

文章编号: 1001-3806(2014)06-0830-05

位置敏感探测器测量准确度的研究

杨淑连, 宿元斌, 何建廷, 魏芹芹, 盛翠霞, 申 晋
(山东理工大学 电气与电子工程学院, 淄博 255049)

摘要: 为了研究噪声光对位置敏感探测器测量准确度的影响, 首先对3种噪声光进行了描述, 然后运用方差分析法建立了位置敏感探测器测量准确度的数学模型, 并对系统的误差进行了分析。结果表明, 实验数据和计算数据是一致的, 此实验结果证明了该数学模型的正确性。

关键词: 探测器; 横向光电效应; 背景光; 测量准确度

中图分类号: TL816+.5 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.06.023

Study of measurement accuracy of position sensitive detectors

YANG Shulian, SU Yuanbin, HE Jianting, WEI Qinqin, SHENG Cui Xia, SHEN Jin

(School of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In order to study the effect of stray noise on measurement accuracy of a position sensitive detector (PSD), three kinds of the stray noise was described firstly. Then the mathematical model of measurement accuracy of PSD was built by using the method of variance analysis. The error of the system was analyzed. The results show the experimental data is consistent with the calculation data and the mathematical model is valid.

Key words: detectors; lateral photo-electronic effect; background light; measurement accuracy

引言

在自动化工业生产中, 光电位置敏感探测器 (position sensitive detector, PSD) 被广泛用于和其它光源共存的环境中, 在这样的环境中, PSD 直接或间接地受到噪声光的影响, 这些噪声光可能是来自各个表面的散射光和反射光等^[1-3]。这些随机的噪声光源包括定向的光源 (点光源或扩展的光源), 它们以不同的空间分布照射在探测器的表面。这些直射或反射光与信号光同时照射在探测器的表面时, 就会对探测器产生不良的影响^[4-7]。因此, PSD 的响应就不可避免地受到这些噪声光的干扰。本文中针对各种外部噪声光源对 PSD 的影响建立模型, 并对噪声光对 PSD 准确度的影响进行分析。

1 无噪声光时 PSD 的测量准确度

PSD 一般分为 1 维和 2 维两种形式, 1 维和 2 维 PSD 的基本原理是一样的, 即基于半导体的横向光电效应。PSD 正是基于该特性实现了对目标位置的测量。为了简化问题, 仅讨论 1 维情形。根据 1 维 PSD 的等效电路, 设坐标原点在器件的中心点, 则在 x 轴上光点的距离为^[8]:

$$P_x = \frac{L}{2} \left(\frac{i_2 - i_1}{i_2 + i_1} \right) \quad (1)$$

式中, i_1, i_2 分别为两个电极的光电流, L 为两个电极之间的距离。

PSD 的位置精度定义为 PSD 能够分辨的最小位移, 而准确度是 PSD 的输出位置相对于实际光束位置的接近程度。PSD 的位置精度和测量准确度是传感系统的重要特性, 噪声光束的出现和信噪比的衰减严重地影响了这些参量。类似地, 外部照明噪声的出现影响了整个测量系统的准确度。

影响 PSD 的测量准确度的因素包括内部因素和外部因素。由内部因素引起的光点位置不确定度可以由斑点噪声和热噪声表示。在测量系统中, 影

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (2010FM005)

作者简介: 杨淑连 (1963-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事光电检测、光纤传感等方面的研究。

E-mail: yangsl21cn@163.com

收稿日期: 2013-10-22; 收到修改稿日期: 2013-11-22

响 PSD 性能和测量准确度的是外部因素,因为不容易从实际光点位置信息中把它们分离出来^[9-10]。

2 有噪声光时 PSD 的测量准确度

2.1 噪声光

在实际的光学系统中,第 1 种外部噪声光是背景辐射,它可能有不同的来源、不同的形状和特性。这主要包括环境照明光、太阳光和其它激光源,这些光源是 PSD 性能起伏和影响其测量准确度的主要因素。

根据普朗克定律,背景照明的平均功率为:

$$\bar{P}_b = \int_{\Delta\nu} \frac{\Omega}{16\pi} AI(\nu) d\nu \quad (2)$$

式中, $I(\nu)$ 是频率为 ν 时的光强, A 为照射面积, Ω 为相关的立体角。当光强较小时,它们的影响可以忽略。

当光束照射到 PSD 表面时,输出的电流为 $i_j = i_j(I_s, x_s, y_s)$, $j=1,2,3,4$ 。其中 I_s 是照射到 PSD 表面的光强度, x_s 和 y_s 是照射到 PSD 表面的光束的中心位置。类似的,当噪声光束也照射到 PSD 的表面时,其输出电流为 $i'_j = i'_j(I_n, x_n, y_n)$, $j=1,2,3,4$ 。其中 I_n 是噪声的强度, x_n 和 y_n 是照射到 PSD 表面的噪声光束的中心位置。如图 1 所示。

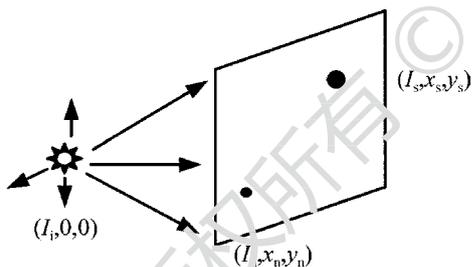


Fig. 1 Signal, noise and background beam on the PSD surface

第 2 种类型的噪声光包括点光源、扩展光源或漫反射等,它们的特点是光线照射到 PSD 的整个表面。尽管由于强度的变化以及入射角度的不同,可能使其形心偏离中心位置。但是,作者只分析比较简单的情况,即把它们近似地看作是一个覆盖整个 PSD 表面的较宽的“点”,并且形心在 PSD 的中心。因此, $i'_j = i'_j(I_i, 0, 0)$, $j=1,2,3,4$ 。其中 I_i 是干扰照明光强度, $(0,0)$ 是 PSD 表面噪声光形心的中心位置。

第 3 种类型的噪声光是脉冲光,其以脉冲串的形式照射在 PSD 的表面。尽管也是照射在探测器的某个特定区域,其特点是几乎覆盖整个面积的漫射照明。因此,输出电流为 $i'_j = i'_j(I_i, 0, 0, d)$, $j=1,$

2,3,4。其中 d 为照射到 PSD 表面的干扰脉冲的占空比。

2.2 测量准确度

为了计算由于噪声光引进的误差,需同时考虑噪声光和信号光入射到 PSD 表面的情况。如果只考虑信号光束入射到 PSD 表面,则信号光束形心的位置计算公式为:

$$P_s = \frac{L}{2} \left(\frac{i_2 - i_1}{i_2 + i_1} \right) \quad (3)$$

如果用噪声光束代替信号光束,则噪声光束的位置公式为:

$$P_n = \frac{L}{2} \left(\frac{i'_2 - i'_1}{i'_2 + i'_1} \right) \quad (4)$$

当噪声光和信号光同时入射到 PSD 表面时,其最终输出电流为两个电流的叠加。此时最后测量位置为:

$$P_m = \frac{L}{2} \left[\frac{(i_2 + i_2') - (i_1 + i_1')}{(i_2 + i_2') + (i_1 + i_1')} \right] = \frac{L}{2} \left[\frac{(i_2 - i_1) + (i_2' - i_1')}{(i_2 + i_1) + (i_2' + i_1')} \right] \quad (5)$$

在本系统中,通过各自的电流定义入射光信噪比为:

$$\frac{S}{N} = \frac{i_2 + i_1}{i_2' + i_1'} \quad (6)$$

此时测量位置为:

$$P_m = \frac{L}{2} \left\{ \frac{\frac{S}{N} [(i_2 - i_1) + (i_2' - i_1')]}{\left(\frac{S}{N} + 1 \right) (i_2 + i_1)} \right\} \quad (7)$$

(1) 当干扰噪声光束直接入射到 PSD 表面时,测量误差为:

$$\Delta P = P_m - P_s = \frac{L}{2} \left[\frac{\frac{S}{N} (i_2' - i_1') - (i_2 - i_1)}{(S/N + 1) (i_2 + i_1)} \right] = \frac{1}{\frac{S}{N} + 1} (P_n - P_s) \quad (8)$$

当噪声光束和信号光束同时照射在 PSD 的表面,且在 PSD 探测表面的相对边缘有独立的极大值时,误差最小或为 0。因此,当 $S/N \gg 1$ 时,最大测量误差为:

$$\Delta P_{\max} = \frac{1}{\frac{S}{N} + 1} (P_n - P_s) \Big|_{\max} = \frac{L}{\frac{S}{N} + 1} \approx \frac{L}{N} \quad (9)$$

可见,由于噪声光束引起的最大误差等于探测面积的长度与 PSD 上的信噪比的比。

(2) 当 1 个点光源或扩散光源照射在 PSD 的整个表面上时,它的形心可以放在 PSD 的中心。当 $S/N \gg 1$ 时,测量位置的最大误差为:

$$\Delta P_{\max} = \frac{1}{\frac{S}{N} + 1} (-P_s) \Big|_{\max} = \frac{L}{2\left(\frac{S}{N} + 1\right)} \approx \frac{L}{2S/N} \quad (10)$$

(3) 最后一种情况是脉冲光以脉冲串的形式照射在 PSD 的表面。当噪声的强度很小时,即 $I_n \ll I_s$ 或者 $S/N \gg 1$ 时,(10)式变为:

$$\Delta P_{\max} = \frac{1}{\frac{S}{N} \times d + 1} (-P_s) \Big|_{\max} \approx \frac{1}{\frac{S}{N} + 1} \times d(-P_s) \Big|_{\max} = \frac{d \times L}{2\left(\frac{S}{N} + 1\right)} \approx \frac{d \times L}{2S/N} \quad (11)$$

式中, d 为照射到 PSD 表面的干扰脉冲的占空比。

3 实验装置

噪声对位置测量准确度影响的实验装置框图如图 2 所示^[7]。入射光源是 LD 抽运全固态绿色激光器 TYPE-532L,辐射波长为 532nm,输出功率可达到 30mW,工作在 TEM₀₀ 模式,束腰半径为 2.0mm,全发散角为 1.5mrad,谱线宽度为 0.1nm。位置敏感探测器选用的是滨松公司的 S1300 型双面结构的 2 维 PSD,该 PSD 有效光敏区为 13mm × 13mm,当测量范围在 ±2.5mm 以内时,最大误差为 ±150μm,典型值为 ±80μm;当测量范围在 ±5mm(60%有效光敏区)以内时,最大误差为 ±250μm,典型值为 ±150μm。伴有噪声光的入射光通过光学系统聚焦后,照射到 PSD 表面上。PSD 的输出信号经过 I/V 转换和放大电路把电流信号转换成电压信号,并进行放大;然

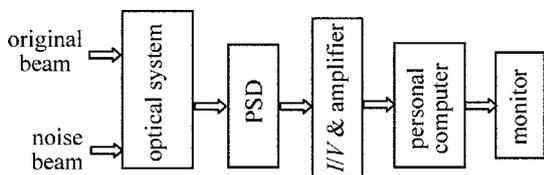


Fig. 2 Experimental setup of the system

后,将该电压信号送入内部的 A/D 转换板进行处理;最后,将结果显示出来。

4 实验结果及讨论

4.1 实验结果

为了计算第 1 种噪声的影响,首先把信号光束始终照射到 PSD 表面的中心,然后把噪声光源的零位置调整到 PSD 的中心,并在 x 方向扫描过 PSD 表面的校准区域。在 PSD 表面上每隔 1mm,噪声光照射一次。第 1 束噪声光强度约为信号光强度的 10%,第 2 束噪声光强度约为信号光强度的 5%。从(8)式中计算带有干扰的位置输出的差,并和实验数据进行比较, x 方向各个位置实验值偏离计算值的百分比误差 e 如图 3 所示,其中“*”对应噪声光强度约为信号光强度的 10%，“+”对应噪声光强度约为信号光强度的 5%。从图上可以看出,位置输出的计算结果和实验结果是一致的。在全量程 4000μm(-2000μm ~ +2000μm)内两组数据的最大的误差约为 5.58%。

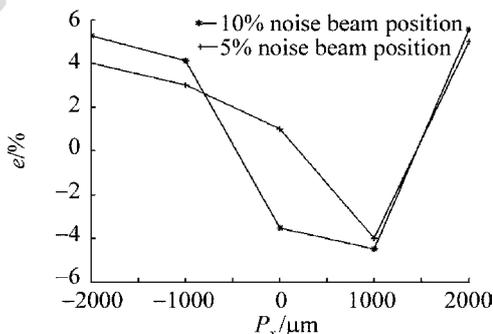


Fig. 3 Percent experimental error of signal beam vs. noise beam position

对于杂散光照明,它在 PSD 表面上不是形成一个点,而是覆盖了 PSD 的整个面积。在实验中,通过多束室内光形成这种类型的光源。在 x 方向,信号光照射在 PSD 表面的两端,即在 -2.50mm 和 +2.50mm 处。测量时杂散光照明强度约为信号强度的 5% 和 10%。在杂散光照明的情况下,把两个实验数据和由(10)式计算得到的位置输出的差进行了比较。 x 方向各个位置实验值偏离计算值的百分比误差 e 如图 4 所示。其中“*”对应噪声光强度约为信号光强度的 10%，“+”对应噪声光强度约为信号光强度的 5%。从图上可以看到,实验数据和计算数据是一致的。在这些点中,最大误差约为全量程读数的 5.78%。

对于模拟脉冲,噪声光束以频率 1.0kHz, 占空

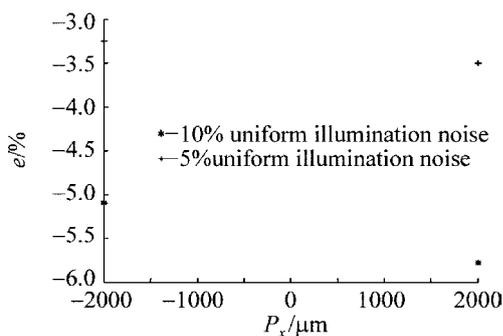


Fig. 4 Percent experimental error of signal beam vs. background noise beam

比为 50% 被调制。然后把它照射在 PSD 探测面积的中心。信号光束照射到 PSD 校准面积的一端。测量时调制噪声强度约为信号强度 5% 和 10% 的强度进行。在干扰脉冲光照明情况下,实验测量的两组数据与从(11)式计算得到的位置输出进行了比较, x 方向各个位置实验值偏离计算值的百分比误差 e 如图 5 所示。其中“*”对应噪声光强度约为信号光强度的 10%，“+”对应噪声光强度约为信号光强度的 5%。从图中可以看到,计算值和实验结果基本一致。中心数据点的最大误差约为全量程读数的 4.25%。

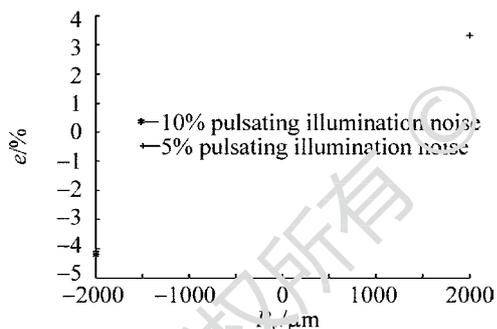


Fig. 5 Percent experimental error of signal beam vs. pulsating noise beam

4.2 系统误差

(1) 由实验曲线可以看出,正光束的位置数据有负的偏差,而负光束的位置数据有正的偏差,或者说两种情况的实验数据偏向 PSD 的中心;这主要是由于环境光集中于 PSD 中心的缘故。根据叠加定律,当噪声光束照射在 PSD 的边缘时,在净位置输出中将会出现偏差。

(2) 第 2 个系统误差是探头的物理结构引起的。在测量过程中,假设散射光照明的影响集中在 PSD 的中心,但实际上它不可能是这样,因为来自探测器自身的反射光,如果以一定角度照射,会引起照明形心的偏移。对于不同入射角度 θ 的入射光,得

到入射光形心位置数据。其曲线如图 6 所示。从图上可以看到,当 PSD 沿轴旋转时,探测体的部分反射光偏移了照明形心。旋转角度越大,形心偏移也越大,这是由于部分探测体遮挡了 PSD 的部分表面。在实际中,非均匀光分布或者光强的瞬时起伏也能引起照明形心的偏移。

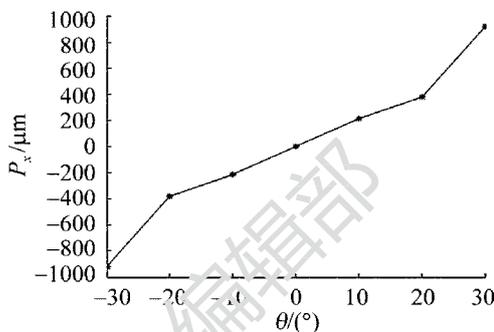


Fig. 6 Effect of illumination incident angle on measured position

(3) PSD 的另一个系统误差是由于 y 轴的位移影响了 x 轴的位置测量值。保持 x 轴的光束位置固定,光束沿 y 轴从 PSD 表面的一端扫描到另一端。测量值较大的误差出现在非常接近 PSD 表面的边缘。 x 方向各个位置实验值偏离计算值的百分比误差 e 如图 7 所示。从图上可以看到,实验数据和计算数据是一致的。在这些点中,最大误差约为全量程读数的 0.98%。

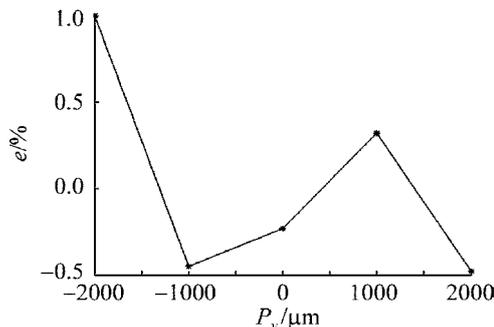


Fig. 7 Effect of y -displacement on x -displacement measurement

5 结论

从理论上对噪声光对 PSD 测量准确度的影响进行了分析并建立了数学模型,得到了杂散光对 PSD 的测量准确度的影响,实验结果验证了该模型的正确性。最后,对测量系统的系统误差进行了分析。

参考文献

[1] LIU Y, ZHAO M R, SONG L, *et al.* Noise reduction method for PSD in the range-finding circuit[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42 (9):1026-1030 (in Chinese).

- [2] HUANG Zh H, LI X D, CAI H Y, *et al.* The research of light-spot position measurement technology under strong background based on PSD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(10):89-94 (in Chinese).
- [3] LI B, GAO Y, WANG H P, *et al.* Linearization method and experimental research of the high-precision PSD[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 36(1/2):37-39 (in Chinese).
- [4] ZHANG T T, YAO E T, JIA J T. Study on effect of laser shape and incident angle on PSD location [J]. *Computation & Measurement Technologies*, 2012, 32(1):15-18 (in Chinese).
- [5] LI B, GAO Y, CAO G H, *et al.* Research of nonlinear correction method in shafting alignment test system based on PSD[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(3):300-302 (in Chinese).
- [6] YU H Y, ZHAO Zh P, LU Y H. Error measurement system of coaxiality for long-span holes based on PSD [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(2):70-73 (in Chinese).
- [7] LI T Z, ZHAO Y L, SHENG C X, *et al.* Study on characteristic and distortion of duo-lateral position sensitive detector [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2013, 35(2):181-184 (in Chinese).
- [8] WANG Q L, PAN H X, REN H F, *et al.* Design of measurement system for curvature of long tube based on PSD [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(1):108-111 (in Chinese).
- [9] WANG K, WANG J. Design and simulation of FSM system based on PSD[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2013, 28(2):76-79 (in Chinese).
- [10] CHEN J H, ZHANG J M, LÜ Y P. Design of position detector for alignment laser line based on the PSD[J]. *Measurement & Control Technologies*, 2012, 31(10):8-11 (in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©