

文章编号 1004-924X(2013)02-0394-06

基于动态模糊系统模型的压电陶瓷驱动器控制

李朋志^{1*}, 葛川¹, 苏志德^{1,2}, 闫丰¹, 隋永新¹, 杨怀江¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学
国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:针对压电陶瓷驱动器(PZT)的迟滞非线性对周期性超精密跟踪精度的影响,对基于 Takagi-Sugeno(T-S)型模糊规则的动态模糊系统(DFS)前馈+PI 控制方法进行了研究。介绍了 DFS 模型前馈部分和结论部分的辨识方法;结合直接逆模型控制和迭代学习控制的思想,提出了周期性轨迹跟踪的 DFS 前馈+PI 控制方法。最后,针对 20 Hz 的三角波和正弦波期望轨迹进行了跟踪控制实验。实验结果表明:提出的控制方法对三角波和正弦波期望轨迹的最大跟踪误差分别为 0.25% 和 0.27%,相对于 PI 控制,跟踪精度分别提高了 52 倍和 64 倍,而最大跟踪绝对误差分别降低到 5.1 nm 和 5.5 nm。结果显示这种控制方法易于实现,周期性轨迹跟踪精度高。

关键词:压电陶瓷驱动器(PZT);迟滞;动态模糊系统;前馈;轨迹跟踪

中图分类号:TP273.1;TN384 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0394

Control of piezoelectric ceramic actuator via dynamic fuzzy system model

LI Peng-zhi^{1*}, GE Chuan¹, SU Zhi-de^{1,2}, YAN Feng¹, SUI Yong-xin¹, YANG Huai-jiang¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: kindrobot@163.com

Abstract: As the nonlinear hysteresis characteristic of a Piezoelectric Ceramic Actuator(PZT) has a big impact on periodic ultra-precise tracking accuracy, this paper investigates a methodology which combines the Dynamic Fuzzy System(DFS) feed-forward based on Takagi-Sugeno(T-S) fuzzy rule with the PI control. The identification methods of DFS antecedent and consequent structures are introduced. Then, DFS feed-forward with PI control strategy of periodic trajectory tracking is proposed according to theories of direct inverse model control and iterative learning control. Finally, the tracking control experiment is performed on a 20Hz triangular trajectory and a sinusoidal desired trajectory. Experimental results indicate that the proposed control method can achieve 0.25% and 0.27% maximum tracking errors for triangular and sinusoidal trajectories, which are 52 and 64 times as accurate as that of PI control. Moreover, the maximum absolute tracking errors have been reduced to 5.1 nm and

收稿日期:2012-11-31;修订日期:2012-12-10.

基金项目:02 重大专项资助项目(No. 2009ZX02205)

5.5 nm, respectively. It concludes that the methodology can be easily implemented and has high periodic trajectory tracking accuracy.

Key words: piezoelectric ceramic actuator (PZT); hysteresis; dynamic fuzzy system; feed-forward; trajectory tracking

1 引言

压电陶瓷驱动器(PZT)是利用机电耦合效应,即逆压电效应或电致伸缩效应来产生微位移的。由于其具有高刚度、高分辨率、无摩擦和响应速度快等优点,PZT被广泛应用于各种超精密平台中。干涉仪中的移相器和光刻机物镜中光学元件的位置调整也需要PZT来实现。PZT的迟滞特性有以下特点:1)多值映射和非线性。多值映射意味着当加在PZT的电压相同时,在不同的时刻可能获得不同的输出位移。一般情况下,电压升高和降低时相同电压所对应的输出位移会有所不同,二者的差值可称为输出位移间隙。非线性意味着它不是连续可微的,这使得传统的控制理论和建模方法不再适用。2)频率和幅度依赖性。当所加的输入电压是正弦波信号时,其所呈现的迟滞特性曲线形状与该信号的频率和幅度有关。当频率小或幅度小时,迟滞曲线间隙相对小些。随着它们的升高,间隙也会逐渐变大。此外,频率改变也会影响迟滞曲线环形状的倾斜方向。PZT的迟滞特性会使其跟踪精度严重下降,因此需要采取适当的控制手段来提高PZT的跟踪精度。贾宏光^[1]基于变比模型构造了一种带有前馈补偿的压电元件复合控制结构。孙立宁^[2]采用单神经元自适应PID算法对压电陶瓷进行了相关的控制研究。赖志林^[3]提出了一种针对迟滞特性的动态滑模跟踪控制器设计方法。Zhang和Tan^[4-5]针对迟滞特性进行了神经网络建模及控制研究。Yong^[6]使用电荷驱动技术来驱动PZT,采用IRC和前馈控制策略进行轨迹跟踪。Li^[7]使用前馈和反馈控制技术针对二维并联微动台低频率的三角波和正弦波轨迹进行了跟踪。

本文基于直接逆模型控制和迭代学习控制的思想,采用动态模糊系统(Dynamic Fuzzy System, DFS)对PZT的迟滞非线性建模,然后结合增量式数字PI控制算法,对周期性轨迹跟踪进行

闭环控制,达到了很高的跟踪精度。

2 DFS迟滞模型

PZT的迟滞特性不仅具有多值映射的非线性的特点,而且也与所加电压信号的频率和幅度有关,而Takagi-Sugeno(T-S)型^[8]DFS非常适用于复杂非线性对象的建模。

为了提高建模精度,采用 L 个1阶T-S型模糊规则,其第 l 个模糊规则如下:

$$R^l: \text{IF } y(k-1) \text{ is } A_1^l \text{ and } y(k) \text{ is } A_2^l \\ \text{THEN } u(k) = q_{1l}y(k-1) + q_{2l}y(k) + q_{3l}, \quad (1) \\ 1 \leq l \leq L, l \in \mathbf{N} (\mathbf{N} \text{ 为自然数集})$$

其中IF前提部分中的 $A_i^l (i=1,2)$ 是式(2)中具有三角形隶属度函数的模糊集合,THEN结论部分中的 $q_{1l}y(k-1) + q_{2l}y(k) + q_{3l}$ 是模糊规则的结论数值,是一个确定的数, q_{1l}, q_{2l}, q_{3l} 是相应的系数,也是确定的数。 $u(k)$ 是DFS模型的输出,其值为PZT系统在 k 时刻的输入电压。 $y(k-1), y(k)$ 是DFS模型的输入,其值为PZT系统在 $k-1, k$ 时刻的输出位移。

则DFS有2个输入和1个输出,相应的输入变量论域可记为 $Y_i (i=1,2)$ 。

对上述T-S型DFS模型的前提部分和结论部分分开辨识,对输入变量先进行模糊聚类,确定前提部分中的输入变量的隶属度函数分布,在这种划分下,再辨识结论部分中的参数。

基于最大隶属度和最近邻居^[9]结合的方法,指定一个超半径^[10] $r_0 \in (0.5, 1.0]$,根据作者已发表文献的方法^[11],对前提部分进行辨识,产生系统的多维模糊集合,则产生的多维模糊集合的数目为 L 。

第 i 个($i=1,2$)论域 Y_i 上的模糊集合 A_i^l 的隶属度函数定义如下:

$$\mu_{A_i^l}(y) = \begin{cases} 1 - \frac{|y - a_i^l|}{w_i^l}, & y \in [a_i^l - w_i^l, a_i^l + w_i^l] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

多维隶属度函数定义为:

$$A^l(\mathbf{y}_k) = 1 - rd^l(\mathbf{y}_k) = 1 -$$

$$\min \left\{ \sqrt{\frac{(a_1^l - y(k-1))^2 + (a_2^l - y(k))^2}{(\omega_1^l)^2 + (\omega_2^l)^2}}, 1 \right\}, \quad (3)$$

其中: $\mathbf{y}_k = [y(k-1), y(k)]^T$ 。

定义第 l 个模糊基函数(Fuzzy Basis Function, FBF)为:

$$p^l(\mathbf{y}_k) = \frac{A^l(\mathbf{y}_k)}{\sum_{l=1}^L A^l(\mathbf{y}_k)}, \quad (4)$$

利用加权平均法可得到 DFS 的输出

$$\hat{u}_k = \hat{u}(k) = \sum_{l=1}^L p^l(\mathbf{y}_k) \mathbf{q}_l \cdot \tilde{\mathbf{y}}_k, \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{q}_l = [q_{l1}, q_{l2}, q_{l3}]$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = [y(k-1), y(k), 1]^T$$

模糊系统中 L 个模糊规则及相应的 FBF 已知,可根据 PZT 系统的 n 个输入输出数据 $[\mathbf{y}_k; u_k] = [[y(k-1), y(k)]^T; u(k)] (k=1, 2, \dots, n)$, 通过使用批处理最小二乘法或递推最小二乘法最小化 E , 辨识得到结论部分中的参数 \mathbf{q}_l 的数值。

E 指标取为下式:

$$E = \sum_{k=1}^n \left[u_k - \sum_{l=1}^L p^l(\mathbf{y}_k) \mathbf{q}_l \cdot \tilde{\mathbf{y}}_k \right]^2, u_k = u(k). \quad (6)$$

3 DFS+PI 控制方法

采用非线性系统的逆模型与系统本身相串联可以消除其非线性影响,直接逆模型的建立方法是将被控系统的输入和输出数据分别作为所建立模型的输出和输入数据来训练该模型。

迭代学习控制是通过某种迭代修正算法达到某种控制目标的改善,它能在给定的时间 $t \in [0, t_d]$ 内,按照一定的学习控制算法通过多次重复的运行,使控制输入趋向于期望的控制输入 $u_j(t) \rightarrow u_d(t)$,从而使系统输出趋向于给定的期望输出 $y_j(t) \rightarrow y_d(t)$, j 表示迭代次数。

基于直接逆模型和迭代学习控制的思想,采用 DFS 对 PZT 系统的迟滞非线性进行建模,然后结合增量式数字 PI 控制算法,对周期性轨迹跟

踪进行闭环控制,其控制框图如图 1 所示。

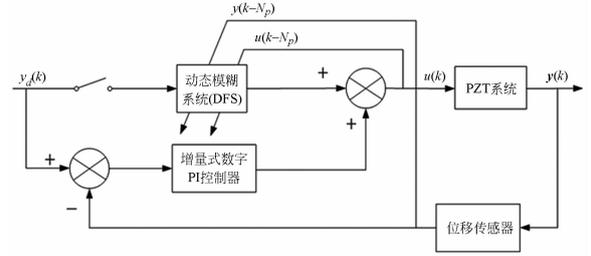


图 1 DFS+PI 控制框图

Fig. 1 Block diagram of DFS+PI control

增量式数字 PID 控制算法为:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

$$\Delta u(k) = k_p (\text{error}(k) - \text{error}(k-1)) + k_i \cdot \text{error}(k) + k_d (\text{error}(k) - 2 \cdot \text{error}(k-1) + \text{error}(k-2)). \quad (7)$$

其中 k_p, k_i, k_d 分别为比例、积分和微分系数。下文中实际应用于 PZT 系统时,微分系数 k_d 取为 0,其原因在于:(1)微分控制对噪声干扰比较敏感,会放大现场中的干扰,降低超精密 PZT 系统的分辨率和抗干扰能力,容易引起系统振荡;(2)微分控制的超前调节作用虽能改善系统的动态特性,但由于 PZT 系统固有的迟滞非线性,其实际应用时的作用效果不明显。

对于给定的频率为 f_d 的周期性期望输出轨迹信号 y_d ,图 1 框图中的 N_p 表示一个周期内的采样数,即 $N_p = \frac{1}{f_d \cdot T_s}$, T_s 表示采样时间。

上述控制器的工作过程如下:

Step 1: 开关断开,只有增量式数字 PI 控制器工作的情况下,运行 2 个周期,记录第 2 个周期的 PZT 系统的输入和输出数据。

Step 2: 把所记录的 PZT 系统的输入和输出数据当作 DFS 的输出和输入数据,训练、辨识并建立 DFS 模型。

Step 3: 开关闭合,DFS 和 PI 控制器同时工作,运行 1 个周期,记录这个周期的 PZT 系统的输入和输出数据;然后转向 Step 2 建立新周期内的 DFS 模型,以便在下一个周期使用。

Step 4: 重复 Step 3 直至周期性期望输出轨迹结束。

由此可以看出,控制器每次都根据上个周期

的数据来更新 DFS 模型,然后使用更新的 DFS 模型在当前周期内进行前馈和 PI 控制,这样不断地迭代学习和更新,系统输出会逐渐逼近给定的期望输出。

4 实验结果与分析

为了验证上述 DFS+PI 控制方法的可行性,针对自研干涉仪中的 PZT 移相器进行控制。控制实验在精密环控实验室中进行,移相器放置在光学隔振平台上,型号为德国 Physik Instrumente 公司的 S-900K131,标称行程为 $10\ \mu\text{m}$,放大器的输出电压为 $-35\sim 135\ \text{V}$,D/A 转换器为 20 位。平台位移由内置的电容位移传感器获得,其分辨率小于 $0.5\ \text{nm}$,A/D 转换器为 16 位。实物图如图 2 所示。



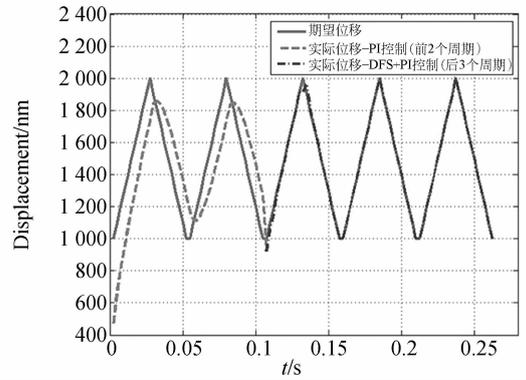
图 2 实验实物图

Fig. 2 Experimental equipment

实验中的期望轨迹输出信号为三角波和正弦波信号,频率为 $20\ \text{Hz}$,偏置为 $1\ \mu\text{m}$,幅度为 $1\ \mu\text{m}$,采样时间为 $2.5\ \text{ms}$ 。

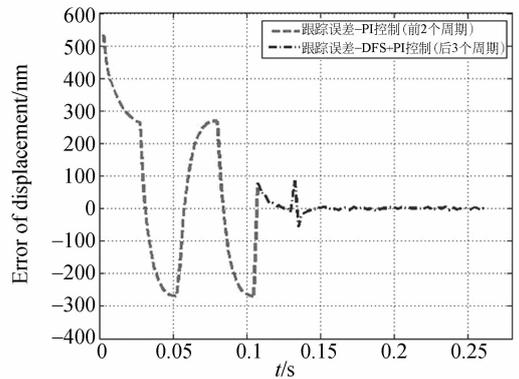
周期性的期望轨迹输出信号取为 5 个周期,三角波轨迹跟踪控制效果见图 3,正弦波轨迹跟踪控制效果见图 4。前 2 个周期为 PI 控制,由于系统的初始位置不在 $1\ \mu\text{m}$,故第 1 个周期起始阶段的跟踪误差较大,PI 控制在第 2 个周期稳定阶段的控制误差有所降低,随着第 3 个周期 DFS 前馈+PI 控制的使用,跟踪误差在每个周期后会有所降低。

控制参数 $k_p=0.1$, $k_i=0.5$, $r_0=0.85$,模糊规则数目 $L=3$ 。定义绝对误差 $e_a=|y_d-y_r|$,相对误差 $e_r=|y_d-y_r|/\max(y_d)\times 100\%$, y_d 为期



(a) 期望轨迹与实际轨迹

(a) Desired and real trajectories



(b) 跟踪误差

(b) Tracking error

图 3 周期性三角波轨迹跟踪控制结果

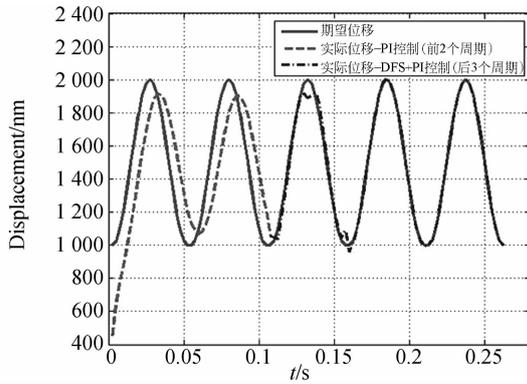
Fig. 3 Results of periodic triangular trajectory tracking control

望轨迹, y_r 为实际轨迹。

三角波轨迹跟踪时,PI 控制在第 2 个周期稳定阶段的最大跟踪绝对误差为 $272.1\ \text{nm}$,最大跟踪相对误差为 13.61% ,而经过 2 个周期的迭代学习和更新后,DFS 前馈+PI 控制在第 5 个周期的最大跟踪绝对误差为 $5.1\ \text{nm}$,最大跟踪相对误差为 0.25% ,跟踪精度提高了 52 倍。

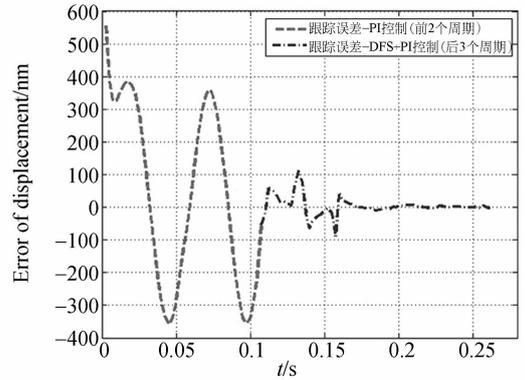
正弦波轨迹跟踪时,PI 控制在第 2 个周期稳定阶段的最大跟踪绝对误差为 $361.1\ \text{nm}$,最大跟踪相对误差为 18.06% ,而经过 2 个周期的迭代学习和更新后,DFS 前馈+PI 控制在第 5 个周期的最大跟踪绝对误差为 $5.5\ \text{nm}$,最大跟踪相对误差为 0.27% ,跟踪精度提高了 64 倍。

由此可见,对于周期性的轨迹跟踪,相对于 PI 控制,DFS 前馈+PI 控制方法能有效提高 PZT 系统的跟踪精度。



(a) 期望轨迹与实际轨迹

(a) Desired and real trajectories



(b) 跟踪误差

(b) Tracking error

图 4 周期性正弦波轨迹跟踪控制结果

Fig. 4 Results of tracking control for periodic sinusoidal trajectory

5 结 论

本文针对 PZT 的迟滞非线性,采用了 T-S 型 DFS 迟滞模型。结合直接逆模型控制和迭代学习控制的思想,针对 20 Hz 的三角波和正弦波期望轨迹进行了 DFS 前馈+PI 控制实验。实验结

果表明:DFS 前馈+PI 控制方法对三角波和正弦波期望轨迹的最大跟踪相对误差分别为 0.25% 和 0.27%,相对于 PI 控制,跟踪精度分别提高了 52 倍和 64 倍,最大跟踪绝对误差分别降低到 5.1 nm 和 5.5 nm。因此,这种控制方法能有效地满足周期性轨迹跟踪的精度要求。

参考文献:

- [1] 贾宏光,郑岩,吴一辉,等. 非线性模型的压电元件复合控制方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1547-1552.
JIA H G, ZHENG Y, WU Y H, *et al.*. PZT actuator control complex arithmetic based on nonlinear model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1547-1552. (in Chinese)
- [2] 孙立宁,孙绍云,曲东升,等. 基于 PZT 的微驱动定位系统及控制方法的研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 55-59.
SUN L N, SUN SH Y, QU D SH, *et al.*. Micro-drive positioning system based on PZT and its control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 55-59. (in Chinese)
- [3] 赖志林,刘向东,耿洁,等. 压电陶瓷执行器迟滞的滑模逆补偿控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1281-1290.
LAI ZH L, LIU X D, GENG J, *et al.*. Sliding mode control of hysteresis of piezoceramic actuator based on inverse Preisach compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1281-1290. (in Chinese)
- [4] ZHANG X L, TAN Y H, SU M Y. Modeling of hysteresis in piezoelectric actuators using neural networks [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23: 2699-2711.
- [5] ZHANG X L, TAN Y H, SU M Y, *et al.*. Neural networks based identification and compensation of rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators [J]. *Physica B*, 2010, 405: 2687-2693.
- [6] YONG Y K, APHALE S, MOHEIMANI S O R. Design, identification, and control of a flexure-based XY stage for fast nanoscale positioning [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2009, 8(1): 46-54.
- [7] LI Y M, XU Q S. Development and assessment of a novel decoupled XY parallel micropositioning platform [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(1): 125-135.
- [8] SUGENO M, YASUKAWA T. A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, 1(1): 7-31.

- [9] WANG L X, MENDEL J M. Generating fuzzy rules from numerical data with applications [J]. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, 1992, 22(6):1414-1427.
- [10] GEORGE T, HARALAMBOS S, GEORGE B. A simple algorithm for training fuzzy systems using input-output data [J]. *Advances in Engineering*

Software, 2003, 34: 247-259.

- [11] LI P Z, GU G Y, LAI L J, *et al.*. Hysteresis modeling of piezoelectric actuators using the fuzzy system [C]. *The 3rd International Conference on Intelligent Robotics and Applications, ICIRA 2010, LNAI*, 2010, 6424(1): 372-382.

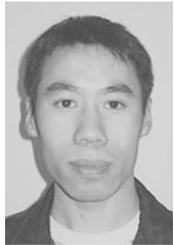
作者简介:



李朋志(1983—),男,安徽阜阳人,硕士,研究实习员,2011年于上海交通大学获得硕士学位,主要从事微定位平台设计、PZT迟滞非线性系统的建模和控制方面的研究。E-mail: kindrobot@163.com



葛川(1985—),男,辽宁丹东人,硕士,研究实习员,2011年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事压电陶瓷动态驱动电源方面的设计与研究。E-mail: gczongheng@163.com



苏志德(1985—),男,河北邢台人,博士研究生,2008年于吉林大学获得学士学位,主要从事干涉仪移相技术及标定方法的研究。E-mail: suzhide111@gmail.com



闫丰(1975—),男,吉林长春人,副研究员,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所博士后出站,目前主要从事光电探测器器件应用及193 nm光刻技术的研究。E-mail: yan.feng@126.com



隋永新(1970—),男,吉林长春人,博士,研究员,硕士生导师,1993年、1996年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,2002年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光刻物镜中光学元件超高精度检测技术方面的研究。E-mail: suiyx@sklao.ac.cn



杨怀江(1966—),男,辽宁丹东人,博士,研究员,博士生导师,1988年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1993年于长春理工大学获得硕士学位,1996年于北京理工大学获得博士学位,主要从事网络信息安全、光学信息融合及深紫外光刻技术的研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)