

压电陶瓷驱动器控制模型建立及仿真

韦光辉, 陈道炯, 宫赤坤, 杨旭霞
(上海理工大学机械学院, 上海 200093)

摘要:介绍了一种压电陶瓷微位移驱动器的控制模型. 借助于统计物理学分析, 结合数学方法, 利用BP人工神经网络建立了一个简单实用的压电陶瓷的迟滞数学模型, 并根据实测压电陶瓷电压/位移数据, 对该控制模型进行了仿真, 仿真结果表明, 所建立的模型可有效地减小压电陶瓷的迟滞非线性误差, 提高压电陶瓷微位移的控制精度, 有助于实现压电陶瓷驱动器的高精度微位移开环控制.

关键词:压电陶瓷驱动器; 控制模型; 迟滞; BP神经网络

中图分类号:TP224 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-855X(2004)06-0050-04

Controlled Model and Simulating Behavior of Piezoelectric Actuators

WEI Guang-hui, CHEN Dao-jiong, GONG Chi-kun, YANG Xu-xia

(College of Mechanical Engineering, University of Shanghai Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A control model of piezoelectric actuators is introduced. By means of statistic physical analysis and mathematic method, a simple and practical mathematic formula describing the hysteresis of a piezoelectric actuators built by BP artificial neural network. According to some experimental results of the voltage and distance, the simulating behavior of the control model was practiced. The result shows that the model is effective in diminishing the error arising from nonlinear hysteresis. In this way micro-positioning control accuracy of piezoelectric actuators can be improved. As a result, the research is helpful to effect high precision open loop micro-positioning controls based on piezoelectric actuators.

Key words: piezoelectric actuators; control model; hysteresis; BP artificial neural network

0 引言

压电陶瓷驱动器是一种利用压电陶瓷逆压电效应制作的微位移器,但是由于压电陶瓷存在迟滞、蠕变和位移非线性等不足,而且位移输出不但和所处的电场强度、输入电压有关,还与压电陶瓷所处的环境温度、陶瓷片之间连接材料、驱动器受到的外力等因素有关^[1],在高精度定位应用场合,这些因素都不能忽视,因此其位移输出在一定程度上具有比较大的随机性,给驱动器精确定位带来误差,使驱动器转换信号失真,给压电陶瓷的控制带来困难.利用传统的压电方程^[2]或机电耦合动力学方程^[3]建立的压电陶瓷数学模型,对温度、陶瓷片间的连接材料、受力等情况没有考虑,不够周全.也有应用将电压/位移线性化进行反馈控制,或者对迟滞环进行分段多项式逼近的方法,虽然能在一定程度上降低迟滞的影响,但是控制序列复杂或迟滞环大时多项式逼近难以达到令人满意的效果,而且在有些情况下难以安装高精度的传感器,因此不能建立有效的反馈系统,系统的自适应的能力比较弱.采用电荷控制方法虽然有比较好的线性度,但存在响应速度慢,不易控制的问题,同时当外部工作环境改变时,也不能很好地适应.

本文主要针对压电陶瓷迟滞特性,拟通过对压电陶瓷的物理、数学分析,运用BP神经网络建立模型并仿真.

收稿日期:2004-05-14. 基金项目:上海理工大学创新基金.

第一作者简介:韦光辉(1979~),男,在读硕士.主要研究方向:精密测控技术. E-mail: wghls@163.com.

1 压电陶瓷迟滞模型建立

压电陶瓷迟滞特性对陶瓷的位移输出精度有很大的影响. 图1、图2分别是两种不同型号的压电陶瓷驱动器在开环控制下实际测量到的电压/位移特性曲线. 从图中可以看出压电陶瓷的位移输出有较大的滞回. 图1重合性比较好, 即在下降沿压电陶瓷位移能够恢复到初始位零电压状态; 图2重合性差, 不能够恢复到零电压状态, 这是由于对应于图2的压电陶瓷驱动器的电容比较大, 使压电陶瓷驱动器带有剩余电荷而引起的, 或者压电陶瓷具有预置电压.

考虑到压电陶瓷驱动器在很多情况下的实际应用及本课题的实际需求, 只利用其上升沿工作, 故本文只讨论压电陶瓷驱动器的上升沿的模型建立. 鉴于图1是图2的特殊情况, 这里只讨论图2的情况.

1.1 迟滞特性分析

采用统计物理学的方法来推导电偶极子的宏观规律可知: 压电陶瓷伸长的位移值由所施加电压值及其固有电偶极矩所决定. 而固有电偶极矩则与所加电压的历史有关. 施加不同初始电压的位移曲线之间具有线性关系.

观察图2中的迟滞曲线分布可知, 施加不同初始电压的曲线之间具有相似性, 首先每条曲线的上升起始形状相差不大, 并且最终都收敛到施加极限电压处, 此处即压电陶瓷晶体位移的最大值, 定义其为饱和区域. 在整个上升过程中, 曲线间的差别只是收敛的速度不同. 为了简便, 把从零点出发的曲线定义为极限曲线, 则其他曲线与极限曲线之间的函数关系为线性对应关系, 与统计物理学分析得出的结论是一致的. 只要有了极限曲线的模型, 就可以通过极限曲线和具有不同初始电压的电压/位移曲线的线性关系得出压电陶瓷的迟滞模型.

1.2 迟滞曲线的线性关系

施加不同起始电压值的迟滞曲线具有线性关系, 因此具有相同的导数, 即极限上升曲线 f_0 与上升分支 f_n 的导数相同, 即

$$f_n(u) = f_0(u - U_0) \quad (1)$$

又因为当趋于极限点时导数相同, 经过推导可得出

$$f_n = kf_0(u - U_0) + b \quad (2)$$

其中

$$k = \frac{f_n(U_s) - f_n(U_0)}{f_0(U_s) - f_0(0)} \quad (3)$$

$$b = f_n(U_0) - k * f_0(U_0) \quad (4)$$

因为初始点的电压位移, 极限点的电压位移都可以测得, 这样只要建立极限曲线的模型就可以根据式(2)、(3)、(4)得到整个压电陶瓷的上升沿的迟滞模型.

1.3 利用BP神经网络建立极限曲线模型

从以上分析可以看出极限曲线直接影响着整个模型的准确程度. 鉴于BP神经网络具有结构简单, 计算速度快, 适应性强等特点, 而且尤其适用于非线性建模, 同时外界环境温度、受力、陶瓷片间的连接材料等外部因素对压电陶瓷的电压/位移曲线的影响, 也可以通过具有很强的自学习、自适应的能力的BP神经网络给予修正, 故选择BP神经网络对极限曲线进行建模.

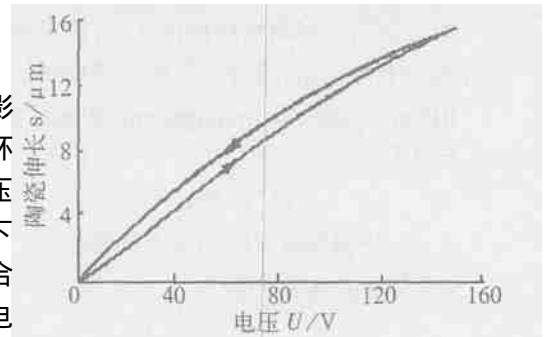


图1 压电陶瓷位移曲线

Fig.1 Displacement curves of piezoelectric actuator

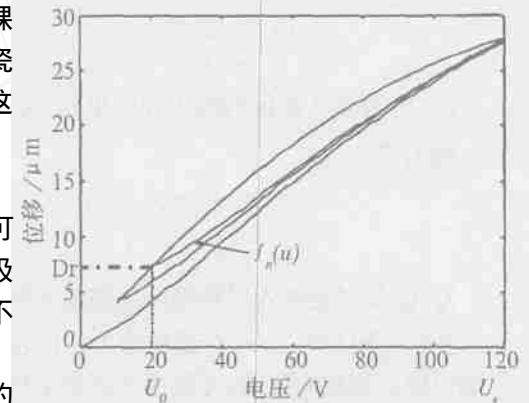


图2 压电陶瓷位移滞回曲线

Fig.2 Hysteresis curves of piezoelectric actuator

本文采用三层网络结构的BP神经网络,驱动电压作为输入神经元,位移输出作为输出神经元.输入输出各有一个神经元,经过试算确定隐层神经元数为6.

BP(error back - propagation) 学习算法:

输入层:

$$Q_i = f(I_i) \quad (5)$$

I_i, O_i 分别为输入层的输入和输出.

f 采用 Sigmoid 函数

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (6)$$

隐层:

$$\mu_j = \sum_i w_{ij} O_i + \theta_j \quad (7)$$

$$Z_j = f(\mu_j) \quad (8)$$

μ_j, Z_j 分别为隐层的输入和输出; θ_j 为域值,取 $\theta_j = 1$; w_{ij} 为输入层到隐层的连接权值; f 函数同前.

输出层:

$$s_k = \sum_j w_{jk} z_j + \theta_k \quad (9)$$

$$v_k = f(s_k) \quad (10)$$

s_k, v_k 分别是输入层和输出层的输入和输出.

把输出层的输出 v_k 与期望输出相比较,若其误差超出规定的范围,则把这个误差按一定的方法从输出层向输入层反向传播,并逐层修改各层神经元的权系数 w ,以减少下一次学习的误差.

$$w_{jk} = w_{jk} + \eta \delta_k \quad (11)$$

$$\delta_k = - \frac{\partial E_{jk}}{\partial w_{jk}} \quad (12)$$

其中 η 为学习率,本文中最终选取 $\eta = 0.3$.

$$w_{ij} = w_{ij} + \eta \delta_j \mu_i \quad (13)$$

$$\delta_j = - \frac{\partial E_{jk}}{\partial \mu_j} = - \sum_k \delta_k w_{jk} \quad (14)$$

$$\delta_j = f'(\mu_j) \sum_k \delta_k w_{jk} \quad (15)$$

选择部分但足够数量的测得的极限曲线的电压位移值进行样本学习.采用最速下降法获得与神经网络模型的各层权值.

2 仿真实例

本文根据某型号电致伸缩陶瓷的电压/位移特性曲线图,对该型号的陶瓷迟滞模型进行仿真,耐压范围为 $-300 \sim +300$ V,根据实际需求这里我们只考虑电压 $0 \sim 300$ V时,且在电压上升沿的电压/位移特性.如图3所示.

利用BP人工神经网络建立极限曲线的模型,学习样本为电压 $0 \sim 300$ V均匀分布的50个电压/位移采样点,学习过程中的误差曲线如图4所示.

然后利用已经建立的极限曲线的BP神经网络模型,根据式(2)、(3)、(4)建立压电陶瓷驱动器的神经网络迟滞模型.

最后利用在电压 $0 \sim 300$ V均匀分布的30个电压/位移采样点数据作为模型检验样本,根据模型输出

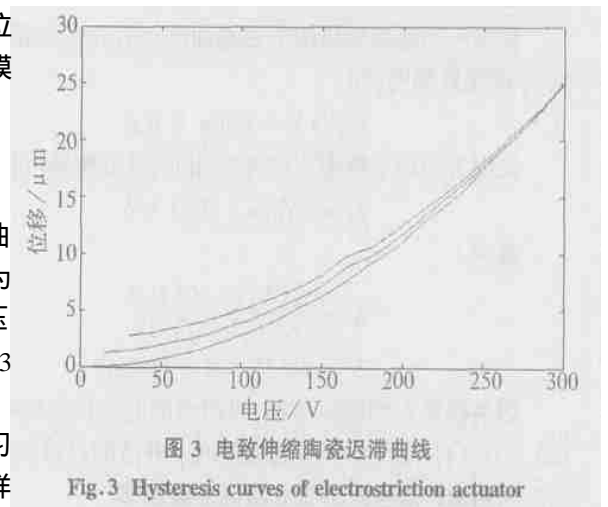


图3 电致伸缩陶瓷迟滞曲线
Fig.3 Hysteresis curves of electrostriction actuator

得到压电陶瓷模型迟滞曲线,如图5中虚线所示.图中实线表示实际迟滞曲线.

经计算,应用该模型计算压电陶瓷的位移误差占总位移量的0.7%.从仿真结果可以看出,所建立的压电陶瓷驱动器的电压/位移控制模型从理论上能够较好地模拟出驱动器的迟滞特性.故应用BP神经网络建立压电陶瓷驱动器的迟滞模型能够为解决驱动器的非线性误差提供有效方法.

3 结论

通过借助物理学分析,结合数学方法,利用BP神经网络建立的压电陶瓷的迟滞数学模型有以下优点:

(1) 克服了传统数学模型,如压电方程、机电耦合动力学方程对外部环境考虑不周全的问题能够较全面的考虑外部条件的影响,模拟压电陶瓷的电压/位移特性.

(2) BP神经网络所需学习样本较少,故当外部工作环境变化时,能够通过少量的样本学习迅速建立驱动器的迟滞模型,使该模型具有较强的自适应能力.

(3) 利用此模型可对压电陶瓷驱动器采用电压开环控制,不存在电荷控制响应速度慢,不易控制的问题,而且开环控制能够克服闭环反馈控制在实际操作中的缺点.

参考文献:

- [1] 张涛,孙立宁.压电陶瓷基本特性研究[J].光学精密工程,1998,6(5):26~32.
- [2] 阎绍泽,吴德隆.航天压电陶瓷微位移作动器设计与实验研究[J].导弹与航天运载,1998(6):25~31.
- [3] 聂润兔,邹振祝.压电桁架动力学建模与振动控制[J].宇航学报,1998,19(4):8~14.
- [4] 曲东升,荣伟彬.压电陶瓷微位移器件控制模型的研究[J],2002,10(6):602~607.
- [5] 徐丽娜.神经网络控制[M].北京:电子工业出版社,2003:11~65.
- [6] 杜正春,李春梅,颜景平.非线性迟滞现象的广义模型及其在压电微作动器中的应用[J].仪器仪表学报,1999,20(4):32~34.
- [7] G P Jouanch M. Tracking control of a Piezoceramic actuator[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 1996, 4(3):209~216.
- [8] Leigh T, Zimmerman D. An implicit method for the nonlinear modeling and simulation of Piezoceramic actuators displaying hysteresis[J]. Smart structures and material, 1991, AMD-123:57~63.

