

压电超精密定位台的动态迟滞建模研究*

杨晓京,李庭树,刘浩

(昆明理工大学机电工程学院 昆明 650500)

摘要:为了提高压电超精密定位台的建模精度,采用 Backlash-Like 迟滞非线性模型来描述压电超精密定位台的迟滞特性,采用基于遗传因子的递推最小二乘法来辨识 Backlash-Like 模型的参数,并结合压电超精密定位台的动态特性,建立了压电超精密定位台的二阶动态迟滞模型。通过实验得到,对比 Backlash-Like 模型,动态迟滞模型在频率为 30 和 40 Hz 时,最大输出位移误差由 1.21 和 1.39 μm 下降到 0.32 和 0.44 μm ,且最大相对误差分别仅为 3.5% 和 4.4%,平均位移误差由 0.53 和 0.76 μm 下降到 0.17 和 0.21 μm ,平均相对误差由 1.93% 和 3.38% 下降到 1.11% 和 1.37%。实验结果验证了提出的动态迟滞模型,既能减小了因压电超精密定位台的动态特性而引起的系统误差,又能很好地模拟其迟滞特性与动态特性,并且避免了不同频率下的模型参数反复辨识问题,提高了压电超精密定位台在高频、快速、大行程定位中的精度。该方法简单且适应性强,易于工程实现。

关键词: 压电超精密定位台; Backlash-Like 迟滞模型; 遗传因子的递推最小二乘法; 动态模型

中图分类号: TP271.4 TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Dynamic hysteresis modeling of piezoelectric ultra precision positioning stage

Yang Xiaojing, Li Tingshu, Liu Hao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to improve the modeling accuracy of piezoelectric ultra precision positioning stage, the hysteresis model of Backlash-Like is used to describe the hysteresis characteristics of piezoelectric ultra precision positioning stage. The recursive least squares method based on genetic algorithm is utilized to identify the parameters of Backlash-Like model. Combined with the dynamic characteristics of the piezoelectric ultra precision positioning stage, the second-order dynamic hysteresis model is established for the piezoelectric ultra precision positioning stage. The experimental results show that, compared with the Backlash-Like model under frequencies of 30 and 40 Hz, the maximum output displacement error of the dynamic hysteresis model decreases from 1.21 and 1.39 μm to 0.32 and 0.44 μm , and the maximum relative error are 3.5% and 4.4%. The average displacement error decreases from 0.53 and 0.76 μm to 0.17 and 0.21 μm , the average relative error decreases from 1.93% and 3.38% to 1.11% and 1.37%. The experimental results verify the dynamic hysteresis model and prove that the proposed model can not only reduce the system error caused by the dynamic characteristics of the piezoelectric ultra precision positioning stage, but also simulate the hysteresis characteristic and dynamic characteristic, and avoid the repeated model parameters identification under different frequencies. The accuracy of piezoelectric ultra precision positioning stage is improved in high frequency, fast, and large stroke location. This method is simple and has strong adaptability, easy to implement in engineering.

Keywords: piezoelectric ultra precision positioning stage; Backlash-Like hysteresis model; recursive least square (RLS) based on genetic algorithm; Dynamic model

0 引言

随着纳米级定位技术的迅猛发展,微纳米驱动材料的科学研究得到了越来越广泛的关注。其中压电陶瓷是一种能将机械能和电能互相转换的新型功能型陶瓷材料,具有其他驱动器无可比拟的优点,它具有体积小、反应快、分辨率高和驱动力大等^[1]。但压电陶瓷材料存在的一些缺点,例如迟滞非线性、蠕动性等,给精密定位控制带来一定的影响,使得误差增大^[2]。其中,压电超精密定位台^[3]是近些年发展起来的一种新型微位移机构,采用压电陶瓷叠堆驱动器和柔性铰链支撑的组合一体式结构,对比单纯的压电陶瓷材料具有更高的精度、更大的输出位移,所以现在研究压电陶瓷基本上都是以压电超精密定位台为基础进行研究的。由于压电陶瓷的迟滞非线性对于压电陶瓷定位精度影响最大,为了提高压电超精密定位台的定位精度,国内外学者提出了各种描述压电陶瓷迟滞非线性的模型:Preisach模型^[4-5]、PI模型^[6-8]、Duhem模型^[9-11]、Bouc-Wen模型^[12-14]、Backlash-Like^[15-17]模型等。但是,单纯的采用这些模型进行建模,并没有考虑到压电超精密定位台自身的动态特性,并且在相同输入电压幅值和相同输出位移却不同频率时,对于大部分迟滞非线性模型的参数需要反复辨识,辨识过程繁琐,且误差较大。所以,有必要结合模型的迟滞性非线性和压电超精密定位台自身的动态性来进行建模。

本文提出采用 Backlash-Like 模型^[15]对压电超精密定位台的迟滞非线性部分进行建模,该模型是 Su C. Y. 等人^[15]在 Duhem 模型的基础上提出的一种更为简洁的形式,用来描述系统的迟滞非线性。Ekanayake D. B. 等人^[16]将该模型命名为 SSSL 模型,并将此模型扩展为 n 阶 Play-Like 模型。模型与其他模型相比,具有明确的数学表达式,而且模型输入输出为速率关系,是一种动态模型,符合实际智能材料中迟滞非线性的动态特性,通过辨识出模型的参数 c, a, B_1 , 就能够描述不同压电陶瓷的迟滞特性。本文采用基于遗传因子的递推最小二乘法来辨识 Backlash-Like 模型的参数,由于压电超精密定位台自身具有动态特性,本文并将压电超精密定位台的动态特性与其迟滞非线性结合起来建模,得到了更加精确的动态迟滞模型,该模型能够同时体现出压电超精密定位台的迟滞非线性和动态特性。最后通过实验,对比 Backlash-Like 模型的建模结果,动态迟滞模型能够使误差显著减小。

1 迟滞非线性模型的建立与参数辨识

1.1 Backlash-Like 迟滞非线性模型的建立

由于 Backlash-like 模型简洁且具有明确的表达式,只需准确辨识出参数 a, c, B_1 , 就能够描述不同系统的迟滞非线性,因此本文采用该模型来描述压电超精密定位台的迟滞非线性。Su C. Y. 等人将该模型^[15]写成如下:

$$\frac{du}{dt} = a \left| \frac{dv}{dt} \right| (cv - u) + \frac{dv}{dt} B_1 \quad (1)$$

式中: $v(t)$ 为输入电压, $u(t)$ 指的是输出位移, a, c 和 B_1 为待辨识参数,且满足, $c > B_1$ 。由输入 $v(t)$ 的分段单调性,式(1)的解为^[15]:

$$\begin{cases} u(t) = cv(t) + d(v) \\ d(v) = (u_0 - cv_0) e^{-a(v-v_0)\text{sgn}\dot{v}} + \\ e^{-a v \text{sgn}\dot{v}} \int_{v_0}^v (B_1 - c) e^{-ax(\text{sgn}\dot{v})} dx \end{cases} \quad (2)$$

当 \dot{v} 为常数时, $u(v_0) = u_0$ 。由式(2)可以看出解是由斜率为 c 的直线和 $d(v)$ 组成, v_0 和 w_0 为初始值。 $d(v)$ 为指数收敛的,收敛速度为 a 。

当 $\dot{v} > 0$ ($\dot{v} < 0$) 和 $v \rightarrow +\infty$ ($-\infty$) 时,则有:

$$\lim_{v \rightarrow +\infty} d(v) = \lim_{v \rightarrow +\infty} [w(v; v_0; w_0) - f(v)] = -\frac{c - B_1}{a} \quad (3)$$

$$\lim_{v \rightarrow -\infty} d(v) = \lim_{v \rightarrow -\infty} [w(v; v_0; w_0) - f(v)] = \frac{c - B_1}{a} \quad (4)$$

式中:非线性部分 $d(v)$ 是指数收敛的,参数 a 决定了 $u(t)$ 在 $-(c - B_1)/a$ 和 $(c - B_1)/a$ 之间切换的切换速度。参数 a 越大, $u(t)$ 切换速度越快。

1.2 Backlash-Like 模型的参数辨识

由于模型的输入输出存在导数形式,将式(1)中的导数进行离散化,可以令:

$$U(k) = \frac{du}{dt} = u(k) - u(k-1) \quad (5)$$

$$V(k) = \frac{dv}{dt} = v(k) - v(k-1) \quad (6)$$

式中: $v(k)$ 为 k 时刻的输入电压, $u(k)$ 为 k 时刻的输出位移。

可以将式(1)变成离散化形式:

$$U(k) = a |V(k)| (cv(k) - u(k)) + B_1 V(k) \quad (7)$$

式(7)可进一步写成:

$$U(k) = \varphi^T(k) \times \theta \quad (8)$$

式中: φ 为数据向量, θ 为待估计的参数向量, $\varphi^T(k) = [|V(k)|v(k), -|V(k)|u(k), V(k)]$, $\theta = [ac, a, B_1]$ 。

那么根据最小二乘法的思路, 可以将参数 θ 辨识出来, 本文采用基于遗忘因子的递推最小二乘法, 相比最小二乘法的离线辨识, 能够实时在线辨识, 提高系统参数的辨识精度, 其基本思想为: 新估计值 $\hat{\theta}(k) =$ 上一时刻估计值 $\hat{\theta}(k-1) +$ 修正值。

考虑到系统输入输出数据量大, 加入了遗忘因子 λ ($0 < \lambda \leq 1$), 是误差度量函数的加权因子, 目的是为了克服数据饱和所产生的辨识误差。取性能指标:

$$J = \sum_{j=1}^k e^2(j) = \sum_{j=1}^k \lambda^{k-j} [U(j) - \varphi^T(j) \times \theta]^2 \quad (9)$$

则有:

$$e(k) = U(k) - \varphi^T(k) \times \theta \quad (10)$$

参数估计的目的是目标函数 J 取得最小值时 θ 的估计值, 根据基于遗传因子的递推最小二乘估计值递推式(11), 可辨识出参数:

$$\begin{cases} \hat{\theta} = \hat{\theta}(k-1) + K(k) [U(k) - \varphi^T(k) \times \hat{\theta}(k-1)] \\ P(k) = \frac{1}{\lambda} [P(k-1) - K(k) \varphi^T(k) P(k-1)] \\ K(k) = \frac{P(k-1) \varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k) P(k-1) \varphi(k)} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P(0) = \alpha I$, α 为正实数 ($10^4 \sim 10^6$), $\theta(0)$ 可取很小的正实数向量或者零向量, 一般的线性系统, $0.95 < \lambda \leq 1$ 。

通过 MATLAB 编写出基于遗传因子递推最小二乘法的程序, 即可辨识出系统参数, 并将辨识出来的模型参数 a, c, B_1 代入式(2)中得到 Backlash-like 模型的表达式, 完成模型的建立。

2 动态迟滞模型的建立与参数辨识

2.1 基于 Backlash-Like 迟滞模型的动态迟滞模型

由于单纯的采用 Backlash-Like 模型进行建模, 会因为压电超精密定位台自身的动态特性等问题, 会在输入电压和输出位移较大时, 产生较大的位移误差, 并且在输入电压和输出位移在相同电压幅值和相同输出位移却不同频率的情况下, 对于大部分迟滞非线性模型的参数需要反复辨识, 包括本文运用的迟滞非线性模型在内, 辨识过程繁琐, 而且误差大。因此建立了一个基于 Backlash-Like 迟滞模型的动态迟滞模型。可以将动态迟滞模型看成两部分, 即由非线性环节和动态线性环节串接构成, 其中非线性环节由迟滞非线性模型体现, 而动态线性环节由一个弹簧-阻尼二阶系统体现。

如果可以把非线性环节看成系统的扰动, 则压电超精密定位台的状态方程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{X} = Ax + bu + d \\ y = cx + n \\ u = H^* [v(t)] \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T^2} & \frac{2\xi}{T} \end{bmatrix}, b = [0 \quad \frac{K}{T^2}], c = [0 \quad 1], \text{ 可以将}$$

$H^* [v(t)]$ 看成的迟滞非线性模型 Backlash-Like, 即 $H^* [v(t)] = u(t)$, 其中, $u(t)$ 既为式(2)的输出, 又为状态方程(12)的线性部分输入, y 为压电陶瓷输出, x_1 为输出位移, x_2 为速度, T 为时间常数, ξ 为系统阻尼因子, K 为增益, n 为输出调整因子。其分量可为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{T^2}x_1 - \frac{2\xi}{T}x_2 + \frac{K}{T^2}u + d \\ y = x_1 + n \end{cases} \quad (13)$$

式(13)进一步可以写成:

$$\begin{cases} \ddot{x} + C\dot{x} + Bx = KBu + d \\ y = x + n \end{cases} \quad (14)$$

式中: $C = 2\xi/T, B = 1/T^2$, 为二阶系统输出位移, 该系统 d 可取为 0。式(14)即为所建立的动态迟滞模型, 该模型能够同时体现系统的迟滞特性和动态特性, 提高了模型的定位精度。

2.2 动态迟滞模型参数的辨识

动态迟滞模型的参数辨识是通过频率响应辨识法中的 levy 复数曲线拟合进行的。其基本原理是把待辨识的标准二阶动态方程写成传递函数的形式, 通过 MATLAB 以二阶系统传递函数的形式, 对实验数据进行分析处理得到模型的参数。

将式(14)中的二阶系统写出传递函数的形式:

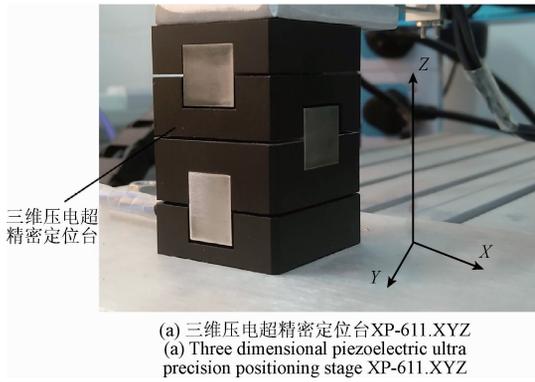
$$\frac{X(s)}{V(s)} = G(s) = \frac{KB}{s^2 + Cs + B} \quad (15)$$

只需辨识系统的参数 B, C, K, n 。即可完成动态迟滞模型的建立。

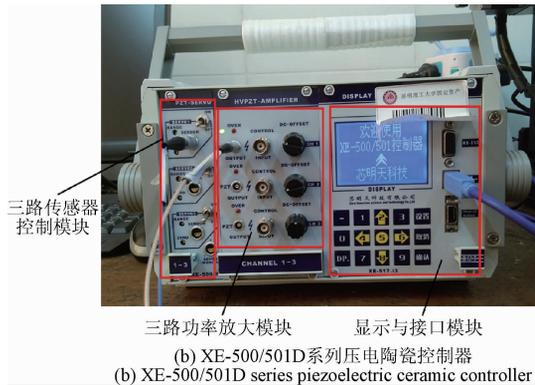
3 实验研究

3.1 实验设备

采用如图 1 所示的实验设备, 该设备采用哈尔滨芯明天科技有限公司生产的三维压电超精密定位台 XP-611. XYZ (见图 1(a)) 和 XE-500/501D 系列压电陶瓷控制器 (见图 1(b))。开发出适用于该 XE-500/501D 系列压电陶瓷控制器的 LABVIEW 控制程序和采集程序, 用来完成数据采集和 Backlash-Like 模型、动态迟滞模型的参数辨识。



(a) 三维压电超精密定位台 XP-611.XYZ
(a) Three dimensional piezoelectric ultra precision positioning stage XP-611.XYZ



(b) XE-500/501D series piezoelectric ceramic controller

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental devices

以 X 轴方向为例进行实验。压电超精密定位台 X 轴的基本参数如下: 输入电压为 0 ~ 150 V; 最大输出位移为 120 μm ($\pm 20\%$); 开环定位分辨率为 0.2 nm; 重复定位精度为 30 nm; 空载响应频率为 350 Hz。XE-500/501D 系列压电陶瓷控制器由放大器模块、传感器控制模块和显示与接口模块等组成。实验过程中, 通过压电陶瓷控制器驱动微位移平台, 并与计算机连接, 采用基于 LABVIEW 的数据采集程序, 可得到采集的输入输出. xls 表格格式数据, 数据可直接导入 MATLAB 中。

3.2 Backlash-Like 模型参数的实验研究

在 MATLAB 中开发出基于遗传因子的递推最小二乘法参数辨识程序, 其中取 $\lambda = 0.98$, $\alpha = 10^6$, $\theta(0)$ 取零向量。让 XP611.XYZ 型压电微位移平台分别输入一组频率为 2 Hz, 电压幅值为 60 V 的正弦电压即 $v = 30\sin(4\pi t - \pi/2) + 30$, 再通过 LABVIEW 采集得 2 Hz 下压电超精密定位台的输出位移, 并将采集到的输入电压和输出位移导入到已经开发好的 MATLAB 程序。辨识结果如图 2 所示。得到频率为 2 Hz 时的模型参数为:

$$\theta = [0.029\ 2, 0.035\ 1, 0.585\ 4] \quad (16)$$

则有 $a = 0.035\ 1$, $c = 0.029\ 2/0.035\ 1$, $B_1 = 0.585\ 4$ 。再将模型的参数带入迟滞模型中, 即可完成模型的建立。

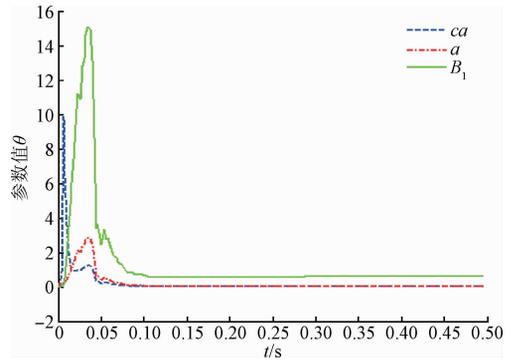


图 2 Backlash-Like 模型参数辨识过程

Fig. 2 Parameter identification process for Backlash-Like model

3.3 动态迟滞模型参数的实验研究

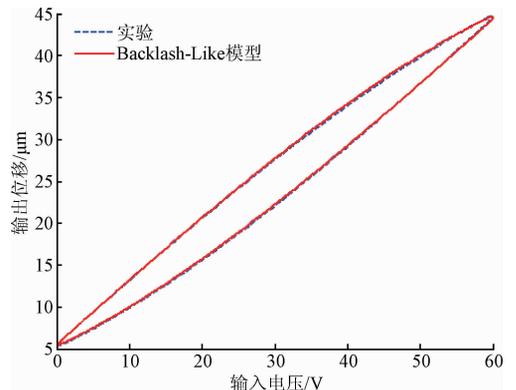
打开 MATLAB 工具箱中的 Invfreqs, 将测得的超精密定位台频率响应数据通过 MATLAB 整合到文件中, 将整合好的数据导入 Invfreqs 函数中, 然后对频率响应数据进行曲线拟合。得到系统参数 $C = 613$, $B = 9.35 \times 10^6$, $K = 0.975$ 。

再将模型的参数代入式 (14) 中, 只需根据系统误差调整参数 n , 即可完成动态迟滞模型的建立。

3.4 Backlash-Like 模型与实验数据对比

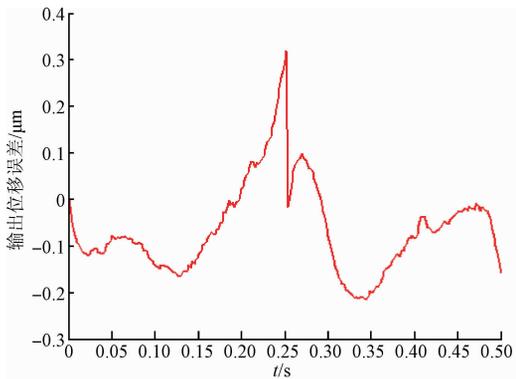
将辨识得到的参数 θ 代入式 (2) 中, 得到 Backlash-like 模型输入输出与实验迟滞曲线输入输出对比, 如图 3 所示。

从图 3(a) 中可以看出, 实验迟滞曲线与模型迟滞曲线基本上重合。从图 3(b) 中的误差曲线图中可以看出, 在频率为 2 Hz 时, 最大误差出现在 $t = 0.25\ \text{s}$ 左右的时刻, 即输入电压最大值 60 V, 输出位移最大值的时刻, 这是由于压电陶瓷微动平台自身的动态特性和输出位移大行程等因素导致的位移误差。输出最大位移误差仅为 0.32 μm , 表明了 Backlash-Like 模型能够精确地描述压电超精密定位台的迟滞非线性。

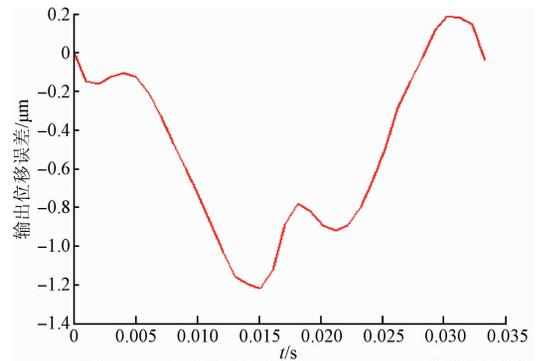


(a) 频率为 2 Hz 时, 实验迟滞曲线与 Backlash-Like 模型迟滞曲线

(a) The experimental hysteresis curve and hysteresis curve of Backlash-Like model when the frequency is 2 Hz



(b) 频率2 Hz时, 实验迟滞曲线与Backlash-Like模型误差曲线
(b) The error curve of the experimental hysteresis curve and Backlash-Like model when the frequency is 2 Hz



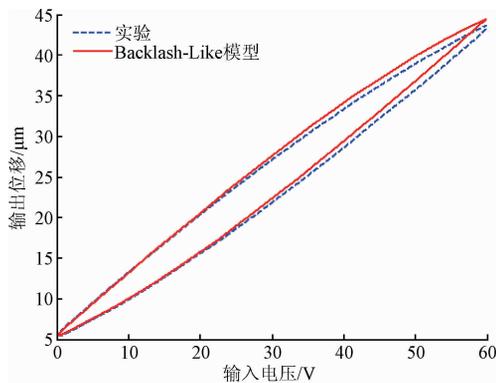
(b) 频率30 Hz时, 实验迟滞曲线与Backlash-Like模型误差曲线
(b) The error curve of the experimental hysteresis curve and Backlash-Like model when the frequency is 30 Hz

图3 Backlash-Like模型预测的压电陶瓷微位移平台结果与实验结果的对比

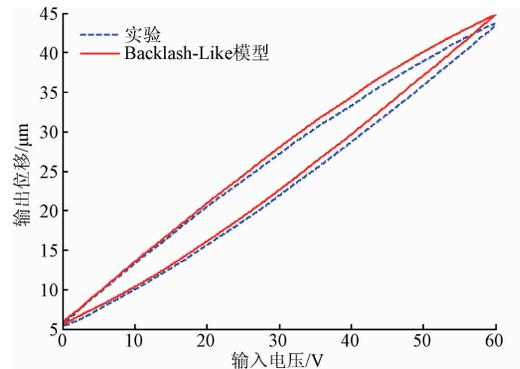
Fig. 3 Comparison between the results of the Backlash-Like model and the experimental results of piezoelectric ceramic micro displacement stage

3.5 动态迟滞模型的实验验证

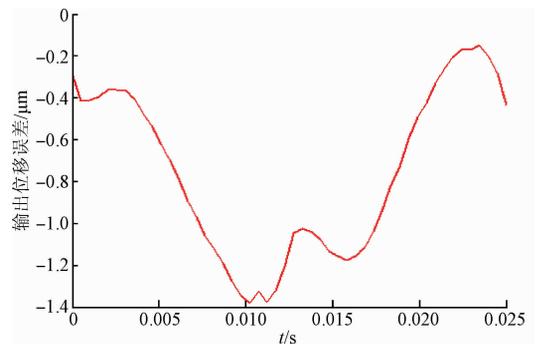
为了更好地验证动态迟滞模型建模的准确性。将上述在输入频率为2 Hz时, 辨识出来的 Backlash-Like 模型数据 a 、 c 、 B_1 导入式(2)中, 通过控制器将压电超精密定位台的正弦输入电压频率由2 Hz提升到30 Hz, 幅值保持60 V不变, 再通过 LABVIEW 采集得到30 Hz下压电超精密定位台的输出位移, 并将电压与位移数据导入到 MATLAB 工作区中, 得到一组输入输出数据, 同样的, 再将正弦输入电压频率由30 Hz提升到40 Hz, 其他条件不变, 又可得到一组输入输出数据。并将这两组实验数据通过 MATLAB 导入到 Backlash-Like 迟滞模型中, 电压-位移曲线和时间-位移误差曲线, 如图4所示。



(a) 频率为30 Hz时, 实验迟滞曲线与Backlash-Like模型迟滞曲线
(a) The experimental hysteresis curve and the hysteresis curve of Backlash-Like model when the frequency is 30 Hz



(c) 频率为40 Hz时, 实验迟滞曲线与Backlash-Like模型迟滞曲线
(c) The experimental hysteresis curve and the hysteresis curve of Backlash-Like model when the frequency is 40 Hz



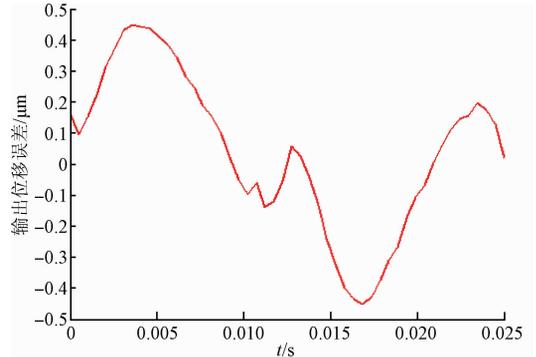
(d) 频率40 Hz时, 实验迟滞曲线与Backlash-Like模型误差曲线
(d) The error curve of the experimental hysteresis curve and Backlash-Like model when the frequency is 40 Hz

图4 Backlash-Like模型预测的压电陶瓷微位移平台结果与实验结果的对比

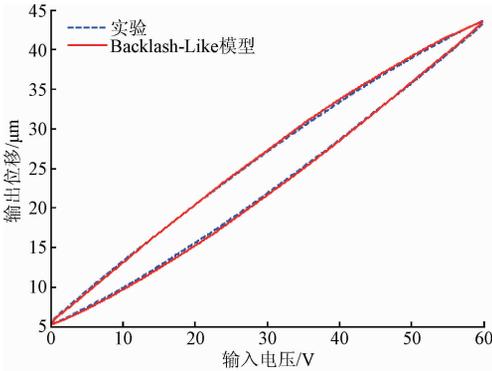
Fig. 4 Comparison between the results of the Backlash-Like model and the experimental results of piezoelectric ceramic micro displacement stage

由图4可知, 在只改变输入正弦电压信号的频率但不改变电压幅值的情况下, 当频率为30和40 Hz时, Backlash-

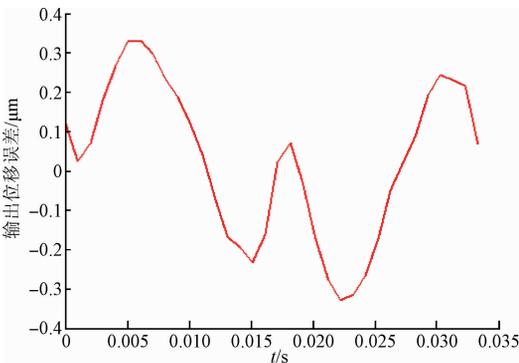
Like 模型输入输出环对比实验迟滞曲线输入输出环有着较明显的上偏,最大误差分别为 1.21 和 1.39 μm 。这是由于单纯的 Backlash-Like 模型并没有考虑到压电超精密定位台自身的动态特性,而且频率越大,压电超精密定位台的动态性越强,因此在压电超精密定位台较快速且大行程定位时,产生了较大的误差。为了减小该位移误差,将已经辨识出来的传递函数参数代入式(14)中,再将式(2)与(14)相结合,得到动态迟滞模型。将上述在 30 和 40 Hz 下采集到的两组实验数据通过 MATLAB 导入到动态迟滞模型中,得到如图 5 所示的电压-位移曲线、时间-位移误差曲线。



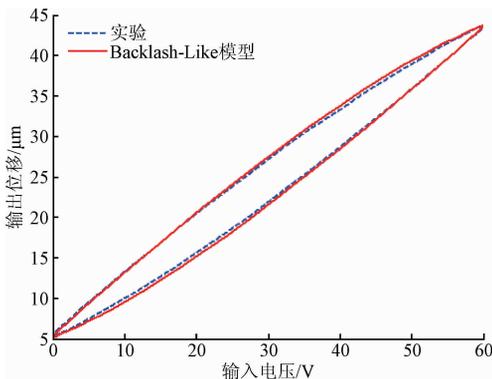
(d) 频率 40 Hz 时, 实验迟滞曲线与 Backlash-Like 模型误差曲线
(d) The error curve of the experimental hysteresis curve and Backlash-Like model when the frequency is 40 Hz



(a) 频率为 30 Hz 时, 实验迟滞曲线与 Backlash-Like 模型迟滞曲线
(a) The experimental hysteresis curve and the hysteresis curve of Backlash-Like model when the frequency is 30 Hz



(b) 频率 30 Hz 时, 实验迟滞曲线与 Backlash-Like 模型误差曲线
(b) The error curve of the experimental hysteresis curve and Backlash-Like model when the frequency is 30 Hz



(c) 频率为 40 Hz 时, 实验迟滞曲线与 Backlash-Like 模型迟滞曲线
(c) The experimental hysteresis curve and the hysteresis curve of Backlash-Like model when the frequency is 40 Hz

图 5 压电超精密定位系统预测的压电陶瓷微位移平台结果与实验结果的对比

Fig. 5 Comparison between the results of the piezoelectric ultra precision positioning system and the experimental results of piezoelectric ceramic micro displacement platform

从图 5 中可以看出动态迟滞模型明显比 Backlash-Like 模型的拟合效果更好,为了更直观地对比 Backlash-Like 模型和动态迟滞模型,实验数据如表 1、2 所示。从表 1 中可以看出,Backlash-Like 模型 30、40 Hz 的误差较 2 Hz 的误差明显大很多,从表 2 中可以看出,动态迟滞模型 30、40 Hz 的误差较 2 Hz 的误差比较接近。再将表 1 和 2 进行对比可以看出,30 和 40 Hz 时,最大输出位移误差由 1.21 和 1.39 μm 下降到 0.32 和 0.44 μm ,最大相对误差由 4.04% 和 7.37% 下降到 3.5% 和 4.4%,平均位移误差由 0.53 和 0.76 μm 下降至 0.17 和 0.21 μm 平均相对误差由 1.93% 和 3.38% 下降到 1.11% 和 1.37%。结合图 5 和表 1、2,可以得出结论,不管从最大误差还是平均误差实验数据进行分析,动态迟滞模型较 Backlash-Like 模型的误差都存在较明显的减小,动态迟滞模型对于压电超精密定位台的建模具有良好的泛化能力,验证了动态迟滞模型的优越性。

表 1 Backlash-like 模型精度比较

Table 1 Accuracy comparison of Backlash-like model

Backlash-like 模型	最大位移误差/ μm	最大相对误差/%	平均位移误差/ μm	平均相对误差/%
2 Hz	0.32	2.86	0.10	0.57
30 Hz	1.21	4.04	0.53	1.93
40 Hz	1.39	7.37	0.76	3.38

表2 动态迟滞模型精度比较

Table 2 Accuracy comparison of dynamic hysteresis models

动态迟滞模型	最大位移误差/ μm	最大相对误差/%	平均位移误差/ μm	平均相对误差/%
2 Hz	0.32	2.86	0.10	0.57
30 Hz	0.32	3.5	0.17	1.11
40 Hz	0.44	4.4	0.21	1.37

4 结 论

本文提出 Backlash-Like 模型来描述压电超精密定位台的迟滞非线性问题,采用基于遗传因子的递推最小二乘法来辨识 Backlash-Like 模型的参数,并结合压电超精密定位台的动态特性,建立了动态迟滞模型,既减小了因压电超精密定位台自身的动态特性而引起的建模误差,又能避免输入电压和输出位移在相同电压幅值和相同输出位移却不同频率下的模型参数反复辨识问题。实验得到动态迟滞模型对比单纯的 Backlash-Like 模型在频率为 30 和 40 Hz 时,最大位移误差由 1.21 和 1.39 μm 下降到 0.32 和 0.44 μm ,且最大相对误差分别仅为 3.5% 和 4.4%,平均位移误差由 0.53 和 0.76 μm 下降至 0.17 和 0.21 μm ,平均相对误差由 1.93% 和 3.38% 下降到 1.11% 和 1.37%。本次实验是以哈尔滨芯明天科技有限公司的三维压电超精密定位台 XP-611. XYZ 和 XE-500/501D 系列压电陶瓷控制器为基础进行实验的。对于其他品牌的压电超精密定位台,仅需在该压电超精密定位台的基础上,辨识得到动态迟滞模型的参数,即可得到一种更加精确且方便的动态迟滞模型来描述压电超精密定位台的迟滞非线性,此模型参数辨识较为简单,无需反复辨识参数,并且具有广泛适用性,易于工程实现,为下一步系统的控制奠定了基础。

参考文献

- [1] 谢国兵,刘卫国,高爱华. 基于压电陶瓷的激光谐振腔长控制技术[J]. 兵工自动化,2012,31(3):75-78.
XIE G B, LIU W G, GAO AI H. Laser resonant cavity-length regulation technology based on piezoelectric ceramic [J]. Ordnance Industry Automation, 2012, 31(3):75-78.
- [2] 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.
- [3] 陈辉. 多维超精密定位系统建模与控制关键技术研究[D]. 南京:东南大学,2016.

CHEN H. Research based on multi-dimensional ultra precision positioning system modeling and a key technology of control. [D]. Nanjing:Southeast University, 2016.

- [4] 刘一帆,章文俊. 压电驱动器建模与控制技术研究[J]. 压电与声光,2016,38(3):363-366.
LIU Y F, ZHANG W J. Study on modeling and control technology for piezoelectric actuator [J]. Piezoelectrics&Acoustooptics, 2016, 38(3):363-366.
- [5] 冒鹏飞,王传礼,喻曹丰,等. 磁滞伸缩驱动器磁滞特性的 Persiach 模型建模[J]. 科学技术与工程,2017,17(9):149-152.
MAO P F, WANG CH L, YU C F, et al. Establish the preisach model of hysteresis in giant magnetostrictive material [J]. Science Technology and Engineering, 2017,17(9):149-152.
- [6] 田雷,陈俊杰,崔玉国,等. 基于 PI 迟滞模型的单压电变形镜开环控制[J]. 仪器仪表学报,2017,38(1):136-142.
TIAN L, CHEN J J, CUI Y G, et al. Open-loop control of unimorph piezoelectric deformable mirror based on PI hysteresis model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(1):136-142.
- [7] 于志亮,刘杨,王岩,等. 基于改进 PI 模型的压电陶瓷迟滞特性补偿控制[J]. 仪器仪表学报,2017,38(1):129-136.
YU ZH L, LIU Y, WANG Y, et al. Hysteresis compensation and control of piezoelectric actuator based on an improved PI model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 129-136.
- [8] 方楚,郭劲,徐新行,等. 压电陶瓷迟滞非线性前馈补偿器[J]. 光学精密工程,2016,24(9):2217-2223.
FANG CH, GUO J, XU X H, et al. Compensating controller for hysteresis nonlinearity of piezoelectric-ceramics[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(9):2217-2223.
- [9] YING Z G, ZHU W Q. Stochastic averaging of Duhem hysteretic systems [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002,254(1):91-104.
- [10] 陈辉,谭永红,周杏鹏,等. 压电陶瓷驱动器的动态模型辨识与控制[J]. 光学精密工程,2012,20(1):88-95.
CHEN H, TAN Y H, ZHOU X P, et al. Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 88-95.
- [11] 孙涛,李国平,孙浩益. 基于 Duhem 模型和逆模型的压电执行器精密定位及控制[J]. 宁波大学学报,

- 2017,30(1):13-17.
- SUN T, LI G P, SUN H Y. Accurate positioning and control of piezoelectric actuator based on Duhe-m model and inverse model [J]. Journal of Ningbo University, 2017,30(1):13-17.
- [12] 杨晓京,彭芸浩,李尧. 压电微位移台的动态迟滞建模及实验验证[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9): 2255-2261.
- YANG X J, PENG Y H, LI Y. Dynamic hysteresis modeling and experimental verification of piezoelectric positioning stage[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(9): 2255-2261.
- [13] 胡凯明,文立华. PBP 驱动器率相关迟滞特性研究及其线性化控制[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 205-212.
- HU K M, WEN L H. Research on rate-dependent hysteresis characteristics of PBP actuators and its linearization control [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 205-212.
- [14] 顾寒烈,吴洪涛,杨小龙,等. 压电作动器非对称迟滞模型的建立和参数辨识[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 903-909.
- GU H L, WU H T, YANG X L, et al. Modeling and parameter identification of asymmetric hysteresis for piezoelectric actuator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 903-909.
- [15] SU C Y, STEPANENKO Y, SVOBODA J, et al. Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(12): 2427-2432.
- [16] EKANAYAKE D B, IYER R V. Study of a play-like operator [J]. Physica B: Condensed Matter, 2008, 403(2-3): 456-459.
- [17] ZHOU J, WEN C, ZHANG C. Adaptive backstepping control of a class of uncertain nonlinear systems with unknown Backlash-like hysteresis [J]. Automatica, 2004, 49(10): 1751-1759.

作者简介



杨晓京, 2008年于浙江大学获得博士学位,现为昆明理工大学教授、博士生导师,主要研究方向为超精密驱动与传动理论及新技术等方面的研究。

E-mail: xjyang@vip.sina.com

Yang Xiaojing received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2008. Now he is a professor and doctoral supervisor in Kunming University of Science and Technology. His main research interests include ultra precision drive and transmission theory and new technology.



李庭树(通讯作者), 2015年于湖南理工大学获得学士学位,现为昆明理工大学硕士研究生,主要研究方向为压电超精密定位台建模与控制方面的研究。

E-mail: 605436079@qq.com

Li Tingshu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hunan Institute of Science and Technology in 2015. Now he is a master student in Kunming University of Science and Technology. His main research interests include modeling and control of piezoelectric ultra precision positioning stage.