

文章编号 1004-924X(2012)02-0287-09

## 用于异形孔精密加工的超磁致 伸缩构件的线性化迟滞建模

张 雷, 邬义杰\*, 刘孝亮, 王 彬

(浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 根据超磁致伸缩构件精密加工异形孔刀具轨迹的特点, 采用纯延时环节串联线性化模型, 建立其在高频驱动下驱动电流与输出微位移的迟滞非线性动态模型。通过一定频率下驱动电流与输出位移的相关辨识, 获得系统纯延时环节的补偿参数, 并建立了驱动电流与无相位差输出位移的线性化模型。当实时控制时, 通过迟滞非线性模型的直接逆模型补偿, 使位移输出与异形孔的理想刀具轨迹一致。实验验证表明, 直接逆模型的最大开环控制误差为  $2.7 \mu\text{m}$ , 最大相对误差为 10%。进一步对构件进行微位移反馈闭环控制, 实验误差最大值为  $1.2 \mu\text{m}$ , 最大相对误差为 7%, 提高了系统的控制精度。

**关键词:** 超磁致伸缩构件; 异形孔精密加工; 线性化迟滞模型; 参数辨识; 相关分析

**中图分类号:** TG713; TP271 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122002.0287

## Linearity hysteresis model of giant magnetostrictive components for non-cylindrical hole precision machining

ZHANG Lei, WU Yi-jie\*, LIU Xiao-liang, WANG Bin

(*Institute of Modern Manufacture Engineering, State Key Laboratory of Fluid Power  
Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: wuj1116@zju.edu.cn*

**Abstract:** According to the tool path characters of non-cylindrical hole precision machining by giant magnetostrictive components, a dynamic hysteresis model of giant magnetostrictive components was established by a pure delay transfer function and the linearity model between high-frequency driving currents and micro-displacement responses. The pure delay compensation parameters of the system were obtained by the relevant identification of driven currents and output displacements with a certain frequency. Then, a mapping model of the driven currents and output displacements without delay was established. The output displacement met the ideal tool paths of non-cylindrical hole boring by direct inverse model and delay compensation in real-time control. The results in verification experiments indicate that the maximum control error is  $2.7 \mu\text{m}$ , and the maximum relative error is about 10%. By integration of micro-displacement feedback control, the accuracy of the component is improved further, the maximum control error is  $1.2 \mu\text{m}$ , and the maximum relative error is about 7%.

收稿日期: 2011-09-13; 修订日期: 2011-10-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50975256); 浙江省自然科学基金重点资助项目 (No. Z1080537); 国家教育部博士点基金资助项目 (No. 20070335204)

**Key words:** giant magnetostrictive component; precision machining non-cylindrical hole; linear hysteresis model; parameter identification; correlation analysis

## 1 引言

超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material, GMM)相比其他智能材料,具有应变大、输出力强、功率密度高、精度高、响应速度快等优点,由此设计的 GMA(Giant Magnetostrictive Actuator)已被广泛应用于机器人、航空器、潜艇、减振、精密加工等微位移驱动领域<sup>[1]</sup>。如浙江大学将 GMM 嵌入刀杆内(嵌入式 GMM 构件或 GMA),利用 GMM 的磁致伸缩变形驱动刀杆输出高频、径向的微位移,用于多种结构的活塞异形销孔精密加工<sup>[2]</sup>。但由于 GMM 构件存在迟滞非线性现象,从而对其精密控制提出了难题;且活塞异形销孔的高速切削工艺,要求刀具实现高频响应下的微进给,这对其控制的实时性提出了更高的要求。

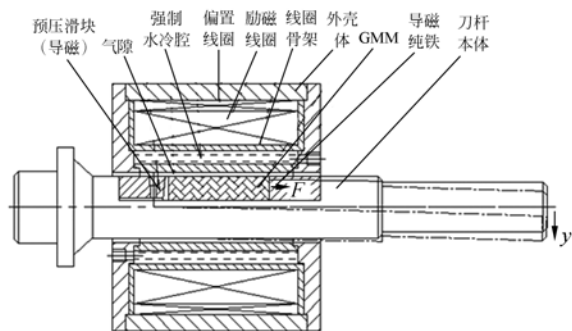
解决迟滞非线性的基本方法是先建立其数学模型,通过模型的在线参数辨识,并结合求逆和补偿等方法克服迟滞非线性<sup>[3-9]</sup>,但至今尚无一个高精度的控制模型能满足高实时性的要求。应用较广泛的迟滞非线性模型有 3 类。一类是 Jiles-Atherton 模型,它通过能量守恒原理导出磁化过程中不可逆部分的关系式,再获得外磁场和平均磁化强度的表达式,模型结构较复杂,参数辨识非常困难。另一类是 Preisach 模型,它通过数学算子描述迟滞现象,计算快速简便,但 Preisach 算子的擦除特性和同余特性限制了该模型的应用范围。第三类是基于人工智能的智能化模型,如最典型的神经网络模型,模型结构简单,参数辨识易实现,对非线性函数具有通用逼近性,因而精度较高;其缺点是学习和求解问题具有黑箱特性,对样本的要求较高,同时工作过程不具备解释性。以上 3 种模型在低频场合应用良好,但尚未见高频场合的应用。

对此,本文从 GMM 构件精密加工活塞异形孔的实际需求出发,根据异形孔精密加工的刀具轨迹特点,采用不同频率、幅值的正弦信号激励 GMM 构件,分析其输入电流与输出位移之间存在的时滞非线性现象,以此,选择纯延时环节与线性化模型串联结构作为高频驱动下 GMM 构件

迟滞非线性动态模型。通过最小二乘法辨识不同频率、幅值的驱动电流与输出位移的迟滞非线性模型参数,建立高频驱动电流下 GMM 输出位移的迟滞非线性动态模型。最后,将该迟滞非线性模型进行求逆,并将获得的逆模型用于 GMM 构件加工异形孔的直接逆开环和闭环控制实验中。

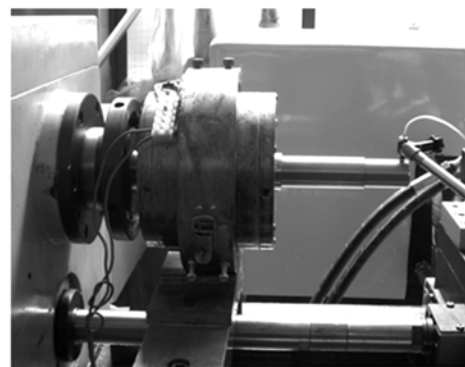
## 2 GMM 构件工作原理及异形孔加工刀轨分析

利用 GMM 研制的嵌入式 GMM 构件如图 1 所示。



(a) 结构

(a) Structure



(b) 实物

(b) Objective graph

图 1 嵌入式 GMM 构件结构与实物图

Fig. 1 Structure and objective graph of embedded GMM components

### 2.1 GMM 构件精密加工异形孔的工作原理

在驱动电流作用下,励磁线圈产生磁场引起 GMM 的磁致伸缩变形,驱动刀杆输出高频、径向的微位移,并结合刀具的高速旋转运动,实现各类非圆截面孔的精密镗削加工。

### 2.2 异形孔加工刀具轨迹的特点分析

一般活塞异形销孔都具有内大外小、连续、光滑的特征,其两种常见的截面形状如图 2 所示。当主轴转速、拖板进给速度恒定时,则两种异形孔加工的刀具轨迹如图 3 所示。

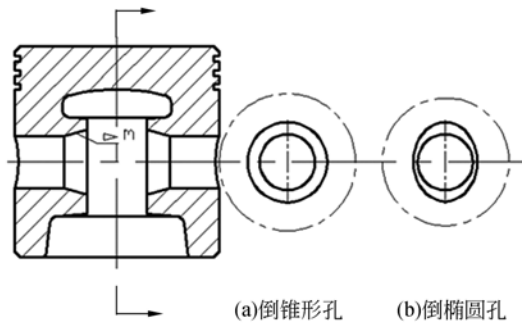


图 2 活塞异形销孔结构

Fig. 2 Structure of non-cylindrical piston pin-holes

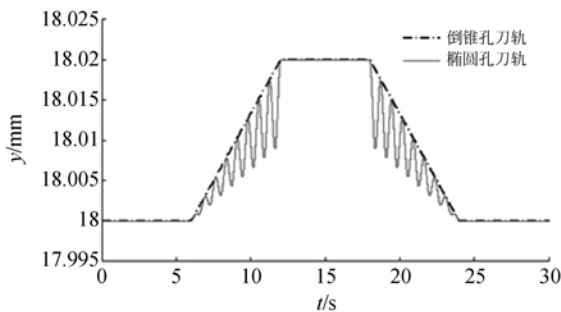


图 3 进给速度、转速恒定时的两种刀具轨迹(时域图)

Fig. 3 Two tool paths of machining non-cylindrical piston pin-holes when feeding rate and speed are constant (Time-domain graph)

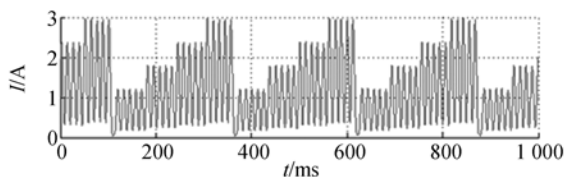
其中,倒锥形孔加工的刀具运动轨迹是拖板进给量  $z$  的单变量函数,与主轴旋转角度  $\theta$  无关。当拖板进给速度较慢(一般为 100 mm/min)时,GMM 构件只需较低的频响(频率小于 1 Hz),可通过简单的前馈补偿和闭环反馈实现高精度位移控制,已通过了实验验证<sup>[6-8]</sup>。而倒椭圆孔或倒三角型面孔的刀轨是拖板进给量  $z$  和主轴转角  $\theta$  的双变量函数。以倒椭圆孔加工刀轨为例,当静压

镗床主轴转速较高(一般为 3 000 r/m)时,GMM 构件往复进给的控制必须达到相应的驱动频率(100 Hz)才行。此时,其迟滞非线性成为控制的关键问题。对此,必须建立高频驱动下 GMM 构件的迟滞非线性动态模型,才能实现活塞异形销孔的精密加工。

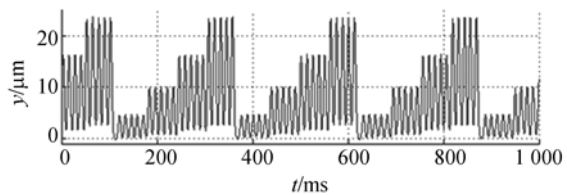
分析图 2、3 可知,异形孔的曲面具有光滑、连续、截面曲线的曲率渐进变化的特点,这使得加工异形孔的刀具轨迹也具有光滑、连续、渐变的特点,且变化规律类似于频率不变、幅值渐变的正弦波。

## 3 GMM 构件迟滞非线性建模及参数辨识

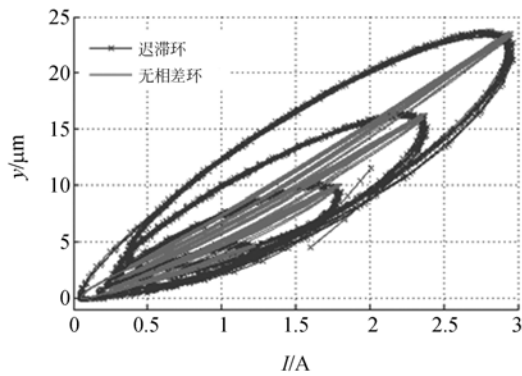
通过一定频率、不同幅值的正弦波信号驱动 GMM 构件,激励电流与输出位移及其迟滞非线性现象如图 4(a)、(b)、(c)所示。经相差分析计算,无相位差电流与位移的迟滞环如图 4(c)所示。其特征规律为:无相差环的上升段曲线与下降段曲线基本重合;当驱动电流幅值范围改变时,输出位移与驱动电流的映射关系基本不变,但斜率和位置会发生相应变化。且类似正弦的驱动信号都可获得该规律,但若采用非连续、不光滑的波形(如三角波、方波等),则无法获得上述的特征规律。



(a) 驱动电流  
(a) Driven currents



(b) 位移输出  
(b) Output displacements



(c) 迟滞环和无相位差环

(c) Hysteresis loops and hysteresis loops without delay

图 4 100 Hz 正弦波驱动电流与输出位移的迟滞环

Fig. 4 Hysteresis loop of output displacements with 100 Hz sinusoidal driven currents

### 3.1 GMM 构件迟滞非线性建模

由以上特征规律,可将输入、输出的相位差作为独立环节,建立 GMM 构件输入、输出的纯时滞环节与线性化传递函数串联的等效模型,如图 5 所示。

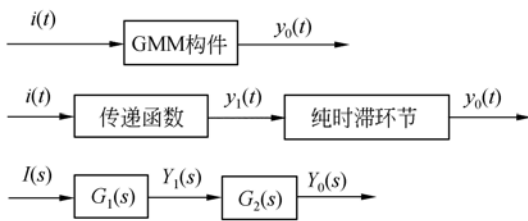


图 5 GMM 构件纯时滞环节与线性环节串联的位移输出模型

Fig. 5 Output displacement model of were a pure delay part constituted with linearity part for GMM components

图 5 中  $G_1(s)$  为(无相差)输入电流与输出位移的线性关系,即传递函数; $G_2(s)$  为纯时滞传递环节; $i(t)$ 、 $i(s)$  为励磁驱动电流; $y_1(s)$  为无相差的位移输出; $y_0(s)$  为纯时滞环节串联后位移输出,即 GMM 构件实际输出位移。

当频率、幅值都不变时,正弦驱动电流  $i(t)$  与 GMM 构件输出位移  $y_1(t)$  的(无相差)线性化模型如下,

$$y_1(t) = [a \ b \ c][i^2(t) \ i(t) \ 1]^T, \quad (1)$$

式中,  $a, b, c$  为待辨识参数,即  $M_1 = [a \ b \ c]$ 。

图 5 中,纯时滞环节表达式如下,

$$y_0(t) = c_0 y_1(t - \tau), \quad (2)$$

式中,  $c_0$  为常数,通常取 1。

将式(1)代入式(2)可得输入电流  $i(t)$  与输出位移  $y_0(s)$  的迟滞非线性模型

$$y_0(t) = G_0[i(t)] = [a \ b \ c] \cdot [i^2(t - \tau) \ i(t - \tau) \ 1]^T, \quad (3)$$

式(3)的逆模型  $i(t) = G_0^{-1}[y_0(t)]$  可作为系统控制直接逆模型。

### 3.2 GMM 构件迟滞非线性模型的参数辨识方法

GMM 构件迟滞非线性模型的参数辨识可采取分步辨识的方法,首先辨识输入电流  $i(t)$  与输出位移  $y_0(t)$  的延时时间常数  $\tau$ ,即相位差;然后,通过最小二乘法辨识出输入电流  $i(t)$  与无相位差  $y_0(t)$  线性化模型的参数。

相差计算一般有 3 种:相关分析法、自适应法(LMS)、快速谱分析法(FFT)。在此采用算法简单的相关分析法计算输入电流  $i(t)$  与输出位移  $y_0(t)$  的延时时间常数  $\tau$ 。

由互相关函数定义<sup>[9-10]</sup>

$$R_{iy_0}(\tau) = \int_0^T i(t) y_0(t + \tau) dt, \quad (4)$$

则驱动电流与输出位移的相位差为  $\varphi = \frac{2}{AB} \arccos$

$R_{iy_0}(0)$ , 可知延时时间常数  $\tau = \frac{\varphi}{2\pi f}$ ,  $f$  为输入电

流的频率。

当频率不变时,正弦驱动电流幅值(峰值  $i_m(t)$ 、谷值  $i_n(t)$ )与位移幅值(峰值  $y_m(t)$ 、谷值  $y_n(t)$ )(无相差)的关系模型如下,

$$y_m(t) = \mathbf{M}[i_m^2(t) \ i_m(t) \ 1]^T, \quad (5)$$

$$y_n(t) = \mathbf{N}[i_n^2(t) \ i_n(t) \ 1]^T, \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{M} = [a_m \ b_m \ c_m]$ ,  $\mathbf{N} = [a_n \ b_n \ c_n]$  为待辨识参数。

通过对相同频率、不同幅值的驱动电流和输

出位移采样可得

$$\mathbf{Y}_m = \begin{bmatrix} y_m(1) \\ \vdots \\ y_m(k) \end{bmatrix}, \mathbf{I}_m = \begin{bmatrix} i_m(1) \\ \vdots \\ i_m(k) \end{bmatrix}, \mathbf{I}_m^2 = \begin{bmatrix} i_m^2(1) \\ \vdots \\ i_m^2(k) \end{bmatrix}, \mathbf{X}_m =$$

$[\mathbf{I}_m^2 \quad \mathbf{I}_m \quad \mathbf{1}]^T, k$  为峰值、谷值序列。

则  $\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{Y}_m \mathbf{X}_m^{-1}$ , 通过最小二乘法可辨识出模型的参数矩阵  $\mathbf{M}$ 。同理, 可辨识出参数矩阵  $\mathbf{N}$ 。

当输入电流频率一定时, 已知正弦驱动电流峰值与谷值的计算模型, 可通过如下方法辨识该情况下的迟滞环模型参数。

定义  $\mathbf{Y}_1(k) = [y_m(k) \quad y_n(k) \quad y_1(1) \cdots y_1(j)]^T$ ,

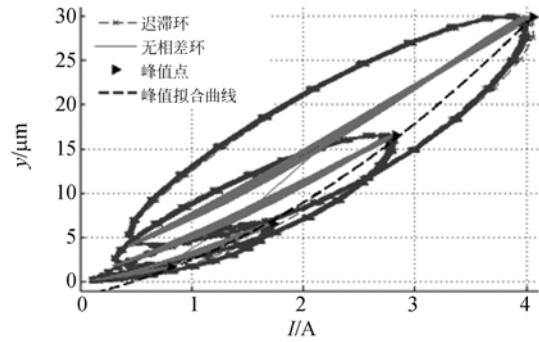
$$\mathbf{I}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_m^2(k) & \mathbf{I}_n^2(k) & \mathbf{I}^2(1) & \cdots & \mathbf{I}^2(j) \\ \mathbf{I}_m(k) & \mathbf{I}_n(k) & \mathbf{I}(1) & \cdots & \mathbf{I}(j) \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix},$$
 其

中,  $k$  为峰值、谷值序列,  $j$  为采样点序列,  $\hat{\mathbf{M}}_1 = \mathbf{Y}_1(k) \mathbf{I}(k)^{-1}$ , 通过最小二乘法可辨识出模型的参数矩阵  $\mathbf{M}_1$ 。

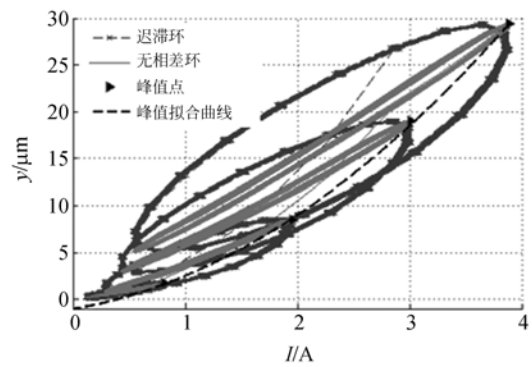
### 3.3 GMM 构件迟滞非线性模型的参数辨识结果

为验证 GMM 构件迟滞非线性模型及辨识方法的可行性和准确性, 采用多组辨识试验对模型进行参数辨识。实验方案: 由 DG1022 信号发生器输出标准电压信号, 控制大功率线性恒流功放输出同频率、同相位的激磁电流, 驱动 GMM 构件输出高频微位移量。并采用 PCI6251 卡同步采集 GMM 构件的径向输出位移、驱动电流、驱动电压的值。

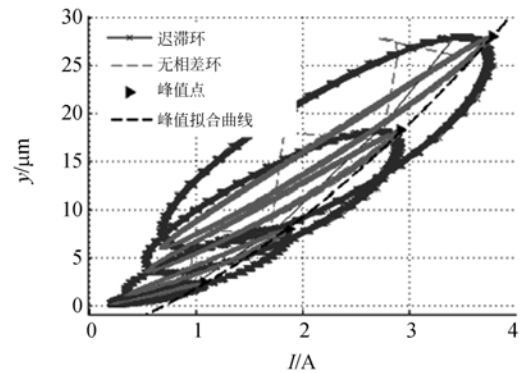
采用不同驱动频率 (80, 100, 120 Hz)、不同电流幅值的正弦电流驱动励磁线圈, 同时采集驱动电流  $i(t)$  和位移的信号  $y(t)$ , 采样频率为 2 kHz, 如图 6 所示; 采取分步辨识延时环节参数和线性环节参数, 如表 1 所示,  $e_m$  为峰值曲线拟合后的残差值,  $a, b, c, e$  分别为最大无相差环曲线拟合系数及残差值。由图 6 和表 1 可见, 不同的驱动频率对应不同的延时时间常数, 其峰值拟合曲线也不同。由于在 120 Hz 试验时采样率仍是 2 kHz, 每一个周期采样点数较少, 使得无相差的输



(a) 80 Hz



(b) 100 Hz



(c) 120 Hz

图 6 不同频率和幅值正弦激励下, GMM 构件微位移输出迟滞环与拟合曲线

Fig. 6 Hysteresis loops and curve fittings of micro-displacements outputs for GMM components with different frequencies and amplitudes by sine wave excitation

入电流与输出位移的上升和下降曲线无法较好的贴合, 使得模型辨识的精度下降。由此可知, 提高采样率可进一步提高辨识精度。

表 1 不同频、幅值正弦激励时,GMM 构件微位移输出的迟滞非线性模型辨识结果

Tab.1 Identified results of nonlinearity hysteresis model of micro-displacements outputs GMM components with different frequencies and amplitudes by sine wave excitations

参数	80 Hz	100 Hz	120 Hz
$\tau/\text{ms}$	1.85	2.0	2.14
$a_m$	1.207 8	1.494 2	1.108 9
$b_m$	2.889 5	2.032 5	4.149 9
$c_m$	-1.610 1	-0.993 5	-3.446 7
$e_m/\mu\text{m}$	0.503 3	0.401 5	0.324 3
$a_n$	44.854	27.762	15.783
$b_n$	-10.837	-6.187 4	-0.452 9
$c_n$	0.859 08	0.578 9	-0.357 5
$e_n/\mu\text{m}$	0.392 7	0.170 5	0.102 9
$a$	-0.832 1	-0.349 4	-0.168 0
$b$	9.703 1	7.130	5.548 7
$c$	0.734 1	0.202 5	0.274 0
$e/\mu\text{m}$	1.696 5	1.499 3	1.161 3

### 4 GMM 构件直接逆模型开环和闭环控制

在上述模型辨识基础上,对构件分别采用直接逆模型前馈补偿的开环控制和闭环反馈控制的准静态试验。直接逆模型的开环实验目的是验证上述迟滞非线性模型对非圆柱孔加工刀具轨迹跟踪的有效性。直接逆模型+闭环反馈控制的目的是进一步提高微位移跟踪控制的精度。试验中机床主轴静止,以一定频率(100 Hz)的离散时间点代替机床主轴转角计数(设主轴恒转速为 3 000 r/m)。闭环反馈的传感器采用电涡流微位移传感器,因主轴静止,可避免刀具的被测量表面非圆误差以及机床主轴旋转振动对反馈检测的干扰,提高试验的可靠性。

#### 4.1 直接逆模型开环控制

试验由 DSP2812 输出幅值渐变的 100 Hz 正弦控制信号(模拟图 3 的刀具轨迹),经功放激励 GMM 构件,并通过 PCI6251 卡采集驱动电流与输出位移信号。离线分析驱动电流与 GMM 构件实际位移信号的相位差,并计算迟滞非线性模型的参数。

由于迟滞非线性模型以多项式形式表达,可通过反函数求解和拉格朗日线性插值的方法求得其离散化逆模型。最后,可将该逆模型用于异形销孔加工轨迹的前馈补偿控制,其原理如图 7 所示。其补偿控制结果与误差如图 8、9 所示,误差最大值为  $2.7 \mu\text{m}$ ,最大相对误差 10%。由此可见,直接逆模型的控制方法是有效的,但还需进一步提高控制精度。

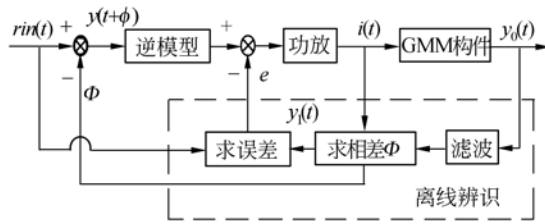


图 7 GMM 构件微位移直接逆开环控制原理

Fig.7 Open-loop control of micro-displacements for GMM components with direct inverse model

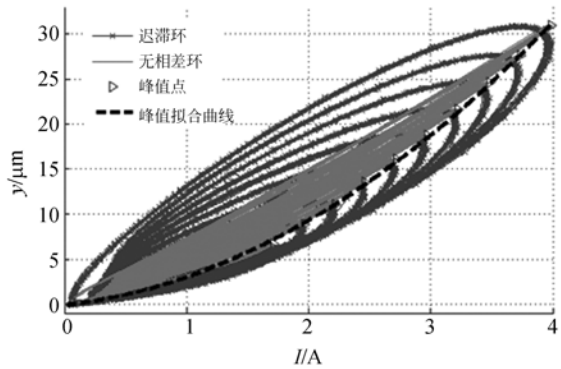
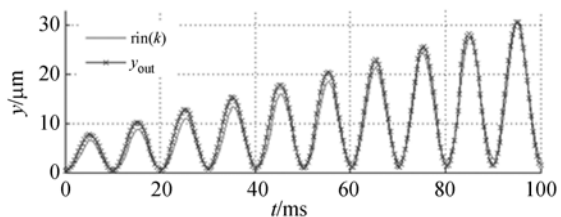


图 8 100 Hz 幅值渐变的正弦电流与实际位移的关系曲线(迟滞环、无相位环、峰值点、峰值拟合曲线)

Fig.8 Hysteresis loops of GMM component displacements stimulated by 100 Hz sinusoidal currents with gradient amplitudes (hysteresis loop, difference curves without delay, peak point, fitted curve)



(a)理想轨迹及实际位移曲线

(a)Ideal displacements and actual trajectories

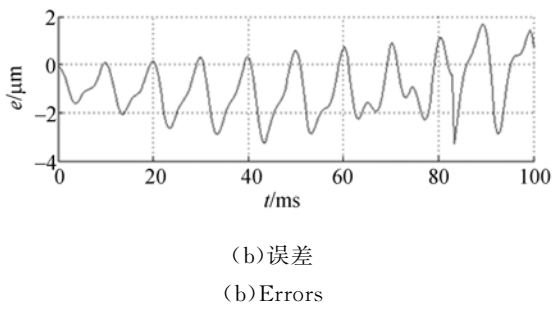


图 9 前馈补偿后,100 Hz 幅值渐变的理想轨迹与实际位移曲线及其误差

Fig. 9 100 Hz ideal displacements and actual trajectories and their errors with gradient amplitudes by feed-forward compensation control

#### 4.2 直接逆模型前馈补偿+PI 闭环控制

在前馈补偿实验的基础上,采用直接逆模型的前馈补偿+微位移闭环反馈的方法,进一步提高系统的控制精度。试验分两步进行,首先根据上述参数辨识方法求得系统的逆模型作为初始的控制器。随后,将逆模型与功放、GMM 构件串联,将图 7 中离线辨识部分作为闭环反馈的实时检测模块,即微位移反馈信号与驱动电流做实时相差分析,在线调整控制系统的延时参数。并采用 PI 方法补偿输出位移的误差值,其程序流程图如图 10 所示。其中,DSP2812 中 A/D 模块同时采集 GMM 构件端部的微位移信号和驱动电流信号,采样率为 20 kHz。

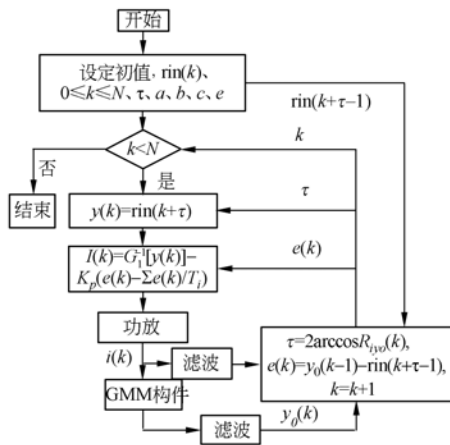


图 10 直接逆模型+闭环反馈控制策略流程图

Fig. 10 Processing diagram of direct inverse model add closed loop feedback control

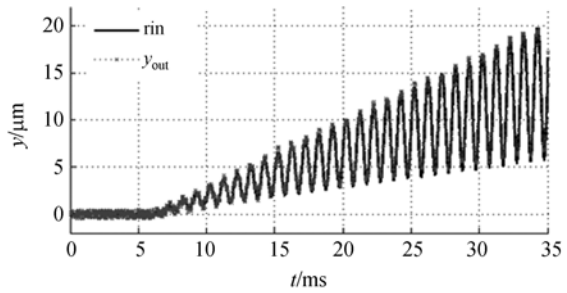


图 11 椭圆孔理想刀具轨迹与实际位移控制图

Fig. 11 Ideal tracking displacements and real trajectories of elliptic hole

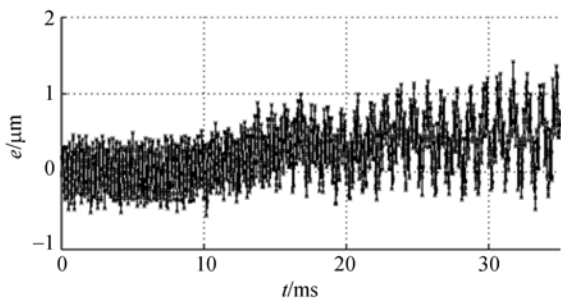


图 12 椭圆孔理想刀具轨迹与实际位移控制误差图

Fig. 12 Errors of ideal tracking displacements and real trajectories of elliptic hole

同样,通过 100 Hz 刀具轨迹的控制曲线辨识系统模型参数,对实际的 GMM 构件进行微位移跟踪控制试验,实验结果如图 11、12 所示。误差最大值为 1.2  $\mu\text{m}$ ,最大相对误差 7%。

## 5 结 论

本文从 GMM 构件精密加工活塞异形孔刀具轨迹特点分析,选择纯延时环节与线性化模型串联的结构作为 GMM 构件迟滞非线性模型。通过不同频率、幅值的驱动电流与 GMM 构件输出位移的相关辨识,获得一定频率下的系统纯延时环节参数。在此基础上,建立 GMM 构件的输入电流与输出位移迟滞非线性动态模型,用于高频驱动时 GMM 构件加工异形孔的直接逆控制。准静态试验结果表明,开环补偿控制的误差最大值为 2.7  $\mu\text{m}$ ,最大相对误差为 10%。进一步结合微位移反馈控制,实验误差最大值为 1.2  $\mu\text{m}$ ,

最大相对误差为 7%，提高了系统的控制精度。因此，采用时滞环节与线性化模型串联的逆模型，

并结合输出位移反馈，可实现高频驱动下 GMM 构件精密加工异形孔的高精度微位移跟踪控制。

#### 参考文献：

- [1] 孙宝元. 现代执行器技术[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2003: 144-180.  
SUN B Y. *Modern Actuators*[M]. Changchun: Jilin University Press, 2003: 144-180. (in Chinese)
- [2] 赵章荣, 鄒义杰, 顾新建, 等. 用神经网络结构实现超磁致伸缩智能构件滑模控制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 778-786.  
ZHAO ZH R, WU Y J, GU X J, *et al.*. Implementation of sliding mode control of giant magnetostrictive smart component by neural network[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 778-786. (in Chinese)
- [3] MAYERGOYZ D. Dynamic preisach models of hysteresis[J]. *IEEE Trans on Magetics*, 1988, 24(6): 2927-2929.
- [4] 龚大成, 唐志峰, 吕福在, 等. 非线性 Preisach 理论与超磁致伸缩执行器高阶迟滞建模[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 252-256.  
GONG D CH, TANG ZH F, LV F Z, *et al.*. Non-linear preisach model and high order hysteresis modeling for giant magnetostrictive actuator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(12): 252-256. (in Chinese)
- [5] TAN X, BARAS J S. Adaptive identification and control of hysteresis in smart materials [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(6): 827-828.
- [6] 李欣欣, 王文, 陈子辰. 超磁致伸缩致动器的广义预测-多模 PID 控制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 412-419.  
LI X X, WANG W, CHEN Z CH. Generalized predictive-multimode PID control for giant magnetostrictive actuators[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 412-419. (in Chinese)
- [7] 王湘江, 王兴松. 基于 KP 模型的 GMA 迟滞系统辨识与补偿[J]. 中国机械工程, 2008, 19(10): 1167-1173.  
WANG X J, WANG X S. GMA hysteresis system identification and compensation based on KP model [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(10): 1167-1173. (in Chinese)
- [8] 曹淑瑛, 郑加驹, 王博文, 等. 基于动态递归神经网络的超磁致伸缩驱动器精密位移控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 106-111.  
CAO SH Y, ZHENG J J, WANG B W, *et al.*. Precision position control for giant magnetostrictive actuator based on dynamic recurrent neural network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(3): 106-111. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] NEALIS J, SMITH R C. Model-Based robust control design for magnetostrictive transducers operating in hysteretic and nonlinear regimes [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(1): 22239.

#### 作者简介：



张雷(1982—),男,浙江宁波人,博士研究生,主要从事智能材料应用、数控精密加工技术方面的研究。E-mail: zhanglei200812@gmail.com



刘孝亮(1983—),男,安徽六安人,博士研究生,主要从事基于 GMA 的激振器、振动焊接等方面的研究。E-mail: hzxlliu@zju.edu.cn



王彬(1985—),男,辽宁大石桥人,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

通讯作者:



邬义杰(1963—),男,浙江宁波人,博士,教授,博士生导师,主要从事高速高精数控技术、智能材料微驱动技术、复杂型面精密加工技术等方面的研究。  
E-Mail: wyj1116@zju.edu.cn

● 下期预告

## 双 Mach-Zehnder 光纤干涉传感系统中的偏振衰落控制

曾周末,张溪默,封皓,靳世久,安阳

(天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室,天津 300072)

偏振衰落现象导致的信号关联的二义性一直是分布式双 Mach-Zehnder 光纤干涉传感系统实现高精度定位的难点。为了保持系统检测信号的稳定性,本文利用系统的偏振模型分析了偏振衰落的来源,指出传感光纤偏振特性的不一致性使系统检测信号对输入偏振态敏感是造成信号相关性恶化的根本原因,据此提出对输入偏振态进行偏振控制可实现消偏振衰落的目的。在此基础上通过分析输入偏振态的两个参量对信号相关系数的作用效果进一步明确了偏振控制对算法能力的要求,并利用模拟退火算法作为偏振控制算法进行验证。现场实验表明,该算法可实现对偏振态工作点的快速搜索,持续稳定系统检测信号的相关性;结果证实该偏振衰落控制方法切实有效。