

文章编号: 0258-7025(2002)01-0069-04

# 用大像元 CMOS 线阵光电探测器和插值法 测量激光光斑中心位置

孟贤男, 曾理江

(清华大学精密仪器与机械学系精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**提要** 探讨了用大像元(0.8mm)CMOS 线阵光电探测器确定激光光斑中心位置的插值方法, 并对插值误差进行了理论分析和实验验证。采用线性插值可使测量分辨率提高 10 倍以上。通过实测两种激光准直中光斑中心位置的漂移, 验证了该探测器及插值方法的实用性。

**关键词** 激光准直 线阵光电探测器 插值法

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Measuring the Laser Beam Position by Using a CMOS Photodiode Array and Interpolation Method

MENG Xian-nan, ZENG Li-jiang

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** A method for determining the positions of laser beam has been introduced, in which a photodiode array combined with a CMOS signal processing circuit chip is used as a detector to measure the beam position with a large measurement range. Moreover, an interpolation method is used to improve the resolution of the photodiode array. With successfully measuring the beam shifts for the two kinds of laser alignment system, it is confirmed that the photodiode array and the interpolation method are available in laser alignment for long distance.

**Key words** laser alignment, photodiode array, interpolation method

## 1 引 言

激光准直技术在工程测量领域一直占据重要地位。一维激光准直中常用的光电探测器主要有二维像限光电探测器、位敏传感器和线阵 CCD 器件<sup>[1,2]</sup>等。这些器件有较高的测量灵敏度,但同时存在测量范围小等缺点。长距离激光准直由于光束漂移和大气抖动的影响<sup>[3]</sup>,要求用测量范围大、采样速度快的光电探测器。一般多像元线阵 CCD 不仅价格昂贵,而且由于像元多,导致行采样速度较低。

CMOS 线阵光电探测器由硅光电二极管阵列和

信号处理集成电路构成。信号处理芯片由 CMOS 材料制成。它具有低噪音、高灵敏度、高读出时钟等特点,很好地克服了线阵 CCD 测量范围小、采样速度慢的缺点。而它固有的大像元尺寸(0.8 mm)所带来的误差也通过插值算法得到了很好的解决。作为一个实际应用的例子,同时测量了两种激光准直系统中光斑中心位置的漂移。实验证明 CMOS 线阵光电探测器是长距离激光准直较理想的光电探测元件。

## 2 CMOS 线阵光电探测器的性能

收稿日期 2000-09-18;收到修改稿日期 2000-12-21

基金项目 国家自然科学基金(59875043)博士点基金。

作者简介 孟贤男(1975—),男(朝鲜族),清华大学硕士研究生,主要从事光学精密测量研究。E-mail:mengxn@post.pim.

实验中使用的 CMOS 线阵光电探测器(简称 LPD )S6494-128 是 Hamamatsu 公司的产品,外观及像元尺寸如图 1 所示。它具有尺寸大(128 个像元,受光尺寸 102.4 mm)、灵敏度高( $10^{-6}$  W)、响应速度快(线频达 2 kHz)等优点。可以通过 ISA 总线与计算机接口进行数据处理。为提高其空间分辨率,可采用插值的数据处理方法<sup>[4]</sup>。

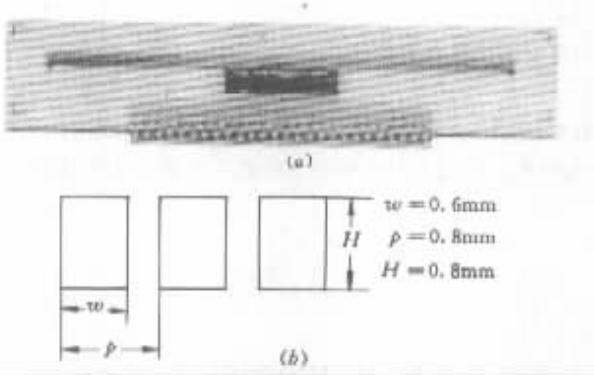


图 1 LPD 外观 (a) 和像元尺寸 (b) 图  
Fig.1 Complexion of LPD (a) and detail of elements (b)  
 $w = 0.6 \text{ mm}, p = 0.8 \text{ mm}, H = 0.8 \text{ mm}$

### 3 数据处理方法及误差分析

#### 3.1 光斑中心位置的插值计算

图 2 (a) 为用 LPD 所测的 He-Ne 激光光斑强度分布曲线。横坐标  $X$  表示光斑在探测器上的位置,纵坐标表示各像元所对应的电压值。假定光斑在 LPD 面上的光强分布是对称的,可以用如下的插值方法确定光斑中心位置。令参考电压值  $V_{\text{Ref}}$  为

$$V_{\text{Ref}} = (V_{\text{max}} - V_d) * K + V_d \quad (1)$$

其中  $V_{\text{max}}$  为光强峰值对应的电压值; $V_d$  为 LPD 暗电流所对应的电压值; $K$  为参考电压比例系数,本实验中  $K = 1/2$ 。在整个  $X$  轴上搜寻两组相邻像元  $X_{a1}, X_{a2}$  和  $X_{b1}, X_{b2}$ , 使其所对应电压值满足  $V_{a2} < V_{\text{Ref}} < V_{a1}, V_{b2} < V_{\text{Ref}} < V_{b1}$ , 并用线性插值法计算出与  $V_{\text{Ref}}$  相对应的  $X_a$  和  $X_b$

$$X_a = X_{a2} + p \times \frac{V_{\text{Ref}} - V_{a2}}{V_{a1} - V_{a2}}$$

$$X_b = X_{b1} + p \times \frac{V_{b1} - V_{\text{Ref}}}{V_{b1} - V_{b2}} \quad (2)$$

其中  $p$  为 LPD 像元间距,本实验中  $p = 0.8 \text{ mm}$ 。光斑中心位置  $X_o$  即为

$$X_o = \frac{X_a + X_b}{2} \quad (3)$$

在实际测量时连续采样 100 次,光斑中心位置取  $X_o$

的平均值。

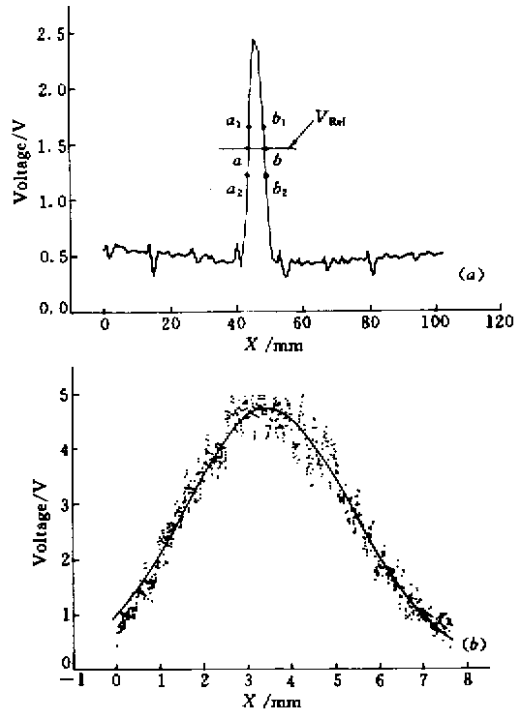


图 2 用 LPD (a) 和 CCD (b) 所测的光强分布曲线  
Fig.2 Intensity distribution of laser beam measured by LPD (a) and CCD (b)

#### 3.2 插值计算方法的误差分析

为分析实际光斑的光强分布特性,用像元尺寸为  $10 \mu\text{m}$  的面阵 CCD 对激光光斑进行了采样,图 2 (b) 为所测光斑光强的一维分布。对结果进行高斯曲线拟合可得

$$I = I_0 + \frac{A}{w + \sqrt{\pi/2}} \exp\left[-2 \frac{(x - x_c)^2}{w^2}\right] \quad (4)$$

其中  $I_0 = 0.13397 \text{ A}; A = 21.68162; w = 3.78075; x_c = 3.45485$ 。

用 LPD 对上述光斑进行采样的过程是一个离散数值积分的过程。图 3 表示用 LPD 对高斯曲线进行采样的过程。通过仿真计算可以得到每个像元所对应的光强值,用 (3) 式可求出光斑中心位置。插值算法所带来的误差  $X_{\text{err}}$  可用实际光斑移动量  $d$  与 LPD 仿真测量值  $d'$  之差来表示。

$X_{\text{err}}$  的大小主要受光腰尺寸  $w$  和参考电压值  $V_{\text{Ref}}$  的影响。图 4 分别给出了取不同参考电压值时光斑移动量  $d$  与误差值  $X_{\text{err}}$  的关系(参考电压值由 (1) 式计算,  $K$  分别为 0.1、0.5 和 0.9)。从图 4 中可以看

出,当  $K = 0.5$  时,插值计算方法所带来的误差最大值约为  $\pm 5 \mu\text{m}$ 。图 5 给出了  $K = 0.5$ ,  $w$  为 0.78, 3.78 和 6.78 时的误差曲线图。从图 5 可以看出  $w$  越大误差越小,并且误差最大值随  $w$  的变化不是完全线性的。

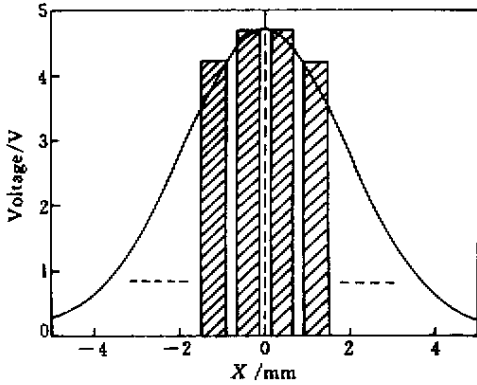


图 3 用 LPD 对高斯曲线的采样

Fig.3 Sampling the Gauss beam by LPD

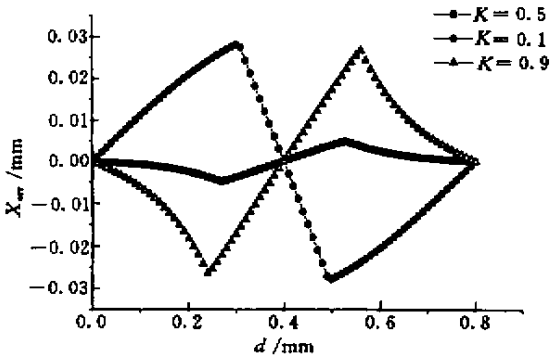


图 4  $K = 0.1, K = 0.5$  和  $K = 0.9$  时,光斑移动量  $d$  与误差值  $X_{\text{err}}$  的关系

Fig.4 Relationship between the beam shift  $d$  and error value  $X_{\text{err}}$  with respect to  $K = 0.1, K = 0.5$  and  $K = 0.9$

综上所述,用插值法可提高 LPD 的分辨率。插值法的误差主要来源于光强分布的非对称性和参考值附近光强随位置变化的非线性。选择合适的电压参考值  $V_{\text{Ref}}$  和光斑尺寸  $w$  可减小此误差。

### 3.3 插值法确定光斑中心位置的比对实验

将 He-Ne 激光器发出的激光扩束 10 倍后入射到 LPD 上。LPD 固定在移动分辨率为  $10 \mu\text{m}$  精密移动台上,以步长  $1 \text{ mm}$  的间隔横向移动,用 LPD 测量出由于工作台移动而导致的光斑中心位置变化,并与移动台上测微螺杆的读数进行比较。测量结果如图 6。用 LPD 测出的光斑中心位置变化与测微螺杆的读数之间的相关系数优于 0.9997,拟合

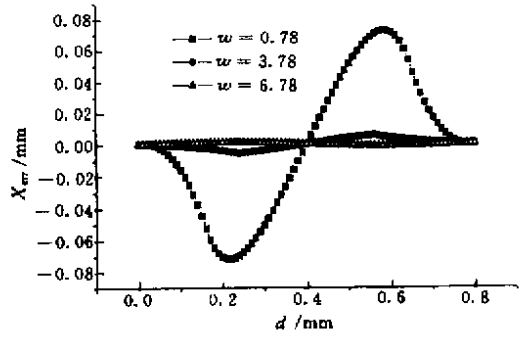


图 5  $K = 0.5$ ,  $w$  为 0.78, 3.78 和 6.78 时,光斑移动量  $d$  与误差值  $X_{\text{err}}$  的关系

Fig.5 Relationship between the beam shift  $d$  and error value  $X_{\text{err}}$  with respect to  $w = 0.78, 3.78$ , and  $6.78$  in the case of  $K = 0.5$

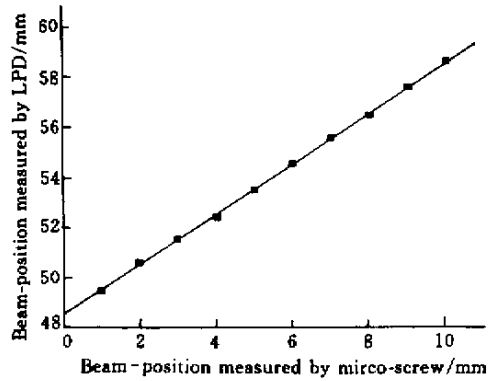


图 6 光斑中心位置比对测量结果

Fig.6 Beam-position Measured by using LPD and a micro-screw

后的直线斜率等于 1.00019,曲线拟合标准偏差为  $73 \mu\text{m}$ 。说明用像元间距为  $800 \mu\text{m}$  的 LPD,通过插值可使分辨率达  $73 \mu\text{m}$ ,提高测量分辨率约 10 倍。主要测量误差是 LPD 像元的曝光不均匀性和激光光斑本身的不对称造成的,约  $40 \sim 50 \mu\text{m}$ 。这也是实际测量分辨率( $73 \mu\text{m}$ )与理论计算结果(插值法误差  $\pm 5 \mu\text{m}$ )有较大出入的主要原因。另外,工作台的移动精度、各机械部件的稳定性、外界环境的干扰等因素也不同程度地引入了测量误差,约  $20 \mu\text{m}$ 。

## 4 对长距离激光准直中光斑中心位置漂移的测量

LPD 具有测量范围大,响应速度快的特点。不仅适用于对长距离激光准直中光斑位置的测量,也可用于同时比对测量不同准直仪的光斑漂移情况,

减少以往由于光电传感器不同而引入的测量误差。我们用 LPD 同时测量了两台激光准直仪在 66 m 处的光束漂移情况。一台是普通的激光准直仪(简称 CCC),即 He-Ne 激光器发出的激光 10 倍扩束后被用于测量。另一台是由二元光学器件制成的激光准直仪(简称 NCC)<sup>5]</sup>,激光束经 40 倍扩束后入射到二元光学器件产生无衍射光束,使在光斑中心不超过 5 mm 的范围内集中了大部分能量,可用于准直测量。测量时,将两台准直仪放在距 LPD 66 m 远的地方,并使来自不同准直仪的两光斑同时入射到 LPD 上。这时在 LPD 面上 NCC 的激光光斑直径约为 5 mm,而 CCC 的激光光斑直径约为 10 mm。所测的垂直方向光束漂移曲线如图 7 所示。

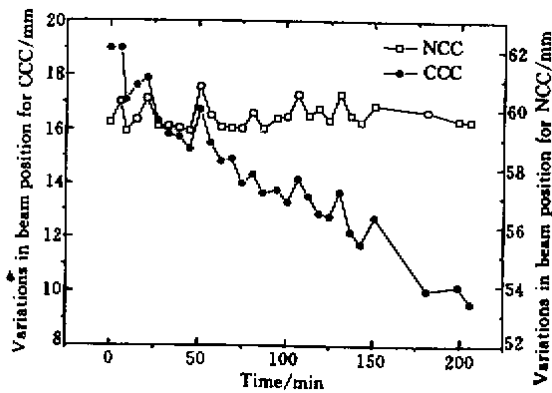


图 7 NCC 和 CCC 激光准直仪在垂直方向上的光束漂移曲线

Fig.7 Beam shifts in vertical direction with respect to NCC and CCC laser alignment systems

在 206 min 内,CCC 的激光光斑中心位置漂移了约 8.64 mm,而 NCC 的激光光斑中心位置变动最大值为 1.54 mm。说明用二元光学器件产生的无衍射光束进行准直测量可有效减少光斑中心位置漂移。而且该准直仪在 120 m 的测量范围内仍能保持 5 mm 的光斑直径,是一种比较好的准直系统。

## 5 结 论

在分析了 CMOS 线阵光电探测器性能的基础上,提出用线性插值的方法提高该探测器的空间分辨率,并对由此产生的误差进行了分析和实验验证。用像元间距为 800  $\mu\text{m}$  的 LPD,通过插值可使测量分辨率达到 73  $\mu\text{m}$ ,提高测量分辨率 10 倍以上。LPD 具有测量范围大,响应速度快的特点,非常适用于长距离激光准直。也可用于多个光斑的比对测量,减

少了以往由于探测器不一致引入的测量误差,使测量结果有很好的可比性。

致谢 本实验得到清华大学殷纯永教授的指导与帮助,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Hao Qun, Li Dacheng, Cao Mang. Using linear array CCD for long distance diffraction alignment-measurement [ J ]. *Optical Technology* ( 光学技术 ), 1999, ( 2 ) 60 ~ 62 ( in Chinese )
- 2 Hao Qun, Zhao Yang, Li Dacheng et al.. Straightness measurement using laser diode and CCD camera [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ), 1999, **18**( 3 ) 215 ~ 220 ( in English )
- 3 Guo Zhenhua, Xu Desheng, Wang Shipeng et al.. Effect of atmospheric turbulence on laser beam propagation [ J ]. *Laser Technology* ( 激光技术 ), 1992, **16**( 2 ) 65 ~ 72 ( in Chinese )
- 4 Wang Rong. Application of interpolation method in laser alignment [ D ]. *Master Thesis. Tsinghua University*, 1984. 35 ~ 73 ( in Chinese )
- 5 Wang Haitao, Yin Chunyong, Wang Dongsheng. 100 m diffraction-free alignment beam [ J ]. *Optical Technology* ( 光学技术 ), 1999, ( 3 ) 32 ~ 33, 37 ( in Chinese )