

# 基于光纤阵列的二维微角位移传感器

赵婷婷 赵 勇\* 张 毅

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

**摘要** 提出了一种基于光纤阵列的二维微角位移传感器。该传感器采用由十字形排列的光纤阵列构成的轮辐式探头结构。各接收光纤接收光强随被测角位移改变。通过对各光纤接收光强进行高斯拟合确定反射光斑中心位置。这种测量方法可以有效降低表面反射系数变化、光源波动以及环境光对测量结果的影响。由于各接收光纤对应光路损耗不同对微角位移测量精度产生影响,提出了光路损耗的归一化修正方法。实验证明系统测量角度范围  $-0.16 \text{ rad} \sim 0.16 \text{ rad}$ , 归一化修正方法使系统测量分辨率提高到了  $3.8 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 角位移传感器; 光纤阵列; 高斯光束; 光路损耗

**中图分类号** O431.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.0874

## Two-Dimensional Micro-Angular Displacement Measurement Based on Fiber Arrays

Zhao Tingting Zhao Yong Zhang Yi

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** A fiber optic sensor for two-dimensional angular displacement measurement is proposed. Linear light receiving fiber arrays arranged as a crisscross spoke are used in the sensor probe. Light intensity received by each fiber will change due to the measured angular displacement and be recorded by the CCD. Based on the Gaussian distribution theory the reflected light spot center can be determined by fitting a Gaussian curve according to received light intensity and position of each fibers. With this method, measurement errors caused by surface reflection index variation, light power fluctuation, and ambient light disturbance can be effectively avoided. The measured angle range is  $-0.16 \text{ rad} \sim 0.16 \text{ rad}$ . The difference of optical path loss of each receiving fiber reduces the measurement accuracy of this system. The proposed method based on the correction of optical path loss corresponding to each fiber can effectively improve the angular measurement resolution to  $3.8 \times 10^{-4} \text{ rad}$ .

**Key words** fiber optics; fiber optic sensor; angular displacement measurement; fiber array; Gaussian beam; optical path loss

## 1 引 言

高精度微角位移测量技术在很多工业过程中有着广泛应用,例如机械系统的精密校准,转动机械的控制,坐标测量机的标定等。光学测角法以其非接触无损测试、分辨率好、灵敏度高等优点而备受青睐,应用越来越广泛。目前,常用的光学测角方法包

括光学自准直法、激光干涉法等<sup>[1,2]</sup>。但是这些测量装置多数体积大、价格高,不适于在测量空间较小的场合下使用。P. S. Huang 等人提出的基于全内反射的小尺寸高精度角度传感器通过测量反射光强得到被测角位移<sup>[3,4]</sup>。这种方法对光源波动及杂散光敏感,应用场合受限。为了消除杂散光的影响,有

收稿日期: 2008-08-03; 收到修改稿日期: 2008-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(50575111, 60704026)资助项目

作者简介: 赵婷婷(1985—),女,博士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zhaott06@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介: 张 毅(1964—),男,教授,博导,主要从事智能交通系统,检测技术等方面的研究。

E-mail: zhyi@mail. tsinghua. edu. cn

\* 通信联系人: E-mail: zhaoy18@tsinghua. edu. cn

学者将外差干涉法应用于全内反射测角法,但与此同时系统复杂性也大大提高<sup>[5,6]</sup>。Amar K. Ganguly 等人提出的基于反射光强调制技术的光纤微角度传感器使用两根或两根以上光纤,利用相邻光纤接收光强之差获取角位移变化量,可以有效消除光源波动及杂散光影响,但是其测量的线性度和稳健性有待提高<sup>[7]</sup>。Khiat A. 等人设计的反射式角位移传感器采用圆柱形探头,将 4 根接收光纤 R1、R2、R3、R4 分别固定于探头的 I、II、III、IV 象限,研究了 R1+R2、R3+R4 接收光强随角位移变化的规律,并利用该规律解调待测角位移<sup>[8]</sup>。这种方法与 Amar K. Ganguly 等人提出的方法类似,均可以消除光源波动及杂散光影响,但由于仅利用相邻光纤接收光强之差或 R1+R2、R3+R4 接收光强之和解调角位移信息,利用数据量少、解调方法较为粗糙,因而对这些数据的测量误差非常敏感,角位移测量稳健性不高。

本文采用由十字型排列的四个光纤阵列构成的轮辐式探头结构实现二维角位移的精确、稳定测量。各接收光纤接收光强随被测角位移改变。通过对各光纤接收光强进行高斯拟合确定反射光斑中心位置,进而得到被测角位移。该方法可以有效消除表面反射系数变化、光源波动以及杂散光对测量结果的影响。由于本方法利用多根光纤探测光强数据,并采用高斯拟合确定光斑中心位置,因而与前人的方法相比有效提高了测量稳健性。研究了光路损耗对测量的影响并提出消除其影响的方法:归一化修正法;研究了光斑大小与相邻纤芯距的匹配关系,保证测量时光纤阵列的有效利用率。

## 2 测量基本原理

设计的光纤角位移传感器原理如图 1。被测角位移由固定在微驱动台上的正三棱镜给出。

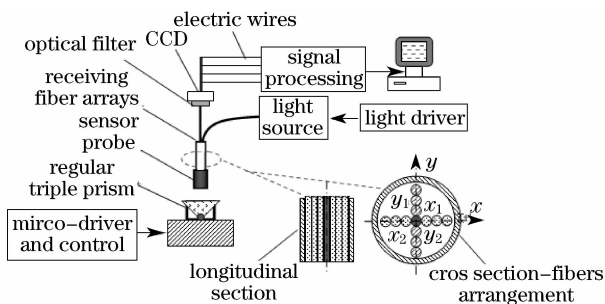


图 1 基于轮辐式光纤阵列探头的角位移测量系统

Fig. 1 Schematic diagram of the two-dimensional fiber-optic angular displacement sensor system with spoke structure

### 2.1 光纤传感器探头及测量原理

为了测量二维角位移,设计轮辐式光纤阵列传感探头如图 1 所示。探头中心为单模出射光纤(以提高测量分辨率),以其为中心分别沿  $x$  轴、 $y$  轴方向正交对称分布四排多模接收光纤,记为  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ 。探头接收光纤选用多模光纤是为了提高探头对信号光的接收能力。

激光器发出的可见光经耦合后进入轮辐式光纤传感探头中心的单模光纤,出射后打在待测倾斜三棱镜表面,反射光反射至探头的十字型多模光纤阵列处,并被多模光纤接收。CCD 探测器检测得到的多模光纤阵列接收到的多个光强,经过数据处理程序以及高斯拟合算法,可以得到光斑中心位置。由光斑中心位置与角位移的对应关系即可完成对角位移的测量。

### 2.2 接收光斑特性

被测角位移的变化导致反射光束打在接收光纤阵列端面的光斑移动。接收光斑在  $x$  轴方向的光强分布近似为高斯分布,可由三个特征参量描述:峰值光功率  $A^2$ 、有效半峰全宽  $a_0$  及峰值光功率的实际位置  $x_0$ ,表达式如下<sup>[8]</sup>:

$$I(x) = A^2 \exp\left[-\frac{2(x-x_0)^2}{a_0^2}\right]. \quad (1)$$

### 2.3 光斑中心位置检测及其与角位移的对应关系

光斑中心位置可以通过记录各光纤位置及其接收光强,如图 2 以 3 根接收光纤为例,记录各光纤纤芯位置及其接收光强  $[x_1, I(x_1)]$ 、 $[x_2, I(x_2)]$ 、 $[x_3, I(x_3)]$ ,在这三个数据点的基础上做高斯拟合,即可得到光斑中心位置  $x_0$ 。当接收光纤多于 3 根时方法同上,也可以通过高斯拟合得到光斑中心位置。

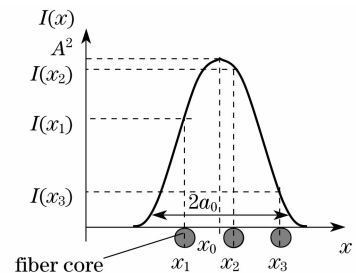


图 2 光斑中心位置与光强高斯分布示意图

Fig. 2 Light spot center analysis based on Gaussian beam with a linear fiber array

将正三棱镜的边长记为  $b$ , 折射率记为  $n$ , 被测角位移设为  $\beta$ 。根据如图 3 所示的几何关系,被测角位移与光斑中心位置之间的关系如下:

$$x_0 = \sqrt{2}bs \sin \beta \cdot \left(1 - \frac{\cos \beta}{n}\right). \quad (2)$$

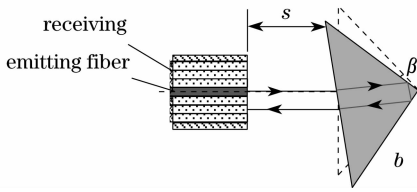


图3 微角位移传感器探头光路图

Fig. 3 Light path of the fiber optic angular displacement sensor

根据(2)式仿真得到被测角位移与光斑中心位置间关系如图4所示。

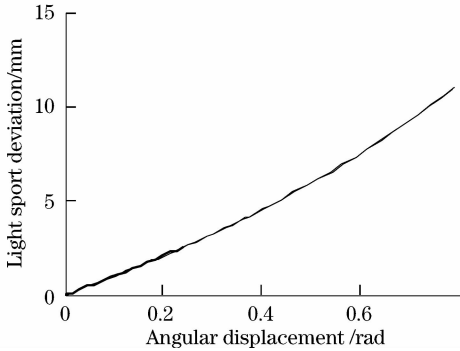


图4 角位移与光斑中心位置关系仿真图

Fig. 4 Simulation result of angular displacement versus light spot deviation

系统选用的光纤阵列由12根光纤线形排列组成,各光纤纤芯间距 $135\ \mu\text{m}$ ,故光斑中心位置的变化范围为 $0\sim 1620\ \mu\text{m}$ 。仿真结果可见在光纤阵列的可测范围内,被测角位移与光斑中心位置呈近似线性关系,且只要适当选择正三棱镜的大小,角位移测量范围即可达到: $0\sim 0.16\ \text{rad}$ [根据(2)式计算得到],对应于单排光纤阵列; $x$ 轴两排光纤阵列,测量范围可达 $-0.16\ \text{rad}\sim 0.16\ \text{rad}$ 。

### 3 实验设计及数据分析

为了验证提出的微角位移测量方法的可行性,搭建了实验平台进行实验验证。实验中选用的单模出射光纤和多模接收光纤的尺寸分别为 $9/125\ \mu\text{m}$ 和 $62.5/125\ \mu\text{m}$ 。选用信噪比高于 $56\ \text{dB}$ 的CCD作为探测器。正三棱镜的边长为 $20\ \text{mm}$ 。

光源选用中心波长为 $650\ \text{nm}$ 的激光器。微驱动台给出被测角位移,按固定步长改变 $x$ 轴方向被测角位移,测量每种角位移情况下各光纤接收光强,实验数据如图5圆点所示。对每种角位移情况下各光纤接收光强进行高斯拟合,得到拟合结果如图5曲线所示,反映了光斑功率分布情况。

理想情况下,被测角位移改变时出射光斑中心位置线性移动,且出射光斑功率不变,故各接收光纤接收最大光强一致。但是实验发现,各光纤接收最大光强

差别较大。原因是各接收光纤对应光路损耗不同。而光路损耗的不同直接影响到对光斑中心位置的定位,从而影响测量微角位移的精度。因此,需要对各多模接收光纤的光路损耗进行测量。

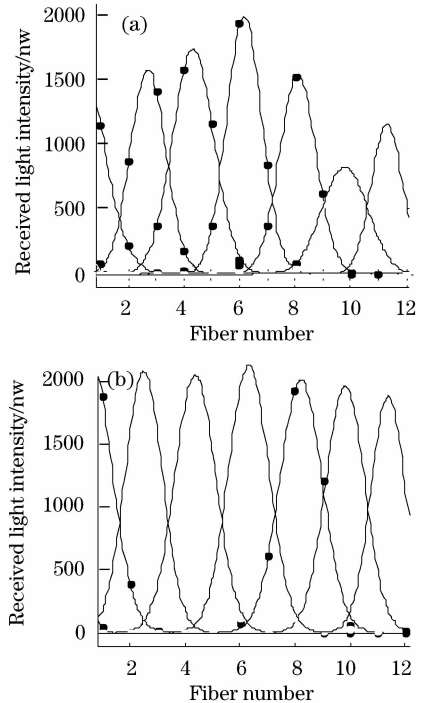


图5 修正前(a)修正后(b)角位移变化时各光纤接收光强高斯拟合曲线

Fig. 5 Gaussian fit curve under each angular displacement without correction (a) with correction (b)

#### 3.1 光路损耗的测量及归一化修正

将一功率稳定的光斑按固定步长沿平行于 $x$ 轴( $y$ 轴)扫描移动,记录各光纤在光斑移动过程中接收光强,对每根光纤记录的一组光强进行高斯拟合,得到的峰值功率即为其接收最大光强,这个光强与出射光斑最大光强的比值即为该光纤对应的光路损耗。图6为实验测得各光纤接收最大光强。

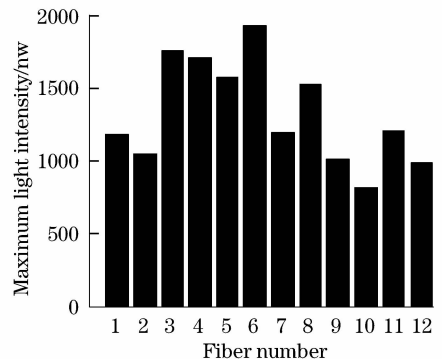


图6 各光纤接收最大光强

Fig. 6 Maximum light intensity received by each fiber

光路损耗的不同直接影响光斑中心位置的定位,从而影响测量微角位移的精度。因此需要根据测得各光纤光路损耗,对原始实验数据进行归一化修正。修正系数定义为光路损耗归一化系数,计算方法为,各光纤接收最大光强的最大值与各光纤接收最大光强的比值。各光纤归一化系数分别1.630150,1.832387,1.097561,1.130910,1.230916,1.000000,1.616500,1.258946,1.915840,2.364650,1.597852,1.970466。修正方法即将实验记录各光纤接收光强分别乘以相应的归一化系数。

图 5(a)为未经修正时微角位移测量实验初始数

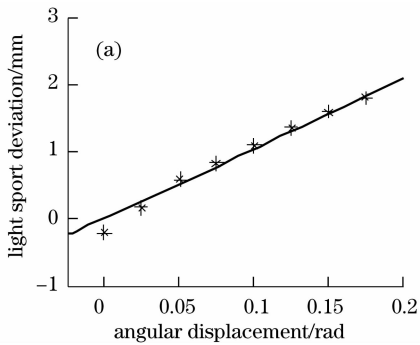
表 1 修正前后不同角位移对应接收光斑中心位置与理论值比较

Table 1 Measurement result (with and without correction) compared with theoretical value for angular displacement and receiving light spot position

Angular displacement /rad	0.175	0.150	0.125	0.100	0.075	0.050	0.025	0
Spot center without correction /mm	1.7466	1.5319	1.2937	1.0200	0.7598	0.5302	0.1092	-0.2687
Spot center with correction /mm	1.7514	1.5324	1.3059	1.0390	0.7651	0.5019	0.2202	0.0503
Theoretical spot center /mm	1.8159	1.5477	1.2835	1.0226	0.7646	0.5085	0.2539	0

分别将修正前后测量结果与理想情况对比,结果如图 7 所示,其中实线为仿真得到的理想情况下的测量结果。

对测量结果进行数据分析,修正前平均测量误差为 0.012354 mm,修正后平均测量误差为



据。微角位移改变时,记录各接收光纤接收光强,经高斯拟合后得到各角位移情况下接收光强分布曲线。

图 5(b)为经过归一化修正后,经高斯拟合得到的角位移变化时接收光强分布。

对比图 5,修正后比修正前各曲线峰值更加一致,符合实际物理情况,说明上述光路损耗的归一化修正方法有效。

### 3.2 修正前后测量精度分析

对于修正前后实验数据,根据高斯拟合结果,得到不同角位移情况下,接收光斑的中心位置,如表 1 所示。

0.001112 mm。可见,经过归一化修正,角位移测量精度明显提高。测量误差可能来源包括角位移方向与光纤阵列轴线不平行、连接头耦合效率波动,CCD 探测误差等。

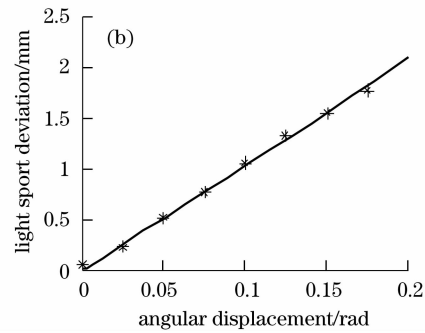


图 7 修正前(a)修正后(b)接收光斑中心位置随角位移变化曲线

Fig. 7 Uncorrected measurement (a) corrected measurement

(b) result of angular displacement uersus light spot deviation

### 3.3 噪声及分辨率分析

传感系统通过对各光纤接收光强进行高斯拟合确定反射光斑中心位置,再根据光斑中心位置与被测角位移的关系实现微角位移测量。本方法可有效消除表面反射系数变化、光源波动以及杂散光对测量结果的影响。系统噪声可能来源包括角位移方向与光纤阵列不平行、连接头耦合效率波动、CCD 探测噪声等。角位移方向与光纤阵列不平行的问题可以通过对系统特性进行标定解决。连接头耦合效率波动可通过对光路的固定及采用更紧密连接头的方

法尽量避免。研究发现经过标定以及光路固定等措施后系统噪声主要由 CCD 探测噪声造成。CCD 探测器的噪声源可归纳为三类:散粒噪声、暗电流噪声和转移噪声<sup>[9]</sup>。假定 CCD 探测器的信噪比为  $R_{\text{ccd}}$ ,接收光斑光强的高斯分布峰值光功率  $A^2$ 、半峰全宽为  $a_0$ ,由式(1)可得 CCD 能探测到的光斑中心位置最小变化为  $(a_0 \sqrt{-\ln(1-1/R_{\text{ccd}})})/2$ 。可见光斑越小、CCD 探测器信噪比越高,系统分辨率越高,但是光斑过小会使接收光纤阵列有效使用率降低。若光

斑直径小于接收光纤间距 2 倍, 高斯拟合算法稳健性较差, 光斑直径的下极限值为 2 倍接收光纤间距, 小于下极限值时高斯拟合算法不能正常工作。因此降低接收光纤芯径可提高系统分辨率, 同时也减小了测量范围。传感系统使用光纤阵列间距  $135 \mu\text{m}$ ,  $a_0 = 135 \mu\text{m}$ , CCD 探测器信噪比为 56 dB,  $R_{\text{ccd}} = 63095.73\%$ , 从而能探测到的最小光斑中心位置变化为  $(a_0 \sqrt{-\ln(1-1/R_{\text{ccd}})})/2 = 3.8 \mu\text{m}$ 。对应角位移分辨率为  $3.8 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。

由于实验条件有限, 只能给定 0.001 rad 步长进行分辨率初步验证试验。实验结果如图 8 所示。当角位移变化步长为 0.001 rad 时, 测量结果精度、线性度较高, 能够验证测量系统的分辨率高于 0.001 rad。

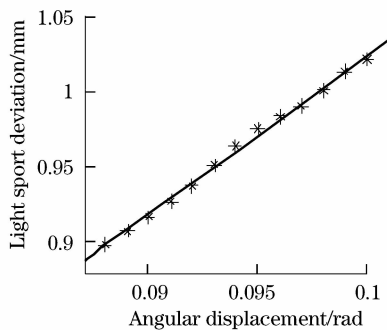


图 8 分辨率实验接收光斑中心位置随角位移变化曲线  
Fig. 8 Measurement result of light spot deviation versus angular displacement in resolution experiment

## 4 结 论

设计了一种新颖的基于光纤阵列的反射式二维微角位移传感器, 采用十字形轮辐式光纤阵列探头, 通过高斯拟合的方法确定光斑位置, 进而实现角位

移测量。该方法比强度型测量方法对光源波动及杂散光稳健性强, 并具有体积小、成本低、易解调等优点。提出了通过测量各光纤光路损耗对实验数据进行归一化修正的方法, 显著提高了系统测量角位移的精度, 测量角位移分辨率达到  $3.8 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。由于探头与被测物体的间距受接收光柱发散所限, 传感器工作距离有限, 可考虑在探头前加装自聚焦透镜以增大传感器工作距离。

## 参 考 文 献

- 1 P. Shi, E. Stijns. Improving the linearity of the Michelson interferometric angular measurement by a parameter compensation method[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**:44~51
- 2 F. J. Schuda. High-precision, wide-range, dual-axis, angle monitoring system[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1983, **54**:1648~1652
- 3 P. S. Huang, S. Kiyono, and O. Kamada *et al.*. Angle measurement based on the internal-reflection effect; a new method [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(28):6047~6055
- 4 W. Zhou and L. Cai. An angular displacement interferometer based on total internal reflection[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**:1647~1652
- 5 M. H. Chiu and D. C. Su. Angle measurement using total-internal-reflection heterodyne interferometry [J]. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(6):1750~1753
- 6 A. Zhang and P. S. Huang. Total internal reflection for precision small-angle measurement[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(10):1617~1622
- 7 Amar K. Ganguly and Ardhendu Saha. Fiberoptic micro-displacement and vibration sensor [C]. *Part of the SPIE Conference on Fiber Optic and Laser Sensors and Applications*, 1998
- 8 Andrzej W. Domanski, Marcin Roszko, Marcin Swillo *et al.*. Compact optical fiber refractive index differential sensor for salinity measurement [C]. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, Canada, May 19-21, 1997*:953~956
- 9 许秀贞, 李自田, 薛利军. CCD 噪声分析及处理技术[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(4):343~346  
Xu Xiuzhen, Li Zitian, Xue Lijun. Analysis and processing of CCD noise[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(4):343~346