

文章编号 1004-924X(2005)03-0318-06

微型压电泵系统的设计研究

杨树臣,程光明,刘国君,刘建芳
(吉林大学 机械科学与工程学院,吉林 长春 130025)

摘要:提出了一种整机采用迭片式结构,单向阀采用悬臂梁式薄片阀的新结构微型压电泵,设计、制作了实验用样机泵,设计了正弦信号发生器电路,将产生的正弦信号经过电压放大和功率放大后,作为该泵电源驱动,通过对该泵的工作性能进行较为系统的实验测试和研究,提出了利用多腔体串联结构提高压电泵性能的优化设计方案。实验测试表明,该泵工作性能稳定(样机尺寸: $\Phi 15\text{ mm} \times 1.8\text{ mm}$;50 V 正弦信号输入,80 Hz 条件下,最大输出压力 22 kPa,流量达到 3.6 ml/min)。该泵的设计方法及所用制作工艺可用于研发大量生产的实用微型泵。

关键词:悬臂梁阀;微型泵;压电泵;迭片结构

中图分类号:TH38;TN384 **文献标识码:**A

Design of piezoelectric micro-pump

YANG Shu-chen, CHENG Guang-ming, LIU Guo-jun, LIU Jian-fang

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

Abstract: This paper introduces a piezoelectric micro-pump with a new structure based on lamination, which adopts a cantilever check valve. In the laboratory the prototype pump has been designed and manufactured, the sine wave signal forming schematic circuit has been finished, which used to drive the micro pump after power amplification and voltage amplification. The systemic experiment research also has been done, the optimization project has been put forward, which adopts multi-chamber series connection structure to improve the performance of micro-pump. Through a series of experiments and tests, many beneficial conclusions have been drawn. the micro-pump possesses the stable work performance and owns higher ratio of performance to volume(the apparent dimension of pump: $\Phi 15\text{ mm} \times 1.8\text{ mm}$; the maximal low rate and backpressure of the micro-pump are about 3.6 ml/min and 22 kPa when applying 50 V sine wave driving voltage at 80 Hz). The structure and manufacture processing are useful for the design and development of the applied piezoelectric micro-pump.

Key words: cantilever check valve; micro-pump; piezoelectric pump; lamination

1 引言

微泵和微阀作为微流量控制系统的关键性执行器件,因其具有广阔应用前景,对其所进行研究正备受业界学者的关注^[1]。基于驱动原理不同,微型泵可分为压电式、静电式、热气式、形状记忆合金式等^[2];根据其不同的结构形式,微阀可分为环台状、V型、悬臂梁式、薄膜式、浮阀式等多种阀结构。同传统泵相比,压电泵的特点是结构简单、体积小、质量轻、耗能低、无噪声、无电磁干扰,可根据施加电压或频率控制输出流量等。因此,压电泵具有相当广泛的应用领域,在医疗^[3-4]、化学分析^[5]以及汽车发动机燃料供给^[6]等领域都可应用。静电泵可分为膜片泵和电液动态(EHD)泵。静电膜片泵可根据激励频率的不同而改变流向,功耗仅几毫瓦,静电EHD泵的最大特点是没有移动或变形部分^[7]。热气式泵由于靠膜片上的加热电阻加热谐振腔内的空气使膜片膨胀,从而通过单向阀的作用使泵腔内的流体产生单向流动,因此该泵工作频率低,响应较慢。

然而,不管采用何种形式的单向阀设计,保证单向阀具有较小的反向泄漏以及具有较好的动态特性是设计微型阀的关键^[8]。为了设计出体积微小、性能优良、适于小批量生产的微型泵,文中采用了目前普遍看好的膜片驱动式结构^[9],设计制造出由压电晶片驱动,采用悬臂梁式单向阀结构的微型压电泵,并对泵和阀的性能进行了测试及分析,提出了优化和改进方案。

2 微型压电泵设计

2.1 泵体结构整机设计

为了实现体积小型化,样机设计采用了迭片式技术,即将整机在厚度方向有机分成若干薄层,各层独立加工成型,装配时

层层迭片组装而成^[10]。此种方法可有效缩小整机的尺寸,同时解决流道难于构造等问题,降低了制造工艺难度。图1为微型压电泵的设计原理性简图。工作时,压电振子(由压电晶片和金属基板构成)在交变电信号的作用下产生上、下弯曲振动,引起泵室内容积和压力的变化^[11]。当压电振子向上弯曲时,泵腔体积增大、腔内流体压力减小,这时入口阀打开、出口阀关闭,流体向腔内流动;相反,压电振子向下弯曲时,泵腔体积减小、压力增加,入口阀关闭、出口阀打开,流体从泵腔内排出。这样压电泵在一个电信号脉冲过程中完成一个从泵吸水到排水完整的泵抽工作过程。

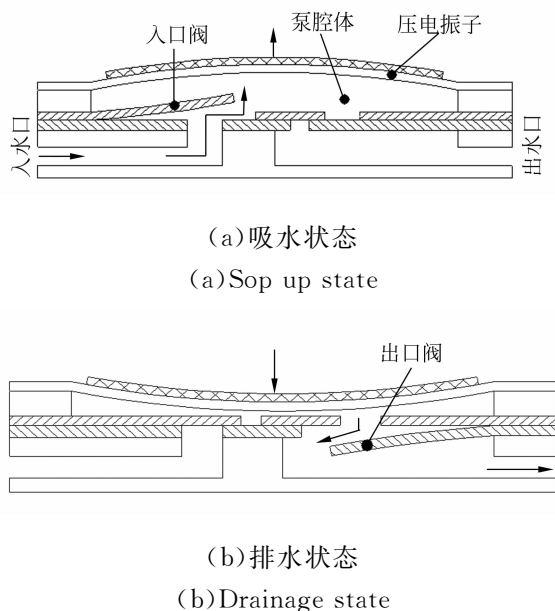


图1 压电晶片致动式微型泵

Fig. 1 Micro pump powered by piezoelectrics

2.2 悬臂梁式单向阀的设计

在单向阀的设计上,选用悬臂梁式单向阀。悬臂梁式单向阀是一种具有典型结构的单向阀,当阀片的两侧存在有压差时,阀片将受到力的作用,或紧贴于阀座或产生一定的开度,从而起到阻流或控制液体通过的作用。

根据伯努利方程和连续方程可得通过矩形缝隙的流量为^[12]:

$$Q = CB_y \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (1)$$

其中: C 为流量系数, B 为缝隙的宽度(取 $B = 2r$, r 为阀片的出入孔半径), y 为阀片端部的变形量, ΔP 为缝隙两侧的压差, ρ 为液体密度。

这里近似取:

$$y_{\max} = \frac{Pl^3}{3EI} = \frac{\Delta P \pi r^2 l^3}{3EI}, \quad (2)$$

同时有:

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1)得:

$$Q = C \frac{\pi \Delta P r^2 l^3}{Eh^3} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (4)$$

其中: E 为阀片的杨氏模量, I 为截面惯矩, h 为阀片的厚度。从流量公式可知: 当其他参数一定时, 通过悬臂梁式单向阀的流量同 l^3 成正比, 同 h^3 成反比。

同时当研究悬臂梁阀的谐振特性时, 其固有频率为^[13]:

$$\omega_n = \frac{(\beta l)^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}, \quad (5)$$

(当 $n = 1, 2, \dots$ 时, $\beta_1 l = 1.875$, $\beta_2 l = 4.694$), 对于压电泵而言, 利用的是阀片一阶振型的运动特性, 故设计时要确保泵的工作频率使阀片的运动满足一阶振型。

同时一阶谐振频率为:

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 0.56 \sqrt{\frac{E}{12\rho}} \times \frac{h}{l^2}, \quad (6)$$

从上面的公式可知: 在其他参数一定时, 阀片的基频同 l^2 成反比, 同 h 成正比。分析 Q 、 f_1 两参数不难得出: 减小悬臂梁式阀片的一阶频率, 即适当减小悬臂梁的厚度及增大悬臂长度, 有利于提高通过单向阀的流量^[14]。

利用 ANSYS 的模态分析对悬臂梁阀进行模态分析, 以求其振动模态和频率响应特性。在分析过程中, 选用 Structural

Shell 的 Elastic 8node 93 单元, 铍青铜的弹性模量 $EX = 1.18e11 \text{ N/m}^2$, 泊松比 $PRXY = 0.35$, 在悬臂梁阀片模型根部施加固支位移约束, 使用 model 分析方法, 扩展前 10 阶模态, 频率范围为 $0 \sim 10\,000 \text{ Hz}$ 。利用 ANSYS 对 3 种结构形式的阀片所进行模拟分析的结果如表 1 所示。从基频角度来分析, II、III 号阀片比 I 号阀片更有利于流量的提高, 从应力变形角度来分析, II 号阀片在阀片端部(出入口处)的应变更均匀, 更有利于提高阀片的工作寿命, 故最终选择 II 号阀片为悬臂梁阀片的结构。表 2 为对不同尺寸的悬臂梁阀片的一阶频率所进行的计算分析结果。从表中可见, 增加悬臂长度、减小阀片的厚度均可降低阀片的一阶频率, 而悬臂宽度影响不大, 综合比较后, 实验样机用悬臂梁阀片的尺寸确定为: $L \times B \times h = 3.8 \text{ e} - 3 \times 1.6 \text{ e} - 3 \times 5 \text{ e} - 5 \text{ mm}$

表 1 3 种阀片的结构与振型分析

Tab. 1 Analysis of three kinds of structures and vibrations

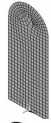





	NO. 1 valve	NO. 2 valve	NO. 3 valve
阀片结构			
第 1 阶谐振频率及振型			
	2 371 Hz	1 914 Hz	1 810 Hz

表 2 不同结构尺寸阀片的一阶频率列表

Tab. 2 List of frequency of valve with different structures and sizes

阀片的结构和尺寸/mm	f/Hz	
Length ($L \times 1.6 \text{ e} - 3 \times 5 \text{ e} - 5$)	$L = 3.8 \text{ e} - 3$	1 914
	$L = 2.8 \text{ e} - 3$	3 532
Width ($3.8 \text{ e} - 3 \times B \times 5 \text{ e} - 5$)	$B = 2 \text{ e} - 3$	1 870
	$B = 1.6 \text{ e} - 3$	1 914
Thickness ($3.8 \text{ e} - 3 \times 1.6 \text{ e} - 3 \times h$)	$h = 6 \text{ e} - 5$	2 298
	$h = 5 \text{ e} - 5$	1 914

3 微型压电泵的制作

采用迭片式结构可使压电泵实现微型化,此种技术是实现泵体微小化,制作小批量实验样机的有效手段。由于有机玻璃易于加工,质量轻,绝缘,故被用来制作压电泵泵体。有机玻璃板经三轴联动的数控精雕机机床,便可制成泵体。对于整体式悬臂梁结构,阀片的选材和制作较为关键,这里要求阀片材料具有弹性恢复性强、对温度敏感性低、抗腐蚀、易于加工等性能指标。本样机泵的阀片选用金属材料铍青铜薄片,该材料具有优良的机械性能指标。

加工工艺采用雕刻技术及传统磨削技术制作而成。采用迭片式结构后,通过层与层之间的叠加、微观对中、粘接等技术微型压电泵能够满足较高的制作和装配精度。

4 样机泵的实验测试

图 2 为压电泵实验测试装置图,在对微型压电泵的实验测试中,实验用流体采用工业用的蒸馏水,在室温下进行实验测试。分别对微型压电泵在不同输入电源电压幅度值和不同频率情况下的输出压力、流量等工作性能进行了较为全面的实验测试和比较。

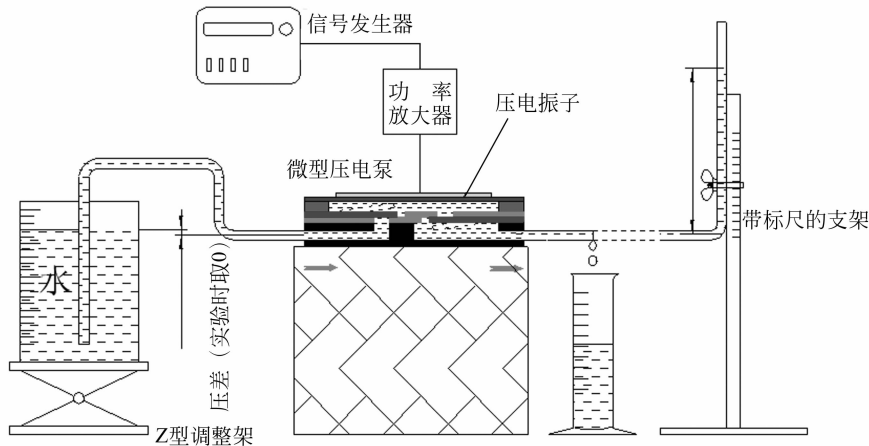
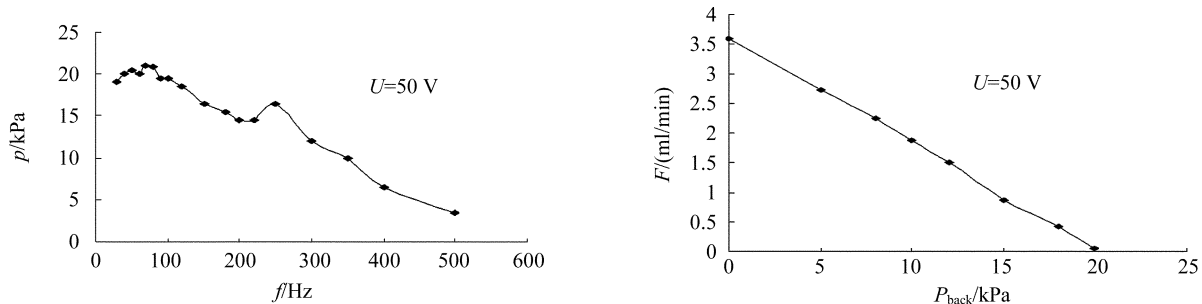


图 2 压电泵实验装置示意图

Fig. 2 Testing equipment for piezoelectric micro-pump



(a)频率对输出端压力的影响曲线

(a) Influential curve of frequency and output pressure

(b)输出端对流量的影响曲线

(b) Influential curve of flux and back pressure

图 3 微型压电泵的工作性能特性曲线

Fig. 3 Operating characteristic curve of micro pump

从压电泵的输出特性实验测得:频率一定时,压电泵的输出压力、流量随着电压的不断增大,近似成线性增长趋势。当样机输入 50 V 电压,工作在 80 Hz 附近时,出口压力达到 22 kPa,流量达到 3.6 ml/min;图 3(a)频率-压力实验曲线显示:压电泵的最佳工作频率处于 60~100 Hz 区间,主体呈不断降低趋势。图 3(b)的实验曲线表明:在电压、频率一定时,流量随输出端背压的不断增大呈线性减小趋势,这一性能同传统离心泵相似。

造的压电泵,通过设计及样机实验,已被证实是一种具有较强工作能力、性能稳定、体积微小化的新结构微型泵。降低阀片的基频,可适当提高微泵的流量,同时也降低了泵的最佳频率。采用多个压电振子、多腔体串联结构是提高微型泵性能的一种有效的措施,可较大幅度提高微泵的流量及频率。在今后的研究工作将继续从事微泵的设计及优化,并从驱动电源电路的角度出发,设计出最佳的驱动电源信号,并在此基础上研发性能更高的微型泵。

5 结 论

采用悬臂梁阀、利用迭片式结构所构

参考文献:

- [1] FUJITA H. *A decade of MEMS and its future*[D]. In Proc. of the IEEE MEMS, 1997:1-8
- [2] SHOJITT S, ESASHIT M. Microfolw devices and systems[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 1994, (4):157-171
- [3] van LINTEL H T G, van DE POL F C M, BOUWSTRA S. A piezoelectric micropump based on mocomachining of silicon [J]. *Sensors and Actuators*, 1988, 15:153-167
- [4] MAILEFER D, VAN LINTEL H, MERMET G R, *et al.* A high-performance silicon micropump for an implantable drug delivery system [C]. *Proc. 12th IEEE MEMS 1998 Technical Digest, Orlando, Florida, USA*, 1998:541-546.
- [5] SHOJI S, NAKAGAWA S, ESASHI N. Micropump and sample-injector for integrated chemical analysis system [J]. *Sensors and Actuators A*, 1990, 21-23:189-192.
- [6] EDERER I, RAETSCH P, SCHULLERUS W, *et al.* Piezoelectrically driven micropump for on-demand duel-drop generation in an automobile heater with continuously adjustable power output [J]. *Sensors and Actuators A*, 1997, 62:752-755.
- [7] 白韶红. 微型阀和微型泵的原理与应用[J]. *传感器世界*, 2000, 4:1-8.
BAI SH H. Principium and applications of microvalves and micropumps[J]. *Sensor Word*, 2000, 4:1-8. (in Chinese)
- [8] 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*, 20002, 10(6):619-625.
KAN J W, YANG ZH G, CHENG G M. Status and development of piezoelectric micro-pump [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6):619-625. (in Chinese)
- [9] WU X W, CHENG G M, JACKSON D J, *et al.* A new kind of single stator multi-freedom piezoelectric motor driven by single frequency standing wave[C]. *IEEE(EIT2000, Chicago, USA.)*, 2000.
- [10] TRUONG T Q. A polymeric piezoelectric micropump based on lamination technology[J]. *J.*

Micromech. Microeng., 2004,(14):632-638.

- [11] ZHANG J H, XIA Q X, WANG D K, *et al.* Sample theorem to periodic non-continuous signal from cavitation of piezoelectric pump [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(5): 476-482
- [12] 尹执中, 庞江涛, 胡桅林. 悬臂梁式微型阀[J]. 仪表技术与传感器. 2000, (3): 38-43.
YIN ZH ZH, PANG J G, HU W L. Adopts the cantilever check valve [J]. *Instrumental Technique and Sensor*, 2000, (3): 38-43. (in Chinese)
- [13] 许本文, 焦群英. 机械振动与模态分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
XU B W, JIAO Q Y. *Mechanical vibrations and element of modal analysis*[M]. Beijing: Machine Press, 1998. (in Chinese)
- [14] TEYMOORI M M, ABBASPOUR S E. Design and simulation of a novel electrostatic peristaltic micromachined pump for drug delivery applications[J]. *Sensors and Actuator A.*, 2004, 117(2): 222-229

作者简介: 杨树臣(1971—), 男, 吉林人, 吉林大学机械学院机电工程专业, 在读博士生, 吉林工程技术师范学院, 讲师。