

压电陶瓷精密控制系统的自适应模糊控制器研究

刘建秀, 张 杨, 张段芹

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 针对压电陶瓷等非线性系统, 建立压电陶瓷微精密位移系统模型, 并将模糊控制器替换传统的比例、积分和微分(PID)控制器, 实现对 PID 参数的在线自整定。对模糊控制器的控制变量及论域等级等进行了研究及制定, 并对其进行 MATLAB 仿真。实验结果表明, 模糊逻辑控制器比传统 PID 控制器的响应速度快, 超调量小, 且控制策略简单易行。

关键词: 压电陶瓷; 模糊控制; 微定位系统; 仿真模型; 位移驱动器

中图分类号: TN712

文献标识码: A

The Control System of Piezoelectric Ceramic Precision Adaptive Fuzzy Controller

LIU Jianxiu, ZHANG Yang, ZHANG Duanqin

(School of Mechanic and Electronic Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Establish precision displacement system model based on the characteristics of the piezoelectric ceramic (PZT), and the fuzzy controller is replaced with conventional PID controller, achieve on-line self-tuning PID parameters. Developed a control variable fuzzy controller, define fuzzy sets and the simulation with Matlab. The experimental results show that the fuzzy logic controller has fast response, less overshoot than traditional PID controller.

Key words: piezoelectric ceramic(PZT); fuzzy control; micro-positioning; modeling; displacement actuator

0 引言

压电陶瓷是一种可将机械能与电能相互进行转换的陶瓷材料, 此特性压电陶瓷可运用在诸多领域。压电陶瓷驱动器则利用其逆电压效应, 输出精确位移, 由于其具有体积小, 分辨率高, 无噪声等特点, 是一种理想的纳米微位移元件, 在光学、电子、航空航天、机械制造、生物工程及机器人等技术领域展现出极好的应用前景^[1]。

在纳米定位技术中, 其驱动装置运用最广的是压电陶瓷驱动器。但由于压电陶瓷的迟滞、非线性和蠕变效应, 降低了其定位精度, 给压电陶瓷微定位系统的控制带来困难^[2], 从而使开环控制在精度上引起误差。因此, 采用位移反馈实现闭环控制, 是减小压电陶瓷非理想特性, 获得理想定位精度的一个有效途径。传统的比例、微分和积分(PID)控制由于算法简单及鲁棒性好等特点, 广泛应用于过程控制和运动控制中。然而由于常规 PID 参数整定方

法复杂, 对于压电陶瓷这种传递函数极小的模型, 整定后的参数性能欠佳。将模糊控制器与 PID 结合, 对 PID 参数 k_p 、 k_i 和 k_d 实现在线自整定, 实现闭环控制。

1 压电陶瓷微定位系统

压电陶瓷的微定位系统由压电陶瓷驱动电源、压电陶瓷、转换电路、数字信号处理(DSP)(TMS320F2812)控制系统、定位机构和用于微位移检测的电容测微仪、A/D 数据采集电路及 D/A 转换电路等部分组成(见图 1)。图中, U_i 为驱动电源输出电压, X_{out} 为压电陶瓷输出位移, e 为 A/D 输出信号。上位机按预先设定的位移大小发出驱动控制信号, 经 DSP 处理发出脉冲宽度调制(PWM)模拟波形输入压电陶瓷驱动电源, 然后连接压电陶瓷, 输出高压对其施加电场, 产生微位移。电容测微仪将微位移信号转换为电信号, 并通过 A/D 转换器后将位移信号送回控制器与预定位移进行比较, 由上位

收稿日期: 2014-11-04

基金项目: 河南省国际科技合作基金资助项目(134300510019), 郑州市普通科技攻关基金资助项目(141PPTGG346)

作者简介: 刘建秀(1962-), 女, 山西洪洞县人, 教授, 主要从事材料及力学的研究。E-mail: jianxiuli@126.com。

机根据预定算法及偏差输出控制信号,从而实现闭环的无偏差定位。

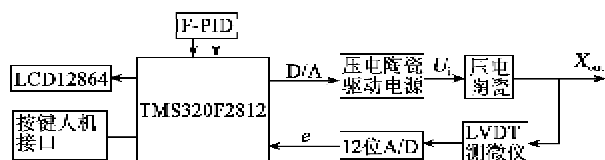


图1 微位移系统硬件控制框图

2 模糊控制器的设计

2.1 压电陶瓷的基本原理

压电陶瓷本身性质为电介质,具有正、逆压电效应。理想条件下,即电场不强时,压电陶瓷伸缩应变与外加电压间应呈线性关系,但实际上,由于陶瓷生产时的制造工艺影响,造成压电陶瓷伸缩应变与外加电压(即输入与输出)间并非呈线性关系。图2为实验所使用的SZBS型压电陶瓷的开环特性曲线。

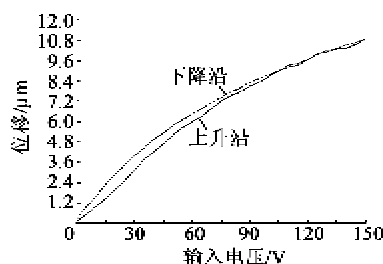


图2 压电陶瓷开环特性曲线

2.2 压电陶瓷的数学模型

压电陶瓷需要外加专门的驱动电源来提供稳定可变的驱动电压。实验采用HPV-1C0150A0500型压电陶瓷驱动电源,电压驱动范围为0~150 V,驱动电源将与陶瓷直接相连。

压电陶瓷由于其本身的特性(蠕变性等),无法用传统的分析法建立起数学模型。驱动电源的共振频率一般较高,频率高于10 kHz,在频率远低于共振频率时,系统位移的等效电路,如图3所示。

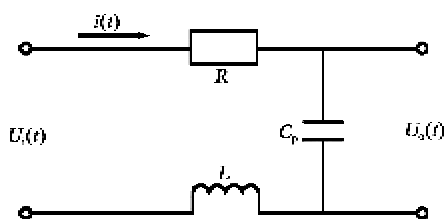


图3 压电陶瓷简化模型

为防止压电陶瓷驱动电源被击穿,因此在电路中串联一个限流电阻 R 。 C_p 、 L_p 分别为压电陶瓷驱动电源的等效电容及等效电感,且 $L_p = m_p / (k_p C_p)$,

其中, m_p 为原件质量, k_p 为刚度。将驱动部分简化为一个RLC网络电路^[4]。

根据环路电压定律 $\sum U_i = 0$ 和节点电流定律

$$\sum I_i = \sum I_o \text{ 可得}$$

$$u_i = u_L - u_R + u_C \quad (1)$$

又

$$u_L = L \cdot (di/dt) \quad (2)$$

$$u_R = i \cdot R \quad (3)$$

$$u_C = u_C = \frac{1}{C} \int i dt \quad (4)$$

即可得

$$L_p C_p \frac{d^2 u_o(t)}{dt^2} + R C_p \frac{d u_o(t)}{dt} + u_o(t) = u_i(t) \quad (5)$$

对式(5)进行拉普拉斯变换得到驱动电源部分的传递函数为

$$G_u(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{L_p C_p s^2 + R C_p s + 1} \quad (6)$$

同时压电陶瓷本身的传递函数也要考虑。将压电陶瓷等效为一个弹性体,将压电陶瓷在电场的作用下产生的电荷等效为大电偶极子,文献[5]表明,压电陶瓷在逆压电效应下,位移 ΔL 、电介质极化电荷 Q' 、剩余极化电荷 Q_r 及陶瓷特性参数相关,压电陶瓷位移与电场强度、电极化强度间的关系^[5]为

$$\Delta L = \frac{Q' Q_r + Q'^2}{\epsilon_0 S K} = \frac{Q_r \epsilon E + \epsilon^2 E^2 S}{\epsilon_0 K} = dE + ME^2 \quad (7)$$

$$\Delta L = \frac{Q' Q_r + Q'^2}{\epsilon_0 S K} = \frac{Q_r P + P^2 S}{\epsilon_0 K} = gP + GP^2 \quad (8)$$

式中: ΔL 为压电陶瓷的伸长量; E 为压电陶瓷的内部电场强度; P 为压电陶瓷的内部电极化强度; ϵ 为压电介质的介电常数; ϵ_0 为真空中的介电常数; Q_r 为极化后的剩余电荷; S 为压电陶瓷的横截面积; K 为压电陶瓷叠片的弹性模量。即可得压电陶瓷电场与位移的关系为

$$\Delta L = dE + ME^2 = gP + GP^2 \quad (9)$$

由简化模型,压电陶瓷可看作一个惯性环节进行处理。得到压电陶瓷位移 $\Delta L = x$ 与电压间的传递函数为

$$G_x(s) = \frac{d_c}{\tau s + 1} \quad (10)$$

式中: d_c 为压电陶瓷位移转换系数; τ 为惯性环节的时间常数。

综上可得到压电陶瓷位移发生部分,即电源与

压电陶瓷间的传递函数为

$$G_p(s) = \frac{X(s)}{U_k(s)} = G_x(s) \cdot G_c(s) = \frac{1}{L_p C_p s^2 + RCs + 1} \cdot \frac{d_c}{\tau s + 1} \quad (11)$$

微位移驱动器安装在气动平台上,实验采用苏州博实公司生产的 SZBS 150/5 × 5/10 型压电陶瓷。试验中并未涉及放大装置及预紧装置,因此微位移平台部分的传递函数可省去。微进给平台传递函数为封装仿真图,如图 4 所示。

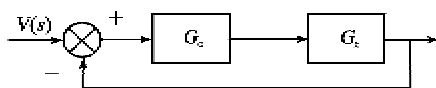


图 4 精密进给系统闭环传递函数框图

3 模糊控制器

3.1 模糊逻辑算法

与传统 PID 控制器相比,模糊逻辑规则控制器根据当前系统测得偏差(e)和偏差变化(ec)相互间关系,可判断未来响应变化趋势,判断标准是由操作人员(专家)长期实践积累的经验知识用控制规则模型化,即成为模糊控制器的规则库。控制器及时采取措施使被控对象的输出快速向设定值靠拢。模糊控制器即把传统 PID 控制与先进的专家系统相结合,从而实现系统的最佳控制,同时规则库的精确程度影响了整个控制器的精度,规则库越精细控制越精确,但同时响应时间会受影响。PID 控制器的控制算式为

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum e(k) + k_d ec(k) \quad (12)$$

式中 $\sum e(k) = ek + e(k-1)$ 和 $ec(k) = e(k) - e(k-1)$ ($k=0,1,2$) 分别为输入变量偏差与偏差变化。用于参数调整的 PID 自适应模糊控制器结构采用二输入三输出的模式。即采用 e 与 ec 作为输入,分别以 PID 控制器的 3 个参数 P、I、D 的修正 ($\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$) 作为输出。对 e, ec 及 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的模糊子集定义为 $[NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]$, 子集中的元素分别代表了负大,负中,负小,0,正小,正中,正大。 e 和 ec 的论域为 $[-3, 3]$, k_p, k_i 及 k_d 的论域分别为 $[-3, 3], [-0.06, 0.06], [-3, 3]$ 。其量化等级为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3], [-0.06, -0.04, -0.02, 0, 0.02, 0.04, 0.06]$ 。针对 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 3 个参数的整定得到如表 1~3 所示^[6]。

表 1 Δk_p 的模糊控制规则

	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NB	NB

表 2 Δk_i 的模糊控制规则

	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB

表 3 Δk_d 的模糊控制规则

	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PS	NS	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PB

由模糊子集的隶属度赋值表和各个参数模糊控制模型,应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表可得

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases} \quad (13)$$

式中 k_{p0}, k_{i0}, k_{d0} 为 PID 参数的原始值,由常规 PID 控制器参数整定方法进行设计。在使用 MATLAB 模糊逻辑工具箱中,输入量 e, ec 与输出量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的隶属度函数选为三角形(trimf)函数。

根据专家的经验思维推理,由系统输出的误差及误差变化趋势来消除系统误差的模糊控制规则。模糊变量误差 e 、误差变化 ec 以及其输出变量的模糊集和论域确定后,需对模糊变量赋值,即确定论域内的各个元素,对控制器中模糊语言变量的隶属度。

e 、 ec 、 Δk_p 、 Δk_d 的论域同为 $[-3, 3]$, Δk_i 的论域为 $[-0.06, 0.06]$ 。把模糊规则转化为语言型的规则形式, 写成条件语句并存入 DSP, 在使用时, 通过调用程序就可实现预期目标, 不必在控制过程中实施推理, 从而实现了实时的闭环控制。对于控制器中的 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 及输入量的调节规则可写成以下 19 条模糊条件语句:

1) if(e is NB) and (ec is NB) then (Δk_p is PB)(Δk_i is NB)(Δk_d is PS)(1)

2) if(e is NB) and (ec is NM) then (Δk_p is

PB)(Δk_i is NB)(Δk_d is NS)(1)

3) if(e is NB) and (ec is NS) then (Δk_p is PM)(Δk_i is NM)(Δk_d is NB)(1)

4) if(e is NB) and (ec is Z) then (Δk_p is PM)(Δk_i is NM)(Δk_d is NB)(1)

5) if(e is NB) and (ec is PS) then (Δk_p is PS)(Δk_i is NS)(Δk_d is NB)(1)

...

运用 MATLAB 的 simulink 仿真器, 分别建立模糊控制器与 PID 控制器, 如图 5 所示。

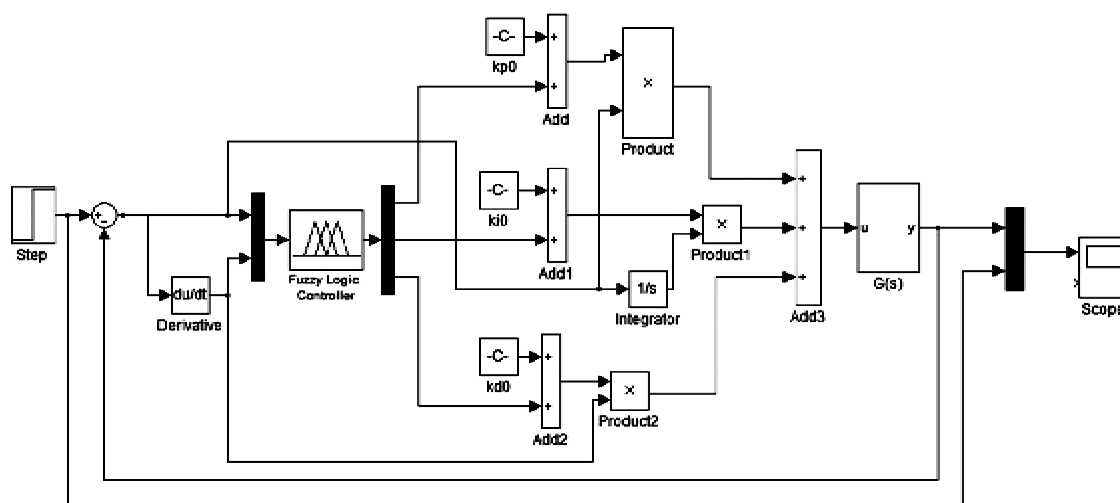


图5 模糊控制器仿真模型

3.2 仿真结果

将仿真系统的传递函数封装, 并设置仿真时间为 10, 算法为 ode45, 采样周期为 0.01 s, 进行仿真, 其结果如图 6、7 所示。

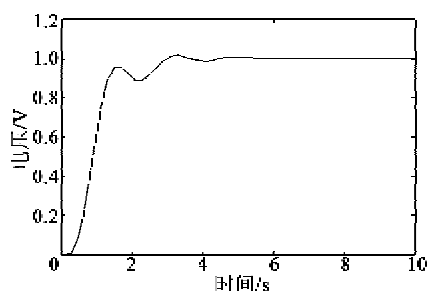


图6 传统 PID 控制

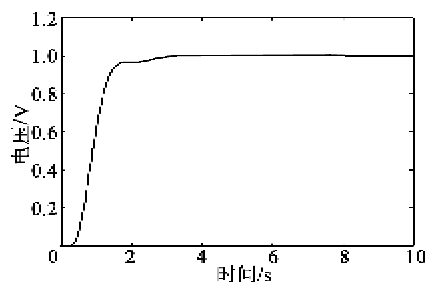


图7 模糊 PID 控制

4 结束语

将模糊控制器应用于压电陶瓷的位移驱动系统中, 控制策略不需复杂运算及调试, 其动态指标均优于传统 PID 控制。模糊-PID 控制器使用方法简便, 响应迅速, 自适应能力优异。在以压电陶瓷等非线性精密控制对象上有广泛的应用。

参考文献:

- [1] 徐源, 李蓓智, 张家梁. 基于压电陶瓷的精密进给系统的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2008(9): 124-126.
XU Yuan, LI Beizhi, ZHANG Jialiang. Research of precision feeding system based on piezo-electric actuator [J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(9): 124-126.
- [2] 刘泊, 郭建英, 孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1503-1509.
LIU Bo, GUO Jianying, SUN Yongquan. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1503-1509.

(下转第 817 页)