光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022071902

位置敏感探测器光斑脱靶误差补偿方法研究

李 鑫，米 良*

（中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所，成都 610000）

摘 要： 为了提高位置敏感探测器(PSD)的位置检测范围，解决光斑在探测器光敏面脱靶时无法准确定位光斑的问题，提出一种光斑脱靶误差补偿方法，分析了脱靶前后 PSD 检测光斑能量重心变化规律，建立了 PSD 光强信号与位置检测误差间的函数关系。实验结果表明：当 PSD 光敏面尺寸为 12 mm×12 mm 时，对于半径为 5 mm 的高斯光斑，通过所提出的光斑补偿方案补偿后 PSD 的 X 轴检测范围提高了 66.7%，位置检测平均相对误差不超过 5%，该方法对提高 PSD 位置检测性能具有重要的意义。

关键词： 测量；位置敏感探测器；高斯光斑；误差补偿

中图分类号： TN247 **文章编号：** 1001－5868(2022)06－1136－06

Study on Compensation Method of Light Spot Off-target Error of Position Sensitive Detector

LI Xin，MI Liang

（Institute of Machinery Manufacturing Technology，Chinese Academy of Engineering Physics，Chengdu 610000，CHN）

Abstract： In order to extend the detection range of position sensitive detector，and solve the problem that the light spot cannot be accurately positioned when the light spot is off-target on the PSD photosensitive surface，a light spot off-target error compensation method is proposed. The variation law of the spot energy center of PSD detection before and after the off-target was analyzed，and the functional relationship between the PSD light intensity signal and the position detection error was established. The experimental results show that：when the size of the PSD photosensitive surface is 12 mm×12 mm，for a Gaussian light spot with a radius of 5 mm，the X-axis detection range of the PSD photosensitive surface is increased by 66.7% after compensation by the spot compensation method proposed in this paper，and the average relative error of position detection is no more than 5%. This method is important to improve the performance of PSD position detection.

Key words： measurement；position sensitive detector；gaussian spot；error compensation

0 引言

位置敏感探测器(Position Sensitive Detector，PSD)是一种基于横向光电效应的光电位置传感器，能够准确且快速地识别其表面光点的能量重心位置，并且具有分辨率高、响应速度快、噪声水平低等特点，被广泛应用于精密检测及光电跟踪控制等领域[1-3]。受制于 PSD 光敏面及光斑尺寸，对于大光斑的应用系统中，仍存在着光斑易脱靶等问题，实际检测范围受到较大限制。因此，研究光斑脱靶对 PSD 位置检测的影响规律并利用合理方法进行误差补偿，对提高 PSD 位置探测能力具有重要意义。

为提高 PSD 位置探测范围，相关学者对提高 PSD 位置探测能力进行了大量研究。文献[4-7]利用插值及神经网络等方法对 PSD 的非线性误差进行了补偿，将线性范围由 A 区提升至整个光敏面范围；文献[8-11]分析了高斯光斑半径、信噪比、光斑

收稿日期：2022－07－19.

基金项目：技术基础科研项目(J0067-1922-FJC).

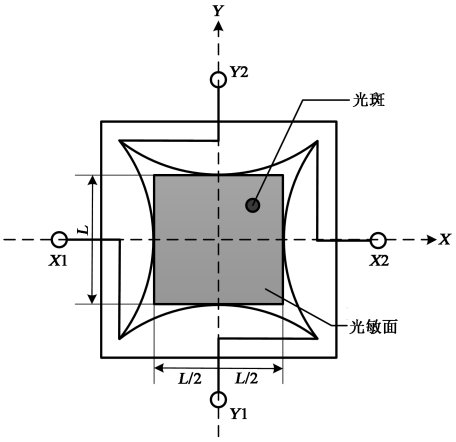
* 通信作者：米 良 E-mail：mibolt@foxmail.com

质量及放大电路噪声等因素对 PSD 位置检测性能的影响。上述研究均着眼于提高 PSD 在光敏面区内的探测范围与精度，尚未对探测光斑脱靶过程中 PSD 的准确定位问题进行分析研究。

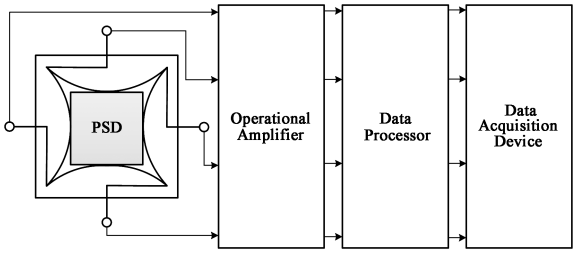
在本文中，首先基于高斯光斑模型下光敏面脱靶前后的能量分布模型，分析了 PSD 检测的能量重心偏移量随光斑位移的变化规律，并利用 PSD 光强指示信号提出一种基于 PSD 检光率的脱靶误差的补偿方案，最后通过仿真与实验验证了补偿方案的有效性。本方法能够有效提升 PSD 使用范围，对于提升 PSD 探测能力具有重要意义。

1　PSD 位置检测原理

PSD 的工作原理基于半导体的横向光电效应，其结构如图 1(a)所示。当光斑入射至二维 PSD 光敏面时，若光斑重心与 PSD 中心重合，则四个电极会产生大小相等的光电流；当光斑重心相对于 PSD 中心产生偏移时，电极产生相应大小的光电流[12-14]。



(a)　PSD 结构图



(b)　PSD 信号处理方案

图 1　PSD 位置检测系统示意图

在不考虑背景光和电路噪声的情况下，光斑的能量重心位置的解算公式为[15]

$$x_c=\frac{L_x}{2}\cdot\frac{(I_{X2}+I_{Y1})-(I_{X1}+I_{Y2})}{I_{X1}+I_{X2}+I_{Y1}+I_{Y2}} \tag{1}$$

$$y_c=\frac{L_y}{2}\cdot\frac{(I_{X2}+I_{Y2})-(I_{X1}+I_{Y1})}{I_{X1}+I_{X2}+I_{Y1}+I_{Y2}} \tag{2}$$

式中，x_c，y_c 为光斑重心位置坐标；L_x，L_y 为 PSD 光敏面尺寸；I_{X1}，I_{X2}，I_{Y1}，I_{Y2} 为 PSD 四个电极对应的输出电流。对于 PSD 位置检测系统，通常先将微弱的光电流经放大电路转换为电压信号，然后利用数据处理和采集等设备观察与记录。PSD 信号处理方案如图 1(b)所示。

2　PSD 脱靶误差补偿方案研究

对于激光谐振腔发出的基模辐射场，其横截面的能量分布经由光学扩束、投射和耦合后服从二维高斯分布。光电测量领域中常用的激光光斑的分布模式有均匀光斑和高斯光斑两种，研究表明，高斯光斑在 PSD 光敏面中心相比均匀光斑具有更高的灵敏度[16-17]。因此，下文均在二维高斯分布光斑模型基础上进行分析。

2.1　PSD 脱靶误差分析

对于二维高斯光斑，式(3)表示了其能量分布，依据 3−σ 准则，99.73% 的光斑能量处于($\mu+3\sigma$，$\mu-3\sigma$)范围内，视高斯光斑束腰半径为 $\sigma=r/3$，r 为光斑半径。由于高斯光斑的能量分布具有中心对称的性质，下述方法以光斑重心在位置敏感探测器 X 方向运动为析，Y 方向与其情况类似。

$$E(x,y)=\frac{E_0}{2\pi\sigma^2}\exp\left\{-\left[\left(\frac{x-x_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2+\left(\frac{y-y_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right]\right\} \tag{3}$$

式中，E_0 为光斑总能量，σ 为光斑的高斯光斑的束腰半径，(x_0,y_0)为光斑能量重心位置坐标。其能量分布示意图如图 2 所示。

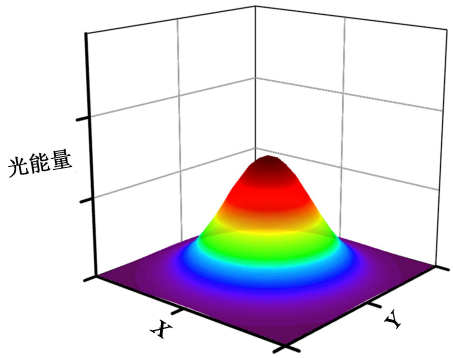


图 2　高斯光斑能量分布示意图

图 3 给出了光斑在 PSD 光敏面 X 轴上移动时的能量重心示意图，光斑可视为被 PSD 的 X 轴分

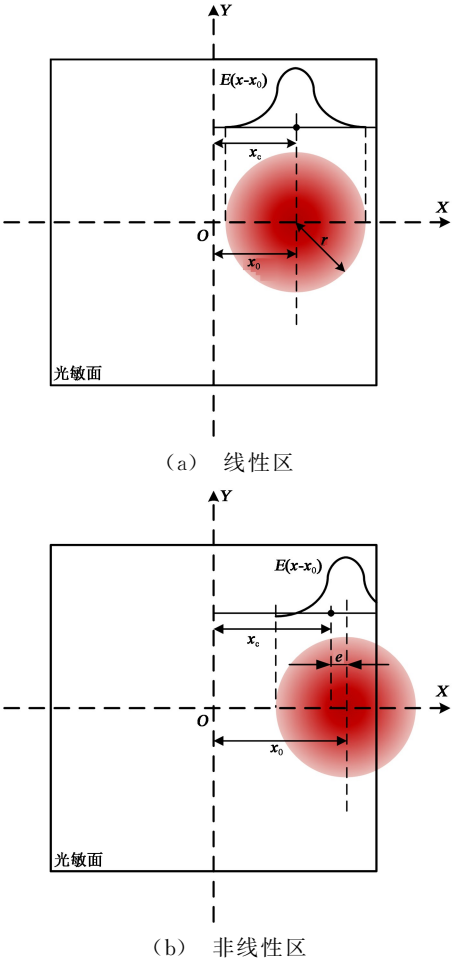
为上下两个部分，由于高斯光斑关于 X 轴对称的各点具有相同的能量强度，PSD 检测到的能量重心位置 x_c 可视作光斑沿 X 轴垂直于光敏面上截面能量分布 $E(x)$ 的重心位置，为便于分析，将总能量进行归一化后，光斑在 PSD 中心时能量分布函数如下式所示：

$$E(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right] \tag{4}$$

当光斑在 PSD 光敏面内移动时，如图 3(a)所示，不考虑干扰因素及 PSD 器件本身的误差，PSD 检测的光斑位置 x_c 与光斑位移 x_0 两者将在数值上相等，这部分移动范围称为 PSD 的线性区，此时有：

$$x_c=x_0, x_0\in(-L/2+r, L/2-r) \tag{5}$$

当高斯光斑继续沿 X 轴向外侧移动至离开光敏面时，PSD 检测的光能量会发生丢失，这种现象称之为光斑脱靶。当光斑脱靶时，PSD 检测位置会随光敏面上能量重心变化而发生偏移，因此无法得到准确的光斑位置信息。光斑从即将发生脱靶至完全离开光敏面的这部分位移范围称为 PSD 的非线性区，如图 3(b)所示。



(a) 线性区

(b) 非线性区

图 3 PSD 光斑能量重心示意图

为了使非线性区内 PSD 仍能准确定位光斑位置，首先需要找到在非线性区内 PSD 位置检测值与光斑实际位移值之间的函数关系，对于某脱靶范围内光斑位移 x_0，PSD 检测到的能量分布 $E(x_0)$ 是被光敏面边缘割裂的高斯分布部分区间。利用重心计算公式得到此时的 PSD 位置检测值：

$$x_c=\frac{\int_{x_0-r}^{L/2}x\cdot E(x-x_0)\mathrm{d}x}{\int_{x_0-r}^{x_0+r}E(x-x_0)\mathrm{d}x},$$
$$x_0\in(-L/2-r,-L/2+r)\cup(L/2-r,L/2+r) \tag{6}$$

为便于分析，设定光敏面尺寸为 12 mm×12 mm 的 PSD 和半径为 5 mm 的高斯光斑进行 PSD 位置检测输出与光斑位移量的仿真分析，结果如图 4 所示。

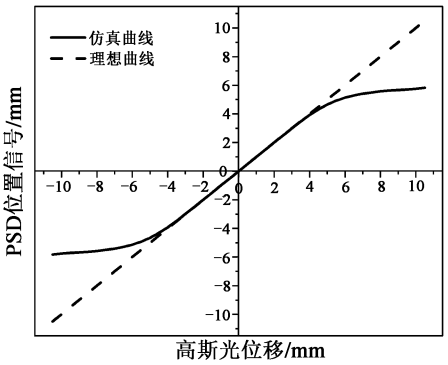


图 4 PSD 位置检测仿真曲线

当光斑发生脱靶时，PSD 位置检测值与光斑位移值差值的绝对值为脱靶误差 e，有

$$e=|x_0-x_c| \tag{7}$$

对于光敏面尺寸为 12 mm×12 mm 的 PSD 和半径为 5 mm 的高斯光斑，其理论计算的线性区范围为[−1 mm，1 mm]。但仿真分析曲线显示 PSD 位置检测值与光斑位移在[−4 mm，4 mm]范围内仍有良好线性关系，这是因为发生脱靶时首先离开光敏面上的是远离高斯光斑中心能量较弱的部分，大量光斑仍在光敏面上从而保证 PSD 较好的位置检测精度。总体而言，光斑位移距离 PSD 中心点越远，PSD 位置检测脱靶误差就越大。

2.2 PSD 脱靶误差补偿算法

当整个光斑照射在 PSD 光敏面上时，对应的 PSD 光强信号达到最大值 U_{max}，此后光斑继续位移

至脱靶某位置，光强输出信号变化为 U_x。将某位置 PSD 光强信号 U_x 与未脱靶时光强信号 U_{max} 的比值定义为检光率 s，有

$$s=\frac{U_x}{U_{max}}\times 100\%=\frac{S(\lambda)\cdot Z_t\cdot\int_{x_0-r}^{L/2}E(x-x_0)\mathrm{d}x}{S(\lambda)\cdot Z_t\cdot\int_{-r}^{r}E(x)\mathrm{d}x}\times 100\% \quad (8)$$

其中，$S(\lambda)$表示 PSD 的光敏性，与 PSD 型号及入射光波长相关；Z_t 代表放大电路的转换阻抗。通过式(8)可以计算出不同光斑位移对应的检光率 s，其变化曲线如图 5 所示。

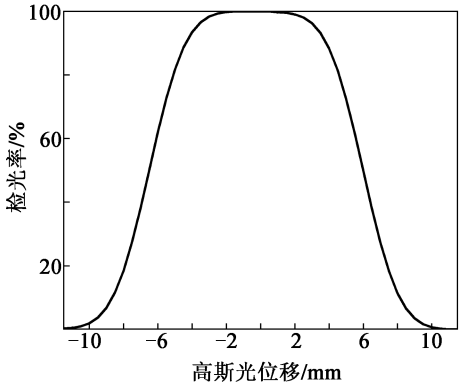


图 5　PSD 检光率仿真曲线

根据式(6)～(8)，可以得出高斯光斑在 PSD 正半轴移动时检光率 s 与脱靶误差之间函数关系

$$e=|\ s^{-1}-x_c\ | \quad (9)$$

根据上述分析，可以得到不同检光率下的脱靶误差仿真曲线，如图 6 所示。

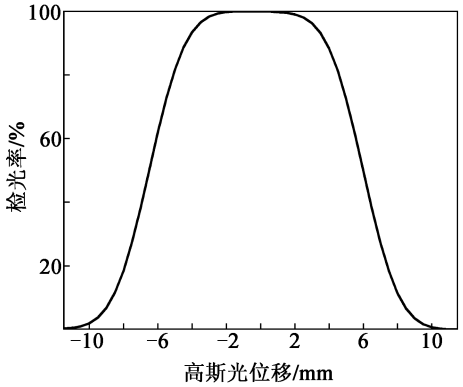


图 6　脱靶误差仿真曲线

考虑到当光斑在 X 轴不同方向上移动时，PSD 位置检测值与光斑实际位移值具备不同的对应关系，且距离 PSD 中心等距但不同方向的两点具有相同检光率。因此，在确定补偿值之前需首先判定光斑移动方向。根据以上分析，提出一套基于 PSD 检光率的脱靶误差补偿算法，其流程如图 7 所示。

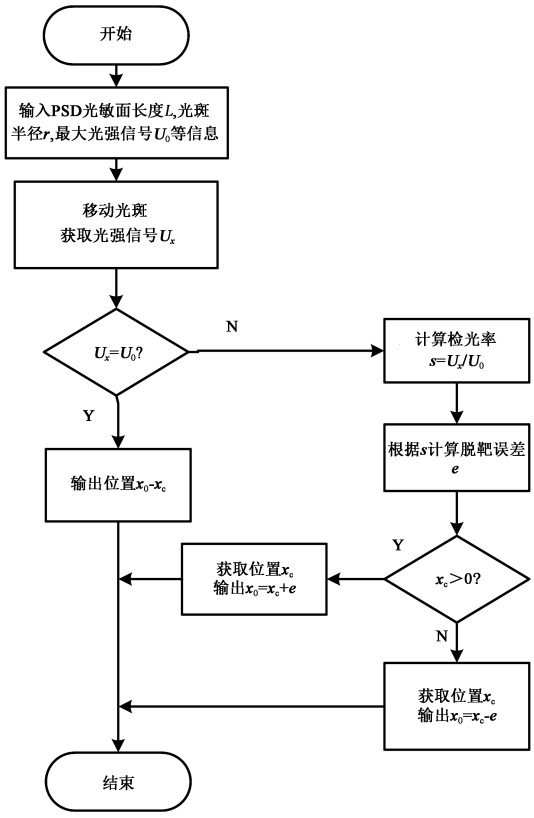
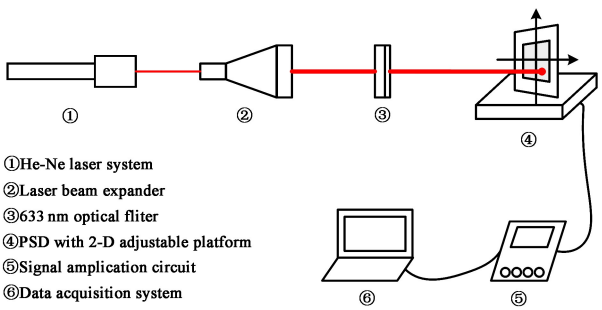


图 7　脱靶误差补偿算法流程图

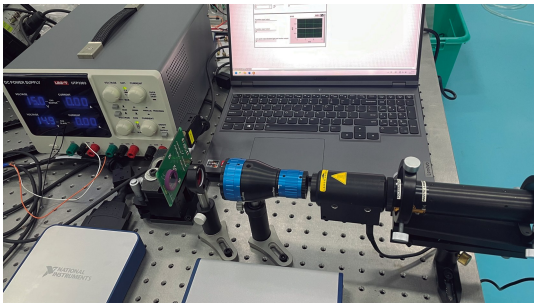
3　实验与分析

为了验证光斑位移量与 PSD 检测位置之间的关系，测试脱靶误差补偿方案的效果，在实验室内搭建了如图 8 所示的实验系统。

实验基本原理为：激光器发射的光源经扩束后，通过 633 nm 光学滤波片以减少环境光对位置检测的影响，通过调整二维位移台使光斑垂直入射于 PSD 光敏面中心，沿 X 轴正向及反向以固定步距改变光斑位置。经过信号处理电路及数据采集设备后，利用 LabVIEW 记录位置和光强信号，并使用



(a)　原理示意图



(b) 实物系统

图 8 实验系统组成图

表 1 实验器件的型号及参数

器件	制造商 & 型号	参数 & 单位	值
He-Ne Laser System	PACIFIC LASERTEC 25-STP-910	功率 P/mW	0.41-0.86
		波长 λ/nm	633
PSD	HAMAMATSU S1880	光敏感性 S/(A/W)	0.42
		$L\times L$/(mm×mm)	12×12
Signal Processing Circui	HAMAMATSU C4674-01	转换阻抗 Z_t/(V/A)	1×10^5
Data Acquisition System	National Instrument USB-7856R	/	/

Matlab 进行数据处理。部分关键实验器件的型号及参数信息如表 1 所示。

3.1 PSD 位置检测模型验证

为验证脱靶前后的 PSD 位置检测模型的准确性，固定 PSD 于二维位移台上，光源半径经扩束镜调整为 5 mm，设定位移台单位步距为 1 mm，每点停留并测量 1 000 次后取平均值记录。光斑随着位移台在[−10 mm，10 mm]范围移动时，PSD 位置检测信号实验与仿真对比如图 9 所示，由图中能够看出实验值相比理论值略靠近 PSD 中心，但变化规律基本吻合。

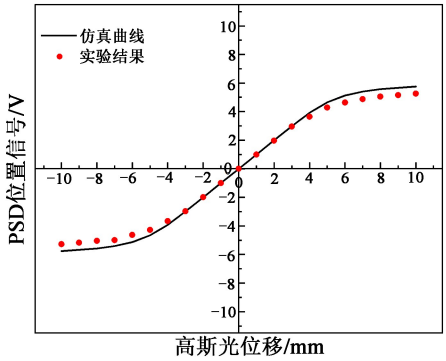


图 9 实验结果与仿真对比图

3.2 脱靶误差补偿效果探究

将实验得到的数据经上文提出的补偿算法处理后，PSD 位置检测值与光斑实际位移之间的对应关系如图 10 所示，能够看出经过脱靶误差补偿后的数据点与实际位移间具有较好的线性关系，与理想对应曲线较为接近。图 11 对比了实验数据进行误差补偿前后的相对误差关系，位置检测相对误差最大值由 47.2%降低为 7.3%。

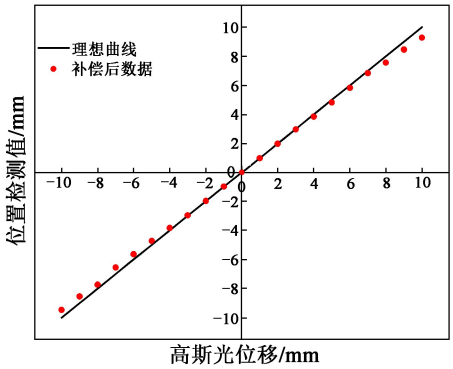


图 10 补偿后实验数据对比图

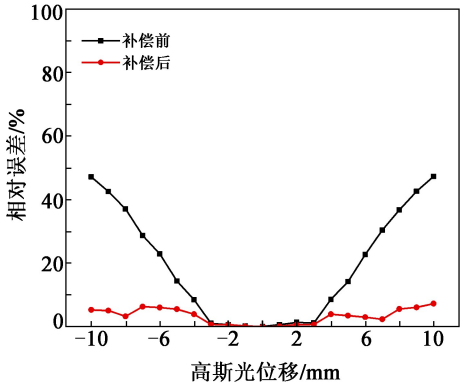


图 11 补偿前后相对误差对比图

综合实验分析能够得出，脱靶后 PSD 位置检测信号的实验结果和仿真结果接近，且经过脱靶误差补偿方案处理后的数据点具有良好的对应关系。证明了文中提出的 PSD 位置检测模型及补偿算法的有效性，但对于图 11 中补偿后 PSD 位置检测信号与实际光斑位移间仍存在的少量偏差，对实验结果的深入分析后得出以下原因：(1)PSD 器件由于制造工艺限制导致表面电阻值分布不均匀，在远离 PSD 中心位置会产生非线性误差；(2)光束在光路中由散斑效应引入部分高频噪声，且光电信号放大后得到的模拟电压信号容易受到环境干扰，导致位置检测存在偏差；(3)由于空气微粒与光学器件的影响，使 PSD 接收到的激光能量密度分布不再符合理想高斯分布，导致光斑重心发生偏移。

4 结论

本文对光斑发生脱靶后二维高斯光斑重心偏移现象进行了分析，推导出 PSD 位置检测误差与光斑

实际位移之间的函数关系，并根据 PSD 检光率变化提出一种 PSD 脱靶误差补偿算法。实验表明，经过脱靶误差补偿后 PSD 的 X 轴检测范围提高了 66.7%，位置检测平均相对误差不超过 5%。本文提出的脱靶误差补偿方法对于光斑脱靶发生在 PSD 两坐标轴上具有较好效果，为大光斑下 PSD 检测能力的提升提供了理论指导，但对于发生在光敏面其他位置的脱靶仍具有一定局限性，通过神经网络等方法进行优化从理论上能够将 PSD 提升至更大的检测范围。

参考文献：

[1] 高玉娥，刘　伟，吕世猛，等. 基于位置敏感探测器的六自由度精密位姿测量系统[J]. 光学精密工程，2018，26(12)：2930-2939.
Gao Yue，Liu Wei，Lü Shimeng，et al. Six-degree-of-freedom displacement and angle measurement system based on two-dimensional position-sensitive detector[J]. Optics and Precision Engineering，2018，26(12)：2930-2939.

[2] Aguado S，Pérez P，Albajez J A，et al. Algorithm to optimize measurement system location in a machine tool verification [J]. Procedia Manufacturing，2019，41：1127-1134.

[3] Tomita M，Ibaraki S. Measurement of 2D positioning "error map" of a SCARA-type robot over the entire workspace by using a laser interferometer and a PSD sensor[C]// 2020 Inter. Symp. on Flexible Automation，2020.

[4] 樊昭阳，李君波. 位置敏感探测器非线性校正的神经网络设计[J]. 光学与光电技术，2018，16(2)：5.
Fan Zhaoyang，Li Junbo. Neural network design for nonlinear correction of position-sensitive-detectors [J]. Optics & Optoelectronic Technol.，2018，16(2)：5.

[5] Li Q，Xu S，Yu J，et al. An improved method for the position detection of a quadrant detector for free space optical communication[J]. Sensors，2019，19(1)：175-186.

[6] Wang X，Su X，Liu G，et al. Investigation of high-precision algorithm for the spot position detection for four-quadrant detector[J]. Optik-Inter. J. for Light and Electron Optics，2019，203(6)：163941.

[7] Qiu Z B，Jia W H，Ma X，et al. Neural-network-based method for improving measurement accuracy of four-quadrant detectors[J]. Appl. Opt.，2022，61：9-14.

[8] 颜超超，刘　瑾，杨海马，等. ATP 跟瞄系统中位置敏感探测器测量精度研究[J]. 激光与红外，2015，45(5)：524-531.
Yan Chaochao，Liu Jin，Yang Haima，et al. Measurement accuracy research of position sensitive detector in ATP system [J]. Laser & Infrared，2015，45(5)：524-531.

[9] David R N，José L G，Ignacio B M，et al. Mathematical model and calibration procedure of a PSD sensor used in local positioning systems[J]. Sensors，2016，16(9)：1484.

[10] Fan Z A，Jin L A，Hy B，et al. Attitude measurement and simulation of two-dimensional position sensitive detector[J]. Optik，2019，184：399-411.

[11] 张天宇，贾方秀. 基于 PSD 窄脉冲激光信号检测放大电路噪声分析及参数匹配研究[J]. 现代电子技术，2019，42(10)：35-39.
Zhang Tianyu，Jia Fangxiu. Research on noise analysis and parameter matching for narrow pulse laser signal detection amplifying circuit based on PSD [J]. Modern Electronic Technique，2019，42(10)：35-39.

[12] 陈洪芳，汤　亮，张　爽，等. 位置敏感探测器对激光追踪测量系统的影响[J]. 中国激光，2020，47(11)：107-116.
Chen Hongfang，Tang Liang，Zhang Shuang，et al. Effects of position sensitive detector on laser tracing measurement system [J]. Chinese J. of Lasers，2020，47(11)：107-116.

[13] Zhang J，Yang J，Liu Z，et al. A model of measurement error caused by non-uniform spot on four-quadrant detector [C]// Infrared Sensors，Devices，and Applications Ⅷ，2018.

[14] Zhang J，Qian W，Gu G，et al. Improved algorithm for expanding the measurement linear range of a four-quadrant detector[J]. Appl. Opt.，2019，58(28)：7741.

[15] Podlaskin B G，Guk E G，Obolenskov A G，et al. Improvement of the accuracy of a position-sensitive detector with a wide field of view[J]. Technical Phys. Lett.，2020，46(10)：988-990.

[16] Qian L，Wu J，Chen Y，et al. High precision position measurement method for laguerre-gaussian beams using a quadrant detector[J]. Sensors，2018，18(11)：4007.

[17] 张鹏程，刘　瑾，杨海马，等. 基于 PSD 的非均匀激光光斑中心定位研究[J]. 激光与红外，2020，50(8)：941-947.
Zhang Pengcheng，Liu Jin，Yang Haima，et al. Research on center positioning of non-uniform laser spot based on PSD[J]. Laser & Infrared，2020，50(8)：941-947.

作者简介：

李　鑫(1997—)，男，硕士，主要研究方向为激光跟踪反馈系统、光斑位置检测；

米　良(1985—)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为大尺寸空间测量、智能制造装备及系统检测评价。