

压电微动平台的改进 PI 迟滞模型研究

方 凡,崔玉国,梁冬泰,李 勇

(宁波大学 机械工程与力学学院,浙江 宁波 315211)

摘 要:为了建立既有较高精度又有较快运算速度的压电微动平台迟滞模型,对传统 PI 迟滞模型进行了改进研究。由于压电微动平台初载曲线前半升程斜率变化较大,而后半升程斜率变化较小,因此,采用非等分域值方法建立了其 PI 迟滞模型,通过求取所建模型与实测初载曲线误差的最小二范数辨识出了模型的相应参数,实验验证了所建模型的有效性。实验结果表明,在 $20.7 \mu\text{m}$ 的平台最大位移范围内,模型的最大误差为 $0.71 \mu\text{m}$,平均误差为 $0.23 \mu\text{m}$ 。

关键词:压电微动平台;迟滞模型;PI 模型;非等分域值

中图分类号:TM282;TN384 **文献标识码:**A

Research on Improved Hysteresis Model of Piezoelectric Micro-positioning Stage

FANG Fan, CUI Yuguo, LIANG Dongtai, LI Yong

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

Abstract: The traditional PI hysteresis model is improved as to build both high accuracy and fast computing speed of hysteresis model of the piezoelectric micro-positioning stage. Based on the fact that the slopes of the first half of the initial loading curve for the piezoelectric micro-positioning stage change much while the slopes of the second half change little, the PI hysteresis model of the stage was established by the non-equiinterval threshold value. The established model was identified by optimizing the minimum-norm of the errors between measured initial load curve and the model. The experimental results show that the maximum error and average error of the model are $0.71 \mu\text{m}$ and $0.23 \mu\text{m}$ in the displacement range of $20.7 \mu\text{m}$.

Key words: piezoelectric micro-positioning stage; hysteresis model; PI model; non-equiinterval threshold value

0 引言

压电微动平台是基于柔性结构的、由压电陶瓷执行器驱动的微位移机构,由于它具有位移分辨率高,响应快,功耗小及无噪声等优点,所以被广泛应用于超精密加工、微纳米测量、微机电系统(MEMS)、半导体光刻及生物工程等领域中^[1]。但其输出位移同其驱动电压间存在严重的迟滞非线性,从而降低了其定位精度。为提高其定位精度,往往需对其进行控制,这就需要建立其迟滞非线性模型。

描述压电微动平台迟滞非线性特性的数学模型有 Preisach 模型^[2]、PI 模型^[3]、广义 Maxwell 滑动模型^[4]、坐标变换模型^[5]、变比模型^[6]等。同其他模

型相比,PI 模型具有解析式,参数少,求逆简单,便于控制器设计。因此,国内外很多学者都采用 PI 模型来建立压电微动平台的迟滞模型^[3,7-9]。不过,为提高模型精度而增加算子数目时,PI 模型的运算速度将会降低。为使所建模型在保证精度的同时也具有较快的速度,本文采用非等分域值方法,基于 PI 模型来建立压电微动平台的迟滞模型。

1 PI 迟滞模型的描述

PI 模型是由许多权重和域值不同的迟滞算子(Backlash 算子,见图 1)线性叠加构成的。Backlash 算子的输出特性取决于域值 r 、权重 w 与输入信号,只要有足够多的算子数目就可表示任何复杂的迟滞特性,从而建立精确的迟滞模型。

收稿日期:2013-03-20

基金项目:教育部回国人员科研启动基金资助项目,宁波市自然科学基金资助项目(2011A610138)

作者简介:方凡(1986-),女,湖北黄冈人,硕士生,主要从事微纳米定位技术的研究。崔玉国(1971-),教授,博士生导师,主要从事微/纳米定位技术、精密测量技术研究。

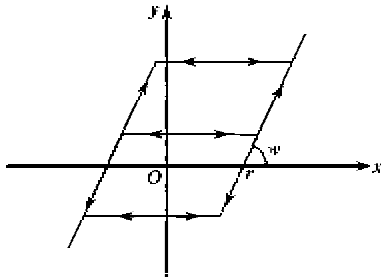


图1 w, r 的 Backlash 算子

Backlash 算子的数学描述为

$$y = \begin{cases} w(x-r) & x-y/w=r \\ c & -r < x-y/w < r \\ w(x+r) & x-y/w=-r \end{cases} \quad (1)$$

为了数值计算上的方便,在构造 PI 模型时,通常采用递归形式来描述 Backlash 算子^[9]:

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

式中: $H_{r,w}$ 为 Backlash 迟滞算子; $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别为算子的输入和输出; T 为采样周期。式(2)的初始条件为

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

式中: $x_0 = x(0)$; y_0 为 Backlash 算子的初始值,通常取为 0。

n 个域值不同、权重不同的 Backlash 算子线性叠加即可构成 PI 迟滞模型,即

$$y(t) = \sum_{i=0}^{n-1} H_{r^i, w^i}[x(t), y^i(0)] = \sum_{i=0}^{n-1} w^i \max\{x(t) - r^i, \min\{x(t) + r^i, y^i(t-T)\}\} = W^T H_r[x, y_0] \quad (4)$$

式中: r^i 和 w^i 分别为 Backlash 算子的域值和权重,且满足: $0 = r^0 < r^1 < \dots < r^{n-1} < +\infty$; $y^i(0)$ 是算子的初始值,均可取为 0。

如果式(4)中的 r^i, w^i 确定后,便可求得 PI 迟滞模型。而 r^i, w^i 可通过压电微动平台的初载曲线(就是驱动电压从 0 施加到压电执行器所能承受的最大值的实测升程曲线)辨识出来。这种辨识是通过求取 PI 模型 $y(t)$ 与实测初载曲线 $\hat{y}(t)$ 的误差的最小二范数 L_2^2 实现的^[7],即

$$L_2^2 = \min \| W^T H_r[w, y_0] - \hat{y}(t) \|_2^2 = \min \left\{ W^T \int_t H_r[x, y_0] H_r[x_0, y_0]^T dt \cdot W - 2 \int_t \hat{y}(t) H_r[x, y_0] dt \cdot W^T + \right.$$

$$\left. \int_t \hat{y}(t)^2 dt \right\} \quad \text{st: } Uw - u > 0 \quad (5)$$

其中

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$u = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon \\ \vdots \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 ε 为大于 0 的无穷小数。

由式(4)可知,在求解 PI 模型时,每求模型的 1 个点,需进行 $2(n+1) + n$ 次加法、 $n+1$ 次乘法、 $2(n+1)$ 次比较,共 $6n+5$ 次运算;要求得整个 PI 模型,就需进行 $(6n+5) \times n_s$ (n_s 为采样点数)次运算。可见,求解 PI 模型的运算量随着算子数的增大而迅速增大。在保证模型精度的同时,为提高模型的运算速度,就需减少算子的数目。本文便基于该思想来建立压电微动平台的迟滞模型。

2 PI 迟滞模型的改进

当通过实验获得压电微动平台的初载曲线后,就可确定 PI 模型中的算子数 n, r^i 。目前大都采用等分阈值的方式来确定 n, r^i ,如图 2 所示。

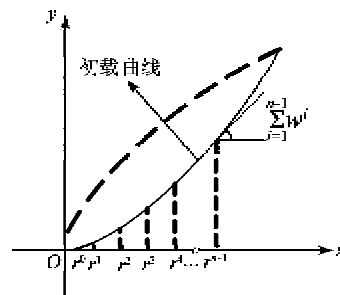


图2 PI 迟滞模型的初载曲线

当 n 足够大时,分割后初载曲线的每一段都可用线性函数来表示,即

$$y(t) = \sum_{j=0}^i w^j (r - r^j) \quad r^i < r < r^{i+1} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (8)$$

初载曲线在每经过一个域值后斜率会发生改变,斜率值为

$$\frac{d}{dr}y(t) = \sum_{j=0}^i w^j \quad r^i < r < r^{i+1} \quad i=0,1,2,\dots,n-1 \quad (9)$$

上述采用等间隔取值方式来求取 PI 模型时,在保证模型精度的情况下,会使算子数过多。由式(8)、(9)可知,权重同初载曲线斜率的变化量有关。图 3 为本文压电微动平台的实测初载曲线,由图可知,初载曲线前半升程的斜率变化很大,而后半升程变化很小。于是,可采取非等分域值的方法来确定 n, r^i ,即对前半升程的算子数取得多些,以保证模型的精度;对后半升程的算子数取得少些,以提高模型的运算速度。

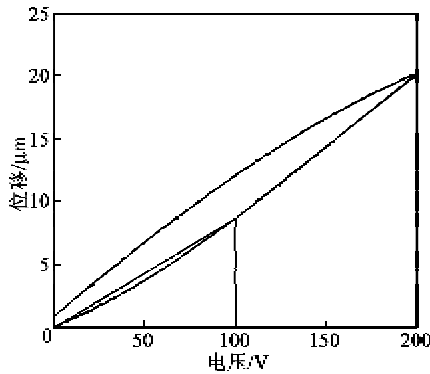


图 3 压电微动平台的实测初载曲线
在本文中,域值的选择为

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{i \max(x)}{2m} - \frac{\max(x)}{2}, 0 < x < \frac{\max(x)}{2} \\ i=0,1,2,\dots,2m-1 \\ \frac{\max(x)}{2} + \frac{i}{m} \left(\frac{\max(x)}{2} - \frac{\max(x)}{2} \right), \\ \frac{\max(x)}{2} < x < \max(x) \\ i=0,1,2,\dots,m-1 \end{array} \right. \quad (10)$$

3 微动平台迟滞模型的建立

要获得压电微动平台的迟滞模型,就需要测量其初载曲线。给驱动微动平台的压电执行器施加 0~200 V(本文所用压电执行器所能承受的最大驱动电压为 200 V)的三角波电压。根据所测得的位移初载曲线如图 3 所示。通过式(5)、(10)便可辨识出压电微动平台迟滞模型中的相应参数 n, r^i, w^i ,如表 1 所示。由表可知,总算子数为 20,实际起作用的算子数为 7;前半升程阈值 r^i 的增量为 8.1 V,后半升程为 16 V。

表 1 改进 PI 模型的参数辨识结果

i	r^i	$w^i (1 \times 10^{-3})$	i	r^i	$w^i (1 \times 10^{-3})$
1	0	21.422 0	11	81	0
2	8.1	64.669 0	12	89.1	0
3	16.2	0	13	97.2	0
4	24.3	4.597 9	14	100	0
5	32.4	6.340 8	15	116	0
6	40.5	5.720 9	16	132	2.064 4
7	48.6	10.178 0	17	148	0
8	56.7	0	18	164	0
9	64.8	0	19	180	0
10	72.9	0	20	196	0

为了验证所建迟滞模型的有效性,给驱动微动平台的压电执行器施加幅值衰减的三角波驱动电压,平台位移的实测曲线及迟滞模型曲线如图 4 所示。由图可知,在 20.7 μm 的平台最大位移范围内,其迟滞模型的最大误差为 0.71 μm ,平均误差为 0.23 μm 。可见,所建迟滞模型能够很好地描述微动平台的迟滞非线性特性。

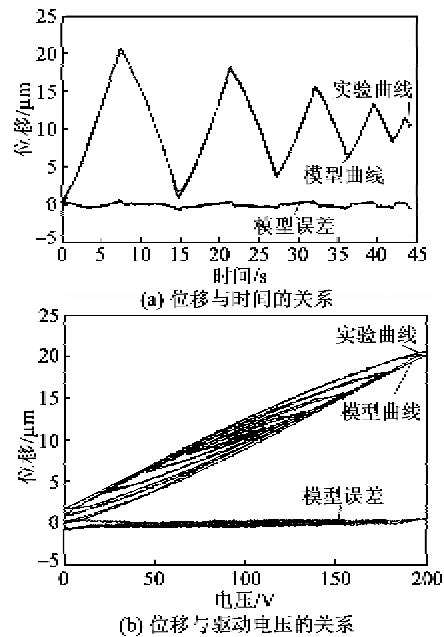


图 4 压电微动平台位移的实测曲线与模型曲线

4 结束语

由于压电微动平台初载曲线前半升程斜率变化较大而后半升程斜率变化较小,采用非等分域值法建立了平台的 PI 迟滞模型,该模型在保证精度的同时,具有较快的运算速度;且对所建迟滞模型进行了辨识,结果表明,在 20.7 μm 的位移范围内,所获模型的最大误差为 0.71 μm ,平均误差为 0.23 μm 。

(下转第 75 页)