

# 基于激光测量的高速非接触角度检测技术研究

杨梦放, 陈磊, 张登伟, 黄腾超, 周一览, 舒晓武, 车双良, 刘承  
(浙江大学光电信息科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**提出了一种基于光学三角法测距原理的高速非接触光学角度测量方法,利用两个激光位移传感器测量物体具有角度变化时产生的位移,实时计算得到物体一维运动角度,在摇摆台上进行角度范围及精度的实验,并使用光纤陀螺进行角度实时同步测量,通过最小二乘拟合法对误差进行补偿。实验结果表明,该系统的角度测量范围 $\pm 10^\circ$ ,角度测量精度 $\pm 0.005^\circ$ ,测量频率2000 Hz。该角度测量技术使用非接触光学测量方法,对被测物体表面无损伤。

**关键词:**光纤陀螺;高速检测;激光三角法;非接触测量;角度测量

**中图分类号:**TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.014

## Research on high-speed and non-contact angle detection based on laser measurement

YANG Meng-fang, CHEN Lei, ZHANG Deng-wei, HUANG Teng-chao, ZHOU Yi-lan,  
SHU Xiao-wu, CHE Shuang-liang, LIU Cheng  
(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** A high-speed and non-contact angle measuring method based on the principle of optical triangulation distance measurement was presented. Two laser displacement sensors were used to measure the angle when the angle of the target changed, which could calculate one dimensional motion angle of the target in real time. The experiment of angular measuring range and precision of the measurement system was carried out on the swing turntable, and fiber optic gyroscope was used to realize real-time synchronous measurement of the angle, and then the error was compensated by the least square fitting method. The experimental results show that the range of angle measurement can be up to  $\pm 10^\circ$ , the precision can reach  $\pm 0.005^\circ$ , and the measuring frequency can be up to 2000 Hz. This method adopts non-contact optical measurement method, and it has no damage to the measured surface.

**Key words:** fiber optic gyroscope; high-speed detection; laser triangulation method; non-contact measurement; angle measurement

### 1 引言

角度测量是测试计量科学研究的基本参数之一,随着生产和科学的不断发展,角度测量越来越广泛地应用于机械、光学、航空、航天、航海等各个领域,技术水平和测量准确度也在不断提高<sup>[1]</sup>。各种

测角技术和测角装置有各自不同的特点:利用圆光栅的角度测量方案虽然精度高,响应快,动态范围大<sup>[2,3]</sup>,但是该方法不能实现非接触测量。光幕测量法的两组光幕可同时测得多种信息,确定两组投影物之间样品的相对初始位置的角度,但测量精度

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 61203190);浙江省自然科学基金项目(No. LY17F030010)资助。

**作者简介:**杨梦放(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术的研究。E-mail:425954317@qq.com

**通讯作者:**张登伟(1978-),男,博士,副教授,主要研究方向为光纤传感及系统的研究。E-mail:seaskyzdw@zju.edu.cn

**收稿日期:**2016-08-18; **修订日期:**2016-10-01

低,且光幕之间的平行难以保证,测量范围较小,不够灵活<sup>[4]</sup>;利用光栅的泰伯效应的角度测量方法能同时得到三维数据,经过计算可得到转动角度值,但测量精度低,尤其是光场的外围和离光栅较远处,衍射严重,且响应慢。

本文提出了一种高速、大范围、高精度的非接触角度检测技术,该技术基于激光三角法测距原理,利用两个激光位移传感器实时测量载体的运动位移,计算载体的实时运动角度,系统设置了同步采集通道,利用光纤陀螺<sup>[5]</sup>输出角速度的积分作为角度基准,得到系统的角度测量误差。实验结果表明,该角度测量方法动态范围大( $\pm 10^\circ$ ),响应速度快(大于2000 Hz),测量精度高( $\pm 0.005^\circ$ ),且采用非接触测量,对被测物体表面没有损伤。

## 2 测量系统设计

### 2.1 激光三角测量位移的原理

如图1所示,光源发出的光经过会聚透镜聚焦后垂直入射到被测物体表面 $M$ 上,物体移动或表面变化,导致光敏元件 CCD 上的成像光点移动,对 CCD 输出的电信号进行运算处理得到传感器与被测物体表面之间的距离信息<sup>[6,7]</sup>。在接受透镜和 CCD 之间安置一滤光片(激光器发出的红光波长为650 nm,其透过率 $>90\%$ ,而其他波段的光几乎全部滤掉),减小了环境的影响。同时在激光器和聚光镜之间安置孔径光阑,减小光斑直径<sup>[8]</sup>。

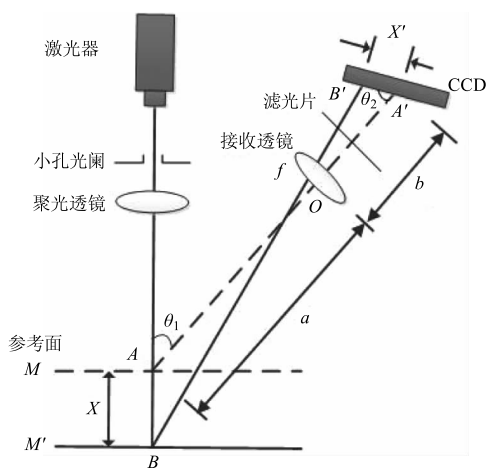


图1 激光三角法测量原理图

Fig. 1 Measurement principle of laser triangulation

传感器激光束与被测面垂直,只有一个准确聚焦的位置,其余位置的像都处于不同程度的离焦状态,离焦引起像点的弥散,降低了系统的测量精度。

为了提高测量精度,设计中采用了恒焦光路,满足Scheimpflug条件<sup>[9]</sup>,即 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 满足:

$$\tan\theta_1 = \beta \tan\theta_2 \quad (1)$$

式中, $\beta$ 为接收透镜横向放大率; $\theta_1$ 为激光束与接收透镜光轴之间的夹角; $\theta_2$ 为 CCD 光敏面与接受透镜光轴之间的夹角。

式(1)表明成像面、被测物表面和透镜主平面相交于一个共同点,无论被测物表面如何移动,光斑都能在 CCD 上成清晰的像<sup>[10-11]</sup>。

当被测表面位于参考面 $M$ 时,光斑成像于 CCD 中心位置 $A'$ 处;当被测面距离参考面 $M$ 的位移为 $x$ ,向下移动到 $M'$ 时,光斑成像于 CCD 光敏面的 $B'$ 处,光斑像点在 CCD 上的位移为 $x'$ ,设 $A'B'$ ,利用几何光学的基本知识,可得出被测面沿法线方向的移动距离为:

$$x = \frac{ax' \sin\theta_2}{b \sin\theta_1 - x' \sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2)$$

式中, $a$ 为激光束和参考平面 $M$ 的交点到接收透镜前主面的距离; $b$ 为接收透镜后主面到成像面中心点的距离。

通过 CCD 测量光斑像点的位移,由式(2)可得激光位移传感器到被测物体的距离。

### 2.2 角度测量系统设计

如图2虚线框内所示,角度测量系统由两个激光位移传感器、信息采集系统、信号同步系统和 PC 软件构成。为了评价本文提出的角度测量方法的精度,利用高精度光纤陀螺对测量系统进行标定,从而获取系统的测量误差。

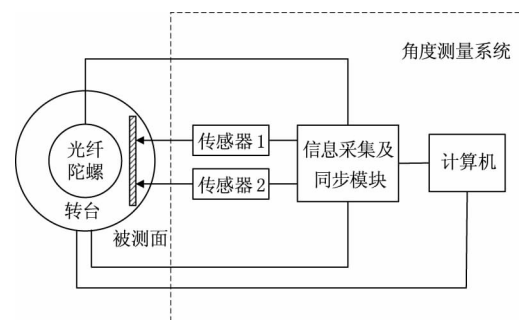


图2 实验总体测量示意图

Fig. 2 General diagram of the measurement system

实验总体框图如图2所示,将被测面安装在高精度摇摆台上,用计算机控制转台的摆幅和频率,两个激光位移传感器在转台转动的过程中实时测量传感器到被测面的距离,并将测量数据通过信息采集

及同步模块实现与光纤陀螺<sup>[12]</sup>的输出同步,并将数据发送给计算机进行处理。

被测角度与激光位移传感器测量位移的关系如图3所示,虚线位置为被测物体的初始位置,假设被

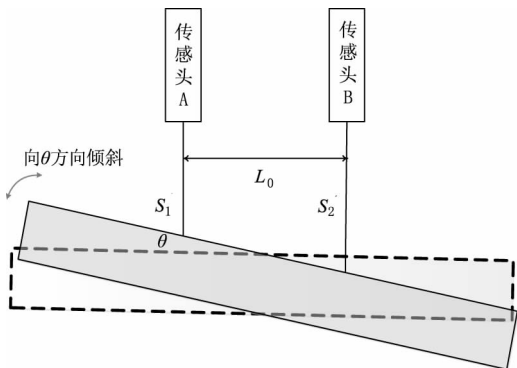


图3 位移与角度的关系

Fig. 3 The relations of displacement and angle

测面与两激光束垂直,两传感器到被测面的距离分别为  $S_1$  和  $S_2$ ;实线位置为被测面绕法线顺时针转  $\theta$  度后的位置,设此时两传感器到被测面的距离分别为  $S'_1$  和  $S'_2$ ;  $L$  为两激光束之间的距离,  $\theta$  与两激光位移传感器的位移及两激光束间距  $L$  之间的关系为:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{S'_1 - S_1 + S_2 - S'_2}{L} \right) \quad (3)$$

式中,  $\theta$  为被测面相对初始垂直位置转过的角度,逆时针为正,顺时针为负。

### 3 实验结果

图4是所搭建的实验装置,光纤陀螺仪与被测面安装在高精度摇摆台上,陀螺敏感轴与摆动平面垂直;调整两个激光位移传感器,使其发出的光束平行;设置高精度摇摆台的摆动幅度为  $\pm 10^\circ$ ,摆动频率为 1 Hz;计算机采样频率为 2000 Hz。以光纤陀螺的角位移作为参照,比较激光位移传感器的测量值。

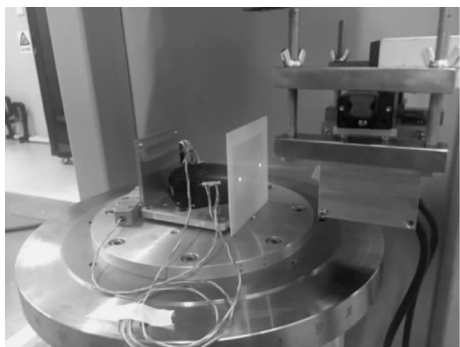


图4 实验装置图

Fig. 4 The diagram of experimental device

转台在设定的摆幅和频率下周期摆动,激光位移传感器的角度测量误差如图5所示。

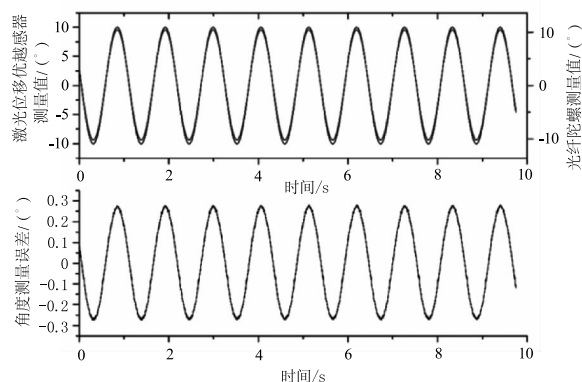


图5 角度测量实验结果

Fig. 5 Diagram of angle measurement result

## 4 误差分析与补偿

### 4.1 误差分析

被测面的初始位置与激光位移传感器的不垂直以及两个激光位移传感器的不平行是影响角度测量精度的两个主要因素。

实验中调节被测面与两激光束垂直是将反射镜紧贴被测面,通过调节转台,使两激光束打在反射镜后光路沿原路返回,以此时被测面的位置为初始位置计算角度值,但手动调整垂直存在误差,经计算,初始位置与激光束的不垂直度为  $0.33^\circ$  时,对于  $10^\circ$  的转角,存在  $0.01029^\circ$  的角度测量误差,因此必须通过定量计算找到与两激光束垂直的理想初始位置。

如图6所示,被测面分别找两个位置,分别测得两激光位移传感器到位置1的位移  $S'_1$ 、 $S'_2$  和两激光位移传感器到位置2的位移  $S''_1$ 、 $S''_2$ ;虚线位置为垂直位置,两激光位移传感器到垂直位置的位移分别为  $S_1$  和  $S_2$  (理想情况下  $S_1 = S_2$ ,因传感器安装误差使被测面与两激光束垂直时  $S_1 = S_2$ ),由式(3)可知,只需得到  $S_1$  和  $S_2$  的差值即可计算角度信息,设  $x = S_2 - S_1$ 。

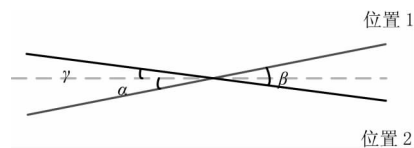


图6 几何示意图

Fig. 6 Diagram of geometry

根据式(3)可得:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{S'_1 - S_1 + S_2 - S'_2}{L}\right) \tan^{-1}\left(\frac{S'_1 + x - S'_2}{L}\right) \quad (4)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{S''_1 - S_1 + S_2 - S''_2}{L}\right) \tan^{-1}\left(\frac{S''_1 + x - S''_2}{L}\right) \quad (5)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{S''_1 - S'_1 + S'_2 - S''_2}{L}\right) \quad (6)$$

由于逆时针为正,因而 $\alpha$ 为正, $\gamma$ 、 $\beta$ 为负,由图6可知:

$$\alpha - \gamma = -\beta \quad (7)$$

其中, $\beta$ 是位置2到位置1的角度,而位置1与两激光束并不垂直,存在一个 $\alpha$ 角的不垂直度,因此使用式(6)来计算 $\beta$ 是存在误差的。联立式(4),(5),(6),(7)可解得 $x = 0.92 \text{ mm}$ ,从而解得 $\alpha = 0.1005^\circ$ , $\gamma = -0.0287^\circ$ , $-(\alpha - \gamma) = -0.1292^\circ$ 。经计算可知,当不垂直度为 $0.1005^\circ$ ,转角为 $-0.2392^\circ$ 时,角度计算误差为 $1.1352 \times 10^{-7}(\circ)$ ,因此 $\beta$ 的计算误差可以忽略。

而对于激光位移传感器的不平行误差,主要通过软件补偿方法进行补偿。

#### 4.2 误差补偿

角度测量误差随转角的变化如图7所示,由图可知误差随转动角度的增大而增大,是趋势性误差<sup>[13-14]</sup>,误差模型为:

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (8)$$

式中, $x$ 为激光位移传感器测量的角度值, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 分别为拟合直线的三次、二次、一次项系数及常数项。

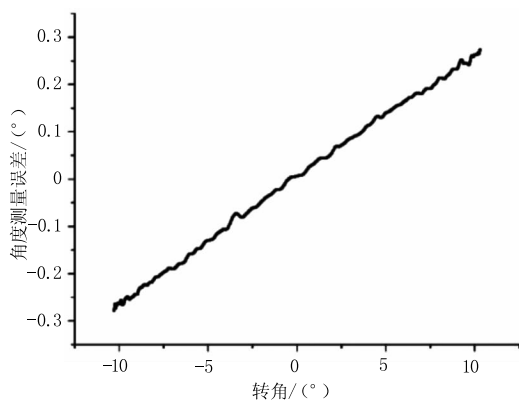


图7 角度测量误差与转角的关系

Fig.7 The relation between error of angle measurement and rotation angle

对实验数据进行最小二乘拟合,按照式(8)

算得:

$$a = -5.6987 \times 10^{-6}$$

$$b = -4.9302 \times 10^{-5}$$

$$c = 0.0266$$

$$d = 0.00477$$

图8是补偿后的角度测量误差,从图中可知误差由 $\pm 0.3^\circ$ 降到 $\pm 0.005^\circ$ ,降低一个数量级,经多次测量,该误差模型满足测量要求。

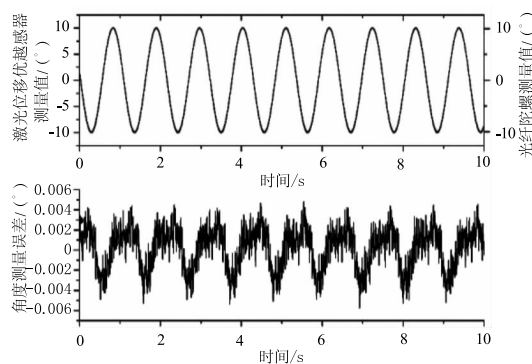


图8 补偿后的角度测量误差

Fig.8 Compensated angle measurement error

#### 5 结论

提出了一种基于光学三角法的新型角度测量技术,该技术使用非接触光学方法,对被测物体表面的粗糙度和光洁度要求不高,且对被测物表面没有损伤。通过对光纤陀螺输出角速度进行积分,得到实时角度基准,与本系统的角度测量结果实时对比实验表明,该角度测量方法的角度测量范围 $\pm 10^\circ$ ,角度测量精度 $\pm 0.005^\circ$ ,测量频率2000 Hz,可用于各种载体的实时角度测量或测角误差标定,是一种实用的精密动态角度测量技术。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Zhuo, LI Pengsheng, QIANG Xifu, et al. The Development Situation of Angle Measuring Technology domestic and overseas [J]. Space Navigation Measuring Technology, 1994, 13(4): 4-11. (in Chinese)  
张琢,李鹏生,强锡富,等.测角技术国内外发展概况[J].宇航计测技术,1994,13(4):4-11.
- [2] LI Xiangrong. Research on the reverse measurement technology based on moire fringe [J]. Changchun: The Chinese Academy of Sciences Changchun Optical Precision Machinery and the Institute of Physics, 2006: 1-117. (in Chinese)  
李向荣.基于莫尔条纹法的扭转测量技术研究[D].长

- 春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2006:1-117.
- [3] SU Dongfeng, XU Zhijun, JIA Jiqiang, et al. Read-head design for improving the precision of circular grating angular measuring system[J]. Journal of electronic instruments and measurement, 2013, 27(7): 653-657. (in Chinese)  
苏东风, 续志军, 贾继强, 等. 提高圆光栅测角系统精度的读数头设计[J]. 电子仪器与测量学报, 2013, 27(7): 653-657.
- [4] NI Jinping. Screen array test technology and application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014: 134-168. (in Chinese)  
倪晋平. 光幕阵列测试技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 134-168.
- [5] J Nayak. Fiber-optic gyroscope: from design to production[J]. APPLIED OPTICS, 2011, 50(25): E152-E161.
- [6] CHANG Cheng, ZHANG Zhifeng. Study on the error in triangular laser measurement[J]. China Science and Technology Information, 2006(23): 61-64. (in Chinese)  
常城, 张志峰. 激光三角法测量的误差研究[J]. 中国科技信息, 2006(23): 61-64.
- [7] WU Jianfeng, WANG Wen, CHEN Zichen. Study on the analysis for error in triangular laser measurement and the method of improving accuracy[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2003, 20(5): 89-91. (in Chinese)  
吴剑锋, 王文, 陈子辰. 激光三角法测量误差分析与精度提高[J]. 机电工程, 2003, 20(5): 89-91.
- [8] JIN Hongyu. Based on laser trigonometry measuring technology research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 1-54. (in Chinese)  
金洪禹. 基于光散射的三角法测量技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 1-54.
- [9] CHEN Hao, LÜ Chao, CHE Ying, et al. Analysis on the object surface tilt effect on the measurement error of laser triangulation method[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 38(1): 17-20. (in Chinese)  
陈浩, 吕超, 车英, 等. 物面倾斜对激光三角法测量误差影响的分析研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2015, 28(1): 17-20.
- [10] FENG Junyan, Feng Qibo, KUANG Cuifang. Present status of high precision laser displacement sensor based on triangulation[J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(3): 33-36. (in Chinese)  
冯俊艳, 冯其波, 匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. 应用光学, 2004, 25(3): 33-36.
- [11] Daneshpanah M, Harding K. Surface sensitivity reduction in laser triangulation sensors[J]. Proc. of SPIE, 2011(8133): 813300-813300-9.
- [12] ZHOU Kejiang, HU Guodong, LIU Shujun, et al. Separation of Shupe effect and Sagnac effect in interferometric fiber-optic gyroscope[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(4): 429-432. (in Chinese)  
周柯江, 胡国栋, 刘树俊, 等. 干涉式光纤陀螺 Shupe 效应与 Sagnac 效应的分离[J]. 激光与红外, 2014, 44(4): 429-432.
- [13] ZHANG Jingjuan, ZHANG Zhongyi, LIU Juncheng. Novel method of calibrating the angle-measurement error of resolver[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 149-152. (in Chinese)  
张京娟, 张仲毅, 刘俊成. 一种新型的旋转变压器测角误差标定技术[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 149-152.
- [14] ZHAO Zhongmin, XI Youbao. Inherent error correction algorithm for 3D laser scanning system[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(1): 34-38. (in Chinese)  
赵中民, 习友宝. 三维激光扫描系统的固有误差校正算法[J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 34-38.