

三腔蠕动式主动阀压电泵设计与实验研究

温建明¹, 曾平^{1,2}, 胡雄海², 阚君武^{1,2}, 程光明¹

(1. 浙江师范大学精密机械研究所, 321004, 浙江金华; 2. 吉林大学机械科学与工程学院, 130025, 长春)

摘要: 针对无阀压电泵截止性能和工作输出压力的不足,设计了一种新型三腔蠕动式主动阀压电泵,分析了蠕动式压电泵的工作原理,对蠕动式压电泵的结构进行了研究,建立了压电泵的核心部件——阀的结构模型.采用 ANSYS 软件对阀的结构参数进行了优化,得到了阀结构优化参数,并制作了压电泵实验样机,对压电泵的流量、背压进行了实验测试.实验结果表明:该主动阀压电泵输出水的最大流量为 220 mL/min,最大正向背压为 15.8 kPa,且泵气能力远大于泵水能力,最大泵气量为 5 142 mL/min.该压电泵在医疗器械、液体冷却、生物工程等领域有广阔的应用前景.

关键词: 压电泵;蠕动式;主动阀;优化

中图分类号: TH38 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)09-0078-04

Design and Experiment of Inchworm Active Valve Piezoelectric Pump with Three Chambers

WEN Jianming¹, ZENG Ping^{1,2}, HU Xionghai², KAN Junwu^{1,2}, CHENG Guangming¹

(1. Institute of Precision Machinery, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China; 2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Due to the shortage of blockage performance and working output pressure of valveless piezoelectric pump, a new type of inchworm active valve piezoelectric pump with three chambers was developed. The structure of the piezoelectric pump was designed, and its working principle was analyzed. The structure model of the valve body was then set up, and the structure parameter was optimized by software ANSYS. The piezoelectric pump was manufactured and experimentally verified. The experimental results show the active valve piezoelectric pump is able to achieve the maximum water flow of 220 mL/min, the maximum backpressure of 15.8 kPa, and the maximum gas flows of 5 142 mL/min.

Keywords: piezoelectric pump; inchworm; active valve; optimization

由于压电泵具有结构紧凑、响应特性好、便于精确控制等特点,因此在微型泵的研究开发中得到重视,并已成为目前国内外的热点研究方向^[1-4].

实验研究发现,有阀压电泵工作时,泵腔的体积变化量大大超过了压电泵的流体输出量,而无阀压电泵虽然可以提高泵的工作频率,但缺点是泵的截止性能和工作输出压力不足^[5-6].因此,需要从压电泵的基本工作原理角度出发,来研究、探讨提高其工作性能的关键技术^[7-8].本文提出了三腔蠕动式主动

阀压电泵的研究方案,设计了主动阀压电泵的结构,建立了主动阀结构模型,对阀体参数进行优化,制作出主动阀压电泵实验样机,并进行了相关的实验测试.

1 主动阀压电泵结构设计

1.1 设计结构

三腔蠕动式主动阀压电泵的设计结构如图 1 所示,它由泵体、阀体、上下盖、密封圈和进出口构成,

采用了2个阀腔,1个泵腔。

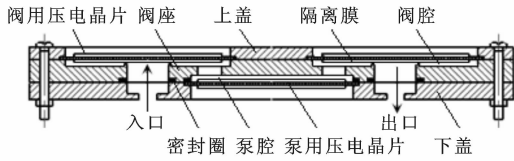


图1 蠕动式主动阀压电泵的结构图

1.2 工作原理

如图2所示,泵的工作过程由压电晶片蠕动式运动来实现,流体定向运动,阀片能同时起到泵送流体和控制流体方向的作用。蠕动式主动阀压电泵的驱动方式为(100)、(110)、(011)、(001),其中1代表压电晶片向外运动,将流体吸入腔内,0代表压电晶片向内运动,将流体从腔体挤压出去。在压电泵工作的1~2阶段,流体被吸入泵中,而在3~4阶段则将流体排出泵体,在这个过程中流体定向运动,回流量很小。

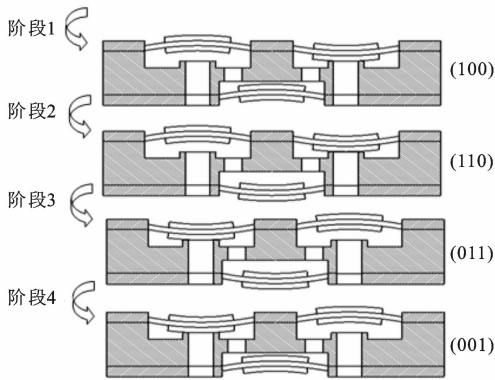


图2 压电泵的工作原理示意图

2 主动阀结构模型

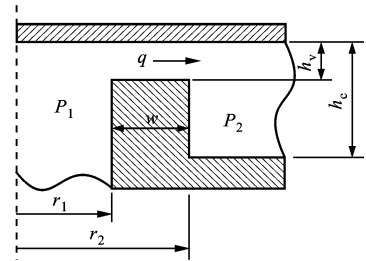
阀作为压电泵的核心部件对泵的性能有很大影响,建立的主动阀结构模型如图3所示。从阀口内中心孔引入压力流体,沿径向向外呈放射状流动,由于间隙非常小,流体流动一般为层流,且在径向上无剪切流动。

在半径 $r(r_1 < r < r_2)$ 处取宽度为 dr 的流体层,则在这薄层中的流动可近似看成平行平板缝隙中的流动^[9]。由边界条件 $y=0, u=0, y=h_v, u=0$ (y 为缝隙纵坐标参数, u 为速度分布函数^[9]), 得到

$$u(y) = \frac{1}{2u} \frac{dp}{dr} y(y - h_v) \quad (1)$$

通过 h_v , 半径为 r 的环带部分的质量流量为

$$q_m = 2\pi\rho \int_0^{h_v} u dy = -\frac{\pi r \rho h_v^3}{6\mu} \frac{dp}{dr}$$



r_1, r_2 : 阀口的内外半径; w : 阀座的宽度; h_v : 阀口的开度; h_c : 压电晶片表面到阀腔底部的距离; q : 体积输出流量;

P_1 : 腔体内压力; P_2 : 泵腔输出压力

图3 主动阀结构模型图

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{6\mu q}{\pi r h_v^3} \quad (2)$$

式中: 负号表示流体沿流动方向的压力是下降的; μ 为缝隙间流体的动力黏度; ρ 为流体的密度; p 为压力分布。

对于流体, 可认为是不可压缩的, 即

$$\begin{aligned} dp &= -\frac{6\mu q}{\pi r h_v^3} dr \\ p &= -\frac{6\mu q}{\pi h_v^3} \ln r + c \end{aligned} \quad (3)$$

当 $r=r_1$ 时, $p=P_1=0$; 当 $r=r_2$ 时, 将 $p=P_2$ 代入式(3)可求出积分常数 c , 并求得

$$q = \frac{\pi h_v^3 \Delta p}{6\mu \ln(r_2/r_1)} = \frac{\pi h_v^3 P_2}{6\mu \ln(r_2/r_1)} \quad (4)$$

由于 $r_2=r_1+w$, 因此

$$q = \frac{\pi h_v^3 P_2}{6\mu \ln(1 + (w/r_1))} \quad (5)$$

3 主动阀结构参数的优化

由式(5)可以看出, 在系统压力源固定的情况下, 阀口处圆环平面缝隙流的过流量主要与 h_v, r_1, w 有关。流体过阀口时的压力损失为

$$\Delta p = \xi_1 \frac{6\mu}{\pi h_v^3} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) q + \xi_2 \frac{1}{4\pi^2 (r_1 + r_2)^2 h_v^2} \rho q^2 \quad (6)$$

式中: ξ_1 为黏性损失系数; ξ_2 为对流损失系数。

运用 ANSYS-Flotran 模块, 分析了压力损失、流量与阀口开度、阀口内半径和阀座宽度的关系。

3.1 阀口开度的选定

由图4可知, 随着 h_v 的减小, 流量增加, 压力损失随之增大。考虑到阀的泄漏, 为了保证阀能封住阀口, 并考虑了压电晶片的性能后, 选择 h_v 为 0.3 mm。

3.2 阀座宽度的选定

流量-阀座宽度的特性曲线如图5所示, 随着 w

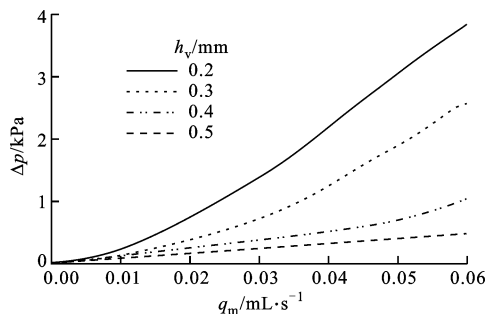


图4 压力损失-质量流量特性曲线

的增加,流量急剧下降,为了获得较大的过流量及较小的压力损失, w 的值应该越小越好.综合考虑阀口刚度、寿命的要求,选定 w 为 0.5 mm.

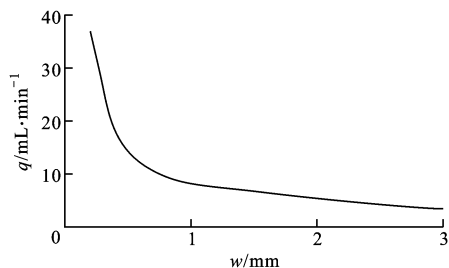


图5 流量-阀座宽度的特性曲线

3.3 阀口内半径的选定

由图6可知,压力损失随着 r_1 的增大而增大.结合获得尽量大的过流量、尽量小的压力损失的原则,选择 r_1 为 7~9 mm 的区间为阀口内半径域,但实际研制时,选择 r_1 为 7.5 mm.

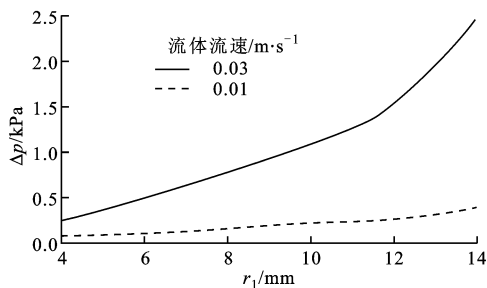


图6 压力损失-阀口内半径的特性曲线

4 实验性能测试

制作了三腔蠕动式主动阀压电泵的实验样机并进行了相关的实验测试.

4.1 流量-频率特性测试

由于压电泵的进口阀与出口阀在非工作条件下是开启状态,因此改变两主动阀的驱动信号就可以实现压电泵双向(即正向和反向)泵送流体.

如图7所示,当频率 $f=60$ Hz 时,正向流量最大为 178 mL/min,随着 f 的继续升高,流量呈下降趋势.在低频(f 小于 40 Hz)和高频(f 大于 100 Hz)时,压电泵失去泵水能力.压电泵流量在正反2个方向上存在差异的主要原因为:①进出口阀及腔体流道加工存在误差,使流体正反向流动时受到的阻力不同;②由图1可知,采用螺钉固定的泵体上下盖及进出口阀,因安装误差会使阀片预紧力不完全对称.

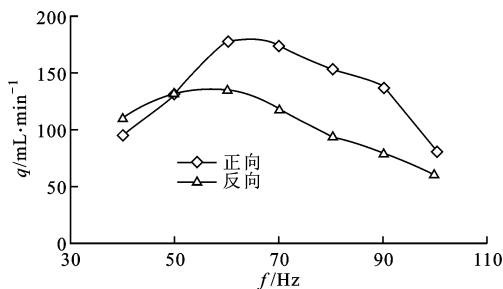


图7 流量-频率特性曲线

4.2 流量-压强特性测试

如图8所示,当 $f=60$ Hz 时,随着背压的增加,流量逐渐减小,正向最大背压为 15.8 kPa,但主动阀压电泵具有较强的承压能力.

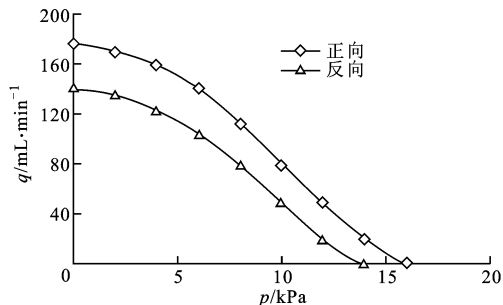


图8 流量-压强特性曲线

4.3 泵气与泵水量比较实验测试

压电泵在同等条件驱动下,水流量、空气流量-频率特性曲线如图9所示.由于泵气能力大于泵水能力,出现了2个协调工作点,因此当 $f=100$ Hz 时,压电泵泵气量为 5 142 mL/min,当 $f=120$ Hz、压电泵泵气量为 3 488 mL/min 时,泵水量最大只有 220 mL/min.

主动阀压电泵的泵气能力远大于泵水能力,主要原因为:①压电晶片在空气中的变形比在水中大,因为空气的密度和黏性比水小,水的表面张力比空气大很多,使得泵气量比泵水量大;②流量与流体的动力黏度成反比,20℃时水的动力黏度为 1.005 mPa·s,而空气的动力黏度为 0.018 3 mPa·s.

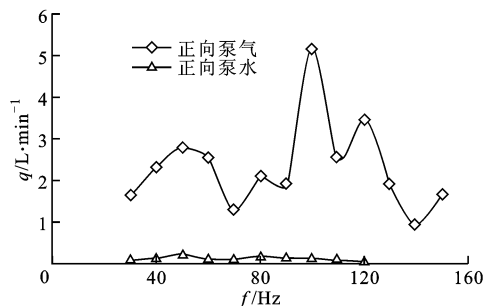


图9 水、空气流量-频率特性的对比曲线

5 结 论

(1)本文对新型三腔蠕动式主动阀压电泵的结构进行了设计,建立了主动阀的结构模型.通过对阀的结构参数进行优化,得到的阀口开度、宽度及内半径分别为0.3 mm、0.5 mm和7.5 mm.

(2)通过有限元仿真得到了主动阀结构的优化参数,实际制作了主动阀压电泵,并进行了流量、背压等实验测试.实验结果表明:本文研制的压电泵具有较好的背压能力,且泵气的能力远大于泵水的能力.

参考文献:

- [1] FARID A, ZHOU Y, TOM J. Current micropump technologies and their biomedical applications[J]. Microsyst Technol, 2009,15(5):647-666.
 - [2] KAN Junwu, TANG Kehong, LIU Guojun, et al. Development of serial-connection piezoelectric pumps [J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2008,144(2):321-327.
 - [3] CHENG Guangming, LI Peng, ZENG Ping, et al. Piezoelectric pump used in bionic underwater propulsion unit [J]. Journal of Bionic Engineering, 2007,4(3): 159-164.
 - [4] 吴丽萍,杨志刚,曾平,等.单振子双腔体压电泵的输出性能实验 [J]. 西安交通大学学报, 2007,41(5): 628-630.
- WU Liping, YANG Zhigang, ZENG Ping, et al. Experimental research on the performance of piezoelectric pump with single bimorph-double chambers[J].

Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007,41(5):628-630.

- [5] VAN THANH D, THIEN X D, TANAKA K, et al. A cross-junction channel valveless-micropump with PZT actuation [J]. Microsyst Technol, 2009,15(7): 1039-1044.
 - [6] MAJID N, LUC M. Numerical analysis of high frequency pulsating flows through a diffuser-nozzle element in valveless acoustic micropumps [J]. Microfluid Nanofluid, 2009,7(5):669-681.
 - [7] 李鹏,程光明,董景石,等.电磁驱动主动阀压电泵的设计及其性能 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2008,38(S0):111-114.
- LI Peng, CHENG Guangming, DONG Jingshi, et al. Piezoelectric pump with active electromagnetic driven valve [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008,38(S0):111-114.
- [8] GEIPEL A, GOLDSCHMIDT D F, DOLL A, et al. An implantable active microport based on a self-priming high-performance two-stage micropump [J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2008,145/146(7/8):414-422.
 - [9] 曾亿山,郭永存.流体力学 [M]. 合肥:合肥工业大学出版社, 2008:149-153.

[本刊相关文献链接]

输送流体双腔并联压电泵性能分析与试验研究. 西安交通大学学报, 2010,44(3):82-85.

压电驱动型胰岛素泵的研究. 西安交通大学学报, 2007,41(5):602-605.

单振子双腔体压电泵的输出性能实验. 西安交通大学学报, 2007,41(5): 628-630.

单振子双腔体压电薄膜泵的研究. 西安交通大学学报, 2007,41(3):380-382.

电致动聚合物驱动的无阀微泵的设计与制作. 西安交通大学学报, 2009,43(7):92-95.

气动阀间歇性排气噪声辐射规律的研究. 西安交通大学学报, 2008,42(9):1091-1095.

(编辑 管咏梅)