

文章编号 1004-924X(2009)04-0778-09

# 用神经网络结构实现超磁致伸缩智能构件滑模控制

赵章荣<sup>1,2</sup>, 邬义杰<sup>1</sup>, 顾新建<sup>1</sup>, 张雷<sup>1</sup>, 王彬<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 现代制造工程研究所 流体传动与控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;  
2. 华北科技学院 机电系, 河北 燕郊 101601)

**摘要:**提出了一种利用超磁致伸缩材料(GMM)智能构件精密加工活塞异形孔的方法。采用一种神经网络前馈复合离散滑模变结构控制策略,实现GMM智能构件的精密位移控制,消除了GMM智能构件迟滞非线性的影响。将智能构件的输出位移及其变化率作为小脑模型神经网络(CMAC)输入,构件的输入电流作为网络输出,利用CMAC在线自学习能力建立GMM智能构件的迟滞逆模型;通过离散滑模变结构控制器来消除神经网络的建模近似误差以及外界干扰。仿真结果表明,此控制策略能在线建立智能构件的迟滞逆模型,消除迟滞非线性的影响,控制误差降低到1.5%以内,可实现智能构件的精密位移控制。

**关键词:**超磁致伸缩智能构件;小脑模型神经网络(CMAC);滑模变结构控制;前馈补偿;迟滞非线性

**中图分类号:**TP183;TP271.7 **文献标识码:**A

## Implementation of sliding mode control of giant magnetostrictive smart component by neural network

ZHAO Zhang-rong<sup>1,2</sup>, WU Yi-jie<sup>1</sup>, GU Xin-jian<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Institute of Modern Manufacture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*; 2. *Department of Mechanical & Electronic, North China Institute of Science & Technology, Yanjiao 101601, China*)

**Abstract:** A new method for precise machining non-cylinder pin holes of pistons was presented by using Giant Magnetostrictive Material(GMM) smart components. To eliminate the impact of GMM smart component hysteresis and nonlinearity, a real-time hysteretic compensation control strategy combining a CMAC neural network feedforward controller and a sliding mode controller was proposed to implement the precision position tracking control of the smart component. The output and the output rate were used as the input data of CMAC neural network of the current smart component, the input current as the output of the neural network, and an inverse hysteresis model based on the GMM smart component was established by the CMAC network on-line learning. The model approximate error of CMAC neural network and the external disturbance were eliminated by using the discrete sliding controller. Simulation results show that the control strategy could on-line obtain the inverse hysteresis

收稿日期:2008-04-07;修订日期:2008-06-25.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 50575205);国家"863"高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA04Z233, 2007AA04Z101);国家教育部博士点基金资助项目(No. 20070335204);浙江省自然科学基金重点资助项目(No. Z1080537)

model of the smart component with a controll error less than 1.5%, and could eliminate the hysteretic nonlinear impact on the smart component.

**Key words:** giant magnetostrictive smart component; CMAC neural network; sliding mode variable structure control; feedforward compensation; hysteresis nonlinearity

## 1 引言

活塞是汽车、轿车、摩托车、拖拉机、柴油机、压缩机等的关键零件。由于活塞在发动机气缸中处于高温、高压的交变作用,活塞销孔受力不均匀。随着发动机燃气输出功率和转速的日益提高,活塞所承受的燃气压力和惯性力愈来愈大,活塞销孔所承受的载荷也愈来愈大,这样原结构中作为支承部分的销孔的内表面上部的裂纹问题就变得明显了。为了解决这类问题,通常将销孔设计成喇叭口形状或椭圆形状,此种非圆柱形销孔即为“异型销孔”<sup>[1]</sup>。目前国内外较成熟加工异形孔的方法主要有主轴相对偏心式、倾斜主轴式、弹性变形式和机械仿形式等<sup>[2-4]</sup>,这些方案均需采用机械部件及靠模,因而有结构复杂、部件制造精度要求高、长时间运行易产生磨损、加工精度不易保证、局限于某类活塞异形销孔的加工、无法实现非圆曲面型异形销孔加工等缺点。张凯、翟鹏<sup>[5-6]</sup>分别利用压电陶瓷和超磁致伸缩材料(GMM)加上变形结构来进行异形加工,但结构复杂。本文将GMM嵌入到构件中,设计精密加工异形孔的智能构件。

对活塞异形孔的精密加工,需要对设计的智能构件进行精密位移跟踪控制,这就要求对GMM迟滞非线性进行建模和控制。有关迟滞非线性建模及控制方法,已有很多国内外学者开展了研究<sup>[7-10]</sup>,目前主要有动态控制、静态控制以及神经网络控制等。动态控制<sup>[11-12]</sup>是通过在线调整所建立的线性参数化迟滞逆模型的参数来实现对各种信号输入都适合的控制方法;但动态控制存在系统工作初期误差较大、逆模型在线调整复杂等缺点。静态控制<sup>[13-14]</sup>是通过迟滞特性离线辨识,得到相关的系统输入输出数据,系统工作时仅仅需要查表来实现控制;静态控制能对静态迟滞效应进行高精度补偿,算法简单易用,但对迟滞动态变化的系统不适合。神经网络对非线性系统具有良好的逼近能力,具有简化模型辨识算法、高的

建模精度优点;缺点是:神经网络理论上只能一一映射或多对一映射,不能实现迟滞这种一对多的映射。因此,实现多值映射到一般非线性映射转化,是应用神经网络技术进行迟滞建模与控制的关键。对此,Hwang<sup>[15]</sup>用两个结构相同的神经网络分别建立单环迟滞上下半环的逆模型,但它仅能补偿单环迟滞特性。王湘江<sup>[16]</sup>通过分段建立逆模型,然后再用叠加的方式建立整个迟滞系统的逆模型,模型可以应用于多环迟滞的补偿。由于GMM的迟滞随着输入信号频率变化而变化,使用神经网络建模时,需要表征迟滞随输入信号频率变化这一特性。

本文为了将GMM迟滞特性的一对多映射关系转化为一对一的映射关系,实现GMM迟滞逆模型的神经网络建模,使用智能构件理想输出位移和变化率作为神经网络的输入,智能构件的输入驱动电流作为神经网络输出来建立神经网络。并且,通过使用位移随时间的变化率来描述GMM迟滞和输入信号频率的相关特性,实现了考虑动态迟滞效应的GMM智能构件迟滞逆模型。在此基础上,使用小脑模型(CMAC)神经网络在线自学习建立GMM智能构件迟滞逆模型,提出一种基于CMAC前馈结合离散滑模变结构控制的实时迟滞补偿控制策略,实现智能构件的精密位移控制。仿真表明,此控制策略能够得到智能构件理想位移控制效果。

## 2 应用智能构件加工异形孔原理

本课题组提出的加工异形孔GMM智能构件原理及具体设计结构如图1~图3。

智能构件异形孔精密加工实现原理为:在驱动电流作用下,GMM伸长,迫使构件弯曲,产生径向进给。通过控制输入电流的大小来实现加工异形销孔。GMM的磁致伸缩 $\lambda$ 与驱动磁场 $H$ 满足一定函数关系 $\lambda = F(H)$ 。驱动线圈电流和磁场之间近似满足 $H = nI$ ,因此可得磁致伸缩和线圈驱动电流之间满足函数关系 $\lambda = F(nI)$ 。构

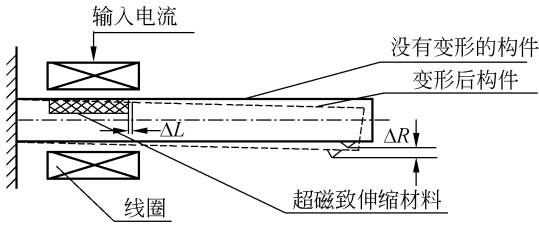


图 1 超磁致伸缩智能构件加工异形孔的原理图

Fig. 1 Principle of non-cylinder pin hole machined by GMM smart component

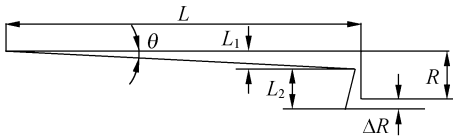


图 2 超磁致伸缩智能构件的微小转角

Fig. 2 Tiny rotor angle of GMM smart component

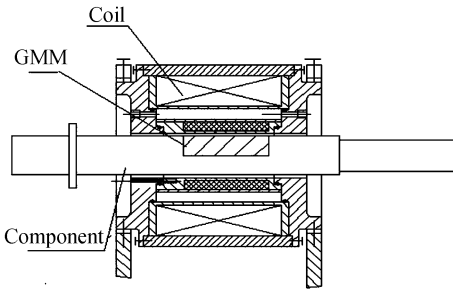


图 3 超磁致伸缩智能构件结构图

Fig. 3 Structure of GMM smart component

件弯曲产生微小转角  $\theta$ ，由图 2 可得：

$$L_1 = L \sin \theta,$$

$$L_2 = R \cos \theta.$$

$\Delta R = L_1 + L_2 - R = L \sin \theta + R \cos \theta - R$  由于转角  $\theta$  很小， $\sin \theta = \theta, \cos \theta = 1$ ，则  $\Delta R = L\theta$ 。转角  $\theta$  极小，转角  $\theta$  正比于  $\Delta L$ ，即  $\theta = K\Delta L$ ， $K$  为比例因子。因此可得径向增量  $\Delta R = KL\Delta L$ 。又磁致伸缩  $\lambda = \Delta L/L'$ ， $L'$  为 GMM 的长度，可得到径向增量与电流满足  $\Delta R = KLL'F(nI)$ 。由径向增量与电流关系式可看出，只要控制驱动线圈电流大小，就可得到所需要的径向位移，达到加工异形孔的目的。

活塞异形孔种类较多，刀具在径向方向进给运动以径向异性孔最为复杂，以典型的截面为椭圆为例，其截面结构如图 4 所示。

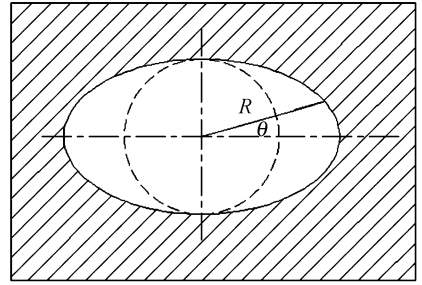


图 4 径向异形孔结构示意图

Fig. 4 Structure of radial noncircular hole

若刀具进给运动从椭圆短半轴处开始，则刀具的径向进给运动轨迹为：

$$R(\theta) = \sqrt{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} - b,$$

式中， $a, b$  分别为椭圆的长、短半轴。其进给运动轨迹如图 5 所示。

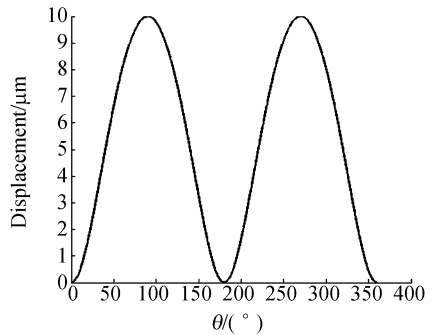


图 5 径向进给和转角的关系

Fig. 5 Radial displacement vs rotational angle

由图 5 看出，只要控制刀具的进给运动轨迹，就能实现加工椭圆异形孔。

### 3 智能构件迟滞回线的小脑模型的神经网络建模

GMM 内在具有迟滞特性，对迟滞系统的建模，国内外学者提出了多种迟滞系统的数学模型。其中较为经典的是 Goldforb 等提出的 Maxell 迟滞模型，F. Preisach 等提出的 Preisach 模型，J. M. Cruz 等提出的 wiener 模型以及其他数学模型和机理模型等。其中，Preisach 模型是描述迟滞应用最广泛的模型之一。经典 Preisach 模型 (Classical preisach Model, CPM) 是描述迟滞现

象比较成功的一种,它能够精确地描述各种迟滞现象。经典 Preisach 模型基本思想是将磁物质表示为一组磁偶极子,这些磁偶极子都具有矩形迟滞特性,材料的宏观迟滞特性被看成是这些偶极子特性的总和。系统的输出由全部的滞回算子  $\gamma_{\alpha\beta}$  分别乘以对应的权函数  $\mu(\alpha, \beta)$  的加权和。Preisach 模型的数学表达式为:

$$f(t) = \iint_{\alpha > \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(u(t)) d\alpha d\beta, \quad (1)$$

其中  $\mu(\alpha, \beta)$ 、 $\gamma_{\alpha\beta}(u(t))$ 、 $f(t)$ 、 $u(t)$  分别为迟滞算子的权系数、迟滞算子、 $t$  时刻系统输出和系统输入。如图 6 所示。

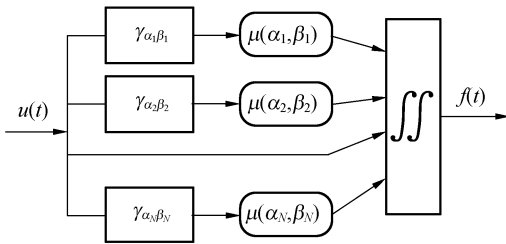


图 6 经典 Preisach 模型结构示意图

Fig. 6 Geometric description of classic PM

CPM 仅能描述静态迟滞行为,忽略了迟滞随着输入信号频率变化的特性。但 GMM 迟滞具有与频率相关性质,故应用 CPM 无法描述任意输入信号下 GMM 迟滞输出。针对此问题,文献[17-18]将系统输入量的变化率引入到 Preisach 模型的权函数中,描述与输入信号频率相关迟滞的行为。其改进的 Preisach 模型如下:

$$f(t) = \iint_{\alpha > \beta} \mu(\alpha, \beta, du/dt) \gamma_{\alpha\beta}(u(t)) d\alpha d\beta. \quad (2)$$

应用数值方法实现上述模型,必须确定与输入信号频率相关的权函数,此时需要测试大量实验数据,实现过程复杂。从图 3 所示的 CPM 模型结构可以看出,它与神经网络结构非常相似,因此可用神经网络模型实现 PM 的建模。由于 GMM 迟滞特性具有一对多的映射关系,无法用神经网络实现这种映射,所以必须改变映射关系才能应用神经网络实现迟滞特性建模。考虑改进的 PM,可以将迟滞的输入量及其变化率作为神经网络输入,并以迟滞系统的输出量作为神经网络输出,来实现与频率相关的迟滞特性神经网络

建模。

小脑模型关节控制器(Cerebellar Model Articulation Controller,CMAC)是一种表达复杂非线性函数的表格查询自适应神经网络,该网络可通过学习算法改变表格的内容,具有信息的分类存储能力。其基本思想是:在输入空间中给出一个状态,从存储单元中找到对应于该状态的地址,将这些存储单元中的内容求和得到 CMAC 的输出;同时,将此输出值与期望输出值进行比较,并根据学习算法修改这些已激活的存储单元的内容。CMAC 相对于其它神经网络的优越性在于其为基于局部学习的神经网络,每次修正的权值很少,在保证函数非线性逼近性能的前提下,学习速度快,适合于实时控制;具有一定泛化能力,即相近输入产生相近输出,不同输入产生不同输出;连续(模拟)输入、输出能力;作为非线性逼近器,对学习数据出现次序不敏感。这些特点使其非常适用于实时系统控制<sup>[19]</sup>。

针对超磁致伸缩智能构件,通过对输入量、输入量变化率和输出量的数据采集,应用 CMAC 对智能构件单迟滞环、多迟滞环的辨识结果如图 7 和图 8。其中,CMAC 权存储空间为 2 500,泛化尺寸为 10。

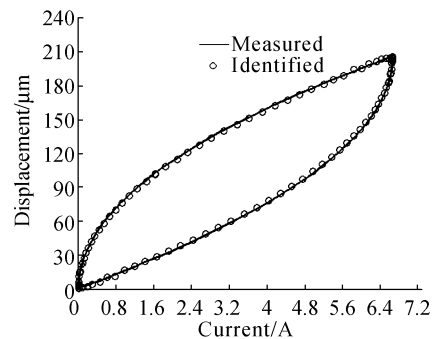


图 7 实验和 CMAC 辨识的迟滞主环回线

Fig. 7 Experimental main hysteresis and CMAC identified main hysteresis

由图 7 和图 8 可见,CMAC 神经网络能高精度地逼近 GMM 迟滞的主环和多环回线,因此可将 CMAC 神经网络应用于 GMM 智能构件的迟滞逆模型的建模中。

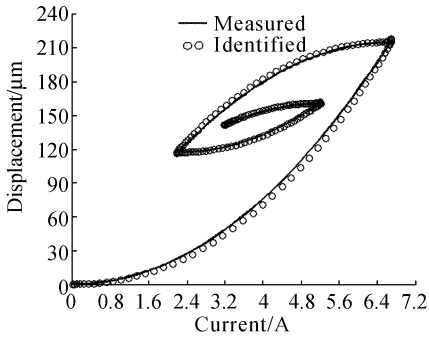


图 8 实验和 CMAC 辨识的迟滞多环回路

Fig. 8 Experimental multi-loop hysteresis and CMAC identified multi-loop hysteresis

## 4 智能构件的 CMAC 和滑模位移跟踪控制

### 4.1 智能构件的 CMAC 和滑模位移跟踪控制系统

智能构件的 CMAC 前馈补偿复合离散滑模变结构控制的结构如图 9。

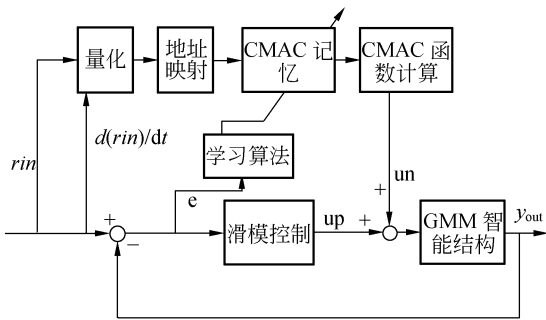


图 9 智能构件精密位移跟踪控制系统

Fig. 9 Precision position tracking control system of smart component

CMAC 作为前馈控制器,它通过学习获得 GMM 智能构件的近似逆模型,对 GMM 智能构件迟滞非线性进行补偿;滑模控制器则用来补偿 CMAC 映射误差和抑制扰动,提高位移控制性能。其工作过程为:初始状态 CMAC 的所有权值为零,控制时将期望值  $rin(k)$  与期望值变化率  $d(rin(k))/dt$  量化后,作为地址输入到 CMAC,在实际存储器中找到与之对应的地址,并将这些地址中权值相加,得到 CMAC 的输出。然后与滑模

控制器的输出  $u_s$  相加,得到系统总的控制输入。

即:

$$u = u_s + u_{CMAC}, \quad (3)$$

式中,  $u_{CMAC}$  为 CMAC 前馈控制器的输出。每一控制周期结束,以理想输出与实际的输出的误差修正权重,进入学习过程。学习目的是使误差最小。这种学习方法的特点是学习和控制同时进行,使控制系统能够适应被控对象动态特性的变化,这和传统的先学习后控制<sup>[20-21]</sup>明显不同。权值的调整按照梯度下降法,即:

$$\Delta w_{ij}(k) = \eta \frac{e(k)}{c}, \quad (4)$$

$$w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) + \Delta w_{ij}(k) + \alpha(w_{ij}(k-1) - w_{ij}(k-2)). \quad (5)$$

对权值的修正时,设置权值修正范围为  $\delta$ ,当  $|rin(k) - yout(k)| \leq \delta$ ,不修正权值,当  $|rin(k) - yout(k)| > \delta$ ,修正权值。输入量化采用线性化的方法,其公式:

$$s(k) = \text{round}[(u(k) - x_{\min}) \frac{M}{x_{\max} - x_{\min}}], \quad (6)$$

式中,  $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 、 $M$  分别为输入最小值、最大值和  $x_{\max}$  量化后的最大值,round 为取整函数。为了节约存储单元,采用杂散编码技术中的除留余数法来实现 CMAC 的实际映射,可以将大的稀疏矩阵存储到一个小的存储区域中。具体实现公式:

$$ad(i) = \text{mod}(s(k) + i, N) + 1, \quad (7)$$

式中,  $ad(i)$  为实际存储地址,  $N$  为实际权值存储空间大小,  $s(k)$  量化后  $k$  时刻输入值, mod 为取余函数。

### 4.2 滑模控制器的设计

滑模变结构控制 (Sliding Mode Variable Structure Control, SMVSC) 是一种能用来实现线性和非线性系统鲁棒控制的方法。由于滑模变结构系统中的滑动模态对系统参数扰动及外部干扰具有不变性,即它和系统的扰动性与外界干扰无关,这种理想的鲁棒性受到世界范围的极大关注并得到了迅速发展。

控制系统的控制目标是让智能构件输出  $yout(k)$  跟踪期望的轨迹  $rin(k)$ ,因此定义跟踪误差为:

$$e(k) = rin(k) - yout(k), \quad (8)$$

取滑模切换函数为:

$$s(k) = ce(k). \quad (9)$$

因为指数趋近率具有较快的趋近速度,而引起的抖振却可以调整。在这里采用指数趋近率设计控制器,其离散形式为:

$$s(k+1) = s(k) + T(-\epsilon \text{sgn}(s(k)) - qs(k)) \quad (10)$$

式(9)和(10)中滑模控制器参数  $c, \epsilon, q$  分别为滑模面斜率、符号函数增益和趋近速度参数。当趋近速度  $q$  越大,系统到达滑模面的速度越快;滑模面参数  $c$  越大,滑模运动响应越快;符号增益  $\epsilon$  越大,系统克服扰动和外干扰能力越强。这些参数不宜过大,否则会导致控制量输出过大,引起系统抖振。

### 4.3 仿真结果和分析

在进行智能构件精密位移跟踪控制系统仿真前,需要知道涉及迟滞特性的 GMM 智能构件的数学模型。通过理论分析得到精确的系统模型比较困难,所以本文根据系统实验输入和输出数据,使用 BP 神经网络辨识系统,进行智能构件控制仿真。BP 神经网络选择 13 层隐层,隐层神经元均采用变换函数,输出层采用变换函数。各层隐层均采用 10 个神经元。CMAC 参数为:CMAC 权值存储空间为 2 500,泛化尺寸为 10,学习速率为 1.8,惯性系数为 0.96。

当期望位移为  $rin_1(k)$  时,

$$rin_1(k) = 90 \exp(-0.8t(k)) \cdot \sin(2\pi t(k) + 1.5\pi) + 90,$$

智能构件滑模控制仿真结果如图 10,滑模控制器的参数为  $c=10, \epsilon=8, q=50$ ;CMAC 和离散滑模复合控制的仿真结果如图 11。

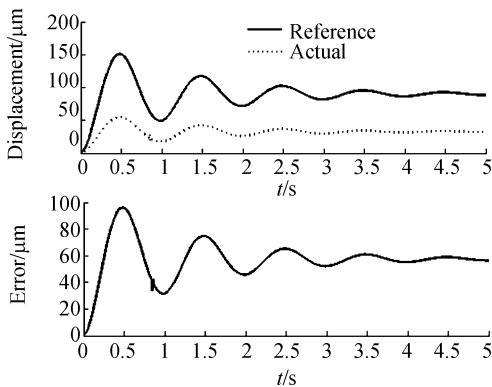


图 10 在输入信号 1 下智能构件离散滑模控制  
Fig. 10 DSMVSC of smart component under reference signal 1

当期望位移为  $rin_2(k)$  时,

$$rin_2(k) = 87 + 32 \sin(2\pi t(k)) + 64 \sin(\pi t(k)),$$

智能构件滑模控制仿真结果如图 12,滑模控制器的参数为  $c=15, \epsilon=12, q=50$ ;CMAC 和离散滑模复合控制的仿真结果如图 13。

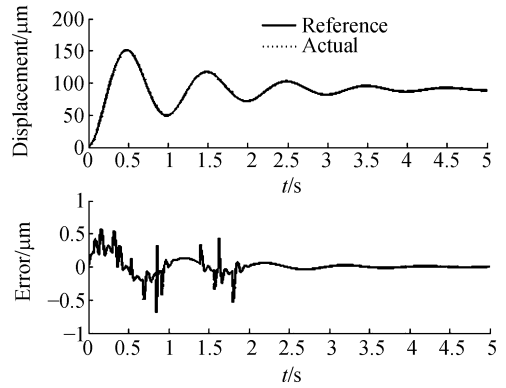


图 11 在输入信号 1 下智能构件离散滑模控制和 CMAC 复合控制  
Fig. 11 DSMVSC and CMAC control of smart component under reference signal 1

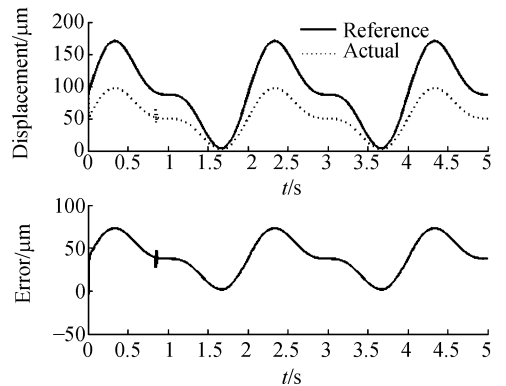


图 12 在输入信号 2 下智能构件离散滑模控制  
Fig. 12 DSMVSC of smart component under reference signal 2

当期望位移按照图 5 所示椭圆异形孔的运动规律运动时,CMAC 和离散滑模复合控制的仿真结果如图 14。

由图 10~13 可以看出,单独离散滑模控制稳态误差达到 30% 以上,再增加相应的滑模控制参数系统会振荡。由此可以看出,由于迟滞系统的强非线性,常规的离散滑模控制器对于迟滞模型的控制能力有限。而采用 CMAC 前馈和离散滑模控制时,对图 11 而言,在  $k=100$  时误差降到

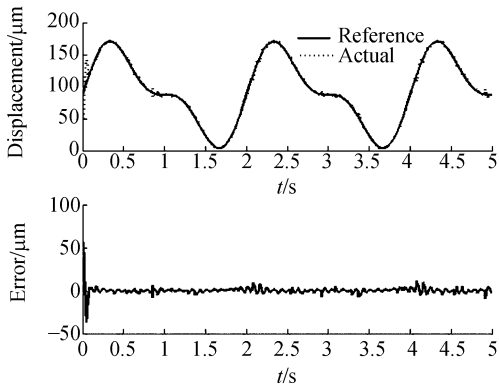


图 13 在输入信号 2 下智能构件离散滑模控制和 CMAC 复合控制

Fig. 13 DSMVSC and CMAC control of smart component under reference signal 2

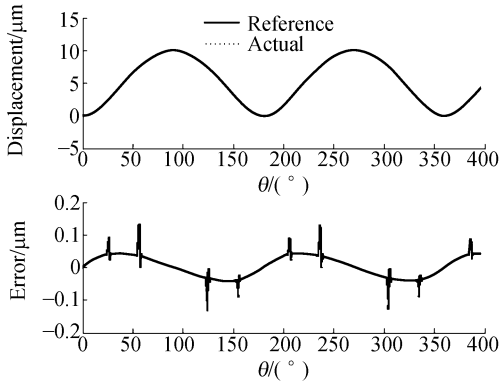


图 14 加工径向异形孔时离散滑模控制和 CMAC 复合控制

Fig. 14 DSMVSC and CMAC control of smart component under machining non-circular hole

1%, 在  $k=1\ 932$  时, 误差降到 0.01%; 对图 13 而言在  $k=84$  时误差降到 1%。而且, 在  $k=850$  时刻加入一定干扰时, 系统能够有效克服外界干扰。由图 14 看出, CMAC 前馈复合 DSMVSC 能使误差在 1.5% 以内, 达到了加工异形孔的要求。因此, 通过 CMAC 的前馈和离散滑模控制复合控制, 能有效地消除 GMM 的迟滞非线性影响, 实现 GMM 智能构件的精密位移跟踪控制。

## 5 结 论

本文提出一种 GMM 智能构件加工的方法, 分析了加工原理和相应的 GMM 智能构件的设计。提出了一种神经网络结构来实现 GMM 智能构件的逆模型建模。其中, 将构件输出位移及其随时间变化率作为神经网络输入, 构件的输入驱动电流作为神经网络的输出, 从而将 GMM 迟滞的一对多映射转化为一对一的映射关系。同时, 运用输出位移随时间变化率来反映 GMM 动态迟滞。利用 CMAC 强大的非线性逼近和快速学习能力, 将 CMAC 前馈求逆加上离散滑模变结构控制, 实现了 GMM 智能构件迟滞非线性控制。仿真结果表明, 此控制策略不需要进行复杂迟滞建模计算, 能实现动态实时迟滞非线性补偿控制, 实现了 GMM 智能构件的精密位移跟踪控制。对各种输入信号, 能够在线边学习边控制, 控制误差降到 1% 以内, 而且对外界干扰具有很强的鲁棒性。

## 参考文献:

- [1] SUHARA T, TAKEI T, TAKIGUTI M. Characteristics of friction force on piston pin boss bearings [J]. *JSAE Review*, 1996, 17(4): 453-453.
- [2] 翁景雍, 翁绍裕. 活塞异形销孔加工原理及装备[J]. *上海机床*, 1998(1): 22-24.  
WENG J Y, WENG SH Y. Machining principle and equipment of non-cylinder pin hole of piston[J]. *Shanghai Machine Tool*, 1998(1): 22-24. (in Chinese)
- [3] 胡德金, 刘仁茂, 许黎明, 等. 全自动 CNC 镗削活塞销孔专机的研究开发[J]. *组合机床与自动化加工技*

术, 1999(1): 27-30.

HU D J, LIU R M, XU L M, *et al.*. Research and development of full automatic CNC special machine for boring piston pin hole [J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 1999(1): 27-30. (in Chinese)

- [4] 许黎明, 胡德金, 张蕾. 全自动 CNC 镗削活塞销孔专机控制系统的研制[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 1999(8): 33-35.

XU L M, HU D J, ZHANG L. Development of a automatic CNC machine's control system for boring piston pin hole [J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 1999(8): 33-

35. (in Chinese)
- [5] 翟鹏,张承瑞,王海涛,等.基于GMM的活塞异形销孔加工原理研究[J].压电与声光,2007,29(1):125-128.  
ZHAI P, ZHANG CH R, WANG H T, *et al.*. Research on machining principle for non-cylinder piston pin hole based on GMM[J]. *Piezoelectric & Acoustooptics*, 2007, 29(1):125-128. (in Chinese)
- [6] 张凯,胡德全,马浩全.新型活塞异形销孔加工方法的研究[J].组合机床与自动化加工技术,2003(8):4-8.  
ZHANG K, HU D J, MA H Q. Research on boring mechanism for piston noncircular pin hole[J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2003(8):4-8. (in Chinese)
- [7] 龚大成,吕福在,潘晓弘,等. Preisach 逆补偿的GMA精密轨迹跟踪与实验优化[J].光学精密工程,2007,15(8):1241-1246.  
GONG D CH, LU F Z, PAN X H, *et al.*. Precision tracking and experimental optimization of GMA by preisach inverse compensation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1241-1246. (in Chinese)
- [8] 龚大成,吕福在,潘晓弘,等.复合前馈补偿的超磁致伸缩执行器精密伺服控制[J].光学精密工程,2007,15(10):1589-1594.  
GONG D CH, LU F Z, PAN X H, *et al.*. Precision tracking and experimental optimization of GMA by preisach inverse compensation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1589-1594. (in Chinese)
- [9] 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 piezoceramic[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):1032-1040. (in Chinese)
- [10] MAJIMA S, KODAMA K, HASEGAWA T. Modeling of shape memory actuator and tracking control system with the model[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2001, 9(1):54-59.
- [11] LHEE C G, PARK J S, AHN H S, *et al.*. Sliding mode like logic control with self-tuning the dead zone parameters[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Sys-*
- tems*, 2001, 9(2):343-347.
- [12] KURDILA A J, WEBB G. Compensation for distributed hysteresis operators in active structured systems[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1997, 20(6):1125-1132.
- [13] GE P, JOUANEH M. Generalized preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuators[J]. *Precision Engineering*, 1997, 20(2):99-111.
- [14] MITTAL S, MEAQ CH. Hysteresis compensation in electromagnetic actuator through preisach model inversion[J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2000, 5(4):394-409.
- [15] HWANG C L, JAN CH, CHEN Y H. Piezomechanic using intelligent variable-structure control[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronic*, 2001, 48(1):47-59.
- [16] 王湘江,王兴松.超磁致驱动器迟滞系统逆模补偿控制[J].中国机械工程,2007,18(10):1151-1156.  
WANG X J, WANG X S. Inverse compensation control for giant magnetostrictive actuator[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(10):1151-1156. (in Chinese)
- [17] MAYERGOYZ D. Dynamic preisach models of hysteresis[J]. *IEEE Trans on Magetics*, 1988, 24(6):2929-2927.
- [18] YU Y H, XIAO Z C, NAGI G, *et al.*. Dynamic preisach modeling of hysteresis of the piezoceramic actuator system[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2002(37):75-89.
- [19] MILLER W T, HEWES R P, GLANZ F H, *et al.*. Real-time dynamic control of an industry manipulator using a neural network based learning controller[J]. *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, 1990, 6(1):1-9.
- [20] CRUZ HERNONDEZ J M, HAYWARD V. Phase control approach to hysteresis reduction[J]. *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, 2001, 9(1):17-26.
- [21] CAVALLO A, NATALE C, PIROZZI S, *et al.*. Feedback control systems for micropositioning tasks with Hysteresis compensation[J]. *IEEE Trans. Magn.*, 2004, 40(2):876-879.

## 作者简介:



赵章荣(1973—),男,湖北武汉人,讲师,浙江大学现代制造工程研究所在读博士研究生,主要研究方向为智能材料建模与控制及数控加工。E-mail: zha-zhangrong@sina.com



张雷(1982—),男,浙江宁波人,在读博士研究生,2006年于中北大学获学士学位,主要研究异型销孔加工的设计、测试,以及GMM的研究与应用。E-mail: zhanglei200812@gmail.com

## 导师简介:



邬义杰(1963—),男,浙江宁波人,教授,博士生导师,主要研究方向为高速高精数控技术、智能材料微驱动技术和复杂型面精密加工技术研究。E-mail: WYJ1116@zju.edu.cn



王彬(1985—),男,辽宁大石桥人,浙江大学现代制造工程研究所博士研究生,主要从事高速高精数控技术和智能材料微驱动技术等方面的研究。E-mail: charleswang2007@gmail.com



顾新建(1956—),男,浙江湖州人,教授,博士生导师,主要研究方向为网络化制造、制造业信息化和知识管理等。E-mail: Xjgu@zju.edu.cn

## ● 下期预告

## 基于光弹效应的三分量光弹波导加速度传感器

唐东林<sup>1</sup>, 郭峰<sup>1</sup>, 刘泽年<sup>2</sup>, 代志勇<sup>3</sup>, 王莹<sup>1</sup>, 阳玲<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学机电工程学院, 四川成都 610500; 2. 中国石油管道秦京输油气分公司, 河北秦皇岛 066001; 3. 电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054)

为了实现强电磁场环境下的三维地震高精度勘探,提高油气产量和油气开采率,设计了三分量光弹波导加速度传感器。利用光弹原理设计出可检测加速度的三个轴向分量的集成光路及组合式三分量谐振子,达到了降低加速度各分量串扰的目的。依据LiNbO<sub>3</sub>光波导相位变化规律对影响该串扰的交叉轴灵敏度和横向灵敏度比进行了分析。实验结果表明:该传感器的自然频率为3 500 Hz,横向灵敏度比为0.11%。所设计的传感器具有较宽的频带、良好的线性频率响应特性,能够满足高精度地震勘探的要求。