

文章编号: 0258-7025(2009)04-0954-05

采用三线位置敏感探测器定位模型分析光斑 对定位精度的影响

方关明 曹益平 周力萍

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 在实际测量中,由于光斑具有一定尺寸和不对称性,在很大程度上影响了位置敏感探测器(PSD)的定位精度。根据激光光束高斯能连续分布的特征,建立了一种三线 PSD 定位模型,可以根据光斑的形状解算出该光斑特征状态下的定位误差。实验验证了该 PSD 定位模型的有效性。在激光三角测量法中采用该定位模型可以很好地补偿由于光斑自身不均匀性、传输过程中光斑尺寸变化以及激光与待测物体互作用产生的散斑所引入的定位误差,有效提高测量精度。实验中可以补偿的误差达到 0.07 mm。

关键词 光电子学; 光斑定位; 三线模型; 激光三角法; 位置敏感探测器

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0954

Analysis on the Position Sensitive Detector Positioning Error Caused by Laser Spot Using New Three-Ray Model

Fang Guanming Cao Yiping Zhou Liping

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract In practical measurement, the positioning precision of position sensitive detector (PSD) is greatly affected by the size and asymmetry of the spot. A three-ray positioning model of PSD caused by laser spot is established systematically based on the Gauss energy distribution character of laser beam. The positioning error is derived under the character of the spot by its shape. The validity of the PSD positioning model is proved by experiments. The positioning errors caused by the asymmetry of the spot, the change of the spot size in transmission, and the speckle caused by the interaction between the laser and object can be compensated by using this positioning model in laser triangulation measurement. And the precision of positioning can be improved effectively. Experiments show that the compensated error can reach 0.07 mm.

Key words optoelectronics; spot orientation; three-ray model; laser triangulation; position sensitive detector

1 引 言

在现代机械化的工业生产中,几何尺寸和表面轮廓的测量非常重要,测量精度直接影响产品的整体性能。随着工业自动化程度的提高,人们对测量技术提出了越来越高的要求,使这一技术向高精度、小型化、在线实时无接触测量的方向发展。在许多生产流水线上,例如造纸业的成品纸张厚度及其均

匀性检测、印钞行业钞票厚薄的实时监测并控制、电路板生产中敷铜反馈制作工艺以及薄膜厚度生产控制等。基于位置敏感探测器(PSD)激光测微头能够很好地满足在线实时测量要求,但测量精度受激光光斑的影响。为了提高测微头精度,有必要对光斑的影响展开系统的研究,在分析不同大小和形状激光光斑对 PSD 定位精度影响的基础上,提出有效的

收稿日期: 2008-04-30; 收到修改稿日期: 2008-07-07

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z333), 四川省科技攻关项目(2006Z01-028)和四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)资助课题。

作者简介: 方关明(1982-),男,硕士研究生,主要从事三维光学信息处理研究。E-mail: fgm1982@sohu.com

导师简介: 曹益平(1962-),男,教授,博士,主要从事光学三维传感、光电信息处理、激光干涉计量等方面的研究。

E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net (通信作者)

改进措施。

2 PSD 的定位原理

PSD^[1]是 20 世纪 80 年代发展起来的一种基于横向光电效应的新型位置传感器件,具有响应快、精度高、信号调理电路简单等优点。

PSD 结构如图 1 所示。当半导体的 P-N 结或肖特基(Schottky)结受到非均匀光照射时,除了在结的两边存在纵向光电效应外,结平面内还存在光电势的降落,从而在 PSD 两端产生光电流 I_1, I_2 ,当一光线入射在 PSD 的正中央处时 $I_1 = I_2$,而当光束入射到距中央点 x 处时, I_1, I_2 不再相等, x 与 I_1, I_2 的关系可表示为

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

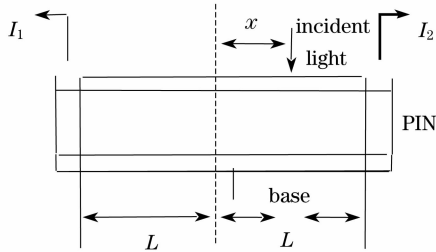


图 1 实际 PSD 的结构
Fig. 1 Structure of PSD

3 光斑大小对 PSD 定位精度的影响

PSD 的定位精度是保证激光测距精度的关键,而(1)式是在假设器件自身没有噪声且入射光是一理想光线的情况下推出来的。实际上器件线性度会造成影响^[2,3],自身存在的噪声,也会对定位精度有影响^[4],PSD 测量状态下受到背景光场的干扰^[5],入射光的模式和方向也会导致定位不准^[6,7],特别是实际入射光束是具有一定形状和大小的,如果直接将其看成理想光线,必将引入定位误差。吕爱民等^[8]曾经提出了双光束 PSD 定位模型,并用该模型分析了光斑对定位精度的影响。但该模型是建立在光斑能量相对均匀的前提下,当采用激光光束时,由于其能量不均匀,呈高斯分布,主能量高度集中在中央。因此根据激光光斑特征提出了一种三光线 PSD 定位模型,并在此模型基础上建立了真实激光光斑 PSD 定位模型。

3.1 三光线 PSD 定位模型

为了讨论激光光斑大小对 PSD 定位精度的影响,将入射到 PSD 的光束分成三束光束进行讨论,

如图 2 所示。一半径为 a 的光束可简化看作如图 2 所示的 1,2,3 束同时入射 PSD 感光表面的光线,而整个光束的中心为光束 2 所在位置。每束光线均会在 PSD 两端产生光电流,分别设为: $I_{11}, I_{12}, I_{21}, I_{22}, I_{31}, I_{32}$ 。光束 1~3 分别产生的总光电流设为 I_{1Z}, I_{2Z}, I_{3Z} ,即

$$\begin{cases} I_{1Z} = I_{11} + I_{12} \\ I_{2Z} = I_{21} + I_{22} \\ I_{3Z} = I_{31} + I_{32} \end{cases} \quad (2)$$

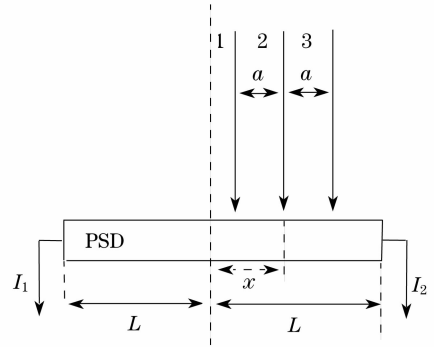


图 2 三光线入射模型
Fig. 2 Three-ray model

从 PSD 两端流出的光电流为

$$\begin{cases} I_1 = I_{11} + I_{21} + I_{31} \\ I_2 = I_{12} + I_{22} + I_{32} \end{cases} \quad (3)$$

根据(1)式可得到

$$x' = \frac{(x-a)I_{1Z} + xI_{2Z} + (x+a)I_{3Z}}{I_{1Z} + I_{2Z} + I_{3Z}} \quad (4)$$

式中 x' 为实际由 PSD 两端出射的电流计算所得的光束中心位置。 x 为光斑的几何中心。则两者的定位误差为

$$\begin{aligned} \Delta = x' - x &= \frac{(x-a)I_{1Z} + xI_{2Z} + (x+a)I_{3Z}}{I_{1Z} + I_{2Z} + I_{3Z}} - x \\ &= \frac{a(I_{3Z} - I_{1Z})}{I_{1Z} + I_{2Z} + I_{3Z}} = \frac{a(I_{3Z} - I_{1Z})}{I_1 + I_2} \end{aligned} \quad (5)$$

从(5)式分析可知,PSD 定位误差与激光光斑半径成正比,光斑越大,引入的定位误差可能也越大;但当光斑以几何中心对称分布时,无论光斑大小如何,其定位误差也为零;当光斑不以几何中心对称分布时,将引入定位误差。

3.2 实际光斑 PSD 定位模型

以三条光线 PSD 定位模型为基础,可以认为实际光斑就是足够多三光线定位模型的集合。由于 PSD 存在一定的分辨率(可设为 a_1),表明 PSD 对在分辨率内移动的光束是不敏感的。假设一束具有几何大小的光束入射到 PSD 上,可以将该光束分为

$2n+1$ 束光束。光斑几何中心位置处的光束设为第 i 束光束,由第 i 束光束向两侧每隔 a_1 看成一束光束。如图 3 所示,激光束从第 i 束光束向右侧依次为第 $i+1, i+2, \dots, i+n$ 束光束;向左侧依次为第 $i-1, i-2, \dots, i-n$ 束光束。每一束光束将分别引起 PSD 上的两路电流,分别设为: $I_{i1}, I_{i2}, I_{(i+1)1}, I_{(i+1)2}, I_{(i-1)1}, I_{(i-1)2}, \dots, I_{(i+n)1}, I_{(i+n)2}, I_{(i-n)1}, I_{(i-n)2}$, 每一束光束的总的光生电流为: $I_{iZ}, I_{(i+1)Z}, I_{(i-1)Z}, \dots, I_{(i+n)Z}, I_{(i-n)Z}$ 。同理可得

$$\begin{cases} I_1 = I_{i1} + I_{(i+1)1} + I_{(i-1)1} + \dots + I_{(i+n)1} + I_{(i-n)1}, \\ I_2 = I_{i2} + I_{(i+1)2} + I_{(i-1)2} + \dots + I_{(i+n)2} + I_{(i-n)2}, \end{cases} \quad (6)$$

$$x' = L(I_2 - I_1 / I_2 + I_1)。 \quad (7)$$

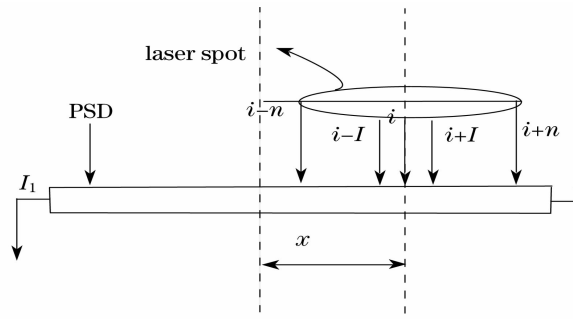


图 3 光斑模型示意图

Fig. 3 Illustration of the spot model

关于第 i 束光束对称的两束光束均可以看作图 2 中的第 1, 2, 3 束光束,那么所有的 $2n+1$ 束光束引起的总定位误差为

$$\Delta = x' - x = \frac{a_1 [I_{(i+1)Z} - I_{(i-1)Z}] + a_2 [I_{(i+2)Z} - I_{(i-2)Z}] + \dots + a_n [I_{(i+n)Z} - I_{(i-n)Z}]}{I_{1Z} + I_{2Z} + \dots + I_{(i-1)Z} + I_{iZ} + I_{(i+1)Z} + \dots + I_{(2i+1)Z}}, \quad (8)$$

其中 a_1 为第 $i \pm 1$ 束光束到第 i 束光束的距离; a_2 为第 $i \pm 2$ 束光束到第 i 束光束的距离; $\dots a_n$ 为第 $i \pm n$ 束光束到第 i 束光束的距离,即 $a_i = ia_1 (i=1, 2, \dots, n)$ 。可得

$$\Delta = \frac{a_1 \{ [I_{(i+1)Z} - I_{(i-1)Z}] + 2[I_{(i+2)Z} - I_{(i-2)Z}] + \dots + n[I_{(i+n)Z} - I_{(i-n)Z}] \}}{I_{1Z} + I_{2Z} + \dots + I_{(i-1)Z} + I_{iZ} + I_{(i+1)Z} + \dots + I_{(2i+1)Z}}. \quad (9)$$

当入射光束为光强相对于光束几何中心成完全对称分布时,有

$$\begin{aligned} I_{(i+1)Z} - I_{(i-1)Z} &= I_{(i+2)Z} - I_{(i-2)Z} = \\ &\dots = I_{(i+n)Z} - I_{(i-n)Z}, \end{aligned} \quad (10)$$

将(10)式代入(9)式可得 $\Delta=0$,说明此时光斑大小对 PSD 的定位精度没有影响。而当入射光束的光强不相对于中心对称时,可得 $\Delta \neq 0$,表明此时光斑对定位精度有影响,其尺寸大小对应(9)式中的 n ,光斑半径越大,表明 n 越大,对定位误差的贡献也越大。

4 实验与分析

为了验证三线模型的有效性和误差补偿思想的可行性,设计了如图 4 所示的激光三角法^[9]测量改进实验系统光路图。激光器发出的激光通过整形透镜组,照射在待侧面 C 上,反射后通过 $1 \times$ 成像透镜,在分光镜处被分为两束,一束照射在线阵 CCD 上,另一束照射在 PSD 上。可以认为分光镜分出的两束光具有相同的特性,根据照射在 CCD 上的光斑形状,可以算出定位误差 Δ 。

图 5 是在线阵 CCD 上采集的激光光斑的光强分布图,其特征总趋势呈带有噪声的高斯分布。由于激光光束自身不对称性,光束传输引入尺寸改变

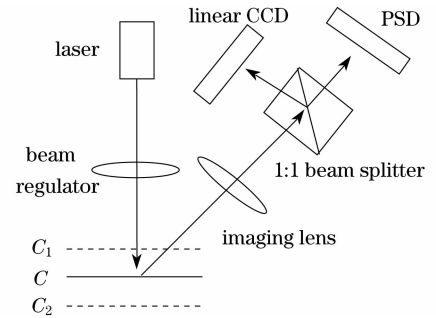


图 4 实验系统原理图

Fig. 4 Experimental setup

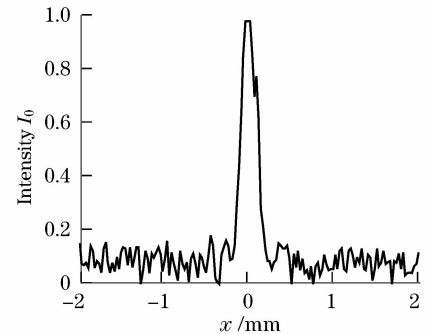


图 5 激光光斑光强分布曲线

Fig. 5 Laser spot intensity distribution

和噪声以及光与物体相互作用引起的散斑噪声,光斑特征发生了不同的改变,均会引入一定的定位误

差。无论光斑特征怎样,只要不随时间发生改变,均可利用三光线 PSD 定位模型有效解算出对应状态下的定位误差值。

实验中, C 为基准面,即为高斯光束的束腰处。待测面相对位置从 C_1 经 C 移到 C_2 ,每次移动 0.1 mm ,并用计量光栅记录位移真值 x_0 ,根据 PSD 上的光斑位置就可以分别算出移动对应位值的 Δ 值。图 6 是分别用 He-Ne 激光和半导体激光器进行实验采集到的一系列光斑的光强分布曲线并用三光线 PSD 定位模型解算的定位误差分布。图 6(a) 是在 -5 mm , -2.5 mm , 0 mm , 2.5 mm , 5 mm 位置采集的 He-Ne 激光光斑,呈现出较好的对称性,它所对应的定位误差如图 6(b) 虚线所示。定位误差呈无规则波动特征,这是因为在光斑对称性较好的

条件下,散斑是影响定位精度的主要因素。图 6(c) 是在 -5 mm , -2.5 mm , 0 mm , 2.5 mm , 5 mm 位置采集的固体激光光斑,可以看出对称性不如 He-Ne 激光,其定位误差如图 6(b) 中实线所示。在光斑较大且不对称时定位误差很大,达到 $70\text{ }\mu\text{m}$ 。可以看出,光斑不对称性是影响定位精度的主要因素,而由于半导体激光的相干性不如 He-Ne 激光,因此其散斑引起的定位误差相对小些。利用三光线 PSD 定位模型可以实现 PSD 定位误差补偿。如果在获取 Δ 的同时,根据(1)式计算出 PSD 对应位置的定位值 x ,这两者是一一对应的关系,这样就可根据误差补偿的思想,解出对应位置的定位真实值 x' 。图 7 是用半导体激光光源获取的误差补偿曲线。

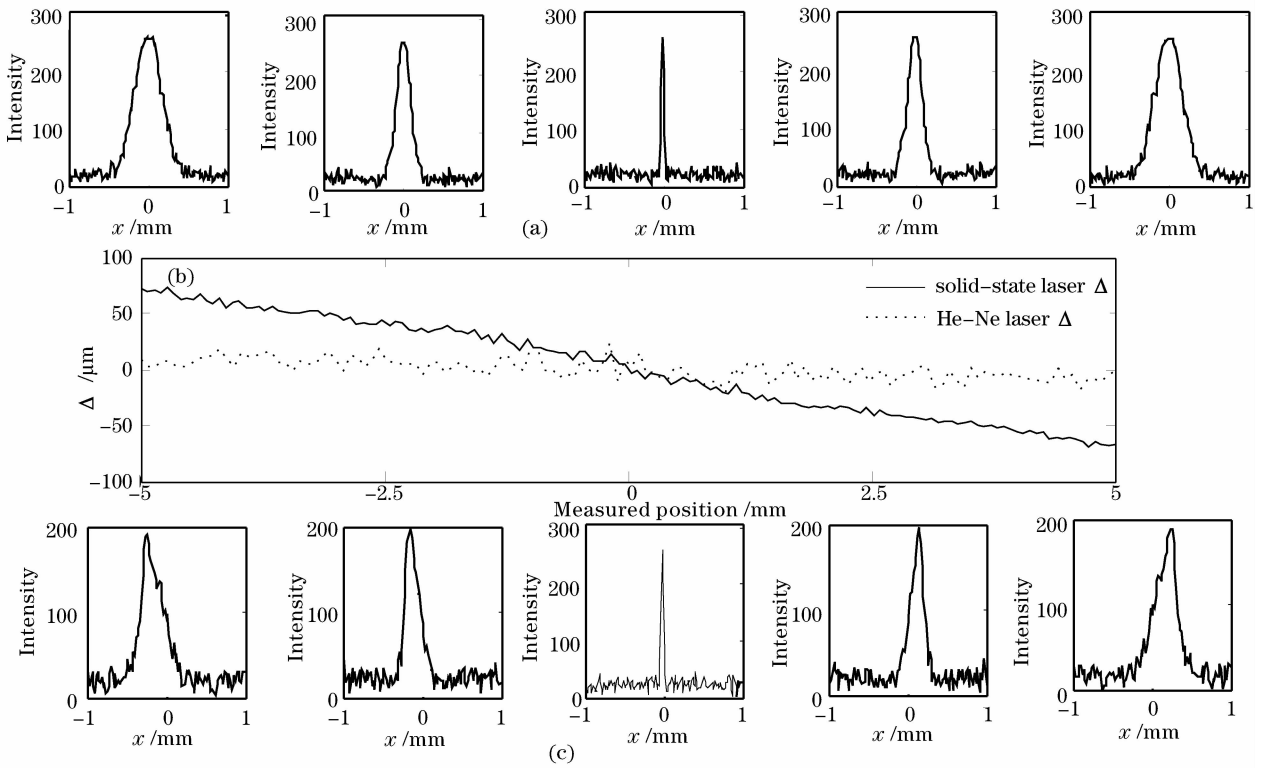


图 6 不同激光产生的光斑及定位误差

Fig. 6 Spots and positioning error of different lasers

从图中可看出,如果测量值经过补偿后,确实很接近于计量光栅表征的真实值,则在实际应用测量时,可去掉图 4 中 CCD 和分光镜。如果将图 7 所示的误差补偿曲线以表的形式存在 PSD 测量系统的数据处理单元中,由 PSD 得到测量值,通过查表法实时补偿 Δ 值,即可获得更为准确的定位值,有效提高 PSD 的定位精度。

5 结 论

通过分析激光高斯光束特征,建立了三光线 PSD 定位模型,并在此基础上推出了实际光斑 PSD 定位模型。用设计的实验验证了三光线 PSD 定位模型的有效性,并从实验分析可知,尽管激光器自身光束存在非对称性,光束传输中引起光斑的尺寸大小改变,激光与物体相互作用会引起散斑效应,影响

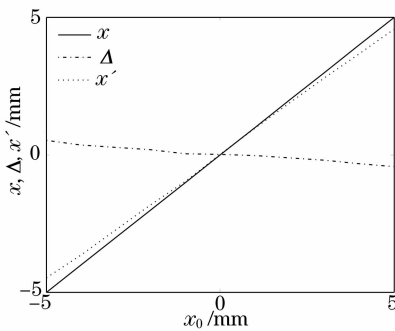


图 7 误差补偿曲线

Fig. 7 Error compensation

PSD 的定位精度,但只要知道最终在 PSD 上的光斑特征,总可以用三光线 PSD 定位模型解算出各光斑状态下的定位误差;如果利用三光线 PSD 定位模型事先测出位置和对应的定位误差并以表的形式存入 PSD 信号处理系统中,就可以用查表法实现实时误差补偿,从而有效提高 PSD 的定位精度。

参 考 文 献

- 1 Liang Fengchao, Xu Zhijun, Hu Jun *et al.*. Tiny displacement sensor based on PSD [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, **26**(3): 59~61
梁凤超, 续志军, 胡君等. 基于 PSD 的微位移传感器[J]. *传感器与微系统*, 2007, **26**(3): 59~61
- 2 Tang Jiuyao, Zhang Xiaohua. Improvement of the position accuracy and linearity in one-dimensional position sensitive detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1501~1505

- 唐九耀, 张晓华. 一维位置敏感探测器位置准确度和线性度的改进[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1501~1505
- 3 Meiying Ye. Improving linearity of position-sensitive detector using support vector machines[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(4): 205~207
- 4 Chellappan Narayanan, A. Bruce Buckman, Ilene Busch-Vishniac. Noise analysis for position sensitive detectors [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Easurement*, 1997, **46**(5): 1137~1144
- 5 Mo Changtao, Chen Changzheng. Study on background light compensation of photo-electric position sensitive detector [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 427~431
莫长涛, 陈长征. 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
- 6 Shang Hongyan, Zhang Guangjun. Analysis of the response characteristics of position sensitive detector under different models of light source[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(1): 93~96
尚鸿雁, 张广军. 不同光源模式下位置敏感探测器响应特性分析[J]. *光电工程*, 2005, **23**(1): 93~96
- 7 Yuan Hongxing, He Anzhi, Li Zhenhua *et al.*. Additional position error of PSD caused by diffraction of light source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 118~126
袁红星, 贺安之, 李振华等. 指示光源衍射所引起的位置敏感探测器附加定位误差探讨[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 118~126
- 8 Lü Aimin, Yuan Hongxing, He Anzhi. The research in the influence of beam spot on the precision of PSD [J]. *Laser Technology*, 1998, **22**(5): 294~297
吕爱民, 袁红星, 贺安之. 光斑模式对 PSD 定位的研究[J]. *激光技术*, 1998, **22**(5): 294~297
- 9 Zheng Defeng, Wang Xiangzhao Li Zhongling *et al.*. Dynamic measurement of small angle with two prisms [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1255~1259
郑德锋, 王向朝, 李中梁等. 一种使用双棱镜的动态小角度测量方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1255~1259