个周期采样约 12500 个点, 间接表明系统的采样速率达到了 125 kHz 的水平。

以快轴为例, 采用 500 Hz 带宽的数字低通滤波器(切比雪夫滤波器)对角度数据滤波, 尽量保证低频信号部分的频谱不衰减, 如图 13 所示为滤波前后信号的频谱, 从图中可以看出, 低频信号段基本无衰减。

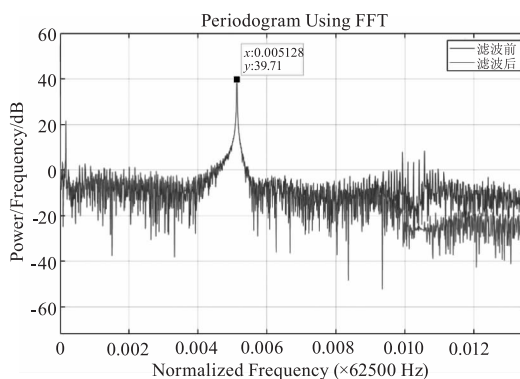


图 13 频域图

Fig. 13 Frequency domain diagram

滤波前后某一周期内的时域曲线如图 14 所示, 经过数字滤波后, 正弦曲线趋于平滑, 角度的随机误差减小, 信号的幅值无明显衰减, 信号产生约 25 个采样点的相位延迟, 需在后期进行数据处理。

4.3 线性度实验

反射镜置于在精密位移台上, 保持 Y 轴静止不动, X 轴每次以 0.5° 的步长转动, 保存转动到每一位置的系统测量值(未标定)和位移台的精确角度值, 采集 29 组对应数据, 得到的曲线如图 15 所示, 计算得到其非线性误差为 0.165 %。

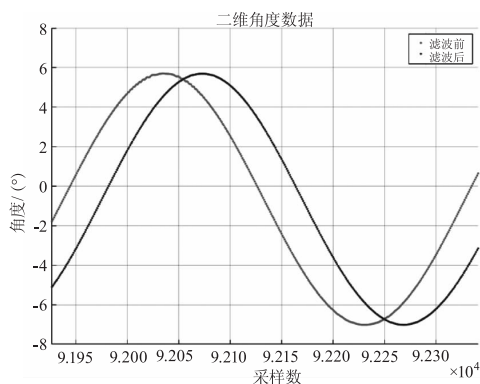


图14 相位延迟

Fig. 14 Phase delay

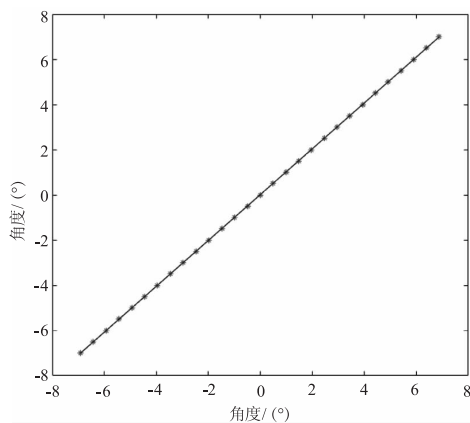


图15 X轴非线性度

Fig. 15 X-axis nonlinearity

同理,保持 X 轴静止不动, Y 轴每次以 0.5° 的步长转动,保存相应的测量值和位移台的角度值,采集 29 组对应数据,得到的曲线如图 16 所示,计算得到其非线性误差为 0.404 %。X 和 Y 两个轴的非线性误差都在较小的量级,且 X 方向的线性度较 Y 方向好。

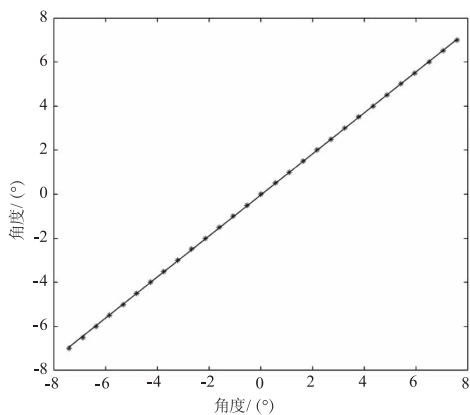


图16 Y轴非线性度

Fig. 16 Y-axis nonlinearity

4.4 标定实验

下面对比了采用多项式拟合的方法和线性插值两种方法的标定结果。

4.4.1 多项式拟合方法

采用三次多项式拟合对测量值进行校正。通过最小二乘法估计求出拟合参数即可。

如表 4 所示,为经过校正后的误差结果, X 和 Y 两个方向标定后的最大误差均达到 0.02°, 无法满足精度要求。

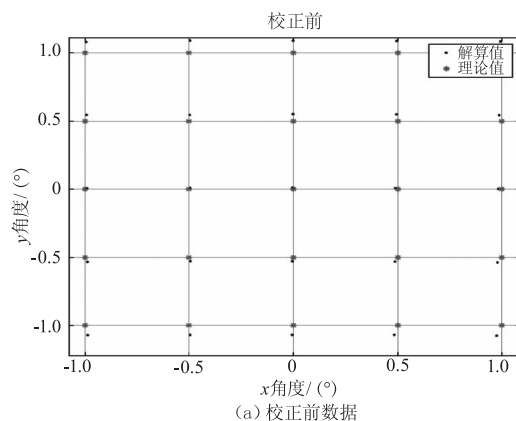
表 4 标定误差

Tab. 4 Calibration error

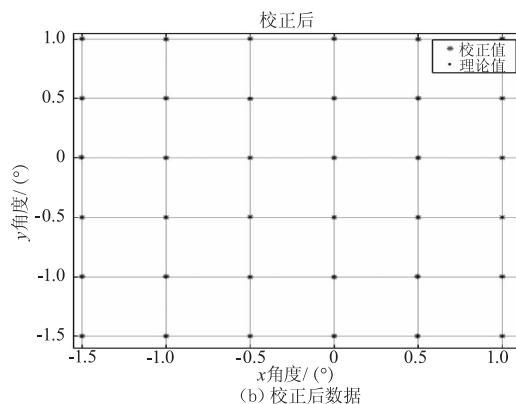
	最大值	误差波动	平均值	标准差
X/(°)	0.0203	±0.01	0.0014	0.0013
Y/(°)	0.0203	±0.01	0.0046	0.004

4.4.2 插值方法

插值法与拟合法的差别主要在于拟合法考虑的是整体的数据特性,而插值法考虑局部数据的相关性。如图 17(a) 所示,校正前测量角度值与理论的角度值存在较大的偏差,如图 17(b) 所示,经过插值校正后,插值估计值均与理论值近似重合。



(a) 校正前数据



(b) 校正后数据

图17 标定结果

Fig. 17 Calibration result

如图 18 所示,为经过校正后的误差分布结果,其中颜色深浅表征相应位置误差的大小,经过校正后, X 轴最大误差约 0.007°, 平均误差约 0.0009°, Y 轴最大误差约 0.007°, 平均误差约 0.0009°。

Y轴最大误差 0.0065° ,平均误差 0.0017° ,平均误差满足 0.001° 精度指标。

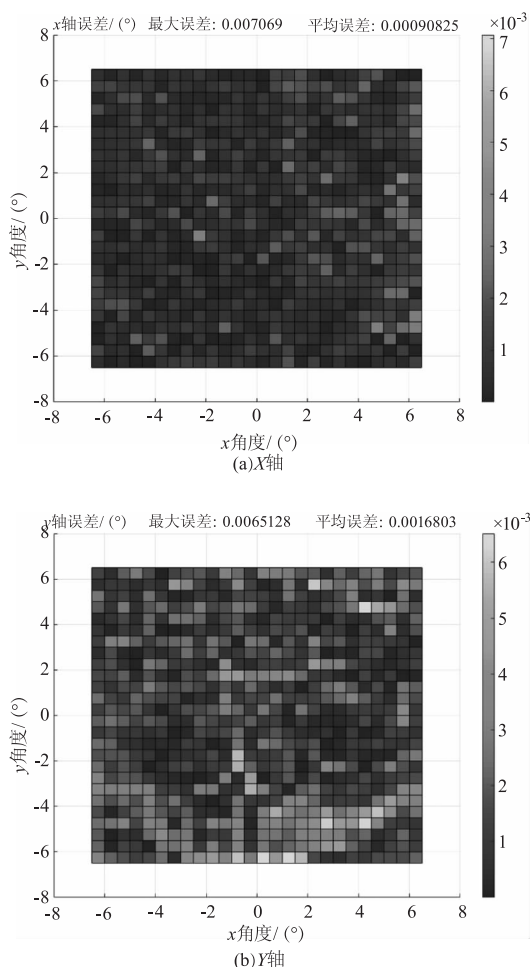


图 18 误差分布图

Fig. 18 Error distribution

5 结论

设计了一台可以进行非接触式的二维动态角度精密测量的设备。设备采用二维 PSD 和高速数据采集系统的方案可以精确的给出二维反射镜的两个角度值,并采用插值的方式对系统进行标定,实现高精度测量。系统达到 $\pm 10^\circ$ 的范围,随机噪声 0.001° ,系统误差标定后最大 0.007° ,同时采样速度达到 125 kHz 的水平,具有 300 Hz 以上的响应带宽,处于行业较高水平。该高精度动态角度测量设备可以用于高速二维振镜的测试,还可以推广到航天、交通、工业、精密仪器等应用中。

参考文献:

[1] Luo Y D, Shen Y T, Cordero J, et al. Enhancing measure-

ment accuracy of position sensitive detector(PSD) system using Kalman filter and distortion rectifying [C]//IEEE Sensors Baltimore, Maryland, 2013; 1977 - 1982.

[2] 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.

[3] Pu Zhaobang, Tao Wei, Zhang Zuo. Angle measurement with optical methods [J]. Optical Technique, 2002, 28 (2): 168 - 171. (in Chinese)

浦昭邦,陶卫,张琢. 角度测量的光学方法[J]. 光学技术, 2002, 28 (2): 168 - 171.

[4] Zhang Caini, Wang Xiangchao. Optical methods for measuring small angles [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002, (4): 416 - 419. (in Chinese)

张彩妮,王向朝. 微角度的光学测量[J]. 光电子·激光, 2002, (4): 416 - 419.

[5] Lou Zhibin, Zhao Hui, Liu Quan, et al. Two-dimensional rotation angle dynamic measurement system combining laser collimation [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, (3): 561 - 568. (in Chinese)

楼志斌,赵辉,刘权,等. 结合激光准直的二维转角动态测量系统[J]. 光学精密工程, 2019, (3): 561 - 568.

[6] Shagn Hongyan, Zhang Guangjun. Dynamic angle real-time measuring system with three degrees of freedom [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, (1): 98 - 102. (in Chinese)

尚鸿雁,张广军. 三自由度动态角度实时测量系统[J]. 光电工程, 2006, (1): 98 - 102.

[7] Pan Wenbo. Research on two-dimensional laser micangle measuring system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)

潘文博. 激光二维微角度测量系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[8] Gao Yu e, Liu Wei, LV Simeng, et al. Six-degree-of-freedom displacement and angle measurement system based on two-dimensional position-sensitive detector [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26 (12): 2930 - 2939. (in Chinese)

高玉娥,刘伟,吕世猛,等. 基于位置敏感探测器的六自由度精密位姿测量系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26 (12): 2930 - 2939.

[9] Zhang Jiyun. Two dimensional micro angle measurement apparatus and its key technologies [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 (in Chinese)

- 张戢云. 二维激光微角度测量装置及其关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [10] Takamasa Suzuki, Takanori Endo, John E Greivenkamp, et al. Wide range two-dimensional small rotation-angle measurement by use of fringe projection [C] // Proceedings of Photonics Asia, 2004; 185 - 192.
- [11] Takamasa Suzuki. Two-dimensional small-rotation-angle measurement using an imaging method [J]. Optical Engineering, 2015, 45(4): 043604 - 1 - 043604 - 7 - 0.
- [12] Zhang Bo, Duan Jin, Jing Wenbo. CCD-based optical detection precision of angle measurement [J]. Journal of Changchun University of Science, 2010, 33(4): 55 - 57. (in Chinese)
张博, 段锦, 景文博. 基于 CCD 的光学测角精度检测方
法 [J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2010, 33(4):
55 - 57.
- [13] Wang Jianlin, Zhu Mingwu, Cui Xiuhua. A novel single linear CCD two-dimensional auto-collimator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, (3): 229 - 232. (in Chinese)
王建林, 朱明武, 崔秀华. 一种新颖的单线阵 CCD 双坐
标自准直仪 [J]. 仪器仪表学报, 2000, (3): 229 - 232.
- [14] Li Zongke, Qin Yongyuan. Research of on-line measurement and non-linearity correction of two dimension PSD device [J]. Laser Technology, 2004, (4): 370 - 372, 416. (in Chinese)
李忠科, 秦永元. PSD 器件自动化标定与非线性修正
技术研究 [J]. 激光技术, 2004, (4): 370 - 372, 416.