

# 基于位置传感器的空间激光准直系统标定技术

黄战华, 方石\*, 张亚男, 蔡怀宇, 张尹馨

天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 空间激光准直系统常采用位置传感器(PSD)作为光电接收单元, 半导体激光器作为光源。由于 PSD 具有非线性, 激光光源出射激光的衍射特性会导致准直系统在空间不同距离处响应情况不同。为了减少空间激光准直系统工作时在不同空间距离处的重复标定工作, 提出了一种模拟 PSD 探测半导体激光光斑位置的方法。该方法通过设计相关光学系统获取 PSD 靶面非线性数据及激光光强分布数据, 完成了 PSD 对光斑强度重心响应的模拟。之后对仿真结果进行了实验验证, 实验结果表明该仿真系统能够较好地重现实际 PSD 探测过程, 在 0~4.5 mm 的相对位移范围内最大误差仅为 0.026 mm。

**关键词** 空间激光准直系统; 位置传感器; 衍射; 非线性; 重心响应

**中图分类号** TN23      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.110401

## Spatial Laser Collimation System Calibration Based on Position Sensitive Device

Huang Zhanhua, Fang Shi\*, Zhang Yanan, Cai Huaiyu, Zhang Yinxin

*Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education,*

*College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** Spatial laser collimation system often uses the position sensitive device (PSD) as a photoelectric receiver unit, and a semiconductor laser as a light source. Because of the nonlinearity of PSD, the diffraction characteristics of laser light will result in different responses of collimation system at different spatial distances. To reduce the repeated calibration at different spatial distances during the operation of the spatial laser collimation system, we propose a simulation method of detecting the semiconductor laser spot position by PSD. In this method, the non-linear data of PSD target surface and the laser intensity distribution data are obtained with the design of the relevant optical systems, and the response of the PSD to the spot intensity center of gravity is simulated. Then, the simulation results are verified by experiment. The experimental results show that the simulation system designed in this paper can reproduce the actual PSD detection process, and the maximum error is only 0.026 mm in the relative displacement range of 0-4.5 mm.

**Key words** spatial laser collimation system; position sensitive device; diffraction; nonlinearity; center of gravity response

**OCIS codes** 040.5160; 120.1680; 120.1880

## 1 引言

空间激光准直系统在工业直线度测量<sup>[1-2]</sup>, 角度测量<sup>[3-4]</sup>及跟踪探测<sup>[5-6]</sup>等领域有着极其重要的作用。传统的空间激光准直系统主要由象限探测器、电荷耦合元件(CCD)及互补金属氧化物半导体(CMOS)等器件组成。但是该类系统在使用过程中

存在探测盲区<sup>[7]</sup>, 容易造成探测数据出错及不准; 采集数据量过大<sup>[8-9]</sup>等方面的不足导致该类系统在高速、高精度等应用领域往往处理效果不佳。基于此, 以位置传感器(PSD)为光电探测单元的空间激光准直系统得到了越来越广泛的应用。PSD是一类基于半导体横向光电效应的传感器, 能够根据光点在 PSD 靶面上的位置输出对应的电流信号。PSD 具

收稿日期: 2018-03-21; 修回日期: 2018-04-17; 录用日期: 2018-05-28

基金项目: 天津大学自主创业基金(2017XZY-0028)

\* E-mail: phone\_13370302310@163.com

有精度高、处理速度快等优点,在高速测量微小偏移距离、角度等领域<sup>[10]</sup>有较好的应用,能够有效弥补传统光电传感器在准直系统应用中的不足。

常用的 PSD 为二维结构,制造工艺的不足<sup>[11]</sup>会导致 PSD 本身具有一定的非线性。在实际工作过程中,激光衍射光斑尺寸以及 PSD 本身非线性会影响准直系统最终输出结果,因而需要进行多次重复标定工作。为了减少重复标定带来的复杂且庞大的工作量,本文提出了一种利用计算机模拟 PSD 响应激光光斑的方法。即通过高精度 CCD 相机分别获取激光准直系统传输方向上不同空间位置的光斑图样,结合实验获取的 PSD 靶面上的非线性数据完成最终成像靶面的模拟工作。该方法能够有效减少实际空间激光准直系统在初始标定方面的扫描工作,从而极大地提高系统工作效率。

## 2 基本原理

图 1 为 PSD 的空间激光准直系统的仿真系统示意图,其中二维 PSD 及其放大电路安置在距离激光光源一定距离的光学平台上。工作时,激光光斑照射在 PSD 靶面中心位置,通过二维位移平台完成对不同距离处系统标定数据的采样工作。为了更好地描述所使用的仿真系统,需要对 PSD 本身的基本工作特性和仿真系统的可行性进行相关的介绍和讨论。

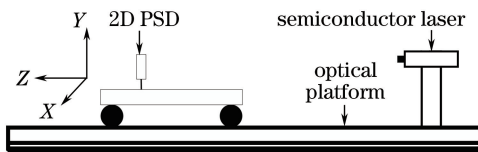


图 1 基于 PSD 的激光准直系统

Fig. 1 PSD-based laser collimation system

### 2.1 PSD 的工作原理

对于空间激光准直系统,常采用二维面阵 PSD 作为光电传感单元来探测光斑在水平和竖直方向的位置变化<sup>[12-13]</sup>。枕形 PSD 根据 Gear 定理研究而成,理论上具有表面分流 PSD 和双面 PSD 的共同优点<sup>[14]</sup>。但是由于加工工艺等原因,枕形 PSD 具有一定非线性。枕形 PSD 光点响应位置坐标方程为

$$X = \frac{(i_1 + i_2) - (i_3 + i_4)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4} \times \frac{L}{2}, \quad (1)$$

$$Y = \frac{(i_1 + i_4) - (i_3 + i_2)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4} \times \frac{L}{2}, \quad (2)$$

式中, $i_1, i_2, i_3, i_4$  分别为 4 个电极流出的电流, $L$  表示 PSD 光敏面的长, $(X, Y)$  为通过电流公式计算

出来的光点坐标。

### 2.2 空间激光准直系统仿真模型

在空间准直系统中通常采用 PSD 接收激光光斑的方式进行准直,半导体激光器出射激光具有一定的衍射及发散角,导致不同位置处 PSD 靶面响应情况不同。为了能够更加准确地描述准直系统工作过程中的校验结果,需要在空间不同距离处进行大量的位置标定。为了弥补上述缺点,提出一种新型的空间激光准直系统的仿真模型。即通过结合 PSD 靶面的非线性数据及衍射光斑的光强分布数据完成对光斑重心位置的输出,利用这种方法能够极大减少系统标定时的工作量。下面将对该方法在理论上是否具有合理性进行验证。

实际能够采集到的 PSD 非线性数据及激光衍射数据都是离散数据。假定衍射光斑光强分布为  $U(i, j)$ ,  $(i, j)$  为光斑光强的单个像元位置,结合 PSD 实际的光生电流公式可得

$$I(i, j) = k \times U(i, j), \quad (3)$$

式中  $k$  为 PSD 的感光灵敏度,与 PSD 的材料有关,一般为定值。考虑到单个像元的响应情况,利用枕形 PSD 输出的(1)、(2)式表示为

$$X_{ij} = \frac{\Delta I_{ij1} + \Delta I_{ij2} - \Delta I_{ij3} - \Delta I_{ij4}}{\Delta I_{ij1} + \Delta I_{ij2} + \Delta I_{ij3} + \Delta I_{ij4}} \times \frac{L}{2} = \frac{\Delta I_{ij1} + \Delta I_{ij2} - \Delta I_{ij3} - \Delta I_{ij4}}{\Delta I_{ij}} \times \frac{L}{2}, \quad (4)$$

$$Y_{ij} = \frac{\Delta I_{ij1} + \Delta I_{ij4} - \Delta I_{ij3} - \Delta I_{ij2}}{\Delta I_{ij1} + \Delta I_{ij2} + \Delta I_{ij3} + \Delta I_{ij4}} \times \frac{L}{2} = \frac{\Delta I_{ij1} + \Delta I_{ij4} - \Delta I_{ij3} - \Delta I_{ij2}}{\Delta I_{ij}} \times \frac{L}{2}, \quad (5)$$

式中: $\Delta I_{ij1}, \Delta I_{ij2}, \Delta I_{ij3}, \Delta I_{ij4}$  分别为衍射光斑单个像元光点响应 PSD 所产生的四路电极电流值; $X_{ij}, Y_{ij}$  为响应出来的位置坐标,即 PSD 非线性数据。将(4)、(5)式变形能够得到离散位置与连续电流的关系:

$$\frac{2}{L} \times \sum (X_{ij} \times \Delta I_{ij}) = \sum (\Delta I_{ij1} + \Delta I_{ij2} - \Delta I_{ij3} - \Delta I_{ij4}) = I_1 + I_2 - I_3 - I_4, \quad (6)$$

$$\frac{2}{L} \times \sum (Y_{ij} \times \Delta I_{ij}) = \sum (\Delta I_{ij1} + \Delta I_{ij4} - \Delta I_{ij3} - \Delta I_{ij2}) = I_1 + I_4 - I_3 - I_2, \quad (7)$$

式中, $I_1, I_2, I_3, I_4$  为衍射光斑照射在 PSD 靶面上响应出的四路电极总电流值。结合(1)~(2)式,可

将  $I_1, I_2, I_3, I_4$  分别对应于  $i_1, i_2, i_3, i_4$ , 则有如下关系:

$$X = \frac{I_1 + I_2 - I_3 - I_4}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \times \frac{L}{2} = \frac{\sum (X_{ij} \times \Delta I_{ij})}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}, \quad (8)$$

$$Y = \frac{I_1 + I_4 - I_3 - I_2}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \times \frac{L}{2} = \frac{\sum (Y_{ij} \times \Delta I_{ij})}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}. \quad (9)$$

结合(3)式中所假定的 PSD 输出电流信号的大小与所受光强成正比的关系能够得到 PSD 靶面离散坐标与激光光斑照射强度以及最终 PSD 响应位置关系:

$$X = \frac{\sum (X_{ij} \times \Delta I_{ij})}{\sum (\Delta I_{ij})} = \frac{\sum [X_{ij} \times U(i, j)]}{\sum [U(i, j)]}, \quad (10)$$

$$Y = \frac{\sum (Y_{ij} \times \Delta I_{ij})}{\sum (\Delta I_{ij})} = \frac{\sum [Y_{ij} \times U(i, j)]}{\sum [U(i, j)]}. \quad (11)$$

(10)和(11)式表明设计的仿真系统在理论上具有可行性。

## 3 系统实验

### 3.1 PSD 非线性数据探测实验

为了避免激光光斑的尺寸对实验获取 PSD 非线性数据的影响,将激光出射光斑以透镜聚焦的方式会聚成小径光斑并投射在 PSD 靶面上。实验过程中,二维位移平台带动 PSD 及其信号放大电路板进行相应的靶面扫描运动,其中扫描范围为  $-6 \sim 6$  mm,电机定位精度达到  $3.125 \mu\text{m}$ 。利用数据采集卡获取其信号电路输出的四路电极电压信号,并通过计算得到其对应的位置信息。图 2 是该 PSD 靶面经过  $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  靶面扫描实验得到的非线性网格数据。

在 PSD 非线性数据获取实验中,得到了其本身的非线性数据。接下来通过激光器衍射光斑接收实验、系统仿真实验及 PSD 光斑相应实验获得激光的衍射图像。

### 3.2 激光器衍射光斑接收实验

实际激光器出射激光具有复杂的光斑图样,为了能够准确地描述激光光斑的形状,实验采用高分辨率 CCD 相机(像素为  $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$ , 像元

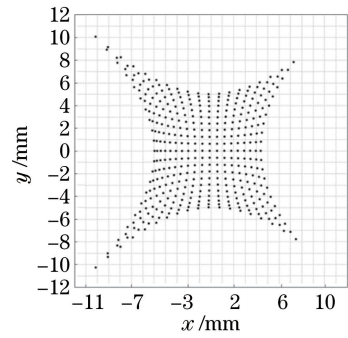


图 2 PSD 非线性数据网格

Fig. 2 Nonlinear data grid of PSD

尺寸为  $6.5 \mu\text{m}$ ),捕捉相关衍射图样。为了保证相机靶面能将激光衍射光斑全部接收,在相机前部安置倒置的放大倍率为 1.5 的扩束镜对激光光斑进行成像。

通过调节 CCD 靶面和激光器之间的相对位置能够获取不同距离处激光器的衍射光斑图样。考虑到振动、空气扰动及温度变化都会影响 PSD 光斑检测结果,采用在空气流动较小、杂质较少的负压超净室环境中进行实验,并通过中央空调调节净室环境为  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在实验进行过程中保证入射在 CCD 靶面上激光光强始终处于不饱和状态,其拍摄的图像信息能够准确反映出激光本身的衍射情况,如图 3 所示。

### 3.3 系统仿真实验

在激光器衍射光斑接收实验中,得到了关于 PSD 靶面的非线性数据和激光光斑强度分布数据。但二者所对应的分辨率不同,无法直接通过光斑重心公式进行计算。为了解决这一问题,可以采用如图 4 所示的方法将所获取的 PSD 数据与光斑强度数据进行像素匹配。

采用了数据处理模块将 PSD 的非线性数据和激光光斑强度数据进行对应的处理。之前的实验均是在目视情况下完成,具有一定的视觉误差和机械误差。为了保证最终数据的准确性,通过 Matlab 软件分析所获取的 PSD 数据和激光光斑强度数据,继而通过旋转矫正得到相对正确的结果,再根据 PSD 靶面尺寸和所使用的 CCD 靶面尺寸完成像元尺寸间的匹配。确定好所需要处理的像素后,通过三次样条插值对数据结果进行数据插值操作。

### 3.4 PSD 光斑响应实验

通过前述实验,获取了 PSD 靶面非线性数据以及不同距离处激光衍射光斑图样,再经过相关的仿真算法处理能够获得系统在衍射光斑图样对应位置的响应关系。为了探究仿真系统在实际使用过程中

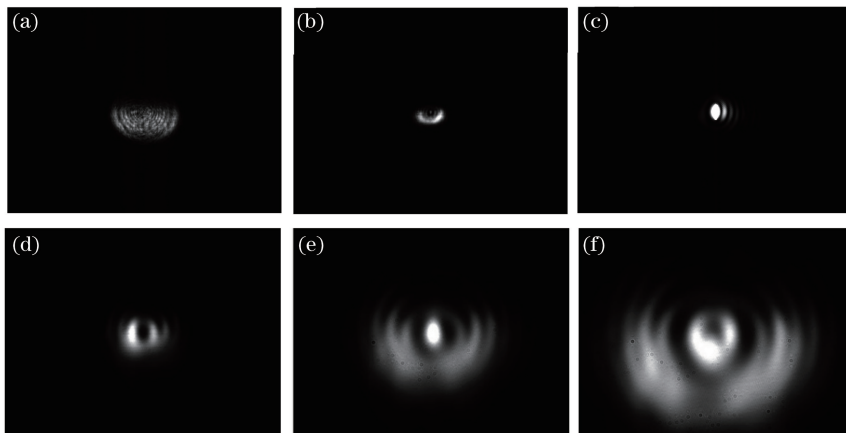


图3 不同空间距离处激光光斑光强分布图。

(a) 230 mm; (b) 700 mm; (c) 1350 mm; (d) 2440 mm; (e) 3580 mm; (f) 4750 mm

Fig. 3 Intensity distribution of laser spots at different spatial distances.

(a) 230 mm; (b) 700 mm; (c) 1350 mm; (d) 2440 mm; (e) 3580 mm; (f) 4750 mm

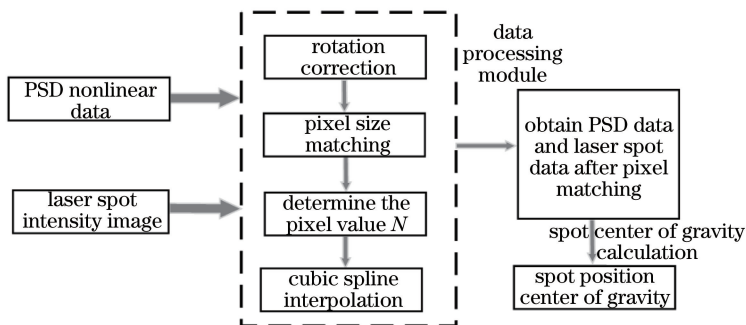


图4 系统仿真实验算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart of system simulation experiment

的精准性,对实际 PSD 位置响应进行输出探测。系统探测原理图如图 5 所示,分别在空间不同距离、靶面不同位置完成探测工作,其中所使用的 PSD 测量精度典型值达到  $4.2 \mu\text{m}$ , PSD 靶面的扫描范围为  $0 \sim 4.5 \text{ mm}$ 。

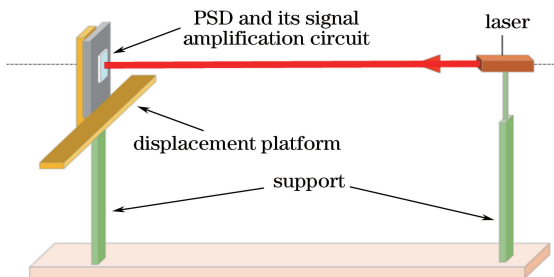


图5 PSD 光斑响应实验原理图

Fig. 5 Schematic of PSD spot response experiment

实验系统主要通过高精度位移平台(定位精度达到  $3.125 \mu\text{m}$ )带动 PSD 及其放大电路获取远方不同距离处激光器出射的光斑。在获得信号放大电路输出的电压信息后,通过 16 位数据采集卡完成对相

应电极信号的数据采集工作。数据处理后,输出对应的光斑位置信息。图 6 为实际实验中 PSD 探测器安装示意图,位移平台带动 PSD 进行水平及竖直方向的二维移动,并通过高精度激光测距仪完成径向位置的定位。

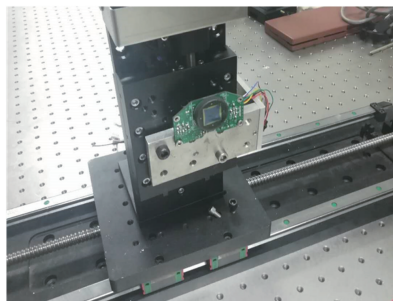


图6 PSD 探测器安装示意图

Fig. 6 Schematic of PSD detector installation

## 4 实验结果及分析

为了能与前述获取的激光光斑图像匹配,同时

考虑到激光衍射光斑形状随距离会产生变化,分别在对应距离进行实际的 PSD 采集实验。二者采集结果如表 1、表 2 所示。

表 1、表 2 分别描述了在空间不同距离处,激光光斑与 PSD 靶面相对位移为 0,1.5,3.0,4.5 mm 时的仿真系统输出数据和 PSD 实验输出数据。下面分别对这两种数据进行分析。

表 1 仿真系统输出结果

Table 1 Simulation system output results

mm

Relative distance	Spatial distance					
	230	700	1350	2440	3580	4750
0	-0.0489	-0.0070	-0.0365	0.0382	0.0190	-0.0096
1.5	1.7319	1.7501	1.8364	1.7398	1.5870	1.1200
3.0	3.3781	3.4104	3.4088	3.2320	2.8703	1.9078
4.5	4.4940	4.5729	4.6161	4.3587	3.5077	2.7548

表 2 PSD 实验输出结果

Table 2 PSD experimental output results

mm

Relative distance	Spatial distance					
	230	700	1350	2440	3580	4750
0	-0.0743	-0.0063	-0.0250	0.0373	0.0182	-0.0104
1.5	1.7409	1.7573	1.8431	1.7500	1.6010	1.1400
3.0	3.3807	3.4250	3.4287	3.2506	2.8888	1.9301
4.5	4.5050	4.5872	4.6300	4.3731	3.5270	2.7829

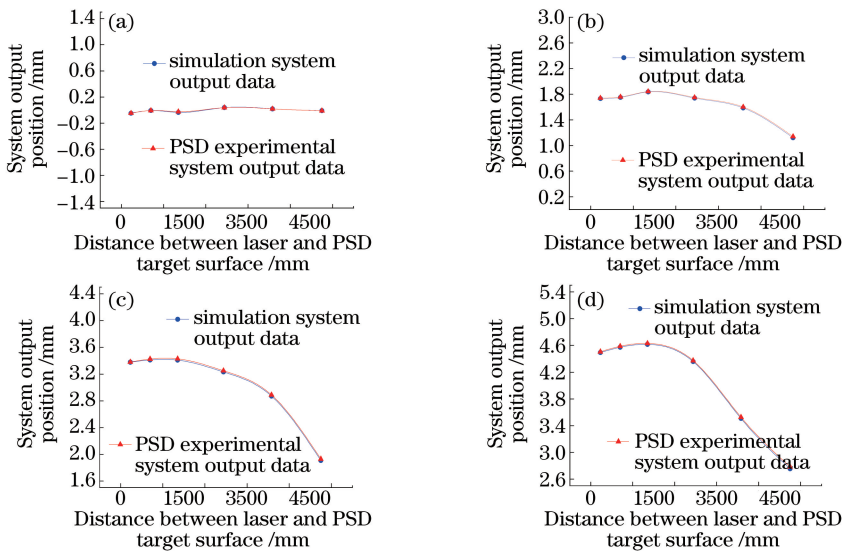


图 7 不同相对位移下仿真系统与实际系统结果对比图。(a) 0 mm;(b) 1.5 mm;(c) 3.0 mm;(d) 4.5 mm

Fig. 7 Comparison of simulation results and experimental results under different relative displacements.

(a) 0 mm; (b) 1.5 mm; (c) 3.0 mm; (d) 4.5 mm

表 3 仿真与实验误差结果

Table 3 Simulation and experimental error results

mm

Relative distance	Spatial distance					
	230	700	1350	2440	3580	4750
0	0.0015	0.0007	0.0115	-0.0009	-0.0008	-0.0008
1.5	0.0090	0.0072	0.0067	0.0102	0.0140	0.0200
3.0	0.0026	0.0146	0.0200	0.0186	0.0184	0.0223
4.5	0.0111	0.0143	0.0139	0.0144	0.0193	0.0281

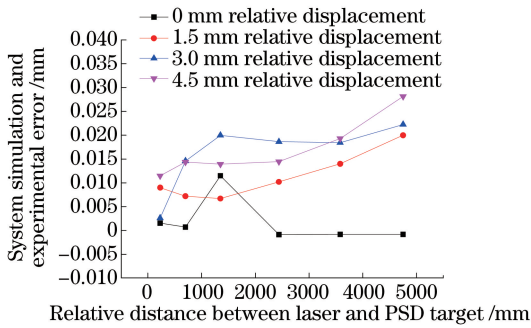


图 8 激光光斑与 PSD 靶面中心相对位移为 0, 1.5, 3.0, 4.5 mm 处误差曲线图

Fig. 8 Error curves diagram of the relative displacement between the laser spot and the PSD target surface center with 0, 1.5, 3.0, 4.5 mm

表 3 与图 8 分别给出了实验系统与仿真系统在平动过程中的误差值及其变化折线图。其中在 0~1.5 mm 变化范围内,所设计的仿真系统最大误差为 0.01 mm,在 3~4.5 mm 变化范围内,仿真系统最大误差仅为 0.026 mm。这表明所设计的空间激光准直标定系统能够在一定程度上替代空间不同距离处准直系统的标定工作。

然而在分析上述图像的过程中,发现仿真数据与实验数据间仍有一定误差,且激光光斑偏离 PSD 靶面越远,输出数据误差越大。分析原因主要可归纳为三点:

1) 所使用的 PSD 靶面为枕形,边缘具有弧形电极。在扫描得到非线性数据的弧形电极位置处,具有一定的扫描盲区。这样就会导致对比实验中得到的仿真系统输出结果偏小。

2) 在进行 PSD 探测实验过程时,由于机械结构的原因,PSD 没有完全对齐,从而实际探测出的结果出现一定误差。

3) 在完成 PSD 数据和激光光斑的获取过程中,主要采用了三次样条插值算法。插值算法得到的值与实际值之间仍有一定的差别,这也会造成仿真系统与实验系统间存在一定的误差。

## 5 结 论

本研究提出了一种模拟 PSD 探测激光光斑位置的方法:通过高分辨率 CCD 获取激光光斑的光强分布,实现对光斑衍射情况的模拟;通过搭建相关光学系统获取 PSD 非线性数据,实现了对探测系统中 PSD 的模拟。之后通过将激光光斑数据和 PSD 非线性数据引入设计的空间激光准直标定模型中,实现了 PSD 对激光光斑接收过程的相关仿真。

同时,设计了 PSD 的探测实验,利用独立设计的 PSD 探测电路完成了不同距离处 PSD 的探测工作,并将实际结果与仿真结果进行了对比分析。对比结果表明设计的仿真系统能够较高精度地描述实际 PSD 接收激光光斑的相关过程。此模型的建立,对空间 PSD 光斑的校准具有一定的指导意义,未来可以在长距离光斑位置测量及标定系统的应用中发挥出重要作用。

## 参 考 文 献

- [1] Luo K, Chen P F, Wang Y. Long guide rail alignment systems based on position sensitive detectors[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(1): 30-33.  
罗凯, 陈培锋, 王英. 基于光斑位置传感器的长导轨准直系统[J]. *激光技术*, 2018, 42(1): 30-33.
- [2] Yuan J, Qiu Z X, Shao J X. Automatic measuring system of alignment error based on laser collimator technique[J]. *Instrumentation Customer*, 2006, 13(5): 17-19.  
袁江, 邱自学, 邵建新. 基于激光准直的直线度误差自动测量系统[J]. *仪器仪表用户*, 2006, 13(5): 17-19.
- [3] Jiang B H, Chen W Y, Hu W F, *et al.* Mini-angle measurement using CCD and laser-collimation [J]. *Laser & Infrared*, 1998, 28(4): 233-234, 243.  
蒋本和, 陈文毅, 胡文斐, 等. 用激光准直及 CCD 检测的小角度测量系统[J]. *激光与红外*, 1998, 28(4): 233-234, 243.
- [4] Huang Y G. Study on micro-angle measuring basic technique of laser autocollimation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010: 18-20.  
黄银国. 激光自准直微小角度测量基础技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010: 18-20.
- [5] Wei P F, Liu J, Li X F, *et al.* Design of laser beam real-time monitoring and adaptive collimation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1590-1595.  
尉鹏飞, 刘军, 李晓芳, 等. 激光光束实时监测与自动准直系统设计[J]. *光学学报*, 2008, 28(8): 1590-1595.
- [6] Rogers A M, Lee J, Nett B E, *et al.* A non-contact laser-based alignment system (LBAS) for nuclear-physics experiments[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 707: 64-68.
- [7] Kuang C F, Feng Q B, Feng J Y, *et al.* Analyzing

- characteristic of the four-quadrant detector applied to laser alignment [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(4): 387-389.
- 匡萃方, 冯其波, 冯俊艳, 等. 四象限探测器用作激光准直的特性分析 [J]. *光学技术*, 2004, 30(4): 387-389.
- [8] Lu X C, Li X S, Liu G J. Development of the large range CCD coordinate to use in the vacuum laser collimation monitoring system [J]. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 2013, 37(1): 51-53.
- 卢欣春, 李学胜, 刘冠军. 基于真空激光准直监测系统的大量程 CCD 坐标仪的研制 [J]. *水电自动化与大坝监测*, 2013, 37(1): 51-53.
- [9] Li Y, Wang D, Guo X Y, *et al.* Fast and accurate laser beam automatic alignment system based on CMOS sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0916002.
- 李耀, 王丁, 郭晓杨, 等. 基于 CMOS 传感器的高速高精度激光光束自动准直系统 [J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0916002.
- [10] Liu Q, Yang X, Mu Y N. FPGA implementation for CCD driving and laser spot position detection [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 496/500: 1587-1590.
- [11] Cheng Z, Dong D F, Zhou W H, *et al.* High precision laser position detecting system based on position sensitive device [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081202.
- 程智, 董登峰, 周维虎, 等. 基于位置敏感器件的高精度激光位置检测系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 081202.
- [12] Guo L F, Zhang G X, Guo J B, *et al.* Study on spatial 3-D nonlinear correction technique for PSD [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2007, 18(5): 566-570.
- 郭丽峰, 张国雄, 郭敬滨, 等. PSD 空间三维非线性修正技术的研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2007, 18(5): 566-570.
- [13] Zhang F. Research of laser alignment system calibration method [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 25-32.
- 张丰. 激光准直测量系统校准方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012: 25-32.
- [14] Lin Y T. The development of PSD's comprehensive performance test systems [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2012: 35-38.
- 林永涛. PSD 综合性能检测系统的研制 [D]. 浙江: 浙江大学, 2012: 35-38.