

# 基于 QPD 的二维角位移精密测量传感技术研究

范亚男,陈青山,刘洋,王猛

北京信息科技大学

**摘要:** 为解决二维角位移高精度精密测量的问题,研究了一种基于 QPD 的二维角位移测量方法。以 LED 作为光源,低暗电流、高灵敏度的四象限光电探测器作为检测元件,采用光学杠杆式的测角方法形成测量系统。分析了光斑大小对测量结果的影响,并搭建高集成实验系统进行验证。测试实验结果表明:测角分辨力达到  $1''$ ,在  $2\text{mrad}$  量程内,非线性度为  $0.18\%$ ,数据采集与传送延时为  $250\mu\text{s}$ 。该方法可用于精密光机系统,以便高精度实时监测高速运动元件的二维角运动。

**关键词:** 二维角位移;四象限光电探测器;LED;精密测量

**中图分类号:** TG806;TH712

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2019.08.023

## Research on 2D Angular Displacement Precision Measurement Sensing Technology Based on QPD

Fan Yanan, Chen Qingshan, Liu Yang, Wang Meng

**Abstract:** In order to solve the problem of high-precision precision two-dimensional angular displacement measurement, a two-dimensional angular displacement measurement method based on QPD is studied. Using LED as the light source, low dark current high-sensitivity four-quadrant detector as the detection component, an optical lever type angle measurement system is constructed. The influence of spot size on the measurement results is investigated. A highly integrated experiment setup is built to verify the method. The experiment results show that the angular resolution reaches  $1''$ , the nonlinearity is  $0.18\%$ , and the data collect and transmission delay is less than  $250\mu\text{s}$  within the  $2\text{mrad}$  range. The formed method and system can be applied in precision opto-mechanics devices for the high precision real-time monitoring of the 2-D angular motion.

**Keywords:** 2D angle precision measurement; four quadrant detector; LED; precision measurement

## 1 引言

角度测量是计量科学的重要组成部分,特别是二维角位移的精密测量在精密器件加工、航空航天、军事和通讯等许多领域都具有极其重要的意义和作用<sup>[1,2]</sup>。

目前,常用的二维角位移精密测量传感器可以分为电容式、电感式、光电式三大类。电容式角度传感器具有较高的分辨率和响应速度,但电容式角度传感器对制作工艺要求严格且量程较小,在较大角位移测量中容易受到限制<sup>[3,4]</sup>。电感式角度传感器具有重复定位精度高、功耗低、耐久度高的特点,但是容易受到外界环境(磁场、振动)的影响且价格昂贵<sup>[5-7]</sup>。光电式角度测量传感器具有非接触式、灵敏度高的特点,在工程应用中越来越广泛<sup>[8-10]</sup>。浙江大学的潘文博<sup>[11]</sup>通过自准直原理及光电探测器

实现对小角度的测量,在  $\pm 50''$  量程内,角度分辨率为  $0.1''$ ,非线性度为  $1.28\%$ 。Avanesov Yu L. 等<sup>[12]</sup>使用系统结构复杂的线阵 CCD 对二维转角进行测量。因此,研究一种高精度、便携式的二维角位移精密测量仪器成为必要<sup>[13,14]</sup>。

本文介绍利用一种基于 QPD 的二维角位移测量方法,利用特定波长的 LED 作为光源,以高灵敏、暗电流的四象限光电探测器作为检测元件,搭建了一套结构简单、集成度高的二维角位移精密测量实验系统。

## 2 二维角位移精密测量原理

系统测量原理见图 1。LED 发出的光经过准直后照射在装有反射镜的俯仰平台上,经俯仰平台表面的反射镜反射后,在四象限光电探测器表面成像。

设俯仰平台距离四象限光电探测器表面垂直距离(光程)为  $L$ 。通过探测器输出光电压得到光斑的位移量为  $d$ ,根据几何关系可得出,俯仰平台角位移变化量  $\theta$  与光斑位移量  $d$  之间的对应关系为

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{d}{L} \quad (1)$$

式中,当  $d \ll L$  时,得  $\theta = \frac{d}{2L}$ 。

当光斑照射在探测器光敏面上,四个象限的光电管会相应输出四路光电流信号。从四路光电流信号进而得到光斑在四个象限上的能量分布,对光斑在四个象限上的能量分布进行计算就可以得到光斑在横向和纵向上的位移量,从而得到二维偏转角度。

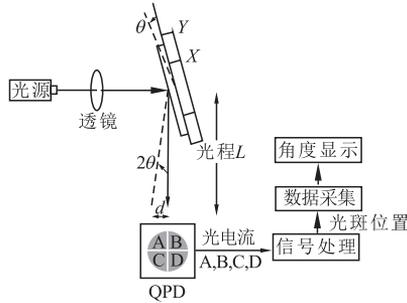


图1 二维角位移测量原理

如图2所示,光斑在四个象限所占的区域依次为A、B、C、D四个部分,假定每一部分上的光斑面积分别为  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , 对应四象限光电二极管产生的电流分别为  $I_1, I_2, I_3, I_4$ , 即光斑在四个象限上的能量分布分别为  $E_1, E_2, E_3, E_4$ 。

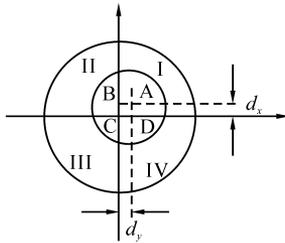


图2 四象限工作原理

光斑中心相对于探测器中心的偏移量分别为  $d_x, d_y$ , 光斑中心位置坐标为  $(x_0, y_0)$ 。

$$d_x = \frac{(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \propto \frac{(E_1 + E_4) - (E_2 + E_3)}{E_1 + E_2 + E_3 + E_4} \propto \frac{(S_1 + S_4) - (S_2 + S_3)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (2)$$

$$d_y = \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \propto \frac{(E_1 + E_2) - (E_3 + E_4)}{E_1 + E_2 + E_3 + E_4} \propto \frac{(S_1 + S_2) - (S_3 + S_4)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (3)$$

因此  $d_x, d_y$  体现了光斑中心的变化,利用几何知识求得第一象限中光斑面积为

$$S_A = x_0 y_0 + \frac{y_0}{2} \sqrt{r^2 - y_0^2} + \frac{x_0}{2} \sqrt{r^2 - x_0^2} + \frac{r^2}{2} \left[ \frac{\pi}{2} + \sin^{-1} \frac{y_0}{r} + \sin^{-1} \frac{x_0}{r} \right] \quad (4)$$

同理可以求得  $S_B, S_C, S_D$  的面积。将  $S_A, S_B, S_C, S_D$  代入式(2)、式(3)可得

$$d_x = \frac{1}{\pi r^2} \left[ 2r^2 \sin^{-1} \frac{x_0}{r} + 2x_0 \sqrt{r^2 - x_0^2} \right] \quad (5)$$

$$d_y = \frac{1}{\pi r^2} \left[ 2r^2 \sin^{-1} \frac{y_0}{r} + 2y_0 \sqrt{r^2 - y_0^2} \right] \quad (6)$$

当  $x_0, y_0 \ll r$  时,有

$$d_x = \frac{1}{\pi r^2} \left( 2r^2 \frac{x_0}{r} + 2rx_0 \right) \approx \frac{4x_0}{\pi r} \quad (7)$$

$$d_y = \frac{1}{\pi r^2} \left( 2r^2 \frac{y_0}{r} + 2ry_0 \right) \approx \frac{4y_0}{\pi r} \quad (8)$$

即

$$x_0 = \frac{\pi r}{4} d_x = \frac{\pi r (I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)}{4 (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)} \quad (9)$$

$$y_0 = \frac{\pi r}{4} d_y = \frac{\pi r (I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{4 (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)} \quad (10)$$

俯仰平台角度变化量和光斑位移量的关系为

$$\theta_x = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\pi r (I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)}{4L (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)} (x_0, y_0 \ll r)$$

$$\theta_y = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\pi r (I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{4L (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)} (x_0, y_0 \ll r)$$

### 3 实验系统

#### 3.1 测试系统及整体方案

如图3所示,二维角位移实验系统由LED光源、二维偏转台、信号处理电路、数据采集电路组成。采用德国PI-S-330.2SL(分辨率1urad)二维偏转台偏转微小角度。测试系统结构如图4所示,LED(波长为850nm)光源发出的光经过PI偏转平台表面的反射镜反射后,在探测器表面成像,用数据采集电路同时采集四路跨阻放大器输出的电压,计算得到光斑在横向和纵向上的位移量,实现二维角位移测量。

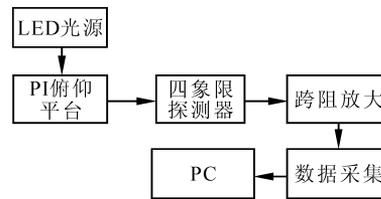


图3 测试系统框图

检测元件采用First-Sensor公司QP50系列四象限光电探测器:峰值波长850nm,光敏面直径D为6mm。从式(5)、式(6)可以得到,在光斑分布均匀的情况下,光斑实际中心位置与理论计算的中心位置呈非线性关系。

当四象限探测器的光敏面半径为3mm、光斑半径为1~2mm时,用MATLAB软件分析光斑实际偏移量和理论计算量的关系(见图5),随着光斑半径

的增加,测量精度降低,但是探测范围增大。因此优选光斑尺寸对二维角位移测量装置的测角性能至关重要。

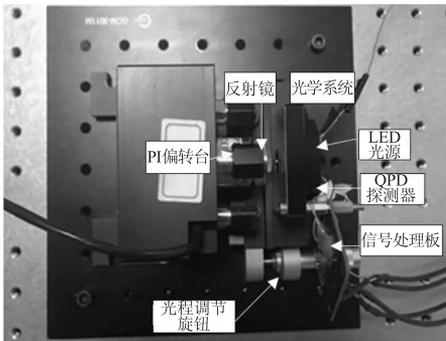


图4 测试系统结构

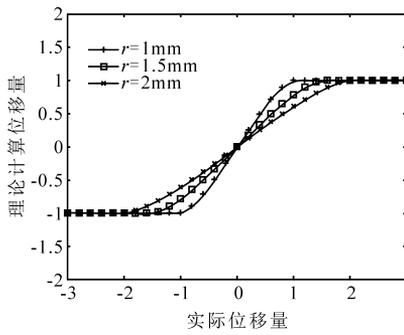


图5 光斑大小与测量精度的关系<sup>[15]</sup>

在实际运用中,为保持四象限探测器有较好的测量范围,一般光斑尺寸的大小是四象限探测器尺寸的一半,光斑直径  $d = D/2 = 3\text{mm}$  即  $r = 1.5\text{mm}$ 。如图6所示,在光程  $16\text{mm}$ 、透镜焦距  $6\text{mm}$ 、光斑半径  $1.5\text{mm}$  条件下,利用光学杠杆式角度测量方法及成像原理设计出结构紧凑、体积小的光学系统。相应公式为

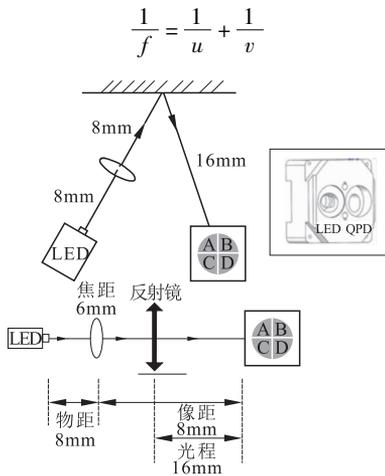


图6 光学结构

式中,  $f$  为透镜焦距;  $u$  为光源到透镜的距离;  $v$  为光斑到透镜的距离。

### 3.2 信号处理

跨阻放大电路是光学传感器的前端放大电路,用于将传感器的电流转换为电压,在信号处理过程中注重噪声的抑制提高信噪比。实际运用中四象限光电探测器输出的电流在微安量级。图7为跨阻放大器的结构图,主要由放大器和跨阻组成。

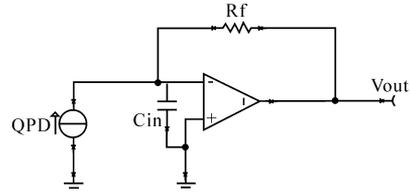


图7 跨阻放大电路

当增大放大器的反馈电阻为  $R_f$  时,反馈电阻  $R_f$  会与放大器的输入寄生  $C_{in}$  电容构成频率转折点,这个点会使放大电路稳定性变差,相位滞后电路产生振荡。为了消除放大电路的不稳定因素,通过添加额外的反馈电容进行相位补偿,如图8所示。该方法具有简单、空间占用小和可靠性高的特点。

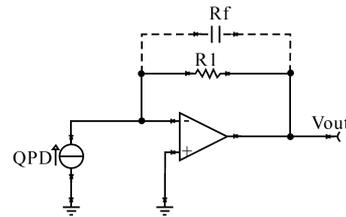


图8 相位补偿

### 3.3 数据采集

数据采集主要包括 AD 转换电路、FPGA 外围电路和串口传输电路。FPGA 采用 SPI 的通信方式控制 AD 转换芯片获得四路光电电压,在发送时钟周期内进行 16 次采样并进行均值滤波,最后通过 RS-422 通信方式将数据发送给上位机,上位机将采集到的数据进行处理得到光斑的位置信息。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 标定方法

在量程  $2\text{mrad}$  范围内,控制 PI 二维偏转平台每次步进偏转  $100\mu\text{rad}$ ,每次偏转完成后采集四路跨阻放大器的电压,运算得到每次光斑位移。通过拟合得到镜面偏转角度  $\theta_x, \theta_y$  与光斑位移量  $d_x, d_y$  的对应关系为

$$\theta_x = 94.5963d_x + 16.7884 \quad (11)$$

$$\theta_y = 81.0499d_y + 2.8115 \quad (12)$$

### 4.2 角分辨力

传感器的分辨力即当传感器的输入值从某一值

缓慢增加时,在超过某一增量后输出发生可观测的变化,该输入增量称为传感器的分辨率。

在指示光条件下,使用 PI-Mikro Mover 软件控制 PI 偏转平台进行 1 角秒的正弦波动,指示光照射到 PI 二维俯仰平台表面的反射镜上,在探测器的表面成像。用数据采集电路连续采集一段时间的四路光电压,同时采集俯仰平台产生的微小角度信号。通过计算可以得到以下数据反馈。

当二维俯仰平台产生 1"正弦波动时,从图 9 中可以清楚地看到二维测角装置的输出信号的变化。因此测角系统的测角分辨力达到 1"。

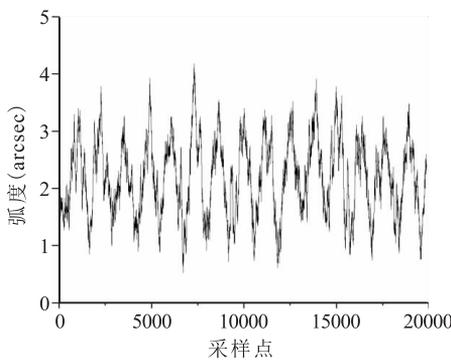


图 9 1"正弦跳动

### 4.3 线性度

从式(5)、式(6)中可以得出,光斑位置与四象限中心位置偏移较小时,光斑位置与实际偏移位置线性度较高;偏移较大时,线性度低。

将 X 方向上的数据与拟合直线(式 11)进行做差,结果如图 10 所示:在 1.5mrad 处产生最大偏差,其最大偏差为  $\Delta Y_{max} = 0.0035$ ,则非线性度为

$$\delta = \frac{\Delta Y_{max}}{Y_{full}} \times 100\% = 0.18\%$$

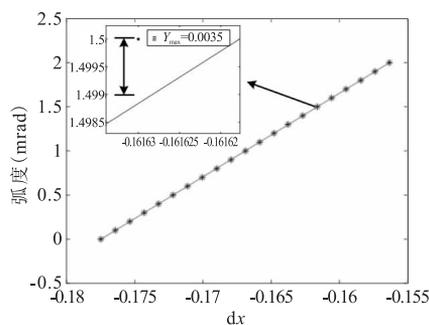


图 10 X 方向线性度数据

将 Y 方向上的数据与拟合直线(式 12)进行做差,结果如图 11 所示:在 1.6mrad 处产生最大偏差,其最大偏差为  $\Delta Y_{max} = 0.0028$ ,则非线性度为

$$\delta = \frac{\Delta Y_{max}}{Y_{full}} \times 100\% = 0.14\%$$

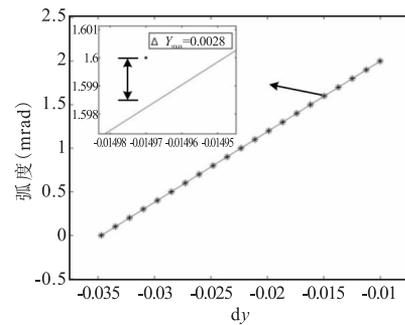


图 11 Y 方向线性度数据

### 4.4 数据采集与传输延时

二维角位移测量系统数据传输速率受 QPD 响应时间、AD 转换时间、FPGA 数据处理延时的影响。QPD 的响应时间是指光生载流子到 QPD 外部探测到光电流的时间差,该时间差常在纳秒量级,对于二维角位移测量系统而言可忽略不计。因此数据传输速率主要受 AD 转换延时及 FPGA 数据处理延时的影响。

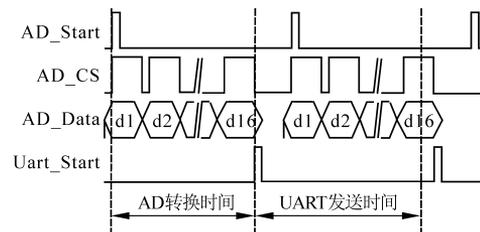


图 12 时序图

系统所采用的时序如图 12 所示,当 AD 转换开始,第 1 个数据到第 16 个数据转换完成后,每 16 个数据求均值,所得结果通过串口发送到上位机。通过 Modelism 软件对程序进行仿真即可得到 AD 转换延时和串口发送延时,其结果如图 13 所示。

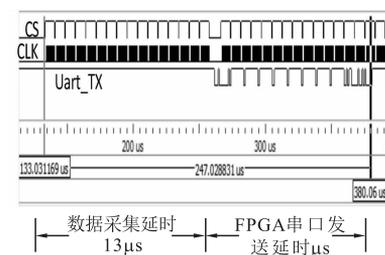


图 13 Modelsim 仿真结果

二维角位移测量系统中采用的 AD 精度为 16 位且 SPI 时钟为 5MHz。使用图 4 所示的实验系统,使用示波器对系统数据采集及传输延时进行测试,其结果如图 14 所示。每 16 个数据采集完成的时间约为 133μs。在串口波特率为 921600 条件下,FP-GA 每 16 个数据进行均值滤波及一帧数据发送完毕所需时间为 117μs。即二维角位移测量系统的数

据采集延时为  $250\mu\text{s}$ , 数据传输频率达到  $4\text{kHz}$ 。

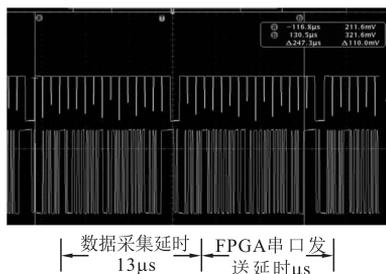


图 14 二维角位移测量系统响应延时

## 5 结语

本文通过理论分析,研究 QPD 二维角度位移精密测量原理,分析光斑位移与四象限探测器输出光电流的关系,并搭建了一套基于 QPD 的二维角位移精密测量实验系统。该系统结构简单,体积小,测角分辨力达到  $1''$ ,非线性度为  $0.18\%$ ,数据采集与传送延时为  $250\mu\text{s}$ ,系统测量精度进一步提高。在信号处理电路中,四路跨阻放大电路分别进行放大而由于电子器件本身的精度误差(例如反馈电阻的精度),导致放大电路的不一致性,从而导致测量装置在精度和线性度上产生误差。后续可以通过提高电路的一致性来提高测量精度。

### 参考文献

- [1] 陈洪芳,谭志,石照耀,等. 四象限传感器用于激光跟踪仪光斑偏移量测量[J]. 哈尔滨工程大学学报,2017,38(2):258-262.
- [2] 袁巨龙. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报,2010,46(15):162-177.
- [3] 李成宇,周哲海. 基于 QPD 的粒子位移与输出电压的转换系数标定[J]. 激光杂志,2017,38(9):50-53.
- [4] J Henry, J Livings. Improved position sensitive detectors using high resistivity substrates[J]. Phys,2008,41(7):55-58.
- [5] 何超,常金涛,王勇,等. 基于四象限探测器的斯托克斯向量测量仪[J]. 红外与毫米波学报,2016,35(1):57-62.
- [6] 庄鑫栋,董云飞,刘辉,等. 高精度可调量程电感式位移传感器测量系统[J]. 工具技术,2017,51(7):104-107.

- [7] 吴佳彬. 基于四象限探测器的高精度激光光斑位置检测技术研究[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2016.
- [8] Qingkunzhou, Ben-tzvi. Design of fast steering mirror systems for precision laser beams steering[C]. Robotic and Sensors Environments, 2008. ROSE 2008. International Workshop on,2008:144-149.
- [9] 陈志斌,范磊,肖文健. 二维振镜扫描系统调向误差分析[J]. 应用光学,2018,39(2):180-186.
- [10] Yun L, Xu D, Tan M. A new pre-alignment approach based on four-quadrant-photo-detector for IC mask [J]. International Journal of Automation and Computing, 2007, 4(2): 208-216.
- [11] 潘文博. 激光二维微角度测量系统研究[D]. 杭州:浙江大学硕士学位论文,2016.
- [12] Avanesov Yu L, Gorokhovskiy K S, Granovskii V A, et al. Rotation angle measurement device principle of operation and initial calibration results [C]. International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, Castelldefels-Barcelona, Spain, Feb 11-14, 2014:1-6.
- [13] C He, J Chang. Linear polarization optimized Stokes polarimeter based on four-quadrant detector [J]. Appl. Opt, 2015, 54(14):4458-4463.
- [14] 张雷,张国玉,刘云清. 影响四象限探测器精度的因素[J]. 中国激光,2012(6):121-125.
- [15] 程韦,滕艳华,夏玲燕,等. 光斑性质对四象限探测器测量精度的影响[J]. 科学技术与工程,2015,15(4):239-242.

第一作者:范亚男,硕士研究生,北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院,100192 北京市

First Author: Fan Yanan, Postgraduate, School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

通信作者:陈青山,博士,教授,北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院,100192 北京市

Corresponding Author: Chen Qingshan, Doctor, Professor, School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China