

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.013

基于正切函数的压电驱动磁滞建模及其控制

席守治, 赖磊捷

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:压电陶瓷驱动器具有迟滞、蠕变等非线性特性,降低了微纳米定位平台的精度,因此,课题组通过建立压电陶瓷微位移驱动器的磁滞模型以提高精密定位系统的控制精度,并且设计有效的控制系统加以实验验证。课题组建立了基于正切函数的磁滞模型,将磁滞模型串联在系统中,成功抑制了系统的磁滞效应。在控制系统设计中,采用了逆模型控制、PID控制和PID+前馈控制3种控制策略对微位移实验平台进行控制,验证了模型的精确性和可行性。通过对比分析实验结果可得:实验中的3种控制策略均能有效控制微位移平台的运动,其中以PID+前馈控制的控制效果最为优秀。

关键词:微位移平台;压电陶瓷;迟滞模型;逆模型控制;PID+前馈控制

中图分类号:TH703.8;TM282 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)05-0074-05

Research on Hysteresis Modeling and Control of Piezoelectric Drive Based on Tangent Function

XI Shouzhi, LAI Leijie

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Piezoelectric ceramic actuators have non-linear characteristics such as hysteresis and creep, which reduce the accuracy of micro-nano positioning platforms. The hysteresis model of the piezoelectric ceramic micro-displacement actuator was established to improve the control accuracy of the precision positioning system, and an effective control system was designed for experimental verification. The hysteresis model based on the tangent function was established and connected in series in the system, and the hysteresis effect of the system was successfully suppressed. In the design of the control system, three control strategies including inverse model control, PID control and PID + feedforward control were used to control the micro-displacement experimental platform to verify the accuracy and feasibility of the model. In addition, through comparative analysis of the experimental results, it is concluded that the three control strategies in the experiment can effectively control the movement of the micro-displacement platform, and the control effect of PID + feedforward control is the best.

Keywords: micro-displacement platform; piezoelectric ceramics; hysteresis model; inverse model control; PID + feedforward control

精密定位技术作为精密制造、精密测量和精密驱动中的关键技术,正在突破传统的光、机、电的框架,被广泛应用于半导体技术^[1]、显微镜技术^[2]、微型机械制造^[3]及超精密加工^[4]等领域中。由于压电陶瓷驱动器具有体积小、位移分辨率高、频响高和承载能力强等优点,以及柔性机构具有无滑动摩擦、无迟滞、无需润滑和

装配等优点,因此基于压电陶瓷驱动器和柔性铰链的微位移平台被广泛应用于纳米级精密定位平台中。但是压电陶瓷驱动器本身固有的迟滞和蠕变等非线性特性,对减小精密定位平台的误差提出了挑战。所以,建立压电陶瓷的微位移平台驱动器的磁滞模型,并设计有效的控制系统对提高精密定位系统精度具有重要意义。

收稿日期:2020-03-08;修回日期:2020-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605275)。

第一作者简介:席守治(1992),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为柔性微纳米定位与控制。通信作者:赖磊捷(1984),男,浙江宁波人,博士,副教授,研究生导师,主要研究方向为微位移驱动控制。E-mail:lailj@sues.edu.cn

为了模拟压电陶瓷微位移器的磁滞特性,国内外学者对压电陶瓷微位移驱动器的模型方案进行了大量研究。例如:采用多项式拟合模型的方法,基于压电陶瓷执行器位移-电压曲线各升程之间、各回程之间的相似性,建立了一种新的简单实用的压电陶瓷执行器的迟滞非线性模型^[5];基于 Maxwell-Slip 模型用 Simulink 模块仿真得到了压电陶瓷驱动器的输出位移和输出力的关系,将两者结合就能得到平台的工作空间^[6];重庆大学的王代华等采用 Bouc-Wen 模型模拟迟滞分量,提出了一种表征 WTYD 型压电陶瓷微位移器的输出位移与驱动电压之间迟滞关系的 Bouc-Wen 模型,并建立了相应的参数辨识方法^[7];周时禹利用多项式对磁滞曲线进行建模,并利用逆模控制、PID 控制和 PID + 前馈控制 3 种控制方法,得到了较好的控制结果^[8];周晓峰推导了压电陶瓷微位移器的 Preisach 迟滞非线性模型,并完成实验验证,还对其进行开环控制、PID 反馈控制和 Preisach 模型前馈的 PID 控制,最后进行了仿真和实验研究^[9]。

为了简化建模过程,课题组基于正切函数对压电陶瓷微位移平台进行磁滞建模,然后将磁滞逆模型串联在系统中来消除系统的磁滞特性,大大减小系统跟踪误差。另外,本文共采用逆模型控制、PID 闭环控制和 PID 闭环反馈 + 前馈控制 3 种控制策略对压电陶瓷微位移实验平台进行轨迹跟踪实验,验证了实验中的 3 种控制策略均能有效控制微位移平台的运动,其中 PID + 前馈控制效果最优。

1 基于正切函数的磁滞模型

1.1 磁滞曲线的相似性

对应相同的输入电压,压电材料在磁滞曲线上的不同小段响应出不同的位移值。由于它们都是基于相同物理模型产生的偏差,则存在一定的相似性。如图 1 所示,压电陶瓷驱动器的输入输出电压经过归一化处理得到上升磁滞曲线。显然,各上升曲线间存在相似性,即收敛于同一个点,只是在形状和收敛速度上略有区别。文中把经过最初起始点的那条上升曲线称为上升参考曲线,记作 $P_0(U)$,其中 P 代表位置,单位为 μm ; U 为电压,单位为 V 。对于其他的每一段上升曲线,我们记作 $P_n(U)$;并且把它们各自的起始点的电压称作拐点电压,记作 U_0 ;收敛点的电压记作 U_m 。

如图 2 所示,把 $P_{n-1}(U)$, $P_n(U)$ 和 $P_{n+1}(U)$ 的上升曲线在拐点电压处的位移值定义为零,得到这 3 条趋近于平行的相对位置曲线。显然,相对位置和参考曲线的位置基本成线性相似关系。

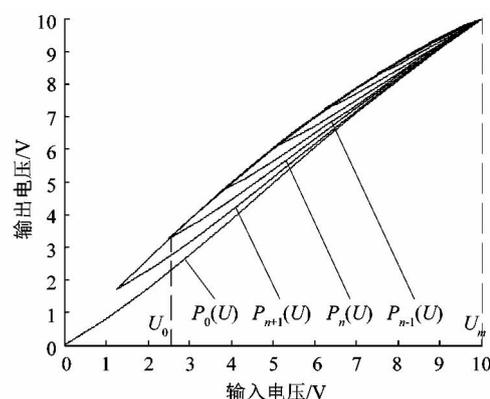


图 1 上升磁滞曲线

Figure 1 Rising hysteresis curve

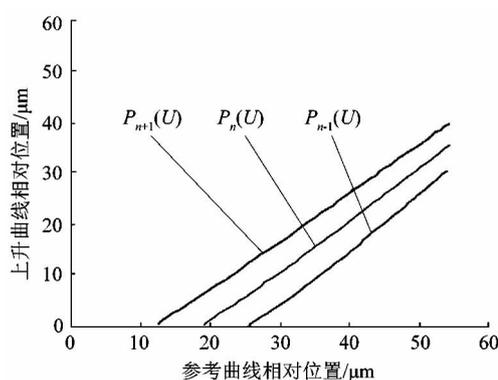


图 2 上升曲线相对位置

Figure 2 Relative position of rising curve

同理,如图 3 所示,在下降曲线中也存在这样的相似关系。其中, $D_0(U)$ 是初始下降点的那条下降参考曲线, $D_n(U)$ 为每一段上升曲线。

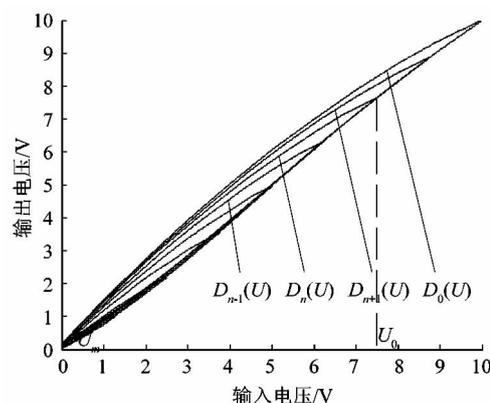


图 3 下降磁滞曲线

Figure 3 Falling hysteresis curve

1.2 基于正切函数磁滞建模

极限曲线拟合:设 $p_a = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4]$, 选用正切函数作为拟合函数,对上升参考曲线和下降参考曲线分别拟合。拟合公式如下:

$$P_0(U) = a_1 \tanh(a_2 U + a_3) + a_4; \quad (1)$$

$$D_0(U) = a_1 \tanh(a_2 U + a_3) + a_4. \quad (2)$$

如图4所示,运行 MATLAB 中的 Isqcurvefit 命令,得到上升参考曲线的正切函数系数向量:

$$p_a = [9.396\ 0\ 0.118\ 6\ 0.599\ 1\ 5.024\ 0]. \quad (3)$$

下降参考曲线的正切函数系数向量:

$$p_a = [8.860\ 7\ 0.136\ 6\ 0.332\ 1\ 3.033\ 5]. \quad (4)$$

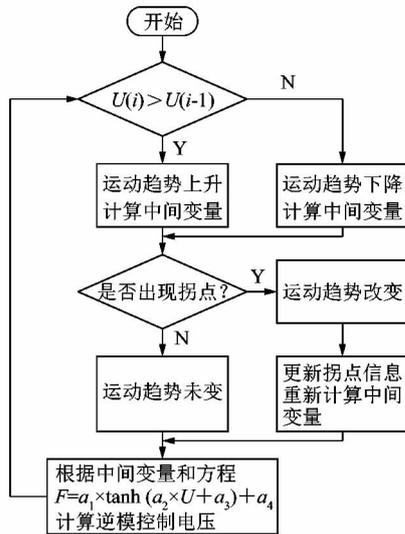


图4 磁滞建模程序框图

Figure 4 Block diagram of hysteresis modeling

由拟合函数(1)和(2)得到极限上升曲线:

$$P_0(U) = 9.396\ 0 \tanh(0.118\ 6U - 0.599\ 1) + 5.024\ 0. \quad (5)$$

同理可得到,极限下降曲线:

$$D_0(U) = 8.860\ 7 \tanh(0.136\ 6U - 0.332\ 1) + 3.033\ 5. \quad (6)$$

根据普通上升曲线($P_n(U)$)与参考上升曲线($P_0(U)$)的相似关系,建立上升曲线的数学模型,即

$$P_n(U) = kP_0(U) + b. \quad (7)$$

那么

$$\left. \begin{aligned} P_n(U_0) &= kP_0(0) + b, \text{ 当 } U = U_0 \text{ 时;} \\ P_n(U_m) &= kP_0(U_m) + b, \text{ 当 } U = U_m \text{ 时.} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

解方程并简化,得

$$k = \frac{P_n(U_m) - P_n(U_0)}{P_0(U_m) - P_0(0)}; \quad (9)$$

$$b = P_n(U_0) - kP_0(0). \quad (10)$$

由于任何一条曲线都是向极限点收敛,所以通过 $P_0(U)$ 来计算以 $(U_0, P_0(U_0))$ 为起点, $(U_m, P_0(U_m))$ 为终点的上升曲线,得到数学模型函数表达式,即

$$P_n(U) = kP_0(m(U - U_0)) + b. \quad (11)$$

将式(9)和式(10)代入式(11)可得

$$m = \frac{U_m - 0}{U_m - U_0}. \quad (12)$$

综上所述,可得上升磁滞曲线的数学模型:

$$P_n(U) = \left\{ P_0 \left[\frac{U_m - 0}{U_m - U_0} (U - U_0) \right] - P_0(0) \right\} \cdot$$

$$\frac{P_n(U_m) - P_n(U_0)}{P_0(U_m) - P_0(0)} + P_n(U_0). \quad (13)$$

同理,可得一般下降磁滞曲线的数学模型:

$$D_n(U) = \left\{ D_0 \left[\frac{U_m - 0}{U_m - U_0} (U - U_0) \right] - D_0(0) \right\} \cdot$$

$$\frac{D_n(U_m) - D_n(U_0)}{D_0(U_m) - D_0(0)} + D_n(U_0). \quad (14)$$

2 基于正切函数磁滞模型实验验证与控制研究

2.1 实验装置

如图5所示,整个纳米定位系统由工控机、数据采集卡、驱动电源和纳米定位平台这4部分连线组成。

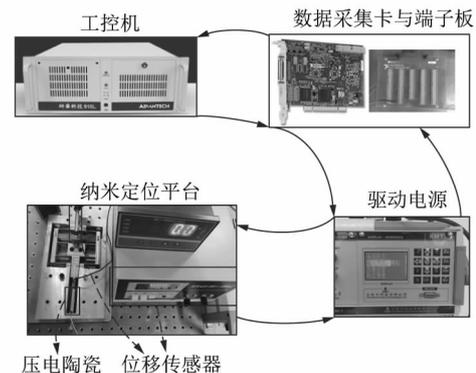


图5 纳米定位系统总体结构

Figure 5 General structure of nano positioning system

数据采集卡型号为 PCI-6221, 采样率为 250 kS/s, 分辨率为 16 位, 模拟电压输入输出范围均是 $(-10 \sim 10\text{ V})$ 。压电陶瓷驱动器由上海纳动纳米位移技术有限公司生产, 型号为 PAL100VS12, 刚度为 $10\text{ N}/\mu\text{m}$, 空载谐振频率为 10 kHz。驱动电源系统中的信号放大器采用模块化 (PZT) 控制系统, 型号为 XE500D1。纳米定位平台是基于双平行四边形机构的波纹梁加持型双平行四边形柔性纳米定位平台, 刚度为 $0.083\ 8\text{ N}/\mu\text{m}$, 固有频率为 150 Hz。位移传感器由三门峡中原测量仪器有限公司生产, 其型号为 DGS-6C, 分辨率为 100 nm。

2.2 模型验证

数学模型的验证分为 3 步: 选择目标曲线、实际电压的检测和数据对比处理。

首先,如图 6 所示,取任意电压变化曲线为目标曲线。

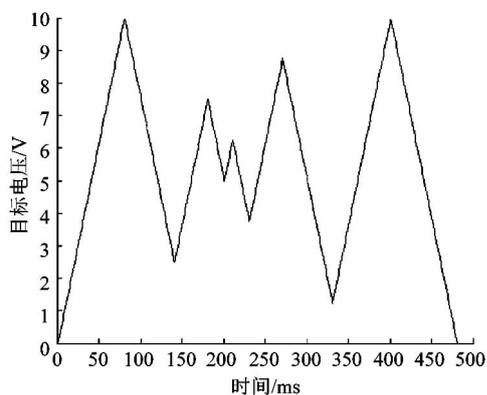


图 6 目标曲线
Figure 6 Target curve

如图 7 所示,经过实际电压的检测,并通过对比实测输出电压和目标输入电压,可以发现实测电压有明显的偏差。

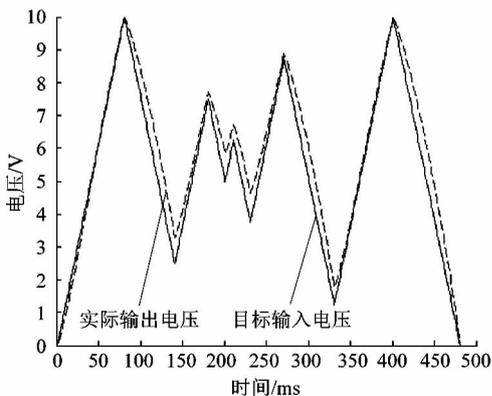


图 7 输入输出电压对比
Figure 7 Comparison chart of input and output voltage

如图 8 所示,通过对比基于正切函数拟合建立的数学模型计算得到的模拟电压与实测电压,发现两者基本吻合,证明了数学模型在一定意义上削弱了压电陶瓷驱动器的磁滞效应。

另外,为了更直观地对比 2 组数据的误差大小,课题组把目标电压与实测电压之间的差值占比作为误差,进行对比分析,如图 9 所示。显然,基于正切函数拟合的数学模型计算结果比实测电压的误差曲线更平稳,控制误差明显减小,验证了基于正切函数建立的磁滞数学模型的正确性和可行性。

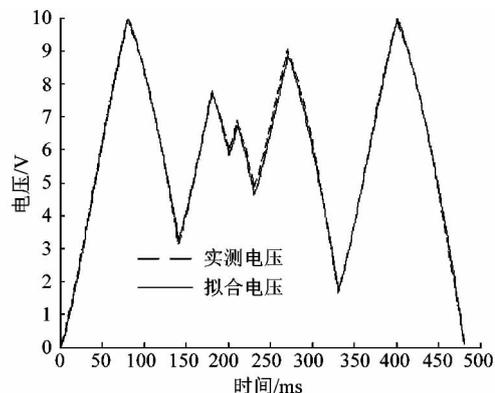


图 8 模型模拟与实测数据对比
Figure 8 Comparison of model simulation and measured data

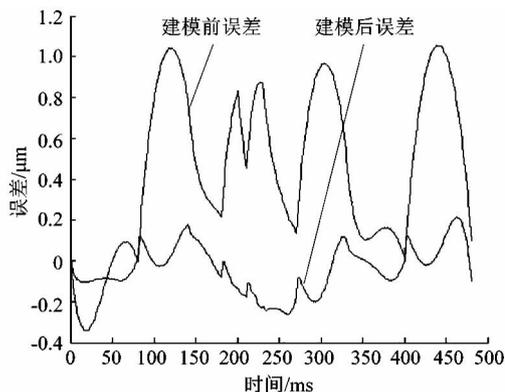


图 9 建模前后误差比较曲线
Figure 9 Error comparison curve before and after modeling

2.3 控制研究

课题组采用开环控制、逆模型控制、PID 控制和结合前馈的 PID 控制对微定位系统进行控制研究。如图 10 所示,控制曲线选采样频率为 500 Hz,周期为 2 s,幅度为 3 V 的正弦曲线作为测试曲线进行控制。

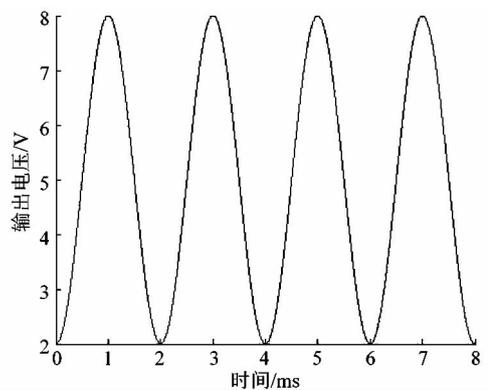


图 10 测试曲线
Figure 10 Test curve

首先,采用逆模型控制。如图 11 所示,逆模控制流程图中, H^{-1} 表示逆模型控制模块,表示 H 具有滞回特性的压电陶瓷驱动器, G 表示具有线性特征的微动平台。

其次,采用传统 PID 闭环控制。PID 控制是将比例、积分和微分 3 种控制器组合使用的控制策略。其组成包括 PID 控制器和被控对象 2 部分。如图 12 所示, $r(t)$ 是给定值, $y(t)$ 是系统的实际输出值,给定值与实际输出值构成控制偏差 $e(t)$, $e(t)$ 作为 PID 控制器的输入, $u(t)$ 为 PID 控制器的输出和被控对象的输入。

由于传统 PID 控制的参数依赖前人经验来确定,所以获得合适的参数难度比较大,即使是经验所得也不是最好的控制效果。所以,课题组还采用 PID + 前馈控制。如图 13 所示,PID + 前馈控制可以兼容逆模型控制和 PID 控制的优点,从而达到更好的控制效果。

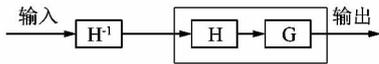


图 11 逆模型程序方块图

Figure 11 Inverse model program flowchart

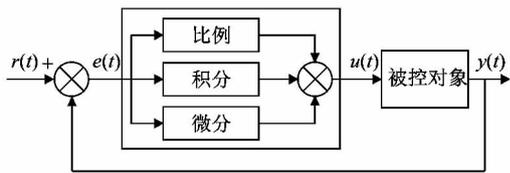


图 12 PID 控制流程图

Figure 12 PID control flowchart

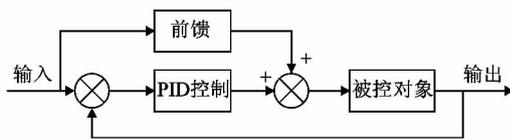


图 13 PID + 前馈控制程序

Figure 13 PID + feedforward control program

综合以上 3 种控制方法,分别对建模后的系统进行控制实验并检测数据,结果如图 14 所示。由此可见,3 种控制策略的控制结果都较准确,其中 PID + 前馈控制的控制效果最优,逆模型控制的控制效果次之。由于系统存在小幅颤,传统 PID 控制效果稍差。

3 结语

课题组基于正切函数建立了压电陶瓷微位移器的磁滞模型,然后设计微定位平台实验系统,将磁滞逆模

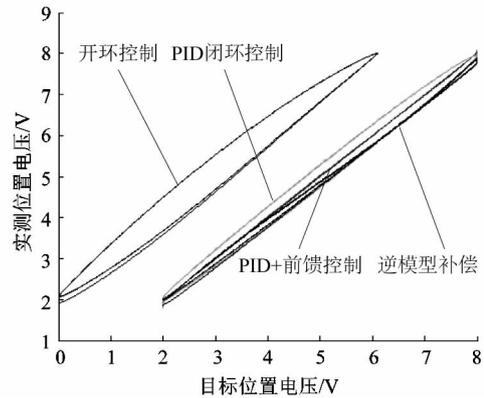


图 14 4 种控制策略效果对比

Figure 14 Comparison of effects of four control strategies

型串联在系统中,系统的磁滞效应被大大削弱,控制误差也明显降低。在控制系统设计中,共采用了逆模型控制、PID 控制和 PID + 前馈控制 3 种控制策略对微位移实验平台进行精确定位和轨迹跟踪实验,并对实验结果进行分析比较。在实验中,验证了模型的准确性和可行性,还验证了 3 种控制策略均能有效控制微位移平台的运动,其中以 PID + 前馈控制的控制效果最好。总之,基于正切函数建立的磁滞模型,再结合 PID + 前馈控制,能够较好地抑制压电陶瓷驱动器的磁滞特性,并实现精确快速的定位。

参考文献:

- [1] 郝晓红,梅雪松,张东升. 一种新型磁悬浮纳米定位工作台的研究[J]. 机械科学与技术,2009,28(5):89-93.
- [2] ZERGIOTI I, MAILIS S, VAINOS N A, et al. Microdeposition of metals by femtosecond excimer laser[J]. Applied Surface Science, 1998,127/128/129: 601-605.
- [3] NERGUIZIAN V, RAFAF M, DESSAINT L A, et al. MEMS magnetic linear motor for micro applications[J]. WSEAS Transactions on Circuits and Systems,2005,4(4):267.
- [4] KIM J D, NAM S R. Development of a micro-depth control system for an ultra-precision lathe using a piezo-electric actuator [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37 (4):495-509.
- [5] 崔玉国. 压电陶瓷自感知执行器及其驱动微动工作台控制方法的研究[D]. 大连:大连理工大学,2003:38-51.
- [6] 丁冰晓. 平面三自由度并联微操作平台的设计与分析[D]. 天津:天津理工大学,2015:33-42.
- [7] 王代华,朱炜. WTYD 型压电陶瓷微位移器的迟滞特性建模与实验验证[J]. 光学精密工程,2010,18(1):211-217.
- [8] 周时禹. 约束刻蚀剂层微纳加工仪器的设计与开发[D]. 上海:上海交通大学,2013:31-50.
- [9] 周晓峰. 基于 PZT 微定位系统控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2004:47-85.