

文章编号 1004-924X(2016)06-1389-10

## 超磁致伸缩致动器的复合反馈控制及其 在变椭圆销孔精密加工中的应用

翟 鹏\*, 肖博涵, 贺 凯, 张 琨

(山东大学(威海)机电与信息工程学院, 山东 威海 264209)

**摘要:**针对非对称性销孔的镗削加工,研究了用于高负荷孔精密镗削装置的超磁致伸缩致动器(GMA)的相关控制。考虑 GMA 的迟滞非线性,分析了准静态改进型 Prandtl-Ishlinskii(P-I)模型的数学机理;为提高其动态适用频域和控制精度,提出了结合相角前馈补偿的动态改进型 P-I 模型,获得了满意的控制效果。结合 PID 反馈控制搭建的闭环控制实验结果显示,GMA 的迟滞非线性由补偿前的 14.5%~67.2%减小到 1.5%~4.3%,有效降低了迟滞系统的非线性误差。在此基础上进行了椭圆销孔试镗削实验,结果显示其椭圆度均符合图纸要求,验证了补偿方法的正确性。本文的研究为实现高负荷异形孔的精密加工提供了新方法。

**关键词:**异形销孔;镗削加工;超磁致伸缩致动器;复合反馈控制;改进型 P-I 模型 频率相位控制

**中图分类号:** TG 53 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1389

## Composite backward control for GMA and its application in high precision machining of variable ellipse pinhole

ZHAI Peng\*, XIAO Bo-han<sup>1</sup>, HE Kai<sup>1</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>

(School of Mechanical, Electrical & Information Engineering,  
Shandong University(Weihai), Shandong 264209, China)

\* Corresponding author, E-mail: zp1197@163.com

**Abstract:** For high precision machining of asymmetric boring holes, a control technology of the Giant Magnetostictive Actuator (GMA) used in a precision high-load pinhole boring device was explored. According to the hysteresis nonlinearity of the GMA, the mathematic mechanism of the quasi static modified Prandtl-Ishlinskii(P-I) model was analyzed briefly. To broaden the application frequency domain and to improve the precision of quasi static modified P-I model, a modified dynamic P-I model was proposed by combining with hysteresis phase feedforward compensation, and good control results were obtained. The experiment of back loop control system based on the dynamic modified P-I model and a PID controller was conducted. Results after compensation show that the hysteresis nonlinearity of GMA has reduced from 14.5%—67.2% to 1.5%—4.3% at the case of open loop control, which controls the nonlinear error of the hysteresis. Moreover, a boring experiment for an oval pin hole was

performed, the obtained ovality accords with the requirement of drawings, and verifies the feasibility of the proposed method. The research in this paper provides a new method for machining high-load oval pinholes.

**Key words:** oval pinhole; boring; Giant Magnetostictive Actuator (GMA); composite backward Control; modified P-I model; control of frequency and phase

## 1 引言

随着发动机性能的日益提高,活塞所承受的燃气压力和惯性力不断增大,作为支撑部分的销孔负荷也显著增加。为降低销孔内侧应力集中提高活塞承载能力,延长使用寿命,“异形销孔”的设计与加工逐渐成为研究的热点。

对于椭圆形的异形销孔,常规的镗削方式无法实现刀具的径向位移补偿,欧美、日本等内燃机制造技术相对发达国家以不同的方式实现了异形销孔的加工,但由于技术封锁及价格因素等,国内高负荷活塞的发展受到了限制,日本等国家更是明令禁止引进设备严禁用于军事设备用途。

超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material, GMM)是近年来发展起来的一种新型的功能材料,具有应变大、推进力大,响应迅速、能量密度高等优点,在微定位机构、微位移执行器以及纳米技术等领域具有良好的应用前景,但高频段的迟滞非线性问题仍然没有得到有效解决,严重制约了超磁致伸缩致动器(Giant Magnetostrictive Actuator, GMA)的应用。

为了对迟滞非线性系统精确控制,必须对其模型进行合理的构建。国内外学者对此作了大量研究工作,提出一系列迟滞非线性系统模型。迟滞非线性系统建模主要包括 Jiles-Atherton 迟滞模型,唯象迟滞模型,和自由能迟滞模型。

物理机理的迟滞模型的典型代表是 Jiles-Atherton 迟滞模型,该模型基于铁磁材料的畴壁理论,由 Jiles 和 Atherton 于 1983 年通过对铁磁滞材料的畴壁运动机理的研究推导出包括可逆和不可逆微分磁化率的微分方程,得到磁化强度和外加磁场的磁滞回线。崔旭<sup>[1]</sup>等在考虑 GMM 内部分布的基础上结合动态 J-A 模型,建立了 GMM 棒的动态磁滞模型,可较好地描述在动态磁场作用下 GMM 棒内部磁场分布情况、涡流损耗以及异常损耗,从而可以预测 GMM 棒磁滞非

线性的变化规律以及能量损耗特性。但模型涉及较多的物理过程转换及求导变换,影响了模型精度。

唯象迟滞模型中最具代表性的是 Preisach 模型。经典 Preisach 模型只能描述各种静态迟滞,对于准静态下迟滞非线性控制效果良好,但不能描述动态情况实现动态迟滞建模。为了能够对动态迟滞进行描述,一些学者在经典 Preisach 模型的基础上发展了动态迟滞模型,研究适合于输入变化的迟滞模型。龚大成<sup>[2]</sup>等在 Preisach 模型参数辨识过程中,由于网格离散化会造成误差,故采用基于迭代补偿的近似算法,以避免 Preisach 模型的直接逆运算的困难。考虑到要将前述基于 Preisach 模型的前馈补偿信号和基于重复控制原理的补偿信号同时施加到被控对象上,设计了复合前馈补偿 PID 闭环控制器。系统的跟踪精度已达  $1 \mu\text{m}$ ,说明了补偿控制的有效性。唐志峰等<sup>[3]</sup>研究表明 Preisach 前馈补偿的 PID 反馈控制器仅能显著改善磁致伸缩致动器在准静态( $<5 \text{ Hz}$ )的精密定位跟踪性能。Carman 等人<sup>[4,5]</sup>从自由能角度,通过保留展开的泰勒级数有限相关项的方法建立了一维磁致伸缩材料非线性有限元模型,在高预压力下模型和实验结果吻合,但是,此模型没有考虑饱和效应。此外,上海交通大学的赵寅<sup>[6]</sup>首先采用 Prandtl - Ishlinskii(P-I)模型对驱动器的磁滞特性进行建模,并基于 P-I 模型设计了实时补偿控制策略,通过实验证明,P-I 模型具有较好的磁滞跟踪能力,并设计的实时补偿控制策略可以有效减小磁滞误差,可有效提高驱动器的可控精度。

本文对高负荷孔精密镗削装置用超磁致伸缩致动器(GMA)的相关控制技术进行了研究,为拓宽 GMA 的适用频域达到 GMA 的高频响,并有效简化模型,采用改进型 P-I 模型结合相角补偿复合前馈,PID 反馈的控制方式,提高了 P-I 模型的适用频域,达到了良好的控制效果,并通过活塞变椭圆销孔的加工实现,验证了补偿结果的正确

性,为高负荷变椭圆销孔的精密镗削加工提供了新方法。

## 2 改进型 P-I 模型的数学描述

### 2.1 基本算子性质

改进 P-I 模型是黑箱模型,不考虑磁致伸缩过程的物理机理,仅对输入输出关系做纯数学的描述。其中包含 2 个基本算子<sup>[7,8]</sup>:Backlash 算子与饱和算子(又称:单侧死区算子),其中 Backlash 算子的数学表达式为:

$$\bar{y}(t) = H_{rH}[x(t), \bar{y}] = \max\{x(t) - r_H, \min\{x(t) + r_H, \bar{y}(t-T)\}\}, \quad (1)$$

且满足初试条件,即  $t=0$  时:

$$\bar{y}(0) = \max\{x(0) - r_H, \min\{x(0) + r_H, \bar{y}_0\}\}, \quad (2)$$

其中: $x(t)$ 为  $t$ 时刻的输入值; $y(t)$ 为  $t$ 时刻的输出值; $r$ 为 Backlash 算子的阈值; $T$ 为信号的周期时间;是初始值,一般设置为 0。

基于 MATLAB 对 Backlash 算子的输入输出关系做无量纲的纯数值模拟,如图 1 所示。

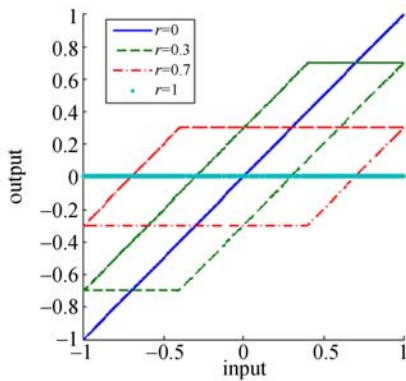


图 1 Backlash 算子的数值输出关系

Fig. 1 Numerical input-output relationship of Backlash operator

可见,阈值不同的 Backlash 算子是一系列的平行四边形,且两条侧边的斜率为 1,当阈值  $r$  为 0 时,算子即为正比例函数  $y = x$ ;当阈值大于等于输入量最大值时,算子的输出恒为 0。

饱和算子的数学表达式为:

$$y(t) = S[x(t), r_s] = \begin{cases} \max\{x(t) - r_s, 0\}; & r_s > 0 \\ x(t) & r_s = 0, \\ \min\{x(t) + r_s, 0\}; & r_s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: $x(t)$ 为  $t$ 时刻的输入值; $y(t)$ 为  $t$ 时刻的输出值; $r$ 为饱和算子的阈值。

基于 MATLAB 对饱和算子算子的输入输出关系做无量纲的纯数值模拟如图 2 所示。

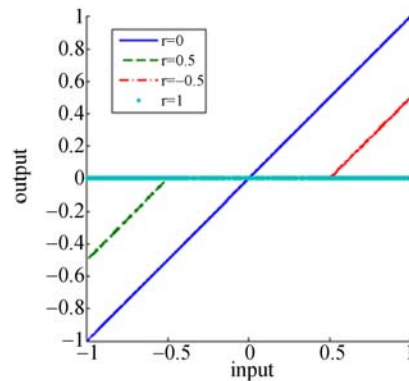


图 2 饱和算子的数值输出关系

Fig. 2 Input-output relationship of saturation operator

可见,饱和算子与 Backlash 算子有类似的性质:当阈值为 0 时,算子即为正比例函数  $y = x$ ;当阈值等于输入量最大值时,算子的输出恒为 0。但饱和算子与 Backlash 相比,最大的不同在于,饱和算子的阈值可以为负值,而 Backlash 算子的阈值为正值。

### 2.2 改进型 P-I 模型及逆模型

传统 P-I 模型是一系列 Backlash 算子的线性叠加,由于 Backlash 算子的中心对称性,传统 P-I 模型只能描述滞环为中心对称型的迟滞现象,而超磁致伸缩材料本身具有磁饱和性质和滞环的非中心对称性,导致传统 P-I 模型存在较大的理论误差。德国萨尔大学的 Klaus Kuhnen<sup>[8,9]</sup>提出了改进型 P-I 模型,如图 1 所示,即在传统 P-I 模型的输出信号  $y(t)$ 作为一系列饱和算子的输入信号,并进行线性叠加获得最后的输出信号  $Z(t)$ ,其中  $W_{h1}, W_{h2}, \dots, W_{hm}$ 是若干 Backlash 算子叠加的权重, $W_{s1}, W_{s2}, \dots, W_{sm}$ 是若干饱和算子叠加的权重。这样可改善传统 P-I 模型拟合的滞回曲线,提高控制精度。

改进型 P-I 模型的数学表达式为:

$$\Gamma[x](t) = \sum_{s=1}^n S_{rs}[W_H^T H_{rH}[x, z_{H0}]], \quad (4)$$

其中: $n$ 个 Backlash 算子的输出矩阵,是权重向量, $m$ 个饱和算子的输出矩阵,是权重向量。

为了进行 GMA 的前馈补偿控制,求取改进

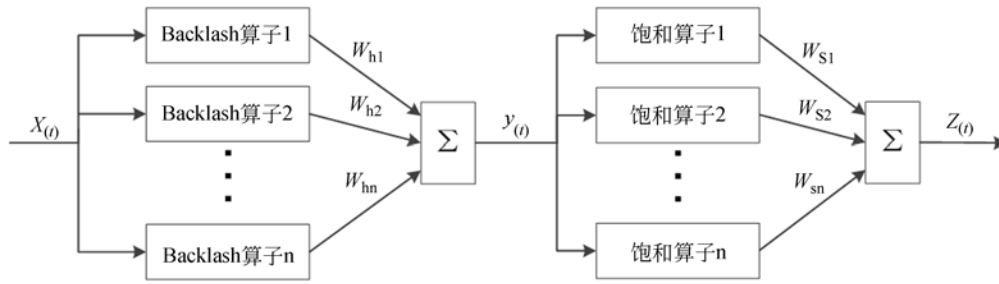


图 3 改进型 P-I 模型的数学结构

Fig. 3 Mathematical structure of modified P-I model

型 P-I 模型的逆模型为:

$$\Gamma^{-1}[y](t) = \omega_{\text{H}}^{\text{T}} H_{\text{rH}} [W_{\text{S}}^{\text{T}} S_{\text{rS}}[y], z'_{\text{H0}}](t). \quad (5)$$

逆模型中 Backlash 算子的阈值与权重的计算为:

$$r_{\text{Hi}}' = \sum_{j=0}^i \omega_{\text{Hj}} (r_{\text{Hi}} - r_{\text{Hj}}); i = 0 \cdots n, \quad (6)$$

$$\omega_{\text{H0}}' = 1/\omega_{\text{H0}}, \quad (7)$$

$$\omega_{\text{Hi}}' = -\omega_{\text{Hi}} / [(\omega_{\text{H0}} + \sum_{j=1}^i \omega_{\text{Hj}}) g(\omega_{\text{H0}} + \sum_{j=1}^{i-1} \omega_{\text{Hj}})]; j = 1 \cdots 1, \quad (8)$$

饱和算子正半支的阈值与权重的计算为:

$$r_{\text{Si}}' = \sum_{j=0}^i \omega_{\text{Sj}} (r_{\text{Si}} - r_{\text{Sj}}); i = 1 \cdots 1, \quad (9)$$

$$\omega_{\text{Si}}' = -\omega_{\text{Si}} / [(\omega_{\text{S0}} + \sum_{j=1}^i \omega_{\text{Sj}}) g(\omega_{\text{S0}} + \sum_{j=1}^{i-1} \omega_{\text{Sj}})]; j = 1 \cdots 1 \quad (10)$$

饱和算子负半支的阈值与权重的计算为:

$$r_{\text{Si}}' = \sum_{j=i}^0 \omega_{\text{Sj}} (r_{\text{Si}} - r_{\text{Sj}}); i = -1 \cdots 0, \quad (11)$$

$$\omega_{\text{S0}}' = 1/\omega_{\text{S0}}, \quad (12)$$

$$\omega_{\text{Si}}' = -\omega_{\text{Si}} / [(\omega_{\text{S0}} + \sum_{j=i}^{-1} \omega_{\text{Sj}}) g(\omega_{\text{S0}} + \sum_{j=i+1}^{-1} \omega_{\text{Sj}})]; j = 1 \cdots l, \quad (13)$$

### 2.3 参数辨识

改进型 P-I 模型中<sup>[10,11]</sup>, 需要辨识的参数有 Backlash 算子的阈值, 权重向量, 以及饱和算子的阈值, 权重向量。

为辨识模型参数, 我们需要先通过实验测量在正弦信号激励下 GMA 的相应。

将根输入信号范围等分, 确定阈值宽度。即:

$$r_{\text{Hi}} = r_{\text{Si}} = ig(\max\{x(t)\} - \min\{x(t)\}) / (n+1), \quad i = 0 \cdots n, \quad (14)$$

Backlash 算子权重  $\omega_{\text{H}}$  的辨识, 利用最小二乘法, 通过比较传统 P-I 模型输出和实验输出使下面的误差方程的值最小:

$$E[x, z](\omega_{\text{H}} \cdot \omega_{\text{S}}, t) = \hat{y}(t) - z(t) = [\omega_{\text{H}}^{\text{T}} H_{\text{r}}[x, y_0]](t) - z(t), \quad (15)$$

其中:  $z(t)$  为测量输出。

最终, 饱和算子权重  $\omega_{\text{S}}$  的辨识, 采用相同的最小二乘法, 通过比较改进型 P-I 模型输出和实验输出使下面的误差方程的值最小:

$$E[x, z](\omega_{\text{H}} \cdot \omega_{\text{S}}, t) = \hat{z}(t) - z(t) = \omega_{\text{S}}^{\text{T}} S_{\text{d}}[\omega_{\text{H}}^{\text{T}} H_{\text{r}}[x, y_0]](t) - z(t). \quad (16)$$

### 2.4 改进型 P-I 模型的局限

P-I 模型的本质是用分段线性的曲线去拟合滞回曲线, 故每段曲线上的斜率为:

$$\omega_{\text{hi}} = \frac{d}{dr} \varphi(r) = \sum_{j=0}^i \omega_{\text{hj}}. \quad (17)$$

由于改进型 P-I 模型中 Backlash 算子的权重均为正数, 故分段曲线的斜率为正且单调递增, 所以 P-I 模型只适用于输入输出正相关的外凸的拟合滞回曲线。

而通过 Xiaobo Tan<sup>[12,13]</sup> 等人的研究发现, 在高频激励时, 滞回曲线会发生形状的畸变, 导致改进型 P-I 模型无法适用, 为解决这一问题, 在改进型 P-I 前馈控制前先加入相角补偿前馈, 修正滞回曲线形状畸变, 使其满足改进型 P-I 模型适用条件。

## 3 GMA 前馈相角补偿模型

滞回曲线的形成, 部分原因是在于位移输出信号与输入电压信号之间存在相位差。<sup>[14]</sup>

求解各个频率下输出位移相对输入电压的滞

后角,使用离散傅里叶变换的快速算法(FFT)<sup>[15,16]</sup>。假设某频率  $f$  下的采样点数为  $N$ ,采样频率为  $F_s$ ,这  $N$  个输出位移值经过 FFT 算法之后由时域变为频域,变为  $N$  个复数,这  $N$  个复数中幅值最大的点对应的频率即为信号频率  $f$ ;相应地,该点的相角对应输出位移值的相角。用同样的方法可以得到输入电压的相角,将这两个相角进行求差,就可得到输出位移相对输入电压的滞后角  $\Phi$ 。

得到各个频率下输出位移相对输入电压的滞后角  $\Phi$  后,用最小二乘法对滞后角  $\Phi$  和频率  $f$  的关系进行拟合,可以得到相角滞后模型相位滞后角和频率的关系,如图 4 所示,由该图可知输出位移滞后相角与频率大小为线性关系,该实验平台用 GMA 两者之间的关系式为: $\Phi=0.0398f$ 。

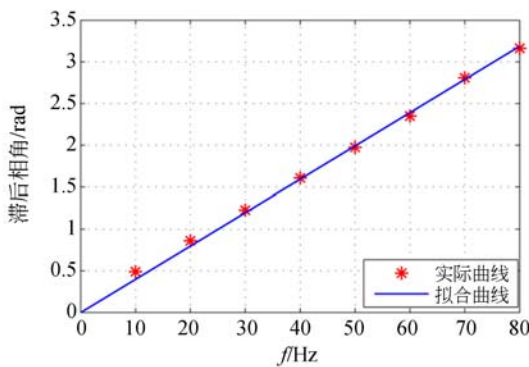


图 4 模型相位滞后角与频率的关系

Fig. 4 Relationship of model's lagging phase angle and frequency

#### 4 基于复合前馈补偿的 PID 控制

在前述基于改进型 P-I 模型和相角补偿的复合前馈补偿信号,设计了如下的复合前馈补偿 PID 闭环控制器,其中是理想位移信号,  $e(t)$  是误差信号,  $uk(t)$  为经相角补偿和改进型 P-I 模型补偿后的电压信号,  $upid(t)$  是 PID 反馈信号,  $uk(t)$  与  $upid(t)$  二者合成 GMA 的控制电压信号  $u(t)$ ,  $f(t)$  是位移传感器采集的 GMA 实际位移信号。

控制实验之前,需要先通过一定频率下的一组电压一位移信号,利用最小二乘法,对改进型

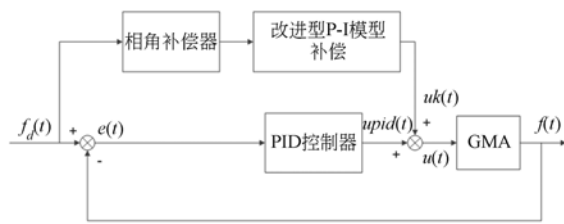


图 5 基于复合前馈补偿的 PID 控制框图

Fig. 5 Block diagram of PID control based on complex feedforward compensation

P-I 模型中的参数进行辨识,再根据式(5)~(13)计算其逆模型参数。

控制实验时,理想位移信号先经过相角补偿,保证位移信号能满足改进型 P-I 模型的适用条件,即滞回曲线必须是单调增的凸曲线。再经过改进型 P-I 模型的逆模型补偿,结合 PID 反馈控制器,对 GMA 进行控制。

### 5 控制实验及结果

#### 5.1 实验平台

实验用 GMA 控制系统采用工控机加 EtherMAC 两轴控制卡的形式,其中的 EtherMAC 是由山东大学数控中心自主研发,实验电源的电压为 0.47~1.2V。搭建硬件实验平台如图 6 所示:

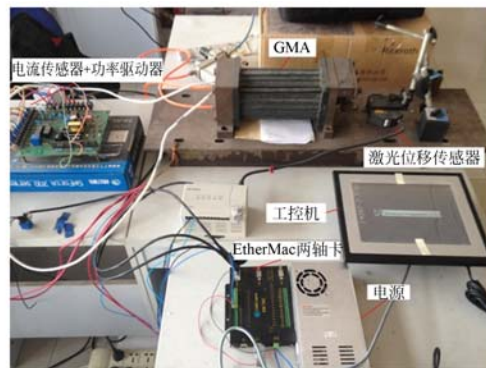


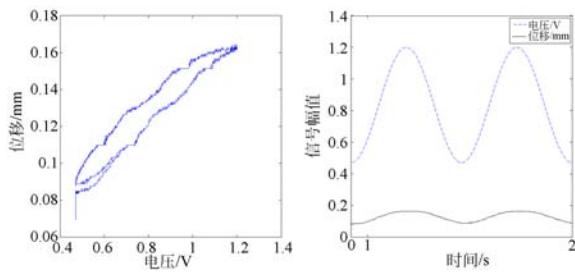
图 6 GMA 控制实验平台

Fig. 6 Control experiment platform of GMA

#### 5.2 无补偿实验

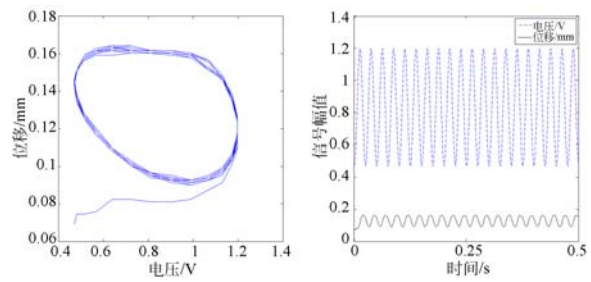
分别在 1 Hz、10 Hz、20 Hz、30 Hz、40 Hz 和 50 Hz 的正弦波激励下进行实验。在未做任何补偿的情况下各频率的输入输出关系如图 7 所示。





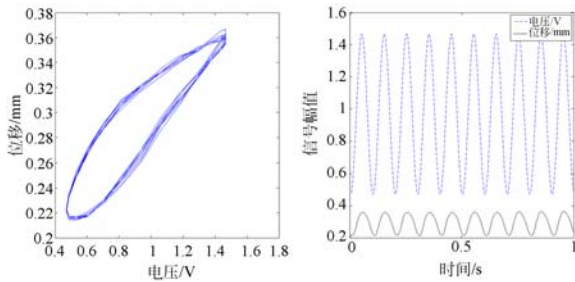
(a) 1 Hz 输入信号无补偿开环滞环

(a) Input-output relation of GMA under uncompensated signal stimulus of 1 Hz



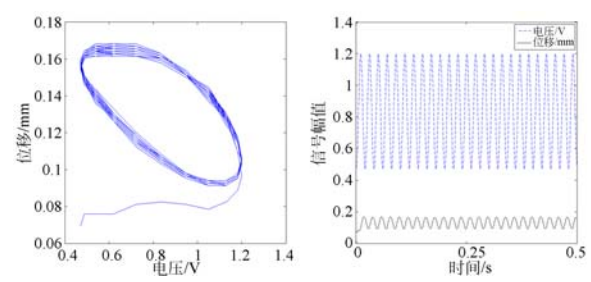
(e) 40 Hz 输入信号无补偿开环滞环

(e) Input-output relation of GMA under uncompensated signal stimulus of 40 Hz



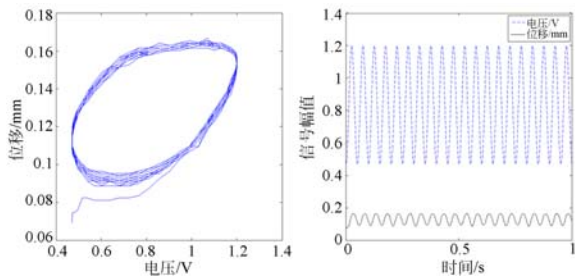
(b) 10 Hz 输入信号无补偿开环滞环

(b) Input-output relation of GMA under uncompensated signal stimulus of 10 Hz



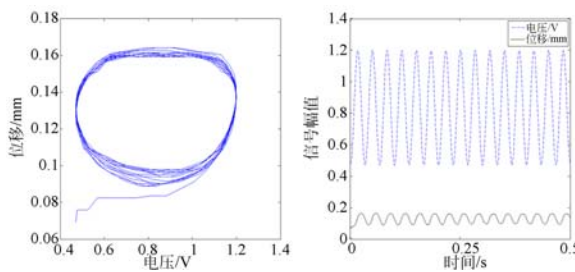
(f) 50 Hz 输入信号无补偿开环滞环

(f) Input-output relation of GMA under uncompensated signal stimulus of 50 Hz



(c) 20 Hz 输入信号无补偿开环滞环

(c) Input-output relation of GMA under uncompensated signal stimulus of 20 Hz



(d) 30 Hz 输入信号无补偿开环滞环

(d) Input-output relation of GMA under uncompensated signal stimulus of 30 Hz

图 7 不同频率信号无补偿激励的 GMA 输入输出特性  
Fig. 7 Input-output relation of GMA under uncompensated signal stimulus of different frequencies

### 5.3 复合前馈补偿实验

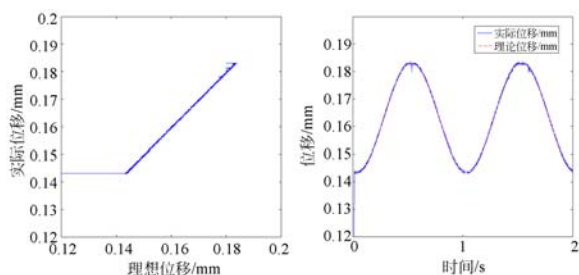
由上述实验结果,在频率大于 20 Hz 时,滞环畸变严重,不能直接应用改进型 P-I 模型进行补偿。结合了相角补偿和改进型 P-I 逆模型的复合前馈开环补偿结果如图 8 所示,改善了 GMM 材料本身的迟滞非线性。有良好的补偿效果。参与计算的算子越多,计算精确度越高,计算时间越长。经前期实验,若采用小于 6 个的算子,补偿结果误差较大,而当算子大于 8 个时,补偿误差在允许范围内,且随算子个数增长的变化率极小。故本文所用改进型 P-I 模型含有 8 个 Backlash 算子和 8 个饱和算子。

为了进一步提高控制精度,在复合前馈的基础上,又做了 PID 闭环反馈控制,进一步提高了控制精度,各频率下的输入输出关系如下图 9 所示。

实验的控制误差定义为:

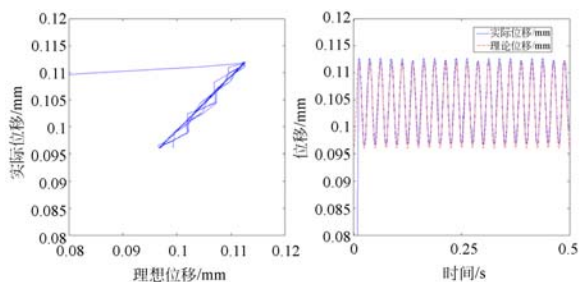
$$\epsilon = \max\{|s_d(t) - s(t)|\} / \max\{|S_d(t)|\}.$$

(18)



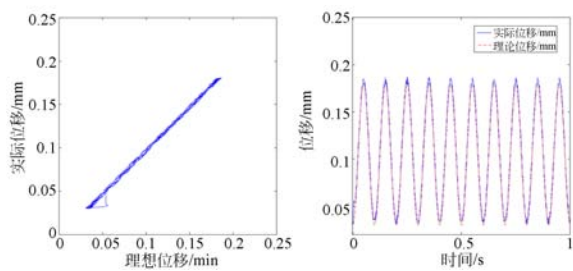
(a) 1 Hz 输入信号复合前馈开环补偿

(a) Input-output relation of GMA under compounding feedforward signal stimulus of 1 Hz



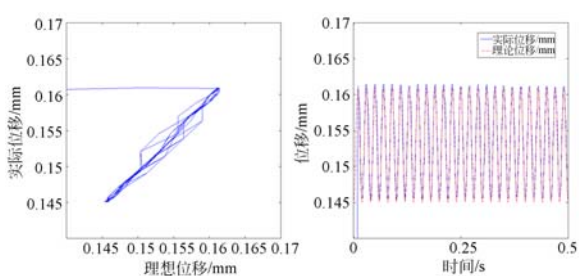
(e) 40 Hz 输入信号复合前馈开环补偿

(e) Input-output relation of GMA under compounding feedforward signal stimulus of 40 Hz



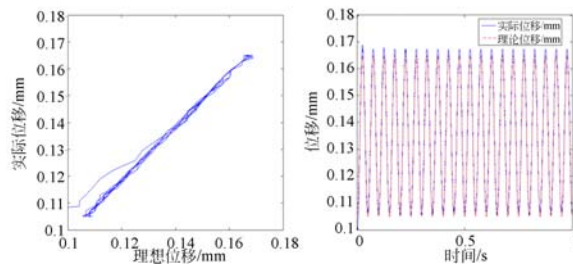
(b) 10 Hz 输入信号复合前馈开环补偿

(b) Input-output relation of GMA under compounding feedforward signal stimulus of 10 Hz



(f) 10 Hz 输入信号复合前馈开环补偿

(f) Input-output relation of GMA under compounding feedforward signal stimulus of 50 Hz



(c) 20 Hz 输入信号复合前馈开环补偿

(c) Input-output relation of GMA under compounding feedforward signal stimulus of 20 Hz

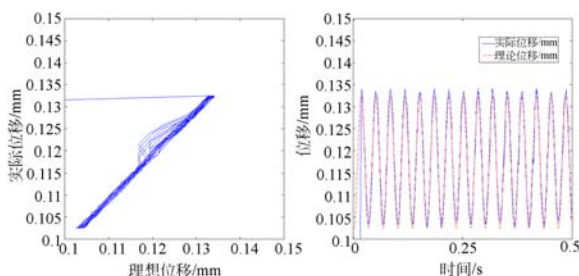
(f) 10 Hz 输入信号复合前馈开环补偿

(f) Input-output relation of GMA under compounding feedforward signal stimulus of 50 Hz

图 8 不同频率信号激励的 GMA 复合前馈输入输出特性

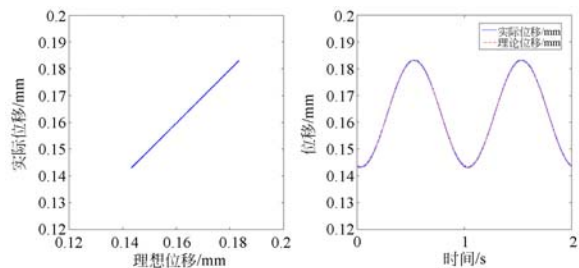
Fig. 8 Input-output relation of GMA under compounding feedforward signal stimulus of different frequencies

计算各频率激励下的控制误差如表 1 所示, 误差率随频率的增大而增加。这是由于频率越高, 换能器工作时磁滞后越明显, 能量损耗越大。同时系统刚度的不足与周围的噪声, 也是导致误差的主要原因。



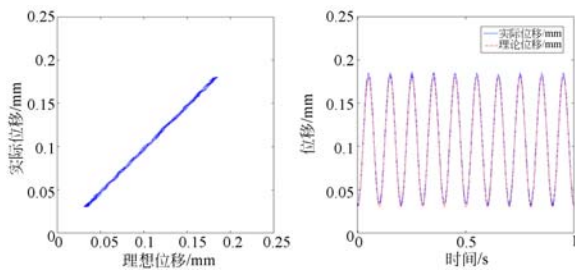
(d) 30 Hz 输入信号复合前馈开环补偿

(d) Input-output relation of GMA under compounding feedforward signal stimulus of 30 Hz



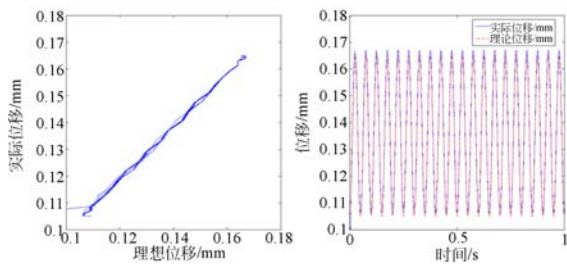
(a) 1 Hz 输入信号复合前馈闭环补偿

(a) Input-output relation of GMA under composite feed-forward loop compensation signal stimulus of 1 Hz



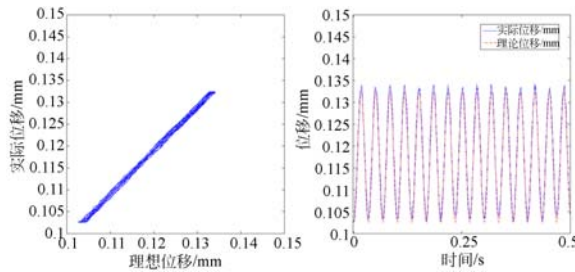
(b) 10 Hz 输入信号复合前馈闭环补偿

(b) Input-output relation of GMA under composite feed-forward loop compensation signal stimulus of 10 Hz



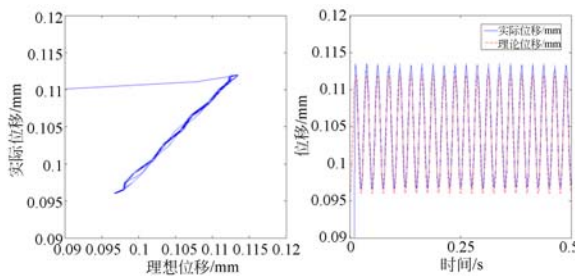
(c) 20 Hz 输入信号复合前馈闭环补偿

(c) Input-output relation of GMA under composite feed-forward loop compensation signal stimulus of 20 Hz



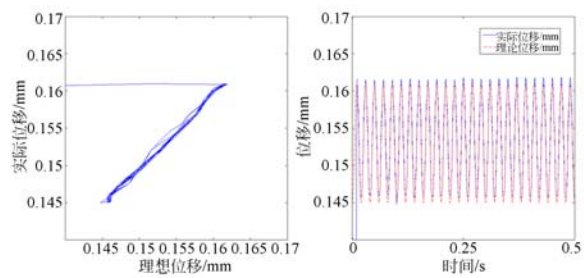
(d) 30 Hz 输入信号复合前馈闭环补偿

(d) Input-output relation of GMA under composite feed-forward loop compensation signal stimulus of 30 Hz



(e) 40 Hz 输入信号复合前馈闭环补偿

(e) Input-output relation of GMA under composite feed-forward loop compensation signal stimulus of 40 Hz



(f) 50 Hz 输入信号复合前馈闭环补偿

(f) Input-output relation of GMA under composite feed-forward loop compensation signal stimulus of 50 Hz

图 9 不同频率信号激励下的 GMA 复合前馈闭环输入输出特性

Fig. 9 Input-output relation of GMA under composite feed-forward loop compensation signal stimulus of different frequency

表 1 各频率下不同控制方法的误差率

Tab. 1 Error rate of different control methods at each frequency

频率	误差率		
	无补偿	开环补偿	闭环补偿
1	14.5	2.3	1.5
10	21.0	2.9	2.1
20	30.6	4.3	2.8
30	38.7	3.8	3.3
40	42.5	5.2	3.8
50	67.2	6.7	4.3

## 6 镗床加工实验及结果

为实现椭圆销孔的加工,采用基于工业以太网的控制方案,基于数控内核自行编写程序构建开放式数控系统,将上述前馈补偿算法应用到活塞的高负荷椭圆异形销孔的专用镗削机床(图 10 为高频响伺服刀杆)。分别对椭圆度为  $0.03 \pm 0.005$ 、 $0.013 \pm 0.005$ 、 $0.003 \pm 0.0025$  的椭圆孔进行镗削实验。试验主轴转速 2000 r/min,进给速度 200 mm/min,切削深度 0.10 mm。试镗削结果如图 11 所示。

镗削三个椭圆孔的实测椭圆度如表 2 所示,加工误差均在图纸要求范围内。实验用镗床主轴采用动静压精密轴系,主轴回转精度  $\leq 0.0015$  mm,纵向滑台导轨采用高精度 THK 直线导轨,为实现高精度销孔的镗削提供了良好的基础条件。





图10 椭圆孔镗床的高频响伺服刀杆

Fig. 10 Novel high frequency boring bar of elliptical hole boring machine

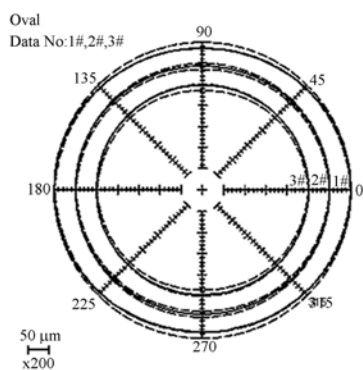


图11 镗削椭圆孔截面轮廓

Fig. 11 Section profile of elliptical boring hole

## 参考文献:

- [1] 崔旭,何忠波,孙华刚,等.超磁致伸缩材料动态磁滞特性理论分析[J].微特电机,2012,40(11):4-10. CUI X, HE ZH B, SUN H G, et al.. Theoretical analysis of dynamic characteristic for giant magnetostrictive material [J]. *Small & special Electrical Machines*, 2012, 40(11): 4-10. (in Chinese)
- [2] 龚大成,吕福在,项占琴,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):1589-1595. GONG D CH, LV F Z, XIANG ZH Q, et al.. Precision servo control of GMA based on compounding feedforward compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1589-1595. (in Chinese)
- [3] 唐志峰,吕福在,项占琴.超磁致伸缩微位移驱动器的非线性迟滞建模及控制方法[J].机械工程学报,2007,43(6):55-61. TANG ZH F, LV F Z, XIANG ZH Q. Nonlinear hysteresis model and control of

表2 镗削椭圆孔的椭圆度

Tab. 2 Ellipticity of elliptical boring hole

被测椭圆满序号	图纸要求椭圆度 /mm	实测椭圆度 /mm
1#	0.03±0.005	0.03
2#	0.013±0.005	0.0121
3#	0.003±0.002 5	0.005 1

## 7 结 论

相角补偿结合改进型 P-I 模型的控制方法提高了 P-I 模型的适用频域,迟滞补偿实验表明该控制方法可有效减小迟滞系统的非线性误差,但在高频情况下,模型精度会受到一定影响。实验结果表明,最大误差容易产生在滞环的拐点附近,即信号的极值点附近。如何减小最大误差,进一步提高控制精度,将成为以后研究的重要课题。

为了更好地满足活塞的承载能力,德国大众 EA211 发动机等采用了非对称形汽油机销孔结构,使国内外现有加工方法受到了限制。实现非对称性销孔的镗削加工,不仅要求驱动刀具的 GMA 要有较高的定位精度,同时要有良好的频响特性。本文提供的高频响条件下 GMA 定位精度方法的研究,可为非对成型高负荷销孔的精密镗削提供新方法。

magnetostrictive micropositioner [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(6): 55-61. (in Chinese)

- [4] CARMAN G P, MITROVIC M. Nonlinear constitutive relations for magnetostrictive Materials with applications to 1-D problems [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1995, 6(5): 673-683.
- [5] CARMAN G P, MITROVIC M. Nonlinear constitutive relations for magnetostrictive materials [C]. *Proc. Of the 2nd International Conference on Intelligent Materials*, 1994: 265-278.
- [6] 赵寅.超磁致伸缩驱动器建模及驱动控制研究[D].上海:上海交通大学,2013.
- [7] 王俐,饶长辉,饶学军.压电陶瓷微动台的复合控制[J].光学精密工程,2012,20(6):1265-1271. WANG L, RAO C H, RAO X J. Feed-forward control of piezoelectric ceramic positioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1265-1271.

- [8] KUHEN K. Modeling, identification and compensation of complex hysteretic nonlinearities: A modified Prandtl-Ishlinskii approach [J]. *European Journal of Control*, 2003, 9(4): 407-418.
- [9] KUHEN K, JANOCCHA H. Inverse feedforward controller for complex hysteretic nonlinearities in smart-material systems [J]. *Control Intell. Syst.*, 2001, 29(3): 74-83.
- [10] 杨斌堂, 赵寅, 彭志科, 等. 基于 Prandtl-Ishlinskii 模型的超磁致伸缩驱动器实时磁滞补偿控制 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 124-130.  
YANG B T, ZHAO Y, PENG Z K, *et al.*. Real-time compensation control of hysteresis based on Prandtl-Ishlinskii operator for GMA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 124-130.
- [11] SCHÄFER J, JANOCCHA H. Compensation of hysteresis in solid-state actuators [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1995, 49(1): 97-102.
- [12] WEI T A, DONG SH, LI D. Feedforward Controller With Inverse Rate-Dependent Model for Piezoelectric Actuators in Trajectory-Tracking Applications [J]. *Mechatronics, IEEE/ASME Trans*, 2013, 21(5): 1549-1557.
- [13] TAN X B, JOHN S B. Modeling and control of hysteresis in magnetostrictive actuators [J]. *Automatica*, 2013, 40(2004): 1469-1480.
- [14] Cruz-Hernandez J M, Hayward V. Phase control approach to hysteresis reduction [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, 9(1): 17-26.
- [15] 曲孟孟. 地震波法隧道地质超前预报用 GMA 可控震源研究 [D]. 山东: 山东大学(威海), 2013.  
QU M M. *Research of GMA Vibroseis for Tunnel Seismic Geological Advance Prediction* [D]. Shandong: Shandong University(Weihai), 2013.
- [16] QIN Y D, GAO W G, ZHANG D W. Rate-Dependent Hysteresis Modeling and Compensation of Piezo-Driven Flexure-Based Mechanism [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2013, 18(3): 157-167.

#### 作者简介:



翟鹏(1963—),男,山东省邹平县人,教授,研究生导师。1987年于山东工业大学获学士学位,2002年于山东大学获工程硕士学位,2007年于山东大学获博士学位,主要研究方向智能材料致动器设计及应用,机电装备技术。E-mail: zp1197@163.com



肖博涵(1990—),男,河北秦皇岛人,山东大学(威海)机电与信息工程学院硕士研究生,主要研究方向为超磁致伸缩驱动器控制。E-mail: xiaobh90@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)