

基于光斑跟踪系统的位敏传感器误差修正

帅红俊^{1,2}, 张 帅², 宋建涛², 张建华^{1,2}

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;

2. 上海大学 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072)

摘要: 位置敏感探测器(PSD)测量误差主要来自于自身非线性、干扰和安装倾斜的影响,且 PSD 的直接测量范围受限于探测器的尺寸。针对这些问题,分析了自身非线性、干扰和安装倾斜的影响原理,根据测量值与实际值的线性关系,提出利用伺服模组与 PSD 相结合的光斑跟踪系统来进行局部拟合实时校准的方法减小干扰影响并消除 PSD 安装倾斜误差,利用线性度较好的中间区域减小自身非线性影响。实验以 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PEN}$ 为样品,利用研制的光斑跟踪系统对上述方法进行的验证结果显示,线性相关系数维持在 $1\pm 0.0015/40\text{ mm}$ 之间,线性度标准误差减小到 $0.3\ \mu\text{m}/40\text{ mm}$ 以下,最大误差在 $16\ \mu\text{m}/40\text{ mm}$ 之内且测量范围也可增大到模组的行程 200 mm ,此方法简单有效、灵活实用,特别适用于光强度弱且多变和测试范围较大的场合。

关键词: 位置敏感探测器; 光斑跟踪系统; 杂光暗电流; 线性度

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0417002

Error corrections for position sensitive detector based on speckle tracking system

Shuai Hongjun^{1,2}, Zhang Shuai², Song Jiantao², Zhang Jianhua^{1,2}

(1. School of Mechatronics and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Key Laboratory of Advanced Display and System Applications, Ministry of Education, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The accuracy of position sensitive detector (PSD) is mainly affected by the non-linearity, interference and the installation tilt error, and the measurable range is limited by the size of the detector. Based on the analysis of the influencing mechanism of the non-linearity, the interference and the installation tilt error, a speckle tracking system was introduced to remove the influence by local fitting and real-time calibration according to the linear relationship between the actual value and the measured value. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PEN}$ sample was used to experimentally verify the designed spot tracking system platform. The results show that the linear correlation coefficient maintains in a range of 1 ± 0.0015 , the linearity standard error is reduced to $0.3\ \mu\text{m}/40\text{ mm}$, the maximum error is less than $16\ \mu\text{m}/40\text{ mm}$ and the measurable range can be increased to the stroke of the module, 200 mm in this work. This method is effective, flexible and practical for position detection applications especially under feeble light condition and for large measuring range.

Key words: position sensitive detector; speckle tracking system; stray light and dark current; linearity

收稿日期: 2015-08-25; 修订日期: 2015-09-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB655005); 上海市科学技术委员会项目(14XD1401800, 14DZ2280900)

作者简介: 帅红俊(1990-), 男, 硕士生, 主要从事光电机设计方面的研究。Email: hjsuai2013@163.com

导师简介: 张建华(1972-), 女, 教授, 主要从事光电器件及新型显示技术方面的研究。Email: jhzhang@oa.shu.edu.cn

0 引言

位置敏感探测器(PSD)作为一种光斑位置检测器件分辨率高、结构简单、可用于实时在线快速测量^[1],在各种测量领域其都有很好的应用前景^[2-3]。但其尺寸较小,大大限制了它的量程,通常将 PSD 与精密运动模组相结合来扩大其测量范围。并且,PSD 工作时会受到目标物以外的杂光及暗电流干扰,影响测量的精度和可靠性。在测量反射率较小且不均匀的表面微位移时,被检测光斑强度较小,测量误差甚至高达 10%以上^[4]。为此在系统设计中须考虑杂光及暗电流的干扰,加以减弱或消除。同时,PSD 自身的非线性及安装倾斜,也会给测量结果带来较大误差,使用中须进行校准。

非线性误差主要集中在 PSD 的边缘区域,校准方法有三坐标定位法、线性插值法、人工神经网络 BP 优化算法,要精准消除这种误差比较复杂繁琐^[5]。消除干扰电流的影响一般采用交流调制频率分离法^[6]或调零处理法^[7-8]。交流调制频率分离法需对光源进行高频调制,然后在 PSD 信号采集电路中用高通滤波的方法将杂光和暗电流引起的低频信号去除。这种方法虽然可以达到精度要求,但要求激光器可调制和后续处理电路的调制解调处理,不仅增大了工作量和成本还限制了激光器选用。调零处理法是在测量之前将输出电流调为零,但当暗电流或周围杂光变化较快较大时难以进行实时调零,不可避免地带入误差。而安装倾斜度,主要是通过测得倾斜度常数来校准。

文中通过分析自身非线性和干扰电流影响模式,提出利用光斑跟踪系统进行局部拟合^[9]实时校准的方法,在去除 PSD 干扰和安装倾斜影响的同时,减少非线性误差并增大 PSD 的测量范围。

1 PSD 误差特性分析

由于光斑跟踪系统使用的是 PSD 线性度较好的中间区域,间接地校准了 PSD 的线性度,所以不再对非线性误差进行校准,主要分析干扰及安装倾斜度的影响原理。

图 1 为 PSD 的结构示意图,对于大多数 PSD,暗电流可认为是均匀分布的。另外,对 PSD 这样的小光敏面区域,也可认为照射其上的杂光也是基本

均匀的^[10]。基于上述两种假设,可以认为干扰电流 I_d 是集中打在中心位置上的,PSD 位置坐标公式也可由公式(1)修正为公式(2)^[11]:

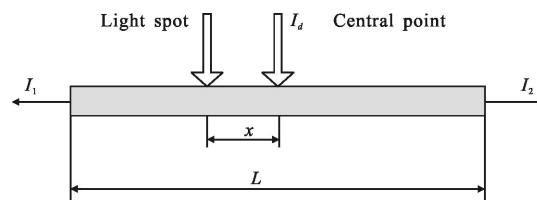


图 1 PSD 结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the PSD

$$x = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \times \frac{L}{2} \quad (1)$$

$$x = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2 + 2\nu I_d} \times \frac{L}{2} \quad (2)$$

式中: I_1 、 I_2 为光斑激发的电流; I_d 为杂光及暗电流共同引起的干扰电流; ν 为常数; L 为光电探测器的有效尺寸。

从公式(2)可以看出,光斑强度越小,干扰电流会相对越大,暗电流及杂光的影响将会越明显。当光斑激发的总电流(I_1+I_2)和干扰电流保持一定时,探测器上测量位置与实际位置的比值将保持一个定量 $C_0(I_1+I_2)/(I_1+I_2+2\nu I_d)$ 。但是,对一些表面不够均匀或反射率相差较大的被测物,其反射回来的光斑大小、强度均会产生变化,导致总电流变化较大,引起实际位置与测量位置比值的改变。而且当间隔时间较长时,周围环境也会变化较大,杂光和暗电流引起的干扰电流会产生明显的变化,这也将改变上述比值。若不进行实时校准,误差将随着被测物反射率的变化而变化,容易被当作随机误差处理。

PSD 的安装无法保证与运动模组绝对平行,这将导致测量值与真实值之间存在一定差异。但由图2

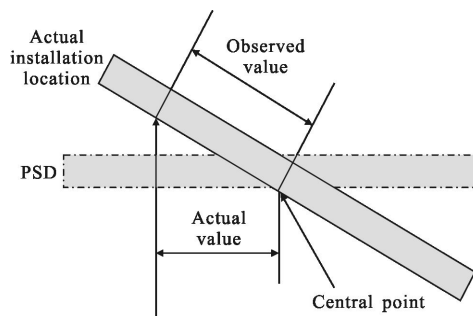


图 2 PSD 安装误差分析

Fig.2 Installation error analysis of PSD

可知,在只考虑安装倾斜误差时,测量值与实际值之间的比值是一个常数 C_1 ,PSD 安装完成时即已确定。

将干扰电流影响与安装倾斜度影响相结合,可得测量位置与实际位置的比值 $k=C_0*C_1$ 。

2 光斑跟踪系统误差修正

2.1 误差修正方法

由上述对干扰电流和安装倾斜影响的分析可知,当能够准确获得测量位置与实际位置的比值 k 时,就可使用 PSD 的测量值与比值 k 得到实际的光斑位置。根据此原理,使用光斑跟踪系统测得比值 k ,并进行光斑位置测量。

光斑跟踪系统的一个跟踪实时校准周期可以细分成以下几个步骤:

(1) 光斑在被测样品上从一点移动到另一点,由于被测样品形貌和反射率改变,将导致 PSD 上接收到的光斑发生偏移和光斑强度改变;

(2) PSD 上光斑从 A 点(PSD 测试位置 Z_0)偏移移到 B 点,此后认为光斑强度暂时不变,即总电流不变;

(3) 使用 PSD 探测器采集光斑当前位置 Z_1 ;

(4) 把 $-Z_1$ 设为伺服电机运动的距离,但需将此距离平分为 5 份(X_2, X_3, X_4, X_5, X_6),逐一向中心点方向运动,并且每次运动完成后记录下光斑在 PSD 上的位置(Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6);光斑跟踪流程示意图如图 3 所示。

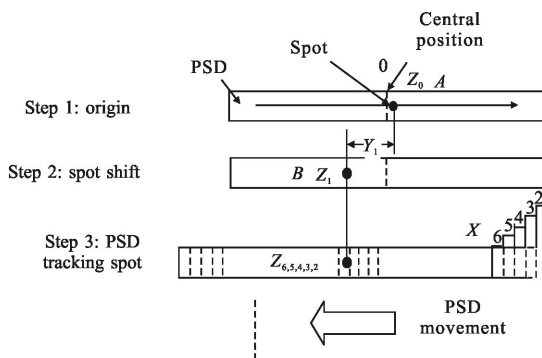


图 3 光斑跟踪流程示意图

Fig.3 Diagram of speckle tracking process

(5) 将 6 个位置上 PSD 测量数据和伺服电机反馈回来的位置数据采用最小二乘法进行拟合,得到斜率 k 。由于测量时间间隔较小,可忽略杂光及暗电流的变化,因此可保证该循环过程 k 是一个定值;

(6) 最后使用 $Y_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{k}$ 公式即可得到由该方法

测得的光斑实际偏移量 Y_1 。

此方法不仅能使光斑尽量落在线性度较好的中间地带,减小非线性误差,而且可间接扩大 PSD 的测量范围。虽然该方法会引入伺服运动模块的精度误差,但此误差相比于干扰电流及安装倾斜度的影响要小的多。

2.2 光斑跟踪系统设计

为保证在一个循环内 PSD 上光斑强度保持不变,选择激光功率较稳定的 HeNe 激光器(杭州谱镭光电,型号 SPL-HN8.0R,功率 8 mW)。考虑到测量精度和经常性启停正反转,选用台达 A2 系列伺服驱动器及与其配套的 400 W 伺服电机和上银 KK86 精密级模组(有效行程 200 mm,重复定位精度 $\pm 3 \mu\text{m}/\text{m}$, 导程 10 mm,行走平行度 $15 \mu\text{m}/\text{m}$,角摆影响可忽略),中间使用膜片联轴器降低震动影响。

如图 4 所示,将 PSD(上海欧光电子,型号 PSD100-SPB,二维 10 mm \times 10 mm,仅用一维)固定在运动模组

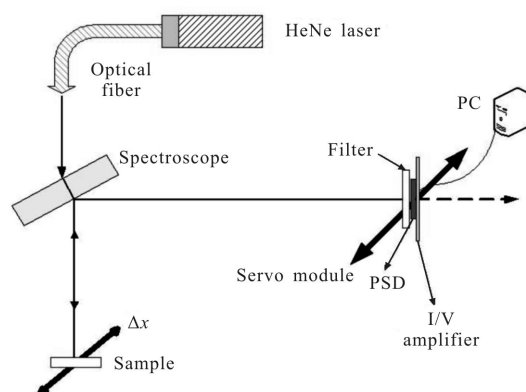


图 4 光斑跟踪系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of spot tracking system

上,并使 PSD 一边与模组运动方向平行。为减少周围杂光的影响,可在 PSD 前加上一个窄带滤光片。数据采集时,首先通过 I/V Amplifier 模块,将微弱的电流信号放大并转换为电压信号,可便于数据采集卡的采集。此处用 14 位的数据采集模组 USB-4704-AE,进行差分采集,采集到的数据在 LabVIEW 中使用虚拟低通滤波器进行处理,去除不稳定因素的影响,最后可得到光斑位置对应的电压值。由于电压值和电流值成正比,所以可以将电流

值对应的电压值带入公式(1)、(2)得到光斑的位置,然后通过 LabVIEW 发送运动指令到运动控制卡控制伺服运动模组的运动,这样,一个光斑跟踪系统便得以建立,如图 5 所示。

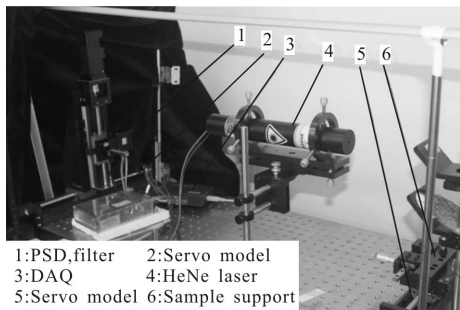


图 5 光斑跟踪系统实物图

Fig.5 Physical map of the spot tracking system

3 实验验证

柔性结构微弱变形的测量对其性能有着重要的影响^[12],文中选择其中的 $Al_2O_3/PEN(Al_2O_3$ 厚 100 nm, 采用原子层沉积法生长, PEN 厚 125 μm) 作为测量样品,其透明度较高,反射率约为 20%,再加上半透半反镜(透射:反射=1:1)损耗的 75%以上的功率,即使采用 8 mW 功率 HeNe 激光器,最后反射回来的光斑强度也很微弱,因此周围杂光及暗电流的影响将很显著。

如图 6 所示,先在样品上选取 4 个不同的位置点(每个位置反射率不同),在每个位置处用校准和未校准两种方法对 PSD 进行线性测试。实验中忽略了伺服运动模组定位误差,使用伺服运动模组相对于 PSD 的精准位移来代替光斑位置的真正移动。校准之前量程较小,所以让伺服运动模组每运动 0.2 mm 记录下 PSD 上光斑的位置。校准后量程受限于模组轨道长度,为了模拟光斑的漂移,由 LabVIEW 来控制,让模组随机运动 0~1 mm,然后记录下模组运动距离和 PSD 测量位置。最后用最小二乘法对得到的结果进行拟合,并分析其线性度误差。

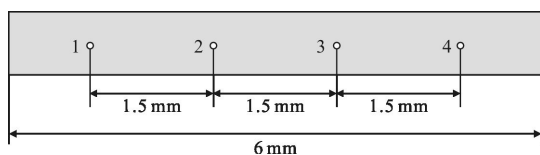


图 6 样品中 4 个位置分布

Fig.6 Four positions in a sample

另外,在黑暗的环境中,将激光器直接打到 PSD 上,总电压为 4.83 V,信噪比较大,可忽略干扰电流的影响,此时测出的线性系数 C_1 为 1.011 5,即为 PSD 安装倾斜影响程度,在整个实验中为常数。

如图 7 和表 1 所示,4 个位置在校准之前均呈线性关系,验证了在干扰电流和总激发电流一定时,测量值与实际值的比值是一个定量 k (包含的 C_1 为常数,所以不再讨论倾斜误差)。线性相关系数随总电压的减小而减小,如位置 4,总电压为 0.20 V 左右时,线性相关系数只有 0.923 6,误差达 0.76 mm/cm。而在线性校准之后,不论总电压大小,线性相关系数均保持在 $1 \pm 0.001 5$ 之间,实际值与测量值几乎相同,达到了去除干扰及安装倾斜度影响的效果。

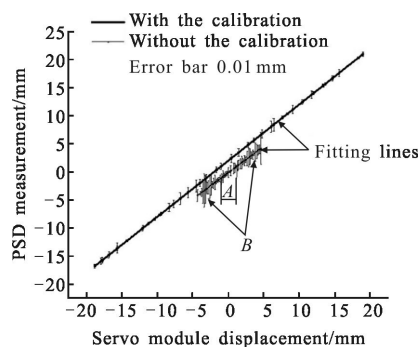


图 7 位置 4 处实际位置与测量位置线性拟合

Fig.7 Linear fitting of the actual position and measurement position at position 4

此外,校准之后 PSD 可测范围不再受限于传感器尺寸(10 mm),而是受限于导轨的行程(此处为 200 mm)。

由图 7 及表 1 也可看出,校准前中间 A 区的标准误差小于边缘 B 区,且校准后的标准误差与 A 区相当。校准之后的最大误差可控制在 16 $\mu m/40$ mm 之内,线性度标准误差也均减小至 0.3 $\mu m/40$ mm 以内。由此说明伺服运动模组所带来的定位误差并未过多影响到线性度,且由于使用了 PSD 线性度较好的中间区域和局部拟合校准,使整个量程范围内的非线性误差有所减小,提高了 PSD 测量精度和可靠性。

接下来对 PSD 进行重复定位精度的验证,以保证上述实验数据的可信度。选择上述实验样品的位置 4,直接将 PSD 测量值除以 0.9236 进行校准。使伺服模组分别位移到 1、2、3、4、5 处,记录下伺服模

表 1 线性测试结果

Tab.1 Results of the linear test

Position	Total voltage/V	Slope		Maximum error(Range/mm)		Standard error	
		Without calibration	With calibration	Without calibration	With calibration	Without calibration	With calibration
1	0.30-0.32	0.950 8	1.001 3	0.036(8)	0.016(40)	0.000 83	0.000 10
2	0.93-0.98	0.976 5	0.999 7	0.032(8)	0.008(40)	0.000 58	0.000 08
3	0.63-0.66	0.968 9	1.000 8	0.050(8)	0.015(40)	0.009 60	0.000 28
4	0.19-0.21	0.923 6	0.999 4	0.030(8)	0.011(40)	0.000 27	0.000 11

组的位置和 PSD 的测量值再校准, 如此重复 4 次, 其数据如表 2 所示。可以看出, 2、4 点处伺服模组与 PSD 测量值之间存在 8 μm、13 μm 左右的误差, 这主要是由 PSD 线性误差引起的, 也证明中间区域线性度更好。此外, 先假设模组无重复定位误差, 则 PSD 重复定位精度在 3 μm/4 mm 之内, 加上模组的重复定位误差 ±3 μm, 可知合成重复定位误差在 ±6 μm 之内, 对上述实验结果的影响可以忽略, 表明数据采集和处理的的有效性和光斑跟踪实时校准方法的可行性。

表 2 伺服运动模组及 PSD 重复定位精度测试
Tab.2 Test of repositioning precision for servo module and PSD

Point	Servo 1-3/mm	PSD1 /mm	PSD2 /mm	PSD3 /mm	PSD4 /mm
1	(0.002, 0.003)	0.004	0.003	0.004	0.004
2	(2.000, 2.001)	2.008	2.008	2.009	2.008
3	(-1.999, -2.000)	-2.006	-2.004	-2.004	-2.004
4	(3.991, 3.992)	4.005	4.003	4.003	4.004
5	(-3.989, -3.990)	-4.002	-4.000	-4.001	-4.001

4 结 论

文中对 PSD 误差的修正主要集中于干扰和安装倾斜影响的去除, 对非线性误差则是通过使用线性度较好的中间区域来间接减少其影响, 相对其他方法更加方便实用。

干扰对 PSD 精度的影响一直存在, 光斑较强时可忽略, 但当光斑较弱时其激发出的电流与干扰电流相差不大, 信噪比小, 在测量时则需去除。文中研

究了干扰的影响模式与线性特性, 结合光斑跟踪系统获得各测量点的校准系数, 通过对测量结果进行校准以去除干扰的影响。采用该方法不仅有效去除了干扰和安装倾斜的影响, 同时也大幅增大了 PSD 测量范围, 减小了非线性误差。

参 考 文 献:

- [1] Schössler S, Bromberger B, Brandis M, et al. Time and position sensitive single photon detector for scintillator read-out[J]. *Journal of Instrumentation*, 2012, 7(2): C02048.
- [2] Urbain X, Bech D, Van Roy J P, et al. A zero dead-time multi-particle time and position sensitive detector based on correlation between brightness and amplitude [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(2): 023305.
- [3] Cheng Jiwei, Gong Mali, Jia Weipu, et al. Deflection angle measurement system using PSD for a 2 DOF laser scanner [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(1): 57-60. (in Chinese)
程继伟, 巩马理, 贾维溥, 等. 基于 PSD 的二维定心激光扫描器摆角测量系统 [J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(1): 57-60.
- [4] Zhang Ming, Liang Yanbin. Experiment on two dimensional quadrilateral position sensing detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 459-464. (in Chinese)
张敏, 梁雁冰. 二维四边形位置敏感探测器实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 459-464.
- [5] Cui S, Soh Y C. Linearity indices and linearity improvement of 2-d tetralateral position-sensitive detector [J]. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 2010, 57(9): 2310-2316.
- [6] Guanghui W, Shum P, Guoliang X, et al. Position detection improvement of position sensitive detector (psd) by using analog and digital signal processing [C]//Information,

- Communications & Signal Processing, 2007 6th International Conference on. IEEE, 2007: 1-4.
- [7] Wang Guangzhi, Ding Haishu. Light disturbance to position sensitive detectors—pattern and methods to overcome it [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1997, 37(1): 61-64. (in Chinese)
王广志, 丁海曙. 位置敏感器件(PSD)的杂光干扰研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1997, 37(1): 61-64.
- [8] Duan Jie, Zhang Xiangyan, Cai Jinghai, et al. Applications research to PSD in the laser displacement detecting system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 281-284. (in Chinese)
段洁, 孙向阳, 蔡敬海, 等. PSD 在激光位移检测系统中的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 281-284.
- [9] Tian Long, Liu Zongtian. Least-squares Method Piecewise Linear Fitting [J]. *Computer Science*, 2012, 39(B06): 482-484. (in Chinese)
- 田垅, 刘宗田. 最小二乘法分段直线拟合 [J]. 计算机科学, 2012, 39(B06): 482-484.
- [10] Song Dianyou. Research and application on technology of precise PSD micro-displacement online measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
宋殿友. 精密 PSD 微位移在线测量技术的研究与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [11] Zeng Xianyang, Zhang Zhiliang. A system measuring micro vibration in weak reflection based on PSD and laser triangulation method [J]. *Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences)*, 2009, 32(3): 298-302. (in Chinese)
曾宪阳, 张志良. PSD 激光三角法弱反射微振动测量系统 [J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2009, 32(3): 298-302.
- [12] Chung I J, Kang I B. Flexible display technology-opportunity and challenges to new business application [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2009, 507(1): 1-17.