

文章编号 1004-924X(2007)03-0372-06

压电型喷嘴挡板阀及其控制方法研究

周淼磊¹, 杨志刚², 田彦涛¹, 程光明², 高 巍¹

(1. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130025, 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:提出了一种新型压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀,并对其控制方法进行了研究。采用成本较低的双压电晶片弯曲元件设计了双喷嘴挡板放大器,用其取代原有传统的力矩马达作为双喷嘴电液伺服阀的前置级驱动器。介绍了新型压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀的工作原理。最后,针对压电元件存在的迟滞、蠕变非线性及系统中存在的时变性因素等问题,采用了具有自学习、自适应和自组织能力的单神经元自适应 PSD 智能控制算法对系统进行控制。实验结果表明,采用 PID 控制算法时系统阶跃响应的超调量和稳态时间分别为 27.9% 和 0.13 s,而采用提出的控制算法时系统阶跃响应的超调量和稳态时间只有 2.4% 和 0.07 s,验证了该方法的有效性。新型压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀结构简单、成本低、精度高,可以满足精密控制系统的要求。

关键词:压电晶片;喷嘴挡板式电液伺服阀;非线性;单神经元自适应 PSD

中图分类号:TN384;TP273 **文献标识码:**A

Piezoelectric type nozzle flapper valve and its control method

ZHOU Miao-lei¹, YANG Zhi-gang², TIAN Yan-tao¹, CHENG Guang-ming², GAO Wei¹

(1. *College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;*
2. *College of Machinery Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China*)

Abstract: A novel piezoelectric type nozzle flapper hydroelectric servo valve was developed and its control method was researched. A double nozzle baffle amplifier was designed as the prestage actuator of the double nozzle flapper hydroelectric servo valve by the low cost bimorph bend component, then the principle of the novel piezoelectric type nozzle flapper hydroelectric servo valve was introduced. Finally, for the hysteresis and creep nonlinearities of the piezoelectric component and time variation factors of the system, a single nerve-cell adaptive PSD intelligent control method was presented. Experimental results show that the overshoot and the setting time of the step respond under the PID control method is 27.9% and 0.13 s, respectively, but the overshoot and the setting time of the step respond under the proposed control method is 2.4% and 0.07 s. It is proved that the proposed control method is validaty. Experimental results also indicate that the novel piezoelectric type nozzle flapper hydroelectric servo valve has advantages in simple structure, low cost and high precision, it can meet the need of high precise control system in the recent period.

Key words: bimorph; nozzle flapper hydroelectric servo valve; nonlinearity; single nerve-cell adaptive PSD control

收稿日期:2006-07-22;修订日期:2006-12-18.

基金项目:国家 863 计划项目(No. 2001AA423270);中国博士后科学基金项目(No. 2005037185)

1 引言

电液伺服阀作为连接电气部分与液压部分的桥梁,是电液伺服系统的核心部件。电液伺服系统在工程上的应用日益广泛,其应用领域的拓宽,对电液伺服阀提出了更高的技术要求:如高压、大流量、抗干扰、抗油液污染、控制精度高和成本低廉等。而传统的电液伺服阀已经难以达到这些要求,因此新型电液伺服阀的研制成为流体传动控制领域发展的一大难题。随着机械制造与设计技术及微电子技术的发展,电液伺服阀技术的发展主要体现为新型材料的应用及新型结构的设计开发^[1]。新型材料包括压电陶瓷材料、超磁致伸缩材料、形状记忆合金等。其中压电陶瓷材料中的压电晶片因为具有价格低廉、体积小、分辨率高、频响快等优点,被广泛应用到精密机械及微驱动等领域。

本文利用双压电晶片设计了一种双压电晶片弯曲元件,并采用该元件取代传统的电磁式动圈马达或力矩马达作为电液伺服阀的前置级驱动器,研制出一种新型的压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀。实验研究发现,该系统具有参数时变性及复杂的非线性,需要采用有效的控制方法来提高系统的性能。目前,PID控制方法由于具有结构简单、易于设计和造价低廉等优点,被广泛应用于工业控制领域。然而对于具有高度非线性和不确定性的新型压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀系统,该方法难以取得很好的控制效果。为提高系统的性能,本文采用单神经元自适应PSD智能控制算法,利用神经元的自学习、自组织能力对控制器进行在线调整,具有很高的鲁棒性。控制算法结构简单,计算量小,易于工程实现。

2 压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀的结构及工作原理

2.1 压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀的结构

压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀在结构上可分为两部分:采用双压电晶片弯曲元件制作的双喷嘴挡板放大器和喷嘴等组成双喷嘴挡板阀作为第一级,由一个功率滑阀作为第二级。

双压电晶片弯曲元件是由两片沿厚度方向极化过的压电晶片与金属片粘贴在一起形成的,其基本结构如图1所示。其中左、右两层为材料及结构尺寸均相同的压电晶片(PZT-5H),两个压电晶片的极化方向相反,中间层为金属层(镀青铜)。工作时,弯曲元件相当一端固定的悬臂梁。施加电压后,一个压电片在长度方向缩短,而另一压电片在长度方向伸长,产生的弯曲张力使弯曲元件顶端产生形变位移^[2]。利用双压电晶片弯曲元件制作的双喷嘴挡板放大器如图2所示。

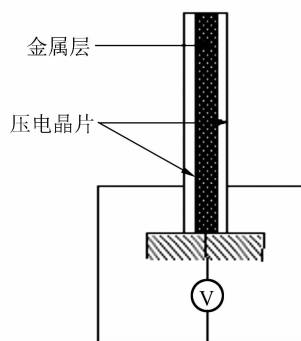


图1 双压电晶片弯曲元件

Fig. 1 Structure of bimorph bend component

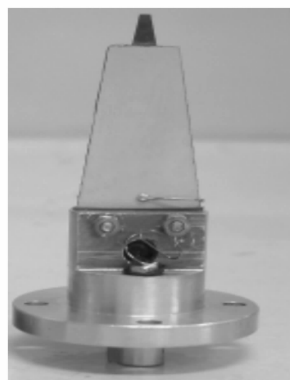


图2 双喷嘴挡板放大器

Fig. 2 Double nozzle baffle amplifier

图3和图4分别为研制的新型压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀结构原理图及样机图。该阀主要由2个进油口、2个工作油口、2个喷嘴、1个回油口以及进油口、回油口内的固定节流口组成。

2.2 压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀的工作原理

在系统供油压力 P_s 作用下,工作油液经固定节流孔、喷嘴前腔、喷嘴、喷嘴端面和压电弯曲元件之间的间隙后排入回油腔。喷嘴前腔与负载

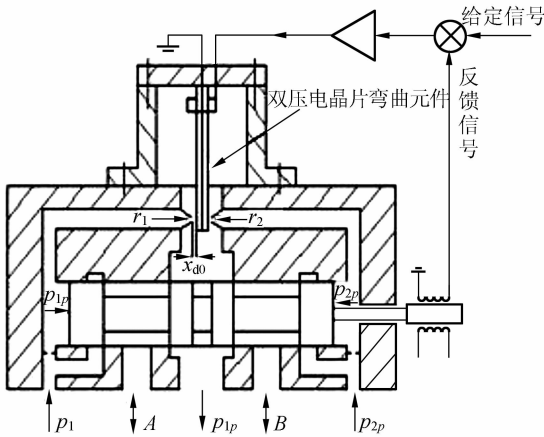


图 3 压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀结构原理图
Fig. 3 Structure principle of piezoelectric type nozzle flapper hydroelectric servo valve

腔相连。间隙的大小 X_{d0} 取决于双压电晶片弯曲元件相对端面的位置。

当双压电晶片弯曲元件处于两个喷嘴的中间位置时,两个喷嘴负载腔压力相等,产生的压力差 $\Delta p_p = p_{1p} - p_{2p} = 0$,此时阀无输出。当施加电压控制信号时,双压电晶片弯曲元件在控制电压作用下会产生偏转位移,可使固定节流孔截面积改变,通过喷嘴的油液流量将发生变化。由于前面有恒压源及固定节流孔,所以两个喷嘴前腔内的压力 r_1 和 r_2 (即通往两个负载腔的压力)同时发生变化。两个喷嘴负载腔压力将不再相等,产生压力差 $\Delta p_p = p_{1p} - p_{2p} \neq 0$,此压力差加到功率滑阀的两端并驱动其运动。

功率滑阀的位移由位移传感器测得,经转换电路处理送到控制器内。在控制器中,经由控制算法得到前置驱动级的控制信号,实现位置反馈补偿。当给定信号为某一正(负)值时,控制器控制主滑阀向右(左)移动,直至测量值与给定值相同时,滑阀停止运动,伺服阀获得一个稳定输出量。对于每一个给定值,滑阀都有一个确定位置与之相对应,且给定值与滑阀位移成正比,而滑阀的流量(压力)与其位移量成正比。因此阀的输出流量(压力)与给定信号成正比,从而实现伺服阀的流量、压力控制。

3 控制算法研究

新型压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀系统

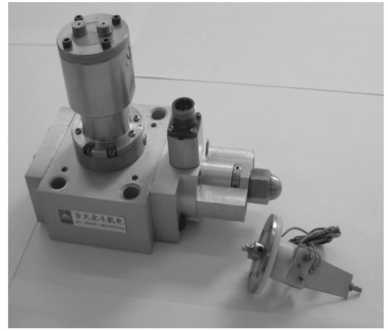


图 4 压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀样机图
Fig. 4 Prototype of piezoelectric type nozzle flapper hydroelectric servo valve

是开环不稳定系统,需要采用闭环反馈控制方法加以控制。在闭环反馈控制系统中,工业上普遍采用的控制算法为 PID 控制算法。然而压电晶片元件具有迟滞,蠕变等非线性^[3-6],并且系统中摩擦力、阀工作死区等非线性及阻尼系数、油温等时变性因素^[7],使压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀系统具有参数时变性及复杂的非线性。传统 PID 控制器本质上是一种线性控制器,不适合控制具有参数时变和非线性特性的被控对象,对于本系统难以取得很好的控制效果。神经元自适应算法具有非线性映射能力,并且算法简单、易于实现、鲁棒性强。自适应 PSD 控制算法^[8]根据过程误差的几何特性建立性能指标,从而形成无需辨识对象参数的自适应 PSD 控制律。利用二者的优点,将神经元算法同自适应 PSD 算法相结合形成单神经元自适应 PSD 智能控制算法^[9]。本文采用该控制算法对系统进行控制,其控制结构框图如图 5。

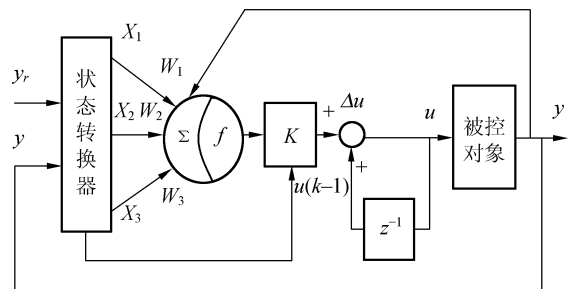


图 5 单神经元自适应 PSD 智能控制系统结构
Fig. 5 Structure of single nerve-cell adaptive PSD control system

图中状态转换器的输入反映被控过程及控制设定的状态,其输入量分别为设定值 $y_r(k)$ 和被控对象的输出 $y(k)$,经状态转换器转换后作为神经元学习的状态输入量 $x_1(k), x_2(k), x_3(k)$,它们分别为:

$$\begin{cases} x_1(k) = y_r(k) - y(k) = e(k) \\ x_2(k) = \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) = \Delta^2 e(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $e(k)$ 为 k 时刻的偏差, $\Delta e(k)$ 为 k 时刻偏差变化速度, $\Delta^2 e(k)$ 为 k 时刻偏差变化加速度。

为了保证算法的收敛性和鲁棒性,采用规范化学习方法,得到单神经元自适应 PSD 智能控制算法如下:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta(k), \quad (2)$$

$$\Delta u(k) = K(k) \sum_{i=1}^3 w_i'(k) x_i(k), \quad (3)$$

$$w_k' = \frac{w_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |w_i(k)|}, \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} w_1(k+1) = w_1(k) + \eta_i z(k) u(k) [e(k) + \Delta e(k)] \\ w_2(k+1) = w_2(k) + \eta_p z(k) u(k) [e(k) + \Delta e(k)] \\ w_3(k+1) = w_3(k) + \eta_d z(k) u(k) [e(k) + \Delta e(k)] \end{cases}, \quad (5)$$

式中, $u(k)$ 为控制器 k 时刻控制量输出; $w_i(k)$ 是神经元的加权系数; $K(k)$ 为神经元的增益系数; η_i, η_p, η_d 分别为积分、比例、微分的学习速率。

单神经元自适应 PSD 控制器通过对加权系数 $w_i(k)$ 的调整来实现自适应、自组织功能。本文加权系数的调整采用有监督的 Hebb 学习规则,它与神经元的输入、输出和输出偏差三者的相关函数有关,即

$$\begin{cases} w_i(k+1) = (1-b)w_i(k) + \eta r_i(k) \\ r_i(k) = z(k) u(k) x_i(k) \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $r_i(k)$ 为递进信号,同 $w_i(k)$ 成正比,随着控制过程进行而缓慢衰减; $z(k) = y_r(k) - y(k) = e(k)$ 为教师信号; η 为学习速率; b 为常数,且 $b \geq 0$ 。应用随机逼近理论,可以证明当 b 足够小时, $w_i(k)$ 收敛到某一稳定值 w_i^* , 本文取 $b=0$ 。

根据 PSD 控制规律^[10],增益系数 $K(k)$ 有多

种迭代算法,本文选择

$$\begin{cases} K(k) = K(k-1) + c \frac{K(k-1)}{T_v(k-1)} \\ \text{sgn}[e(k)] = \text{sgn}[e(k-1)] \\ K(k) = 0.75K(k-1) \\ \text{sgn}[e(k)] \neq \text{sgn}[e(k-1)] \end{cases}, \quad (7)$$

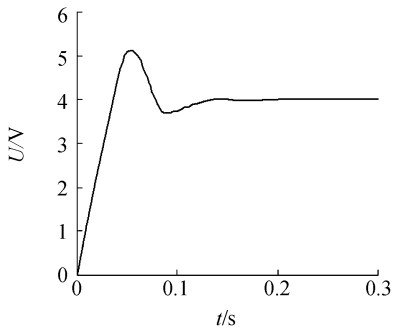
式中: $T_v(k) = T_v(k-1) + L^* \text{sgn}[|\Delta e(k)| - T_v(k-1)|\Delta^2 e(k)|]$; $0.025 \leq c \leq 0.05$; $0.05 \leq L^* \leq 0.1$ 。

上式意义是:当偏差同号时,自动调整增益使其增大,以尽快达到设定值;当偏差异号时,减小增益,进行细调,使输出与设定值一致。通过对增益系数 $K(k)$ 的自调整,使得单神经元自适应 PSD 智能控制算法的自学习、自组织和鲁棒性都有较大的提高。

4 实验研究

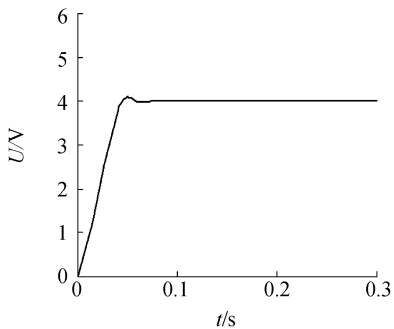
在自行研制的电液伺服阀实验平台^[11]上进行了实验研究。实验时的工作参数如下:供油压力为 7 MPa,流量为 0~40 L/min。

分别采用位置式 PID 控制算法和单神经元自适应 PSD 智能控制算法,对研制的新型压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀进行阶跃响应实验。首先利用工程整定方法对位置式 PID 控制器参数进行整定,使系统在位移给定值由 0 V~4.0 V 跃变时具有较好的响应特性,如图 6(a)所示。然后采用单神经元自适应 PSD 智能控制算法进行实验研究,通过对可调参数 $K(k), \eta_i, \eta_p, \eta_d$ 的反复试验,得出得到一组合适的值,使系统位移给定值由 0 V~4.0 V 跃变时的具有较好的阶跃响应特性,如图 6(b)所示。对比图 6(a)和图 6(b),在位置式 PID 控制算法作用下,系统阶跃响应的超调量和稳态时间分别为 27.9% 和 0.13 s;在单神经元自适应 PSD 智能控制算法作用下,系统阶跃响应的超调量和稳态时间分别为 2.4% 和 0.07 s。可见,同传统 PID 控制算法相比,采用单神经元自适应 PSD 智能控制算法能够显著提高新型压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀的动态性能及控制精度。



(a) 位置式 PID 控制算法

(a) Position type PID control method



(b) 单神经元自适应 PSD 智能控制算法

(b) Single nerve-cell adaptive PSD control method

图 6 阶跃响应对比曲线

Fig. 6 Contrast curve of step response

5 结 论

本文利用成本较低的双压电晶片弯曲元件设计了双喷嘴挡板放大器并用其取代原有传统的力矩马达作为双喷嘴电液伺服阀的前置级驱动器,研制出一种价格低廉的新型精密流体控制器件。由于新型压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀系统具有参数时变性及复杂的非线性,因此采用有自学习、自适应和自组织能力的单神经元自适应 PSD 智能控制算法对系统进行控制。该控制算法本质上是非线性优化控制,在控制过程中,不需要进行系统参数辨识,且控制算法简单、计算量小,能够适应工程上实时控制的要求。实验结果表明,采用 PID 控制算法时系统阶跃响应的超调量和稳态时间分别为 27.9% 和 0.13 s,而采用提出的控制算法时系统阶跃响应的超调量和稳态时间只有 2.4% 和 0.07 s。可见,同传统 PID 控制算法相比,采用单神经元自适应 PSD 智能控制算法能够显著提高新型压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀的动态性能及控制精度。新型压电晶片型喷嘴挡板式电液伺服阀具有结构简单、成本低和精度高等优点,能够满足现代精密控制系统的要求。

参考文献:

- [1] 李其朋,丁凡. 电液伺服阀技术研究现状及发展趋势[J]. 工程机械,2003,34(6): 28-33.
LI Q P, DING F. Current situations and development trend of the research of electro-hydraulic servo valve technique[J]. *Constr. Mach. Equip.*, 2003, 34(6): 28-33. (in Chinese)
- [2] 程光明,李鹏,杨志刚,等. 压电驱动式双喷嘴挡板电液伺服阀[J]. 光学精密工程,2005, 13(3): 276-282.
CHENG G M, LI P, YANG ZH G, *et al.*. Double nozzle piezoelectric servo valve[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 276-282. (in Chinese)
- [3] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学精密工程,1998,6(5): 26-32.
ZHANG T, SUN L N, CAI H G. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5): 26-32. (in Chinese)
- [4] 赵宏伟,孙立宁,张涛,等. 压电陶瓷驱动器在机器人柔性臂应用中的研究[J]. 压电与声光,2000,22(3): 173-176.
ZHAO H W, SUN L N, ZHANG T, *et al.*. The research of flexible manipulator driven by piezoelectric actuators [J]. *Piezoelectr. Acoustoopt.*, 2000, 22(3): 173-176. (in Chinese)
- [5] YU Y H, XIAO Z CH, NAGANTHAN N G, *et al.*. Dynamic Preisach modeling of hysteresis for the piezoceramic actuator system[J]. *Mech. Mach. Theory*, 2002, 37(1): 75-89.
- [6] 吴建华,褚家如. 一种压电驱动微操作器及其释放位置精度分析[J]. 光学精密工程,2005,13(3): 283-290.

- WU J H, CHU J R. Piezoelectric driven micromanipulator and its positioning accuracy analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 283-290. (in Chinese)
- [7] 史维祥,杜彦亭. 电液伺服系统自适应控制的新发展[J]. *机床与液压*, 1995, 133(1): 1-12.
SHI W X, DU Y T. The new development of hydroelectric servo system of adaptive control[J]. *Mach. Hydraul.*, 1995, 133(1): 1-12. (in Chinese)
- [8] MARSIK J. A new conception of digital adaptive PSD control[J]. *Probl. Contr. Inf. Theory*, 1983, 12(4): 267-279.
- [9] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.
LI SH Y. *Fuzzy Control · Neurocontrol and Intelligent Cybernetics*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [10] MARSIK J, STREJC V. Application of identification free algorithms for adaptive control[J]. *Automatica*, 1989, 25(2): 273-277.
- [11] 周森磊. 压电型电液伺服阀及其控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
ZHOU M L. *Piezoelectric hydroelectric servo valve and its control method*[D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)

作者简介:周森磊(1976—),男,吉林四平人,吉林大学讲师,工学博士,主要从事控制理论及压电驱动与控制技术等方面的研究工作,承担和参加国家及部省级科研项目5项,发表论文10余篇。E-mail: zml@jlu.edu.cn