文章编号: 1001-0920(2018)01-0095-06 DOI: 10.13195/j.kzyjc.2016.1289

压电微定位平台神经网络与专家模糊复合控制方法

周淼磊†, 张敬爱, 赵 宇, 高 巍

(吉林大学 通信工程学院，长春 130022)

摘 要: 为了消除压电微定位平台的迟滞非线性特性,实现高精度定位控制,采用具有两个隐含层的BP神经网络建立压电微定位平台的迟滞模型,以精确描述驱动电压与输出位移的迟滞关系;设计一种基于BP神经网络迟滞逆模型的前馈控制器,对迟滞非线性进行补偿,将迟滞非线性近似线性化. 为进一步提高定位系统的精度,提出基于迟滞逆模型前馈补偿和专家模糊控制的复合控制方法. 仿真结果表明,该复合控制方法可以将压电微定位平台的定位误差控制在0.091 μm以内,从而有效地消除迟滞非线性对压电微定位平台定位精度的影响.

关键词: 压电微定位平台；BP神经网络；迟滞非线性；迟滞补偿；复合控制

中图分类号: TP273.3 **文献标志码:** A

Hybrid control for piezoelectric micro positioning platform based on BP neural network and expert fuzzy control

ZHOU Miao-lei†, ZHANG Jing-ai, ZHAO Yu, GAO Wei

(College of Communication Engineering，Jilin University，Changchun 130022，China)

Abstract: For the sake of eliminating the hysteresis nonlinearity characteristic and achieving high precision positioning control, a BP neural network with two hidden layers is adopted to establish the hysteresis model, therefore, the relationship between the driving voltage and the output displacement of piezoelectric micro positioning platform can be described and predicted accurately. A feedforward controller based on the inverse hysteresis model is proposed to compensate the hysteresis negative influence and make the positioning system display a excellent linear property. In order to improve the accuracy of the positioning system further, a hybrid control based on the feedforward compensation and expert fuzzy control is designed. The simulation results show that the maximum positioning error is 0.091 μm, and the negative effect of hysteresis nonlinearity has been reduced significantly.

Keywords: piezoelectric micro platform；BP neural network；hysteresis nonlinearity；hysteresis compensation；hybrid control

0 引 言

近年来,随着航空航天、纳米生物工程、微电子技术及精密制造业的飞速发展,压电微定位平台在微纳米定位等领域的应用受到越来越广泛的重视[1-4],但是其本身固有的迟滞非线性特性对其定位精度产生了严重影响,阻碍了其应用的推广[5-6].

消除压电微定位平台固有迟滞非线性的影响,实现高精度定位控制,是目前研究的一个热点问题. Xiao等[7]提出了一种新型的Preisach迟滞模型,并设计了一种基于逆Preisach迟滞模型的前馈控制器,实验结果表明该方法可以有效提高压电陶瓷执行器的位移追踪精度. Ang等[8]提出了一种改进的PI模型来描述压电执行器的迟滞非线性特性,结合PI逆模型进行前馈补偿,可以在不同频率的驱动电压下有效消除迟滞非线性的影响. Wang等[9]提出一种基于改进PI迟滞模型的鲁棒自适应控制方法,提高了定位系统的稳定性和精度. Lin等[10]针对压电微定位平台提出了一种广义Duhem迟滞模型,用PI控制器进行前馈补偿,定位误差可降低到0.1 μm. Dong等[11]针对压电微定位平台的迟滞非线性建立了一种嵌套Duhem函数的三明治模型,实验结果表明该模型的建模误差为0.086 7 μm,相对误差率小于3.3%. Cheng

收稿日期: 2016-10-13；**修回日期:** 2017-04-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675228)；吉林省科技发展计划项目(20140101062JC)；吉林省教育厅“十二五”科学技术研究规划项目(吉教科合字[2014]第B023号).

作者简介: 周淼磊(1976−),男,教授,博士生导师,从事微纳驱动与控制理论等研究；张敬爱(1991−),女,硕士生,从事微纳米驱动与控制理论的研究.

†通讯作者. E-mail: zml@jlu.edu.cn

等[12]针对迟滞特性提出了一种自回归滑动平均模型,并结合多层神经网络和非线性模型预测控制方案消除迟滞非线性对压电微定位平台定位精度的影响. Ru等[13]提出了一种LMS算法辨识未知参数的数学模型,并设计了自适应逆控制算法,将压电微定位平台的定位误差由17%降低到3%. Lin等[14]采用一种智能积分反步滑模控制,可以有效地降低压电微定位平台在定位控制中的最大均方根误差. Gu等[15]提出了一种实时的逆模型前馈控制方法,可以将定位追踪误差降低90%.

本文针对压电微定位平台的迟滞非线性特性,采用具有两个隐含层的BP神经网络,对压电微定位平台驱动电压与输出位移间的迟滞特性进行训练与学习,进而建立基于神经网络的迟滞模型和迟滞逆模型,克服PI、Preisach等数学模型参数辨识难度大的缺点;并结合智能控制理论,提出一种基于BP神经网络迟滞逆模型和专家模糊控制的复合控制方案,进一步消除平台的迟滞非线性特性,提高定位控制精度. 最后,通过仿真分析验证了本文所提出控制方法的有效性.

1 BP神经网络迟滞模型

本文采用的BP神经网络迟滞模型的结构如图1所示. 该网络输入层具有两个神经元,$x(k)$代表k时刻的驱动电压,$y(k-1)$代表$k-1$时刻模型输出位移. 输入层的激励函数为线性函数,输入层的输出为$u(k)=[u_1(k),u_2(k)]$,$u_1(k)=x(k)$,$u_2(k)=y(k-1)$. 综合考虑建模误差和训练时长,在Matlab环境下经多次调试,最后确定第1隐含层的神经元个数为100,第2隐含层神经元个数为200,第1隐含层的激励函数为tansig函数,第2隐含层的激励函数为logsig函数,如下式所示:

$$\mathrm{tansig}(n)=\frac{2}{1+\mathrm{e}^{-2n}}-1, \tag{1}$$

$$\mathrm{logsig}(n)=\frac{2}{1+\mathrm{e}^{-n}}, \tag{2}$$

其中n代表隐含层神经元的个数. 第1隐含层第i个神经元的输入为

$$h_i(k)=\sum_{j=1}^{2}{}^{1}w_{ij}u_j(k),\ i=1,2,\cdots,100, \tag{3}$$

其中:${}^{1}w_{ij}$代表第j个输入层神经元和第1隐含层第i个神经元之间的权值;第1隐含层的第i个神经元的输出为

$$h_i'(k)=\frac{2}{1+\mathrm{e}^{-2h_i(k)}}-1,\ i=1,2,\cdots,100. \tag{4}$$

第2隐含层第i个神经元的输入为

$$l_i(k)=\sum_{j=1}^{100}{}^{2}w_{ij}h_j'(k),\ i=1,2,\cdots,200; \tag{5}$$

第2隐含层的第i个神经元的输出为

$$l_i'(k)=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-l_i(k)}},\ i=1,2,\cdots,200. \tag{6}$$

输出层只有一个神经元,其输入为$q(k)=\sum_{i=1}^{200}{}^{3}w_i l_i'(k)$,输出为$y(k)$. BP神经网络迟滞模型的最终输出为

$$y(k)=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-q(k)}}. \tag{7}$$

整个网络的权值调整采用改进梯度最速下降法[16],即通过自适应反向传播算法自动调整权值更新公式中的学习速率和惯性因子,进而调整网络的权值和阈值,避免传统BP神经网络收敛速度慢、易陷入局部最优的缺点,最终使网络的误差平方和最小.

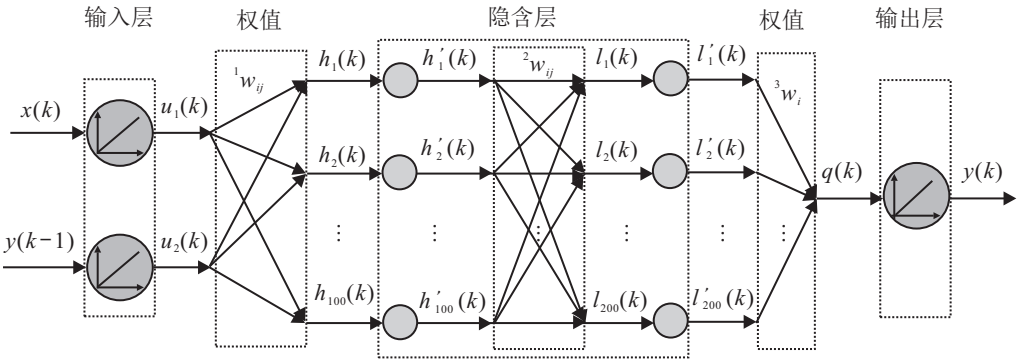

图1 BP神经网络迟滞模型结构

2 复合控制

2.1 基于BP神经网络迟滞逆模型前馈控制

压电微定位平台具有复杂的迟滞非线性,传统的控制方法很难满足对定位精度的要求. 因此,本文结合逆模型前馈控制理论[17],将压电微定位平台实际输出位移作为神经网络的输入,将驱动电压作为参考输出,采用图1所示具有两个隐含层的BP神经网络建立压电微定位平台的迟滞逆模型,并将压电

微定位平台的迟滞逆模型作为前馈控制器,对迟滞非线性进行补偿. 基于BP神经网络迟滞逆模型的前馈控制原理如图2所示. 设定压电微定位平台对象为$H[w](t)$,迟滞逆模型为$H^{-1}[w](t)$. 假设压电陶瓷微定位平台迟滞逆模型的精度足够高,则迟滞逆模型的输出即为压电微定位平台的实际驱动电压,平台的实际输出位移就可以很好地跟随给定的参考位移,整个系统将呈现出理想的线性特性,可表示为$y(t)=H[H^{-1}[w](t)]=1$,即基于迟滞逆模型的前馈控制对迟滞非线性起到有效的补偿作用.

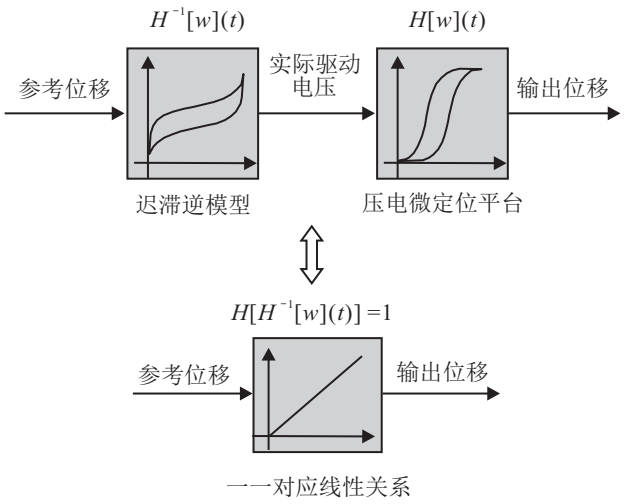

图 2　基于迟滞逆模型的前馈补偿原理

2.2　基于前馈补偿和专家模糊的复合控制

虽然基于迟滞逆模型的前馈控制可以对压电微定位平台的迟滞非线性进行补偿,但前馈控制存在抗干扰能力差的缺点,且逆模型与实际压电微定位平台匹配存在一定误差. 为了进一步提高控制精度,本文设计一种基于神经网络迟滞逆模型的前馈补偿和专家模糊控制的复合控制方案. 其控制结构原理如图3所示.

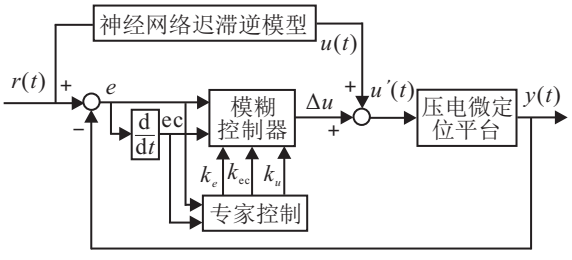

图 3　基于前馈补偿和专家模糊的复合控制结构

在专家模糊控制中,模糊控制的3个参数k_e、k_{ec}和k_u可根据专家控制规则[18-19]在线自适应调整. 在实际的压电微定位平台控制系统中,$r(k)$和$y(t)$分别代表参考的位移和实际平台的输出位移,模糊控制器的输入变量分别为输出位移误差e和误差的变化率ec,输出变量为Δu. 量化因子k_e和k_{ec}可以实现位移误差e和误差变化率ec从基本论域到模糊论域的转化,而比例因子k_u可将模糊输出Δu从模糊论域转换到基本论域中. 压电微定位平台实际控制电压为神经网络迟滞逆模型前馈补偿输出与专家模糊控制输出的代数和,即复合控制的输出$u'(k)=u(k)+\Delta u$. 其中: $u(k)$为k时刻迟滞逆模型前馈补偿输出; Δu为驱动电压变化量,由模糊控制器输出经比例因子k_u去模糊化后得到. 变量e、Δu和ec隶属度函数的选取结果如图4～图6所示.

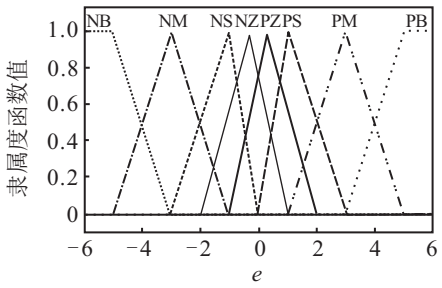

图 4　误差e的隶属度函数

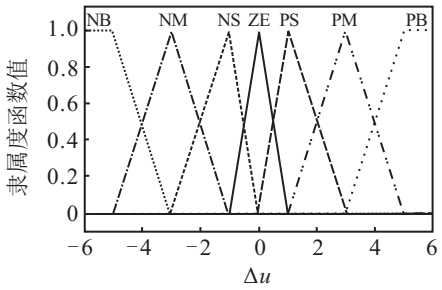

图 5　输出变量Δu的隶属度函数

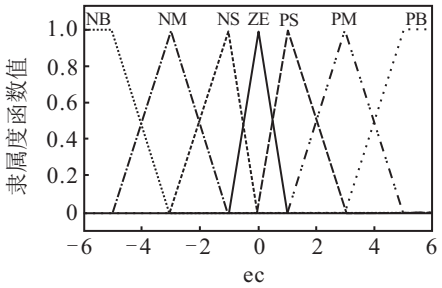

图 6　误差变化率ec的隶属度函数

在模糊控制过程中,将位移输出误差e、误差变化率ec和输出变量Δu均匀量化为$[-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6]$十三个等级,误差$e$的模糊集定义为{负大(NB), 负中(NM), 负零(NZ), 正零(PZ), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB)},而误差的变化率ec和输出变量Δu的模糊集定义为{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}. 根据控制经验,将控制规则以模糊控制表的形式给出,如表1所示. 当误差较大时,选择控制量以尽快消除误差为主; 当误差较小时,选择控制量以系统稳定为主,防止超调.

表1 模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PM	PS	PS	PS	PS
NM	PB	PM	PS	PS	PS	PS	ZE
NS	PM	PM	PS	PS	PS	ZE	ZE
NZ	PM	PM	PS	PS	ZE	ZE	ZE
PZ	PM	PM	PS	PS	NS	NS	ZE
PS	ZE	ZE	NS	NS	NS	NM	NB
PM	ZE	NS	NS	NS	NS	NM	NB
PB	NS	NS	NS	NS	NM	NM	NB

在经典模糊控制中,量化因子k_e、$k_{\rm ec}$和比例因子k_u都是常量,本文为了进一步提高压电微定位平台的控制性能,采用专家控制经验在线调整3个参变量的值,具体的专家调整控制规则如下:

Rule 1: if $e>0$ and ec>0 and $e\leqslant m$,
then $k_e=k_e+\Delta k_e, k_{\rm ec}=k_{\rm ec}+\Delta k_{\rm ec}$,
$k_u=k_u-\Delta k_u$;

Rule 2: if $e>0$ and ec>0 and $e>m$,
then $k_e=k_e+\Delta k_e, k_{\rm ec}=k_{\rm ec}$,
$k_u=k_u+\Delta k_u$;

Rule 3: if $e>0$ and ec<0 and $e>m$,
then $k_e=k_e+\Delta k_e, k_{\rm ec}=k_{\rm ec}$,
$k_u=k_u-\Delta k_u$;

Rule 4: if $e>0$ and ec<0 and $e\leqslant m$,
then $k_e=k_e-\Delta k_e, k_{\rm ec}=k_{\rm ec}+\Delta k_{\rm ec}$,
$k_u=k_u-\Delta k_u$;

Rule 5: if $e<0$ and ec>0 and $e\geqslant -m$,
then $k_e=k_e+\Delta k_e, k_{\rm ec}=k_{\rm ec}+\Delta k_{\rm ec}$,
$k_u=k_u-\Delta k_u$;

Rule 6: if $e<0$ and ec>0 and $e\leqslant -m$,
then $k_e=k_e+\Delta k_e, k_{\rm ec}=k_{\rm ec}$,
$k_u=k_u-\Delta k_u$;

Rule 7: if $e<0$ and ec<0 and $e\leqslant -m$,
then $k_e=k_e+\Delta k_e, k_{\rm ec}=k_{\rm ec}$,
$k_u=k_u+\Delta k_u$;

Rule 8: if $e<0$ and ec<0 and $e\geqslant -m$,
then $k_e=k_e-\Delta k_e, k_{\rm ec}=k_{\rm ec}+\Delta k_{\rm ec}$,
$k_u=k_u-\Delta k_u$;

Rule 9: if $e=0$ or ec$=0$,
then $k_e=k_e, k_{\rm ec}=k_{\rm ec}, k_u=k_u$.

其中:m为误差的边界值,且$m>0$;Δk_e、$\Delta k_{\rm ec}$和Δk_u分别是k_e、$k_{\rm ec}$、k_u的修正量.

3 仿真与分析

在Matlab环境下,利用压电微定位平台的驱动电压(幅值为0～150 V,周期为600 ms的三角波信号)与输出位移值(范围2.5～37.5 μm)作为仿真数据,验证并分析BP神经网络迟滞模型与迟滞逆模型的建模效果. 为了验证所提出的基于神经网络前馈补偿和专家模糊控制的复合控制方法的有效性,本文设定一个参考位移信号

$$y=\left(\frac{7x}{60}+2.5\right)\Big|_{(0<x<300)}+\left(\frac{-7x}{60}+72.5\right)\Big|_{(300<x<600)}.$$

其中:x表示时间,单位为ms;y表示随时间变化的位移值,单位为μm.

3.1 BP神经网络迟滞模型与迟滞逆模型

BP神经网络迟滞模型的仿真验证结果如图7所示. 其中:实线为压电微定位平台驱动电压与输出位移迟滞非线性曲线,虚线为BP神经网络迟滞模型在相同驱动电压下的输出位移迟滞曲线. 由图8的模型误差曲线可以看出,BP神经网络迟滞模型的最大建模误差为0.13 μm,相对误差率为0.35 %,从而表明本文所提出的具有两个隐含层的BP神经网络迟滞模型能够精确描述压电微定位平台的迟滞非线性.

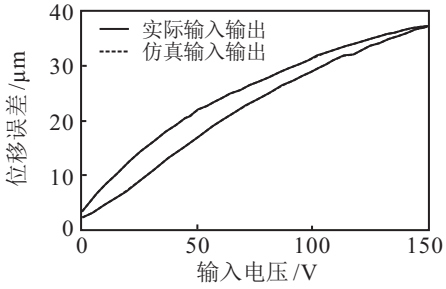

图7 BP神经网络迟滞模型

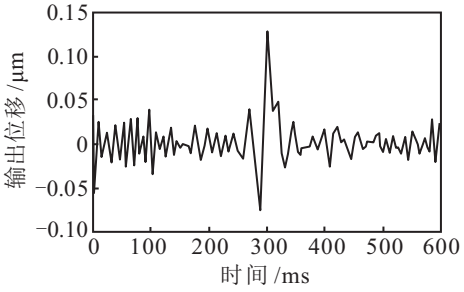

图8 BP神经网络迟滞模型误差曲线

将压电微定位平台的实际输出位移作为BP神经网络的输入,将实际三角波驱动电压作为BP神经网络的参考输出,通过式(1)～(7)可以建立压电微定位平台的神经网络迟滞逆模型. 对该迟滞逆模型建模精度的仿真验证结果如图9和图10所示. 可以看出,BP神经网络迟滞逆模型的建模最大误差为1.57 V,最大的相对误差率为1.05 %,可以比较准确地建立压电微定位平台的迟滞非线性逆模型.

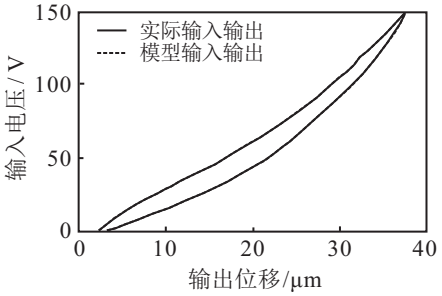

图 9　BP神经网络迟滞逆模型

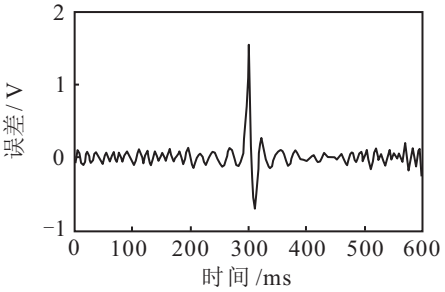

图 10　BP神经网络迟滞逆模型误差曲线

3.2　基于BP迟滞逆模型的前馈补偿控制

将BP神经网络迟滞逆模型作为前馈控制器,对压电微定位平台进行前馈补偿控制效果的仿真验证,结果如图11和图12所示.

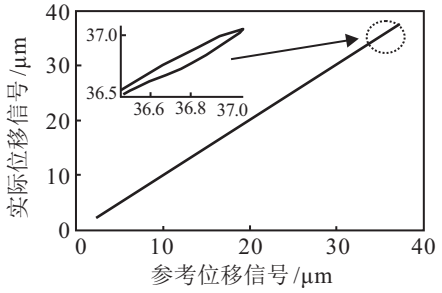

图 11　参考输出位移与实际输出位移关系曲线(前馈补偿控制)

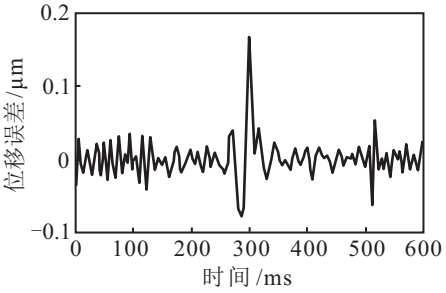

图 12　位移误差曲线(前馈补偿控制)

图11为基于BP神经网络迟滞逆模型前馈补偿的参考输出位移与实际输出位移关系曲线,图12为基于BP神经网络迟滞逆模型位移的定位误差曲线. 可以看出,前馈补偿控制的最大位移误差为0.17 μm,出现在最大位移转折点附近(见图11放大部分),对应的最大相对误差率为0.44 %,从而表明本文提出的基于BP神经网络迟滞逆模型的前馈补偿控制可以有效地消除迟滞非线性的影响,使压电微定位平台输出位移能较好地跟踪给定的位移信号.

3.3　神经网络前馈补偿和专家模糊复合控制

为了进一步提高压电微定位平台的定位控制精度,本文提出了基于BP神经网络迟滞逆模型前馈补偿和专家模糊控制的复合控制方案. 为了验证该方案的有效性,专家模糊控制的各个参数的初始值如表2所示,复合控制的仿真结果如图13和图14所示.

表 2　模糊控制初始化参数表

k_e	k_{ec}	k_u	Δk_e	Δk_{ec}	Δk_u	m
50	1	0.1	5	0.1	0.01	0.05

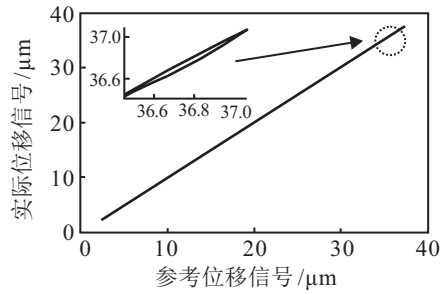

图 13　参考输出位移与实际输出位移关系曲线(复合控制)

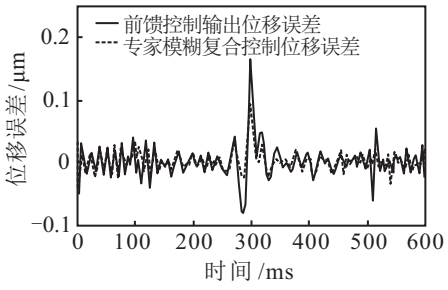

图 14　位移误差曲线(复合控制)

图13为复合控制方案参考输出位移与实际输出位移关系曲线,可以看出,压电微定位平台的输出位移可以很好地跟踪参考位移信号,且最大输出位移转折点处的误差得到明显消除(见图13放大部分). 图14为神经网络前馈补偿和专家模糊复合控制方案下的输出位移误差曲线,可以看出,压电微定位平台输出位移的最大误差降低到0.091 μm,最大的相对误差率为0.26 %,充分表明了本文所提出的复合控制方法可以进一步提高压电微定位平台的控制精度.

4　结　论

为了消除压电微定位平台本身固有迟滞非线性对输出位移精度的影响,本文采用具有两个隐含层的BP神经网络对压电微定位平台驱动电压与输出位移之间的迟滞非线性进行深层次的学习,从而建立压电微定位平台的迟滞模型和迟滞逆模型. 仿真结果显

示,基于两个隐含层的BP神经网络迟滞模型的最大建模误差为0.13 μm,最大相对误差率为0.35 %,迟滞逆模型的最大建模误差为1.57 V,最大相对误差率为1.05 %,表明本文的BP神经网络建模方法可以很好地描述压电微定位平台的迟滞非线性特性. 为了消除迟滞非线性对定位精度的影响,将BP迟滞逆模型作为前馈控制器对压电微定位平台的迟滞非线性进行补偿,仿真结果表明,经前馈补偿后的最大位移误差可降到0.17 μm,最大相对误差率为0.44 %,输出位移呈现出较好的线性特性. 为了进一步提高压电微定位平台位移输出精度,弥补前馈控制难以消除外界干扰对控制精度影响的缺点,提出了基于BP神经网络迟滞逆模型前馈补偿和专家模糊控制的复合控制方案. 通过仿真验证表明,该复合控制方案可以将压电微定位平台的最大位移定位误差降低到0.091 μm,最大相对误差率降到0.26 %,使控制精度得到进一步提高.

参考文献(References)

[1] Devasia S, Eleftheriou E, Moheimani S O R. A survey of control issues in nanopositioning[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2007, 15(5): 802-823.

[2] Gu G Y, Zhu L M, Su C Y, et al. Motion control of piezoelectric positioning stages: Modeling, controller design, and experimental evaluation[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2013, 18(5): 1459-1471.

[3] Hubbabd N B, Culpepper M L, Howell L L. Actuators for micropositioners and nanopositioners[J]. Applied Mechanics Reviews, 2006, 59(6): 324-334.

[4] Kenton B J, Leang K K. Design and control of a three-axis serial-kinematic high-bandwidth nanopositioner[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2012, 17(2): 356-369.

[5] Kawamata A, Kadota Y, Hosaka H, et al. Self-sensing piezoelectric actuator using permittivity detection[J]. Ferroelectrics, 2008, 368(1): 194-201.

[6] Bertotti G, Mayergoyz I D. The science of hysteresis: Physical modeling, micromagnetics, and magnetization dynamics[M]. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2006: 1-649.

[7] Xiao S, Li Y. Modeling and high dynamic compensating the rate-dependent hysteresis of piezoelectric actuators via a novel modified inverse preisach model[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2013, 21(5): 1549-1557.

[8] Ang W T, Khosla P K, Riviere C N. Feedforward controller with inverse rate-dependent model for piezoelectric actuators in trajectory-tracking applications[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2007, 12(2): 134-142.

[9] Wang Q, Su C Y. Robust adaptive control of a class of nonlinear systems including actuator hysteresis with prandtl-ishlinskii presentations[J]. Automatica, 2006, 42(5): 859-867.

[10] Lin C J, Lin P T. Tracking control of a biaxial piezo-actuated positioning stage using generalized duhem model[J]. Computers Mathematics with Applications, 2012, 60(5): 766-787.

[11] Dong R, Tan Y, Xie Y. Identification of micropositioning stage with piezoelectric actuators[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 75: 618-630.

[12] Cheng L, Liu W, Hou Z G, et al. Neural-network-based nonlinear model predictive control for piezoelectric actuators[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7717-7727.

[13] Ru C, Chen L, Shao B, et al. A hysteresis compensation method of piezoelectric actuator: Model, identification and control[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(9): 1107-1114.

[14] Lin F J, Lee S Y. Intelligent integral backstepping sliding-mode control for piezo-flexural nanopositioning stage[C]. The 2nd IEEE Int Future Energy Electronics Conf(IFEEC). Taipei: IEEE, 2015: 1-6.

[15] Gu G Y, Yang M J, Zhu L M. Real-time inverse hysteresis compensation of piezoelectric actuators with a modified prandtl-ishlinskii model[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(6): 065106-1-065106-8.

[16] Jin W, Li Z J, Wei L S, et al. The improvements of BP neural network learning algorithm[C]. Proc of 5th Int Conf on Signal Processing. Beijing: IEEE, 2000: 1647-1649.

[17] Wang X J, Alici G. Modeling and inverse feedforward control for conducting polymer actuators with hysteresis[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 23(2): 105-111.

[18] Åström K J, Anton J J, Årzén K E. Expert control[J]. Automatica, 1986, 22(3): 277-286.

[19] Årzén K E. Architecture for expert system based feedback control[J]. Automatica, 1989, 25(6): 813-827.

（责任编辑：李君玲）