

文章编号 1004-924X(2007)10-1547-06

非线性模型的压电元件复合控制方法

贾宏光¹, 郑岩², 吴一辉¹, 王立鼎³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国人民解放军 装甲兵技术学院, 吉林 长春 130117;

3. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘要:研究了压电元件的非线性及其复合控制问题。依据压电元件全程及局部伸长和缩短的实验数据,提出了一种根据外环曲线参数及当前坐标值确定比例系数,进而确定内环伸长曲线的数学模型。实验表明,这种全面反映内、外环曲线的非线性数学模型对上升和下降过程的最大拟合误差在全程范围内分别为1.2%和2.0%。利用此模型,可在压电元件非线性外环曲线及目前电压-伸长量已知的情况下,求出其下一时刻上升或下降的路径。以此模型为基础,构造了一种压电元件前馈复合控制算法,在输入峰-峰值为4 μm 位移的情况下,得到了280 Hz的闭环带宽。同普通PID控制算法相比,带宽提高了30%以上。

关键词:压电元件; 执行器; 非线性模型; 复合控制

中图分类号: TN384; TP391.9 **文献标识码:** A

PZT actuator control complex arithmetic based on nonlinear model

JIA Hong-guang¹, ZHENG Yan², WU Yi-hui¹, WANG Li-ding³

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Armored Technique Institute of PLA, Changchun 130117, China*;
3. *Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

Abstract: A new nonlinear mathematical model describing the comparability between minor loop curves and mean loop curves of the PZT actuator was established. With the model, the minor loop curves can be expressed by multiplying each point while the mean loop curves by a sequential factor. The maximum relatively errors of the model are 1.2% in ascending curves and 2% in descending curves respectively. A new PID complex control arithmetic to the PZT actuator was setup referencing feed-forward loop. The experimental results show that 280 Hz closed loop bandwidth is available with 4 μm peak-to-peak input, and the band width is 30% wider than that of a general PID feedback control arithmetic.

Key words: PZT actuator; actuator; nonlinear model; complex control

1 引 言

压电材料的非线性特性一直是压电元件及其驱动系统研究的热点问题之一,以简单的直线代替或通过参数表的形式给出整个外环的非线性曲线方式^[1]所得出的拟合结果精度一般都很低。为提高拟合精度,相继出现了一些其它形式的拟合方式,如常规的代数多项式、三角多项式和参量模型^[2]等。随着研究的深入,出现了一些能够同时反映压电元件外环非线性特性及其相互关系的数学模型,如 Seuung-Bae June 依据实验提出的参量模型^[3]、Motoya Taniguchi 可变系数模型^[4]、Preisach 模型^[5]及其改进形式^[6]等等。这些模型的提出对深入细致地描述压电元件的非线性,特别是对提高以压电元件为驱动器的原子力显微镜、微动工作台等的动态性能都有一定的促进作用^[7]。

本文首先提出一种新的描述压电元件内、外环伸长非线性关系的模型,在此基础上,构造了一种带有前馈补偿的压电元件复合控制结构,并进行了相应的测试。实验结果表明,这种模型拟合精度很高,以其为基础的前馈补偿复合控制算法相对于普通 PID 控制可有效提高带宽。

2 压电元件非线性模型

2.1 数学模型描述

压电元件上升过程(伸长)和下降过程(缩短)的非线性曲线走向具有明显的区别,首先以下降过程为例建立模型。如图 1 所示, x_0, x_n 分别为加在压电元件上的最低及最高电压, $Q_n(x_0)$ 及 $Q_n(x_n)$ 分别为对应于 x_0, x_n 两点压电元件的伸长, $P_n(x)$ 及 $Q_n(x)$ 分别为从 x_0 到 x_n 的上升过程和从 x_n 到 x_0 的下降过程。根据压电元件非线性特性可知对应于任何加于压电元件上的电压 $x(x_0 \leq x \leq x_n)$ 及其伸长所构成的点必位于图 1 中 $Q_n(x)$ 和 $P_n(x)$ 所包围的区域(外环)内。

对于任意下降过程 $Q_i(x)$, 设其转折点

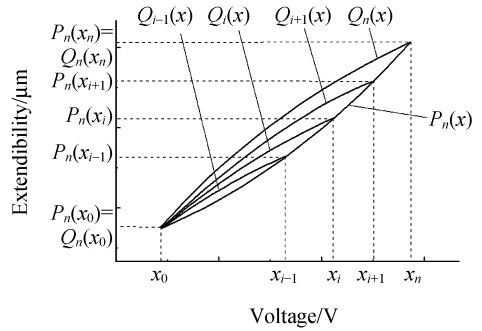


图 1 压电元件在不同转折点下的下降过程, $Q_n(x)$ 和 $P_n(x)$ 分别表示压电元件下降和上升的最外环, $Q_i(x)$ 代表压电元件由 $P_n(x)$ 上升到转折点 x_i 后再次缩短(下降)所走过的轨迹。

Fig. 1 Descending curves of PZT actuator in different turning points. $Q_n(x)$ and $P_n(x)$ represent mean loop of a PZT actuator. The PZT actuator ascends from curve $P_n(x)$ to turning point x_i at first, and then descends from curve $Q_i(x)$.

($Q_i(x)$ 与 $P_n(x)$ 的交点)为 $x_i(x_0 < x_i < x_n)$, 那么 $Q_i(x)$ 上的点 $[x', Q_i(x')]$ 与 $Q_n(x)$ 上的点 $[x, Q_n(x)]$ 将满足以下关系:

$$\begin{bmatrix} x' \\ Q_i(x') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_i - x_0}{x_n - x_0} & 0 \\ 0 & \frac{P_n(x_i) - P_n(x_0)}{P_n(x_n) - P_n(x_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ Q_n(x) \end{bmatrix}, \tag{1}$$

对于上升过程, 先进行如下坐标变换:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_n \\ P_n(x_n) \end{bmatrix}. \tag{2}$$

如图 2 所示, 将与 x_i 对应的上升曲线定义为 $P_{n-i}(x)$, 将公式(1)代入公式(2), 可得到对于 x_i 的上升过程为:

$$\begin{bmatrix} x_n - x' \\ P_n(x_n) - P_{n-i}(x') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_n - x_i}{x_n - x_0} & 0 \\ 0 & \frac{Q_n(x_n) - Q_n(x_i)}{Q_n(x_n) - Q_n(x_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n - x \\ P_n(x_n) - P_n(x) \end{bmatrix} \tag{3}$$

一般来说, $x_0, P_n(x_0)$ 和 $Q_n(x_0)$ 都为 0, 或通

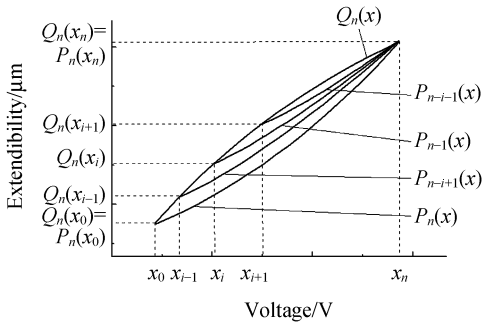


图 2 压电元件在不同转折点下的上升过程, $Q_n(x)$ 和 $P_n(x)$ 分别表示压电元件下降和上升的最外环, $P_{n-i}(x)$ 代表由 $Q_n(x)$ 下降到转折点 x_i 后压电元件再次伸长(上升)所走过的轨迹。

Fig. 2 Ascending curves of PZT actuator in different turning points, $Q_n(x)$ and $P_n(x)$ represent mean loop of a PZT actuator. The PZT actuator descends from curve $Q_n(x)$ to turning point x_i at first, and then ascends from curve $P_i(x)$.

过简单的坐标变换将其变为 0。因此,式(1)和式(3)可简化为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ Q_i(x') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_i}{x_n} & 0 \\ 0 & \frac{P_n(x_i)}{P_n(x_n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ Q_n(x) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_n - x' \\ P_n(x_n) - P_{n-i}(x') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_n - x_i}{x_n} & 0 \\ 0 & \frac{Q_n(x_n) - Q_n(x_i)}{Q_n(x_n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n - x \\ P_n(x_n) - P_n(x) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在以后的推导和计算中, x_0 、 $P_n(x_0)$ 和 $Q_n(x_0)$ 都按 0 处理。在此模型中,对于任意的 $P_i(x)$ 、 $Q_i(x)$ 曲线,都是由 $P_n(x)$ 和 $Q_n(x)$ 通过在两个坐标轴上不同的比例的变换完成的。下面就通过实际测量得到的曲线同由模型计算所得的曲线加以对比来说明这种新模型的准确程度。

2.2 理论模型与实测升、降过程对比

利用公式(4)和公式(5),就可根据实测的 $P_n(x)$ 的 $Q_n(x)$ 计算对应于 x_i 的任意上升和下降过程。图 3 和图 4 分别对应于上升和下降过程的

模型计算曲线(实线)和实测曲线(虚线),相对误差定义为:

$$\delta = \left| \frac{P_i(x) - P_i'(x)}{P_n(x_n)} \right| \times 100\%, \quad (6)$$

$$\delta = \left| \frac{Q_i(x) - Q_i'(x)}{Q_n(x_n)} \right| \times 100\%. \quad (7)$$

实验表明,在全程范围内模型对上升和下降过程的最大拟合误差分别为 1.2% 和 2.0%。

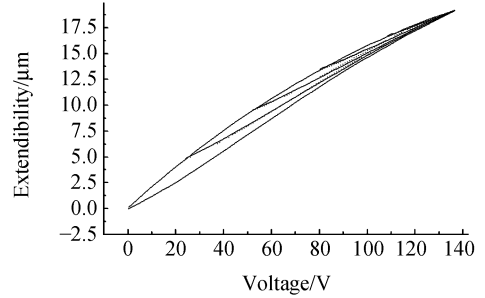


图 3 上升过程模型曲线同实际曲线的对比图,图中实线为模型曲线,虚线为实际测量值,全程范围内最大拟合误差为 1.2%。

Fig. 3 Model curves vs. experimental curves in ascending process, Real lines and broken lines represent model curves and experimental curves respectively. The maximum relatively errors of the model are 1.2% in ascending process.

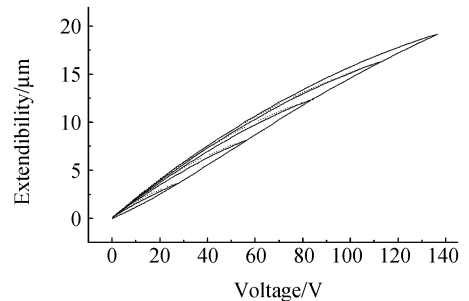


图 4 下降过程模型曲线同实际曲线的对比图,图中实线为模型曲线,虚线为实际测量值,全程范围内最大拟合误差为 2.0%。

Fig. 4 Model curves vs. experimental curves in descending process, Real lines and broken lines represent model curves and experimental curves respectively. The maximum relatively errors of the model are 2% in descending process.

3 基于非线性模型前馈的压电元件复合控制结构

3.1 控制系统组成

在以上模型建立的基础上,构建了一种以模型计算值为前馈量的压电元件复合控制系统,硬件结构包括计算机、A/D 及 D/A 卡、高压运算放大电路、隔振工作台、电容测微仪和压电元件,各个部分之间的连接关系如图 5 所示。其框图如图

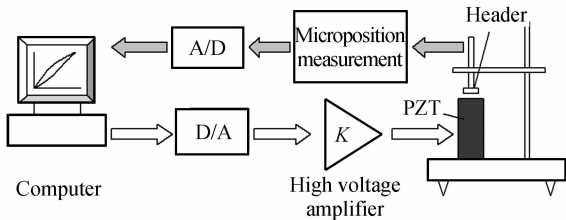


图 5 实验系统结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental system

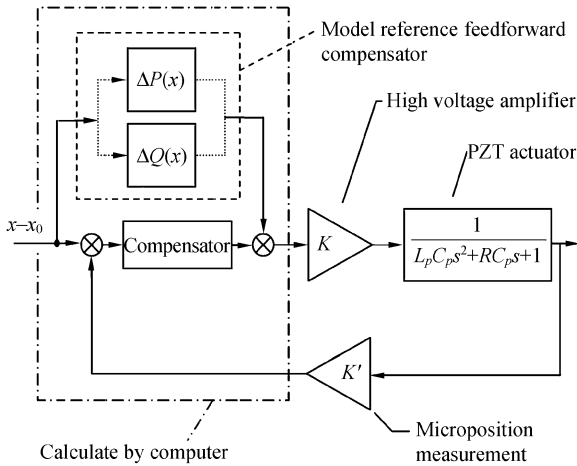


图 6 基于非线性模型的复合控制结构原理框图, $\Delta P(x)$ 和 $\Delta Q(x)$ 为由前面所建立非线性模型、伸长量及开始伸长的基点所计算出来的前馈补偿量,根据伸长或缩短的数值,二者选其一。

Fig. 6 Schematic of a complex control system to PZT actuator based on nonlinear model, According to input and current position, the feedforward value $\Delta P(x)$ or $\Delta Q(x)$ can be calculated with the model.

6 所示,除去非线性模型补偿部分之外,压电元件被简化为一阶阻尼的二阶环节(图中采用 LC 等效传递方法代替)。系统的其它部分,如高压运算放大器、电容测微仪、A/D、D/A,相对于压电元件来说时间常数很小,简化为比例环节。

3.2 复合校正环节设计

为使调节器能根据系统偏差的大小来设定积分系数,兼顾超调和静态误差,更好地发挥压电元件的性能,校正环节除采用普通 PID 算法外,作为对比,还采用了变速积分 PID 算法。设一系数 f 为 $e(n)$ 的函数,当 $|e(n)|$ 增大时, f 减小,反之增大。每次采样后用 f 和 $e(n)$ 相乘,再进行累加,即积分项变为:

$$K_1 \left[\sum_{i=0}^{n-1} e(i) + f \cdot e(KT) \right], \quad (8)$$

f 同 $e(KT)$ 的关系设为:

$$f = \begin{cases} 1, & e(KT) < 0.5 \\ 0.5, & e(KT) \geq 0.5 \end{cases}, \quad (9)$$

这样,整个带有模型前馈补偿的变速积分 PID 算法就是:

$$u(KT) = K_P e(KT) + K_1 \left[\sum_{i=0}^{n-1} e(i) + f \cdot e(KT) \right] + K_D \{e(KT) - e[(K-1)T]\} + u_d(KT), \quad (10)$$

以上各式中:

T —采样周期;

K —采样序列;

$e(KT)$ 、 $e[(K-1)T]$ —第 K 次和第 $K-1$ 次采样时偏差值;

K_P —比例系数;

K_I —积分系数;

K_D —微分系数;

$u(KT)$ —输出;

$u_d(KT)$ —根据输入量 $i(KT)$ 利用变比模型计算出来的前馈补偿量。

4 实验

实验的正弦输入信号的峰-峰值都取为 4

μm (压电元件最大伸长为 $20 \mu\text{m}$),采用以下几种控制结构对压电元件进行对比测量:

(1) 开环控制

(2) 普通 PID 控制

$$u(KT) = K_P e(KT) + K_I \sum_{j=0}^n e(j) + K_D \{e(KT) - e[(K-1)T]\}$$

(3) 变速积分 PID 控制

$$u(KT) = K_P e(KT) + K_I \left[\sum_{i=0}^{n-1} e(i) + f \cdot e(KT) \right] + K_D \{e(KT) - e[(K-1)T]\}$$

(4) 非线性模型模型前馈+普通 PID 复合控制

$$u(KT) = K_P e(KT) + K_I \sum_{i=0}^{n-1} e(i) + K_D \{e(KT) - e[(K-1)T]\} + u_d(KT)$$

(5) 非线性模型模型前馈+变速积分 PID 复合控制

$$u(KT) = K_P e(KT) + K_I \left[\sum_{i=0}^{n-1} e(i) + f \cdot e(KT) \right] + K_D \{e(KT) - e[(K-1)T]\} + u_d(KT)$$

(6) 电荷控制

各种控制结构所能达到的动态性能如表 1 所示,其中电荷控制硬件结构同图 5 不同,在此不再赘述,作为对比,只列出其结果。

表 1 各种不同算法控制下压电元件所能达到的各种动态指标

Tab.1 Dynamic properties of PZT actuator with different control algorithms

Algorithms	Bandwidth(Hz)
Open loop	13
General PID	180
PID with limit	190
Model reference+	
General PID	240
Model reference+	
PID with limit	280
Charge control	<80

5 结 论

本文首先建立了反映压电元件内、外环伸长曲线关系的数学模型,并对数学模型的准确性进行了测量,在全程范围内,模型的拟合误差不大于 2%。相对于 Preisach 模型来说,这种非线性模型简单,计算量少,简单易用。但是此模型并没有考虑到压电元件迟滞效应的影响,这是其不足之处。尽管如此,以这种模型来计算前馈量的复合控制系统相比于普通 PID 控制结构,带宽可以提高 30% 以上。并且由表 1 可以看出,相对于普通 PID 算法,其变形在这种由模型补偿情况下对动态性能的影响十分明显。以上各个数据都是对单独的压电元件测试的结果,在带载情况下,对压电陶瓷驱动的二维微动工作台进行的测试表明,应用非线性模型前馈补偿,在输入峰-峰值为 $4 \mu\text{m}$ 时,带宽为 53 Hz,相对于普通 PID 控制,带宽提高了 32%。

参考文献:

- [1] POPOV E P. *The Theory of Nonlinear Automation Control System*[M]. Moscow:Karl B DA, 1988.
- [2] ROSTISLAV V L, OLEG V O. Fast-acting piezoactuator and digital feedback loop for scanning tunneling microscopes[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1993, 64(10):2883-2887.
- [3] JUNG S. Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feed-forward model-reference control [J]. *Precision Engineering*, 1994, 14:49-55.
- [4] MOTOYA T. Ultra precision wafer positioning by six-axis micro-motion mechanism[J]. *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, 1992, 26(1):582-586.

- [5] MAYERGOYZ I D. *Mathematical Models of hysteresis*[M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [6] 李黎,刘向东,王伟,等. 压电陶瓷执行器迟滞特性的广义非线性 Preisach 模型及其数值实现[J]. 光学精密工程, 2007,15(5):706-712.
- LI L, LIU X D, WANG W, *et al.*. Generalized nonlinear Preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuator and its numerical implementation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(5):706-712. (in Chinese)
- [7] HEWON J. Enhancement of AFM image by compensating the hysteresis and creep effect within PZT[J]. *Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology*, SPIE, 1999, 3740:327-330.

作者简介:贾宏光(1971—),男,工学博士,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为光机电系统小型化技术、精确制导技术。E-mail: jiahg@ciomp. ac. cn

《超声电机技术与应用》新书介绍

超声电机是在 20 世纪 80 年代迅速发展和应用起来的、基于压电效应和超声振动的一种新型微电机。它突破了传统的电磁效应电机原理,具有力矩/质量比大、结构紧凑、低速大扭矩、响应快、电磁兼容性和控制性能好等突出优点,已在机器人、精密仪器仪表、医疗器械,航空航天及新型武器装备等领域得到广泛的应用。

我国振动理论和应用学术界的知名专家、中国科学院院士赵淳生教授及其团队是我国超声电机技术研究领域最主要的开拓者之一,他们把我国的超声电机技术推进到国际先进水平,受到世界各国科技工作者的重视和关注,并曾获得"2004 年国家技术发明二等奖"。

赵淳生院士及其科研团队对十多年来从事超声电机技术研究进行了总结和提炼,撰写成《超声电机技术与应用》一书,并将于 2007 年 9 月由科学出版社出版发行。该书贯穿着科学发展观和自主创新的指导思想,从振动和波动理论出发,全面而系统地阐述了超声电机的运动机理、机电耦合模型、结构参数优化设计和驱动与控制技术,总结和提出了超声电机的系统的理论和方法,以及著者在实验研究和工程应用方面所做的大量工作和积累的经验。

该书共分 16 章。书中首先概略叙述了超声电机的发展;其次详细地叙述了现有各类超声电机的运动机理,设计、制造和试验技术,驱动和控制技术,以及超声电机在工程中的应用;书中扼要叙述了驻波和行波理论、摩擦和超声电机用的摩擦材料和压电材料等基本知识,为深入学习超声电机技术提供了必要的理论基础。

该书毫无保留地将这一高新技术介绍给广大正在从事或将要从事超声电机研究的人员和读者,希望对从事超声电机或作动器的科研、设计和应用的工程技术人员,高等院校精密工程或精密驱动等相关专业研究生、博士生教学用书。我们也希望该书的出版将促进我国超声电机技术的发展与应用,也为世界超声电机技术的发展做出积极的贡献。

附:1.《超声电机技术与应用》:

页码:588 页
装帧:纸面精装
插页:12 页(彩色图片)
定价:98.00 元

2. 联系方式

联系人:段博原(责任编辑)
电 话:010-6403 3891
E-mail:gk@mail. sciencep. com
地 址:北京东黄城根北街 16 号
邮 编:100717