

《新型驱动技术·压电驱动与控制》专题文章导读

刘建芳
吉林大学压电驱动与控制研究中心

当某些各向异性的晶体材料承受外部的机械力作用时,其相应的表面会出现电荷,这一现象称为压电效应。反之当这种晶体置于电场下时,晶体会出现几何变形,这被称为逆压电效应。具有压电效应的材料称为压电材料。钛酸钡陶瓷的发现促进了压电材料的发展,它不但使压电材料从压电单晶发展到压电陶瓷等多晶材料,而且压电性能有了大幅度提高。压电材料独特和优良的性能使其成为研究开发者越来越青睐的一种智能材料。

压电陶瓷是一种先进的智能材料,其特殊的性能具体表现在:

- 1、高分辨率(High resolution):压电陶瓷在通电的状态下可以得到连续的变形量,在微小电压驱动下可以达到纳米级的输出位移分辨率。
- 2、高频(High response):压电陶瓷具有很高的频率特性,在自由状态下,其工作频率最高可达到100 kHz,因此可以输出高频运动。
- 3、大输出载荷(Large force generation):压电叠堆的最大输出力 $> 10\ 000\ \text{N}$ 。
- 4、无磁干扰(No magnetic fields):压电驱动器不产生磁场,也不受磁场的干扰,因此工作过程非常稳定。
- 5、噪声小(Low noise):压电陶瓷在特定的驱动电压下产生的噪音非常小。
- 6、发热小,低能耗(Low steady-state power consumption):压电陶瓷在工作过程中几乎不发热,能耗非常低。

压电陶瓷这一系列优良的性能使它在多种领域得到了越来越广泛的应用。

近年来,随着微/纳米技术的迅猛发展,以压电陶瓷为核心的超精密驱动器在光学精密加工工程、微电子制造技术、航空航天技术、超精密机械制造、超精密微机器人操作、地震测量、生物工程、医学及遗传工程等高技术领域正逐步得到很好的应用。

国内对压电驱动及控制技术的研究也得到了较快的发展,在多个应用领域得到了国家科技部、教育部、自然科学基金委等部门的资助。在《新型驱动技术·压电驱动与控制》这一专栏中,我们谨以《压电型步进精密旋转驱动器》,《新型压电步进型精密直线驱动器》,《压电双晶片型惯性冲击式旋转精密驱动器研究》,《一种压电驱动微操作器及其释放位置精度分析》,《微型压电泵系统的设计研究》,《双腔薄膜阀压电泵的实验研究》,《压电驱动式双喷嘴挡板电液伺服阀》7篇文章从一个侧面向大家展示目前该项研究涉及的内容及其进展情况,这7篇文章所代表的3个应用领域:压电精密驱动器,精密压电泵,高频精密压电阀都得到了国家863高科技发展计划的支持。希望通过这7篇文章能使读者对压电驱动与控制技术略见一斑。

文章编号 1004-924X(2005)03-0276-07

压电驱动式双喷嘴挡板电液伺服阀

程光明,李 鹏,杨志刚,鄂世举,刘建芳
(吉林大学 机械科学与工程学院,吉林 长春 130025)

摘要:设计了一种利用压电双晶片驱动器代替传统双喷嘴电液伺服阀力矩马达驱动部分的新型电液伺服阀,以期改善现有该型阀的动、静态特性。通过试验得出,设计的压电双晶片驱动器输出位移为

收稿日期:2005-03-22;修订日期:2005-04-18.

基金项目:国家863计划资助项目(No. 2001AA423270)。

82.5 μm , 全量程位移波动小于 0.7 μm , 谐振频率 1.2 kHz, 完全满足双喷嘴电液伺服阀对驱动器的要求。试验表明:基于此驱动器的电液伺服阀在频率低于 100 Hz 的范围内具有良好的线性度,克服了传统双喷嘴电液伺服阀在频宽和抗电磁干扰能力等方面的不足。

关键词:电液伺服阀;压电双晶片;反馈控制

中图分类号:TH703.6;TN384 **文献标识码:**A

Double-nozzle piezoelectric servovalve

CHENG Guang-ming, LI Peng, YANG Zhi-gang, E Shi-ju, LIU Jian-fang

(College of Mechanical Science and Engineering, Jinlin University, Changchun 130025, China)

Abstract: To improve the static and dynamic characteristics of traditional electrohydraulic servovalves, a new type electrohydraulic servovalve was designed by using piezoelectric actuator based on bimorph instead of the moment motor of conventional servovalves. The results show that the output distance of designed piezoelectric bimorph actuator is 82.5 μm , fluctuation in full scale is less than 0.7 μm , and resonance frequency is 1.2 kHz. It can meet the requests of servovalve. And the designed servovalve owns perfect linearity when the frequency is less than 100 Hz. The lacks of traditional electrohydraulic servovalves in bandwidth and anti-electromagnetic ability have been overcome.

Key words: electrohydraulic servovalves; piezoelectric bimorphs; feedback control

1 引言

电液伺服系统以液体作为工作介质,以其具有的传动平稳、执行元件输出扭矩大、操纵方便、布置灵活、自动化程度高等特点,广泛应用于矿山机械、建筑机械、钻探机械、农业机械、液压机、飞机和军舰等领域。在整个电液伺服系统中,电液伺服阀既是电液转换元件,也是功率放大元件,它能够将小功率的电信号输入转换为大功率的液压能输出,实现电液信号的转换与放大,并以其本身具有的体积小、结构紧凑、功率放大系数高、直线性好、死区小、灵敏度高、动态性能好、响应速度快等优点,成为电液伺服系统的核心元件,其本身的性能对整个系统的静、动态特性有重要的影响^[1-5]。传统电液伺服阀以力矩马达作为驱动部分,其结构复杂、频响低、抗干扰能力差、造价成本高。

本文介绍了一种新型的电液伺服阀-压电型双喷嘴挡板阀,它利用体积小、质量轻、频响高、反应时间小、抗干扰能力强^[6]的压电元件代替传统电液伺服阀的力矩马达驱动部分,是针对传统电液伺服阀的缺点而进行的一种改进尝试。

2 压电型双喷嘴挡板阀的机械结构及工作原理

2.1 基本结构

研制的压电型电液伺服阀为双喷嘴挡板式一级阀。其基本结构如图 1 所示,该阀主要由压电驱动机构,液压阀 2 部分构成。压电驱动机构的核心部件为压电双晶片,压电双晶片是由 2 块 PZT 压电陶瓷和基板黏结而成。液压阀主要由 2 个进油口、2 个工作油口、2 个喷嘴、1 个回油口以

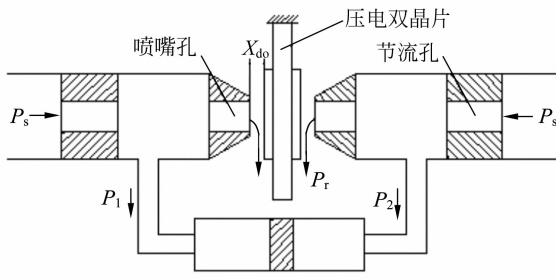


图 1 压电型电液伺服阀

Fig. 1 Piezoelectric servovalve

及进油口、回油口内的固定节流口组成。压电双晶片安装在 2 个喷嘴的中间位置。可见,压电双晶片既是伺服阀的驱动器,亦为其挡板部件。

2.2 压电双晶片的工作原理

压电双晶片是一种应用很广的压电陶瓷元件^[7-8],它的最大优点是可以通过 1 个电输入信号而非机械量输入来产生所需的运动,以实现机械隔离^[9]。这里即利用压电材料通电后变形这一特性,将 2 片压电陶瓷薄片分别黏结于基板两侧,将其一端固定。当没有电压加载时,整个压电双晶片成自然伸直状态,当加载电压后,压电陶瓷片本身发生变形,由于两片压电陶瓷片黏结时的极性相反,因此两片压电陶瓷片的变形方向恰相反,由此克服基板的张力,使整个压电双晶片产生弯曲变形。并用此作为压电型双喷嘴挡板阀的驱动部分。

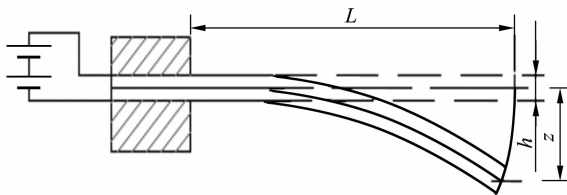


图 2 压电双晶片的变形

Fig. 2 Transfiguration of piezoelectric bimorph

2.3 压电型双喷嘴挡板阀的工作原理

系统由进油口(压力为 P_s)进油后,在没有控制信号输入时,即压电双晶片上没有电压加载时,压电双晶片成自然伸直状态,挡板与两侧喷嘴的间隙相等,此时喷嘴两端具有相等的压力,从而使工作油口压力 $P_1 = P_2$;当输出指令后,指令信号经压电型双喷嘴挡板阀控制器转换为压电双晶片的驱动电压信号,控制压电双晶片产生弯曲变形,整个双晶片向左或向右弯曲。当压电双晶片向左侧弯曲时,左侧喷嘴内油腔压力增大,右侧喷嘴内油腔压力随之降低,使得工作油口压力 $P_1 > P_2$;反之,工作油口压力 $P_1 < P_2$ 。此时,双侧喷嘴产生的压力差被输出,以驱动负载。

当工作油口的压力反馈信号与计算机输出控制信号存在差异时,系统通过计算机的比较控制,对压电双晶片的位移进行调节,使工作油口的压力达到要求。

此外,为了在喷嘴与挡板间产生可变节流口的节流作用^[10],从而保证喷嘴挡板阀的工作,在喷嘴与挡板的结构中,应满足以下关系:

$$\pi d_0 (2x_{d_0}) \leq \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d_0^2}{4} \right)$$

即

$$x_{d_0} \leq \frac{d_0}{16}$$

式中 x_{d_0} ——挡板喷嘴间的初始距离

d_0 ——喷嘴孔的直径

虽然若 d_0 取值变小, x_{d_0} 即可变小,从而降低了对驱动器位移的要求,但工作油口两端的压力差会随之变小,阀的驱动能力下降,同时,还会对机械结构的安装和调试带来困难。因此, d_0 与 x_{d_0} 的匹配要合理。

在伺服阀的构造中,压电弯曲元件是作为挡板及电气-机械转换器使用的,是伺服阀的核心部件,它的性能直接关系着伺服阀的性能,因此它的合理设计也至关重要。

3 压电阀驱动器的尺寸设计及性能测试

通过对伺服阀结构的设计,压电陶瓷片及基板的长度、宽度、厚度尺寸的计算与试验,以及双晶片基板厚度与压电陶瓷片厚度的合理匹配,初步选择了三叠片型式的压电双晶片构造了喷嘴挡板阀,这是因为这种压电双晶片具有较高的输出位移,同时刚度较大,满足了压电伺服阀对驱动器的要求,而且它的性能要优于传统伺服阀的力矩马达。在电气联接上,采用并联方式。压电双晶片的结构尺寸列于表 1 中。

表 1 压电双晶片(挡板)的结构尺寸

Tab.1 Structural size of piezoelectric bimorph

材料	长度 (mm)	宽度 (mm)	厚度 (mm)	
基板	铍青铜	30	12	0.5
压电陶瓷	PZT-5H	30	12	0.35

在伺服阀试验之前首先对双晶片的性能进行了测试。

3.1 电压-位移特性

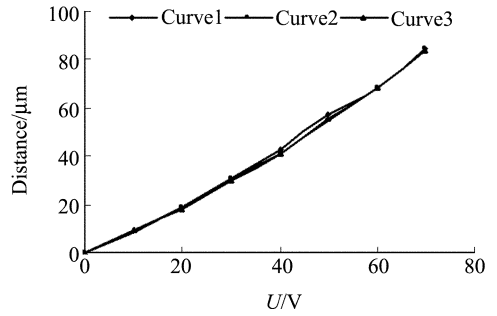
图 3(a)为双晶片输入电压与输出位移之间的关系。其中曲线 1、曲线 2 及曲线 3 分别为相同条件下的 3 次测量结果。由图可见,3 者之间的线性较好,重复性也较好,在全量程中的位移波动在 $0.7 \mu\text{m}$ 之内。

3.2 滞环特性分析

图 3(b)是在开环方式下不同电压范围内的两条位移滞环曲线。在 60 V 驱动电压下双晶片的位移滞环为 10.7% , 40 V 驱动电压下双晶片的位移滞环为 4.86% 。

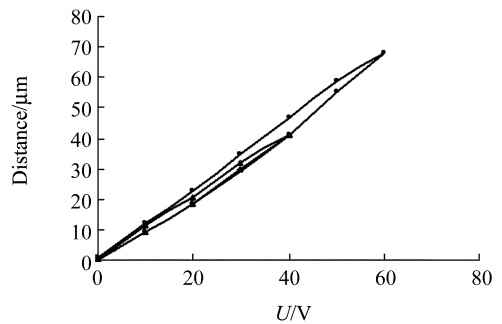
3.3 谐振频率

使用阻抗分析仪测得选用双晶片的谐振频率为 1.2 kHz 。同时得到了它的等效电气参数如表 2。



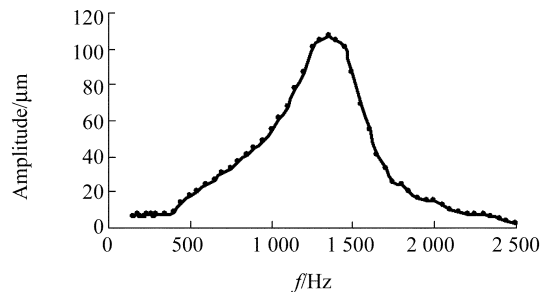
(a)电压-位移特性

(a) Voltage-distance characteristic



(b)电压-位移滞环特性

(b) Voltage-distance hysteresis



(c)幅频特性

(c) Frequency-amplitude characteristic

图 3 压电双晶片性能测试曲线

Fig. 3 Characteristics of piezoelectric bimorph

表 2 双晶片等效电气参数

Tab.2 Equivalent electric parameters of piezoelectric bimorph

R_1 (k Ω)	L_1 (mH)	C_1 (nF)	C_0 (nF)
2.056	828.497	4.137	66.251

3.4 幅频特性

通过扫频方式测得双晶片的幅频特性曲线如图 3(c)所示。扫频使用的激励波形为正弦波,幅值为 40 V。

4 试验测试及结论

通过试验得出压电型电液伺服阀的特性曲线,以便于对电液伺服阀进行动、静态特性分析。

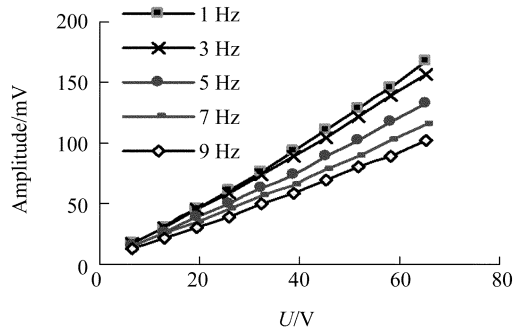
图 4 为供油压力 5 MPa 时,不同频率下的电压幅值特性曲线。由图可知,在 90 Hz 以下,低频范围内压电型电液伺服阀具有良好的线性度,高频时阀的线性度较差,可见本阀具有良好的静态特性。

供油压力分别为 5 MPa、10 MPa,不同频率下电压幅值特性曲线比较见图 5。

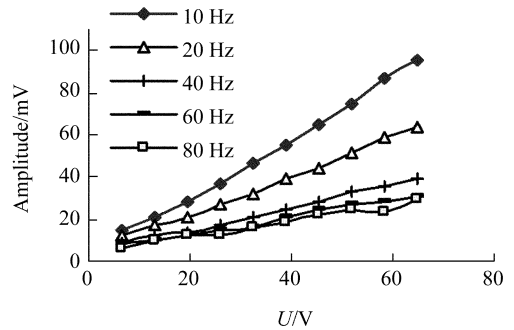
由图可知,当供油压力为 5 MPa,频率为 10 Hz 时,阀的幅值比为 -3 dB;频率为 50 Hz 时,阀的幅值比为 -12.7 dB;频率为 100 Hz 时,阀的幅值比为 -14.4 dB。当供油压力为 10 MPa,频率为 10 Hz 时,阀的幅值比为 -3.3 dB;频率为 50 Hz 时,阀的幅值比为 -11.6 dB;频率为 100 Hz 时,阀的幅值比为 -15.4 dB。可见阀的动态特性一般。

图 6(a)、图 6(b)分别是供油压力为 5 MPa 和 10 MPa 时的幅频特性曲线。

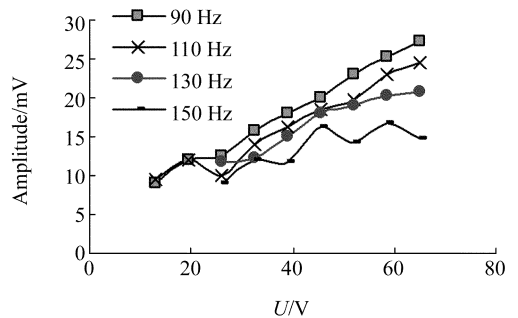
这主要可能由于双晶片驱动器的尺寸,外形,控制电压,电气连接方式;喷嘴挡板组件和节流口 3 者之间的匹配等原因造成的。



(a) 频率 1~9 Hz 下的电压幅值特征曲线
(a) Voltage-amplitude characteristic curve under 1~9 Hz



(b) 频率 10~80 Hz 下的电压幅值特性曲线
(b) Voltage-amplitude characteristic curve under 10~80 Hz



(c) 频率 90~150 Hz 下的电压幅值特性曲线
(c) Voltage-amplitude characteristic curve under 90~150 Hz

图 4 供油压力 5 MPa 时,不同频率下的电压幅值特性曲线

Fig. 4 Voltage-amplitude characteristic curve under 5 MPa supply pressure and different frequencies

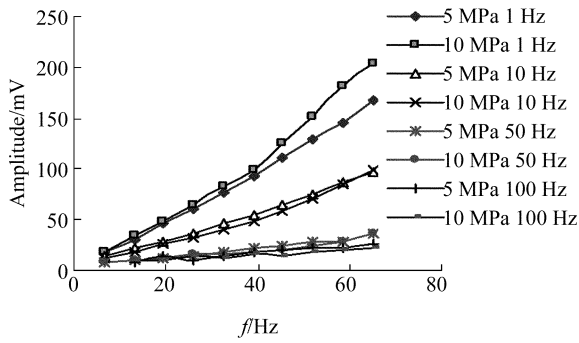
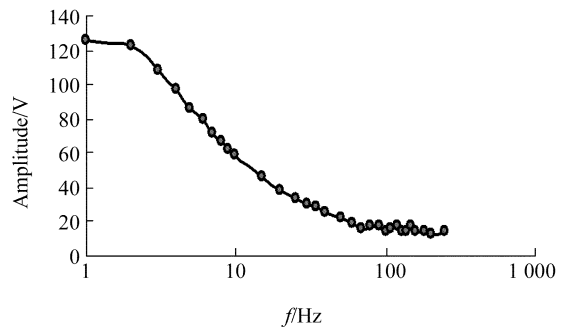


图 5 不同供油压力、频率下电压幅值特性曲线比较图

Fig. 5 Voltage-amplitude characteristic comparing curve under different supply pressures and frequencies

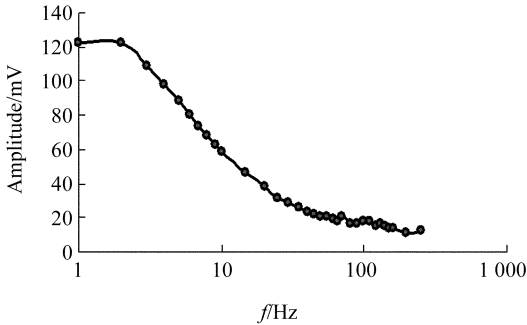


(b) 供油压力 10 MPa 时幅频特性曲线

(b) Amplitude-frequency characteristic curve under 10 MPa supply pressure

图 6 不同供油压力下的幅频特性曲线

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristic curve under different supply pressures



(a) 供油压力 5 MPa 时的幅频特性曲线

(a) Amplitude-frequency characteristic curve under 5 MPa supply pressure

5 结 论

本文介绍了一种使用压电元件作为驱动器的新型电液伺服阀,在文中对压电元件的选取及新型伺服阀的动、静态特性进行了试验分析,取得了一些基础数据和结果,验证了压电伺服阀设计构想的可行性,为该阀的下一步开发工作奠定了基础。

参考文献:

[1] 关景泰. 机电液控制技术[M]. 上海:同济大学出版社,2003:1-6.
 GUAN J T. *Electro-mechanical and hydraulic control technology*[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003:1-6. (in Chinese)

[2] 王广怀. 液压技术应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001:79-99.
 WANG G H. *Application of hydraulic pressure technology*[M]. Haerbin: Press of Harbin University of Technology, 2001:79-99. (in Chinese)

[3] 张春阳. 液压与液力传动[M]. 北京:人民交通出版社,2003:1-26.
 ZHANG CH Y. *Transmission of hydraulic pressure and force*[M]. Beijing: China Communications Press, 2003:1-26. (in Chinese)

[4] 姜继海, 宋锦春, 高常识. 液压与气压传动[M]. 北京:高等教育出版社,2002:1-16.
 JIANG J H, SONG J CH, GAO CH SH. *Transmission of hydraulic and pneumatic pressure* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002:1-16. (in Chinese)

- [5] 章宏甲,黄谊. 液压传动[M]. 北京:机械工业出版社,1998:1-6.
ZHANG H J, HUANG Y. *Transmission of hydraulic pressure* [M]. Beijing: China Machine Press,1998:1-6. (in Chinese)
- [6] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 1998,6(5): 26-32. (in Chinese)
- [7] SMITS J G, DALKE S I, COONEY T K. The constituent equations of piezoelectric bimorphs [J]. *Sensors and Actuators A*, 1991,28:41-61.
- [8] KELLY L J, MARCUS M A. The deflection-bandwidth product of poly (Vinylidene Fluoride) benders and related structures[J]. *Ferroelectrics*, 1981,32:93-101.
- [9] 叶会英,浦昭邦. 压电双晶片的能量传输特性分析[J]. 光学精密工程,2000,8(4): 345-350.
YE H Y, PU ZH B. Analysis of the capacity of energy transmission for piezoelectric bimorph[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000,8(4): 345-350. (in Chinese)
- [10] 王占林. 液压伺服控制[M]. 北京:北京航空学院出版社,1987:64-67.
WANG ZH L. Servo control of hydraulic pressure [M]. Beijing: Beihang University Press, 1987:64-67. (in Chinese)

作者简介:程光明(1957—),男,吉林长春人,吉林大学教授,博士生导师,现主要从事压电驱动与控制技术的研究。