

文章编号 1004-924X(2008)07-1266-07

压电陶瓷执行器的神经网络实时自适应逆控制

党选举

(桂林电子科技大学 智能系统与工业控制研究室, 广西 桂林 541004)

摘要:提出了基于内积的压电陶瓷动态神经网络非线性、非光滑迟滞逆模型,采用反馈误差学习方法,快速地在在线得到压电陶瓷的逆模型,避免了通过正模型求取压电陶瓷的 Jacobian 信息。结合 PID 反馈控制,在 dSPACE 系统平台上实现了压电陶瓷的神经网络自适应逆控制。为提高实时性,采用了效率高、速度快的 C-MEX S Function 编程。实验结果表明:神经网络自适应逆控制的控制精度为 $0.13 \mu\text{m}$,而 PID 控制精度为 $0.32 \mu\text{m}$ 。所提出方法有效地消除了迟滞的影响,控制精度高。

关键词:压电陶瓷;迟滞特性;神经网络自适应逆控制;dSPACE 系统;非光滑迟滞逆模型

中图分类号:TN384; TP273.2 **文献标识码:**A

Real-time adaptive inverse control based on neural networks for piezoceramic actuator

DANG Xuan-ju

(*Laboratory of Intelligent System and Control Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China*)

Abstract: In order to improve the actuator precision, a method for eliminating nonlinear and no-smooth hysteresis characteristic of piezoceramic actuator was proposed. An inner product-based dynamic neural network nonlinear and no-smooth hysteresis inverse model for piezoceramic was established, in which the feedback error learning method was used to avoid obtaining Jacobian information of piezoceramic by positive model. On dSPACE system platform, a neural networks adaptive inverse control was realized combined with a PID control. In order to satisfy the requirement of real time control, the program was designed by a high efficiency and fast C-MEX S function. The experimental results indicate that the precision of the proposed adaptive inverse control based on neural networks is $0.13 \mu\text{m}$ and PID control precision is $0.32 \mu\text{m}$. It is shown that the proposed control method can remove effectively the hysteresis characteristic of piezoceramic and has higher control precision.

Key words: piezoceramic; hysteresis characteristic; neural network adaptive inverse control; dSPACE system; no-smooth hysteresis inverse model

收稿日期:2007-12-02;修订日期:2008-01-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60572055);广西区自然科学基金资助项目(桂科自 No. 0640170)

1 引言

在微/纳米级定位控制系统中,推力大,响应速度快的压电陶瓷常作为执行器,但压电陶瓷表现为一种多值对应的非光滑、非线性的迟滞特性,并且在输入信号频率提高时,迟滞特性发生顺时针的旋转,即压电陶瓷表现为一种特殊的动态迟滞非线性特性^[1]。对于压电陶瓷,采用常规的控制方法,不能对其实现有效的控制。几年来,压电陶瓷的建模与控制,成为精密定位研究中的热点之一。已有的非线性迟滞模型主要可分两大类:(1)Preisach 模型^[2]、PI 及 KP 模型等,它们属于静态模型;(2)基于微分方程的动态模型,如 JA 模型^[3]、Duhem 模型、Bouc-Wen 模型等,但它只适合于固定频率的输入信号。Ge, P. & Musa, J^[1]指出,压电陶瓷的迟滞特性是与输入信号斜率有关的非光滑的动态迟滞非线性特性。所以,非光滑和动态迟滞特性的建模与控制研究成为压电陶瓷迟滞特性研究中的重点和难点。

文献[4]中引入了内积概念,很好地描述了压电陶瓷的动态特性和不光滑特性。该文首先提出了基于内积的压电陶瓷神经网络非光滑、非线性动态迟滞的逆模型;其次提出压电陶瓷的神经网络自适应逆控制方法。

自适应逆控制^[5]由美国斯坦福大学 B. Widrow 提出,并成功地应用到加速器等控制中。在非线性系统的自适应逆控制中,由于不能准确地得到非线性的逆模型,故出现了逆模型与其他控制相结合的控制方法。对于逆模型,M. Kawato 提出了反馈误差学习方法,在线学习得到控制对象的逆模型。在已有的反馈误差学习控制方法中,控制对象只是一般的非线性动态系统,对迟滞对象的实时控制研究很少见。对于压电陶瓷(或迟滞对象)的控制有:基于 Preisach 静态模型逆模型控制^[6-7]、基于 KP 静态模型的控制^[8]、对输入信号有限制的神经网络迟滞控制仿真^[9]、动态神经自适应滑模控制^[10]和基于 Duhem 模型仿真控制^[11]等。但基于 Duhem 模型控制和动态神经自适应滑模控制,都是基于动态迟滞模型的控制,只限于仿真控制研究,并且模型精度不高。当输入信号是任意频率信号时,压电陶瓷表现为非光滑、非线性动态迟滞特性的情况下,采用反馈误差

学习方法进行压电陶瓷实时自适应逆控制的研究较少。

本文提出了基于内积的压电陶瓷非光滑、非线性的动态迟滞神经网络逆模型,采用了反馈误差学习方法,避免了通过正模型求取压电陶瓷的 Jacobian 信息,并且在 dSPACE 系统平台上实现,其中,程序的设计采用了效率高、速度快的 C-MEX S Function 编程,加快了控制算法的学习速度,满足了压电陶瓷快速响应^[1]的要求,实现了对具有动态迟滞特性的压电陶瓷的神经网络实时自适应逆控制。

2 基于内积的压电陶瓷动态神经网络迟滞模型

引入了内积概念,首先将压电陶瓷的多值对应关系转化为单值对应关系。之后,采用结构简单、学习速度快的 RBF 神经网络实现已转换后的单值映射的同时,并通过增加外部输出反馈,描述压电陶瓷的迟滞动态特性。

Cincotti S^[12]针对磁导体的迟滞特性,提出了以电压、磁场强度、及其它影响因素为输入向量,电流为输出信号的磁导体迟滞特性模型,这种方法是在四维空间中建立迟滞特性的模型,但该方法是一种特殊情况。而压电陶瓷只有一个输入信号,从物理概念的角度,借鉴 Cincotti S 提出的建立迟滞模型的方法是无法实现的。所以,压电陶瓷的非光滑、动态迟滞非线性特性的建模更困难,更具有代表性。

2.1 基于内积的迟滞模型

迟滞特性是一个多值映射,设输入、输出信号分别满足 $u \leq C_1$, $y \leq C_2$, C_1 和 C_2 是常数。多值迟滞映射定义如下:

定义 2.1^[4]

$y=f(u(t))$ 是多值映射迟滞函数,如果下面条件满足:

$$u(t_a) = u(t_d), \quad (1)$$

$$u'(t_a) > 0, u'(t_d) < 0, \quad (2)$$

$$y(t_a) \neq y(t_d), y(t_a) < y(t_d). \quad (3)$$

式中, t_a 、 t_d 表示在输入值 u 大小相同时,正、逆程对应的时间; $y(t_a)$ 表示输入为 $u(t_a)$ 时的 y 值。

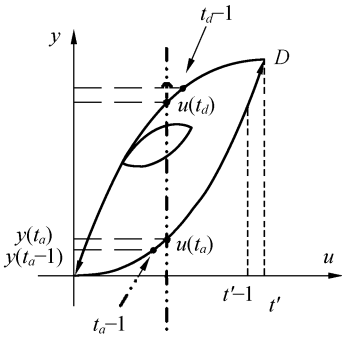


图 1 迟滞特性

Fig. 1 Hysteresis characteristic

对于极值时的特殊点(如图 1 所示)满足:

$$t_a = t_d, y(t_a) = y(t_d) = y(t'), u(t_a) = u(t_d).$$

定理 2.1^[4]对以上定义的多值迟滞函数,设

$$0 \leq A \leq C_1 C_2, \quad (4)$$

式中:

$$A_i = (y(t_i) - \Delta y_i) u(t_i), \text{ 或者 } A_i = y(t_i - 1) u(t_i) \quad i = a, d.$$

设 $\Delta y_i = y(t_i) - y(t_i - 1)$, $y(t_i - 1)$ 是在 $t_i - 1$ 时刻的输出,它是当前时刻 t_i 的前一时刻。则,输入向量 $(A_i, u(t_i))$ 与输出 $y(t_i)$ 是单值对应关系。

2.2 压电陶瓷的 RBF 动态迟滞模型及迟滞非光滑特性

RBF 动态迟滞模型结构如图 2 所示。图中单值映射关系采用 RBF 神经网络实现,并在输入信号中增加了压电陶瓷的前一时刻的采样值,目的是为了模型能够描述压电陶瓷的动态特性。

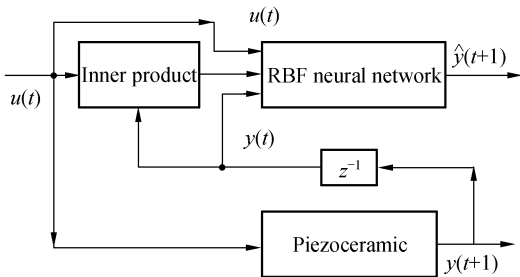


图 2 动态 RBF 神经网络迟滞模型

Fig. 2 Dynamic RBF neural network hysteresis model

由于内积概念的引入,实际上是在 RBF 神经网络之前引入非光滑模型:

$$A_i = y(t_i - 1) u(t_i), \quad (5)$$

图 3 中, $y(t_i - 1)$ ($i = a, d$) 是内积模型,由于压电陶瓷输出是非光滑的,所以内积模型也是非光滑的。在提出的神经网络动态迟滞模型(如图 2 所示)中的 RBF 神经网络只是完成动态非线性单值映射。所以,基于内积的动态迟滞模型能很好地描述压电陶瓷的非光滑、非线性动态迟滞特性。

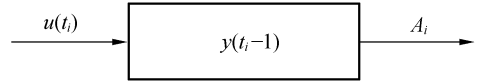


图 3 内积结构

Fig. 3 Inner product-based structure

3 压电陶瓷的 RBF 动态迟滞逆模型

根据压电陶瓷输入输出特性是一个增函数(单调函数)^[13]的特点,在图 2 所示的正模型基础上,得到逆模型结构如图 4 所示。

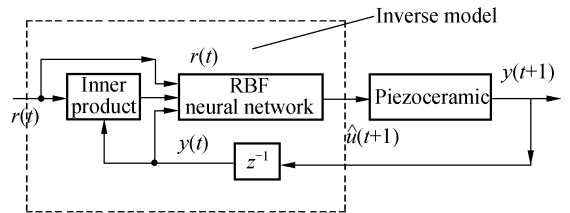


图 4 压电陶瓷的逆模型

Fig. 4 Inverse model for piezoceramic

压电陶瓷的正模型:

$$\hat{y}(t+1) = f(u(t) y(t), u(t), y(t)), \quad (6)$$

对应的压电陶瓷的逆模型:

$$u(t+1) = f^{-1}(y(t) r(t), y(t), r(t)). \quad (7)$$

4 压电陶瓷的神经网络自适应逆控制

在提出的非线性压电陶瓷动态迟滞模型的基础上,对应得到逆模型的结构,提出了基于反馈误差学习方法的神经网络压电陶瓷的自适应逆控制方法。由于迟滞动态系统的逆模型存在误差,所以在控制中结合了 PID 反馈控制,以消除逆模型误差带来的影响。所提出的控制系统在 dSPACE 系统平台上采用速度和效率高的 C-

MEX S 函数编程实现^[14], 有效地缩短了控制算法学习时间, 满足了控制的实时性要求。

4.1 逆模型中的 RBF 神经网络学习

压电陶瓷的逆模型结构采用具有单隐层的 3

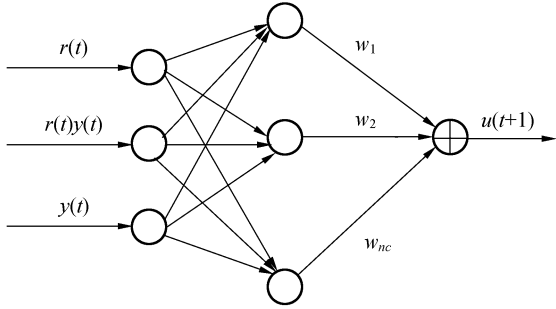


图 5 压电陶瓷的逆模型结构

Fig. 5 Structure of piezoceramic inverse model

层前馈网络如图 5 所示, 其输入输出关系如下:

$$u(t+1) = \sum_{j=1}^{n_c} w_j \Phi_j(x), \quad (8)$$

$$\Phi_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2\sigma_j^2}\right), \quad (9)$$

式中, n_c 是隐含层节点数; $\|\cdot\|$ 是欧几里德范数; $x \in \mathbf{R}^N$ 为输入向量, $x = [r(t), r(t)y(t), y(t)]$; $c_j \in \mathbf{R}^N$ 为第 j 个隐节点的中心; $\sigma_j \in$ 为第 j 个隐节点的宽度; w_j 是第 j 个基函数与输出节点的连接权值。

在式(9)中 σ_j 决定节点的输出形状, 式(9)可简化表示为:

$$\Phi_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{b^2}\right). \quad (10)$$

取 $b = n/0.8236$ ^[15], n 是整数, 决定高斯函数的宽度, 公式(10)关系如图 6 所示:

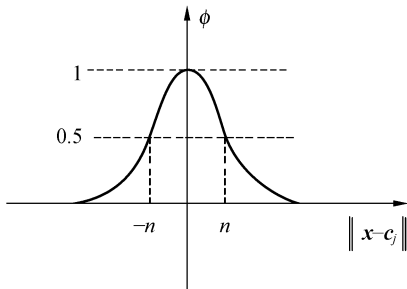


图 6 高斯函数

Fig. 6 Gauss function

采用反馈误差学习方法^[16-17], 避免了通过正模型, 求取压电陶瓷的 Jacobian 信息。由梯度学习方法得到 RBF 神经网络中的权系数 c 和 W 迭代算法如下:

$$w_j(t) = w_j(t-1) + \eta(r(t) - y(t+1))\phi_j(t) + \alpha(w_j(t-1) - w_j(t-2)), \quad (11)$$

$$c_j(t) = c_j(t-1) + \left(\frac{0.8236}{n}\right)^2 \eta(r(t) - y(t+1))w_j(t) + \alpha(c_j(t-1) - c_j(t-2)), \quad (12)$$

$$\phi_j(t) = \left(\frac{0.8236}{n}\right)^2 \|x - c_j\|^2, \quad (13)$$

$$u(t+1) = \sum_1^{n_c} w_j(t)\phi_j(t), \quad (14)$$

式中, w 和 c 为加权系数, $x = [r(t), r(t)y(t), y(t)]$ 为输入向量。

4.2 基于反馈误差学习方法的压电陶瓷神经网络实时自适应逆控制

4.2.1 系统组成

在实现压电陶瓷微定位的控制中, 将压电陶瓷、dSPACE 系统单板系统(DS1103)^[14]、PI 系统(位移的测量、信号的放大功能)构成一个闭环控制。软件采用 C MEX-S Function 设计 PID 控制和 RBF 神经网络控制器(压电陶瓷逆模型)。

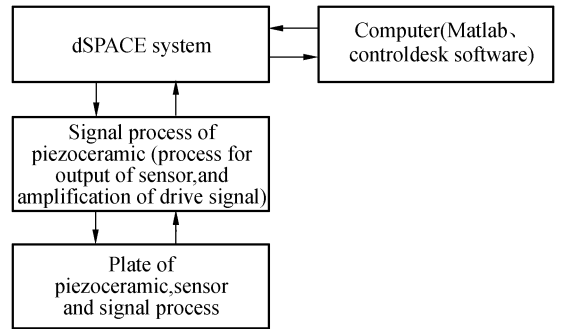


图 7 控制系统的硬件组成框图

Fig. 7 Hardware block diagram of control system

系统硬件^[17]如 7 框图所示。整个控制系统的实物图如 8 所示, 在图 8 中, 压电陶瓷的信号处理在德国 PI 公司的设备平台完成, 其中压电陶瓷和传感器是一体的。其信号的处理有: (1) 电容式位移传感器输出的电压信号放大到 0~10 V; (2) 将 dSPACE 中 D/A 的输出送到 PI 设备, 该信号被 PI 设备放大(变化范围在: 0~120 V)用于驱动压电陶瓷。

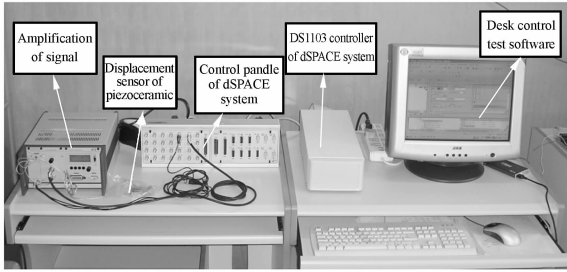


图 8 控制系统实验平台

Fig. 8 Platform of system experiment

在控制系统研究中,典型的平台——dSPACE 系统,具有可靠、快速、易于与 MATLAB 连接等诸多优点,是半实物实时仿真的软硬件工作平台,可完成 A/D 转换、D/A 输出、控制算法的实现等。在 dSPACE 系统中,ControlDesk 测试软件用于完成信号的收集和显示等,并完成参数的调整和测试信号的保存等。

4.2.2 基于 dSPACE 系统的压电陶瓷神经网络实时自适应逆控制的实现

控制系统由 RBF 控制器(与第 3 部分的压电陶瓷逆模型结构相同)、PID 控制器、A/D、D/A 组成,如框图 9 所示。控制系统在 MATLAB/Simulink 下的组态模型如图 10 所示。该组态模型下载到 dSPACE 系统,就可实现实时控制。

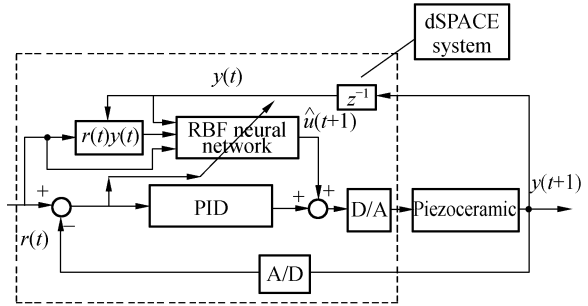


图 9 控制系统的组成框图

Fig. 9 Block diagram of control system

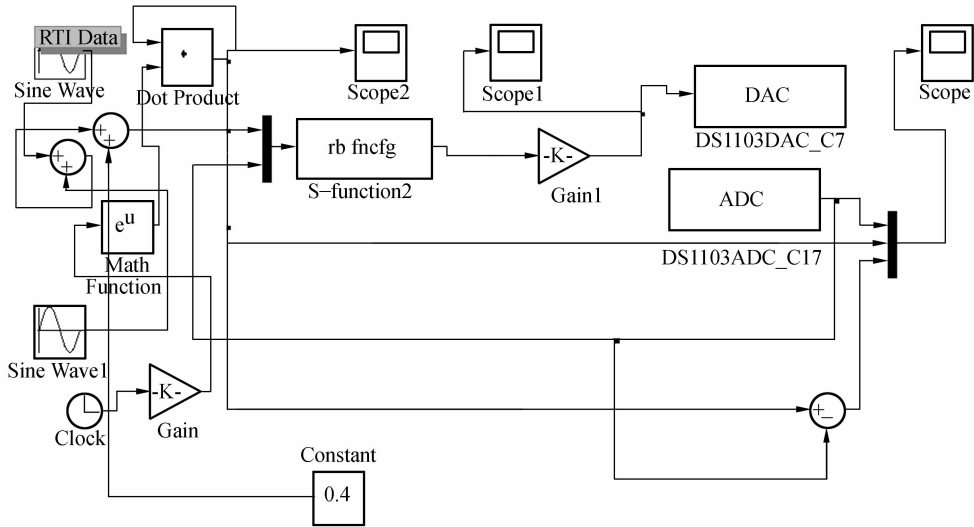


图 10 控制系统的 Simulink 组态图

Fig. 10 Simulink configuration diagram of control system

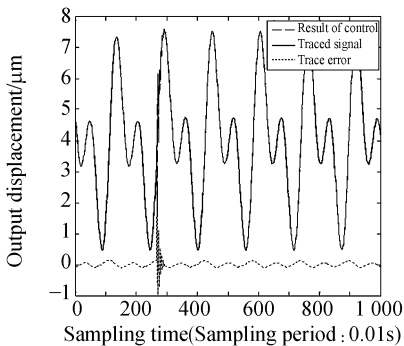


图 11 RBF +PID 控制

Fig. 11 RBF plus PID control

神经网络的参数:学习系数 0.002 5; 其中, PID 控制的比例系数、微分系数及积分系数分别为: 3、1.8、8。PID 单独控制时,比例系数、微分系数及积分系数分别为:1.2、0.8、2.7。

所提出的神经网络自适应逆控制和 PID 控制结果分别如图 11 和 12,图 13 是两种控制的误差比较情况。从两种控制效果分析,压电陶瓷的 RBF 神经网络 PID 自适应逆控制比 PID 控制的误差小许多,具有更好的控制效果。

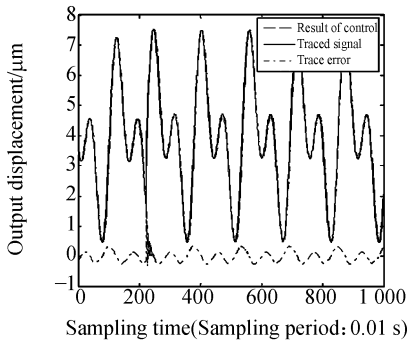


图 12 PID 控制

Fig. 12 PID control

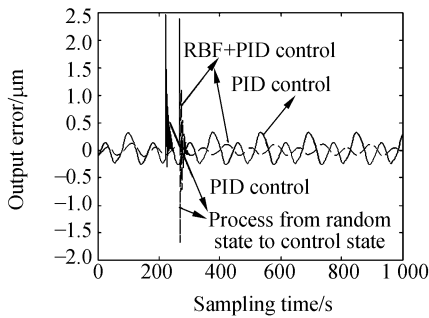


图 13 PID 控制与所提出控制的跟踪误差

Fig. 13 Trace error of PID control and proposed control

图 13 中, 2 s 后, 突然关掉电源, 产生随机的强干扰, 两种控制方法都具有很好的抗干扰能力。RBF 神经网络 PID 自适应逆控制因为用在线学习进行调整参数, 所以过渡过程需要的时间较长, 震荡的幅值较大。但从稳定误差看, 所提出神经网络自适应控制的控制精度为: $0.13 \mu\text{m}$, 而 PID 控制精度为: $0.32 \mu\text{m}$, 所以, RBF 神经网络 PID 自适应逆控制具有更好的控制效果。

5 结 论

提出了基于内积的压电陶瓷非光滑动态迟滞神经网络的逆模型, 并在 dSPACE 平台上实现了压电陶瓷的神经网络实时自适应逆控制。其中采用反馈误差学习方法, 避免了通过正模型求取压电陶瓷的 Jacobian 信息, 并且采用了 C-MEX S Function 编写控制软件, 有效地加快了在线更新 RBF 神经网络权值的学习速度。实验结果表明, 所提出神经网络的自适应控制精度为 $0.13 \mu\text{m}$, 而 PID 控制精度为 $0.32 \mu\text{m}$, 满足了压电陶瓷实时控制的要求。

参考文献:

- [1] GE P, MUSA J. Generalized Preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuators[J]. *Precision Engineering*, 1997, 19(2): 99-111.
- [2] 李黎, 刘向东, 王伟, 等. 压电陶瓷执行器迟滞特性的广义非线性 Preisach 模型及其数值实现[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 706-712.
LI L, LIU X D, WANG W, et al.. Generalized nonlinear Preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuator and its numerical implementation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 706-712. (in Chinese)
- [3] 李欣欣, 王文, 陈戡恒, 等. Jiles-Atherton 模型的超磁致伸缩驱动器磁滞补偿控制[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1558-1563.
LI X X, WANG W, CHEN J H, et al.. Hysteresis compensation of giant magnetostrictive actuator based on Jiles-Atherton model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1558-1563. (in Chinese)
- [4] DANG X J, TAN Y H. An inner product-based dynamic neural network hysteresis model for piezoceramic actuators[J]. *Sensors & Actuators A-Physical*, 2005, 121(2): 535-542.
- [5] B 威德罗, E. 瓦莱斯. 自适应逆控制[M]. 西安: 西安交通大学, 2000.
WIDROW B, EUGENE W. *Adaptive Inverse Control* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000. (in Chinese)
- [6] 王岳宇, 赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 1032-1040.
WANG Y Y, ZHAO X Z. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1032-1040. (in Chinese)
- [7] TAN X B, BARAS J S. Adaptive identification and control of hysteresis in smart materials[J]. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 2005, 50(6): 827-839.

- [8] WEBB G, KURDILA A, LAGOUDAS D. Adaptive hysteresis model for reference control with actuator hysteresis [J]. *Journal Guidance Control and Dynamics*, 2000, 23 (3) :450-465.
- [9] LI CH T, TAN Y H. Adaptive output feedback control of systems preceded by the preisach-type hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2005, 35 (1): 130-135.
- [10] CHIH L H, CHAU J. A reinforcement discrete neuro-adaptive control for unknown piezoelectric actuator systems with dominant hysteresis [J]. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 2003, 14(1): 66-78.
- [11] LU T SH, TAN Y H, SU CH Y. Pole placement control of discrete time systems preceded with hysteresis via dynamic neural network compensator [C]. *Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Vancouver, Canada*, 2002.
- [12] CINCOTTI S, MARCHESI M, SERRI A. A neural network model of parametric nonlinear hysteretic inductors [J]. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 1998, 34(5): 3040-3043.
- [13] CRUZ-HERNAMDEZ J M, HAYWARD V. An approach to reduction of hysteresis in smart materials [C]. *Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium, May*, 1998.
- [14] 杨涤, 李立涛, 杨旭, 等. 系统实时仿真开发环境与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
YANG D, LI L T, YANG X, et al.. *Environment and Development Application of System Real-time Simulation* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)
- [15] MATHWORKS C. *Neural Network Toolbox* [M]. 4. 0. 1 Release Notes, 2005.
- [16] MENG J. Control of adept one SCARA robot using neural networks [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 1997, 44(6) : 762-768.
- [17] 党选举. 迟滞非线性压电陶瓷微位移驱动器的建模方法研究 [D]. 上海交通大学, 2005.
DANG X J. *Research on modeling methods of micro-displacement actuator of piezoceramic with hysteresis non-linear behavior* [D]. Shanghai Jiaotong University, 2005. (in Chinese)

作者简介: 党选举(1965—), 男, 陕西咸阳人, 博士, 教授, 主要从事非线性系统建模与控制, 微纳米级定位智能控制及智能仪表等方面的研究。E-mail: xjd69@163.com

(本栏目编辑 李树军)

● 下期预告

三维柔性神经微电极阵列的制作

孙晓娜^{1,2}, 周洪波^{1,2}, 李刚^{1,2}, 朱壮晖^{1,2}, 姚源^{1,2}, 赵建龙¹, 任秋实³

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 上海交通大学激光与生物医学研究所, 上海 200030)

提出了一种三维凸起柔性神经微电极阵列的制作方法。该方法以光敏性聚酰亚胺(Durimide 7510)为基质材料, 以各向异性刻蚀的硅为模具, 结合微注模、金属微图形化和牺牲层电化学释放技术制作三维凸起柔性微电极, 并通过数值模拟、形貌观测和电学性能测试对制备的微电极进行了评价。利用上述方法制备了具有 4×4 电极位点阵列的三维柔性神经微电极, 每个电极位点大小为 $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$, 高度约 $37 \mu\text{m}$; 阻抗测试显示, 1 kHz 时三维凸起电极位点的阻抗相对于传统的相同大小的平面微电极阵列降低约 63%。结果表明该电极的凸起特点可以保证电极刺激位点与神经细胞的良好接触, 同时凸起结构也增加了电极刺激位点的表面积, 改善了电极刺激位点的电荷注入能力, 从而可有效提高刺激效果。