

基于柔性铰链放大的压电叠堆泵

曲兴田,董景石,郭俊臣,赵宏伟,吴博达

(吉林大学 机械科学与工程学院,长春 130022)

摘要:基于压电和精密驱动技术,利用压电叠堆作为驱动器,结合柔性铰链位移放大机构设计了流体泵样机,进行了试验研究。分析了压电叠堆 Tokin AE0505D16 的滞环特性,从理论上研究了该压电叠堆的刚度特性和快速响应特性。设计制造了用于位移放大的柔性铰链放大机构,对柔性铰链放大机构扭转变形和转角刚度的影响因素进行了理论分析,确定了所设计的柔性铰链放大机构各结构参数;测试了柔性铰链放大机构在不同电源激励下的动态响应、幅频特性、迟滞特性、输出力与输出位移特性,得出了影响放大机构放大倍数和输出特性的因素。利用有限元分析软件对放大机构进行了分析,进一步验证了放大机构的可行性和安全性。通过改变试验参数(电压、频率),对压电叠堆泵样机进行了实验研究,分析了输入电压、输入频率对泵输出流量和输出压力的影响程度。

关键词:仪器仪表技术;压电叠堆;柔性铰链;有限元;压电叠堆泵

中图分类号:TH703.8;TP242 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)03-0552-05

Piezoelectric stack pump based on flexure hinge magnification

Qu Xing-tian, Dong Jing-shi, Guo Jun-chen, Zhao Hong-wei, Wu Bo-da

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on piezoelectric precision drive technology, a hydro-pump using a piezoelectric stack as actuator and a flexible hinge as magnification mechanism was prototyped and tested. The hysteresis behavior of Tokin AE0505 D16 type piezoelectric stack was analyzed and its stiffness characteristic and dynamic response characteristic were studied theoretically. A flexible hinge mechanism to magnify the displacement was prototyped and the factor affecting its torsional deformation and torsional stiffness were analyzed, and its structural parameters were proposed. The dynamic response, the amplitude-frequency characteristic, the hysteresis behavior, and the force output versus displacement of the flexible hinge were tested under different power supply excitations, and the factor affecting the displacement magnification ratio and the output characteristics of the magnification mechanism were found. The flexible hinge was also analyzed by a FEM simulation software and its feasibility and security were validated. The developed piezoelectric stack pump was tested under different input signal voltages and frequencies and the effects of the input on the output flow rate and pressure of the pump were obtained.

收稿日期:2006-12-18.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2002AA404250,2005AA404220).

作者简介:曲兴田(1962-),男,副教授.研究方向:压电精密驱动控制技术,纳米表面涂层工艺技术及应用.

E-mail: rjxqt@sina.com

通讯联系人:赵宏伟(1976-),男,讲师.研究方向:压电精密驱动控制技术,纳米机械学与纳米材料科学.

E-mail: hwzhao@jlu.edu.cn

Key words: technology of instrument and meter; piezoelectric stack; flexure hinge; finite element; piezoelectric stack pump

对压电泵的研究始于 20 世纪 70 年代^[1,2], 现在该类泵在医疗^[3]、化学分析^[4]、航空航天以及汽车发动机燃料供给^[4]等领域均有应用。压电薄膜泵的种类繁多,包括压电片驱动和压电叠堆驱动、单腔体和多腔体等多种结构类型^[5-7]。压电泵的性能与压电振子的结构形式、工作参数相关,也受腔体的数量及其连接方式的影响。由于压电泵是将压电体激发的振动直接作用于流体,使其产生动压或流量输出的一种新型压电驱动机构,因此压电泵是一种涉及多个学科领域的新型流体机械,本文研究的压电泵利用柔性铰链作为放大机构,使压电泵获得了较好的输出特性。它拓展了压电驱动器的应用领域。

1 压电叠堆的特性分析

1.1 迟滞特性

当驱动电压 U 相同时,电压上升阶段和下降阶段的输出位移 ΔL 不同。在电压下降阶段,返回电压的峰值不同,输出的位移也不相同,这种现象称为迟滞。压电陶瓷的迟滞非线性属于非局部存储型迟滞非线性,这是压电陶瓷固有的特性。该特性表明系统下一时刻的输出不仅取决于当前时刻的输入,还取决于输入的历史。压电陶瓷的迟滞环是不对称的,即上升轨迹和下降轨迹之间没有对称轴。较好地掌握滞环特性便于有效的控制。本文以压电叠堆 Tokin AE0505D16(以下简称压电叠堆)为研究对象,其滞环特性曲线如图 1 所示。先将压电陶瓷的驱动电压缓慢增加,达到一定数值后再缓慢减小。测量结果表明,压电叠堆滞环在 15% 左右。

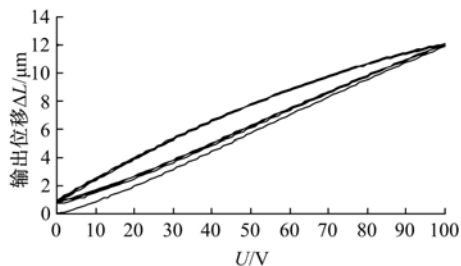


图 1 压电叠堆的滞环特性曲线

Fig. 1 Hysteresis curve of piezoelectric stack

1.2 谐振频率

压电叠堆的弹簧-质量系统的动力学模型如

图 2 所示。谐振频率可由下式计算

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_T}{m_{\text{eff}} + M}} \quad (1)$$

式中: K_T 为压电叠堆刚度; m_{eff} 为压电叠堆等效质量(取压电叠堆质量的 1/3); M 为附加质量。

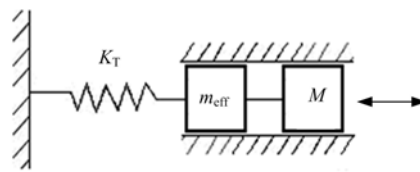


图 2 微位移器动力学模型

Fig. 2 Dynamics modal of micro displacement actuator

K_T 用以下公式计算

$$K_T = \frac{F_{\text{MAX}}}{S_{\text{MAX}}} \quad (2)$$

式中: F_{MAX} 为压电叠堆最大输出力; S_{MAX} 为最大输出位移。

压电叠堆的 F_{MAX} 为 850 N, S_{MAX} 为 16 μm , 质量约为 0.42×10^{-3} kg, 其等效质量约为 0.14×10^{-3} kg, 由式(1)、式(2)可得该压电叠堆的刚度约为 5.3×10^7 N/m, 谐振频率为 $f_0 = 10$ kHz。

快速响应是压电叠堆的主要特点,对式(1)求解可得压电叠堆达到名义位移所需的时间为

$$T_{\text{min}} \approx \frac{1}{3f_0} \quad (3)$$

由式(3)可以求得压电叠堆的最小上升时间约为 30 μs 。

2 单轴柔性铰链放大机构设计

压电叠堆作为泵的驱动元件,由于其输出位移小,需通过柔性铰链位移放大机构对叠堆的变形量进行有效放大。

柔性铰链位移放大机构具有运动精度高、定位精度高,机构简单、价格低等优点。可用于诸多微运动和微定位等领域。柔性铰链位移放大机构沿 z 轴方向的转动刚度是设计柔性铰链最重要的参数,计算柔性铰链沿 z 轴方向的转动刚度时,由于柔性铰链的变形集中在柔性铰链的圆弧部分,所以忽略柔性铰链圆弧以外的变形^[8-10]。

单轴转动柔性铰链的结构参数如图 3 所示。由力矩 M_z 引起柔性铰链扭转变形产生的转角为

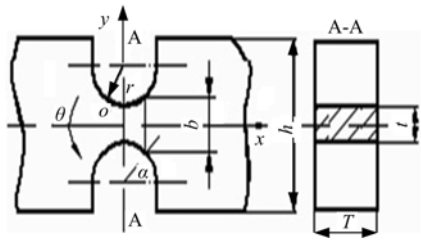


图 3 单轴转动柔性铰链结构参数

Fig. 3 Structure parameter single-axis flexure hinge

θ , 由于柔性铰链实际角位移非常小, 可认为 $\theta = \tan\theta$, 由曲线斜率得到的铰链转角^[11]为

$$\theta \approx \tan\theta = \frac{dy}{dx} \quad (4)$$

单轴柔性铰链的变形是许多微小段弯曲变形累积的结果, 每个微小段可以认为是长度为 dx 的等截面矩形梁, 而且作用在微小段两侧面的弯矩也是相等的, 根据材料力学和数学推导可得

$$\theta = \int_{\pi/2-\theta_0}^{\pi/2+\theta_0} \frac{12Mr\sin\alpha}{ET(2r+t-2r\sin\alpha)^3} d\alpha \quad (5)$$

相应地可得单轴柔性铰链转角刚度 k_b 的计算公式

$$k_b = \frac{1}{\int_{\pi/2-\theta_0}^{\pi/2+\theta_0} \frac{12Mr\sin\alpha}{ET(2r+t-2r\sin\alpha)^3} d\alpha} \quad (6)$$

当柔性铰链的最小厚度远小于柔性铰链的高度 h 和切割半径 r 时, 可得到如下简化公式

$$k_b = 2Ebt^{5/2}9\pi r^{1/2} \quad (7)$$

3 柔性铰链放大机构的分析

3.1 静态特性分析

用于压电叠堆泵位移放大的柔性铰链结构如图 4 所示, 其参数如下: 柔性铰链中心厚度取 $t=0.5 \text{ mm}$, 铰链厚度 $T=6 \text{ mm}$, 角度 $\alpha=8^\circ$, 半径 $r=1 \text{ mm}$; 材料采用弹簧钢, 其弹性模量 $E=200 \text{ GPa}$, 泊松比 $\delta=0.288$, 密度为 7854 kg/m^3 。通过改变 t, α 及 r , 计算出系统输出位移, 作出影响关系曲线, 得出影响放大机构放大倍数以及应力集中的规律。在 A、B 面分别加面力 800 N , 在 C 面加全约束, 在 D 面加预紧力 50 N 。

表 1 给出了实验测得的中心厚度 t 与对输出位移的关系。可以看出, 在同一中心厚度时输出位移量随输入位移增大而增大, 基本成线性增大, 且随着 t 的增大, 其线性度变好; 放大倍数在 $t=0.2$ 时最大, 可以达到 8 倍多, $t=1.0$ 时最小, 为 4.5 倍, 这说明中心厚度越小, 放大倍数越大, 所以在充分考虑结构承载能力的情况下, 应该尽量

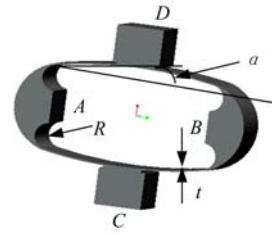


图 4 柔性铰链放大机构结构图

Fig. 4 Flexure hinge displacement magnification mechanism

减小中心厚度。

表 1 柔性铰链结构参数测试数据表

Table 1 Testing result of flexure hinge dimension parameters

输入厚度 $t/\mu\text{m}$	输出位移 $/\mu\text{m}$	输入角度 $\alpha/(\text{°})$	输出位移 $/\mu\text{m}$	输入半径 $r/\mu\text{m}$	输出位移 $/\mu\text{m}$
0.2	118	3	83	0.25	109
0.4	105	4	80	0.50	105
0.5	92	5	77	0.75	101
0.6	88	6	72	1.00	97
0.8	78	7	68	1.25	92

表 1 还给出了实验测得的角度 α 与输出位移的关系以及实验测得的半径 r 与输出位移的关系。可以看出, 随着 α 的减小, 其放大倍数会逐渐增大, 但是 α 也不能无限减小, 因此利用 ANSYS8.0 对 α 与输出位移的关系进行了验证。可以看出, 随着角度的增加, 其输出位移会逐渐减小, 这与上面的分析完全吻合; 但是如果 α 太小, 转角刚度就会过大, 从而影响放大机构的应力分布, 所以选择适当的 α 非常关键。

另外, 同一角度时输出位移随着输入半径(位移)的增加而线性增加, 半径值相差 1 mm 的两条曲线的最大输出位移仅仅相差 $10 \mu\text{m}$, 半径 r 越小其应力集中越严重, 设计柔性铰链放大机构时, 应选择较大 r 的柔性铰链。

3.2 有限元分析

柔性铰链放大机构的有限元分析结果如图 5 所示。可以看出, 在模拟负载的情况下, 放大机构的位移输出约为 39 mm , 近似为 3.5 倍; 出现于弹性铰链处的最大应力为 210 MPa , 小于弹簧钢的许用应力 432 MPa , 强度足够; 圆弧上的应力分布比较均匀, 有效地减小了铰链处的应力集中, 增加了零件的使用寿命。

根据静力学分析, 可确定柔性铰链放大机构的基本尺寸, 即 $t=0.5 \text{ mm}$, $T=6 \text{ mm}$, $\alpha=5^\circ$, $r=$

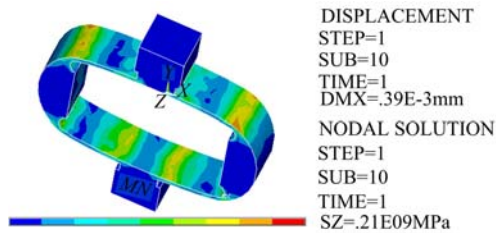


图 5 柔性铰链有限元分析图

Fig. 5 FEM result of flexure hinge

1 mm;材料采用弹簧钢, $E=200$ GPa,泊松比 $\delta=0.288$,密度为 7854 kg/m^3 。根据实际工作情况对模型给定约束条件为:右端固支,左侧位移输出端限定为一个自由度(x 方向)的运动。计算出柔性铰链微位移放大机构的前四阶固有频率如表 2 所示。从表 2 中可以看出该微位移放大机构在此种约束状态下的固有频率达到 1795 Hz ,具有良好的动态特性。

表 2 柔性铰链四阶模态固有频率

Table 2 The 4th mode frequency of flexure hinge

阶次	1	2	3	4
固有频率/Hz	622	1795	3221	4835

4 柔性铰链放大机构特性

由于位移放大机构的放大倍数即输出位移直接影响到泵的性能,所以有必要对放大机构作一个整体测试。采用正弦波、三角波、方波三种电源信号和 10 、 100 、 500 Hz 三种频率对放大机构进行了测试,结果表明:相对于不同的电源波形,放大机构的响应曲线是不同的,正弦波的放大机构响应曲线畸变最小,在三种频率下都与电源波形非常接近,三角波次之,方波最差,但是由于方波的输出功率最大,所以在相同电压相同频率下放大机构的输出位移最大。方波产生位移较大,但噪音也较大;在高频下工作选择正弦波较为合适,因为其没有噪音。

为了测试该柔性铰链放大机构的稳定性,对放大机构进行了多次连续测试,主要实验设备有:压电陶瓷专用电源、多普勒高频振动测振仪、快速傅立叶分析仪等。测试结果表明:此放大机构的放大倍数较为稳定,放大倍数为 4 倍左右。与有限元分析结果基本一致。

测试电压为 20 V 时,由试验测得的柔性铰链放大机构幅频特性可以看出,频率在 1500 Hz 处振幅达到最大值,此处对应的频率为放大机构的

谐振频率,说明该放大机构具有良好的动态特性。实测的谐振点与有限元模态的分析结果接近。

测试电压为 100 V ,预加压力通过砝码来加载。实验仪器主要有:激光测微仪、信号发生器、放大器、电子拉压力计、砝码、直立导轨等。由试验测得的柔性铰链放大机构的输出力对输出位移的影响情况可以看出,随着输出力的增大,其输出位移逐渐减小,最大位移处输出力为零,最大输出力处的输出位移很小。

5 压电叠堆泵的实验研究

5.1 压电叠堆泵的结构设计及工作原理

图 6 为压电叠堆泵的基本结构,主要由泵体、铜隔膜、放大机构及进出水口等组成。压电叠堆的输出位移很小,在连接放大机构及其他零件时,必须要预紧。工作原理为:当给压电叠堆施加交变电压时,压电叠堆周期性地伸长缩短,从而推动放大机构周期性地伸长缩短,与之相连接的铜隔膜也随之上下振动,铜隔膜四周固定,所以变形后会形成近似于球冠的形状,此时,由铜隔膜与有机玻璃构成的封闭泵腔,由于铜隔膜的上下振动引起泵腔体积的周期性变化,从而达到连续输出流体的目的。

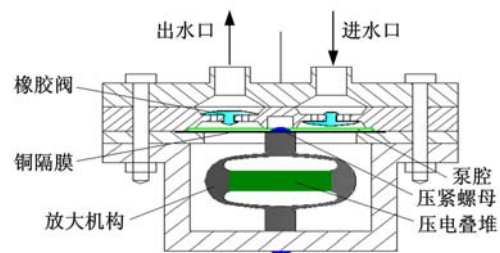


图 6 压电叠堆泵结构图

Fig. 6 Principle of piezoelectric stack pump

5.2 压电叠堆泵性能实验测试

(1) 输入电压对输出流量、输出压力的影响

图 7 为压电叠堆泵性能实验原理图。主要实验设备有信号发生器、压电陶瓷专用电源(模拟输入端)、量杯等。

图 8 中曲线 a 是频率为 25 Hz 输入电压对输出流量、输出压力的影响曲线。可见,随着输入电压的增大,输出流量也增大,线性关系不明显,充分说明了压电叠堆迟滞特性对输出特性的影响。

图 8 中曲线 b 是频率为 12 Hz 时输入电压对输出压力的影响曲线。可以看出,随着电压的升高,其输出压力也逐渐升高,当电压增加到 100 V

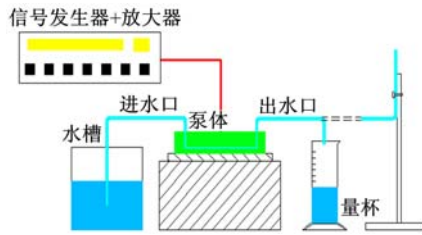


图 7 压电泵性能实验测试原理图

Fig. 7 Experimental system for piezoelectric pump performance

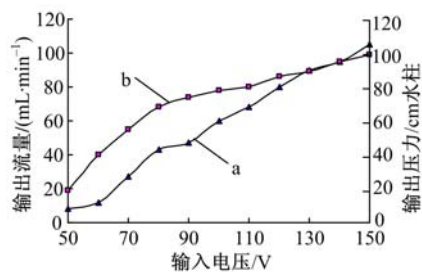


图 8 输入电压对输出流量和输出压力的影响曲线

Fig. 8 Testing curve of input voltage influencing to output flux and pressure

后,压力变化趋势减缓。

(2)输入频率对输出流量、输出压力的影响

图 9 中曲线 a 为 90 V 电压条件下输入频率与输出压力的关系曲线,可以看出,此时其输出压力整体上是随频率的增加而增加的在 10 Hz 左右其输出压力达到最大值,说明系统的谐振频率比较低。当频率在 10 Hz 时起输出压力达到实验的最大值,约为 80 cm 水柱高(相当于 80 kPa)。说明该压电泵适合于在低频率下工作。

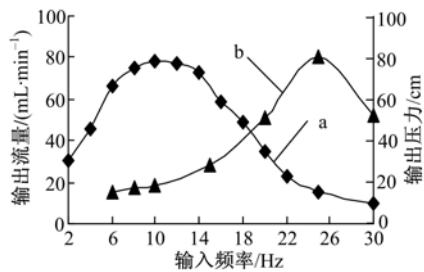


图 9 输入频率对输出压力、输出流量的影响曲线

Fig. 9 Testing curve of input signal frequency influencing to output flux and pressure

图 9 中曲线 b 为输入频率对输出流量的影响曲线。可以看出,随着频率的增加,泵的输出流量也随之增加,当频率增加到 25 Hz 左右时,输出流量达到最大值,而随着频率的继续增加,输出流量又会逐渐减小。

6 结束语

作者对压电叠堆的动静特性进行了论证,得出了压电叠堆的滞环特性和频率特性;提出了一种新型的全柔性铰链放大机构,解决了应力集中问题,利用有限元分析了结构特性,论证了结构尺寸的合理性。分析了柔性铰链压电叠堆泵的输入电压,频率对输出电压、输出流量的影响规律,说明液电泵具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 刘一声. 新型驱动器及其应用的开发[J]. 压电与声光,1994,16(5):19-26.
Liu Yi-sheng. Development of new-types of actuators and their applications[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics,1994,16(5):19-26.

[2] Gerlach T. Microdiffusers as dynamic passive valves for micropump applications [J]. Sensors and Actuators, 1998(A69):181-191.

[3] Valvular. Microvalves[J]. Sensors and Actuators,1996 (A57):75-78.

[4] Olivier Fracais, Isabelle Dufour. Dynamic simulation of an electrostatic micropump with pull-in and hysteresis phenomena[J]. Sensors and Actuators,1998 (A70):56-60.

[5] Amos Ullmann. The piezoelectric valve-less pump-performance enhancement analysis[J]. Sensors and Actuators,1998(A69):97-105.

[6] Gerlach T, Schuenemann M, Wurmus H. A new micropump principle of the reciprocating type using pyramidal micro flowchannels as passive valves[J]. J Micro-mech & Microeng,1995,5:199-201.

[7] Gerlach T, Wurmus H. Working principle and performance of the dynamic micropump[J]. Sensors and Actuators,1995(A50):135-140.

[8] Kojima Y, Okusawa T, Tsubouchi K. Fundamental investigation of a piezoelectric pump for a trace liquid feed [J]. JSME International Journal, Series C, 1995, 38 (3):531-537.

[9] Lobontiu N, Garcia E. Two-axis flexure hinges with axially collocated and symmetric notches[J]. Computer & Structures,2003(1):1329-1341.

[10] Ryu J Gweon D, Moon K. Optimal design of a flexure hinge based X, Y, θ wafer stage[J]. Precision Eng, 1997,21:18-28.

[11] Hiroyuki Fujita. Future of actuators and micro system [J]. Sensors and Actuators, 1996(A56):105-111.