

文章编号 1004-924X(2007)06-0884-05

应用于压电叠堆泵的微位移放大机构

杨志刚¹, 刘登云¹, 吴丽萍^{1,2}, 陈洪涛¹, 刘鹏¹

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025; 2. 长春工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:提出了一种应用于压电叠堆泵的微位移放大机构,该机构以压电叠堆(积层式压电微位移器)为驱动元件,通过基于三角形放大原理的柔性铰链放大机构,放大压电叠堆的输出位移。同时,设计、研制了实验装置,并在试制样机上对其静、动态特性进行了实验。实验测试结果表明:该机构对压电叠堆输出位移的放大倍数达到5倍,并且该机构具有线性良好、高分辨率、高频响应等特点。由有限元分析得到的固有频率达到了1.8 kHz,实际测量的固有频率为1.5 kHz。

关键词:压电叠堆泵;放大机构;微位移;柔性铰链;三角形放大

中图分类号:TH38;TN384 **文献标识码:**A

Micro-displacement magnifying mechanism used in piezo-stack pump

YANG Zhi-gang¹, LIU Deng-yun¹, WU Li-ping^{1,2}, CHEN Hong-tao¹, LIU Peng¹

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;
2. Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: A micro-displacement magnifying mechanism used in piezo-stack pump is presented. Taking the piezoelectric multilayer actuators as drivers of amplifier, the displacement of piezoelectric multilayer actuator is amplified with the flexure hinge amplifier based on the principles of triangle amplification. The static and dynamic characteristics are tested on the prototype, the characteristics of good linearity, high resolution and high frequency are approved. Experimental results conclude that the mechanism can amplify the displacement to 5 times. The natural frequency reaches 1.8 kHz by finite element analysis while the actual measurement result is 1.5 kHz.

Key words: piezo-stack pump; magnifying mechanism; micro-displacement flexure hinge; triangle amplification

1 引言

压电泵是近年来开发的一种新型泵,是压电驱动器的一个重要分支。与传统泵比较,压电泵的特点是:结构简单、体积小、重量轻、无噪声、制

作成本低;与其他微型泵比较,压电泵的特点是:耗能低、无电磁干扰、易控制、便于小型化。基于以上的特点,压电泵具有相当广泛的应用领域,如制药、医疗器械、化学分析、微小部件清洗/冷却、粘接剂喷涂以及汽车发动机燃料供给等^[1-6]。

压电泵按驱动形式不同可分为:压电片驱动

收稿日期:2006-10-11;修订日期:2007-01-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50575093;No. 50605027)

和压电叠堆驱动两种^[2,7]。与压电片相比,压电叠堆具有能量转换效率高、电源功耗低、响应速度快、分辨率高、输出力大、输出位移稳定、能够减少蠕变现象等特点,已越来越多的应用到各种驱动场合。压电叠堆驱动的压电泵(以下简称为压电叠堆泵)具有输出压力大、可实现精密控制等特点。本文采用压电叠堆(积层式压电微位移器)作为压电泵驱动元件,通过基于三角形放大原理的柔性铰链放大机构,对压电叠堆的位移进行放大,设计、研制了由压电叠堆与放大机构组成的驱动器,并进行了实验研究。

2 压电叠堆性能分析

本文采用日本 NECTOKIN 公司 AE0505D16 型压电叠堆作为驱动元件(参数见表 1)^[8]。为了更好地使用 AE0505D16 型压电叠堆,对其进行了基本性能分析。

表 1 AE0505D16 型压电叠堆主要参数

Tab.1 Major parameters of AE0505D16 PZT stack

$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	5440	材料	PbZrO ₃ -PbTiO ₃
机电耦合系数	0.68	d_{33} (mV ⁻¹)	635×10^{-12}
T_c (°C)	145	d_{33} (mV ⁻¹)	-287×10^{-12}
单层厚度(μm)	110	$S_{33}^E/\text{m}^2\text{gN}^{-1}$	18.1×10^{-12}
层数	130	$S_{31}^E/\text{m}^2\text{gN}^{-1}$	14.8×10^{-12}

在室温 25°C 下,单层的压电陶瓷片的电致伸缩特性很微弱,相对于逆压电效应可忽略^[6],故有

$$S \approx d \cdot E, \quad (1)$$

$$d = \frac{S}{E} = \frac{\Delta p}{p} \times \frac{b}{U}. \quad (2)$$

其中 S —应变;

Δp —压电陶瓷片在所用方向上施加电压后的变形量(m);

p —压电陶瓷片在所用方向上的长度(m);

b —压电陶瓷片的厚度(m);

U —外界施加的电压(V)。

当 $p=b$ 时,有 $\Delta p = d \times U$ 。

压电叠堆由压电陶瓷片多层叠加制成,在机械机构上串联,而电压并联。压电叠堆的变形量是单个压电陶瓷片的变形量的总和,即

$$\Delta P = n \times \Delta p = n \times d_{33} \times U, \quad (3)$$

其中 ΔP —压电叠堆的变形量;

n —压电叠堆包含的压电陶瓷片的数量;

d_{33} —压电常数。

根据上述公式和参考表 1 中的参数值,可得到各种工作电压下压电叠堆理论上的相应伸长量(见表 2)。

对日本 NECTOKIN 公司 AE0505D16 型压电叠堆在各种工作电压下进行了实际的测量,具体测量值见表 3。从表中会发现理论与实际测量值有一定偏差,这可能是压电材料的性能及封装工艺造成的,仅供参考。

表 2 压电叠堆电压与理论伸长量的关系

Tab.2 Relationship between voltage and theoretic elongation of PZT stack

电压(V)	伸长量(10^{-6}m)	电压(V)	伸长量(10^{-6}m)
100	8.26	50	4.13
90	7.43	40	3.30
80	6.60	30	2.48
70	5.78	20	1.65
60	4.95	10	0.83

表 3 压电叠堆电压与实际伸长量的关系

Tab.3 Relationship between voltage and practical elongation of PZT stack

电压(V)	伸长量(10^{-6}m)	电压(V)	伸长量(10^{-6}m)
100	12.	50	5.2
90	10.1	40	4.1
80	8.9	30	3.0
70	7.3	20	2.1
60	6.4	10	1.0

3 放大机构的设计与分析

柔性铰链是近年来发展起来的一种新型的传动、支撑机构,它具有体积小、无摩擦、运动间隙小、高分辨率等优点。柔性铰链可以组成多种传动放大机构,如多级杠杆放大机构、差动杠杆放大机构、三角形放大机构等^[10-12]。本文研究采用了三角形放大原理的柔性铰链放大机构,其主要特点是机构紧凑,位移放大倍数在理论上可以达到很大,同时也具有很好的动态特性。

柔性铰链放大机构的三角形放大原理如图 1 所示^[13]。当在水平方向上形成一个 x 位移时,在

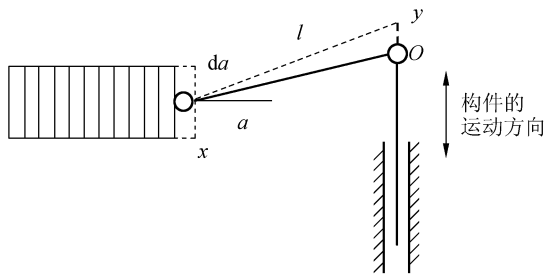


图 1 三角形放大原理

Fig. 1 Principle of triangle amplification

垂直方向便形成一个 y 位移, 对应不同的角度 α 有不同的值 y/x 。设放大倍数为 A , 可得

$$A = y/x. \quad (4)$$

由图 1 可知, 当在水平方向做 x 位移时, α 有一微小增量 $d\alpha$, 因此可得

$$x = l \cos \alpha - l \cos(\alpha + d\alpha), \quad (5)$$

$$y = l \sin(\alpha + d\alpha) - l \sin \alpha. \quad (6)$$

由式(4)、(5)和(6)可得

$$A = y/x = \frac{\tan \alpha (\cos d\alpha - 1) + \sin d\alpha}{(1 - \cos d\alpha) + \tan \alpha \sin d\alpha}, \quad (7)$$

由于压电叠堆的位移量仅有十几微米, α 的增量 $d\alpha$ 也十分微小, 因此根据等价无穷小原理, 把 $\sin d\alpha$ 等价于 $d\alpha$, $1 - \cos d\alpha$ 等价于 $(d\alpha)^2/2$ 代入公式(7), 得到

$$A \approx \frac{1}{\tan \alpha}, \quad (8)$$

由式(8)可以知道三角形放大机构的放大倍数与杠杠的长度无关, 只与 α 的大小有关, α 越小, A 越大。因此, 在设计三角形放大机构时, 应使 α 尽量小。

本设计中, 放大机构采用弹簧钢, 由电火花线切割的方式加工而成。为了分析这种放大机构的

性能, 采用有限元分析软件对此放大机构进行了位移、应力和固有频率的分析。分析结果表明, 设计的柔性铰链放大机构的位移放大倍数为 6 倍, 固有频率约为 1.8 kHz。图 2 为柔性铰链放大机构的应力场分布, 从中能够分析得出有限元单元网格中各点的应力, 从而判断最大应力发生的位置和大小。

4 放大机构的静动态特性

放大机构采用日本 NEC 公司 AE0505D16 型压电叠堆作为驱动元件, 柔性铰链材料为弹簧钢, 外形尺寸为 $25.6 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$, $\theta = 3^\circ$ 。驱动器与放大机构的连接方式采用预紧与胶粘相结合的方式。文中试制的放大机构在设计尺寸时考虑了压电叠堆与放大机构间保持一定的过盈量, 再通过胶接, 避免了螺钉预紧方式的不足。

由于输出的位移是否能够满足压电泵的需求是设计该放大机构的关键, 因此将放大机构位移输出特性的测试作为本测试的主要内容。整个测试由自行编制的精密测量系统软件完成, 该系统实现了多点、多次循环测量, 保证了测量的准确性。测得在 $V = 100 \text{ V}$ 时, 对应着放大机构的最大输出位移 $D = 57 \mu\text{m}$, 而压电叠堆在 $V = 100 \text{ V}$ 时, 对应的输出 $D = 12 \mu\text{m}$, 因此实际测得的位移放大倍数约为 5 倍, 而有限元分析的结果为 6 倍, 说明有限元分析结果接近实际情况。采用解析法计算出的位移结果约为 19 倍, 与真实位移放大倍数之间的差异较大, 原因是由解析法建立的模型的假设前提条件与实际存在很大的差异, 没有考虑到铰链转角刚度的影响, 存在着难于建模、计算结果偏差大的不足, 而有限元在解决此类问题时具有明显的优势, 并与真实位移的值相近。

由图 3 中 A_d 和 B_d 的对比可知, 该放大机构的线性良好, 而且弹性滞后非常小。使用 4294 A 型阻抗分析仪对放大机构进行阻抗分析, 分析结果如图 4 所示。图中 a 点为阻抗的极小值, 此时相位角出现峰值, a 点为谐振频率点; b 点则为反谐振频率点, 说明在此频率下, 放大机构处于谐振状态, 其一阶固有频率在 1.49 kHz 左右。以此作为参考, 对该放大机构的谐振频率进行实际测量, 将放大机构一端刚性固定, 另一端为位移输出端, 输入不同频率、幅值及正向偏置为 50 V 的正



图 2 放大机构的应力场分布图

Fig. 2 Stress field profile of magnifying mechanism

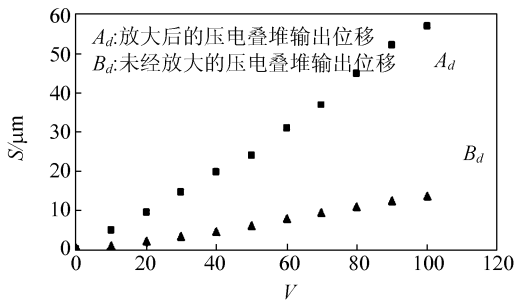


图3 放大机构的位移输出特性

Fig. 3 Output displacement characteristics of magnifying mechanism

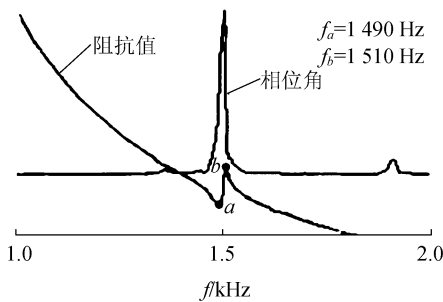


图4 放大机构的阻抗特性

Fig. 4 Impedance characteristics of magnifying mechanism

弦波电压信号(使得驱动电压总为正值)。由多普勒激光测振仪对输出端的动态位移进行测量,测得在不同频率下的输出位移,得到的放大机构的幅频特性曲线如图5所示。由图5可知,在1.5 kHz处振幅出现最大值,此时对应的频率为谐振

频率。可以看出实测的谐振点与阻抗分析的结果非常接近。在对微位移放大机构的模态分析中,计算出的固有频率为1.8 kHz,比实测的谐振频率高,其主要原因是在有限元分析时没有考虑到压电叠堆的质量对谐振频率的影响。以上测试表明,放大机构具有良好的动态响应特性。

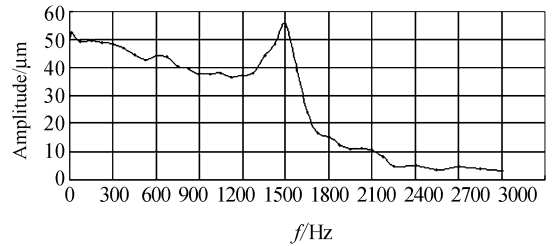


图5 放大机构的幅频特性

Fig. 5 Amplitude frequency characteristics of magnifying mechanism

5 结 论

本文提出了一种基于放大机构的压电叠堆泵,设计了基于三角形放大原理的菱形铰链微位移放大机构,对该机构进行了分析和优化设计,并对其进行了静、动态特性分析。实验结果表明,该放大机构具有较好的位移输出特性(放大倍数达5倍)和优异的动力学性能(谐振频率达1.5 kHz,弹性滞后非常小),可以应用于压电叠堆泵的实验研究中。

参考文献:

- [1] GERLACH T, WURMUS H. Working principle and performance of the dynamic micropump[J]. *Sensors and Actuators A*, 1995, 50: 135-140.
- [2] 阙君武, 杨志刚, 程光明. 压电泵的现状与发展[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6): 619-625.
KAN J W, YANG ZH G, CHENG G M. Research on piezoelectric pump and its development[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 619-625. (in Chinese)
- [3] 焦小卫, 黄卫清, 赵淳生. 压电泵技术的发展及其应用[J]. *微电机*, 2005, 38(5): 66-69.
JIAO X W, HUANG W Q, ZHAO CH SH. The piezoelectric pump technology and its application[J]. *Micromotors Servo Technique*, 2005, 38(5): 66-69. (in Chinese)
- [4] LI C, SUSAN M, DENNIS P. Design and simulation of an implantable medical drug delivery system using micro electromechanical systems technology[J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, 94: 117-125.
- [5] 李欣欣, 方科, 程光明, 等. 压电薄膜喷流泵研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 858-863.
LI X X, FANG K, CHENG G M, et al.. Study on piezoelectric jet pump[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 858-863. (in Chinese)

- [6] 刘国君,程光明,杨志刚. 一种压电式精密输液微泵的实验研究[J]. 光学精密工程,2006,14(4):612-616.
LIU G J, CHENG G M, YANG ZH G, *et al.*. Experimental research on a piezoelectric micro-pump for precision pumping[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):612-616. (in Chinese)
- [7] 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):176-182.
CHENG G M, LI P, YANG ZH G, *et al.*. Double-nozzle piezoelectric servovalve[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3):176-182. (in Chinese)
- [8] NEC/TOKIN. *Multilayer Piezoelectric Actuators*[M]. Japan: NEC TOKIN Corporation, 2004.
- [9] 张福学,王丽坤. 现代压电学[M]. 北京:科学出版社,2002.
ZHANG F X, WANG L K. *Modern Piezoelectricity*[M]. Beijing: Press of China Science, 2002. (in Chinese)
- [10] 薛实福,李庆祥. 精密仪器设计[M]. 北京:清华大学出版社,1991.
XUE SH F, LI Q X. *Design of Precision Instrument*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991. (in Chinese)
- [11] 于靖军,宗光华,毕树生. 全柔性机构与 MEMS[J]. 光学精密工程,2001,9(1):1-5.
YU J J, ZONG G H, BI SH SH. Fully compliant mechanisms and MEMS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1):1-5. (in Chinese)
- [12] 刘建芳,杨志刚,范尊强,等. 压电直线精密驱动器研究[J]. 光学精密工程,2005,13(1):65-72.
LIU J F, YANG ZH G, FAN Z Q, *et al.*. Precise PZT linear step actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1):65-72. (in Chinese)
- [13] 沈传亮,程光明,杨志刚,等. 新型直动式压电伺服阀[J]. 机械工程学报,2004,40(9):125-128.
SHEN CH L, CHENG G M, YANG ZH G, *et al.*. New type piezoelectric direct drive dervo servo valve[J]. *Chinese journal of mechanical engineering*, 2004, 40(9):125-128. (in Chinese)

作者简介:杨志刚(1956—),男,吉林长春人,吉林大学机械科学与工程学院机械设计专业教授,博士生导师,吉林大学链传动研究所所长,主要研究方向为压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械和链传动。
刘登云(1982—),男,山西离石人,吉林大学机械设计及理论专业硕士研究生,主要研究方向为压电叠堆泵的开发设计与研究。E-mail:ldy19820803@yahoo.com.cn