

文章编号 1004-924X(2007)10-1596-06

压电陶瓷微位移工作台的建模方法

魏 强¹, 张玉林²

(1. 泰山学院 物理与电子科学系, 山东 泰安 271021; 2. 山东大学 电子束研究所, 山东 济南 250061)

摘要:压电陶瓷存在着迟滞非线性特性,而且在运行过程中,特性的变化规律也是未知的、不确定的,难以用传统方法获取既有足够精确性又不至于过分复杂的压电陶瓷微位移工作台的数学模型。基于神经网络,本文提出了一种新的建模方法。分析了微位移工作台的结构和建模方法,利用神经网络的自学习和自适应能力,在线调整模型结构和参数,减小工作台的建模误差,为控制系统提供了更为准确的模型信息。采用工作台的位移数据对网络模型进行了训练,实验结果表明,在80 μm 行程范围内,工作台的平均定位误差为80 nm,最大误差为100 nm,基本满足纳米定位的精度要求。

关键词:精密工作台;压电陶瓷;纳米定位;神经网络;系统辨识

中图分类号: TN305.7; TP183; TN384 **文献标识码:** A

Modeling method of micro-displacement stage driven by piezoelectric ceramic

WEI Qiang¹, ZHANG Yu-lin²(1. *Department of Physics and Electronic Science, Taishan University, Tai'an 271021, China;**2. Institute of Electron Beam, Shandong University, Jinan 250061, China)*

Abstract: The piezoelectric ceramics have the property of hysteresis and nonlinearity, and the change rule is unknown and uncertain. It is difficult to build a high accuracy mathematical model simply using the traditional method. In order to improve the model accuracy of micro-displacement stage driven by piezoelectric ceramics, a new modeling method based on neural network is proposed in this paper. The structure and the modeling method of the stage are analyzed. Because of the advantages of the neural network in self-learn and self-adapting, the structure and the parameters can be adjusted on line to reduce the error of the stage model, and more exact information can be provided for the control system. Through training the net model by the stage displacement data, experiment results show that the average error and the maximum error are reduced to 80nm and 100 nm within 80 μm journey respectively, which satisfies the precision requirement of nanometer positioning.

Key words: precision stage; piezoelectric ceramic; nano positioning; neural network; system identification

收稿日期:2007-07-26;修订日期:2007-08-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 90307003)

1 引 言

随着微机电系统的快速发展,对微细加工的精度要求越来越高,不管是利用电子束偏转的曝光方式,还是扫描探针显微技术,在曝光过程中,由于受散焦的影响,束偏转角度必须很小,不可能在一个大面积的晶片上一次性地完成高分辨率曝光,而是必须把整个曝光面积分割成若干个可以在电子束扫描场范围内的部分,然后通过移动工作台进行分次曝光,直至完成整个面积的光刻^[1]。因此,高分辨率的位移工作台是光刻设备中极其重要的部件,其定位精度直接影响了曝光图形的拼接精度和套刻精度,决定了光刻机所能实现的特征线宽。

压电陶瓷是目前微位移技术中比较理想的驱动元件,但由于本身所固有的迟滞、非线性、蠕变特性,使得微位移机构的重复性和精度降低,瞬态响应速度变慢,给压电陶瓷应用造成一定的困难^[2]。为了获得满足要求的运动精度和分辨率,需要设计相应的控制策略。然而,由于压电元件微观机理复杂多变,其数学模型难以获得。传统方法一般采用事先建立好的模型,这种方法当工作台因为工作环境或者自身特性发生变化时,不能及时修正模型信息,给控制系统造成较大的误差,从而降低了工作台的定位精度。本文基于神经网络理论,提出了一种工作台的在线建模方法,提高了模型精度。

2 微位移工作台

微位移工作台是利用微位移技术实现行程小(一般小于毫米级)、精度高(亚微米、纳米级)和灵敏度高的机构,一般由微位移驱动装置、位移传感器和控制系统组成,如图 1 所示。

传统的机械驱动方式,如滚珠丝杠副等,由于存在螺纹空程、传动摩擦和间隙,定位精度只能达到微米级^[3]。压电陶瓷因其机械结构简单、尺寸小、分辨率极高、重复性好、响应速度快、易于控制等特点,既可以作为微进给和微调部件,也可对系统的误差进行补偿,在纳米级微位移驱动装置中得到了广泛的应用^[4]。在实际使用中,压电陶瓷驱动器通常采用叠堆型结构,由于压电陶瓷存在

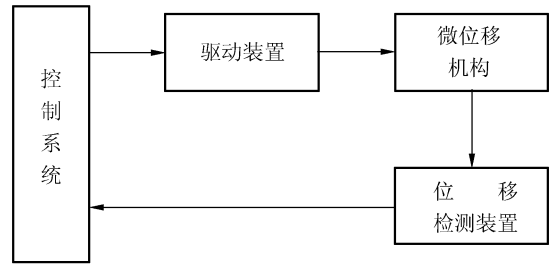


图 1 微位移工作台组成框图

Fig. 1 Block diagram of micro-displacement stage

着非线性、迟滞、蠕变特性,使得输出位移和所施加的电压并不是理想条件下的线性和二次曲线关系,因而降低了定位精度,影响了曝光分辨率^[5,6]。

受加工技术和设备的限制,系统零部件的机械精度和装配精度不可能无限提高,采取一定的控制策略是必要的。无论是采用基于模型的开环控制,还是借助于精密仪器测量的闭环控制,都离不开传统控制方法所依赖的数学模型,但对于压电陶瓷来讲,要获取既有足够的精确性又不至于过分复杂的数学模型是有一定困难的。另外工作台在运行过程中,特性也在不断变化,变化规律往往是未知的、不确定的。十几年来,人们从压电陶瓷的内在机理、动力学特性等方面进行了深入的研究,提出了许多种建立模型的方法,其中应用较为广泛的是 Preisach 模型及其扩展形式^[7-8]。

Preisach 模型最初是由德国物理学家 F. Preisach 于 1935 年提出的,用于分析铁磁材料的磁滞特性,后来用于对压电陶瓷的迟滞非线性进行数学建模^[9]。Preisach 模型是由最简单的滞回发生器叠加构成的,尽管每一个滞回发生器表现出来的是局部记忆滞回,但叠加在一起就表现为全局记忆性,其最大的优点是可以描述压电陶瓷驱动器滞回曲线具有多极点的复杂过程。在实际使用中,从 0 至饱和电压之间 n 等分,从 0 升压到任一等分点,再逐渐降压到 0,在降压的过程中记下每一等分点处的位移值,遍历每一个等分点,得到一个位移值的表格。对于任意的控制序列,就能根据公式预测出压电陶瓷驱动器的位移输出值。如果某一控制电压不在划定的等分点上,可以采用插值的方法获得^[7,10]。

Preisach 模型及其改进模型,大幅度提高了

压电陶瓷驱动器的跟踪精度,被广泛应用于压电陶瓷驱动的微位移机构中,获得了较为精确的位移分辨率和定位精度^[10]。但是 Preisach 模型实现起来较为复杂,且难以适应信号的动态变化,为了便于模型的在线调整,实时反映迟滞特性的动态变化,需要对迟滞非线性或模型加以简化,这不可避免会使得模型匹配误差加大,因此建立一个实现简单且易于在线调整模型对于具有迟滞非线性特性的压电陶瓷驱动器是十分重要的^[11]。

3 微位移工作台的神经网络建模

人工神经网络是由大量处理单元(神经元、处理元件、电子元件、光电元件等)广泛互连而成的网络结构,是人脑的一种抽象、简化和模拟,其最主要的特征为连续时间非线性动力学、网络的全局作用、大规模并行分布处理以及高度的鲁棒性和学习联想能力^[12]。BP 网络是一种单向传播的多层前向网络,Hecht 已经证明,具有一个隐含层的三层前馈 BP 神经网络可以以任意精度逼近任意的非线性函数^[13]。

与传统建模方法相比,神经网络不需要对对象进行模型结构类型和参数的格式辨识,对象的非线性特征隐含在网络的自由参数中,不需要对非线性系统的特征进行近似和拟合,辨识过程在一个采样周期内,根据观察到的数据,产生一次模型参数估计值的修正,既不影响系统的运行,又能对系统进行实时控制,从而在系统辨识中得到了广泛的应用^[14-15]。

本文采用的工作台是由哈工大博实公司生产的纳米级精密定位工作台,如图 2 所示。它是由专用的压电陶瓷驱动电源驱动的,驱动电压为 0~150 V,最大位移量为 80 μm ,重复定位精度 < 80 nm,开环工作时位移分辨率为 1.6 nm,闭环位移分辨率可达 16 nm,最大推力为 400 N,最大负载为 3 kg。位移传感器采用 MA-0.5 型线性可变量差动变压器传感器(LVDT),位移重复性 < 0.15 μm ,可以输出 -5 V~+5 V 的模拟信号。

3.1 模型结构的确定

该工作台可以看作一个 SISO 系统,输入为压电陶瓷驱动电压,输出为位移量。因此选用串-并联结构的三层 BP 网络,如图 3 所示。

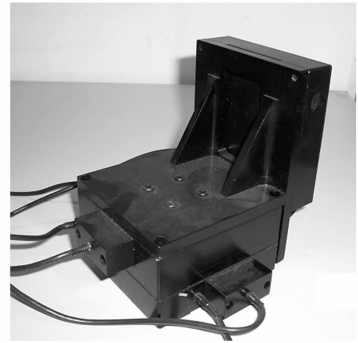


图 2 精密定位工作台实物图

Fig. 2 Photograph of precision positioning stage

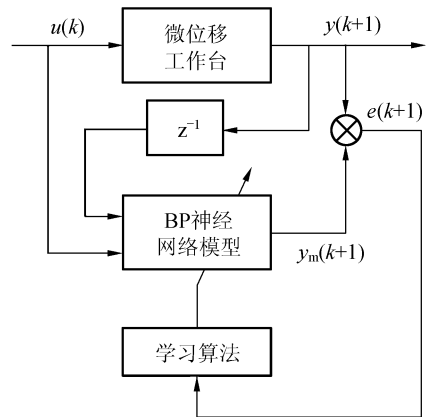


图 3 工作台辨识结构框图

Fig. 3 Block diagram of stage identifier

微位移工作台的输入输出之间的关系可以表示成:

$$y(k+1) = f[y(k), y(k-1), u(k)]$$

其中: $y(k)$ 和 $y(k-1)$ 分别为工作台的历史输出位移, $u(k)$ 为工作台的当前输入电压, $y(k+1)$ 为网络输出。

神经网络对被辨识对象的拟合精度与网络层数呈正比关系,网络层数增多,拟合精度相应提高,但层数的增加同样会使得整个网络复杂,延长了训练时间,降低了网络的泛化能力,故本文采用一个隐含层,隐含层神经元数预先根据经验公式确定^[16]。

3.2 数据的采集和预处理

本文所用样本数据是在实验室中测得的,由于周围环境,包括温度、湿度、空气流动、电磁场和振动等都可能会给测量精度带来误差,因此实验室温度控制在 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,湿度控制在 $40\% \pm 5\%$,为避免电磁干扰和空气流动的影响,将工作

台放置于密封的屏蔽罩内,为减轻振动干扰,再将屏蔽罩放置于由弹簧和泡沫组成的减震装置上。

压电陶瓷专用电源对压电陶瓷驱动器施加电压,电压间隔为 5 V,变化范围从 0 V 增加到 150 V,再返回到 0 V,循环重复 5 次作为一个测量周期,由 LVDT 传感器测量每个电压下的位移量,并经信号处理电路后形成位移输出,取 5 次的平均值作为每个电压下的位移量。这样每次测量周期可以形成一个包含有 30 个输入输出对的样本。连续测量 50 次,得到 50 组样本。由于压电陶瓷在连续循环施加电压的情况下,会逐渐发热,温度升高,压电陶瓷内部的电畴运动变得相对容易,使得压电陶瓷驱动器的迟滞和非线性减小。因此,每个测量周期间隔 1 h。

测量得到的数据是实验原始数据,有不同的量纲,经过每个测量周期的取平均后,剔除了极大、极小值,使得数据分布较为均匀,再采用归一化方法对所搜集到的学习样本进行数据预处理^[17],使得归一化后的数据位于 $[0.1 \ 0.9]$ 区间内,以避免神经网络中 Sigmoid 型激活函数的极小值和极大值这两个饱和区,减少训练次数。

3.3 模型的建立

MATLAB 是 Math Work 公司开发的数学计算工具,计算能力强、效率高,神经网络工具箱是在 MATLAB 环境下开发的,以人工神经网络为基础,利用 MATLAB 编程语言构造出许多典型神经网络激活函数。对于不同的网络模型,采用不同的学习算法,可以把网络层的输出计算转变为对激活函数的调用。利用工具箱函数 Newff 建立 BP 网络,为了同时兼顾辨识精度和网络训练时间两方面的利益,通过调整隐含层神经元的个数来选取辨识误差和训练步数最优的一组。

由于压电陶瓷驱动的微位移工作台呈现出迟滞非线性,网络初始值对于学习后能否达到局部最小、能否收敛以及训练时间的长短有着很大的关系。在实际应用中,希望经过加权后的神经元的输出在零值附近,而这一区域是 S 型传递函数变化最大、对输入变量最敏感之处。所以在本节中,网络的初始权值取为 $[-1 \ 1]$ 之间的随机数。

神经网络算法采用 Levenberg-Marquardt (L-M) BP 算法,L-M 算法是梯度下降法和高斯-牛顿法的结合,它既具有梯度下降法的全局特性,又具有高斯-牛顿法的局部收敛性。隐层传递函

数取为 Tansig 函数,输出层采用 Purelin 函数,目标误差取为 0.001,Marquardt 阻尼因子 μ 取为 0.005, μ 的系数 θ 取为 10,设置隐层节点数分别为 4~9。利用测量得到的 50 组数据对网络进行训练,输出均方误差如表 1 所示。

表 1 L-M 算法训练误差

隐层神经元个数	网络误差
4	0.328 1
5	0.156 7
6	0.153 8
7	0.174 1
8	0.144 6
9	0.168 1

比较后选取隐层节点数为 8,训练结果如图 4 所示。在经过 24 步后,训练误差达到要求,网络输出均方误差为 0.144 6。

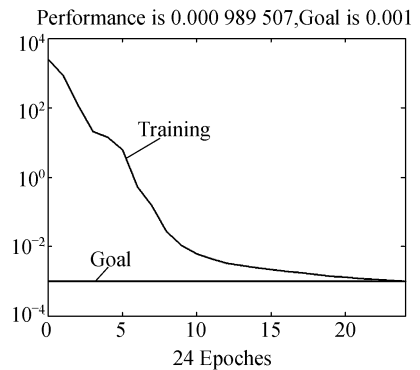


图 4 L-M BP 算法训练结果

Fig. 4 Training result of L-M BP algorithm

为了检验所建立的网络模型的精度,重复一次 0~150 V 的升、降压过程,位移传感器测量工作台的实际位移输出作为位移参考值,与 Preisach 模型和 BP 网络模型输出值相比较,结果如图 5 所示。从中选取若干点处的位移量,列于表 2 中。可以看出,Preisach 模型的位移输出误差平均值为 110 nm,最大误差为 140 nm,而采用 BP 网络训练后的位移输出误差平均值为 80 nm,最大误差为 100 nm,误差大大减小,模型精度得以提高。在整个行程中,电压较低和较高的两端,非线性和蠕变现象明显,误差较大,而在中间线性度较好的一段(驱动电压为 50~120 V,对应输出位移量约 40 μm),误差相对较小。

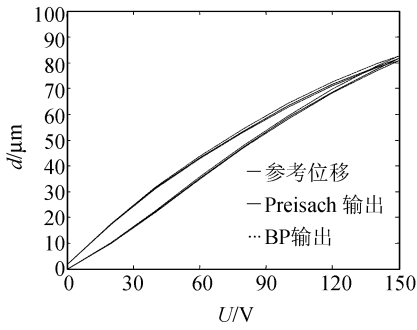


图 5 模型输出结果比较

Fig. 5 Comparison of model outputs

表 2 Preisach 模型和 BP 网络模型定位结果

Tab. 2 Positioning results of Preisach model and BP model

参考位移 (μm)	驱动电压 (V)	Preisach 模型输出(μm)	BP 网络模型 输出(μm)
10.40	20	10.49	10.31
22.98	40	23.11	22.90
36.25	60	36.37	36.18
49.08	80	49.18	49.03
60.80	100	60.90	60.74
71.10	120	71.20	71.04
80.11	140	80.24	80.01
84.24	150	84.39	84.13

由此得到的微位移工作台的静态 BP 神经网络模型参数为:

隐含层权值向量

$$W^H = \begin{bmatrix} -0.7004 & 0.6529 & 0.0561 \\ 8.3992 & 2.8321 & -0.0386 \\ -0.0199 & 0.2256 & -0.1428 \\ -0.0269 & 0.2144 & -0.1553 \\ -4.3945 & -2.6187 & 4.1398 \\ -2.9901 & -6.2411 & -0.7891 \\ -1.4885 & -1.6604 & -2.6961 \\ 1.3450 & 1.4741 & 2.4043 \end{bmatrix};$$

输出层权值向量

$$W^O = \begin{bmatrix} -0.0581 & -4.1136 & 0.0147 & 0.4131 \\ -0.0118 & 1.2073 & -4.6029 & -2.9878 \end{bmatrix};$$

隐含层阈值向量

$$B_1 = \begin{bmatrix} -5.4706 & -5.4524 & 1.6832 & 2.8219 \\ -3.7783 & -5.4362 & 3.7310 & -3.4906 \end{bmatrix};$$

输出层阈值 $B_2 = 1.1356$ 。

由于神经网络的性能对网络参数初始值的设置较为敏感,要获得更为精确的模型输出,需要采用优化算法对网络初值进行优化,并通过实验在更多的定位点上进一步加以验证。

4 结 论

对于纳米定位工作台这种精度极高而且易受外界干扰的装置,在运行过程中其模型参数甚至结构都可能会发生变化,而传统模型(如 Preisach 模型)是事先建立好的,难以在线修正,此时如果单纯地依靠控制系统的控制作用,势必会增加调节的时间和难度,降低工作台的稳定性,影响加工精度和效率。神经网络由于其自身的自组织、自适应特性,在模型建立中有着独特的优势。实验结果表明,经过学习后的神经网络模型,在 $80 \mu\text{m}$ 行程范围内,工作台的平均定位误差为 80 nm ,最大误差为 100 nm ,相对于 Preisach 模型输出有着较大的提高,能够基本满足纳米定位的实验要求。

参考文献:

- [1] 刘俊标. 微纳加工中的精密工件台技术[M]. 北京:北京工业大学出版社,2004.
LIU J B. *Technology of Precision Stage in Micro-nano Fabrication*[M]. Beijing: Publishing House of Beijing University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [2] CHU C L, FAN S H. A novel long-travel piezoelectric-driven linear nano positioning stage[J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(1): 85-95.

- [3] 晏祖根,孙立宁,节德刚. 微驱动定位系统及其在误差补偿机器人中的应用[J]. 光学精密工程,2005,13(6):703-708.
YAN Z G, SUN L N, JIE D G. Research of micro-driven table based on PZT and its control system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):703-708. (in Chinese)
- [4] 马立,荣伟彬,孙立宁. 三维纳米级微动工作台的设计与分析[J]. 光学精密工程,2006,14(6):1017-1024.
MA L, RONG W B, SUN L N. Design and analysis of a novel 3-DOF nano positioning stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):1017-1024. (in Chinese)
- [5] 张福学. 现代压电学[M]. 北京:科学出版社,2001.
ZHANG F X. *Modern Piezoelectrics*[M]. Beijing: Science Publisher, 2001. (in Chinese)
- [6] FAN K C, FEI Y T, YU X F, *et al.*. Study of a noncontact type micro-CMM with arch-bridge and nanopositioning stages[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(3): 276-284.
- [7] GE P, JOUANEH M. Generalized preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuator[J]. *Precision Engineering*, 1997,20(2):99-111.
- [8] GOLDFARB M, CELANOVIC N. Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation[J]. *IEEE Control System*, 1997, 17(3): 69-79.
- [9] MAYERGOYZ I D, FRIEDMAN G. Generalized preisach model of hysteresis [J]. *IEEE Trans. on Magnetics*, 1988, 24 (1): 212-217.
- [10] 魏燕定. 压电驱动器的非线性模型及其精密定位控制研究[J]. 中国机械工程,2004, 15(7): 565-568.
WEI Y D. Study on non-linear model of piezoelectric actuator and accurate positioning control strategy[J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, 15(7): 565-568. (in Chinese)
- [11] 李春涛,谭永红. 迟滞非线性系统的建模与控制[J]. 控制理论与应用,2005,22(2):281-287.
LI CH T, TAN Y H. Modeling and control for nonlinear systems with hysteresis[J]. *Control Theory and Application*, 2005, 22(2): 281-287. (in Chinese)
- [12] 郑晓虎,朱荻. 模糊神经网络在UV-LIGA工艺优化中的应用[J]. 光学精密工程,2006,14(1):139-144.
ZHENG X H, ZHU D. Application of fuzzy neural network to optimizing UV-LIGA process[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):139-144. (in Chinese)
- [13] HECHT N R. Theory of the back-propagation neural networks[C]. *Proceeding of the International Joint Conference on Neural Networks*, 1989, 1: 593-611.
- [14] LI C T, TAN Y H. A neural networks model for hysteresis nonlinearity[J]. *Sensors and Actuators*, 2004, 112 (1): 49-54.
- [15] PERNG M H, WU S H. A fast control law for nano-positioning[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46: 1753-1763.
- [16] CHEN J H, HUANG T C. Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control[J]. *Journal of Process Control*, 2004,14 (2): 211-230.
- [17] 方崇智,萧德云. 过程辨识[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
FANG CH ZH, XIAO D Y. *Process Identification*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. (in Chinese)

作者简介:魏 强(1973—),男,工学博士,泰山学院物理与电子科学系副教授,主要从事微机电系统、精密工件台驱动和控制技术的研究。E-mail: taweiqiang@126.com