

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.041

圆形双振子式主动阀压电泵设计与性能实验*

程光明 何丽鹏 曾平 李鹏 阚君武 杨志刚

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

【摘要】 设计了一种圆形压电振子式主动阀压电泵。通过推导主动阀理论流量公式,分析了影响主动阀流量的主要因素,即阀口内半径和阀座宽度。通过对圆形压电振子式主动阀压电泵性能的实验得出了工作频率、泵腔压电振子驱动电压、输出端背压、主动阀驱动信号与泵腔压电振子驱动信号的相位差是主动阀压电泵的性能影响因素。设计的主动阀压电泵同时具备双向泵送流体的能力。实验结果表明:该泵在 30 Hz、120 V 的正弦信号驱动下,流量达到了 123 mL/min。

关键词: 圆形压电振子 主动阀压电泵 设计 性能实验 流量

中图分类号: TH38; TN384 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)05-0204-05

Design and Performance Test on Circular Two Piezoelectric Pump with Active Valve

Cheng Guangming He Lipeng Zeng Ping Li Peng Kan Junwu Yang Zhigang

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

Abstract

A new type of piezoelectric pump with active valve was designed. By means of derivation piezoelectric pump flux formula, main factors which influenced flux of the active valve were analyzed, i. e. inside diameter and the width of the valve seat. The test result showed that working frequency, the power supply voltage, the output backpressure, phase difference between the driving signal of active valve and the pump were the most influential factors on the performance of piezoelectric pump with the active valve. The designed initiative piezoelectric pump has the capacity of delivering liquid in two directions. The experimental results showed that the flux of designed piezoelectric pump could reach 123 mL/min, under the condition of sinusoidal driving signal at 30 Hz and 120 V.

Key words Circular piezoelectric factor, Piezoelectric-pump with active valve, Design, Performance test, Flux

引言

压电泵在微小型机电液系统中的应用是压电驱动技术的一个重要分支。压电泵的性能不仅取决于泵腔的驱动元件,还取决于进、出口单向阀的工作形式。

主动阀压电泵是近年来提出的一个新的概念,国内外对于它的研究还仅仅处于起步阶段,研究成

果也仅是压电晶片驱动式、蠕动式和压电叠堆驱动式主动阀压电泵。虽然它的发展还仅仅处于起步阶段,但已经成为压电泵发展的一个新方向^[1-3]。本文基于主动阀压电泵,提出一种基于圆形压电双晶片的主动阀压电泵。

1 结构与工作原理

设计的圆形压电振子式主动阀压电泵的结构原

收稿日期:2009-03-17 修回日期:2009-03-30

* 国家自然科学基金资助项目(50575093、50775093)

作者简介:程光明,教授,博士生导师,主要从事微小型机电液系统研究,E-mail: cgm123@163.com

通讯作者:曾平,教授,博士生导师,主要从事微小型机电液系统研究,E-mail: piaoyi820703@163.com

理如图 1 所示。该泵由泵体、阀体、上下盖、密封圈、以及进出口构成。阀体主要包括圆形压电振子和阀座；泵体主要包括泵腔和圆形压电振子。泵腔和阀腔的密封是通过圆形压电振子与密封圈来实现的。泵体与阀体的材料均选用有机玻璃。四周通过螺钉锁紧。

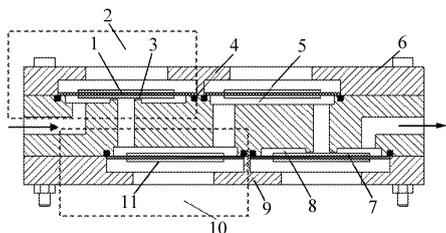


图 1 圆形压电振子式主动阀压电泵的结构原理图

Fig. 1 Block diagram of piezoelectric pump with active valve

- 1. 阀用圆形压电振子 2. 主动阀 3. 阀座 4. 密封圈 5. 泵腔
- 6. 上盖 7. 隔离膜 8. 阀腔 9. 下盖 10. 泵 11. 泵用圆形振子

该泵的工作过程是：①给进出口主动阀压电振子施加信号，使进口阀开启，出口阀关闭。②给泵腔的两个圆形压电振子施加电信号，使其向泵体外侧拱起，泵腔体积随着压电振子的运动而增大，压力降低，液体流入泵腔内，实现压电泵的吸入过程。③当泵腔压电振子达到变形的极值时，改变主动阀的控制信号，使出口阀开启，进口阀关闭。④改变泵腔圆形压电振子的控制信号，使其开始向泵腔内侧运动，泵腔体积随着压电振子的运动而减小，压力升高，流体流出泵腔，压电泵完成排出过程。各个压电振子重复上述动作，主动阀压电泵实现液体的连续泵送。

2 形压电振子式主动阀的参数优化

衡量微小型阀的性能指标主要是流量、耐压、响应时间、响应频率以及泄漏量等参数。响应时间和频率是由驱动器的性能决定的；耐压及泄露量通常通过实验测得；流量则由阀的结构参数决定，它也是微小型阀结构设计的主要考虑因素。

2.1 流量的计算

由于压电振子的变形量很小，因此阀口的开度很小，压电振子与阀座之间只有很小的的缝隙，故将阀口处的液体流动看作液体在缝隙中的压差流问题。平行平板间的缝隙流量为^[4-8]

$$q = \frac{bh^3 \Delta p}{12\eta l} \quad (1)$$

其中

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

式中 η ——缝隙间液体的动力粘度

h ——平行平板的间隙(阀口开度)

l ——平行平板的长度

b ——平行平板的宽度

鉴于阀口为圆形，进一步的将问题延伸为液体在圆环平面缝隙内流动的问题。如图 2 所示，设圆环的内外径为 r_1 、 r_2 ，阀座与压电振子间的间隙(阀口开度)为 h ，虽然压电振子的实际变形为抛物线，但由于变形很小，因此假设阀座与压电振子间隙均为 h ，此外忽略液体重力的影响，假设阀口内部的压力 p_2 为零，阀口外部的压力为 p_1 。在距中心为 r 处取一液层，液层厚度为 dr ，液层的宽度是其展开长度 $2\pi r$ 。由于 dr 很小，故在 dr 液体微层中的压力变化率可视为相同，根据式(1)，得到

$$q = \frac{bh^3 \Delta p}{12\eta l} = -\frac{2\pi rh^3 dp}{12\eta dr}$$

即

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{6\eta q}{\pi rh^3} \quad (2)$$

负号表示压力在流体的流向上是下降的。

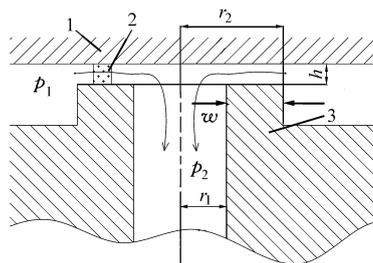


图 2 液体在主动阀阀座处圆环平面缝隙内的流动

Fig. 2 Liquid's flux in circular gap of active valve's seat

- 1. 压电振子 2. 选取的液层 3. 阀座

对式(2)进行积分，根据边界条件 $p = 0 |_{r=r_1}$ ，得到

$$p = \frac{6\eta q}{\pi h^3} \ln \frac{r_1}{r} \quad (3)$$

再将边界条件 $p = p_1 |_{r=r_2}$ 代入式(3)，即可得到主动阀阀座圆环平面缝隙流的流量

$$q = \frac{\pi h^3 p_1}{6\eta \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4)$$

因为

$$r_2 = r_1 + w$$

所以

$$q = \frac{\pi h^3 p_1}{6\eta \ln \frac{r_1 + w}{r_1}} \quad (5)$$

式中 w ——阀座宽度

由流量计算式(5)可以看出，在系统压力源固定的情况下，阀座处圆环平面缝隙流的流量主要与阀口开度 h 、阀口内半径 r_1 和阀座宽度 w 有关，而阀口开度 h 是由压电振子的特性决定的，因此阀口内半径 r_1 、阀座宽度 w 是需要优化的阀结构参数。

2.2 结构参数优化

2.2.1 阀口内径优化

要使阀有较大的流量，就要保证其过流面积足

够大。主动阀的过流面积对应某一阀口半径 r 、阀口开度(压电振子变形 h)与圆形阀口周长围成的圆柱体的侧面积,如图3所示,过流面积的主要影响因素是压电振子变形量 h 和阀口内径 r 。由圆形压电振子的变形特性可知,圆形压电振子的变形为抛物线^[9],虽然抛物线的顶点越高,阀口开启的越大,过流面积也越大,但抛物线的顶点高低(压电振子的变形)是由压电振子自身特性决定的,因此要想得到较大的过流面积,只能调整阀口内径。结合抛物线的形状特点,在顶点附近阀口可获得最大的开度,但相应的阀口内径将受到限制;在抛物线的边缘,虽然阀口内径得到了扩大,但对应的阀口开度又十分有限。综上,只有选择合适的 r 和 h 值才能使过流面积达到最大。

根据图3及圆柱体侧面积的计算公式,即可推导出圆形压电振子式主动阀的过流面积为

$$S = Ch = 2\pi rh \tag{6}$$

式中 C ——圆形阀口的周长

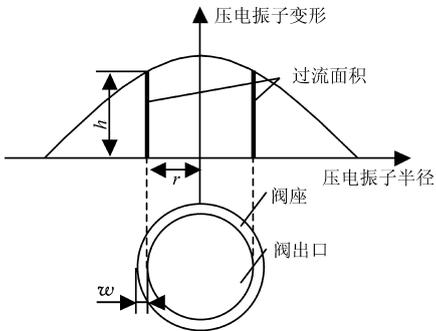


图3 圆形压电振子式主动阀参数

Fig.3 Parameter of circular piezoelectric pump

根据式(6),利用 Matlab,取半径增加的步长为 0.5,将每一个 r 及其对应的 h 值分别相乘,取结果的最大值,便可得到最大的过流面积,本文取 h 值 0.03 mm,计算结果如图4所示。可以看到,当阀口内半径为 15.5 mm 时,主动阀获得最大的过流面积,因此,15.5 mm 是理论上阀口内半径的最佳值。

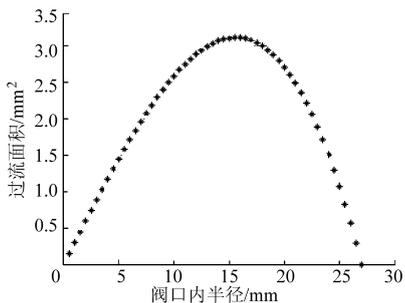


图4 过流面积与阀口内半径的关系

Fig.4 Relation between flux area and inside radii of valve

2.2.2 阀座宽度 w 优化

确定阀口内半径 r 、压电振子变形量 h 后,式

(5)表示的阀座宽度 w 和流量 q 的关系可简化为

$$q \propto \frac{1}{\ln \frac{r+w}{r}} \tag{8}$$

利用 Matlab,取 w 值从 0.2 到 3,步长 0.2,得到阀座宽度 w 和流量 q 之间的关系如图5所示,可以看到,随着阀座宽度 w 的增加,流量 q 急剧下降,因此为了获得较大的流量, w 的值应该越小越好。本文综合考虑阀座刚度、寿命的要求,选定阀座的宽度为 0.5 mm。

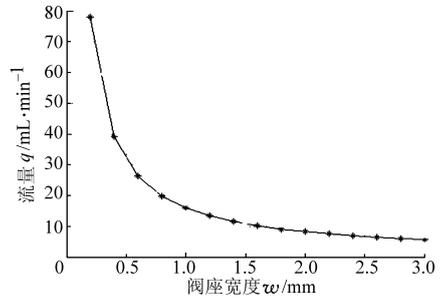


图5 阀座宽度 w 与流量 q 之间的关系

Fig.5 Relation between width of valve seat (w) and flux (q)

3 性能实验

圆形压电振子式主动阀压电泵的性能实验主要是流量和压力的测试,它们是在不同频率,不同驱动电压的正弦信号下完成的(压电泵和主动阀均在正弦信号下工作)。

由于主动阀压电泵的阀口开启和关闭需要根据泵腔压电振子的动作来控制,因此在其性能测试之前,首先确定了泵腔振子、进口阀以及出口阀控制信号间的相位差,结果如图6所示。

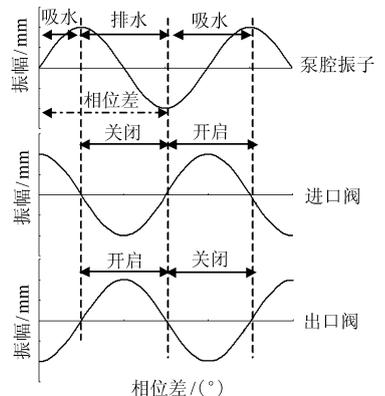


图6 圆形压电振子式主动阀压电泵的泵和阀的驱动信号

Fig.6 Pump and valve's drive signal for piezoelectric pump with active valve

当泵腔处于吸水状态时,进口阀开启,出口阀关闭;当泵腔处于排水状态时,进口阀关闭,出口阀开启。通过图6可以看到,进口阀与泵腔压电振子之

间的相位差为 270° ；出口阀与进口阀之间的相位差为 180° ，这就是进、出口阀压电振子在电气上反接即可的原因，因此本文在实验相位对泵的性能的影响时，只需调整进口阀的相位。从图中还可以发现，如果进、出口阀的驱动信号互换，则进口将变为出口，出口将变为进口，压电泵的泵送方向将会发生改变，故主动阀压电泵是双向泵。

圆形压电振子式主动阀压电泵在两个方向上的频率-流量特性曲线如图 7 所示。在较低的频率下，由于压电泵的流量输出呈脉动，因此泵测试时的频率范围选为 $30 \sim 70$ Hz。实验中泵腔和阀的压电振子施加电压的幅值为 120 V（最大耐压）。由图可知，在两个方向上，压电泵在 30 Hz 下工作时，流量最大，达到 120 mL/min ，之后随着频率的升高，压电泵的流量不断下降，而且下降幅度很大。主要原因是在安装主动阀时，考虑圆形压电振子的位移较大，为了保证圆形压电振子式主动阀压电泵的阀口开度，从而提高泵的流量，因此预留的圆形压电振子与阀口的间隙较大；在阀工作在低频的情况下，由于圆形压电振子的位移较大，故阀口可以被有效的关闭，当频率较高时，圆形压电振子的输出位移减小很快，故阀口无法被有效关闭，从而导致频率升高时，流量迅速下降。压电泵在两个方向上流量的差异主要是因为阀在工作时两个阀口的密封性的不同。

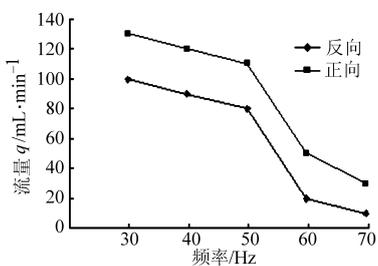


图 7 压电泵在两个方向上的频率-流量特性曲线

Fig.7 Curve of flux against frequency for piezoelectric pump in two directions

主动阀压电泵在 120 V, 30 Hz 正弦信号驱动下，以及在不同输出端背压下，在两个方向上的流量输出特性曲线如图 8 所示。可见，流量随着输出端背压的增大逐渐减少，且基本呈线性趋势。

泵腔压电振子工作在不同驱动电压下（主动阀压电振子工作在 120 V 电压下，测试频率 30 Hz）压电泵的流量变化如图 9 所示。可以看到，当泵腔压电振子的驱动电压升高时，泵的输出流量增大，这与电压升高压电振子变形增大，泵的理论流量输出增大是一致的。进、出口阀相位对主动阀压电泵性能的影响如图 10 所示。（实验中频率为 30 Hz），图中相位差为进口阀与泵腔压电振子的相位差。二者相

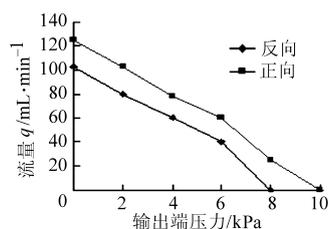


图 8 不同输出端背压下，压电泵在两个方向上的流量输出特性曲线

Fig.8 Flux characteristic curve under difference backpressure and on different directions

位差为 270° 时，压电泵正向泵水，且流量最大，相位差减少或增大，压电泵的流量均减小，当相位差减少或增大较大时，泵失去流量输出。当二者相位差为 90° 时，压电泵的泵送方向变为反向泵送，流量随相位差减少或增大的变化趋势与正向泵送时一样，均减小。

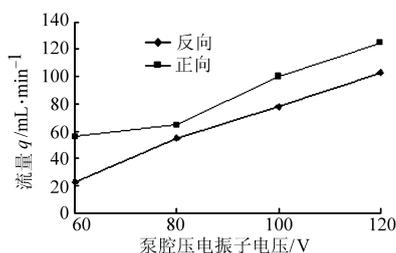


图 9 泵腔压电振子的驱动电压对压电泵流量的影响

Fig.9 Drive voltage's influence for flux

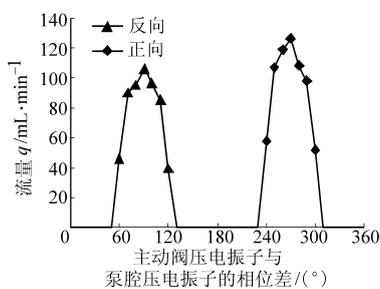


图 10 进口阀相位对压电泵流量及流向的影响

Fig.10 Input valve's face impact on flux and flux direction

4 结束语

通过推导文中设计的压电泵的主动阀理论流量公式可知，阀口内半径和阀座宽度是影响主动阀流量的主要因素，因此二者是主动阀压电泵主动阀设计的主要考虑因素。通过对圆形压电振子式主动阀压电泵性能的实验可知，工作频率、泵腔压电振子驱动电压、输出端背压、主动阀驱动信号与泵腔压电振子驱动信号的相位差是主动阀压电泵性能的主要影响因素。设计的主动阀压电泵除流量可通过驱动电压、频率等方式灵活调整外，还具备双向泵送流体的能力。

参 考 文 献

- 1 Shinohara J, Suda M, Furuta K, et al. A high pressure-resistance micropump using active and normally-closed valves[C]// Proceedings IEEE Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2000: 86~91.
- 2 Richter M, Congar Y, Nissen J, et al. A multi-material micro-pump for applications in micro-fluidics[C]// First International Conference on Multi-material Micro Manufacture, 2005: 397~400.
- 3 Yosida K, Watanabe K, Yokota S. Development of a piezoelectric micro-pump using resonantly-driven active check valve[C]// SICE Annual Conference, 2005.
- 4 阚君武, 杨志刚, 华顺明, 等. 有阀压电薄膜泵性能研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 84~87.
Kan Junwu, Yang Zhigang, Hua Shunming, et al. Study on performance of a check-valve piezoelectric pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 84~87. (in Chinese)
- 5 方科, 李欣欣, 杨志刚, 等. 基于压电泵自主流体驱动的新型精密位移机构[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(2): 421~424.
Fang Ke, Li Xinxin, Yang Zhigang, et al. New type of precise motion mechanism driven by piezoelectric hydro-pump[J]. Mechanical Science and Technology, 2007, 26(2): 421~424. (in Chinese)
- 6 彭太江, 阚君武, 杨志刚. 新型压电一流体混合驱动精密位移机构[J]. 农业机械学报, 2005, 36(2): 51~54.
Peng Taijiang, Kan Junwu, Yang Zhigang. New type of accurate-motion mechanism with hydro-piezoelectric drive[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(2): 51~54. (in Chinese)
- 7 李鹏. 主动阀压电泵的理论及实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Li Peng. Theoretical and experimental study on piezoelectric pump with active valve[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- 8 高建民, 任宁, 谌志伟. 无阀微压电泵关键部件工作过程仿真[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 130~133.
Gao Jianmin, Ren Ning, Chen Zhiwei. Simulation study on key part of a novel valveless piezoelectric pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 130~133. (in Chinese)
- 9 吴丽萍, 程光明, 曾平, 等. 单振子双腔体无阀压电泵结构设计与机理分析[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1~2.
Wu L P, Cheng G M, Zeng P, et al. Structural design and mechanism analysis of a valveless piezoelectric pump with single bimorph and double chamber[J]. Opt. Precision Eng., 2007, 15(7): 1~2. (in Chinese)
- 10 何秀华, 张睿, 邓许连, 等. 基于有限元模拟的泵用压电振子正交优化设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 219~222.
He Xiuhua, Zhang Rui, Deng Xulian, et al. Orthogonal optimum design of the actuator for the piezoelectric pump based on finite element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 219~222. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 171 页)

- 9 Narushin V G. AP-animal production technology: shape geometry of the Avian egg[J]. J. Agric. Eng. Res., 2001, 79(4): 441~448.
- 10 Narushin V G. Non-destructive measurements of egg parameters and quality characteristics[J]. World's Poultry Science Journal, 1997, 53(2): 141~153.
- 11 Ayupov F G. On the egg mathematical model[C]// Advanced Scientific-Industrial Experience in Poultry Breeding, Express Information, 1976, 9: 14~16.
- 12 Narushin V G. Egg geometry calculation using the measurements of length and breadth[J]. Poultry Science, 2005, 84(3): 482~484.
- 13 Zhou Ping, Zheng Wengang, Zhao Chunjiang, et al. Egg volume and surface area calculations based on machine vision[C]// Proceedings of the 2nd CCTA, 2008: 1 647~1 653.
- 14 周平, 刘剑英, 文友先. 鸡蛋图像检测方法与质量预测模型[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 80~83.  
Zhou Ping, Liu Jianying, Wen Youxian. Egg image detection method and weight prediction model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 80~83. (in Chinese)