

文章编号 1004-924X(2009)03-0549-08

# 压电微动工作台的动态迟滞模型

张 栋<sup>1</sup>, 张承进<sup>1</sup>, 魏 强<sup>2</sup>

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;

2. 泰山学院 物理与电子科学系, 山东 泰安 271021)

**摘要:**为实现压电微动工作台的快速准确运动定位,研究了其运动定位模型。压电工作台的运动定位精度主要受工作台动态特性和迟滞特性的影响,在介绍这两类典型特性模型及其适用范围的基础上,提出了能够同时体现压电工作台动态特性和迟滞特性的动态迟滞模型,并给出了采用 Prandtl-Ishlinskii (PI)迟滞算子的动态迟滞模型参数辨识途径。以 TRITOR100 型压电工作台为例进行实验研究,结果表明:当压电工作台在  $30\ \mu\text{m}$  的定位范围内以  $\pm 900\ \text{V/s}$  的输入电压速率进行快速运动定位时,动态迟滞模型的模型精度比以往常用的线性动态模型和迟滞模型有较大提高,其平均误差为  $0.16\ \mu\text{m}$ ,最大误差为  $0.38\ \mu\text{m}$ ,为高性能运动定位工作台控制系统的设计提供了模型基础。

**关键词:**压电微动工作台;运动定位;动态迟滞模型;PI迟滞模型;扫描探针显微镜

**中图分类号:**TP271;TN384 **文献标识码:**A

## Dynamic hysteresis model of piezopositioning stage

ZHANG Dong<sup>1</sup>, ZHANG Cheng-jin<sup>1</sup>, WEI Qiang<sup>2</sup>

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Department of Physics, Taishan University, Taian 271021, China)

**Abstract:** In order to realize dynamic positioning of piezopositioning stage with high speed and high accuracy, the motion positioning model of the stage is studied. Because the dynamic positioning accuracy of piezopositioning stage is affected primarily by dynamic property and hysteresis property of the stage, this paper proposes a dynamic hysteresis model of piezopositioning stage after introducing two kinds of typical property models and their applicable scopes. Furthermore, the parameter identification method of the dynamic hysteresis model constituting of Prandtl-Ishlinskii (PI) hysteresis operator is given. Experimental studies on the TRITOR100 piezopositioning stage indicate that the dynamic hysteresis model is more accurate than both the linear dynamic model and PI hysteresis model when the stage positioning is dynamically positioned at high speed in  $\pm 900\ \text{V/s}$  input voltage within  $30\ \mu\text{m}$  positioning range. The mean error of the dynamic hysteresis model is  $0.16\ \mu\text{m}$ , and the maximum error is  $0.38\ \mu\text{m}$ , which provides foundations for designing high performance control system of piezopositioning stage.

**Key words:** piezopositioning stage; dynamic positioning; dynamic hysteresis model; PI hysteresis model; scanning probe microscope

收稿日期:2008-06-16;修订日期:2008-07-23.

基金项目:山东省科技发展计划资助项目(No. 2007GG30D04D02)

## 1 引言

压电微动工作台由于其高的定位精度被广泛应用于各种微定位系统中,在超精密加工、半导体光刻、微型机械、机密测量、生物工程、微观化学反应过程等领域发挥着至关重要的作用<sup>[1-3]</sup>。但是,压电工作台的定位精度受压电元件蠕变特性、迟滞特性和整个工作台动态特性的影响<sup>[4-5]</sup>,其中蠕变特性在工作台静态定位或慢速运动定位情况下对定位精度影响较大;迟滞特性在工作台大行程定位时表现严重,导致的位移误差甚至可达到最大行程的 20%;而在较快速度运动定位时,工作台的动态特性对定位精度影响较为显著。

从系统和控制的观点出发,建立准确的压电工作台数学模型,进而设计相应的控制器,是提高工作台定位精度的关键。目前很多学者致力于研究压电元件及工作台的建模和控制器的设计<sup>[4,6-12]</sup>,但多数文献介绍的模型往往不能完全反映影响工作台定位精度的全部特性,较多模型仅能反映蠕变特性、迟滞特性和线性动态特性之一,很少将压电工作台的动态特性和固有的迟滞特性结合起来进行建模,这给高性能运动定位工作台控制系统的设计带来一定难度,使得压电工作台较大行程、快速运动定位的精度不高。以扫描探针显微镜(SPM)快速准确成像为例,要求压电工作台在水平方向上精准跟踪高速率三角波曲线<sup>[6]</sup>,工作台控制系统跟踪性能的好坏直接影响最终显微成像的效果。因此建立能够体现压电工作台动态特性和迟滞特性的新型模型,逐步引起更多重视<sup>[5,13-14]</sup>。

本文结合压电工作台内部作用机理和典型特性,分别介绍压电工作台的线性动态模型和迟滞模型,以及各类模型的适用范围;进而提出能够同时体现工作台动态特性和迟滞特性的动态迟滞模型,并给出采用 Prandtl-Ishlinskii (PI) 迟滞算子的动态迟滞模型参数辨识途径;最后以 CHI900B 型扫描电化学显微镜(SECM)的三维压电工作台为实验对象,验证动态迟滞模型较之线性动态模型和迟滞模型在工作台快速运动定位时的优越性,为下一步高性能运动定位工作台控制系统的设计提供模型基础。

## 2 压电工作台典型特性及相应模型

### 2.1 工作台的动态特性及其模型

压电陶瓷驱动、柔性铰链导向的微动工作台工作原理通常可由图 1 表示<sup>[15]</sup>。采用柔性铰链作为导向机构实现了工作台无摩擦和无间隙运动,但同时也使得工作台比单纯压电陶瓷元件表现出更强的动态特性<sup>[13]</sup>,因此可采用二阶系统

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = b\omega_n^2V(t), \quad (1)$$

来表征工作台输入电压与输出位移之间的关系<sup>[2]</sup>。其中, $V(t)$ 和 $x(t)$ 分别表示压电工作台的输入电压和输出位移, $\xi$ 和 $\omega_n$ 分别表示工作台的阻尼比和自然频率, $b$ 为常数。

这种线性模型结构简单,体现工作台的动态特性,但它不能反映压电元件的迟滞特性,尤其在工作台大行程定位时模型准确性较差。因而,用此模型所设计的控制系统往往不能很好地抵制工作台迟滞特性对定位精度的影响,甚至迟滞特性还可引起闭环控制系统的不稳定<sup>[12]</sup>。

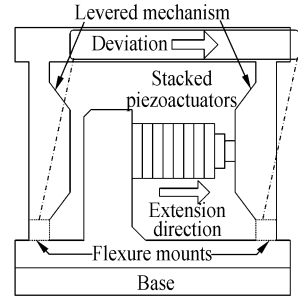


图 1 压电工作台工作原理示意图

Fig. 1 Schematic working principle of piezopositioning stage

### 2.2 工作台的迟滞特性及其模型

机敏材料(Smart Material)均体现出明显的迟滞特性<sup>[4]</sup>。压电工作台的迟滞特性指工作台的输出位移不仅和输入电压的当前值有关,还和输入电压的历史状态(尤其是历史输入的极值)有关,并且是速率相关的<sup>[14]</sup>,它是一种多对多的输入输出映射关系。图 2 所示即为典型的压电工作台定位迟滞回线。

迟滞特性的产生机制尚不完全明确,因此常采用系统辨识的方法来获得其模型<sup>[16]</sup>。目前应用最广泛的迟滞模型是 Preisach 模型<sup>[17]</sup>及 PI 模

型<sup>[18]</sup>。但这类迟滞模型大多为静态模型, 适用于工作台静态定位或慢速运动定位的情形, 并且通常和压电工作台的蠕变特性结合起来共同建模<sup>[16]</sup>。由于不能反应系统的动态特性, 在工作台快速运动定位时, 该类迟滞模型的精度不高。因而用此类模型所设计的控制系统通常会随着压电工作台输入电压速率的提高而性能变差。

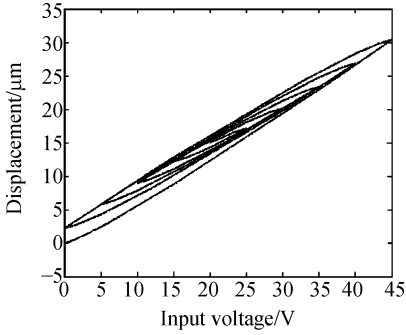


图 2 压电工作台定位迟滞回线

Fig. 2 Hysteresis curve of piezopositioning stage

### 3 压电工作台动态迟滞模型

根据以上分析, 本文提出了能够同时体现工作台动态特性和迟滞特性的动态迟滞模型。

#### 3.1 动态迟滞模型结构

文献[13]介绍了压电工作台的内部作用机制(如图 3 所示), 并指出当压电工作台的工作频率远小于其谐振频率时, 工作台的分布参数模型完全可以简化为一个质量-弹簧-阻尼系统模型。

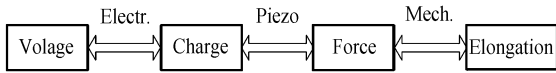


图 3 工作台内部作用关系示意图

Fig. 3 Schematic of cascaded combination in a piezopositioning stage

据此, 对压电工作台进行受力分析, 如图 4 所示。其中工作台的输入电压  $V(t)$  与内部应力  $F_p(t)$  之间是迟滞非线性关系, 记为:

$$F_p(t) = H\{V(t)\} \quad (2)$$

而工作台的动态特性由压电叠堆和柔性铰链传动机构两部分共同表现。由牛顿第二定律得:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_p(t) \quad (3)$$

其中,  $m$  表示压电工作台的等效质量,  $c$  和  $k$  分别

表示压电工作台的等效阻尼系数和弹性系数。令

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}, \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, H^*\{V(t)\} = \frac{H\{V(t)\}}{\omega_n^2 m} \quad (3)$$

可表示为:

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = \omega_n^2H^*\{V(t)\} \quad (4)$$

此处  $\xi, \omega_n$  可视作工作台的阻尼比和自然频率。

方程(4)既表征了工作台的动态特性, 又体现了工作台输入电压与内部应力之间的迟滞非线性关系, 称之为压电工作台的动态迟滞模型。

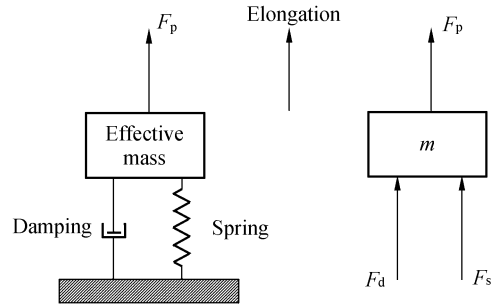


图 4 工作台受力分析示意图

Fig. 4 Schematic of force acting on stage

#### 3.2 Prandtl-Ishlinskii (PI) 迟滞算子

方程(4)中的迟滞非线性关系  $H^*$  易采用具有解析形式的迟滞模型来表征, 如 PI 模型。传统的 PI 模型是在 Preisach 模型基础上发展起来的一种描述静态迟滞特性的模型。该模型能够准确描述迟滞特性的非局部记忆特性, 并较之 Preisach 模型结构简单, 利于求逆运算和在线控制器的设计, 近年来应用较多<sup>[4, 18]</sup>。另外, 改进的 PI 模型还可以是速率相关的<sup>[14]</sup>, 能进一步提高迟滞模型的准确性, 但这类模型较为复杂。鉴于此, 本文采用传统的 PI 算子构成压电工作台的动态迟滞模型。

传统的 PI 算子由许多个阈值不同的加权间隙算子叠加构成。如图 5 所示, 间隙算子的数学描述为

$$y(t) = H_{r, \omega_h}[x, y_0](t) = \omega_h \max\{x(t) - r, \min\{x(t) + r, y(t - T)\}\} \\ y(0) = \omega_h \max\{x(0) - r, \min\{x(0) + r, y(0)\}\} \quad (5)$$

其中,  $x(t)$  和  $y(t)$  分别是间隙算子的输入和输出,  $r$  和  $\omega_h$  分别是间隙算子的阈值和权值,  $T$  是

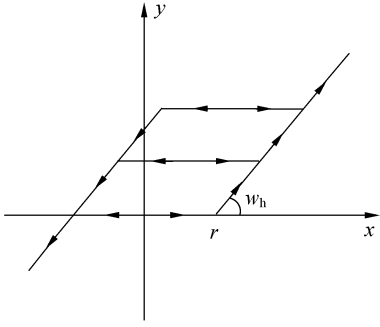


图 5 阈值为  $r$ 、权值为  $\omega_h$  的间隙算子

Fig. 5 Backlash operator with threshold  $r$  and weighting value  $\omega_h$

采样周期。 $x(0), y(0)$  为间隙算子的初始值, 通常为零。

$n$  个阈值不同, 权值不同的间隙算子线性叠加即可构成 PI 迟滞算子

$$y(t) = \sum_{i=0}^n H_{r_i, \omega_h^i} [x, y_0](t) = \sum_{i=0}^n \omega_h^i \max\{x(t) - r^i, \min\{x(t) + r^i, y(t - T)\}\} = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{H}_r [x, y_0](t) \quad (6)$$

### 3.3 动态迟滞模型参数辨识途径

工作台动态迟滞模型的参数辨识可对模型的迟滞特性和动态特性两部分单独进行。

当工作台慢速定位时, 其动态特性体现不明显, 此时方程(4)满足条件  $\omega_n^2 x \gg 2\xi\omega_n \dot{x} \gg \ddot{x}$ , 可简化为

$$x(t) = H^* \{V(t)\} \quad (7)$$

因此, 可通过工作台慢速运动定位的实验曲线辨识得到输入电压与位移的之间的迟滞非线性关系  $H^*$ 。

在选用 PI 迟滞算子构成动态迟滞模型时, 可根据输入信号大小, 合理选取间隙算子的数目及阈值(使得小阈值的间隙算子间隔较小)<sup>[14, 18]</sup>, 并采用使得 PI 模型与慢速实验曲线  $z(t)$  的误差  $E[x, y](\omega, t) = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{H}_r^* [x, y_0](t) - z(t)$  (8) 的  $L_2^2$  范数最小, 即性能指标

$$\min\{\mathbf{W}^T \cdot \int_t \mathbf{H}_r^* [x, y_0](t) \mathbf{H}_r^* [x, y_0](t)^T dt \cdot \mathbf{W} - \int_t 2z(t) \mathbf{H}_r^* [x, y_0](t)^T dt \cdot \mathbf{W} + \int_t z(t)^2 dt\} \quad (9)$$

优化得到与慢速实验迟滞曲线拟合最佳的间隙算子权值。

当工作台运动定位行程较小时, 其迟滞非线性特性不显著, 工作台动态迟滞模型可简化为方程(1)。因此, 可通过线性系统频域响应辨识法获得工作台的阻尼比  $\xi$  和自然频率  $\omega_n$ 。

## 4 实验研究

### 4.1 实验条件

采用图 6 所示 CHI900B 型扫描电化学显微镜的三维定位压电工作台(德国 Piezosystemjena 公司生产的 TRITOR100 型三轴向压电工作台)作为实验对象来验证动态迟滞模型的有效性。

该压电工作台在 3 个轴向的额定参数基本相同: 输入电压为  $-10 \sim 150$  V; 最大定位行程为  $100 \times (1 \pm 0.1) \mu\text{m}$ ; 空载谐振频率为 500 Hz; 开环定位分辨率可达到 0.13 nm。采用高性能 LVDT 测微仪检测工作台的微位移并与 PC 机接口。

为避免环境对测量精度造成的影响, 实验室温度控制在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 湿度控制在  $(40 \pm 5)\%$ , 并将工作台放置于密封的屏蔽罩内, 再将屏蔽罩放置于弹簧和泡沫组成的减震装置上。

以工作台 X 轴为例进行定位实验。工作台 X 轴向动态迟滞模型的建立分为两步进行, 首先辨识工作台 X 轴向 PI 迟滞模型的参数, 进而对工作台的动态特性进行频率响应法辨识。

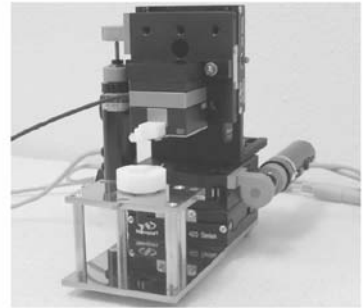


图 6 CHI900B 型扫描电化学显微镜实物图

Fig. 6 Photograph of CHI900B SECM

### 4.2 工作台 PI 迟滞模型参数辨识

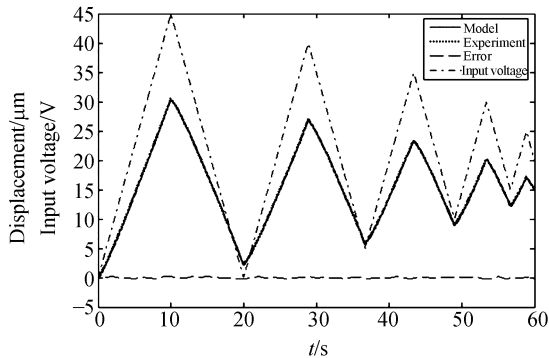
由于 CHI900B 采用宏微两级定位, 压电工作台主要负责  $10 \mu\text{m}$  以下的运动定位; 而且传统的 PI 模型对工作台迟滞特性的非对称性<sup>[19]</sup> 拟合效果欠佳(定位行程越大, 效果越差)。因此, 本文工

作台的定位实验限制在  $30\ \mu\text{m}$  的行程内进行。

如图 7(a)所示,对工作台输入  $0\sim 45\ \text{V}$  慢速 ( $0.05\ \text{Hz}$ ,  $4.5\ \text{V/s}$ ) 振幅衰减的三角波电压,记录工作台的定位数据,形成工作台慢速定位实验曲线  $z(t)$ 。

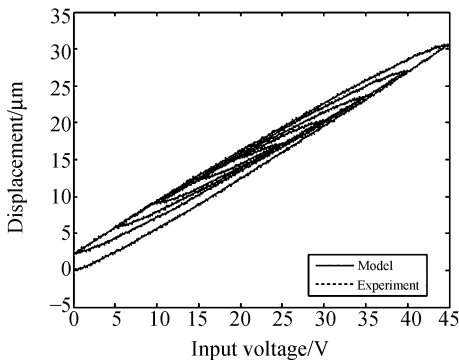
选取 15 个间隙算子线性叠加构成 PI 迟滞算子对工作台定位实验曲线进行拟合,利用公式(9)优化得到最佳间隙算子权值。表 1 列出了工作台 PI 模型参数辨识结果。

另外,图 7(a)还同时标出了 PI 模型响应曲线,模型响应值与实验值之间的平均误差为  $0.11\ \mu\text{m}$ ,最大误差为  $0.15\ \mu\text{m}$ ;图 7(b)直观表现了 PI 模型迟滞回线对实验迟滞回线的拟合效果。



(a) 慢速三角波电压输入作用下,工作台定位实验曲线与 PI 模型响应曲线比较

(a) Comparison between experiment and identified PI model when inputting low rate triangle voltage



(b) 工作台慢速运动定位实验迟滞回线与 PI 模型迟滞回线比较

(b) Comparison between experimental hysteresis curve and identified PI model hysteresis curve when inputting low rate triangle voltage

图 7 工作台定位实验曲线与 PI 模型响应曲线比较  
Fig. 7 Comparison between experiments and identified PI models

表 1 工作台 PI 迟滞模型参数辨识值

Tab. 1 Parameters of identified PI hysteresis model

$i$	$r^i$	$w_h^i$	$i$	$r^i$	$w_h^i$
0	0	0.310 1	8	10.67	0.021 3
1	0.25	0.153 9	9	16.00	0.004 2
2	0.50	0.122 3	10	21.33	0.033 6
3	1.00	0.082 7	11	26.67	0.011 3
4	2.00	0.065 5	12	32.00	0.031 3
5	3.00	0.041 4	13	37.33	0.020 7
6	4.00	0.043 8	14	42.67	0.012 3
7	5.33	0.020 2			

#### 4.3 工作台动态特性的频域法辨识

采用频域响应法对工作台的动态特性进行辨识时,为避免压电工作台蠕变特性和迟滞特性对其线性动态方程辨识精度的影响,将输入正弦波电压的频率限制在  $1\sim 800\ \text{Hz}$  之间;同时将工作台的定位行程限制在  $2\ \mu\text{m}$  内,并在  $0\sim 30\ \mu\text{m}$  定位行程内线性度较好的  $16\sim 18\ \mu\text{m}$  处进行。以二阶系统

$$\frac{X(s)}{V(s)} = G(s) = b \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

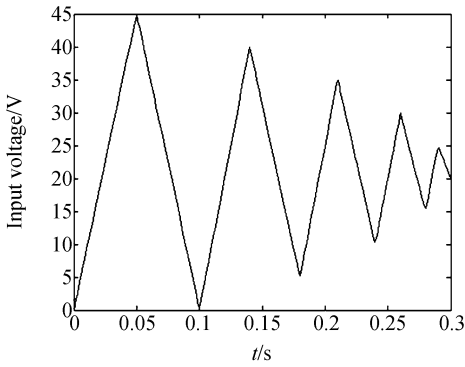
的形式,用 MATLAB 对实验所得工作台的频率响应数据进行曲线拟合。拟合得到比例系数  $b = 0.63$ , 工作台阻尼比  $\xi = 0.43$ , 自然频率  $\omega_n = 613.4\ \text{Hz}$ 。

根据辨识数据计算工作台的谐振频率  $\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} = 486.94\ \text{Hz}$ , 该数据与工作台空载谐振频率额定值 ( $500\ \text{Hz}$ ) 非常接近, 辨识数据的准确性得到验证。

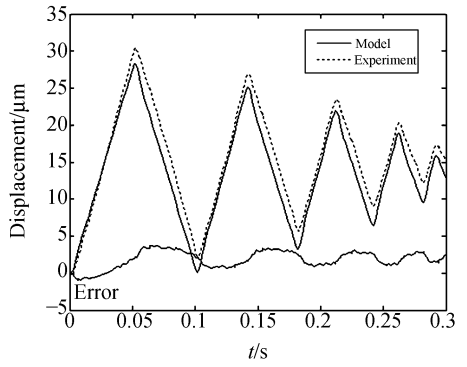
#### 4.4 工作台动态迟滞模型的实验验证

结合迟滞模型和线性动态模型两部分参数, 构成由公式(4)表征的压电工作台动态迟滞模型。

为验证动态迟滞模型较线性动态模型和迟滞模型在压电工作台快速运动定位时的优越性, 对工作台输入频率为  $10\ \text{Hz}$ , 速率为  $\pm 900\ \text{V/s}$  的三角波电压, 比较各类模型响应曲线与实验曲线之间的差异, 如图 8 所示。同时, 表 2 列出了各类模型响应值与实验值之间的最大误差和平均误差。可以看出, 动态迟滞模型在  $30\ \mu\text{m}$  以内的定位行程上, 平均误差为  $0.16\ \mu\text{m}$ , 最大误差为  $0.38\ \mu\text{m}$ , 较以往模型精度有较大提高; PI 迟滞模型精度较差, 线性动态模型精度最差。



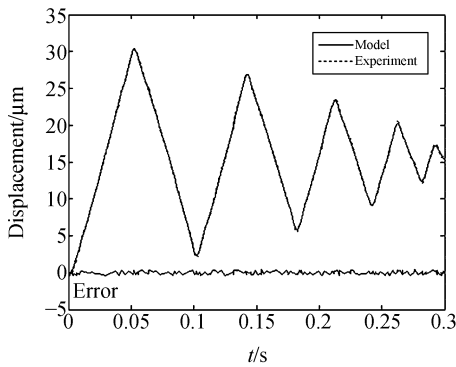
(a) 快速三角波电压输入信号  
(a) High rate input voltage signal



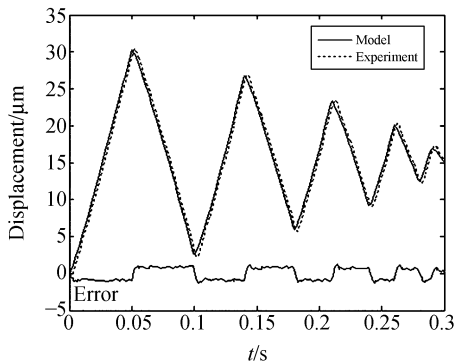
(d) 线性动态模型响应曲线与实验曲线比较  
(d) Response comparison between dynamic linear model and experiment

图 8 模型响应与实验曲线比较

Fig. 8 Comparison between experiments and identified models



(b) 动态迟滞模型响应曲线与实验曲线比较  
(b) Response comparison between dynamic hysteresis model and experiment



(c) PI 迟滞模型响应曲线与实验曲线比较  
(c) Response comparison between PI hysteresis model and experiment

利用图 8(b) 中的模型响应数据与实验数据构成图 9 所示的动态迟滞模型迟滞回线与实验迟滞回线。由于考虑了动态特性在内, 图 9 所示压电工作台动态迟滞回线与图 7(b) 所示迟滞回线

有所不同, 更接近压电工作台快速运动定位的实验迟滞回线。

表 2 各类模型最大误差和平均误差

Tab. 2 Maximum and mean modeling errors for different models under high rate input voltage

模型类型	最大误差( $\mu\text{m}$ )	平均误差( $\mu\text{m}$ )
动态迟滞模型	0.38	0.16
PI 迟滞模型	2.32	1.27
线性动态模型	4.23	3.62

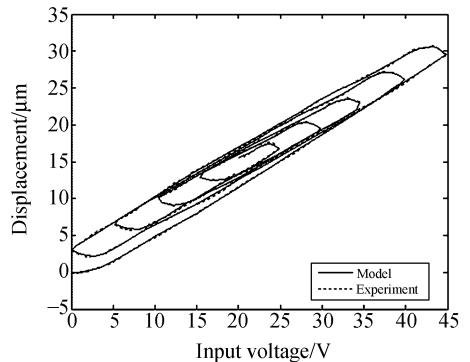


图 9 工作台快速运动定位实验迟滞回线与动态迟滞模型迟滞回线比较

Fig. 9 Comparison of hysteresis curves between experiment and dynamic hysteresis model when inputting high rate triangle voltage

## 5 结 论

在介绍压电工作台典型特性及其相应模型

的基础上,提出了压电工作台动态迟滞模型,该模型能够同时体现压电工作台的动态特性和迟滞特性。实验表明,在  $30\ \mu\text{m}$  的定位范围内,压电工作台快速运动定位时(输入电压速率为  $\pm 900\ \text{V/s}$ ),动态迟滞模型响应值与实验值之间平均误差为  $0.16\ \mu\text{m}$ ,最大误差为  $0.38\ \mu\text{m}$ ,较以

往模型精度有很大提高。

另外,采用 PI 迟滞模型构成的动态迟滞模型结构简单、参数辨识方法简单易行,且易于求逆运算,为下一步高性能运动定位工作台控制系统的设计提供了模型基础。

## 参考文献:

- [1] 刘俊标. 微纳加工中的精密工作台技术[M]. 北京:北京工业大学出版社,2004.  
LIU J B. *Technology of Precision Stage in Micro-nano Fabrication* [M]. Beijing: Publishing House of Beijing University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [2] 李庆祥,王东生,李玉和. 现代精密仪器设计[M]. 北京:清华大学出版社,2004.  
LI Q X, WANG D SH, LI Y H. *Design of Modern Precision Instruments* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [3] 马立,荣伟彬,孙立宁. 三维纳米级微动工作台的设计与分析[J]. 光学精密工程, 2006,14(6):1017-1024.  
MA L, RONG W B, SUN L N. Design and analysis of a novel 3-DOF nano positioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6):1017-1024. (in Chinese)
- [4] DEVASIA S, ELEFTHERIOU E, MOHEIMANI S O R. A survey of control issues in nanopositioning [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007,15(5):802-823.
- [5] BASHASH S, JALILI N. Robust multiple frequency trajectory tracking control of piezoelectrically driven micro/nanopositioning systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007,15(5):867-878.
- [6] LEANG K K, DEVASIA S. Feedback-linearized inverse feedforward for creep, hysteresis, and vibration compensation in AFM piezoactuators [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007,15(5):927-935.
- [7] 孙立宁,孙绍云,曲东升,等. 基于 PZT 的微驱动定位系统及控制方法的研究[J]. 光学精密工程, 2004,12(1):55-59.  
SUN L N, SUN SH Y, QU D SH, *et al.*. Micro-drive positioning system based on PZT and its control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1): 55-59. (in Chinese)
- [8] 田孝军,王越超,席宁,等. 机器人化纳米操作系统驱动器驱动与探针定位研究[J]. 仪器仪表学报, 2007,28(7):1223-1228.  
TIAN X J, WANG CH Y, Xi N, *et al.*. Actuator actuating and probe positioning of robotic nanomanipulation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007,28(7):1223-1228. (in Chinese)
- [9] 李春涛,谭永红. 迟滞非线性系统的建模与控制 [J]. 控制理论与应用, 2005,22(2):281-287.  
LI CH T, TAN Y H. Modeling and control for nonlinear systems with hysteresis [J]. *Control Theory and Application*, 2005, 22(2): 281-287. (in Chinese)
- [10] 魏强,张玉林. 压电陶瓷微位移工作台的建模方法 [J]. 光学精密工程, 2007,15(10):1596-1601.  
WEI Q, ZHANG Y L. Modeling method of micro-displacement stage driven by piezoelectric ceramic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1596-1601. (in Chinese)
- [11] 魏强,张玉林,于欣蕾,等. 扫描隧道显微镜微位移工作台的神经网络 PID 控制方法研究 [J]. 光学精密工程, 2006,14(3):422-427.  
WEI Q, ZHANG Y L, YU X L, *et al.*. Study on neural network PID control for micro-displacement stage of Scanning Tunneling Microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 422-427. (in Chinese)
- [12] LIN F J, SHIEH H J, HUANG P K. Adaptive wavelet neural network control with hysteresis estimation for piezo-positioning mechanism [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2006,17(2):432-444.
- [13] ADRIAENS H, de KONING W, BANNING R. Modeling piezoelectric actuators [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, 5(4): 331-341.
- [14] ANG W T, GARMÓN F A, KHOSLA P K, *et al.*. Modeling rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators [C]. *Proceeding of IEEE International conference on intelligent robots and sys-*

tems, 2003(2):1975-1980.

- [15] SHIEH H J, HSU C H. An integrator-backstepping-based dynamic surface control method for a two-axis piezoelectric micropositioning stage[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007(5):916-926.
- [16] KREJCI P, KUHNEN K. Inverse control of system with hysteresis and creep[C]. *IEE Proc. Control Theory Appl.*, 2001,148(3):185-192.
- [17] GE P, MUSA J. Modeling hysteresis in piezoelectric actuators[J]. *Precision Engineering*, 1995

(1):211-221.

- [18] KUHNEN K, JANOCHA H. Inverse feedforward controller for complex hysteretic nonlinearities in smart-material systems[J]. *Control Intell. Syst.*, 2001,29:74-83.
- [19] JANOCHA H, PESOTSKI D, KUHNEN K. FPG-based compensator of hysteretic actuator nonlinearities for highly dynamic applications [J]. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 2008,13(1):112-116.

#### 作者简介:



张 栋(1979—),男,山东济南人,博士研究生,主要从事微机电系统加工控制技术、微纳系统非线性建模与控制技术的研究。E-mail: zhangdonggraduate@163.com



魏 强(1973—),男,工学博士,副教授,主要从事微机电系统、精密工件台驱动和控制技术的研究。E-mail: taiweiqiang@126.com

#### 导师简介:



张承进(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事非线性系统控制、自适应辨识与控制、时变系统控制、鲁棒控制、智能控制、电机控制等方面的研究。E-mail: cjzhang@sdu.edu.cn

#### ●下期预告

## 太阳敏感器测量坐标系与立方镜转换矩阵的标定

樊巧云,张广军,魏新国,江 洁

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100083)

提出一种太阳敏感器测量坐标系与立方镜坐标系转换矩阵标定的方法。该方法首先利用太阳模拟器和两轴转台,对太阳敏感器测量坐标系与转台坐标系进行标定,然后利用光阑接受屏和 CCD 图像瞄准定位系统,对立方镜坐标系和转台坐标系进行标定,最后以转台坐标系作为中间坐标系计算出所述两坐标系的转换矩阵,从而将太阳敏感器测量的太阳视线方向间接转换到立方镜坐标系。实验结果表明,两坐标系转换矩阵的标定精度优于  $4''(1\sigma)$ ,满足太阳敏感器测量精度要求。该方法不需要精准的加工和安装工艺,同时对两坐标系转换矩阵的标定也不需要太阳敏感器测量坐标系与转台坐标系保持一致,易于实现,具有实用价值。