

基于阈值优化迟滞模型的压电微定位平台前馈控制

宋 林, 崔玉国*, 万光继, 赵余杰, 刘尔春, 方 凡

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为减小压电微定位平台的迟滞误差, 设计前馈控制器对其进行控制. 首先, 在所建平台迟滞模型精度达到要求并使各阈值点精度相同的情况下, 对平台迟滞模型的阈值进行优化, 得到满足模型精度要求的最小算子数, 进而建立平台的 PI (Prandtl-Ishilinskii)迟滞模型. 接着, 通过对所建迟滞模型求逆, 设计出平台的前馈控制器. 最后, 在所设计的前馈控制作用下, 平台达到 $5\text{ }\mu\text{m}$ 理想阶跃值的响应时间为 0.01 s , 稳态误差中线的变化范围为 $0.40\sim 0.50\text{ }\mu\text{m}$; 当期望平台输出最大值为 $17\text{ }\mu\text{m}$ 的变幅值三角波位移时, 实测位移相对于理想位移的误差中线变动范围为 $-1.15\sim -0.05\text{ }\mu\text{m}$, 所设计前馈控制器可有效减小压电微定位平台的迟滞误差.

关键词: 压电微定位平台; 迟滞建模; 阈值优化; 前馈控制

中图分类号: TN304.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 02-0039-05

压电微定位平台是一种结构紧凑、运动行程为亚毫米级、位移分辨率达到纳米级的微定位机构. 在微机电系统中, 它同微夹钳结合, 可操作微零件, 实现微零件的装配. 在原子力显微镜中, 它配合微探针, 可用来测量微结构表面的三维形貌. 在生物工程中, 它同微冲击探针结合, 可对细胞进行捕捉、搬运和释放.

压电微定位平台因采用压电执行器驱动, 从而具有体积小、响应速度快、输出力大、位移分辨率高等优点. 但压电执行器的迟滞特性会使平台产生较大的定位误差, 进而会影响压电微定位平台的整体性能. 为使压电微定位平台具有良好的位移输出特性, 就需要建立反映平台迟滞特性的迟滞模型并对其施加相应的定位控制. 目前描述压电微定位平台迟滞特性的模型主要包括 Maxwell 模型^[1]、多项式逼近模型^[2]、Preisach 模型^[3-5]、PI (Prandtl-Ishilinskii)模型^[6-9]等. 其中, Maxwell 模型在描述压电执行器的迟滞特性时, 将压电执行器中电偶极子在电场作用下的转向等效于若干滑块的库仑摩擦, 物理意义明确, 但其求解过程非常繁琐. 多项式逼近模型用多项式来拟合压电执行器

的迟滞曲线, 建模容易, 但求逆相对困难. Preisach 模型采用迟滞算子加权求和方式来构造被描述对象的迟滞模型, 可建立对象的多环迟滞特性, 但由于采用二重积分计算, 且计算参数较多, 故求解过程复杂. PI 模型是 Preisach 模型的改进, 其迟滞算子采用斜坡函数, 能更精确地拟合对象的迟滞非线性特性. 目前用于提高平台定位性能的控制方法有前馈控制^[10-11]和反馈控制^[12-14]. 前者是一种开环控制, 精度低于反馈控制, 但可在偏差出现前进行控制, 从而在提高被控对象对参考输入跟踪能力的同时, 可使被控对象具有很快的响应速度; 反馈控制是一种闭环控制, 控制精度相对较高, 但因采用传感器反馈, 故控制系统组成复杂, 成本也较高.

本文采用 PI 模型, 并在对模型阈值优化的基础上, 建立压电微定位平台的迟滞模型, 进而设计出前馈控制器, 对其施加相应的控制, 以减小平台的迟滞误差, 提高定位精度.

1 平台迟滞建模

1.1 PI 模型描述

PI 迟滞模型可通过多个阈值以及不同权重的

收稿日期: 2016-11-02.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journallg.nbu.edu.cn/>

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).

第一作者: 宋林 (1992-), 男, 河南扶沟人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 微/纳米定位, E-mail: 2356840931@qq.com

*通信作者: 崔玉国 (1971-), 男, 吉林农安人, 教授, 主要研究方向: 微/纳米定位及精密测量, E-mail: cuiyuguo@nbu.edu.cn

Backlash 算子(图 1)的线性组合表达^[15]:

$$z(t) = \sum_{i=0}^{n-1} w^i \max \{x(t) - r^i, [\min x(t) + r^i, z^i(t-T)]\}, \quad (1)$$

式中: r^i 为算子阈值, $0=r^0 < r^1 < \dots < r^{n-1} < +\infty$, n 为算子数; w^i 为算子权重; $x(t)-r^i$, $x(t)+r^i$ 为算子输入; $z^i(t-T)$ 为算子输出; T 为采样周期; $z^i(0)$ 为算子初始值, 均可取 0.

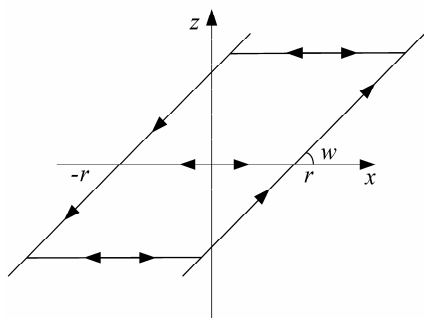


图 1 Backlash 算子

为方便运算, Backlash 算子往往以迭代方式表达, 即:

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

式(2)的初始条件为:

$$z(0) = w \max [x_0 - r, \min(x_0 + r, z_0)], \quad (3)$$

式中: $x_0=x(0)$, z_0 为 Backlash 算子初值, 可取为 0.

当求得式(1)中各算子的阈值和权重后, 就能求出对象的迟滞模型. 各算子的阈值和权重的求解过程为: (1)通过实验得到微定位平台的实际迟滞曲线, 采用足够数量的阈值等分该曲线(图 2), 进而使实际曲线成为分段线性函数; (2)在阈值区间划分基础上, 求出各 Backlash 算子的权重, 所求权重需使平台的模型曲线与实测曲线之间的误差

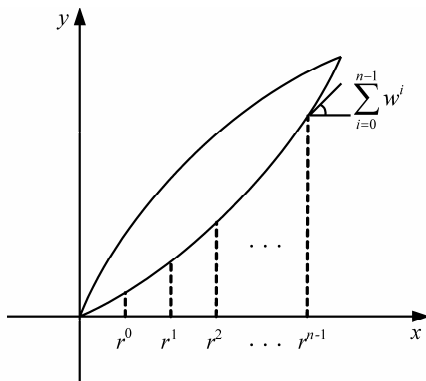


图 2 迟滞曲线斜率同迟滞算子权重的关系

的二范数达到最小.

1.2 阈值优化

通常, 在采用 PI 模型拟合对象的迟滞曲线时, 会把阈值区间划分得非常小, 以使每一段划分后的实测曲线都趋近直线, 进而保证 PI 模型能够以较高的精度来表达对象的迟滞特性, 但这样就会造成模型的迟滞算子过多, 且有很多权重等于零的无效算子. 而通过式(1)可知, PI 模型的求解运算量与模型的迟滞算子的数量成正比, 而被控对象的响应速度与迟滞算子的数量成反比. 因此, 在满足模型精度要求的情况下, 对阈值进行优化, 即合理地对阈值区间进行划分, 必能减小算子数量, 提高模型的运算速度.

在采用 PI 模型建立对象的迟滞模型时, 由于是用所建模型曲线在阈值点的算子权重和来表达被描述对象实测迟滞曲线在对应阈值点的斜率(图 2), 所以在各阈值点处的算子权重和跟实测迟滞曲线的斜率越接近, 所建模型就越精确. 于是, 在使所建平台模型的拟合精度达到要求并使各阈值点精度趋近于一致的前提下, 算子阈值的划分便取决于算子权重和的大小. 采用上述方法来确定各阈值点的具体过程为: (1)将实测迟滞曲线用多项式函数进行拟合; (2)对多项式函数求导, 得出各采样点处的斜率(该斜率可看成是相应采样点处的算子权重), 将所有斜率相加求和; (3)将上述斜率求和进行 n 等分, 等分数 n 即为算子数, 而各等分斜率求和则可被看成各阈值点处的权重和; (4)根据均分斜率求和的大小, 求出相应的阈值; (5)根据所求出的阈值, 辨识出算子权重; (6)通过所求出的算子阈值及权重, 计算模型曲线同时测迟滞曲线之间的误差; (7)若该误差不满足精度要求, 则返回(3), 将斜率求和进行 $n+1$ 等分, 然后重复(4)~(6), 直至模型误差满足精度要求.

1.3 平台迟滞模型的建立

在所搭建的测量微定位平台位移输出特性的实验系统中, 将 0 V 到 75 V, 再由 75 V 回到 0 V 的三角波电压作用于压电执行器, 测得微定位平台的实际迟滞曲线. 将拟建平台迟滞模型的算子数 n 从 2 依次取至 15, 在每个确定的算子数下, 根据实测迟滞曲线, 辨识出相应的阈值 r^i 和权重 w^i .

图 3 给出了在迟滞算子个数不同情况下模型

的误差曲线. 由图3可知, 随着迟滞算子个数的不断增加, 模型误差先不断减小, 后趋于稳定, 当迟滞算子数大于9后模型误差变化已不太明显, 因此这里取算子个数为9. 图4给出了在上述三角波电压作用下压电微定位平台的实测迟滞曲线与模型曲线. 由图4可知, 当平台输出位移为15.85 μm 时, 在算子个数为9时, 模型曲线和实测曲线差值, 即模型误差的变化范围为 $-0.30 \sim 0.30 \mu\text{m}$.

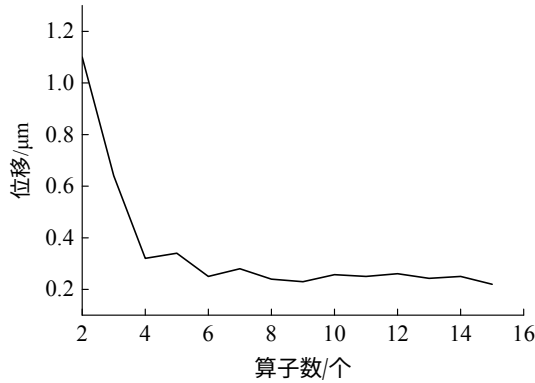
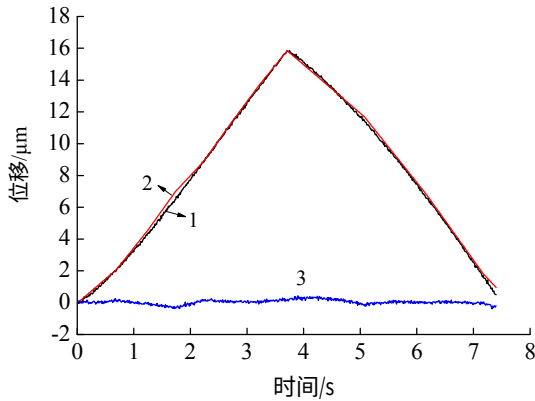


图3 不同算子数下实测曲线与模型曲线之间的误差



1 为实测曲线; 2 为模型曲线; 3 为模型误差

图4 实测曲线与模型曲线

2 平台前馈控制器设计

为减小压电微定位平台的迟滞误差, 提高定位精度, 需要将所建的反映平台位移(作为函数)和电压(作为自变量)之间关系的迟滞模型求逆, 得到反映平台电压(作为函数)和位移(作为自变量)之间关系的迟滞逆模型, 即压电微定位平台的前馈控制器, 并将其作用平台. PI 迟滞模型的逆解为:

$$z'(t) = (z(t))^{-1} = \sum_{i=0}^{n-1} w^i \max \{x(t) - r^i, \min[x(t) + r^i, z^i(t-T)]\}, \quad (4)$$

式中:

$$w^0 = 1 / w^0, \quad (5)$$

$$w^i = \frac{-w^j}{(\sum_{j=0}^i w^j)(\sum_{j=0}^{i-1} w^j)}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (6)$$

$$r^i = \sum_{j=0}^i w^j (r^i - r^j), \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (7)$$

$$z^i(0) = \sum_{j=0}^i w^j z^j(0) + \sum_{j=i+1}^{n-1} w^j z^j(0), \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (8)$$

把所求得的平台迟滞模型参数代入式(5)~(8), 可求得平台迟滞逆模型的相应参数, 再把这些逆模型参数代入式(4)可得平台的前馈控制器.

3 平台前馈控制实验

3.1 实验系统组成

图5为测量平台输出位移的实验系统, 该系统由计算机、数据板卡、压电电源、压电执行器、微定位平台以及电涡流式测微仪组成. 实验过程为: 控制信号由计算机产生, 经数据板卡 D/A 转换后传送到压电电源, 进而施加到压电执行器上, 使微定位平台产生位移, 平台位移被测微仪测得, 经数据板卡 A/D 转换后传送至计算机.

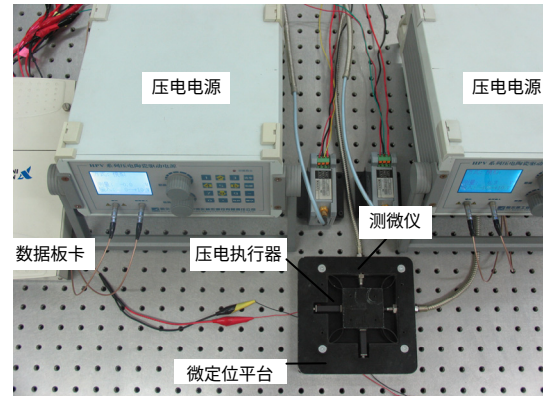


图5 测量平台输出位移的实验系统

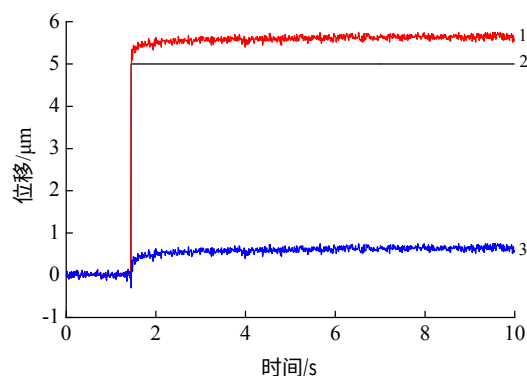
3.2 实验验证

由于本研究的微定位平台结构及尺寸在 x 与 y 方向相同, 因此平台在这两个方向的输出特性也相同, 故这里仅给出平台位移沿 x 方向在前馈控制器作用下的控制结果.

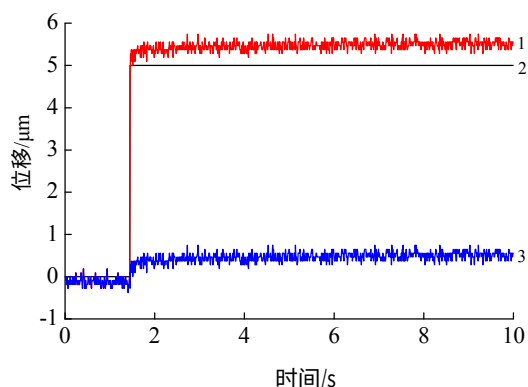
3.2.1 阶跃输入

图6给出了理想位移为阶跃信号时压电微定

位平台未受控制和受前馈控制的响应. 由图 6(a)可知, 在未受控制的情况下, 平台达到 $5\text{ }\mu\text{m}$ 理想阶跃值的响应时间为 0.01 s , 实测位移相对于理想位移的误差中线的变化范围为 $0.55\sim 0.65\text{ }\mu\text{m}$. 由图 6(b)可知, 在前馈控制的作用下, 平台达到 $5\text{ }\mu\text{m}$ 理想阶跃值的响应时间为 0.01 s , 实测位移相对于理想位移的误差中线的变化范围为 $0.40\sim 0.50\text{ }\mu\text{m}$. 可见, 前馈控制可减小压电微定位平台的迟滞误差.



(a) 没有施加控制, 1 为未受控制位移, 2 为理想位移, 3 为误差

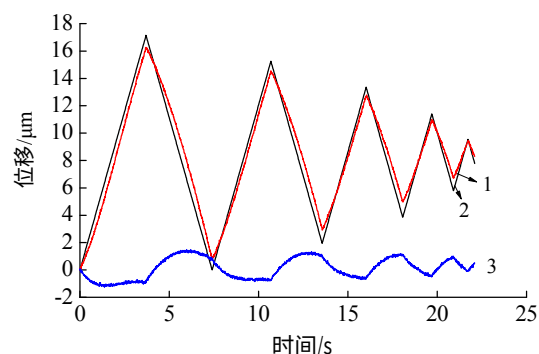


(b) 施加前馈控制, 1 为受前馈控制位移, 2 为理想位移, 3 为误差

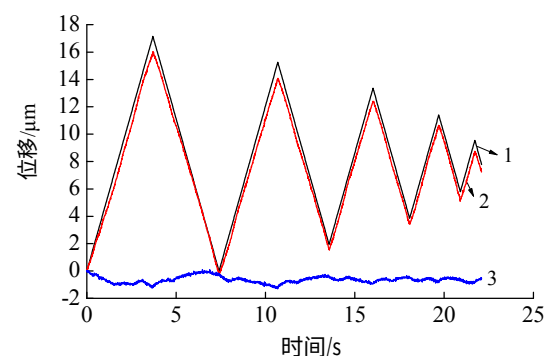
图 6 平台的阶跃响应

3.2.2 三角波输入

图 7 给出了理想位移为变幅值三角波时压电微定位平台未受控制和受前馈控制的响应. 由图 7(a)可知, 在没有控制的情况下, 当期望平台输出最大值为 $17\text{ }\mu\text{m}$ 的变幅值三角波位移时, 其实测位移相对于理想位移的误差中线变化范围为 $-1.15\sim 1.35\text{ }\mu\text{m}$; 从图 7(b)可知, 在前馈控制作用下, 当期望平台输出最大值为 $17\text{ }\mu\text{m}$ 的变幅值三角波位移时, 其实测位移相对于理想位移误差中线变化范围为 $-1.15\sim -0.05\text{ }\mu\text{m}$. 这进一步验证了设计前馈控制器在减小压电微定位平台迟滞误差方面的有效性.



(a) 没有施加控制, 1 为未受控制位移, 2 为理想位移, 3 为误差



(b) 施加前馈控制, 1 为理想位移, 2 为受前馈控制位移, 3 为误差

图 7 平台的变幅值三角波响应

4 结语

通过对描述对象迟滞非线性的 PI 模型的阈值进行优化, 建立了压电微定位平台的迟滞模型, 所建模型相对于现有模型可大大减少迟滞算子数, 且不含权重为零的无效算子.

基于所建平台迟滞模型, 实现了平台的前馈控制. 结果表明, 平台达到 $5\text{ }\mu\text{m}$ 理想阶跃值的响应时间为 0.01 s ; 当期望平台输出最大值为 $17\text{ }\mu\text{m}$ 的变幅值三角波位移时, 其实测位移相对于理想位移的误差中线变动范围为 $-1.15\sim -0.05\text{ }\mu\text{m}$; 所设计前馈控制器可使平台具有较快的响应速度, 并可有效地减小平台的迟滞误差.

参考文献:

- [1] HASSANI V, TJAHJOWIDODO T, DO T N. A survey on hysteresis modeling identification and control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 49: 209-233.
- [2] 陈辉, 谭永红, 周杏鹏, 等. 压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1):88-95.
- [3] WOLF F, SUTOR A, RUPITSCH S J, et al. Modeling

- and measurement of creep- and rate-dependent hysteresis in ferroelectric actuators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 172:245-252.
- [4] 陈远晟. 压电驱动器的迟滞非线性建模与控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [5] 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.
- [6] ALJANAIDEH O, HABINEZA D, RAKOTONDRABE M, et al. Experimental comparison of rate-dependent hysteresis models in characterizing and compensating hysteresis of piezoelectric tube actuators[J]. *Physica B*, 2016, 486:64-68.
- [7] 张桂林, 张承进, 李康, 等. 基于PI迟滞模型的压电驱动器自适应辨识与逆控制[J]. *纳米技术与精密工程*, 2013, 11(1):85-89.
- [8] 吴伊玲, 刘延霞, 张振东, 等. 基于PI迟滞模型的压电陶瓷复合控制算法研究[J]. *压电与声光*, 2015, 37(6): 950-956.
- [9] 胡兵. 压电陶瓷执行器迟滞非线性模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [10] EIELSEN A A, GRAVDAHL J T, PETTERSEN K, et al. Tracking control for a piezoelectric nanopositioner using estimated states and feedforward compensation of hysteresis[J]. *Mechatronics*, 2010, 10:96-104.
- [11] 唐强, 吉方, 陈东生, 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.
- [12] YANG M J, GU G Y, ZHU L M. High-bandwidth tracking control of piezo-actuated nanopositioning stages using closed-loop input shaper[J]. *Mechatronics*, 2014, 24: 724-733.
- [13] ILSSAR D, BUCHER I, FLASHNER H. Modeling and closed loop control of near-field acoustically levitated objects[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 85:367-381.
- [14] 胡俊峰, 郝亚洲, 徐贵阳, 等. 一种新型微操作平台的精确运动控制[J]. *机械科学与技术*, 2016, 35(2):216-221.
- [15] KUHNEN K. Modeling, identification and compensation of complex hysteretic nonlinearities: A modified Prandtl-Ishlinskii approach[J]. *European Journal of Control*, 2003, 9:407-418.

Feedforward control of a piezoelectric micro-positioning stage based on threshold-optimization hysteresis model

SONG Lin, CUI Yu-guo*, WAN Guang-ji, ZHAO Yu-jie, LIU Er-chun, FANG Fan
(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to reduce the hysteresis error of the piezoelectric micro-positioning stage, the feedforward controller is designed. Firstly, the threshold of the hysteresis model of the stage is optimized and the minimum number of operators satisfying the model accuracy is obtained, so as to make the established hysteresis model meet the requirements of precision and the accuracy remains the same at each threshold point. Secondly, a PI (Prandtl-Ishilinskii) hysteresis model of the stage is established. Lastly, the feedforward controller of the stage is designed by the inverse calculation of the hysteresis model. Thus, under the feedforward control, the response time of the stage is 0.01 s at an ideal step of 5 μm , and the variation range of the central line of steady state error is 0.40~0.50 μm . Furthermore, when the desired output of the stage is the triangular wave with maximum displacement amplitude of 17 μm , the variation range of the measured displacement is -1.15~-0.05 μm comparing with the error central line of the ideal displacement. The designed feedforward controller can reduce the hysteresis error of piezoelectric micro-positioning stage effectively.

Key words: piezoelectric micro-positioning stage; hysteresis modeling; threshold optimization; feedforward control

(责任编辑 史小丽)