

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.012

# 基于PSD的轴系对中测试系统非线性校正方法研究\*

李 博,高 艺\*,曹国华,柳常清  
(长春理工大学 机电工程学院,吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对轴系对中测试系统的核心器件—位置敏感探测器(PSD)存在较大非线性误差、PSD输出坐标不能正确反映入射光点实际位置的问题,为提高对中的测试精度,设计了基于PI微位移平台的在线校定装置,提出了基于BP神经网络的非线性校正算法,进行了数据采集和非线性校正实验,并对采集数据和校正后数据分别进行了Matlab仿真分析。研究表明,基于BP神经网络的算法实用高效,采用该算法校正后的PSD线性度误差均低于 $3.9\ \mu\text{m}$ ,极大地减少了非线性的影响,使得B区的线性度和数据置信度得到了大幅改善,在不增加成本和设备复杂度的前提下,有效提高了整个对中系统的精度。

**关键词:** 二维位置敏感探测器;非线性校正;人工神经网络;微位移平台

中图分类号: TH161+.7; TH86; TP183; TH39 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)03-0300-03

## Research of nonlinear correction method in shafting alignment test system based on PSD

LI Bo, GAO Yi, CAO Guo-hua, LIU Chang-qing

(College of Mechatronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Aiming at the large nonlinear error of position sensitive detector(PSD), which is the core device of shafting alignment test system, output coordinate of PSD cannot correctly reflect the actual location of the incident light point, in order to improve the alignment test accuracy, the online calibration device based on the PI micro displacement platform was designed, the nonlinear correction algorithm based on BP neural network was presented, the data acquisition and nonlinear correction experiment was proceeded, acquired data and corrected data were simulated and analyzed by Matlab, respectively. The results indicate that the algorithm based on BP neural network is practical and efficient, after correction using this algorithm by the linearity error of PSD is less than  $3.9\ \mu\text{m}$ . The influence of nonlinear is largely reduced, so that the linearity and the data confidence of B area are greatly improved. On the premise of not increasing the cost and device complexity, the accuracy of the entire alignment system are effectively increased.

**Key words:** 2D-position sensitive detector(PSD); nonlinear correction; artificial neural network; micro displacement platform

## 0 引 言

轴系在安装调试过程中,工作人员对轴与轴之间或轴与轴承之间同轴度的测量和调校通常使用钢尺、卡尺或千分表等工具进行接触式测量,因而测量结果受操作人员的经验和环境影响较大,测量精度低,测量周期很长<sup>[1]</sup>。近年来国内外对激光对中方法开展了广泛的研究,研制出了激光对中仪,该仪器能实现自

动化测量,大大提高了对中精度和效率。但是由于激光对中数据采集系统的核心部件—PSD的半导体元件的特性,使得距离中心较远的区域(B区)非线性误差较大,因此降低了整个对中测试系统的精度<sup>[2]</sup>。

人工神经网络的发展为传感器的信号处理提供了新的、有效的手段,可以在不提高材料性能要求的前提下,提高系统的测试性能<sup>[3]</sup>。本研究提出一种基于德国PI公司二维微位移平台的PSD在线数据采集

收稿日期: 2012-11-08

基金项目: 吉林省科技厅科技发展计划工业高新技术重点资助项目(20100365)

作者简介: 李 博(1987-),男,河南开封人,主要从事在线检测理论与技术方面的研究. E-mail: 25libo@163.com

通信联系人: 高 艺,女,博士,副教授. E-mail: gaocust2006@126.com

系统,采用BP神经网络算法对采集数据进行校正<sup>[4]</sup>。

## 1 PSD自动标定装置

二维PSD的原理在很多文献和资料中都有详细的计算和分析,本研究不再赘述。由于测量数据量大、测量精度高,任何轻微的干扰都会对实验数据产生巨大的影响。为提高采集效率、缩短实验时间、提高实验精度,笔者研制了基于LabVIEW的在线自动采集标定装置,在测试中实现数据的实时显示和自动存储。

标定实验装置如图1所示。该装置由两台德国PI公司生产的M122.2DD微位移平台,以及二维PSD、实验台架和半导体激光器组成。两台微位移平台以90°夹角固定,组成二维平台,分别代表 $x$ 、 $y$ 轴方向。PSD选用日本滨松(Hamamatsu)S1880型二维PSD,并以螺栓连接固定于微位移平台上;激光器选用波长为650 nm半导体激光器,并固定于试验台架上方。

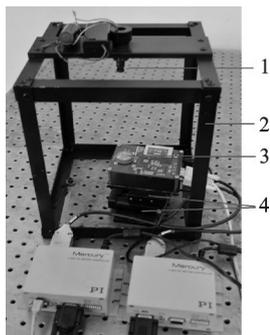


图1 PSD标定实验装置图

1—半导体激光器;2—实验台架;3—S1880型PSD;4—M122.2DD微位移平台

其中,微位移平台的性能参数为:最大行程25 mm,分辨率为0.1  $\mu\text{m}$ ,最大速度为20 mm/s。

PSD的性能参数为:有效面积12 mm $\times$ 12 mm,敏感波段320 nm~1 060 nm,分辨率为3.418  $\mu\text{m}$ 。

因微位移平台的位移分辨率高于PSD的分辨率,微位移平台的位移误差不会影响该系统的测量精度。

本研究进行实验时,自动采集装置流程图如图2所示。由LabVIEW程序逻辑协调二维位移平台移动和PSD数据的读取,当二维平台移动时,等效于光斑在PSD上移动,每个采集点采集10组坐标数据,取平均值后再输出,以降低随机误差。

二维位移平台的移动位置 $(X, Y)$ 可认为是入射光斑在PSD表面上的实际位置坐标,它同PSD的输出坐标 $(x, y)$ 一起被存储为数据文件,以供后续进行PSD线性化使用。

## 2 非线性校正算法

在每个采集点处,PSD的输出坐标 $(x, y)$ 与光斑实际

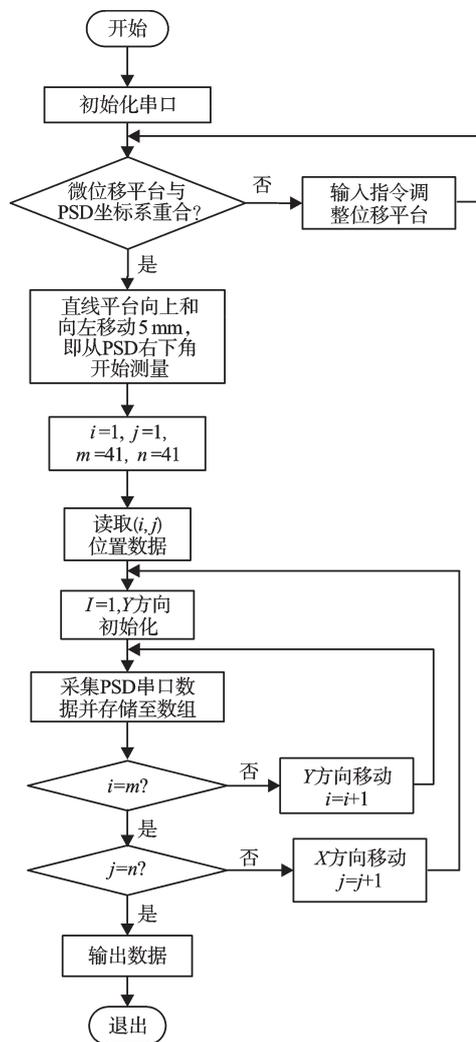


图2 自动采集装置流程图

位置 $(X, Y)$ 间的对应关系可用集合映射方式表示为<sup>[5]</sup>:

$$f: A \rightarrow B \quad (1)$$

$$(x, y) \rightarrow (X, Y)$$

式中: $f$ —从集合 $A$ 到集合 $B$ 的映射法则, $A$ —二维PSD的读数坐标 $x$ 、 $y$ 所有元素的集合, $B$ —光斑的实际位置 $X$ 、 $Y$ 所有元素的集合。

所谓非线性校正,即根据采集实验所获得的 $A$ 、 $B$ 中有限坐标元素 $(x_i, y_i)$ 和 $(X_i, Y_i)$ 建立函数关系 $f$ ,从而用函数 $f$ 对测量中采集到的PSD坐标数据 $(X_i, Y_i)$ 进行非线性校正。线性化后的光斑位置坐标与实际入射光斑的位置坐标存在一定的误差,该误差的大小取决于算法的收敛精度。

从式(1)可以看出,从集合 $A$ 到 $B$ 的映射是二元二值的函数关系,用常规的数学方法很难建立这样的函数关系<sup>[6]</sup>。其他较为常用的方法有函数拟合法,但是该方法计算繁琐,效率很低。而人工神经网络的方法克服了上述缺点,本研究采用神经网络函数拟合功能对PSD的非线性进行校正(网络选择4层BP网络)。因为PSD是二维的,所以输入层节点为2,输出

层节点为2,中间两隐含层节点数分别为40和30,节点函数为sigmoid函数<sup>[7-10]</sup>:

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}} \quad (2)$$

当其导数为:

$$f'(s) = f(s)[1 - f(s)] = y(1 - y) \quad (3)$$

当输入向量  $x$  时,隐含层  $h$  的输入加权和为:

$$s_h = \sum_i w_{ih} x_i \quad (4)$$

相应节点输出为:

$$y_h = f(\sum_i w_{ih} x_i) \quad (5)$$

输出层节点  $j$  的输入加权和为:

$$s_j = \sum_h w_{hj} y_h = \sum_h w_{hj} f(\sum_i w_{ih} x_i) \quad (6)$$

相应节点输出为:

$$y_j = f(s_j) = f[\sum_h w_{hj} f(\sum_i w_{ih} x_i)] \quad (7)$$

将节点的阈值  $\theta$  用一连接的加权值表示为  $\theta = \omega_{oh} \omega_{oj}$ 。这些加权值也是可调的,同其他的权值一样,都参与调节过程。

误差函数采用熟知的均方误差函数:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_j (T_j - y_j)^2 \quad (8)$$

即:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_j [T_j - f[\sum_h w_{hj} f(\sum_i w_{ih} x_i)]]^2 \quad (9)$$

式中:  $T_j$  一节点  $j$  的目标输出值。

### 3 采集实验及 Matlab 仿真

利用本研究所述数据采集及标定装置,笔者对轴系对中系统中的PSD进行了在线采集及标定实验。通过程序设定二维微平台实际位置坐标  $(X, Y)$  的范围为  $(-5 \text{ mm}, -5 \text{ mm}) \sim (5 \text{ mm}, 5 \text{ mm})$ 。第一次实验的采集间隔为  $1 \text{ mm}$ ,即一共采样121点。本研究运用 Matlab 人工神经网络工具箱对采集结果进行训练和仿真<sup>[11]</sup>。经过训练,网络收敛后的均方误差为  $9.64 \times 10^{-9}$ ,线性度最大误差为  $0.69 \mu\text{m}$ 。

第一次实验部分数据如表1所示,由于篇幅有限,表中只给出了第一列采集点的PSD输出值、实际位置坐标(微位移平台读数)和经过线性化算法校正后的坐标。

第二次实验的采集间隔为  $0.25 \text{ mm}$ ,即一共采样1681点。本研究运用 Matlab 人工神经网络工具箱对采集的数据进行训练和仿真,网络收敛后的均方误差为  $9.82 \times 10^{-7}$ 。校正前坐标数据 Matlab 仿真结果如图3所示,从图3中可以看出滨松 S1880 型 PSD 边缘处有

表1 第一次实验的PSD输出、实际位置和校正后坐标

采集点 序号	PSD输出/mm		实际位置/mm		校正后坐标/mm	
	$x$	$y$	$X$	$Y$	$X'$	$Y'$
1	4.896 6	-4.944 8	5.000 0	-5.000 0	5.000 0	-5.000 0
2	4.944 8	-3.977 8	5.000 0	-4.000 0	5.000 0	-4.000 1
3	4.971 1	-2.992 4	5.000 0	-3.000 0	5.000 0	-3.000 0
4	5.008 0	-2.015 2	5.000 0	-2.000 0	5.000 0	-2.000 0
5	5.042 2	-1.039 4	5.000 0	-1.000 0	5.000 0	-1.000 0
6	5.038 8	-0.053 3	5.000 0	0.000 0	5.000 0	0.000 0
7	5.048 3	0.941 0	5.000 0	1.000 0	5.000 0	1.000 0
8	5.049 4	1.911 7	5.000 0	2.000 0	5.000 0	2.000 0
9	5.039 5	2.900 5	5.000 0	3.000 0	4.999 9	3.000 0
10	5.009 7	3.883 8	5.000 0	4.000 0	5.000 0	4.000 0

明显的桶形失真;校正后坐标数据 Matlab 仿真结果如图4所示,可见校正后PSD的非线性大为改善,仿真结果表明,线性度最大误差为  $3.9 \mu\text{m}$ 。因考虑到算法收敛速度的问题,降低了算法设定的均方误差收敛阈值以加快收敛速度,如果在高性能工作站上运行该算法,可以提高收敛阈值以提高精度。

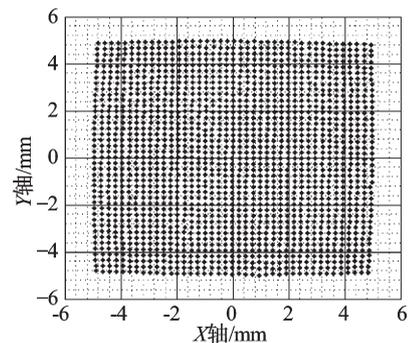


图3 校正前坐标数据 MATLAB 仿真

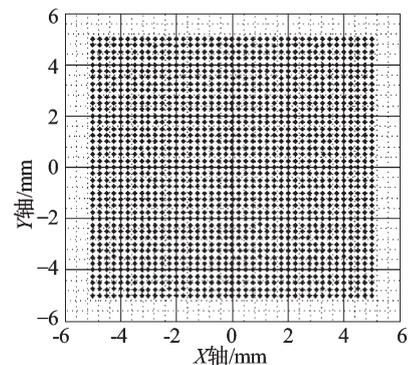


图4 校正后坐标数据 Matlab 仿真

由实验数据及 Matlab 仿真图像可得,滨松 S1880 型 PSD 的 B 区存在较大的桶形失真,校正前最大线性度误差为  $0.117 \text{ mm}$ ;采用该设计的算法校正后,PSD 边缘的线性度大幅改善,线性化算法的性能指标—均方误差可达  $9.64 \times 10^{-9}$ ,线性度误差可达  $0.69 \mu\text{m}$ 。经实验验证本研究设计的在线自动采集装置稳定可靠,效率高;线性化算法真实有效,其精度能够达到对中系统的要求。

(下转第310页)

位置,也叫起针点),最大应力为  $8.571 \times 10^5 \text{ kPa} = 857.1 \text{ MPa}$ 。导针上应力最大(A位置)所对应的节点是导针针锤上175节点。整个成圈过程中导针针锤上175节点的应力变化情况如图4(d)所示。从图4中可以看出,在整个成圈过程中,最危险的那个节点(也就是175节点)受到的应力不是固定不变的,当导针运动到三角通道的A位置时,也就是导针首次和三角接触位置时达到最大应力857.1 MPa,之后应力下降到80 MPa左右。到导针运动三角通道的C位置时,导针和三角再次碰撞,应力达到400 MPa,C位置过后到成圈结束时175节点的应力均在80 MPa以下。

## 4 结束语

本研究以 ABAQUS 为平台,通过运用 ABAQUS/Explicit 显示求解器对横机成圈的动态过程进行了仿真分析。通过仿真分析,得到了全自动电脑横机成圈编织过程中的导针的位移、速度、加速度变化曲线图。研究表明,当三角通道以 1.2 m/s 速度运动时,导针沿着三角斜面运动的速度与理论分析得到的 1.592 m/s 基本相符,导针与三角碰撞时导针的加速度发生突变并且抖动的厉害。

本研究经过仿真得到了导针和三角接触冲击的几个关键位置的导针的应力云图,从而找到了整个成

圈过程中应力最大位置在导针和三角通道首次接触的位置,最大应力为 857.1 MPa。该研究结果对三角和导针的设计优化具有一定的指导作用。

## 参考文献(References):

- [1] 杨荣贤. 横机羊毛衫生产工艺设计[M]. 北京:中国纺织出版社,2008.
- [2] 张 策. 机械动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
- [3] 李胜华,朱文俊. 国产横机的现在与未来发展趋势[J]. 国际纺织导报,2011(3):39-40.
- [4] 张建华,丁 磊. ABAQUS 基础入门与案例精通[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [5] 孟海涛,刘立华. 针织横机的按装调试与维修[M]. 北京:中国纺织出版社,2008.
- [6] 赵树超. 基于UG的变针距电脑横机成圈机构运动模拟与仿真[D]. 杭州:浙江理工大学纺织学院,2012:6-8.
- [7] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例教程[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [8] 赵智渊,杨明顺. 基于ABAQUS丝杆冷滚打变形力仿真[J]. 铸造技术,2011,32(8):1165-1166.
- [9] 黄小光,韩忠英. 基于ABAQUS的压力容器有限元接触分析[J]. 石油化工设备,2011,40(2):35-36.
- [10] 丁立聪,张 宪. 基于有限元技术的锅炉水冷壁焊机关键部件研究[J]. 轻工机械,2012,30(3):92-96.
- [11] 景建桥,马晓建. 横机三角动力学特性分析及优化设计[J]. 针织技术,2006(3):15-18.

[编辑:张 翔]

(上接第302页)

## 4 结束语

PSD作为一种高灵敏度、高精度的位置传感器,如何克服其非线性,已成为轴系对中系统乃至其他测量领域的关键问题。本研究设计了基于微位移平台的在线采集校正系统,并提出了基于BP神经网络的校正算法。实验数据和Matlab仿真的对比结果说明,该算法大幅改善了PSD的桶形失真,实验研究结果对提高PSD的利用价值和整个轴系对中测试系统的精度具有重要意义。

## 参考文献(References):

- [1] 焦永锋. 单表法找正在炼油装置四机组对中安装中的应用[J]. 中国科技信息,2005(15):144-145.
- [2] GENG Z J. New concept of high speed three-dimensional vision systems [J]. **Optical Engineering**, 1996, 35 (2) : 376-383.
- [3] 牟丽娜,陈 鸿,陈闽鄂. 基于L-M算法的二维PSD非线性校正[J]. 计量与测试技术,2006(12):21-22.

- [4] 陈安成,穆希辉,杜峰坡,等. 人工神经网络在发动机建模中的应用研究[J]. 机电工程,2012,29(9):1077-1079.
- [5] 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(5):567-569.
- [6] ZHOU B Y, CHEN P F, ZENG W, et al. Nonlinear error corrects experimental investigations of position sensitive detector[J]. **Optical Instrument**, 2008, 27(5):11-15.
- [7] HOU X L, CHEN C Z, YU H J, et al. Optimum method about weights and thresholds of nerve network[J]. **Journal of Northeastern University: Natural Science**, 1999, 20 (4):447-450.
- [8] 高 隼. 人工神经网络原理及仿真实例[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2010.
- [9] 程 岚. 轨道残压测试仪设计[J]. 现代制造技术与装备, 2011(4):25-27.
- [10] WANG X D, YE M Y. RBF neural network application in the surface rough fiber optic sensor[J]. **Journal of Optoelectronics·Laser**, 2001, 12(10):936-940.
- [11] 董志成,任 强. 基于BP神经网络的减震器示功图识别方法[J]. 机电工程,2012,29(8):929-931.

[编辑:张 翔]