

文章编号 1004-924X(2012)01-0088-08

压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制

陈 辉^{1,2*}, 谭永红³, 周杏鹏¹, 张亚红⁴, 董瑞丽³

(1. 东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096;

2. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

3. 上海师范大学 信息与机电工程学院, 上海 200234;

4. 桂林航天工业高等专科学校 信息工程系, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了提高精密定位系统中压电陶瓷的控制精度, 研究了压电执行器的动态模型及逆模型。根据 Weierstrass 第一逼近定理, 提出了以多项式函数逼近 Duhem 模型中的分段连续函数 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$, 并应用递推最小二乘法辨识 Duhem 模型的参数 α 及 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 的多项式系数, 建立了压电陶瓷执行器的非线性参数化动态模型。利用辨识结果建立压电陶瓷执行器的动态逆模型, 避免对压电陶瓷执行器进行复杂的模型求逆; 介绍了通过逆补偿和 PID 复合控制对压电陶瓷系统进行的控制。实验结果表明: 仅通过逆补偿, 可在 $0\sim 200\ \mu\text{m}$ 使得控制绝对误差小于 $0.8\ \mu\text{m}$; 在前馈逆补偿和 PID 环控制下, 绝对误差可小于 $40\ \text{nm}$, 结果验证了算法的有效性。该算法结构简单, 适应性强, 便于工程实现。

关键词: 压电陶瓷执行器; Duhem 模型; Weierstrass 多项式逼近; 递推最小二乘法; 动态迟滞模型; 动态逆迟滞模型; 逆补偿

中图分类号: TP273.1; TN384 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20122001.0088

Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator

CHEN Hui^{1,2*}, TAN Yong-hong³, ZHOU Xing-peng¹, ZHANG Ya-hong⁴, DONG Rui-li³

(1. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Electronic Engineering & Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 3. College of Information, Mechanical and Electrical Engineering,

Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

4. Department of Information Engineering, Guilin College of Aerospace Technology, Guilin 541004, China)

* Corresponding author, E-mail: glchenhui@126.com

Abstract: The dynamic model and inverse model of a piezoceramic actuator were proposed to improve its control precision in a precision position system. According to the Weierstrass approximation theorem, the polynomials $f(\cdot)$ and $g(\cdot)$ in the Duhem function was developed, and the dynamic modeling of nonlinear parameters of the piezoceramic actuator was given by using recursive least squares to

收稿日期: 2011-08-05; 修订日期: 2011-09-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60971004); 上海市科委重点基金资助项目; (No. 09220503000, 10JC1412200); 上海市自然科学基金资助项目 (No. 09ZR1423400); 上海市教育委员会科研创新基金资助项目 (No. 09ZZ141, 11YZ92); 上海师范大学重点学科基金资助项目 (No. DZL811, DRL904)

identify the model parameters and polynomial coefficients in the Duhem model. Then, an inverse dynamic modeling of the piezoceramic actuator was established based on identified results to simplify the unknown parameter computation process greatly. Finally, the dynamic inverse compensation was incorporated in a closed-loop PID controller to control the piezoceramic actuator. Experimental results indicate that the maximum absolute error with the inverse compensation is less than $0.8 \mu\text{m}$ and that with the inverse compensation and PID is less than 40 nm in an amplitude range of $200 \mu\text{m}$. The experimental result shows that the proposed identification scheme has improved the nonlinear characteristic of the piezoceramic actuator effectively.

Key words: piezoceramic actuator; Duhem model; Weierstrass polynomial approximation; recursive least square; dynamic hysteresis model; dynamic inverse model; inverse compensation

1 引 言

压电陶瓷具有定位精度高、驱动力大、响应速度快等优点,是目前微位移技术中比较理想的驱动元件。但由于本身所固有的迟滞、非线性、蠕变特性,使得微位移机构的重复性和精度降低,瞬态响应速度变慢,给压电陶瓷应用造成了一定的困难^[1-2]。为减小这种非线性特性所造成的不良影响,更好地发挥压电陶瓷的性能,很多科研机构 and 研究人员对迟滞非线性系统建模及控制开展了研究^[1-20]。Preisach 模型是当前广泛应用的迟滞模型之一^[3-5],它原理简单,适应范围广,已成功地运用到铁磁、压电陶瓷和记忆合金等材料的迟滞建模中^[1-5];但是它的实现形式比较复杂,很难与控制器设计相结合,因此,单纯的 Preisach 模型无法解释迟滞特性的频率相关性,且模型参数不易辨识。

Duhem 模型是由 P. Duhem 在 1897 年提出的一种由微分方程描述的迟滞模型,与 Preisach 模型相比,Duhem 模型的最大优点是具有明确的函数表达式,为建立其逆函数提供了便利;Duhem 模型是输入信号导数的函数,模型输出与输入信号的速率相关,是一种动态模型^[8-9],符合实际智能材料中迟滞非线性的动态特性,因此这个模型能够更精确地描述迟滞非线性。通过调整 Duhem 模型的参数可以反映不同迟滞特性^[10-14],但很难获得 Duhem 模型的参数 $\alpha, f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$,这成为了 Duhem 模型的应用障碍。

本文根据 Weierstrass 第一逼近定理^[22],提出了对分段连续函数 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 用多项式进行逼近,采用递推最小二乘算法辨识^[23]Duhem 模

型的参数 $\alpha, f(\cdot)$ 及 $g(\cdot)$,辨识结果可直接用于建立逆模型,不仅避免了复杂的模型求逆过程,还实现了对压电执行器的自适应逆补偿控制。最后,通过实验验证了算法的有效性,提高了压电陶瓷执行器的控制精度。

2 迟滞模型的参数辨识

Duhem 模型具有明确的数学表达式,适当地调整 Duhem 模型的参数 $\alpha, f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$,可以反映不同非线性系统的迟滞特性,因此,准确辨识 Duhem 模型参数就能获得压电陶瓷的迟滞模型。

Coleman 和 Hodgdon 将 Duhem 模型写成如下的微分方程表达式^[24]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \alpha \left| \frac{dv}{dt} \right| [f(v) - \omega] + \frac{dv}{dt} g(v), \quad (1)$$

其中: α 是常数, v 是迟滞输入, ω 是迟滞输出, f, g 定义为分段连续函数。

用 $C[a, b]$ 表示定义在闭区间 $[a, b]$ 上的全体连续函数构成的集合,任意两个 $C[a, b]$ 中的元素 $f(x)$ 和 $p(x)$ 可以用 $\|f - p\|_{\infty} = \sup_{a \leq x \leq b} |f(x) - p(x)|$ 表示它们的距离。

根据 Weierstrass 定理,设 $f \in C[a, b]$,则对于任意给定的 $\epsilon > 0$ 都存在多项式 $p(x)$,使下式成立

$$\|f - p\|_{\infty} = \sup_{a \leq x \leq b} |f(x) - p(x)| \leq \epsilon, \quad (2)$$

即对于给定的 $f(x) \in C[a, b]$ 和给定的逼近精度 $\epsilon > 0$,都能找到一个代数多项式:

$$p(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n,$$

(n 为自然数),使得 $\|f - p\|_{\infty} \leq \epsilon$ 成立。

由 Weierstrass 第一逼近定理可知,对于 Duhem 模型中的连续函数 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$,在满足

一定精度条件下可以应用多项式函数进行逼近。

设在满足一定精度 $\epsilon > 0$ 时, $f(x) = \overline{f(x)}$, $g(x) = \overline{g(x)}$, 阶次分别为 n, m , 其多项式分别为:

$$\overline{f(v)} = f_0 + f_1 v + f_2 v^2 + \dots + f_n v^n = \sum_{i=0}^n f_i v^i, \quad (3)$$

$$\overline{g(v)} = g_0 + g_1 v + g_2 v^2 + \dots + g_m v^m = \sum_{j=0}^m g_j v^j, \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(1)得:

$$\frac{d\omega}{dt} = \alpha \left[\frac{dv}{dt} \right] [\overline{f(v)} - \omega] + \frac{dv}{dt} \overline{g(v)}. \quad (5)$$

式(5)可改写为:

$$\frac{d\omega}{dt} = \left[\frac{dv}{dt} \right] [\alpha \overline{f(v)} - \alpha \omega] + \frac{dv}{dt} \overline{g(v)}. \quad (6)$$

令: $\alpha f_i = F_i, (i=0 \dots n)$, 则式(6)可写为:

$$\frac{d\omega}{dt} = \left[\frac{dv}{dt} \right] \left[\sum_{i=0}^n F_i v^i - \alpha \omega \right] + \frac{dv}{dt} \sum_{j=0}^m g_j v^j. \quad (7)$$

由于系统的输入 v 、输出 ω 及其导数是可测的, 式中 $\alpha, F_i (i=0 \dots n), g_j (j=0 \dots m)$ 为系统参数; 只要准确辨识出 α, F_i, g_j 就可以得到 Duhem 模型的参数化模型。

令 $V_1 = |v(k) - v(k-1)|, V_2 = v(k) - v(k-1), Y(k) = \omega(k) - \omega(k-1)$, 则系统的动态离散化 Duhem 模型为:

$$Y(k) = V_1 \cdot \left[\sum_{i=0}^n F_i v(k)^i - \alpha \omega(k) \right] + V_2 \cdot \sum_{j=0}^m g_j v(k)^j, \quad (8)$$

其中, $v(k)$ 为 k 时刻系统的输入, $\omega(k)$ 为 k 时刻系统的输出。

式(8)可写为:

$$Y(k) = \boldsymbol{\varphi}(k)^T \times \boldsymbol{\theta}, \quad (9)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}(k)$ 为数据向量, $\boldsymbol{\theta}$ 为待估计的参数向量。

$$\boldsymbol{\varphi}(k) = [V_1, V_1 v(k), \dots, V_1 v(k)^n, -V_1 \omega(k),$$

$$V_2, V_2 v(k), \dots, V_2 v(k)^m]^T, \boldsymbol{\varphi}(k) \in \mathbf{R}^{(n+m+3) \times 1}$$

$$\boldsymbol{\theta} = [F_0, F_1, \dots, F_n, \alpha, g_0, g_1, \dots, g_m]^T,$$

$$\boldsymbol{\theta}(k) \in \mathbf{R}^{(n+m+3) \times 1}.$$

设

$$J = \sum_{i=1}^k e^2(k) = \sum_{i=1}^k \left\{ [y(i) - \boldsymbol{\varphi}(k)^T \times \boldsymbol{\theta}]^2 \right\}, \quad (10)$$

所以有 $e(k) = Y(k) - \boldsymbol{\varphi}(k)^T \times \boldsymbol{\theta}$.

递推最小二乘法的参数估计是使目标函数 J 为最小时 $\boldsymbol{\theta}$ 参数的取值, 应用最小二乘估计值递推公式(11)、(12)、(13)可辨识出参数:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \mathbf{K}(k) [y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)], \quad (11)$$

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k) \boldsymbol{\varphi}(k+1)}{1 + \boldsymbol{\varphi}^T(k) \mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k)}, \quad (12)$$

$$\mathbf{P}(k) = [1 - \mathbf{K}(k) \boldsymbol{\varphi}^T(k)] \mathbf{P}(k-1). \quad (13)$$

因为 $\alpha f_i = F_i, (i=0 \dots n)$, 所以 $f_i = \frac{F_i}{\alpha}, (i=0 \dots n)$. 由式(11)得到 Duhem 的参数化模型。

压电陶瓷执行器的特性不仅与输入信号的频率相关, 而且与输入信号的幅值相关^[8-12]。如果采用静态的辨识方法, 系统模型误差较大, 所以本文采用动态参数辨识, 实时调整 Duhem 模型的参数, 减小模型误差, 提高模型精度, 其框图如图 1 所示。

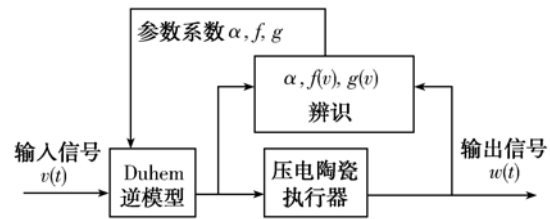


图 1 动态逆补偿框图

Fig. 1 Signal flow diagram of dynamic inverse controller

3 压电陶瓷迟滞逆补偿控制

迟滞逆模型补偿主要思想是建立一个能准确描述迟滞行为的数学模型, 应用逆模型对迟滞进行前馈补偿^[20-21]。逆补偿原理如图 2 所示。根据逆系统理论分析, 迟滞的正模型为 $H[v](t)$, 逆模型为 $H^{-1}[\omega](t)$, 输入信号经过逆过程和正过程的 2 次作用, 其结果等价于一个标准化的单位映

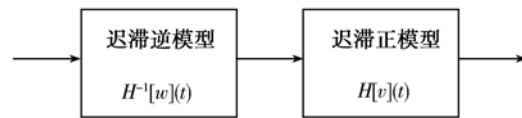


图 2 逆补偿原理框图

Fig. 2 Inverse compensation chart

射,即

$$\omega = H[H^{-1}(\omega)(t)](t) = 1. \quad (14)$$

因此,要对迟滞系统进行有效补偿必须建立系统的有效逆模型。

根据逆函数定理,Duhem 模型的逆模型为:

$$\frac{dv}{dt} = \alpha \left| \frac{d\omega}{dt} \right| [f(\omega) - v] + \frac{d\omega}{dt} g(\omega). \quad (15)$$

当 $\frac{d\omega}{dt} \geq 0$ 时,有:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\frac{dv}{dt}}{\alpha[f(\omega) - v] + g(\omega)}; \quad (16)$$

当 $\frac{d\omega}{dt} < 0$ 时,有:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\frac{dv}{dt}}{-\alpha[f(\omega) - v] + g(\omega)}. \quad (17)$$

由式(16)、(17)可得其逆模型中的参数 α 以及 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 与正模型的参数相同,把 Duhem 模型辨识结果代入式(16)、(17)得到其逆模型,即

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\frac{dv}{dt}}{\alpha[f(\omega) - v] + g(\omega)}, \quad \frac{d\omega}{dt} \geq 0. \quad (18)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\frac{dv}{dt}}{-\alpha[f(\omega) - v] + g(\omega)}, \quad \frac{d\omega}{dt} < 0. \quad (19)$$

4 实验与结果分析

4.1 Duhem 模型参数辨识仿真

为了验证算法对 Duhem 模型辨识的准确性,在 Matlab7.1/Simulink 环境下应用递推最小二乘法来辨识 Duhem 模型参数,参数选择为:

$$\alpha = 2;$$

$$f(v) = 0.0008v^3 + 0.1v^2 + 0.5v + 0.7;$$

$$g(v) = 0.002v^2 + 3v + 0.8.$$

辨识过程如图 3 所示。

应用递推最小二乘辨识结果为:

$$\alpha = 2.000000183; f(v) = 0.00080v^3 + 0.10002v^2 + 0.50001v + 0.69999; g(v) = 0.00200v^2 + 3.00001v + 0.80000.$$

图 3 中 a_3, a_2, a_1, a_0 为函数 $f(v)$ 系数的辨识结果, α 为 Duhem 模型参数, b_2, b_1, b_0 为函数 $g(v)$ 系数的辨识结果。由辨识结果可以看出,参数辨识的最大误差为 0.02%。对具有连续函数 $f(\cdot), g(\cdot)$ 的 Duhem 迟滞模型,应用最小二乘

法可以准确地辨识出 Duhem 模型参数,算法收敛速度快且有效。

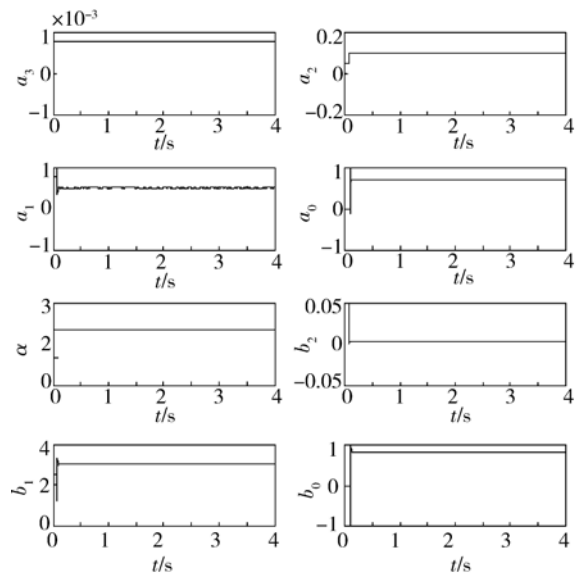


图 3 Duhem 模型参数辨识过程图

Fig. 3 Parameter estimation of Duhem model

4.2 压电陶瓷迟滞建模

实验采用 PI 公司的 P-563.3CD(SN1100233 12)为对象,如图 4 所示。该系统为三维压电执行器,耐压为 $-30 \sim 120$ V,输出位移为 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$,采用 24 位 D/A 转换器,18 位 A/D 转换器,采样率可以达到 20 kHz。



图 4 微位移系统实验装置

Fig. 4 PZT system and experimental setup

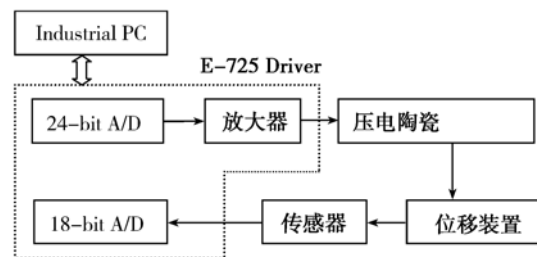


图 5 实验系统结构图

Fig. 5 Experimental architecture

计算机输出电压信号经数据采集卡 D/A 转换并通过功率放大后使执行器产生相应的位移输出, 传感器测得的位移输出经 A/D 转换后输入计算机, 系统框图如图 5 所示。

本次实验 $f(v)$ 多项式的阶次 $n=5$, $g(v)$ 的多项式阶次 $m=4$; 输入一组幅值和频率均变化的正弦信号, 应用上述算法得到一组 Duhem 模型的辨识结果为:

$$\alpha=0.019\ 677\ 564\ 606\ 93;$$

$$g(v)=1.515 \times 10^{-10} v^4+2.145\ 4 \times 10^{-8} v^3-1.811 \times 10^{-5} v^2+2.878\ 5 \times 10^{-3} v-0.901\ 5;$$

$$f(v)=2.39 \times 10^{-9} v^5+1.17 \times 10^{-6} v^4+2.14 \times 10^{-4} v^3-1.759\ 1 \times 10^{-2} v^2+1.896\ 4 v-12.751\ 4.$$

针对该模型输入另外一组幅值和频率均变化的信号, 得到系统的迟滞特性和模型的迟滞曲线如图 6 所示。

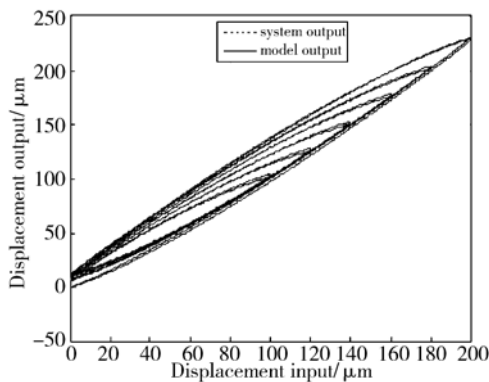


图 6 系统迟滞曲线和模型迟滞曲线图

Fig. 6 Model hysteresis loop and actual hysteresis loop

图 6 表明 Duhem 模型的输出与实测数据基本吻合, 相对误差小于 1%, 这可以在设计控制器时进行相应的补偿。实验结果表明, 应用 Weierstrass 第一逼近定理建立的 Duhem 模型能较好地反映压电陶瓷的迟滞特性, 实验结果验证了算法的有效性。

4.3 采用逆控制算子对迟滞系统开环逆补偿

应用 4.2 中辨识结果, 计算出迟滞逆模型, 对压电执行器进行前馈补偿。以频率、幅值均变化的正弦信号作为系统输入, 系统补偿前的迟滞曲线如图 7 所示, 补偿后系统的迟滞特性如图 8 所示, 系统补偿后误差如图 9 所示。

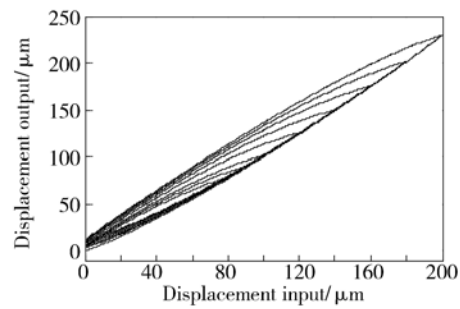


图 7 补偿前的输入-输出图

Fig. 7 Input-output map without inverse compensation

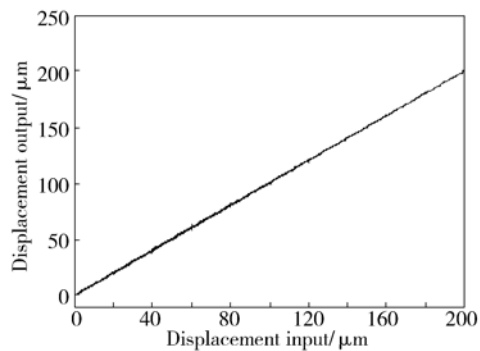


图 8 逆补偿后的输入-输出图

Fig. 8 Input-output map with inverse compensation

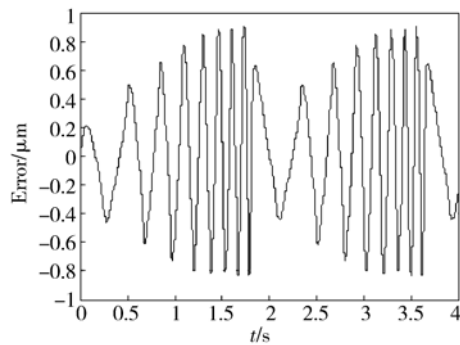


图 9 补偿后输入和输出误差图

Fig. 9 Error with inverse compensation

由图 7 可以看出, 补偿前系统的迟滞现象严重, 且存在迟滞与频率相关现象; 从图 8、9 可以看出经过逆补偿后, 减少了系统的迟滞现象, 输出信号能较快地跟踪输入信号。幅值在 $0 \sim 200 \mu\text{m}$, 绝对误差小于 $0.8 \mu\text{m}$, 基本消除了迟滞现象。实验结果验证了 Duhem 逆补偿的有效性, 为进一步设计控制器, 提高压电陶瓷执行器的定位精度奠定了良好的基础。

4.4 前馈逆补偿和 PID 控制

由 4.3 结果可知通过建立 Duhem 逆模型可以有效地补偿系统的迟滞,但误差较大。为了进一步提高压电陶瓷的定位精度,采用逆补偿加

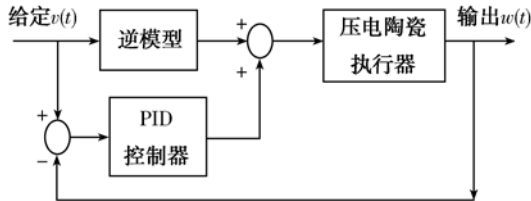


图 10 前馈逆补偿+PID 控制

Fig. 10 Closed-loop compensation of hysteresis

PID 控制方式,控制结构如图 10 所示。通过调节 PID 参数,在输入不同频率和幅值信号的情况下,给定信号与控制后输出效果如图 11 所示,系统误差如图 12 所示。

由图 11 和 12 可以看出,通过前馈逆补偿加 PID 控制,减少了迟滞的影响,进一步提高了控制

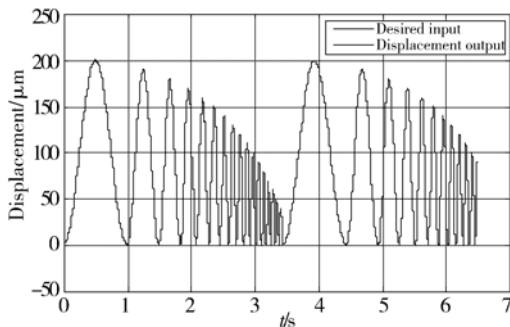


图 11 给定信号与输出信号图

Fig. 11 Desired input and system output displacement with inverse compensation

参考文献:

- [1] BANKS H T, SMITH R C. Hysteresis modeling in smart material systems[J]. *Appl. Mech. Eng.*, 2000(5):31-45.
- [2] TAN X, BARAS J S. Modeling and control of hysteresis in magnetostrictive actuators[J]. *Automatica*, 2004,40(9):1469-1480.
- [3] MAYEYERGOYZ I D. Mathematical model of hysteresis [J]. *IEEE Trans. on Magnet.*, 1986, 22(5):603-608.

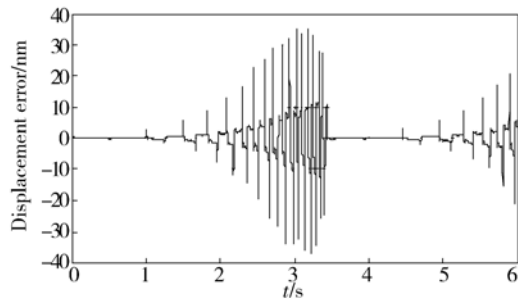


图 12 闭环补偿系统误差图

Fig. 12 Error with closed-loop compensation

精度,在 $0 \sim 200 \mu\text{m}$ 的范围内控制的绝对误差小于 40 nm ,提高了压电陶瓷的控制精度,验证了算法的有效性。

5 结 论

根据 Weierstrass 第一逼近定理,本文提出了以多项式逼近 Duhem 模型的 $f(v)$ 、 $g(v)$ 函数,采用递推最小二乘算法辨识 Duhem 模型的参数 α 及 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 的多项式系数,应用辨识出的参数,计算出压电陶瓷的 Duhem 逆模型。通过前馈逆补偿,有效地减少了压电陶瓷的迟滞现象。以 PI 公司的 P-563. 3CD(SN110023312) 多维压电陶瓷执行器为研究对象,测试了其迟滞特性。仿真实验和实际系统辨识表明,幅值在 $0 \sim 200 \mu\text{m}$ 时,仅通过开环逆补偿,绝对误差 $< 0.8 \mu\text{m}$;通过逆补偿和 PID 复合控制进一步提高了控制精度,使得定位绝对误差小于 40 nm ,从而验证了该算法的有效性。该算法结构简单,易于工程实现,具有一定的实用价值。

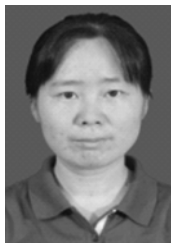
- [4] 刘向东,刘宇,李黎. 一种新广义 Preisach 迟滞模型及其神经网络辨识[J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(2):135-138.
LIU X D, LIU Y, LI L. A new kind of generalized Preisach hysteresis model and its identification based on the neural network[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(2):135-138. (in Chinese)
- [5] JILES D, LATHERTON D. Ferromagnetic hysteresis[J]. *IEEE Trans. Magnet.*, 1983, 19(5): 2183-2185.

- [6] GOLDFARB M, CELANOVIC N. A lumped parameter electromechanical model for describing the nonlinear behavior of piezoelectric actuators [J]. *ASME J. Dynamic Syst. Measure. Control*, 1997, 119(3):479-485.
- [7] WEN Y K. Method for random vibration of hysteretic system[J]. *ASCE J. Eng. Mech.*, 1976, 120: 2299-2325.
- [8] ANG W T, GARM'ON F A. Modeling rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators [C]. *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, NV, October*, 2003.
- [9] DONG R, TAN Y, CHEN H, *et al.*. A neural networks based model for rate-dependent hysteresis for piezoceramic actuators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 143(2):370-376.
- [10] DONG R, TAN Y. Modeling hysteresis in piezoceramic actuators using modified Prandtl-Ishlinskii model[J]. *Physica B*, 2009, 404(8-11):1336-1342.
- [11] OH J H, DENNIS S. Bemstein identification of rate-dependent hysteresis using the SE milinear Duhem model [C]. *Proceeding of the American Control Conference*, 2004:4776-4781.
- [12] BANKS H T, SMITH R C. Hysteresis modeling in smart material systems [J]. *Appl. Mech. Eng.*, 2000, 5:31-45.
- [13] OH J, BERNSTEIN D S. SE milinear Duhem model for rate-independent and rate-dependent hysteresis[J]. *IEEE Trans. Autom. Control*, 2005, 50(5):631-645.
- [14] SU C Y, STEPANENKO Y, SVOBODA J, *et al.*. Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis[J]. *IEEE Trans. Automat. Control*, 2000, 45(12):2427-2432.
- [15] FENG Y, RABBATH CA, CHAI T, *et al.*. Robust adaptive control of systems with hysteretic nonlinearities; a Duhem hysteresis modelling approach [J]. *IEEE Africom*, 2009:1-6.
- [16] HU H. Compensation of hysteresis in piezoceramic actuators and control of nanopositioning system [D]. Canada: *P. H. D Thesis of University of Toronto*, 2003.
- [17] 王生怀, 陈育荣, 王淑珍, 等. 三维精密位移系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):175-182.
WANG SH H, CHEN Y R, WANG SH ZH, *et al.*. Design of 3D precision displacement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):175-182. (in Chinese)
- [18] ZHANG X L, TAN Y H, SU M Y. Modeling of hysteresis in piezoelectric actuators using neural networks [J]. *Mechanical and Signal Processing*, 2009, 23(8):2699-2711.
- [19] 张栋, 张承进, 魏强. 压电微动工作台的动态迟滞模型[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3):551-556.
ZHANG D, ZHANG CH J, WEI Q. Dynamic hysteresis model of piezopositioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):551-556. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] 王岳宇, 赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞与蠕变的逆控制算法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6):1032-1040.
WANG Y Y, ZHAO X Z. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):1032-1040. (in Chinese)
- [22] 孙永生. 函数逼近论 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1989.
SUN Y SH. *Approximation of Functions* [M]. Beijing: Publishing House of Beijing Normal University, 1989.
- [23] LJUNG V L. *System Identification Theory for the User* [M]. Second Edition. Prentice Hall, 1999.
- [24] COLEMAN B D, HODGDON M L. A constitutive relation for rate-independent hysteresis in ferromagnetically soft materials [J]. *International J. Eng. Sci.*, 1986, 24:897-919.

作者简介:



陈 辉(1974—),男,陕西周至人,博士生,1997 年于桂林电子工业学院获学士学位,2004 年于桂林电子科技大学获硕士学位,主要从事智能检测与智能控制、非线性建模与控制方向的研究。E-mail: glchenhui@126. com



张亚红(1977—),女,陕西周至人,讲师,硕士,2000 年于桂林电子工业学院获得学士学位,2008 年于桂林电子科技大学获得硕士学位,主要从事信息安全、信号处理方面的研究。E-mail: yh_zhang2008@163. com



谭永红(1958—),男,广西桂林人,博士,教授,博士生导师,1996 年于比利时根特大学自动化与控制工程系电机工程获得博士学位,主要从事非线性系统建模与控制、工业系统智能控制等方向的研究与应用。E-mail: tany@ yahoo. com. cn



董瑞丽(1980—),女,河南西平人,2002 年、2005 年于西北工业大学分别获得学士、硕士学位,2009 年于上海交通大学获得博士学位,主要从事机电系统建模与控制方面的研究。E-mail: dongrlnpu@shnu. edu. cn



周杏鹏(1951—),男,江苏宜兴人,教授,博士生导师,1982 于南京工学院(现为东南大学)获硕士学位,现为东南大学大检测技术与自动化装置学科带头人,长期从事智能仪器与仪表、工业在线检测与优化控制技术的研究与应用。E-mail: zxpseu@126. com

●下期预告

线结构光传感器中光平面的主动视觉标定方法

陈天飞,马 孜,吴 翔

(大连海事大学 自动化研究中心,辽宁 大连 116026)

针对线结构光传感器的自动标定问题,提出了一种基于主动视觉的光平面标定方法。区别于以往求取光平面上标定点后拟合平面的方法,该方法通过控制传感器做若干平移运动分两步完成标定。首先,经多次平移运动得到光平面中相互平行直线在摄像机中的投影,经计算消影点完成光平面法向的标定。然后,控制传感器沿设定的与光平面法向相垂直的方向做 2 次平移运动,使其满足三点透视模型(P3P),完成摄像机坐标系原点到光平面距离信息的标定。实验结果表明:该标定方法具有较高的准确性,平均绝对测量偏差为 0.015 4 mm,相对误差为 0.183 0%。且该方法本质上属于自标定方法,标定过程无需使用标靶,降低了标定成本,操作灵活方便,适合现场标定。