

文章编号: 1001-3806(2004)04-0370-03

PSD 器件自动化标定与非线性修正技术研究

李忠科, 秦永元

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘要: 介绍了一种应用数控平台对二维位敏探测器 (position sensitive detector, PSD) 器件进行在线测量并用人工神经网络对其非线性进行修正的方法。对光斑在二维 PSD 光敏面上的横向位移, 以光斑的二维坐标集合为人工神经网络的期望输出, 以 PSD 输出的二维坐标集合为人工神经网络的训练样本, 对人工神经网络进行训练。利用人工神经网络所具有的非线性映射能力, 在训练结束后即可建立 PSD 输入与输出的近似线性关系。结果表明, 修正后的 PSD 器件可以实现任意输入的实时非线性修正。

关键词: 二维位敏探测器; 人工神经网络; 非线性修正; 激光

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

Research of on-line measurement and non-linearity correction of two dimension PSD device

LI Zhong-ke, QIN Yong-yuan

(College of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: By using a numerically controlled 2-D shifter, measurement data of PSD are obtained and then artificial neural networks are used for non-linearity correction of two dimensional PSD. When a light point moves in the detective area of PSD, the coordinates of the point at different positions are used as designed output of the networks and the output coordinates of the PSD are used as learning input of the networks, and a learning procedure is carried out. According to the ability of non-linear mapping of artificial neural networks, a linear relationship between input and output of the networks is set up after learning. Results show that learned networks can correct any non-linearity error in real time.

Key words: position sensitive detector (PSD); artificial neural networks; non-linearity correction; laser

引 言

二维位敏探测器 (position sensitive detector, PSD) 是一种新型的半导体位置敏感探测器, 它除了具有光电二极管阵列和电荷耦合器件 (charge coupled devices, CCD) 器件所具有的定位性能外, 还具有灵敏度高、分辨率高、响应速度快、电路简单的特点, 因而正在逐步被人们所重视。由于 PSD 器件是一种连续型半导体器件, 存在表层电阻不均匀, 电极的交叉影响等因素, 非线性起伏不可避免。为了提高测量精度, 在应用中必须对 PSD 的非线性进行修正。通常在标准网格交叉点上对二维 PSD 进行采样, 再配合双一次或双二次插值算法, 进行非线性修正^[1]。

在进行插值时, 常用查表算法来确定光斑坐标。由于 PSD 非线性的存在, 标准的折半查找算法失效, 要对其进行改进^[2]。人工神经网络具有极强的非线性映射能力, 可以用来进行 PSD 器件的非线性修正, 计算机仿真计算表明, 利用人工神经网络可以有效地消除 PSD 的非线性, 提高传感精度^[3]。作者介绍了应用二维数控平台和两个独立的单输出多层人工神经网络对二维 PSD 器件进行在线测量和训练的方法和实例, 并用文中介绍的装置和软件对工程中使用的 60 余个二维 PSD 器件进行了标定, 效果十分理想。

1 PSD 器件结构与原理

PSD 的基本结构是一个大面积的 p-n 结, 由 3 层组成: p 层、i 层和 n 层, 如图 1 所示。这种 PIN 结构具有一般 PIN 光电二极管类似的优点, 即更高的光电转换效率、更高的响应速度和灵敏度。PSD 分为一维和二维两种类型, 分别用于一维和二维光斑位置测量。

作者简介: 李忠科 (1956-), 男, 博士研究生, 教授, 现主要从事精密仪器与机械、计算机测量与控制方面的研究。

E-mail: lizhongke@vip.sina.com

收稿日期: 2003-08-25; 收到修改稿日期: 2003-12-12

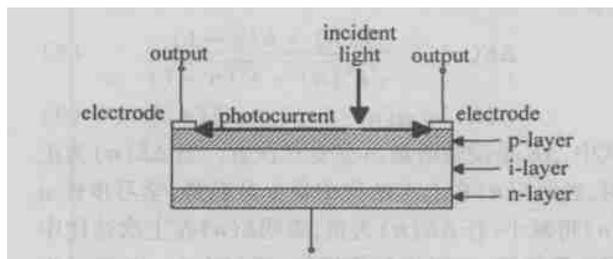


Fig. 1 PSD sectional view

当一光斑落在 PSD 光敏面上时,在入射位置会生成与入射光能量成比例的光生电荷,在横向电场的作用下,电荷向各电极运动,形成电流。流向一个电极的电流与该电极到光斑能量中心的距离成反比,以单面四侧改进的表面分流电极型二维 PSD (pin-cushion or improved tetra-lateral type) 为例,可用简单的公式和图形表达 PSD 输出信号与光斑坐标位置之间的关系,见图 2^[4]和(1)式,(2)式。

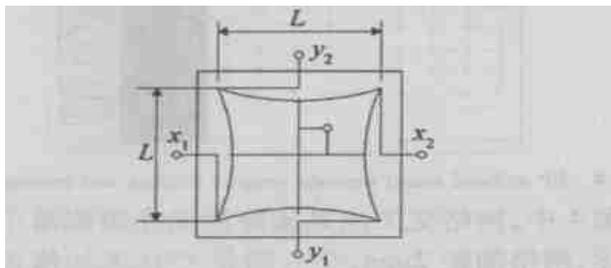


Fig. 2 Relationship between light spot and coordinates

$$\frac{(x_2 + y_1) - (x_1 + y_2)}{x_1 + x_2 + y_1 + y_2} = \frac{2x}{L} \quad (1)$$

$$\frac{(x_2 + y_2) - (x_1 + y_1)}{x_1 + x_2 + y_1 + y_2} = \frac{2y}{L} \quad (2)$$

式中, x_1, x_2 和 y_1, y_2 代表各电极的输出信号(光电流), x, y 是光斑能量中心的坐标。对于实际的器件,由于存在表层电阻不均,电极的交叉影响等因素,非线性起伏不可避免,使由公式计算出的坐标与光斑的实际坐标不能很好重合。图 3a 是一实际器件的测试结果,所用光斑直径约 4mm,能量 0.3mW,

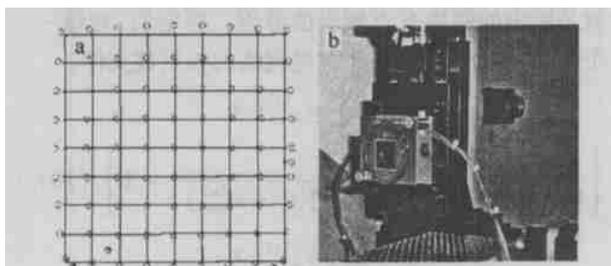


Fig. 3 a - one instance b - 2-D shifter

波长 650nm, 网格间距 2mm, 使用的是国产 PSD 器件 W203, 其主要性能指标如下:有效芯片面积 21mm × 21mm; 峰值灵敏度 0.6A/W ($\lambda = 900\text{nm}$); 位置分辨

率 12 μm ; 位置检测误差 $\pm 300\mu\text{m}$ (半径 2.5mm 内最大值); 位置检测误差 $\pm 600\mu\text{m}$ (半径 5mm 内最大值); 工作温度 - 10 $^{\circ}\text{C}$ ~ + 60 $^{\circ}\text{C}$ 。

在图 3a 中, 网格交叉点是光斑的实际坐标, 而空心圆是用公式计算出的坐标, 可见离中心越远, 两者偏离越大。生产商用位置检测误差表示这一偏差。为了提高测量精度, 在应用中必须对 PSD 的非线性进行修正。通常在标准网格交叉点上对二维 PSD 进行采样, 根据测量结果, 建立计算坐标与实际坐标的映射关系, 从而修正 PSD 的非线性。

2 数据采集

为了建立误差修正的数学模型, 首先要在标准网格上采集 PSD 信号, 激光束以标准间隔在 PSD 光敏面上扫描, 用(1)式,(2)式计算光斑的坐标, 得到一个采样数据集。为此, 制作了二维数控平移支架, 将待测 PSD 器件固定于其上, 激光束垂直于器件表面入射(见图 3b), 在计算机的控制下, PSD 可相对激光束移动, 并用一个 16 位 A/D 变换器采集 PSD 器件的输出信号, 然后用公式计算出坐标。信号采集的工作过程叙述如下: (1) 装夹, 将 PSD 器件安装到平移支架上, 并使光斑大致在 PSD 中心; (2) 自动确定比例系数, 光斑向右移动一固定距离, 根据计算的距离和实际距离确定比例系数; (3) 自动寻找 PSD 中心, 根据当前位置使光斑向中心移动, 直到准确找到中心; (4) 光斑移动到左下角; (5) 开始扫描, 光斑到达右上角时数据采集结束; (6) 存储数据文件; (7) 光斑回到中心, 准备下一个器件的数据采集。

3 非线性误差修正

通常用线性插值对 PSD 的非线性误差进行修正。当标定所用的网格足够密集时, 对于一个任意位置的光斑输入, 通过检索, 在标定数据集中找到斑周围的数个已知点, 再进行插值处理, 便可得到近似正确坐标。插值方法有几个缺点: 因为要使用查找算法, 插值方法降低了实时性; 当光斑在标定区域之外时无法进行插值; 当光斑落在网格线上时要特殊处理。

神经网络经训练后具有极强的非线性映射能力, 对于前馈型神经网络, 已经证明如网络中间层可以根据需要任意设置神经元个数, 中间层结点用 S 型激活函数, 输出结点用线性函数, 人工神经网络可以任意精度逼近任何连续函数^[5~7]。利用这一功能可直接用神经网络实现 PSD 器件的非线性修正。

3.1 网络结构

采用了结构完全相同的两个单输出结点网络,分别输入 x, y 坐标。与采用两个输出结点的单个网络相比,减少了交叉耦合,降低了训练难度,也可以利用数据的相关性,有针对性地选择初始权值,加快学习过程。

3.2 计算公式

中间层激活函数:

$$f(s) = r \left[\frac{2}{1 + \exp(-s)} - 1 \right] \quad (3)$$

式中, f 为激活函数, r 为一常数, s 为该神经元的输入。

$$\text{评价函数: } E = \frac{1}{2} \sum_p (d_p - f_p)^2 \quad (4)$$

式中, E 为误差函数, p 为训练样本数, d_p 为期望输出, 即光斑的实际坐标, f_p 为网络实际输出。

误差梯度与权值调节公式:

$$\text{对于中间层} \quad \delta_i = (r^2 - f_i^2) \delta W \quad (5)$$

$$\text{对于输出节点} \quad \delta = d_p - f_p \quad (6)$$

对第 j 层第 i 个节点, 权值调整公式为:

$$W_i^{(j)} \leftarrow W_i^{(j)} + \eta \delta_i^{(j)} f^{(j-1)} \quad (7)$$

式中, j 是层序号, i 是同一层节点序号, δ 是与节点误差梯度有关的量, η 是学习步长, W 是权向量, f 是节点的输出。(5) 式中没有使用 f 的导数, 但试验中发现比使用 f 的导数效果更好。在(7)式中, 向误差梯度相反的方向调节权值, 将使输出误差减小。

3.3 BP 学习算法的改进

基本的反向传播算法为最速下降反传算法 (steepest descent back propagation, SDBP), 将其用于实际问题时, 收敛速度极慢。在多层网的情况下, 误差曲面可能有多个局部极小点, 而且在参数空间的不同区域曲率的变化很大, 在平坦的区域需要一个大的学习速度, 而在曲率大的区域则需要一个小的学习速度, 固定的学习率很难适应不同的情况。在梯度接近 0 的地方, 即使没靠近局部极小点, 算法实际上也将陷入停滞。如果在迭代过程中根据系统误差不断动态地改变学习率, 在总误差呈上升趋势时, 减小学习率的值, 使学习速率受到一定的抑制; 在总误差呈下降趋势时增大学习率的值使学习加速; 当总误差非常小时仅进行步长的微调。这种对学习率不断增强和适时地抑制的相互作用机制可使迭代过程较快脱离局部极小状态, 加速收敛速度, 并且降低对参数值的敏感性。根据上述思想, 设计算法如下:

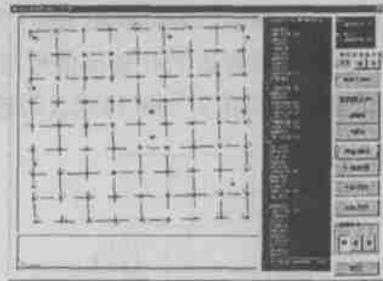
$$\Delta E(n) = \frac{E(n) - E(n-1)}{\sqrt{E^2(n) - E^2(n-1)}} \quad (8)$$

$$\eta(n) = \eta(n-1) [1 - \Delta E(n)] \quad (9)$$

式中, ΔE 是误差增量, n 是迭代次数。当 $\Delta E(n)$ 为正时, 表面 $E(n)$ 在上次迭代中呈上升趋势, 学习步长 $\eta(n)$ 将减小; 若 $\Delta E(n)$ 为负, 表明 $E(n)$ 在上次迭代中呈下降趋势, 学习步长将增加; 若 $\Delta E(n) \rightarrow 0$, 学习步长的改变将非常微小。

3.4 非线性误差的修正效果

图 4 是神经网络软件的界面。在学习过程中, 右下方窗口中实时显示误差曲线, 视收敛情况, 可动态增减中间层神经元的数量, 以求达到最好结果。



在图 4 中, 网格交叉点是实际激光光斑能量中心的坐标, 网格间距 2mm, 空心圆是 PSD 未加修正的输出。以 PSD 的原始输出作为神经网络训练输入矢量, 以网络输出与理想输出差值的平方和为误差函数, 对神经网络进行训练, 训练结束后, PSD 的非线性误差大大下降, 对 60 多个 PSD 器件的处理表明经过神经网络修正后, 均方误差下降为原来的 1/8 至 1/10, 且网络的泛化能力很好, 即对不是训练集中的输入 (或不在交叉点上, 或在区域之外), 也能进行正确的非线性修正。在标定时, 由于安装误差, PSD 器件的 x 轴与平移台的 x 轴不完全平行, 在软件中进行了处理, 将平台坐标向 PSD 坐标进行了投影, 这就是图中的网格有点倾斜的原因。标定后, 对每一个 PSD 器件形成了一个神经网络的权系数文件。

$$x = \sum_i w_{ix}^{(a)} r \times$$

$$\left\{ \frac{2}{1 + \exp[-(w_{ix}^{(m)} x_v + w_{iy}^{(m)} y_v + w_{ix}^{(m)})]} - 1 \right\} \quad (10)$$

$$y = \sum_i w_{iy}^{(a)} r \times$$

$$\left\{ \frac{2}{1 + \exp[-(w_{iy}^{(m)} x_v + w_{ix}^{(m)} y_v + w_{iy}^{(m)})]} - 1 \right\} \quad (11)$$

式中, x_v, y_v 是应用中对任意位置的光斑所产生的

(下转第 416 页)

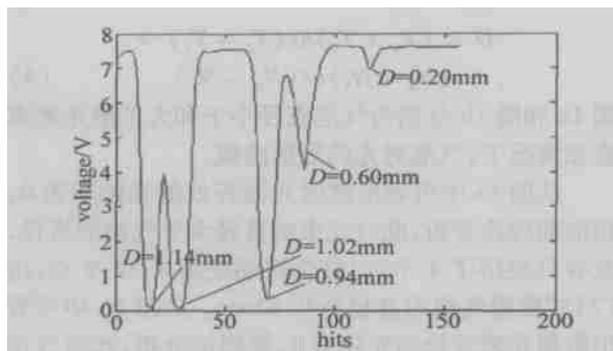


Fig. 4 Scatter light curve of bubble flow

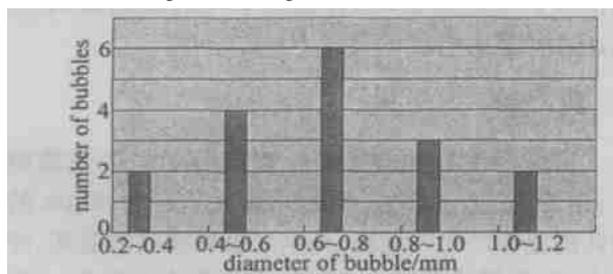


Fig. 5 Distribution of bubble size

在测量过程中,误差来源主要有两个:(1)经气泡散射后的光线,有一小部分会到达探测器,在理论波形中没考虑,所以理论光强值偏低;(2)实际中光

功率的浮动和气泡在上升过程中的“摆动”,会使实际波形变的不平滑。对于理论与实际之间误差的定量与半定量关系,是以后要研究的。

4 结论

直接通过探测散射光来确定气泡的尺寸分布,与 phase-Doppler anemometry 法和 PIV 法相比,信息处理量小、直观、简单、方便。在确定气泡的尺寸分布后,可确定探测点所处的尾流中位置,因而推测舰船通过的时间及性质。应用于鱼雷,便可实现鱼雷的自导。

参考文献

- [1] 钱祖文,李保文,郑晓瑜, *et al.* 气泡幕中的声传播及其反演[J]. 中国科学, 1992(A2):193~199.
- [2] NAQWI A, DURST F, LIU X Zh. Two optical methods for simultaneous measurement of particle size, velocity and refractive index [J]. Appl Opt, 1991, 30(33):4949~4959.
- [3] PEREIRA F, GHARIB M. Defocusing digital particle image velocimetry and the three-dimensional characterization of two-phase flows [J]. Meas Sci Technol, 2002, 13:683~694.
- [4] van de HULST H C. Light scatter by small particles [M]. New York: Wiley Press, 1957. 119~130.

(上接第 372 页)

PSD 原始位置输出, r 是常数, x, y 是神经网络输出的修正坐标, w 是权系数, 上标 o, m 分别表示输出层和中间层, 下标中 i 表示同层神经元节点序号。对中间层节点, 权值下标中 th 表示神经元阈值, 中间的 x, y 分别表示 x 坐标神经网络中的权值和 y 坐标神经网络中的权值, 右边的 x, y 分别表示该权值与输入 x_v, y_v 相关。对输出节点, 权值下标中的 x, y 分别表示该权值属于 x 坐标神经网络和 y 坐标神经网络。图中不在网格交叉点上的空心圆和实心圆是用软件对神经网络泛化(插值)能力的考察。空心圆模拟一个 PSD 原始位置输出, 实心圆是神经网络输出的对应真实坐标, 可见效果很好。

4 结论

(1) 该方法可快速对一维或二维 PSD 器件进行自动化样本数据采集和非线性修正, 形成一个针对被标定器件的权系数文件, 对器件的误差特性不敏

感, 通用性好。(2) 与采用一个双输入双输出神经网络相比, 采用两个分离的双输入单输出神经网络产生二维向量的两个分量可缩短训练时间, 更易于达到要求的精度, 此策略可应用于更高维向量。(3) 该方法可应用于其它需要非线性映射的场合。

参考文献

- [1] 袁红星, 王志兴, 贺安之. PSD 非线性修正的算法研究 [J]. 仪器仪表学报, 1999(3):16~21.
- [2] 易亚星, 李忠科, 邓方林. PSD 精密测量中的二维表检索算法 [J]. 计算机测量与控制, 2002(5):284~285.
- [3] 莫长涛, 陈长征, 张黎明, *et al.* 二维 PSD 非线性修正共轭梯度算法 [J]. 东北大学学报, 2003, 24(5):342~343.
- [4] 王爵树, 张新. 非线性二维光电位置传感器(PSD)研究 [J]. 集成电路通讯, 1995(3):11~17.
- [5] HAGAN M T. Neural network design [M]. 北京:机械工业出版社, 2002. 227~255.
- [6] 王宗炎, 洪振华. BP 网学习算法的改进及在模式识别中的应用 [J]. 南京航空航天大学学报, 1994(11):216~218.
- [7] NILSSON N J. Artificial intelligence anew synthesis [M]. 北京:机械工业出版社, 1999. 23~30.