

文章编号:1004-2474(2013)05-0694-04

压电陶瓷驱动器迟滞非线性的改善方法

陈奇,武秀东,任峰,李虎

(长春理工大学机电工程学院,吉林 长春 130022)

摘要:压电陶瓷驱动器在微位移定位方面被广泛应用,但压电陶瓷驱动器的迟滞非线性严重影响其定位精度,因此,介绍了各种改善压电陶瓷驱动器迟滞非线性特性的方法,并提出了用3次样条插值法和最小二乘曲线拟合法来实现压电陶瓷驱动器的精确定位,改善压电陶瓷驱动器的迟滞非线性特性,实验表明,以上方法可使压电陶瓷驱动器的定位误差小于5%。

关键词:压电陶瓷;压电陶瓷驱动器;迟滞非线性

中图分类号:TM21;TH-39 **文献标识码:**A

The Improvement Methods of Hysteretic Nonlinear Property of Piezoelectric Ceramic Driver

CHEN Qi, WU Xiudong, REN Feng, LI Hu

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The piezoelectric actuators are widely used in the field of micro displacement positioning, but its hysteretic nonlinear property has serious effect on the positioning accuracy of piezoelectric actuators. In this paper, various kinds of methods of improving the hysteretic nonlinear property of piezoelectric actuator have been introduced. The cubic spline interpolation method and least-square curve fitting method have been proposed to achieve the precise positioning of piezoelectric actuators and improve the hysteretic nonlinear property of piezoelectric ceramic actuators. The experimental results have shown that the proposed methods can make the positioning error of piezoelectric actuator down to 5%.

Key words: piezoelectric ceramic; piezoelectric ceramics driver; hysteresis nonlinearity

0 引言

压电陶瓷在实际应用中具有定位精度高,驱动力大和快速响应等优点,而由其制成的压电陶瓷驱动器因其体积小,分辨率高等优势,使其在微位移研究方面占有重要一席,往往被应用于需要位移精度在亚微米级和纳米级的场合中,如航空航天,精密测量,微细加工等高精尖领域中。然而压电陶瓷驱动器在实际应用中因为受许多因素影响^[1],表现出许多不利其定位准确性的特性,而这其中迟滞,蠕变等非线性特性对其定位准确性的影响尤为明显,使其难以准确定位。因此为了使其在应用中能准确定位,就要寻求压电陶瓷或压电陶瓷驱动器的输出位移和输入电压间的关系,并采取一定的控制方法,则可保证其在工作中能定位准确。因此,人们探究出了许

多对压电陶瓷驱动器行程进行控制方法,来改善压电陶瓷驱动器迟滞非线性特性。

1 压电陶瓷驱动器迟滞非线性的改善方法

1.1 PID控制法改善压电陶瓷迟滞非线性

PID(P为比例,I为积分,D为微分)控制是一种较成熟且应用广泛的控制方式^[2]。其一般的控制方案如图1所示。

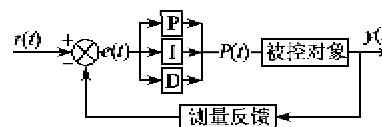


图1 PID控制图

$$P(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

收稿日期:2012-09-24

基金项目:吉林省科技发展计划基金资助项目(241630)

作者简介:陈奇(1987-),男,浙江绍兴人,硕士生,主要从事机械设计及理论方面的研究。E-mail:1669683796@qq.com。

式中: $P(t)$ 为输出信号; K_p 为比例系数; T 为积分时间; T_d 为微分时间; $e(t)$ 为偏差信号。为了适应计算机处理信息, 应将式(1)进行离散化, 则

$$P(k) = K_p e(k) + K_p \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + K_p \frac{T_d}{T} \cdot [e(k) - e(k-1)] + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (2)$$

PID 控制法在压电陶瓷驱动器的调节过程为先确定压电陶瓷驱动器的目标位移, 再确定各个参数, 通过位移检测装置采集压电陶瓷驱动器的实际位移值, 把压电陶瓷驱动器的目标位移和它实际位移值作差可得 $e(k)$, 并通过计算得出 $P(t)$, 调整压电陶瓷驱动器的输入电压, 从而调整其输出位移, 使输出位移达到目标位移, 这样就使压电陶瓷驱动器定位准确, 从而改善压电陶瓷驱动器迟滞非线性特性。

1.2 基于 Preisach 模型的定位控制改善压电陶瓷驱动器的非线性

1953 年, Ferenc Preisach 提出了 Preisach 模型, 其最初是用来描述铁磁材料的迟滞特性, 后被应用到压电陶瓷迟滞非线性的建模中^[3]。其是由最简单的滞回发生器 γ_q 叠加构造而成^[4-5], 如图 2 所示。

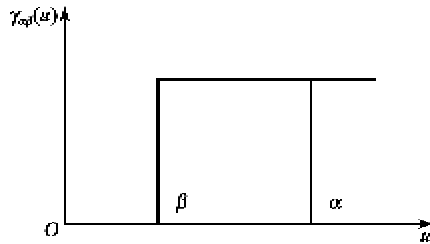


图 2 基本迟滞算子

图 2 中, α 和 β 为输入电压的转变值, α 为使滞回发生器为 1 的上升域值, β 为使滞回发生器变为 0 的电压下降阈值, 通过给定权重函数 $\mu(\alpha, \beta)$, 则模型可描述为

$$x(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_q[u(t)] d\alpha d\beta \quad (3)$$

式中: $x(t)$ 为驱动器的输出位移; $u(t)$ 为输入电压。

Preisach 模型的几何描述如图 3、4 所示。设电压初值为 0, 当电压从 0 上升到 α_1 , 下降到 β_1 , 再上升到 α_2 , 再下降到 β_2 , 再上升... 则可形成的折线(见图 3、4), 电压上升时可看成一水平线往上移动, 电压下降时可看成一垂直线往左移动。此时模型的

极值点 (α_1, β_1) , (α_2, β_1) , (α_2, β_2) , ... 这些都是对输出产生影响的过去输入值。 T_0 为限制三角形, α_0 和 β_0 分别为饱和电压和零电压。

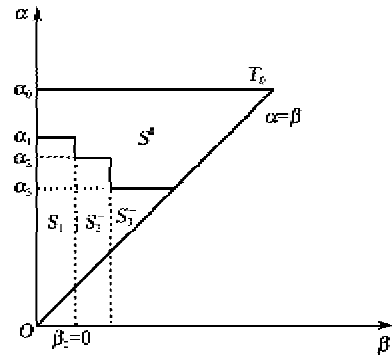


图 3 电压处于上升阶段

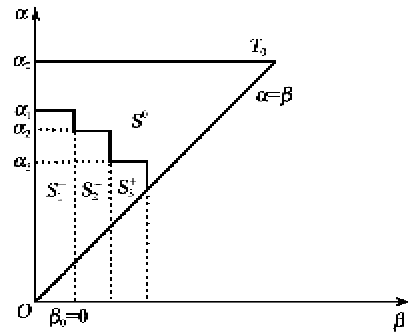


图 4 电压处于下降阶段

由于当 $(\beta, \alpha) \in S^+$ 时, $\gamma_q = 1$, $(\beta, \alpha) \in S^0$ 时, $\gamma_q = 0$, 再根据上述分析, 式(3)中的双重积分为

$$x(t) = \iint_{S^+} \mu(\alpha, \beta) [u(t)] d\alpha d\beta \quad (4)$$

为了适用于实际测量和控制中, 需将其进行离散化处理。因为电压有上升和下降阶段, 其离散后的公式分别表示为

$$x(t) = \sum_{k=1}^{n-1} [Z(\alpha_k, \beta_{k-1}) - Z(\alpha_k, \beta_k)] + Z(u(t), \beta_{n-1}) \quad (5)$$

$$x(t) = \sum_{k=1}^{n-1} [Z(\alpha_k, \beta_{k-1}) - Z(\alpha_k, \beta_k)] + [Z(\alpha_n, \beta_{n-1}) - Z(\alpha_n, u(t))] \quad (6)$$

式中: $Z(\alpha_k, \beta_{k-1})$ 为电压从 β_{k-1} 上升到 α_k 时驱动器的伸长量; $Z(\alpha_k, \beta_k)$ 为电压从 α_k 下降到 β_k 时驱动器的收缩量; $Z(u(t), \beta_{n-1})$ 为电压从 β_{n-1} 上升到 $u(t)$ 的驱动器的伸长量。当 $u(t)$ 处于下降阶段时, $Z(\alpha_n, u(t))$ 为电压从 α_n 下降到 $u(t)$ 时的伸长量。

在实际使用过程中, 先将电压 n 等分, 从 0 升压到任意一等分点, 再逐次降压到 0, 记下每一等分点处位移输出值, 通过上述方法记下每一个分点的位

移输出值,就可得到一个 $Z(\alpha, \beta)$ 的表格。如果所要求的位移值不在等分点上的电压,则 $Z(\alpha, \beta)$ 通过插值求得。这样就可根据这两个方程预测出不同控制序列的驱动器位移输出值。

综上所述可知,可将该模型作为控制系统的前馈环节,以降低压电陶瓷驱动器的滞回特性对输出位移的影响,可有效提高压电陶瓷的控制精度,改善压电陶瓷驱动器迟滞非线性。

1.3 神经网络控制法改善压电陶瓷驱动器迟滞非线性

人工神经网络是一种人脑的抽象、简化和模拟,其最主要的特性为连续时间非线性动力学,网络的全局作用,大规模并行分布处理及高度的鲁棒性和学习联想能力^[6-7]。

因为神经网络的上述优点,所以被广泛应用于非线性系统的控制中,因此研究人员也常用神经网络来描述压电陶瓷驱动器的输入电压和输出位移的非线性关系。常用的是以 BP 神经网络应用于压电陶瓷驱动器来描述这一关系,压电陶瓷驱动器的输入、输出的关系为

$$y(k+1) = f[y(k), y(k-1), u(k)] \quad (7)$$

式中 $y(k)$ 和 $y(k-1)$ 均为驱动器的历史输出位移; $u(k)$ 为当前输入电压; $y(k+1)$ 为网络输出。选用串并联结构的 3 层 BP 网络,再通过实际数据对此网络进行训练(当然为了提高精度,需对这些数据进行一定的预处理,如取平均,剔除误差较大的数据),训练的过程是使神经网络逼近压电驱动器的输入输出这一非线性系统,其目的是得到一定拟合精度的神经网络模型,从而在实际的定位过程中改善压电陶瓷驱动器迟滞非线性特性。其仿真过程现在可用 MATLAB 的神经网络工具箱来实现。

1.4 迭代学习控制法改善压电陶瓷驱动器迟滞非线性

迭代学习控制法^[8]是在有限的时间域 $[0, T]$ 内,给出被控对象的期望响应,使其响应 $Y_k(t)$, ($t \in [0, T]$), 在某种程度上比 $Y_{k-1}(t)$ 有所改善,其中 k 为寻找次数,这一寻找过程称为学习控制过程,若 $k \rightarrow \infty$ 时,有 $Y_k(t) \rightarrow Y_d(t)$ 称为学习控制过程收敛。其一般框图如图 5 所示。

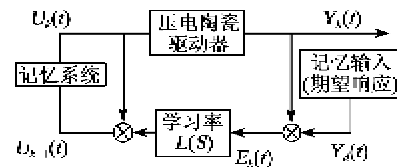


图5 迭代自学习法框图

以控制学习律选取 S. Arimoto 等提出的 PID 型迭代学习控制律为例,其公式可写为

$$U_{k+1}(t) = U_k(t) + \Gamma \frac{d}{dt} E_k(t) + \Phi E_k(t) + \Psi \int E_k(t) dt \quad (8)$$

$$E_k(t) = Y_d(t) - Y_k(t) \quad (9)$$

式中: $U_k(t)$ 为第 k 次的给定; $U_{k+1}(t)$ 为第 $k+1$ 次的给定; $E_k(t)$ 和 Γ, Φ, Ψ 分别为第 k 次的响应误差和增益矩阵。将式(8)、(9)写成增量形式,则可去寻找需要的输入电压,从而得到需要的输出位移。

此方法可在很短时间内完成压电陶瓷驱动器输入、输出线性化。将线性化后得到的数据制作成表格存入计算机中,在进行开环定位时,根据需要的输出位移值通过此表查得输出电压,则可有效改善压电陶瓷驱动器迟滞非线性特性。

1.5 3次样条插值法和最小二乘曲线拟合法改善压电陶瓷驱动器的迟滞非线性

3次样条插值法和曲线拟合法通常被用来处理线性方程,非线性方程和微分方程。

3次样条插值^[9]的基本提法:对区间 $[a, b]$ 进行划分: $a \leq x_0 < x_1 < \dots < x_n \leq b$, 设函数 $y = f(x)$ 在节点 x_i 上的值为 $y_i = f(x_i)$ ($i = 0, 1, \dots, n$), 如果函数 $S(x)$ 于 $[a, b]$ 有二阶连续导数,且在每个小区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上是 3 次多项式,则称 $S(x)$ 是节点 x_0, x_1, \dots, x_n 上的 3 次样条函数,如果 $S(x)$ 在节点 x_i 上还满足条件 $S(x_i) = y_i$ ($i = 0, 1, \dots, n$), 则称为 3 次样条插值函数。

如果测得了压电陶瓷驱动器位移和电压的对映值,则可用 3 次样条插值法来求去插值函数 $S(x)$ 。当需要获得相应的输出位移时,就可用过插值函数求得电压,用此电压来驱动压电陶瓷驱动器即可获得想要的位移量。当取的位移和电压值越多,则求得的插值函数越接近实际函数,通过插值函数求得的电压值也越精确。因此可用此方法来改善压电陶瓷驱动器的迟滞非线性特性。

最小二乘曲线拟合法^[9]是对已知数表(见表 1)

求一简单拟合曲线 $y = \varphi(x)$, 使其在整体上尽可能与原始数据曲线近似, 记 $\delta_i = \varphi(x_i) - y_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 称 δ_i 为拟合曲线 $\varphi(x)$ 在节点 x_i 处的偏差或残差。用偏差的绝对值 $|\delta_i|$ 都最小。这一原则称为最小二乘原则, 按最小二乘原则选择的拟合曲线 $y = \varphi(x)$, 就称为最小二乘拟合曲线。

表 1 最小二乘曲线拟合所用数据表

x	x_1	x_2	...	x_m
$y = f(x)$	y_1	y_2	...	y_m

用此方法来拟合压电陶瓷驱动器的位移和电压关系, 则可得到压电陶瓷的位移和驱动电压的拟合曲线, 当需要输出位移时, 将这一位移代入拟合方程, 求得电压值, 则用此电压驱动压电陶瓷驱动器可得到所需的这一位移。

综上所述可知, 只要测得一组或几组压电陶瓷驱动器位移和电压的对映值, 则就可通过 3 次样条插值法和曲线拟合法来改善压电陶瓷驱动器的迟滞非线性。

1.6 其他改善压电驱动器迟滞非线性的方法

为了对压电陶瓷的迟滞非线性进行改善, 国外学者提出了一些其他方法, 如以电荷驱动代替经典的电压驱动^[10], 采用确定性滞回路模型^[11]等。

2 实验

将 3 次样条插值和最小二乘曲线拟合法运用于压电陶瓷驱动器位移的控制中, 从而来改善其迟滞非线性特性, 此方法可将其用于系统的前馈环节, 也可进行开环定位。

3 次样条插值法和最小二乘曲线拟合法具有测量计算简单, 较适用于在开环控制的情况下改善压电陶瓷驱动器的迟滞非线性特性等优点。

通过实测一个行程为 20 μm , 驱动电压为 0~150 V 的压电陶瓷驱动器, 每隔 5 V 记录下一个位移值, 多次测量取平均值, 如图 6 所示。

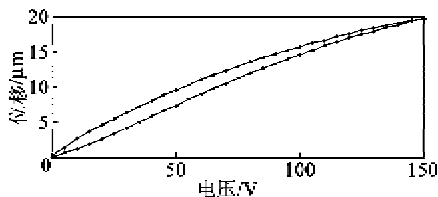


图 6 测量数据点通过直线相连的图形

图 6 为数据点用直线相连后的图形。对上述数据用 3 次样条插值和最小二乘曲线拟合法来计算出每隔 7 V 压电陶瓷驱动器的理论位移输出, 再经过

与实际测得的数据进行比较, 得出相对误差的曲线拟合图, 如图 7、8 所示。

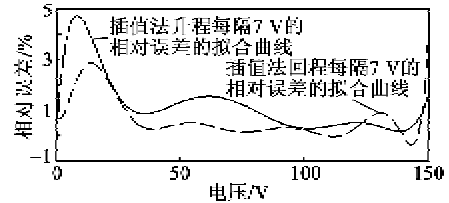


图 7 3 次样条插值法相对误差的曲线拟合图

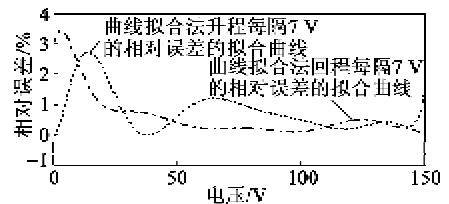


图 8 最小二乘曲线拟合法相对误差的曲线拟合图

由图 7、8 可知, 插值法及曲线拟合法的计算值和实际测量值的相对误差均在 5% 以下。对于任意位移序列, 根据是升程还是回程都可通过 3 次样条插值法和最小二乘曲线拟合法求得输出电压, 再用此算得的电压去驱动压电陶瓷驱动器, 从而实现定位控制, 且具有较高的控制定位精度, 在很大程度上改善了压电陶瓷驱动器的迟滞非线性特性。

3 结束语

本文通过对压电陶瓷驱动器迟滞非线性特性的改善方法进行论述, 阐述了压电陶瓷驱动器迟滞非线性特性的各种改善方法, 并通过实验证明了 3 次样条插值法和最小二乘曲线拟合法可有效改善压电陶瓷驱动器迟滞非线性特性。

参考文献:

[1] 王晓风, 冯之敬. 压电驱动微位移灵敏度影响因素分析[J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(4): 24-27.
WANG Xiaofeng, FENG Zhijing. The analysis of influence factors of the piezoelectric micro displacement sensitivity[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2007, 43(4): 24-27.

[2] 左勇, 张月平, 蒋芝兰, 等. 压电陶瓷微位移系统的变参数 PID 闭环控制方法[J]. 新技术新仪器, 2006, 26(2): 36-38.
ZUO Yong, ZHANG Yueping, JIANG Zhilan, et al. Variable parameter PID loop-locked control method for piezoelectric ceramic micro displacement system[J]. New Technology and New Equipment, 2006, 26(2): 36-38.

(下转第 701 页)