

doi: 10.3788/gzxb20144304.0423004

光斑强度对光电位敏探测器测量准确度的影响

章鹏, 谭艾英, 陈伟民, 张益

(重庆大学 光电工程学院 光电技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 根据位敏探测器的理想定位模型及其信号处理方式, 建立了位敏探测器位移测量误差的数学模型, 以获得高准确度的位移测量. 所建模型显示系统的测量误差随光斑强度增大而减小, 随电噪音增大而增大. 为了验证理论模型的正确性, 以单颗红外发光二极管作为靶标光源, 用枕型位敏探测器及其测试电路板在暗室中搭建了实验系统, 分别在 9 组不同光斑强度下对 21 个位置点进行位移测量实验, 相邻两位置点的间距为 0.3 mm. 使用 MATLAB 的 CF TOOL 工具对每组测得位移值进行拟合, 以均方根误差作为准确度的评价指标, 结果表明: 位移实验的准确度值与模型计算的准确度值基本符合, 准确度随光斑强度变化的趋势完全一致.

关键词: 光源; 位移测量; 光电探测器; 测量误差; 光学系统

中图分类号: TN29

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0423004-5

Effect of Light Spot Intensity on Precision of Displacement Measurement Based on Position Sensitive Detector

ZHANG Peng, TAN Ai-ying, CHEN Wei-min, ZHANG Yi

(College of Opto-electronic Engineering, The Key Laboratory for Opto-electronic Technology & Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to obtain high-precision displacement measurement, a mathematical model for measurement deviation was constructed according to the ideal position model and signal processing methods of position sensitive detector. It indicated that the measurement deviation of system decreased with the increase of the light spot intensity, while increased with the increase of the electrical noise. A displacement measurement experiment was designed to verify the model. The experimental system included an infrared light-emitting diode and a pillow type position sensitive detector and its test circuit board. Displacement measurement experiments of 21 position points were carried out in nine different groups of spot intensities separately. The distance between every two position points each was 0.3 mm. Each group of displacement measurement data was fitted by using MATLAB CF TOOL tool, with root mean square error as a parameter evaluating the precision of position sensitive detector displacement measurement. The result shown that the precision value and its variation trends in the displacement experiment are consistent with that of model calculation.

Key words: Light source; Displacement measurement; Photoelectric detector; Measurement deviation; Optical system

OCIS Codes: 120.6650; 230.5160; 120.0120; 120.4820

0 引言

光电位敏感探测器 (Position Sensitive Detector, PSD) 是一种基于横向光电效应的连续型器件, 能够连

续探测光斑的位置^[1-2]. PSD 因具有分辨力高、后续信号处理简单、响应速度快等优点而广泛应用于各个领域, 如激光三角位移测量、结构变形测量、工件在线检测等^[3-7]. PSD 位移测量的应用方式主要分为两类: 一

第一作者: 章鹏(1970-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电探测及仪器. Email: zhangpeng@cqu.edu.cn

收稿日期: 2013-08-05; 录用日期: 2013-11-19

类是在被测物上安装靶标光源,靶标光源通过透镜在 PSD 上形成光斑,靶标光源随被测物发生移动,光斑也发生相应的移动,PSD 通过探测光斑的位置来反映被测物的位置;另一类是靶标光源固定不动,光源通过透镜在被测物上形成光斑,被测物发生移动时,光斑随之移动,PSD 探测光斑的位置即可反映被测物的位置.各应用形式中,系统的准确度主要取决于 PSD 探测光斑位置的准确度.

理论上,PSD 探测光斑的准确度可以达到微米量级,然而实际应用中,光斑的形状、大小、和强度都会对测量准确度造成影响^[8-10],其中光斑强度的影响极其严重.测量距离一定时,光斑的强度取决于靶标光源的光强,靶标光源太弱,到达 PSD 上光斑的强度有限,位移测量的准确度会受到影响;而增大靶标光源的强度,势必导致靶标光源的制作成本增加,靶标光源的尺寸增大而 PSD 位移测量的准确度降低^[8-10].因此在 PSD 位移测量中,光斑强度的确定极其关键.已有研究者就光斑强度对 PSD 位移测量存在影响的实验现象进行了分析^[11-14],并未涉及到光斑强度与测量误差的确切关系,无法根据准确度的要求,确定合适的光斑强度.本文从 PSD 定位原理和信号处理方式出发,建立光斑强度与 PSD 位移测量误差的数学模型,并进行了实验验证,为靶标光源设计中靶标光源强度的确定提供理论依据.

1 PSD 位移测量原理

二维 PSD 结构如图 1,入射光作用于 PSD 光敏面上形成光斑,光斑重心处产生与光能量成正比的光电流 i_p ,光电流在光敏面电阻层产生分流,各电极分流与光斑重心位置到各电极的阻抗成反比,而各阻抗又与光斑中心至各电极间的距离成正比,因此光斑的位置是四电极电流的函数.

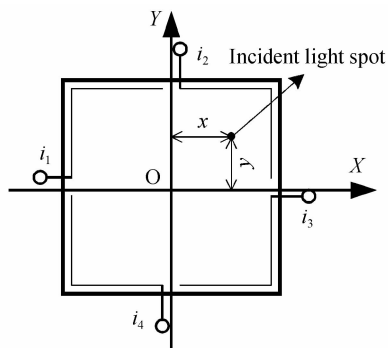


图 1 二维 PSD 结构
Fig. 1 Schematic diagram of 2D-PSD

若以 PSD 中心为二维坐标系原点,则光斑的水平位移 x 和垂直位移 y 与电流的关系为

$$\begin{cases} x = \frac{a}{2} \frac{(i_2 + i_3) - (i_1 + i_4)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4} \\ y = \frac{a}{2} \frac{(i_1 + i_2) - (i_3 + i_4)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4} \end{cases} \quad (1)$$

式中, a 为 PSD 光敏面的尺寸, i_1, i_2, i_3, i_4 分别为四个电极输出的电流值.

PSD 输出的是几至几十微安的微弱电流信号,需进行信号处理和信号运算才能得到光斑的位移,其处理电路如图 2.

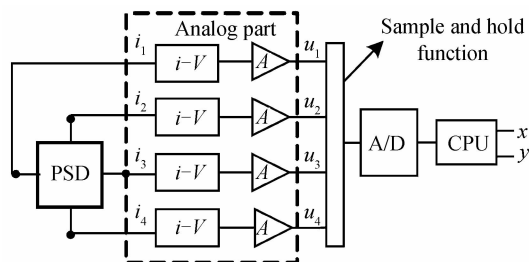


图 2 信号处理电路框图

Fig. 2 Signal processing diagram of the 2D-PSD

四路信号的放大倍数相同, $u_n = ki_n$,结合式(1),光斑的水平位移 x 和垂直位移 y 可转换为式(2)的形式.

$$\begin{cases} x = \frac{a}{2} \frac{(u_2 + u_3) - (u_1 + u_4)}{u_1 + u_2 + u_3 + u_4} \\ y = \frac{a}{2} \frac{(u_1 + u_2) - (u_3 + u_4)}{u_1 + u_2 + u_3 + u_4} \end{cases} \quad (2)$$

式中, u_1, u_2, u_3, u_4 是 i_1, i_2, i_3, i_4 经 I/V 转换和放大后的电压输出.

式(2)为 PSD 理想定位公式,要求作用于 PSD 上光斑的强度足够,无背景光和电噪音的影响.而实际测量中,这些因素的影响无法避免,需对其进行分析.

2 测量误差分析

理想定位的是信号光斑的位置,而 PSD 实际探测到的是信号光斑、背景光和电噪音共同作用的结果.因此,实际探测的位置和理想定位间会存在误差.对于背景光的影响及消除的方法已有研究^[15-17],因此本文在无背景光条件下对误差进行分析.

设信号光斑作用于 PSD 时,理想的四路输出电压分别为 u_1, u_2, u_3, u_4 ,总的有效信号输出 S 为

$$S = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 = kR(\lambda)\Phi \quad (3)$$

式中 k 为处理电路的放大倍数, $R(\lambda)$ 为 PSD 的响应度, Φ 为信号光斑的辐射通量.

由式(2)可知,理想条件下,信号光斑定位 x_s, y_s 为

$$\begin{cases} x_s = \frac{a}{2} \frac{(u_2 + u_3) - (u_1 + u_4)}{u_1 + u_2 + u_3 + u_4} \\ y_s = \frac{a}{2} \frac{(u_1 + u_2) - (u_3 + u_4)}{u_1 + u_2 + u_3 + u_4} \end{cases} \quad (4)$$

实际测量中存在电噪音干扰,设总噪音为 E_n ,则

$$E_n = E_{n_1} + E_{n_2} + E_{n_3} + E_{n_4} = E_n \quad (5)$$

式中, E_{n_1} 、 E_{n_2} 、 E_{n_3} 、 E_{n_4} 分别为对应四路信号的电噪声, 则电噪声产生的位置偏移量 x_n 、 y_n 为

$$\begin{cases} x_n = \frac{a}{2} \frac{(E_{n_1} + E_{n_2}) - (E_{n_3} + E_{n_4})}{E_{n_1} + E_{n_2} + E_{n_3} + E_{n_4}} \\ y_n = \frac{a}{2} \frac{(E_{n_1} + E_{n_3}) - (E_{n_2} + E_{n_4})}{E_{n_1} + E_{n_2} + E_{n_3} + E_{n_4}} \end{cases} \quad (6)$$

而 PSD 实际测得的位移量 x_c 、 y_c 是信号和噪声共同作用的结果, 为

$$\begin{cases} x_c = \frac{a}{2} \frac{(u_2 + u_3 + E_{n_2} + E_{n_3}) - (u_1 + u_4 + E_{n_1} + E_{n_4})}{u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + E_{n_1} + E_{n_2} + E_{n_3} + E_{n_4}} \\ y_c = \frac{a}{2} \frac{(u_1 + u_2 + E_{n_1} + E_{n_2}) - (u_3 + u_4 + E_{n_3} + E_{n_4})}{u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + E_{n_1} + E_{n_2} + E_{n_3} + E_{n_4}} \end{cases} \quad (7)$$

定义信噪比 $\gamma = S/N$, 由式(4)、(6)和式(7)可得 x 和 y 方向的测量误差 Δx 、 Δy 为

$$\begin{cases} \Delta x = |x_c - x_s| = \frac{1}{1+\gamma} |x_n - x_s| \\ \Delta y = |y_c - y_s| = \frac{1}{1+\gamma} |y_n - y_s| \end{cases} \quad (8)$$

又因为 $|x_n - x_s| \leq a$ 和 $|y_n - y_s| \leq a$, x 、 y 向最大的测量误差 Δx_{\max} 、 Δy_{\max} 为

$$\Delta x_{\max} = \Delta y_{\max} = a/(1+\gamma) \quad (9)$$

对比度 γ 远大于 1, $1+\gamma \approx \gamma$, $\gamma = kR(\lambda)\Phi/E_n$, 由式(9)可得

$$\Delta x_{\max} = \Delta y_{\max} = \frac{a}{\gamma} = \frac{aE_n}{kR(\lambda)\Phi} \quad (10)$$

对于具体的系统, 光敏面尺寸和电路放大倍数一定, 测量误差取决于电噪声、PSD 响应度和光斑强度. 由式(10)可知, 测量误差随着电噪声的增大而增大, 随着 PSD 响应度和光斑强度的增大而减小. 测量误差越小, 系统的定位准确度越高.

由上述分析可知, 电噪声和 PSD 响应度一定时, 可根据系统对测量准确度的要求, 由式(10)计算出相应的光斑强度, 靶标光源强度与光斑强度成正比, 从而确定靶标光源的强度.

表 1 各阻值下的参量

Table 1 Parameters under various resistances

Resistance of $R/k\Omega$	0.004	0.13	0.32	0.63	0.93	1.36	1.85	3.03	5
Radiation on PSD/ μW	6.35	4.77	3.73	2.61	2.42	1.61	1.22	0.82	0.56
Photocurrent/ μA	3.81	2.86	2.24	1.57	1.45	0.97	0.73	0.49	0.34

根据表 1 的参量, 在不同的光斑辐射通量下分别进行位移实验. 为了避免非线性的影响, 在其光敏面线性区域内进行移动, 移动范围 $-3 \sim 3$ mm, 每次移动 0.3 mm, 共取 20 个点, 测点示意图如图 4. 为了减小随机因素造成的影响, 每点采集 100 个数求均值. 由理论分析可知, 造成实际位移值与理论位移值不相等的原因, 主要是电噪声的影响. 电噪声包括散粒噪声、热噪声、

3 光斑强度影响实验

实验采用上海欧光的二维枕形 PSD HY0202 以及测试电路板, 放大倍数 $k=10^6$, 电路输出信号经处理后, 电噪声在 9.3 mV 左右. PSD 光敏面 15×15 mm², 线性区域 6×6 mm². 光源采用单颗的红外发光二极管 (Light Emitting Diode, LED), 中心波长为 940 nm, PSD 的响应度 $R(940 \text{ nm})=0.63 \text{ A/W}$. 使用 NI USB-6251 数据采集卡对信号进行采集.

实验系统结构如图 3, PSD 和处理电路板固定在光学平台上. LED 光源与 PSD 之间用铝板隔开, 铝板上钻直径为 1 mm 的小孔, LED 在孔正上方 2 cm 处, PSD 在孔正下方 2 mm 处. 光源与铝板一起固定在精密二维位移平台上, 可以沿 PSD 的 x 、 y 方向进行移动. 整个装置位于暗室中, 以避免环境光的影响.

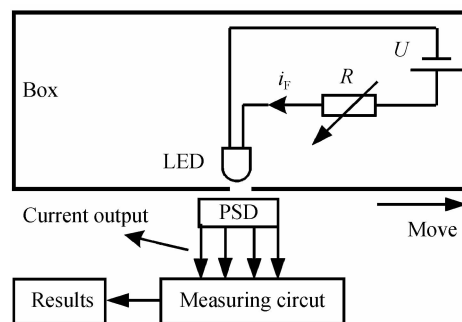


图 3 实验系统

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

LED 光源光强与其流经的电流有关, 由图 3 可知, 流经光源的电流 i_F 由限流电阻 R 控制, 且

$$i_F = \frac{U - U_F}{R} \quad (11)$$

式中 U 为电源电压, U_F 为 LED 两端的电压降.

作用于 PSD 上的光斑辐射通量与光源光强成正比, 结合式(11)可知, 通过控制滑动变阻器 R 的变化, 可以控制作用于 PSD 上的光斑辐射通量的变化. R 在不同阻值下, 作用于 PSD 上的辐射通量和 PSD 产生的总光电流如表 1.

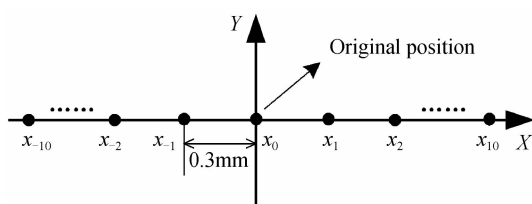


图 4 测点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measuring points

模拟器件的噪音等^[18],这些多为随机噪音,均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)能反映所有随机噪音对测量的影响,因此实验中采用 RMSE 作为准确度的评价指标, RMSE 的表达式为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=-1}^{-n} (x_{-i} - x'_{-i})^2 + \sum_{i=0}^n (x_i - x'_i)^2}{2n+1}} \quad (12)$$

式中 x_{-i} 和 x_i 为分别为对应位置上测得的位移量, x'_{-i} 和 x'_i 为测量数据一次拟合曲线的拟合值, RMSE 为一

次拟合曲线的均方根误差, n 为正负半轴的采样点数。

使用 MATLAB 中的 Cftool 工具对 PSD 测得的位移与光源实际移动量进行拟合,得到不同辐射通量下的 RMSE. 将实验中 PSD 的光敏尺寸、电路放大倍数、电噪音、PSD 响应度等参量代入式(10)中,计算出不同辐射通量下的理论误差,其与实际误差值如表 2 所示,理论误差和实际误差十分相近。

表 2 不同光斑强度下理论误差与实际误差

Table 2 Theoretical deviation and experiment deviation under different light spot intensities

Radiation/ μW	6.35	4.77	3.73	2.61	2.42	1.61	1.22	0.82	0.56
Experiment deviation/mm	0.048	0.056	0.069	0.077	0.094	0.127	0.176	0.278	0.385
Theoretical deviation/mm	0.035	0.046	0.059	0.085	0.092	0.138	0.182	0.27	0.395

为了更直观地表达光斑强度对准确度的影响,根据实验系统的参量,对式(10)进行仿真,结果如图 5。

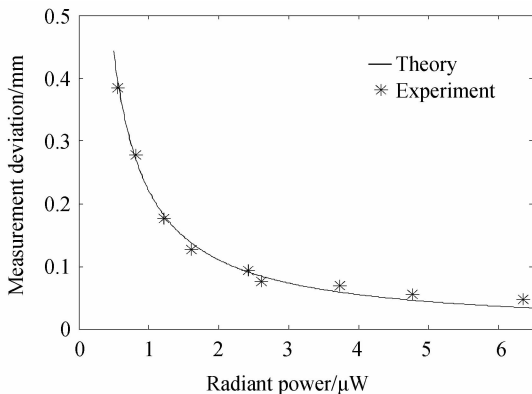


图 5 测量误差随光斑强度的变化

Fig. 5 Measuring deviation as a function of light spot radiation

由图 5 可知,实验误差位于模型仿真曲线上,实验结果与理论分析相符合.且光斑强度低于 $2.5 \mu\text{W}$ 时,测量误差随着光斑强度的增强而急剧减小,光斑强度高于 $2.5 \mu\text{W}$ 时,测量误差逐渐趋于稳定。

4 结论

本文建立了 PSD 位移测量误差的数学模型,导出了光斑强度与测量误差的定量关系,对模型进行实验验证,实验结果与理论模型一致.由模型和实验得出:光斑强度较弱时,测量误差随着光斑强度的增强而急剧减小,此时增强靶标光源的强度能显著地减小测量误差,提高定位准确度;光斑强度增强至一定程度时,测量误差逐渐趋于稳定,此时增强靶标光源的强度,靶标光源的制作成本增加,尺寸增大,而定位准确度却得不到明显的改善.在实际应用中,可根据具体的准确度要求,由模型得出对光斑强度的要求,选取适当的光斑强度值用于靶标光源的设计。

参考文献

[1] WALLMARK J T. A new semiconductor photocell using

lateral photoeffect[J]. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 1957, **45**(4): 474-483.

- [2] LUCOVSKY G. Photoeffects in nonuniformly irradiated P-N junctions[J]. *Journal of Applied Physics*, 1960, **31**(6): 1088-1095.
- [3] YUE Kai-duan, CAO Jian-an, ZHOU Xiang, *et al.* Research of high accuracy laser inclination angle measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1108-1110.
乐开端, 曹建安, 周翔, 等. 高精度激光倾角测量技术研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(9): 1108-1110.
- [4] ZHANG Bo-heng, BIAN Chuan-ping, LI Lu-yao, *et al.* The application of PSD in precisely locating the rotated angle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4): 505-507.
张伯珩, 边川平, 李露瑶, 等. 光电位置传感器在转角精密定位中的应用[J]. *光子学报*, 2001, **30**(4): 505-507.
- [5] SUNG Y C, MIYASAKA T, LIN T K. A case study on bridge health monitoring using position-sensitive detector technology[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2012, **19**(2): 295-308.
- [6] SHEN Lin-yong, LI Ya-min, ZHANG Ya-nan, *et al.* Design and analysis of underground pipeline detecting system based on PSD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(8): 1429-1434.
沈林勇, 李亚旻, 章亚男, 等. 基于 PSD 的地下管线探测装置设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(8): 1429-1434.
- [7] ZHANG Guang-jun. PSD and its applications to precision measurement [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1994, **20**(3): 259-262.
张广军. PSD 器件及其在精密测量中的应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 1994, **20**(3): 259-262.
- [8] SONG Cui, YENG Chai-soh. The effect of spot size on linearity improvement of tetra-lateral position sensitive detector [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2011, **42**: 721-728.
- [9] DING Xiao-kun, LIU Tie-gen, SONG Dian-you. Impact of accuracy of laser spot quality in laser triangulation long-term continuous measuring based on PSD[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(2): 1-7.
丁小昆, 刘铁根, 宋殿友. 激光光斑质量对基于 PSD 的激光三角法长时间连续测量准确度的影响[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 1-7.
- [10] FANG Guan-ming, CAO Yi-ping, ZHOU Li-ping. Analysis on the position sensitive detector positioning error caused by laser spot using new three-ray model[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(4): 954-958.

- 方关明,曹益平,周力萍. 采用三线位置敏感探测器定位模型分析光斑对定位准确度的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(4): 954-958.
- [11] LV Ai-min, YUAN Hong-xing, HE An-zhi. Effect of light source and background noise on the position precision of PSD [J]. *Acta Optical Sinica*, 1998, **18**(6): 762-766.
吕爱民,袁红星,贺安之. 入射光强和背景光对二维光电位置敏感器件干扰的影响[J]. 光学学报, 1998, **18**(6): 762-766.
- [12] HE Xiao-ru, ZHONG Yu-ning, WANG Xuan-ze. Research on position detection of PSD based on light-intensity modulation and digital fit [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2010, **6**(6):94-96.
何晓瑞,钟毓宁,王选择. 基于光强调制和数字拟合的 PSD 位置检测方法的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2010, **6**(6): 94-96.
- [13] YUAN Hong-xing, HE An-zhi, LI Zhen-hua, *et al.* Analysis of effects of light intensity distribution in the phase method to determine the position of a light spot incident on a position sensitive detector (PSD) [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2000, **24**(1): 40-45.
- [14] LU Ai-min, YUAN Hong-xing, HE An-zhi, *et al.* Influence of reverse bias voltage and light intensity on some properties of position-sensitive detector (PSD) [C]. The International Society for Optical Engineering, 1996, **2894**: 219-223.
- [15] MO Chang-tao, CHEN Chang-zheng, ZHANG Li-li, *et al.* Study on background light compensation of photo-electric position sensitive detector [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2004, **31**(4): 427-431.
莫长涛,陈长征,张黎丽,等. 光电位置敏感器件背景光补偿的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(4): 427-431.
- [16] IQBAL S, GUALINI M M S, ASUNDI A. Measurement accuracy of lateral-effect position-sensitive devices in presence of stray illumination noise [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, **143**(2): 286-292.
- [17] WANG Guang-zhi, DING Hai-shu, DING Hui. Light disturbance to position sensitive detectors pattern and methods to overcome it [J]. *Journal of Tsinghua University*, 1997, **37**(1): 61-64.
王广志,丁海曙,丁辉. 位置敏感器件(PSD)的杂光干扰研究[J]. 清华大学学报, 1997, **37**(1): 61-64.
- [18] NARAYANAN C, BUCKMAN A. B, BUSCH-VISHNIAC I. Noise analysis for position-sensitive detectors [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1997, **46**(5): 1137-1144.