

采用变间隔阈值 PI 模型的压电平台前馈控制

孙中梁, 崔玉国, 刘康, 万光继, 赵余杰, 李勇

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:为提高压电微动平台在运动过程中的定位精度,设计前馈控制器来控制平台输出位移。首先,根据压电微动平台迟滞曲线的特点,在不降低模型精度要求的前提下,对迟滞曲线非线性较大区域进行细密划分,对线性较好区域进行稀疏划分,进而建立了变间隔阈值的平台 Prandtl-Ishilinskii(PI)迟滞模型;接着,通过对所建平台迟滞模型求逆,给出了平台的前馈控制算法;最后,将所设计的前馈控制器作用于平台,对其进行了实际控制。结果表明,在 $4\ \mu\text{m}$ 的目标阶跃激励下,平台的响应时间为 $0.01\ \text{s}$,无超调,稳态误差中线从无控制时的 $0.4\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 减小为 $0\sim 0.2\ \mu\text{m}$;在最大值为 $20.7\ \mu\text{m}$ 的幅值衰减三角波输入作用下,平台定位误差中线的最大正负差值从无控制时的 $3.82\ \mu\text{m}$ 减小到 $1.15\ \mu\text{m}$ 。所设计的控制器可有效减小压电微动平台的迟滞误差。

关键词:微动平台;压电执行器;迟滞模型;变间隔阈值;前馈控制

中图分类号: TN39 **文献标识码:** A

Feedforward Control of a Piezoelectric Stage Using Variable-interval Threshold PI Model

SUN Zhongliang, CUI Yuguo, LIU Kang, WAN Guangji, ZHAO Yujie, LI Yong

(The Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To improve the positioning accuracy of the piezoelectric microstage, a feedforward controller is designed to control the output displacement of the stage. Firstly, without reducing the accuracy requirement, the hysteresis curve section with larger nonlinearity is subdivided and the section with better linearity is sparsely divided according to the characteristics of the hysteresis curve of the piezoelectric microstage. Then, a Prandtl-Ishilinskii (PI) hysteresis model with variable-interval thresholds is established. Afterwards, the feedforward control algorithm of the stage is given by inverting the hysteresis model of the stage. Finally, the designed feedforward controller is applied to the stage and the actual control experiments are conducted. The results show that the response time of the stage is $0.01\ \text{s}$ and no overshoot phenomenon occurs under the desired step excitation of $4\ \mu\text{m}$. Meanwhile, the steady-state error midline is reduced from $0.4\sim 0.5\ \mu\text{m}$ (without control) to $0\sim 0.2\ \mu\text{m}$. For an attenuated triangular wave with the maximum amplitude of $20.7\ \mu\text{m}$, the maximum positive-negative deviation of the positioning error midline of the stage is reduced from $3.82\ \mu\text{m}$ (without control) to $1.15\ \mu\text{m}$. Accordingly, the hysteresis error of the piezoelectric microstage can be effectively reduced by the designed controller.

Key words: microstage; piezoelectric actuator; hysteresis model; variable-interval threshold; feedforward control

0 引言

压电微动平台因体积小,频响快,刚度高及抗干扰能力强而广泛应用于精密机械、光学、生物医学等领域(如电液伺服阀、微机械手、自动聚焦系统、器官超声波扫描器等)^[1]。但是,压电陶瓷执行器迟滞特

性产生的迟滞误差降低了微动平台的定位精度,不利于其性能发挥。

为了减小甚至消除压电微动平台因压电陶瓷执行器迟滞非线性造成的迟滞误差,建立了描述其迟滞特性的模型并施加相应控制。目前用来描述压电

收稿日期:2016-10-27

基金项目:浙江省高等学校中青年学科带头人学术攀登项目(pd2013091)

作者简介:孙中梁(1989-),男,山东济宁人,硕士生,主要从事微/纳米定位及检测技术的研究。通信作者:崔玉国(1971-),男,吉林农安人,教授,博士生导师,主要从事微/纳米定位技术、精密测量技术的研究。

微动平台迟滞特性的模型主要有 Preisach 模型^[2]、Prandtl-Ishilinskii (PI) 模型^[3-4]、Duhem 模型^[5] 及 Maxwell 模型^[6] 等。其中,PI 模型因算法简单、参数较少、求逆方便,从而使控制器易于设计,故应用更广泛。关于压电微动平台的控制方法,主要有闭环控制^[7-8] 和前馈控制^[9-10]。其中,闭环控制较前馈控制精度高,但系统构成复杂、成本高;前馈控制是一种建立在预测基础上的开环控制,控制精度低于闭环控制,但其可在偏差出现前进行预测并采用相应的控制策略,从而提高被控对象对目标信号的实时跟踪能力,系统简单、成本低。

本文采用变间隔阈值法来建立压电微动平台的 PI 迟滞模型,并据此来设计其前馈控制器,对其施加相应控制,以减小平台控制误差。

1 PI 迟滞模型及其改进

PI 迟滞模型可表示为 n 个阈值 r^i 不同、权重 ω^i 不同的迟滞算子 $H_{r, \omega}^i$ (Backlash 算子,见图 1) 的加权和,即

$$y(t) = \sum_{i=0}^{n-1} H_{r, \omega}^i [x(t), y^i(0)] = \sum_{i=0}^{n-1} \omega^i \max\{x(t) - r^i, \min\{x(t) + r^i, y^i(t - T)\}\} = \mathbf{W}^T \mathbf{H}_r [x, y_0] \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别为 Backlash 算子的输入、输出; T 为采样周期; ω^i 为算子权重, $\mathbf{W}^T = [\omega^0, \omega^1, \dots, \omega^{n-1}]$ 为算子权重向量; r^i 为算子阈值, $0 = r^0 < r^1 < \dots < r^{n-1} < +\infty$; $y^i(0)$ 为算子初值,均可取为 0; $\mathbf{H}_r [x, y_0]$ 为算子向量。

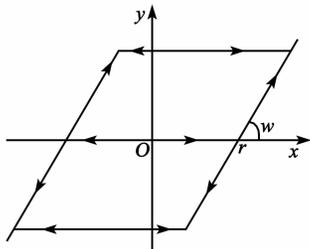


图 1 Backlash 算子

作为构成 PI 迟滞模型的基本单元,为使运算简便,迟滞算子一般以递归形式给出,即

$$y(t) = H_{r, \omega} [x(t), y(0)] = \omega \max\{x(t) - r, \min\{x(t) + r, y(t - T)\}\} \quad (2)$$

式(2)的初始条件为

$$y(0) = \omega \max\{x_0 - r, \min\{x_0 + r, y_0\}\} \quad (3)$$

式中: x_0 、 y_0 为算子初值,一般取为 0。

在确定出式(1)中的 r^i 、 ω^i 后,即可求得 PI 迟

滞模型。一般采用辨识模型误差(即压电微动平台的 PI 迟滞模型 $y(t)$ 同其实测迟滞曲线 $\hat{y}(t)$ 之间的差值)的最小二范数 L_2^2 的方法来给出 r^i 、 ω^i ,即

$$L_2^2 = \min \|\mathbf{W}^T \mathbf{H}_r [x, y_0] - \hat{y}(t)\|_2^2 = \min \left(\mathbf{W}^T \int_t \mathbf{H}_r [x, y_0] \mathbf{H}_r [x, y_0]^T dt \cdot \mathbf{W} - 2 \int_t \hat{y}(t) \mathbf{H}_r [x, y_0]^T dt \cdot \mathbf{W} + \int_t \hat{y}(t)^2 dt \right) \quad (4)$$

S. T. : $\mathbf{U} \tau \mathbf{w} - \mathbf{u} > 0$

其中

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \epsilon \\ \epsilon \\ \vdots \\ \epsilon \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 ϵ 为无穷小正数。

关于 PI 迟滞模型中的算子数 n 和阈值 r^i 的确定,目前大都采用等间隔阈值滤。但在确保模型精度的前提下,等间隔阈值滤会使算子数量增大。图 2 为本文压电微动平台的迟滞曲线示意图。由图可见,曲线升程由两段不同特性的曲线构成,其中前半升程呈凹函数状,斜率变化较大;后半升程则线性度较好,斜率变化很小。根据这一现象,本文采用变间隔阈值法(即前半升程阈值间隔小,后半升程阈值间隔大,且后者为前者的 2 倍)来给出算子数 n 及阈值 r^i ,这样可使模型精度在满足要求的条件下,模型的整体算子数减少,进而提高模型的运算速度。

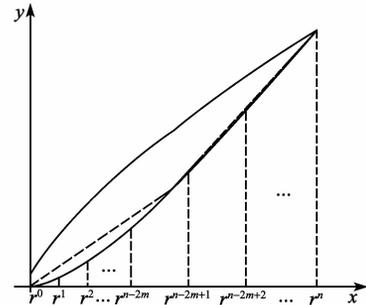


图 2 迟滞曲线示意图

2 前馈控制器设计

对压电微动平台进行前馈控制的目的是,使平台在前馈控制器输出电压的作用下,平台的输出位移能够很好地跟踪目标位移。可见,压电微动平台的前馈控制器就是前述所建平台 PI 迟滞模型的逆

解,即

$$y'(t) = (y(t))^{-1} = \sum_{i=0}^{n-1} (H_{r,w}^i[x(t), y^i(0)])^{-1} = \sum_{i=0}^{n-1} \omega'^i \max\{x(t) - r'^i, \min\{x(t) + r'^i, y'^i(t-T)\}\} = \mathbf{W}'^T \mathbf{H}_r[y, y'_0] \quad (7)$$

由式(7)可见,PI模型的逆解,即压电微动平台的前馈控制器仍为PI模型。

在式(7)中,有

$$\omega'^0 = \frac{1}{\omega^0} \quad (8)$$

$$\omega'^i = \frac{-\omega^j}{(\sum_{j=0}^i \omega^j)(\sum_{j=0}^{i-1} \omega^j)} \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (9)$$

$$r'^i = \sum_{j=0}^i \omega^j (r'^i - r'^j) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (10)$$

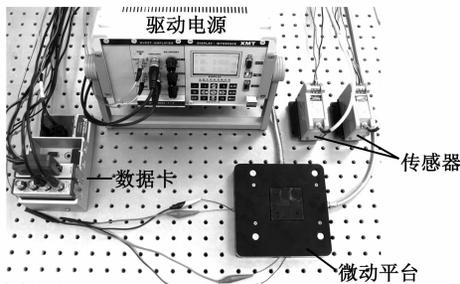
$$y'^i(0) = \sum_{j=0}^i \omega^j y^i(0) + \sum_{j=i+1}^{n-1} \omega^j y^j(0) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (11)$$

式(8)~(11)中的参数 r^j 和 ω^j 可通过前面的方法辨识出来,如此可得到PI迟滞逆模型参数 r'^i 、 ω'^i ,把这些参数代入式(7),则前馈控制器得以建立。

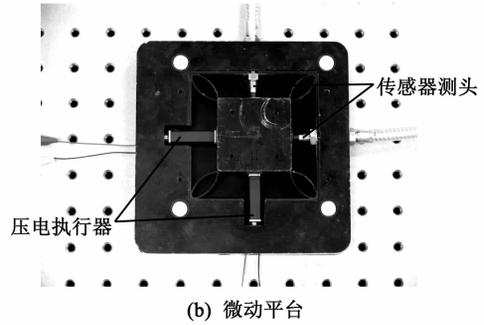
3 前馈控制实验

3.1 实验系统构成

图3为测量压电微动平台在前馈控制下位移输出特性的实验系统。计算机通过数/模转换器(位于数据卡上)输出相应的控制电压波形信号给驱动电源,压电执行器在电源电压作用下输出位移,使微动平台产生相应的微运动,平台的运动被电涡流式位移传感器感知后,由模/数转换器(位于数据卡上)送至计算机。这里,电涡流式位移传感器仅用作验证所设计前馈控制器的有效性。其中,数/模及模/数转换器位数为16 bit;驱动电源的纹波幅度为±5 mV;电涡流位移传感器的测量范围为1 mm,分辨率为0.1 μm;压电执行器的标称位移(在120 V电压作用下)为24 μm。



(a) 实验系统组成



(b) 微动平台

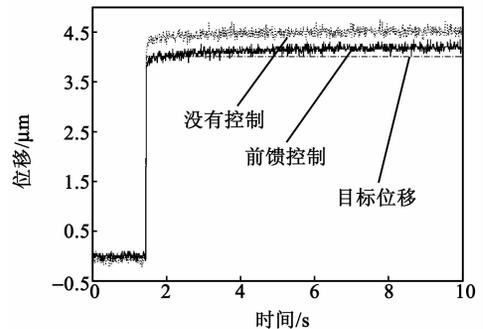
图3 测试压电微动平台位移特性的系统

3.2 前馈控制的实验验证

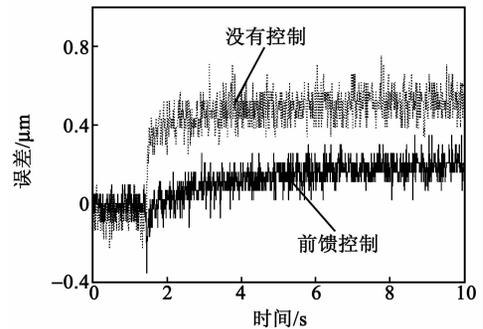
本文压电微动平台为并联结构,由于其 x 、 y 向的结构和几何尺寸一样(见图3(b)),这两个方向的输出特性一样,所以,下面只给出平台 x 向输出位移在前馈控制下的实验结果。

3.2.1 阶跃响应

图4为平台在所设计的前馈控制器作用下对阶跃信号的响应曲线。图中目标位移为4 μm,施加前馈控制后,压电微动平台在目标位移信号激励下输出位移迅速达到4 μm,无超调,稳态误差中线由无控制时的0.4~0.5 μm减小为0~0.2 μm。



(a) 位移与时间的关系



(b) 位移误差

图4 平台的阶跃响应

3.2.2 三角波跟踪

图5(a)为在前馈控制下压电微动平台对幅值衰减三角波激励的响应。由图可见,施加前馈控制后,在20.7 μm位移范围内,平台定位误差中线的

最大正负差值由无控制时的 $3.82 \mu\text{m}$ 减小到前馈控制下的 $1.15 \mu\text{m}$,前馈控制提高了压电微动平台输出位移对目标位移的跟踪能力。

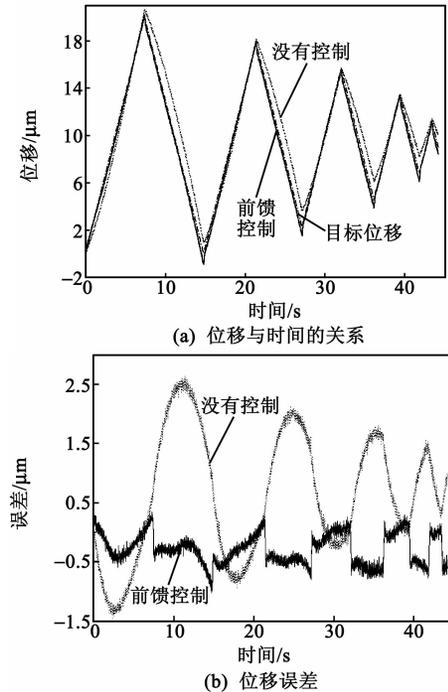


图5 平台对幅值衰减三角波的响应

由图5可见,本文设计的前馈控制器能减小压电微动平台的迟滞误差,提高其定位精度。

4 结束语

本文采用变间隔阈值法,建立了压电微动平台的PI迟滞模型,所建模型在保证精度的条件下,可减少算子数。将所设计的平台前馈控制器作用于平台,对其进行实际控制。结果表明:当目标位移为 $4 \mu\text{m}$ 时,平台响应时间达到 0.01 s ,稳态误差从 $0.5 \mu\text{m}$ 减小为 $0.2 \mu\text{m}$;当跟踪最大幅值为 $20.7 \mu\text{m}$ 的衰减三角波目标位移时,稳态误差从 $3.8 \mu\text{m}$ 减小为 $1.15 \mu\text{m}$ 。所提出的控制方法对减小平台迟滞误差是有效的。

参考文献:

- [1] 吴博达,鄂世举,杨志刚,等. 压电驱动与控制技术的发展与应用[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 79-85.
WU Boda, E Shiju, YANG Zhigang, et al. Development and application of piezoelectric actuation and control[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 79-85.
- [2] DONG Yangyang, HU Hong, WANG Hongjun. Identification and experimental assessment of two-input Preisach

model for coupling hysteresis in piezoelectric stack actuators[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014(220): 92-100.

- [3] GAN Jinqiang, ZhANG Xianmin, WU Heng. A generalized Prandtl-Ishlinskii model for characterizing the rate-independent and rate-dependent hysteresis of piezoelectric actuators[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87: 035002-1-6.
- [4] 江国栋,王晓东. 基于PI逆模型的压电执行器复合控制[J]. 压电与声光, 2016, 38(4):553-557.
JIANG Guodong, WANG Xiaodong. Compounding control of piezoelectric actuators based on inverse PI mode[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(4):553-557.
- [5] LIN C J, LIN P T. Tracking control of a biaxial piezo-actuated positioning stage using generalized Duhem model [J]. Computers & Mathematics With Applications, 2012, 64(5): 766-787.
- [6] 裘进浩,陈海荣,陈远晟,等. 压电驱动器的非对称迟滞模型[J]. 纳米技术与精密工程, 2012, 10(3): 189-197.
QIU Jinhao, CHEN Hairong, CHEN Yuansheng, et al. A model for asymmetric hysteresis of piezoelectric actuators [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2012, 10(3):189-197.
- [7] 王昱棠,张宇鹏,徐钰蕾. 压电陶瓷驱动快速反射镜双闭环控制[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 68-72.
WANG Yutang, ZHANG Yupeng, XU Yulei. Dual-loop control strategy for fast-steering mirror driven by PZT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6):68-72.
- [8] ROMBACH S, MARX M, GU-STOPPEL S, et al. Low power and highly precise closed-loop driving circuits for piezoelectric micromirrors with embedded capacitive position sensors[C]//S. l. :Proc of SPIE, 2016.
- [9] 唐强,吉方,陈东升,等. 压电陶瓷执行器的动态迟滞建模与零相差前馈补偿控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(9): 95-98.
TANG Qiang, JI Fang, CHEN Dongsheng, et al. Dynamic hysteresis modeling and zero-phase-error control of piezoelectric actuators[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(9): 95-98.
- [10] AL HAMIDI Y, RAKOTONDRABE M. Feedforward and output feedback control of a highly oscillating and nonlinear 2-DOF piezoelectric actuator by using input shaping compensator and a linear quadratic regulator[C]//S. l. : Proc of SPIE, 2016.