

文章编号 1004-924X(2019)03-0561-08

结合激光准直的二维转角动态测量系统

楼志斌¹, 赵 辉², 刘 权², 郑 超², 陶 卫^{2*}

(1. 上海科学院, 上海 201203; 2. 上海交通大学 仪器科学与工程系, 上海 200240)

摘要: 为了克服现有二维转角动态测量方法结构复杂、成本昂贵的缺点, 提出了结合激光准直的二维转角动态测量方法。首先, 根据二维转角测量的关键问题提出基于激光准直的测量方法, 采用准直激光作为测量基准, 以远端的位置探测器作为检测器件。接着, 设计测量系统和各组成模块, 根据测量要求对系统中的关键模块进行设计和优化。然后, 具体设计系统中的测量算法, 完成测量模型建立。最后, 在 $\pm 2^\circ$ 范围内进行实验测试和分析。实验结果表明: 系统可动态测量, 稳定性好, 测量重复性误差为 $1 \mu\text{rad}$, X 轴非线性误差为 1.8%, Y 轴非线性误差为 1.7%, 动态带载响应频率在 $\pm 0.01^\circ$ 内优于 200 Hz, 基本满足二维转角测量的高精度、高重复性、高稳定性的要求。

关键词: 激光准直; 二维转角; 动态测量; 光斑位置

中图分类号: TN249 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20192703.0561

Two-dimensional rotation angle dynamic measurement system combining laser collimation

LOU Zhi-bin¹, ZHAO Hui², LIU Quan², ZHENG Chao², TAO Wei^{2*}

(1. Shanghai Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

2. Department of Instrument Science and Engineering,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: taowei@stju.edu.cn

Abstract: To dynamically measure a two-dimensional rotation angle and overcome the shortcomings of a complicated structure and high costs, a method based on laser collimation was proposed and a measurement system was established. First, a method was proposed based on the key measurement requirements. A collimated laser was used as a measurement datum and a remote position detector as a detection device. Second, a measurement system was developed, each module was designed, and the main modules were optimized. Third, the model was established completely after an algorithm was produced. Finally, tests were performed and the obtained data were analyzed within $\pm 2^\circ$. The experimental results show that the stability of the system is positive, the measurement repeatability error is $1 \mu\text{rad}$, the X- and Y-axis nonlinearity errors are 1.8% and 1.7%, respectively, and the dynamic band response frequency is better than 200 Hz within $\pm 0.01^\circ$. The study confirms that the system basically offers high precision, high repeatability, high stability, and a dynamic measurement of a two-dimensional rotation angle.

Key words: laser collimation; two-dimensional rotation angle; dynamic measurement; spot location

收稿日期: 2018-10-16; 修订日期: 2018-11-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. U1637108)

1 引言

角度是一个重要的几何参数,角度测量在几何测量中占有重要地位^[1],其中小角度测量是一个重要的分支。小角度多指 10° 以下,甚至到几分或几十秒。据不完全统计,角度测量方法按照原理大致可以分为 16 类^[2]。在这些测量方法中,光学测量方法是一种测量准确度高、灵敏度高的非接触测量方法,并得到了广泛的应用。目前,应用较为普遍的有圆光栅法、光学内反射法、光学分度头法、激光干涉法和自准直法^[3,4]。

圆光栅是角度测量中最常用的器件之一,其测量原理是将圆光栅与转台同轴安装并同时转动,通过测量光栅转过的栅距数测得转角,主要用于静态下的相对角度测量,稳定性好,但对设备安装和光栅准度的要求较高,在动态测量时难以保证分辨率^[5]。光学内反射法利用全反射条件下入射角与反射率的变化关系,通过反射率的变化来测量入射角的变化,可以制作微小测量器件,但由于测量原理的限制,该方法对环境的要求很高^[6]。光学分度头法由光源发出激光束经滤光片照射度盘,经由物镜组将度盘刻线成像在读数视场并显示分度头的旋转角度,但需要人为目视读取信息,必然引入难以标定的人为误差^[7]。激光干涉法将对物体转动角度的测量转化为物体反射光与参考光的光程差的测量,基本原理与迈克尔逊干涉仪相同,测量精度高,但对环境要求十分苛刻,通常只作为一种测量基准^[8]。自准直法目前的应用最广泛,它基于光学自准直原理,操作方便,结构简单,适用性强,但测量分辨率一般不理想^[9]。

上述方法中,大部分仅能实现一维角度测量,只有圆光栅法^[10,11]和激光干涉法^[12]能够实现二维角度测量。但这两种方法的测量环境要求极其苛刻,因此在实际应用中多作为测量基准来使用。

激光准直技术广泛应用于测量几何参数与形位误差,如直线度、平面度、垂直度及同轴度等。最原始的方法是以钢丝作为基准线。20 世纪 30 年代,人们开始采用光学工具建立基准线,多使用激光,因为它具有亮度高、准直性好、相干性好、测

量精度高等特点^[13]。本文基于激光准直技术设计了一个转角测量系统,以激光器发出的一束准直激光作为测量基准,以远端的位置探测器作为检测器,实现了二维小转角的非接触精密测量。该系统可实现动态测量,具有结构简单、价格合理、稳定性好及可替换性强等优点。

2 系统设计

2.1 算法设计

一维角度测量原理的简化模型如图 1 所示。由激光器发出一束准直激光射向被测物的反射镜,经反射后射向远端的探测器。反射镜角度发生变化后,反射光线的反射角也随之变化,从而引起远端探测器上光斑位置的变化,将被测角度量转换为光斑位置的位移量。

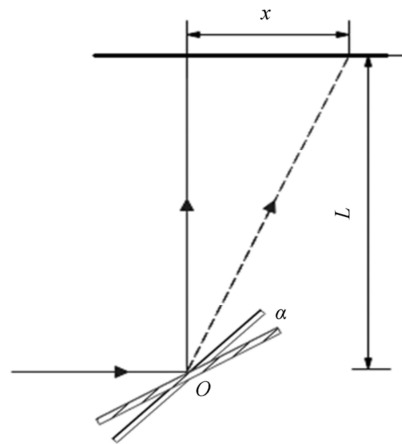


图 1 一维角度测量原理简化模型

Fig. 1 Simplified model of measurement principle of one-dimensional angles

调整激光器和精瞄指向机构的位置,使得激光器发射激光束与被测物体反射镜成 45° ,且激光束指向反射镜片的轴心 O 点。设反射光线到探测器的光程为 L ,当精瞄指向机构的反射镜绕 O 点旋转角度 α 时,探测器上的光斑位移为 x ,则有:

$$x = L \times \tan 2\alpha \quad (1)$$

当 α 很小时,式(1)可以写为:

$$x = L \times (2\alpha) \quad (2)$$

二维转角的测量与此类似,建立三维模型。设在竖直平面内镜面转动角度为 α ,在水平面内

镜面转动角度为 β , 变换矩阵 \mathbf{R} 为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \beta & \frac{\sqrt{2}}{2}\alpha \\ -\beta & 1 & \frac{\sqrt{2}}{2}\alpha \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}\alpha + \frac{\sqrt{2}}{2}q\beta & -\frac{\sqrt{2}}{2}q\beta - \frac{\sqrt{2}}{2}\alpha & 1 \end{bmatrix}$$

经过大量实验, 选取最佳探测距离为 1 m, 此时探测器上光斑在水平方向上的位置偏移 X 为:

$$X = \frac{2(\alpha^2\beta^2 + \beta^2 + \alpha^2 + 3\beta)}{\beta^4 + 2\beta^2 - \epsilon} \approx -2\beta \quad (3)$$

光斑在竖直方向上的位置偏移 Y 为:

$$Y = \frac{2\sqrt{2}\alpha(\beta^2 + 1)}{\beta^4 + \beta^2 + \epsilon\beta + \epsilon} \approx \frac{2\sqrt{2}\alpha}{\epsilon(\beta + 1)} \quad (4)$$

当探测距离为 1 m, 两个方向上角度测量范围均为 $\pm 2^\circ$ 时, 探测器上光斑在水平方向上的位置偏移范围为 ± 70 mm, 在竖直方向上的位置偏移范围为 ± 31 mm。

2.2 系统组成

图 2 和图 3 为结合激光准直的二维转角动态测量系统。它主要由准直激光系统、机械定位系统、光电探测系统以及计算机采集处理系统等组成。准直激光系统由激光器和准直镜组等组成, 主要用来提供高准直度的激光光源。机械定位系统由精密转台和定位机构等组成, 在实验阶段为被测物体提供准确的定位和一定的转动范围, 由于在实验探究阶段, 选择可视化高精度转台配合反射镜作为测试标定对比, 在实际使用中, 只需将被测物体待测面变为反射镜面即可。光电探测系统主要由聚焦镜组、衰减片和光电检测器件等组成, 用来完成反射激光束的汇聚和光斑位置信息的探测与采集。计算机采集处理系统使用自编软件对光电检测器件探测到的信息进行采集及处理, 最终得到被测器件的反射镜转动角度。在测量过程中, 激光器发出的激光经过准直镜组准直后射向被测器件, 由被测器件表面的反射镜面反射至光电检测器件上, 通过检测光电器件上光斑位置的变化, 并进行一系列换算得到被测器件反射镜面的角度变化量。在实际使用中, 将被测物体某一待测表面制成反射镜面或贴附反射镜, 由于测量的变化量为两次绝对角度位置的差动变量, 因此所有安装误差均可自行消除。

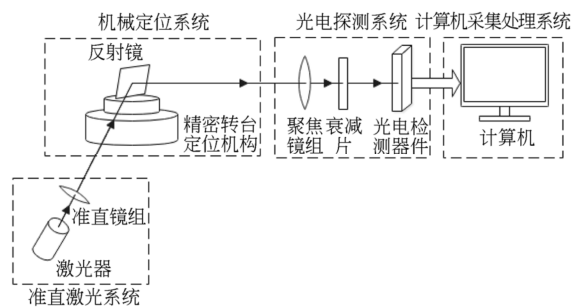


图 2 结合激光准直的二维转角动态测量系统结构

Fig. 2 Structure diagram of two-dimensional rotation angle based on laser collimation measurement system



图 3 二维转角动态测量系统实物图

Fig. 3 Photo of two-dimensional rotation angle dynamic measurement system

2.3 器件选型及分析

2.3.1 准直激光系统设计

激光器是测试系统的重要器件, 激光漂移对测试结果的影响很大, 故需要选择相对稳定、光斑小、漂移小的激光器。通过比较, 选用 DH-HN250 型 He-Ne 激光器, 其主要参数如表 1 所示。实际测量的光束稳定性 $\leq 20 \mu\text{rad}$, 发散角较大, 需要通过准直镜组进行激光准直。

表 1 DH-HN250 型激光器选型参数

Tab.1 Parameters of DH-HN250 laser

波长	功率	光束直径	发散角	光束稳定性
633 nm	≥ 2 mW	0.8 mm	1.4 mrad	≤ 0.2 mrad

由于激光器的发散角不满足要求, 需要设计单独的准直镜组进行激光准直, 使得光束发散角达到要求的 ± 0.25 mrad。由于激光器的发散角不是很大, 这里采用大恒光电的 K9 平凸透镜进行准直。

2.3.2 机械定位系统设计

机械定位系统主要负责将被测机构可靠准确地固定于理想位置,保证实验测量顺利进行。在安装过程中,定位机构主要用于位置微调,在考虑机械误差的前提下,需要微调保证激光束通过精瞄指向机构的轴心,微调精度不得低于 ± 0.1 mm。将定位机构设计为一个三维精密微调机构,通过参数对比,采用一个二维精密平移台大恒 GCM-125102BM 和一个侧升降台大恒 GCM-1641M 制作三维微调机构,在 x 轴、 y 轴、 z 轴 3 个方向上的调节范围均为 ± 5 mm,调节步长可精确到 0.01 mm。被测机构的反射镜与定位面平行,因此为了使定位面与激光器出射激光成 45° 偏转,设计一转台,将三维微调机构安装在转台上,再将被测机构安装于微调机构上。在实验中,被测机构的反射镜采用振镜。选用 GCM-1106M 型旋转台,微调范围为 $\pm 4^\circ$,微调分辨率为 $\pm 1'$,精度为 $\pm 2'$ 。

2.3.3 光电探测系统设计

光电检测器件是光电探测系统的核心部分,主要用来对激光光斑位置进行准确测量。光电检测器件需要能同时进行二维位置检测,与所选激光器光谱一致,检测面积符合实验要求,定位精度高,采样速度也满足实验要求。经过对比,选择 DL100-7 型 PSD 作为检测器件。它为两面型 PSD,光敏面积为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,对于波长为 633 nm 的激光,其响应灵敏度为 0.4 A/W ,定位精度为 $\pm 1\%$,分辨率为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。

PSD 上光斑移动范围与测量角度和测量距离都有关系。由于所选 PSD 的探测面积较小,在实验条件下无法满足 $\pm 2^\circ$ 角度变化量下光斑的移动,因此需要设计聚焦镜组来缩小光斑位移量,并减小光斑直径,提高检测精度。采用两块型号为 GCL-010212 的 K9 双凸透镜,直径为 50.8 mm,焦距为 150 mm,用镜筒固定在支架上,一块与被测器件的距离约为 150 mm,另一块与探测器的距离约为 170 mm。

激光器输出能量较高,经聚焦镜组后能量集中,不宜直接投射到光电检测器件上,需要增加衰减片。可采用中性灰色中灰密度减光片,可选型号为 ZAB2, ZAB5, ZAB10, ZAB25, ZAB30, ZAB50, ZAB65, ZAB70,透过率分别为 2%, 5%,

10%, 25%, 30%, 50%, 65%, 70%。

2.3.4 计算机采集处理系统设计

计算机采集处理系统将 PSD 的探测结果实时传输到电脑中,并对采集到的信息进行处理和运算,最终得到转角值。在数据采集部分,选用北京双诺 MP4624 型数采卡,该卡具有 15 路通道,16 位字长,采样频率为 400 kHz, $\pm 5\text{ V}$ 和 $\pm 10\text{ V}$ 两个量程。数据处理部分采用 LabVIEW 进行编程,对采集的数据进行滤波处理和后续运算,根据光斑位置变化量与角度变化量的关系式计算得到角度变化值。测试系统软件界面如图 4 所示。

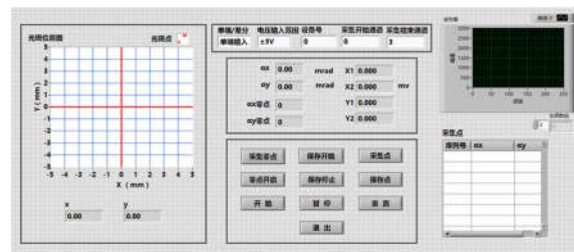


图 4 测试系统软件界面

Fig. 4 Software interface of test system

3 实验测试与分析

3.1 稳定性实验

首先进行激光器自身的稳定性实验,将激光器与 PSD 距离设置为 1 m,用激光器直接射向 PSD,记录 1 分钟以内激光在 X, Y 两个方向上的角度漂移,结果如表 2 所示。

表 2 激光在 X, Y 两个方向上的角度漂移

Tab. 2 Angle shifts in X and Y directions while laser point to PSD directly (mrad)

	最大值	最小值	波动幅值	平均值	标准差
X	0.599	0.586	0.013	0.593	0.004
Y	-0.416	-0.422	0.006	-0.418	0.001

由表 2 可以看出,在较短时间内,激光器本身的稳定性较好,漂移范围在 ± 0.01 mrad 以内。然后进行测量系统稳定性实验,保持激光器和振镜不动,记录 5 min 以内激光在 X, Y 两个方向上

的角度漂移,结果如表 3 所示。

表 3 较长时间(5 min)测量系统角度漂移数据分析
Tab.3 Data analysis of angle shift in 5 minutes (mrad)

	最大值	最小值	波动幅值	平均值	标准差
X	0.012	-0.006	0.018	0.002	0.005
Y	0.008	-0.003	0.011	0.002	0.002

由表 3 可以看出,在较长时间范围内,虽然激光器发热,激光漂移增大,但整个测量系统的漂移幅度可以维持在±0.01 mrad 以内,满足测试精度要求。

3.2 标定实验

虽然测量系统的漂移范围小,机械系统的安装精度高,但无法完全消除误差,因此对系统进行标定。初步选用 JS2204 型二维振镜对系统进行标定,此型号振镜的主要参数如表 4 所示。

表 4 JS2204 型振镜的主要参数
Tab.4 Main parameters of JS2204 galvanometer

指标	参数大小
工作温度/°C	0~45
线性度/%	99.90
小步阶响应时间/ms	≤0.4
零点漂移/(μrad·°C ⁻¹)	<15
长时间漂移(8 h)/mard	<0.5
最大扫描角度/(°)	±15
分辨率/μrad	12
重复精度/μrad	8
频率/Hz	≤800
输入孔径/mm	10

调节激光束通过振镜转轴,保持激光器和振镜位置不变,固定 PSD,调节振镜镜片绕 X 轴在水平方向转动角度 α,记录对应 PSD 上光斑位置的变化量 ΔX_i。对于每个角度 α,重复测量 10 次,求取平均值为 ΔX。实验共进行 16 组测量,测量结果如表 5 所示。

表 5 X 轴转角标定实验数据

Tab.5 Experimental data of X-axis rotation calibration

序号	α/mrad	ΔX/mm
1	0.020	0.046
2	0.100	0.226
3	0.200	0.488
4	0.300	0.710
5	0.400	0.924
6	0.500	1.170
7	0.600	1.418
8	0.700	1.646
9	0.800	1.882
10	0.900	2.086
11	1.000	2.296
12	1.100	2.538
13	1.200	2.754
14	1.300	3.040
15	1.400	3.280
16	1.500	3.492

根据表 5 数据绘制标定曲线并进行拟合,结果如图 5 所示,线性拟合关系式为:

$$\Delta X = 2.363\alpha + 0.002. \quad (5)$$

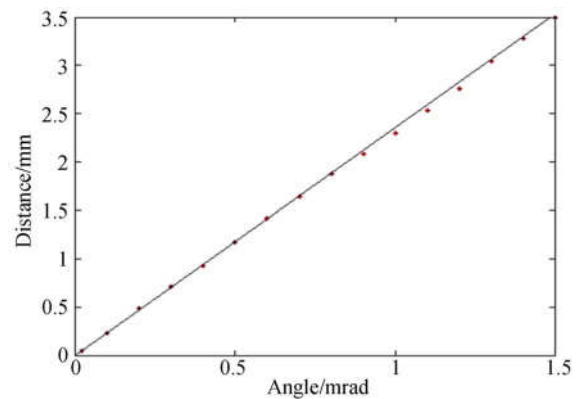


图 5 X 轴标定曲线

Fig.5 Calibration curve of X-axis calibration

同理,得到系统绕 Y 轴在竖直面内转动的标定曲线如图 6 所示,线性拟合关系式为:

$$\Delta Y = 2.211\alpha + 0.051. \quad (6)$$

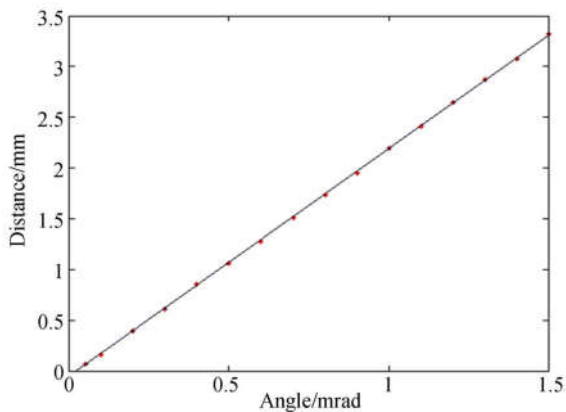


图 6 Y轴标定曲线

Fig. 6 Calibration curve of Y-axis calibration

3.3 重复性实验

控制振镜分别绕 X 轴转动 0.05, 0.1, 0.5 mrad, 重复测量 35 次, 经过计算得表 6。

表 6 X轴重复测量实验数据分析

Tab. 6 Data analysis on X-axis repeatability

转角	最大值	最小值	波动幅值	平均值	标准差
0.05	0.053	0.049	0.004	0.051	0.001
0.1	0.098	0.093	0.005	0.096	0.001
0.5	0.500	0.496	0.004	0.499	0.001

由表 6 可以看出, 系统测量 X 轴转角的重复误差为 $1 \mu\text{rad}$, 单次测量的波动值不超过 $5 \mu\text{rad}$ 。

控制振镜分别绕 Y 轴转动 0.05, 0.1, 0.5 mrad, 重复测量 35 次, 经过计算得表 7。

表 7 Y轴重复测量实验数据分析

Tab. 7 Data analysis on Y-axis repeatability

转角	最大值	最小值	波动幅值	平均值	标准差
0.05	0.054	0.050	0.004	0.052	0.001
0.1	0.099	0.095	0.004	0.098	0.001
0.5	0.506	0.501	0.005	0.504	0.001

由表 7 可以看出, 系统测量 Y 轴转角的重复误差为 $1 \mu\text{rad}$, 单次测量的波动值不超过 $5 \mu\text{rad}$, 与 X 轴基本相同。

3.4 非线性实验

控制振镜每次绕 X 轴转动 0.1 mrad, 连续转动多次, 记录每次转动后测量的角度绝对值, 共测量 30 组数据, 绘制曲线如图 7 所示。经过计算非线性度误差为 1.8%。

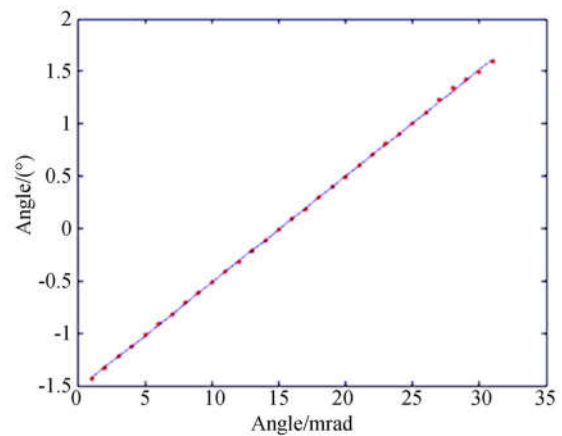


图 7 X轴非线性度实验数据曲线

Fig. 7 Data curve of X-axis nonlinearity

同样地, 控制振镜每次绕 Y 轴转动 0.1 mrad, 连续转动多次, 记录每次转动后测量的角度绝对值, 共测量 30 组数据, 绘制曲线如图 8 所示。经过计算非线性度误差为 1.7%。

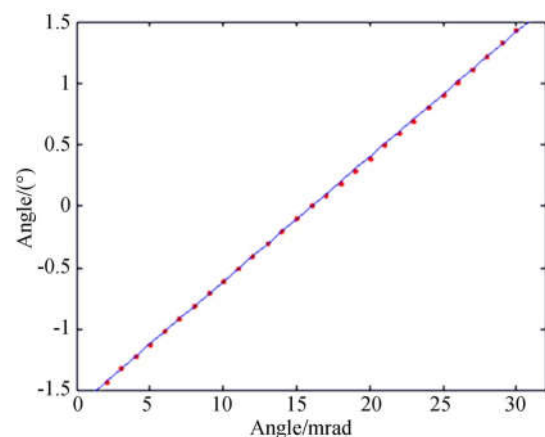


图 8 Y轴非线性度实验数据曲线

Fig. 8 Data curve of Y-axis nonlinearity

3.5 动态测试实验

待测机构以一定的频率和幅度的正弦规律进

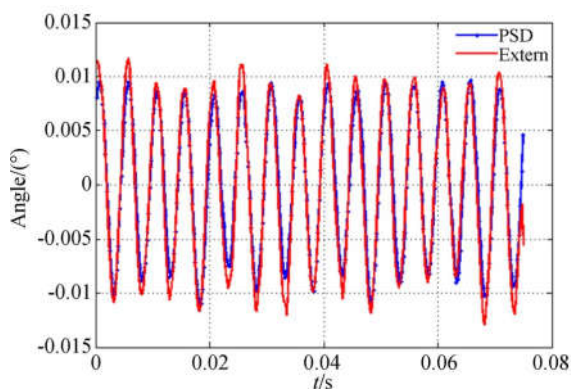


图9 X轴动态测量实验数据曲线

Fig. 9 Data curve of X-axis dynamic measurement

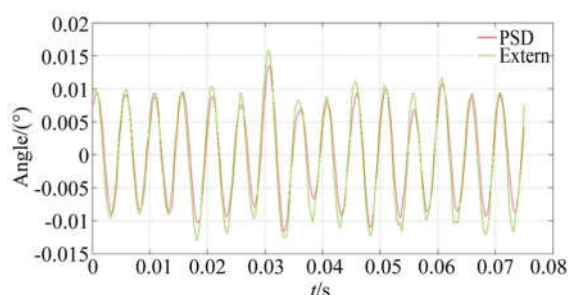


图10 Y轴动态测量实验数据曲线

Fig. 10 Data curve of Y-axis dynamic measurement

参考文献:

- [1] 何杨锋. 高精度双轴角度测量仪的研究与设计[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2016.
HE Y F. High-precision biaxial angle measuring instrument research and design [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [2] 陶卫, 蒲昭邦, 孙运斌. 角度测量技术的发展[J]. 激光杂志, 2002(2): 5-7.
TAO W, PU ZH B, SUN Y B. Development of angle measurement technology [J]. *Journal of Laser*, 2002 (2): 5-7. (in Chinese)
- [3] 周红锋, 宫爱玲. 小角度测量的光学方法[J]. 云南民族大学学报:自然科学版, 2006, 15(2): 130-133.
ZHOU H F, GONG A L. Optical methods of small angle measurement [J]. *Journal of Yunnan University for Nationalities: Natural Science*, 2006, 15 (2): 130-133. (in Chinese)
- [4] 李金阳, 吴简彤, 韩慧群. 小角度测量的光学方法及应用[J]. 应用科技, 2006, 33(7): 15-18.
LI J Y, WU J T, HAN H Q. Optical method and application of small angle measurement [J]. *Applied Science and Technology*, 2006, 33 (7): 15-18. (in Chinese)
- [5] 王明, 高志慧. 圆光栅结构参数误差分析[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(2): 9-12, 40.
WANG M, GAO ZH H. Error analysis of structural parameters of circular grating [J]. *Machinery Manufacturing and Automation*, 2017, 46 (2): 9-12, 40. (in Chinese)
- [6] 耿旭. 基于内反射原理测量小角度变化量的技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2015.
GENG X. *Based on the Principle of Internal Reflection Measurement of Small-angle Changes in the Technical Research* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [7] 邵建桥, 蒋铭, 徐毅, 等. 利用光学分度头标定转角测量装置的方法探讨[J]. 工业计量, 2016(s1): 72.
SHAO J Q, JIANG M, XU Y, et al.. Discussion on the method of calibrating the rotation angle measuring device by using optical indexing head [J]. *Industrial Measurement*, 2016 (S1): 72. (in Chinese)
- [8] 王贵甫, 陈桂林, 陈雨良. 激光干涉仪数字测角的

行周期转动,记录并保存不同频率下 PSD 探测器采集的光斑位置信息,经过软件绘制出两路信号的幅度衰减以及相位滞后。当待测机构的反射镜面以 200 Hz 的频率在 $\pm 0.01^\circ$ 的范围内以正弦规律快速摆动时,测量结果如图 9 和图 10 所示。

4 结 论

为了克服现有转角测量系统结构复杂及成本昂贵的缺点,本文提出了结合激光准直的二维转角动态测量系统。首先,介绍了该测量系统的结构和基本工作原理。然后,对系统中每一个模块进行了设计,并详细地介绍了测量算法。最后,进行系统的标定以及稳定性、重复性、非线性和动态测量实验。实验结果表明:本文设计的测量系统稳定性好,测量重复性误差为 $1 \mu\text{rad}$, X 轴的非线性误差为 1.8%, Y 轴的非线性误差为 1.7%,动态带载响应频率在 $\pm 0.01^\circ$ 内优于 200 Hz,基本可以实现高精度、高稳定性的静态和动态测量。

- 新方法及其应用[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(1): 85-88.
- WANG G P, CHEN G L, CHEN Y L. Laser interferometry digital angle measurement method and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1): 85-88. (in Chinese)
- [9] 田留德, 赵建科, 王涛, 等. 测试设备位姿失调对自准直仪法测量圆分度误差的影响[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(9): 2267-2276.
- TIAN L D, ZHAO J K, WANG T, *et al.*. Influence of attitude and attitude mismatch of test equipment on circle indexing errors measured by self-collimator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2267-2276. (in Chinese)
- [10] SUZUKI T, GREIVENKAMP J E, SASAKI O. Wide-range two-dimensional small rotation-angle measurement by use of fringe projection [J]. *SPIE*, 2005, 5633: 580662.
- [11] SUZUKI T, ENDO T, SASAKI O, *et al.*. Two-dimensional small-rotation-angle measurement using an imaging method[J]. *Optical Engineering*, 2015, 45(4): 7-13.
- [12] SASAKI, OSAMI. Two-dimensional rotation angle measurement using a sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(4): 1132-1136.
- [13] 陈士亮, 李海榕. 激光准直仪及其在工业上的应用[J]. 南昌大学学报: 工科版, 1980(2): 25-32.
- CHEN SH L, LI H R. Laser collimator and its application in industry [J]. *Journal of Nanchang University: Engineering and Technology*, 1980(2): 25-32. (in Chinese)

作者简介:



楼志斌(1966—),男,浙江义乌人,硕士,高级工程师,硕士生导师,1987年于山东大学获得学士学位,2011年于中国科学技术大学获得硕士学位,目前主要从事光电检测与数据分析等方面的研究。E-mail: zblou66@163.com



赵辉(1965—),男,辽宁阜新人,博士,教授,博士生导师,1986年、1989年、1994年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事现代传感器、机器视觉、光电检测技术等方面的研究。E-mail: huizhao@sjtu.edu.cn

通讯作者:



陶卫(1975—),女,辽宁大连人,博士,副教授,硕士生导师,1999年、2003年于哈尔滨工业大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光电及视觉检测等方面的研究。E-mail: taowei@sjtu.edu.cn