

二维光学自准直微角度传感器

廉孟冬, 金伟锋, 居冰峰*

(浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:为实现表面微形貌测量以及精密平台的定位测量,设计了一种结构简单的小体积二维微角度传感器。该微角度传感器基于激光自准直原理,主要由作为光源的激光二极管、自准直光路和作为位置探测器的四象限光电二极管组成。分析计算发现,角度传感器的灵敏度与光路中物镜的焦距无关,因此选用了焦距较短的物镜,以实现小体积、高灵敏度的目的。四象限光电二极管具有二维位置探测能力,利用其作为光电转换装置,微角度传感器可以同时探测两轴角度变化值。实验结果表明,微角度传感器的体积可达到 $25 \times 20 \times 13 \text{ mm}^3$,角度测量范围 $\pm 1\ 200 \text{ arcsec}$,分辨率为 0.1 arcsec 。实验中利用激光自准直仪进行对照,有效验证了这种新型二维光学自准直微角度传感器的可行性。

关键词:微角度传感器;自准直;测量;二维

中图分类号:TH741.2;TP212.14

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2010)12-0023-04

2D micro-angle sensor based on laser autocollimation

LIAN Meng-dong, JIN Wei-feng, JU Bing-feng

(The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problems of measuring surface micro-profile and online measurement of precision platform, a compact two-dimensional micro-angle sensor was designed. The sensor based on the principle of laser autocollimation, was consisted of a laser diode as a light source and a quadrant photodiode as a position-sensing device. The sensitivity of the angle sensor does not rely on the focal length of the objective lens, which makes it probable to realize the compact volume. The quadrant photodiode has two-dimensional position-detecting capability, therefore, the angle sensor can detect two-axis tilt simultaneously. The micro-angle sensor has a dimension of $25 \times 20 \times 13 \text{ mm}^3$. The detection range is $\pm 1\ 200 \text{ arcsec}$ and the resolution is 0.1 arcsec . Comparison experiments with an autocollimator were carried out, which testified the validity of the new compact 2D micro-angle sensor.

Key words: micro-angle sensor; laser autocollimation; measurement; two-dimensional

0 引言

角度测量是几何量计量技术的重要组成部分,广泛应用于工业、军事、航空航天以及通讯等各领域。随着现代工业及生产制造技术的飞速发展,生产加工技术已经从精密加工时代进入了超精密加工时代^[1],与之相应的测量技术也从精密测量发展到超精密测量和纳米测量,因而对角度测量技术水平和测量准确度也提出了新的要求。

光学测角技术随着激光光源、光电材料和器件的发展而迅速发展起来。光学测角法比一般的机械和电磁方法有更高的精度,更容易实现细分和测量过程的自动化,而且具有测量准确度高和非接触测量的特点,因此在角度测量中得到了越来越广泛的应用。

国内外运用的光学测角法主要有光学自准直法、光学内反射法、激光干涉法、环形激光法等。这些测量方法中尤其以激光干涉测角技术为主,该方法的最大优点是测量精度高,小角度测量已经达到了极高的准

确度。目前应用比较广泛的小角度测量仪器如激光干涉仪或自准直仪,虽然能提供较高的测量精度,但基于此设计的测量系统结构比较复杂、体积较大,因而在实际工业应用中具有较大的局限性,特别是很难与精密平台结合用于在线测量^[24]。因此,开发体积小、测量精度和分辨率高、稳定性好的非接触式微角度测量方法以满足在线实时测量的要求十分必要。

本研究介绍了一种基于激光自准直原理的新型二维微角度传感器。该微角度传感器利用激光二极管作为光源,以高灵敏度的四象限光电二极管作为位置探测器。使用较短焦距的物镜,开发了一个体积小、结构简单、灵敏度高,测量范围大的二维微角度传感器。该微角度传感器的体积为 $25 \times 20 \times 13 \text{ mm}^3$,测量范围为 $\pm 1\ 200 \text{ arcsec}$,分辨率为 0.1 arcsec 。

1 微角度测量原理

1.1 激光自准直原理

该微小角度传感器基于激光自准直原理进行角度测量,其几何光学原理如图 1 所示,当入射光转过角度 $\Delta\theta_x$,光电探测器上光斑的位置相应改变 d_y 。当转动很小时,角度和位移之间有如下关系^[5]:

$$\Delta\theta_x = \arctan\left(\frac{d_y}{f}\right) \approx \frac{d_y}{f} \quad (1)$$

因此,通过检测光电探测器上光斑位置的变化就可以计算出入射光转过的角度。

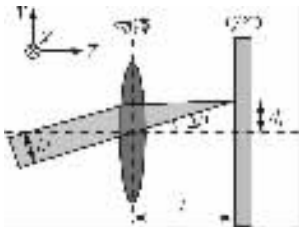


图 1 角度测量原理图

1.2 QPD 工作原理及背景光干扰的消除

此研究采用四象限光电二极管 (QPD) 作为位置探测器, QPD 具有二维位置探测的能力,而且相对于传统的位置探测器,它的灵敏度更高。如图 2 所示,假设 QPD 各象限区域之间没有间隙,当激光照射到 QPD 上时,4 个象限产生的输出电流分别为: I_A, I_B, I_C, I_D , 正比于照射在各个象限中光斑的面积。QPD 的输出 ($X_{\text{out}}, Y_{\text{out}}$) 可以表示为^[6]:

$$X_{\text{out}} = \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \quad (2)$$

$$Y_{\text{out}} = \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \quad (3)$$

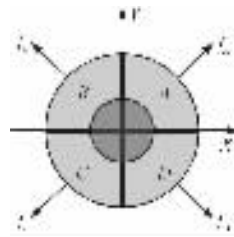


图 2 QPD 上光斑分布

QPD 是光敏器件,测量时环境中背景光的存在会影响输出,使测量可靠性下降。一般背景光可分为覆盖整个 QPD 接收面的稳定漫反射背景光、周期性背景光和集中型背景光等。一般对于稳定的背景光干扰,通常采用在接收面前加与光源波长匹配的滤光片的方法来滤掉大部分的背景光^[7]。

在实验中, QPD 接收面前放置一片与激光波长相匹配的滤波片,滤波片中心波长 635 nm ,半波带宽 4.3 nm ,峰值透过率为 72% 。实验结果表明,在稳定的工作背景中,背景光对系统检测精度影响完全可以忽略。

1.3 传感器的灵敏度

光束倾角变化导致光斑位置变化的示意图如图 3 所示。假设激光束遵循高斯分布, QPD 上光斑半径为^[8]:

$$d_0 = \frac{1.22f\lambda}{D} \quad (4)$$

式中 D —入射光的直径; f —物镜的焦距; λ —光波波长。

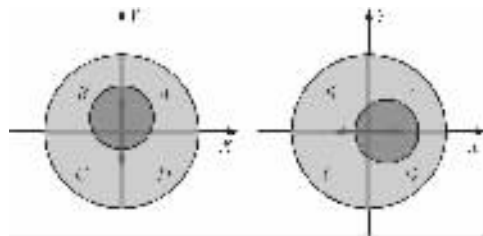


图 3 QPD 上光斑位置变化

由于四象限光电二极管 4 个象限输出电流值正比于照射在上面的光斑的大小。由式 (1) ~ 式 (4) 可以得到 QPD 的输出还可以表示为:

$$X_{\text{out}} = \frac{4d_x}{\pi d_0} = k \frac{D\Delta\theta_y}{\lambda} \quad (5)$$

$$Y_{\text{out}} = \frac{4d_y}{\pi d_0} = k \frac{D\Delta\theta_x}{\lambda} \quad (6)$$

可以看到, QPD 的输出正比于光束倾角的变化,

其中 k 为常数,因此实现了微角度测量的功能。

角度传感器的灵敏度 S 可以用传感器的输出对入射角的百分比表示:

$$S = \frac{X_{\text{out}}}{\Delta\theta_Y} = \frac{Y_{\text{out}}}{\Delta\theta_X} = \frac{D}{\lambda} \times 100\% \tag{7}$$

可见,灵敏度只是跟入射光的直径和波长有关,而跟物镜的焦距无关^[9]。因此,可以利用这个特点来开发一种灵敏度高而且简单轻便的角度传感器。

2 角度传感器设计

二维微角度传感器的结构图如图 4 所示。半导体激光二极管发出的偏振光经准直后变为平行光,然后经偏振分光棱镜(PBS)、1/4 波片变成圆偏振光后,入射到平面反射镜上。反射光沿原路返回,经 1/4 波片后圆偏振光变为线偏振光入射到偏振分光棱镜上,该光不再返回激光二极管,而是由分光棱镜反射后,通过物镜成像在四象限光电探测器上。在此结构中,PBS 和 1/4 波片结合作为光隔离器,防止反射光返回到激光二极管,从而得到稳定的输出^[10]。

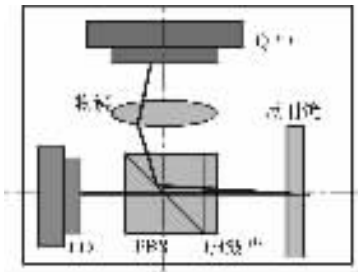


图 4 微角度传感器的结构图

当反射镜转动时,反射光线在四象限光电探测器上的光斑位置发生变化,根据位移与探测器到被测物间的距离之比,便可得到物体的转动角度。角度传感器中元件参数如表 1 所示,其体积为 $25 \times 20 \times 13 \text{ mm}$ 。

表 1 微角度传感器元件参数

LD	入射	物镜	QPD	
			有效面积	象限间隙
输出功率	光波长	焦距		
3 mW	635 nm	20 mm	20 mm^2	$34 \text{ }\mu\text{m}$

3 测量系统设计

3.1 测量系统硬件组成

系统的硬件主要包括半导体激光器、自准直光路部分、四象限光电探测器以及其信号调理电路、数据采集卡、计算机。

实验中采用的半导体激光器功率可调,从而更好地满足了实验要求。激光器发出的激光,经光路调理

后由 QPD 接收面接收。QPD 输出的电流信号进入信号处理电路,实现电流电压转换,信号放大、滤波及稳压。数据采集卡采集信号调理电路输出的稳定的电压信号,传入计算机进行数据处理和显示。

3.2 测量系统软件设计

本测试系统采用 LabVIEW 8.2,在 Windows XP 操作系统下编写。本研究充分利用了软件图形化编程特点,丰富的函数、数值分析能力以及信号处理的功能,从而满足了实验要求。

4 实 验

4.1 实验装置

为了检测该微角度传感器的性能,实验中利用自准直仪进行对照测试。实验装置的示意图如图 5 所示,包括微角度传感器,自准直仪和压电控制器驱动的镜架。自准直仪分辨率为 0.1 arcsec ,测量精度为 $\pm 0.25 \text{ arcsec}$,测量范围为 $\pm 1\,200 \text{ arcsec}$ 。镜架上安置有双面反射镜,可以同时或分别沿着 X 和 Y 两个轴向转动。实验中使用微角度传感器和自准直仪从反射镜两侧同时测量反射镜的转角。

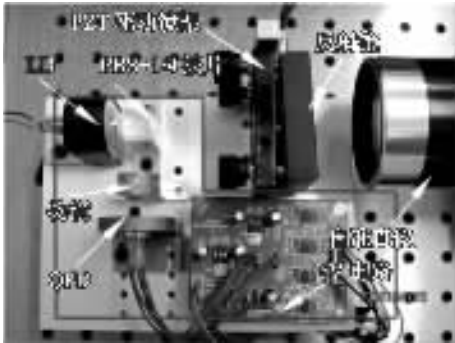


图 5 实验装置示意图

4.2 实验结果

通过微角度传感器和自准直仪对比测量得到的结果如图 6 ~ 图 8 所示(图中水平轴为自准直仪的输出角度值,单位为 arcsec ;竖直轴为微角度传感器的输出,如式(5)、式(6)定义)。实验测得角度传感器的测量范围可以达到 $\pm 1\,200 \text{ arcsec}$,当取 $\pm 600 \text{ arcsec}$ 作为传感器的有效测量范围时,可以得到线性很好的输出曲线,如图 6 所示。

如前所述,该角度传感器可以同时探测二维角度变化。压电控制器驱动镜架同时沿着 X 和 Y 两个轴向转动,微角度传感器和自准直仪的输出对照如表 2 所示。如图 7 所示,角度传感器在 X, Y 两个方向上的输出均具有良好的线性。

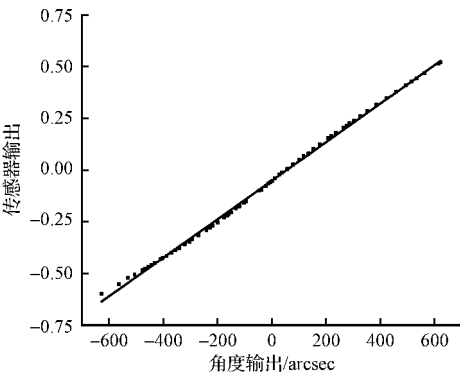
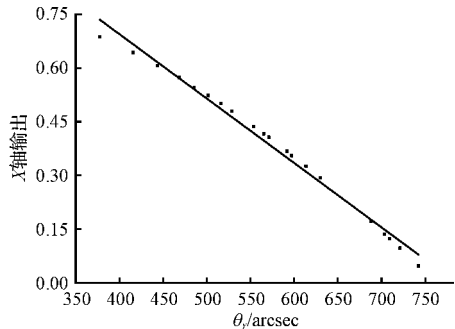


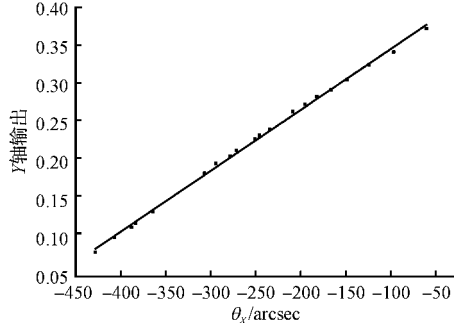
图 6 微角度传感器输出特性

表 2 微角度传感器二维输出

角度输出		QPD 输出	
$\Delta\theta_y$	$\Delta\theta_x$	X 轴输出	Y 轴输出
742.1	-428.5	0.045 970 3	0.082 493
721.2	-406.9	0.095 713 6	0.101 435
709.1	-383.5	0.122 297	0.120 019
688.1	-364.6	0.170 576	0.135 403
630.1	-307.4	0.292 03	0.185 548
613.6	-294.7	0.325 302	0.198 246
597.3	-278.6	0.354 869	0.207 456
591.9	-271.7	0.367 192	0.215 33
570.9	-250.8	0.406 418	0.229 942
565.1	-245.9	0.415 82	0.235 014
553.5	-234.5	0.436 358	0.242 826
528.7	-209.4	0.479 856	0.266 021
516.4	-195.4	0.500 787	0.275 507
501.5	-182.3	0.523 517	0.285 586
485.6	-166.6	0.544 309	0.294 374
468.5	-148.7	0.573 577	0.307 668
443.5	-124.2	0.607 157	0.327 164
415.7	-96.9	0.643 561	0.343 71
377.6	-60.5	0.688 198	0.374 253



(a) 角度传感器X方向输出



(b) 角度传感器Y方向输出

图 7 角度传感器二维输出

如图 8 所示,微角度传感器在小测量范围内也具有高精度和良好的线性度,它的分辨率可以达到 0.1 arcsec。由式(7)可以得到该角度传感器的灵敏度为 $S=0.546\%/arcsec$ 。

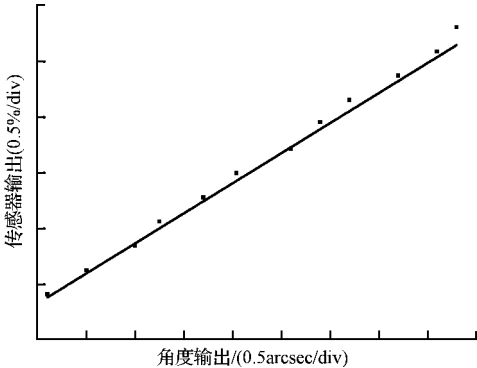


图 8 角度传感器分辨率测试结果

5 结束语

为实现微形貌测量和精密运动平台在线测量的要求,本研究提出了一种基于激光自准直原理的二维微角度传感器。介绍了微角度传感器的工作原理和系统结构,并利用自准直仪进行了对照实验,验证了其可行性。通过该研究,可以得到以下结论:

- (1) 通过分析可知,该微角度传感器的灵敏度与物镜焦距无关,因此可使用短焦距物镜来实现传感器的小体积。微角度传感器的体积为 $25\times20\times13\text{ mm}$,灵敏度可达到 $0.546\%/arcsec$ 。
- (2) 微角度传感器的测量范围为 $\pm1\ 200\text{ arcsec}$,在 $\pm600\text{ arcsec}$ 范围内输出线性度高,分辨率可达到 0.1 arcsec 。
- (3) 微角度传感器可以同时测量两个轴向的角度变化量,精度高且互不干扰。

参考文献 (References):

[1] 钱建强,惠 梅,王东生. 四象限光电探测器用于二维小角度测量的研究[J]. 仪器仪表学报,2002,23(3):538 – 540.

[2] GAO W, DEJIMA S, SHIMIZU Y, et al. Precision measurement of two axis positions and tilt motions using a surface encoder[J]. **Annals of the CIRP**, 2003, 52(1): 435 – 438.

[3] GAO W, TANO M, SATO S, et al. On-machine measurement of cylindrical surface with sinusoidal microstructures by an optical slope sensor[J]. **Precision Engineering**, 2006, 30(3): 274 – 279.

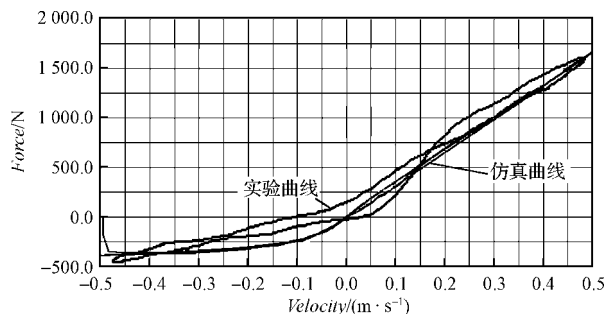


图 8 速度特性图对比

3.3 结论分析

从前面阻尼力数据对比表中可看到,仿真阻尼力和试验阻尼力的相对误差较小;同时仿真和试验示功图和速度特性图也可较好地吻合,说明所建模型较为准确,可以进行更深一步的仿真研究。但考虑到实际减振器工作情况的复杂性以及对减振器流通阀和复原阀建模避开了大挠度理论的复杂精确求解等问题,该模型仿真与试验存在一定误差。

4 结束语

减振器对整车系统的影响越来越重要,对减振器的各种研究也在不断的深入。本研究根据双筒液力减振器的结构和工作原理,对其核心元件环形节流阀片的变形用小挠度理论进行求解,同时使用能描述减振器内部结构的基本参数,建立减振器的数学模型,并根据减振器试验标准对模型进行仿真,阻尼力对比数据显示仿真数据与试验数据之间的误差在 10% 以内,同时仿真与实验阻尼力特性图能较好地吻合,证明建立

模型的准确性。运用该模型可进一步进行液力减振器的动态性能及其对车辆动力学性能影响^[10]的研究。

参考文献 (References):

- [1] 孙胜利. 位移相关减振器动力学建模及对车辆性能影响的研究[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2008.
- [2] CROLLA D. The Influence of Damper Properties on Vehicle Dynamic Behavior[C]. SAE Paper, 2002.
- [3] 吕振华, 李世民. 筒式液阻减振器动态特性模拟分析技术的发展[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(11): 30-37.
- [4] RICHARD V K. A new shock absorber model for use in vehicle system dynamics studies[J]. **Vehicle System Dynamics**, 2005, 43(9): 613-631.
- [5] 祁宏钟, 雷雨成. 某悬架减振器的精确建模及仿真[J]. 机械科学与技术, 2002(5): 714-716.
- [6] [作者不详]. 减振器匹配与设计[EB/OL]. [日期不详]. <http://www.docin.com/p-53911729.html>.
- [7] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [8] 张 伟. Easy5 从入门到进阶[DB]. 2005.
- [9] QC/T 545-1999, 汽车筒式减振器台架试验方法[S].
- [10] SIMMS A, CROLLA D. The Influence of Damper Properties on Vehicle Dynamic Behaviour[C]. SAE paper, 2002.
- [11] 郭志刚, 高东强. 新型陶瓷快速成型机的仿真设计[J]. 轻工机械, 2009(6): 16-19.
- [12] 贺 兵, 刘 扬, 刘建华. 基于 ADAMS 软件的啤酒瓶装箱机双回杆机构的运动仿真优化[J]. 轻工机械, 2008(5): 34-37.

[编辑: 柴福莉]

(上接第 26 页)

- [4] 李志刚, 刘庆纲. 光学内反射测角方法及其在精密测试中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2003, 39(6): 22-25.
- [5] MURATA K. Optics[M]. Saiensu-Sha, 1979.
- [6] YAMAGUCHI J. Measurement of straight motion accuracy using the improved sequential three-point method [J]. **JSPE**, 1993, 59(5): 773-800.
- [7] 周保玉, 陈培锋, 朱明珠, 等. 基于 PSD 的微小角度动态测量研究[J]. 仪器仪表与检测技术, 2005, 25(4): 59-61.

- [8] SAITO Y, GAO W, KIYONO S. A single lens micro-angle sensor[J]. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, 2007, 8(2): 14-19.
- [9] SAITO Y, GAO W, KIYONO S. A micro-angle sensor based on laser autocollimation[C]. Proc. of SPIE, 2005.
- [10] GAO W, HUANG P S, YAMADA T, et al. A compact and sensitive two-dimensional angle probe for flatness measurement of large silicon wafers[J]. **Precision Engineering**, 2002, 26(4): 396-404.

[编辑: 柴福莉]