

文章编号 1004-924X(2007)02-0219-05

# 双腔串联两阀与三阀压电泵的性能研究

杨志刚<sup>1</sup>, 孙晓锋<sup>1,2</sup>, 张德君<sup>1</sup>, 程光明<sup>1</sup>, 李欣欣<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025 ;

2. 吉林化工学院 机电工程系, 吉林 吉林 132022)

**摘要:**研究了双腔串联两阀压电泵与三阀压电泵的输出性能,分析了这两种泵的结构和工作原理,理论分析得出:三阀泵输出性能优于两阀泵。设计制作了两阀泵与三阀泵实验样机,并通过实验测试证明了理论分析的正确性。分别对两阀泵和三阀泵进口腔和出口腔独立工作时流量输出进行了实验测试,并把进口腔和出口腔独立工作时输出流量相加之和,与两腔一起交叉工作时进行了比较。实验测试表明:两阀泵和三阀泵样机在 200 V 交流驱动电压下,最大输出流量分别为 972 ml/min 和 1 035 ml/min,最大输出压力分别为 28.7 kPa 和 40 kPa,最大自吸高度分别为 0.41 m 和 0.43 m 水柱高。

**关键词:**压电振子;双腔压电泵;阀

**中图分类号:**TH38;TN384 **文献标识码:**A

## Performance research on double-valved and three-valved piezoelectric pumps with double series-wound chambers

YANG Zhi-gang<sup>1</sup>, SUN Xiao-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG De-jun<sup>1</sup>, CHENG Guang-ming<sup>1</sup>, LI Xin-xin<sup>1</sup>

(1. *College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China*; 2. *Department of Mechatronic Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China*)

**Abstract:** By analyzing the working principles and structures of double-valved and three-valved piezoelectric pumps with double series-wound chambers, it was proved that the output ability of three-valved pump is better than that of double-valved pump. To explain the theoretical analysis, the pump samples were designed and manufactured, several experiments had been done when inlet chamber and outlet chamber work respectively, and the sum of flowrates was compared with that produced by their double chambers working together alternately. Experimental results show that double-valved and three-valved piezoelectric pumps' maximal output flowrates are 972 ml/min and 1 035 ml/min, maximal output pressures are 28.7 kPa and 40 kPa, and maximal self-suction heights are 0.41 mH<sub>2</sub>O and 0.43 mH<sub>2</sub>O, respectively when they are powered by AC 200 V, which indicates that the results agree with the theory very well.

**Key words:** PZT actuator; piezoelectric pump with double chambers; valve

收稿日期:2006-09-14;修订日期:2006-12-13.

基金项目:国家 863 计划资助项目(No. 2002AA431250);国家自然科学基金资助项目(No. 50575093)

## 1 引言

近几年关于压电泵研究的文献越来越多,压电泵工作原理及一些性能也逐渐被人们所认知。根据是否带有阀体,压电泵可分为有阀压电泵<sup>[1-8]</sup>和无阀压电泵<sup>[9-12]</sup>两类。在近几年的研究中发现,作为有阀压电泵来说,阀的结构形式和腔体的数量及结构形式对压电泵的输出性能(流量和扬程)均有较大影响。本文通过对两阀与三阀双腔串联压电泵输出性能的研究,得出二者在输出性能方面的差异及它们与单个腔体独立工作时输出性能之间的关系。

## 2 压电振子的工作特性

压电振子作为压电泵的驱动元件,其工作性能直接影响压电泵的工作性能,对于由压电陶瓷-金属复合膜压电振子,可采用其中心点的变形量和压力表征输出能力。当压电泵工作频率远远低于压电振子谐振频率,其压电振子中心变形量可视为常数,当用交流信号激励时,每个交流信号周期压电振子振动引起单个泵腔变形量为<sup>[13]</sup>

$$\Delta V = \frac{3\gamma\pi}{32} d_{31} \frac{d^4}{t^2} U, \quad (1)$$

式中, $\gamma$ 为与压电薄膜和金属薄膜尺寸、性能相关的无量纲系数; $U$ 为工作电压; $d$ 为压电薄膜直径; $d_{31}$ 为压电常数; $t$ 为压电薄膜厚度。

压电泵的输出压力为零时的输出流量可表示为

$$Q(U, f) = \gamma_1 \Delta V f, \quad (2)$$

式中, $\gamma_1$ 为阀的效率系数,取决于阀片的开度、阀与压电振子之间的相位角。

压电振子产生的压力为

$$p(U) = \frac{12\pi Y_{11}^D d_{31}}{4.5\pi Y_{11}^D g_{31} d_{31} + 1d^2} t U, \quad (3)$$

式中: $Y_{11}^D$ 为压电振子的弹性模量; $g_{31}$ 为压电电压常数。

## 3 压电泵的结构设计和工作原理

双腔串联压电泵的工作原理<sup>[14]</sup>是通过两个压电振子的异步工作(工作时振动相位相差 $180^\circ$ ),使输入的流体先后经过进口腔和出口腔,

从而达到输出的目的。本文设计了双腔串联两阀泵与三阀泵,三阀泵结构如图 1 所示。两阀泵与三阀泵比较,只是将出口阀去掉。本文通过分析两阀泵与三阀泵的一个周期的工作过程在理论上找出二者工作性能的差异。

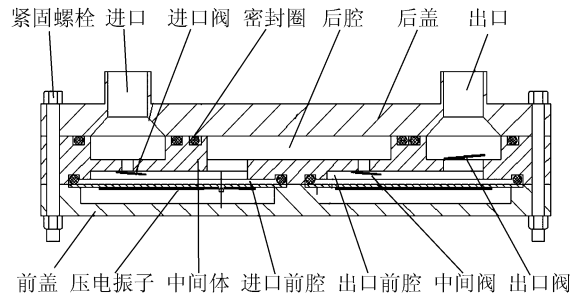


图 1 双腔串联三阀压电泵结构示意图

Fig. 1 Structural schematics of three-valved piezoelectric pump with double series-wound chambers

双腔串联两阀压电泵一个周期的工作过程如图 2 所示。假设在初始时刻,压电振子处于平衡位置,这时进口阀和中间阀都关闭。在  $1/4$  周期过程中,进口腔的压电振子向下振动,出口腔的压电振子向上振动,这时进口阀打开,在进口流体被吸入,出口处流体流出。在  $1/2$  周期过程,两个压电振子又回到平衡位置,在此过程中,进口阀逐渐关闭,在进口阀关闭过程中,进口处会有少量流体回流腔内;中间阀逐渐打开,流体由入口前腔进入到出口前腔,这个过程也叫蓄水过程;由于在出口处没有阀,这时会导致出口处液体回流,但由于蓄水过程的存在,回流的流体远远少于吐出的流体。在  $3/4$  周期过程,进口腔压电振子向上振动,出口腔压电振子向下振动,进口阀已完全关闭,中间阀已完全打开,蓄水与回流仍在继续。一周期的过程中,两压电振子又回到平衡位置,这时进口阀又逐渐打开,中间阀逐渐关闭,流体又由进口处流入,出口处流出。

双腔串联三阀压电泵的一个周期的工作过程如图 3 所示。设在初始时刻,压电振子处于平衡位置,这时三个阀都处于关闭状态。在  $1/4$  周期过程中,进口腔的压电振子向下振动,出口腔的压电振子向上振动,这时进口阀逐渐打开,在进口流体被吸入,出口阀也逐渐打开,在出口处有流体流出。在  $1/2$  周期过程,两个压电振子又回到平衡

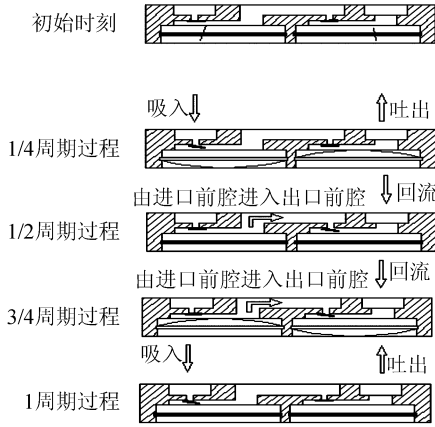


图 2 双腔串联两阀泵工作原理

Fig. 2 Function schematics of double-valved piezoelectric pump with double series-wound chambers

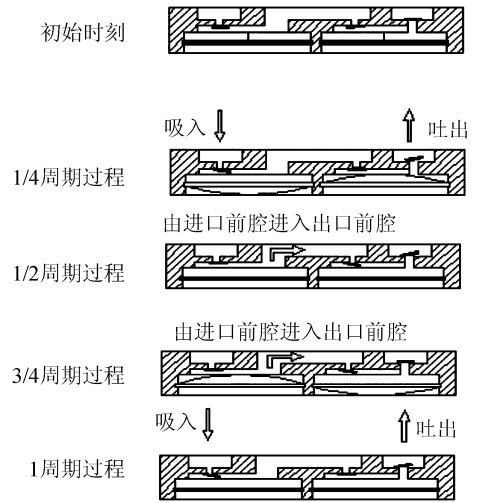


图 3 双腔串联三阀泵工作原理

Fig. 3 Function schematics of three-valved piezoelectric pump with double series-wound chambers

位置,在此过程中,进口阀逐渐关闭,在进口阀关闭过程中,进口处会有少量流体回流腔内;中间阀已逐渐打开,流体由入口前腔进入到出口前腔;出口阀逐渐关闭,这时在出口处也会有少量液体回流,但由于出口阀的存在,回流的流体会少于无阀时状况。在 3/4 周期过程,进口腔压电振子向上振动,出口腔压电振子向下振动,这时进口阀已完全关闭,中间阀已打开,出口阀也已完全关闭,出口处不再有流体回流,蓄水过程仍在继续。一周期的过程中,两压电振子又回到平衡位置,这时进口阀又逐渐打开,中间阀逐渐关闭,出口阀逐渐打开,流体又由进口处流入,出口处流出。

通过对两阀泵与三阀泵一个周期工作过程的理论分析,可以了解到在 1/2 周期与 3/4 周期工作过程中,三阀泵的回流液体要少于两阀泵,因此三阀泵的整体输出性能理论上应好于两阀泵。

### 4 实验测试与分析

图 1 所示的样机由有机玻璃通过精雕机加工而成,利用 XD7 低频信号发生器提供激励信号,以水为介质,对两腔体两阀泵、三阀泵的输出流量、压力及自吸性进行了实验测试与比较,同时对串联泵当一个腔体工作时的流量也进行了测试,实验如图 4~8 所示。

图 4、5 是双腔串联两阀泵与三阀泵电源信号频率与泵输出流量和输出压力的关系曲线。通过试验曲线可以发现,在有效工作频率段内,三阀泵

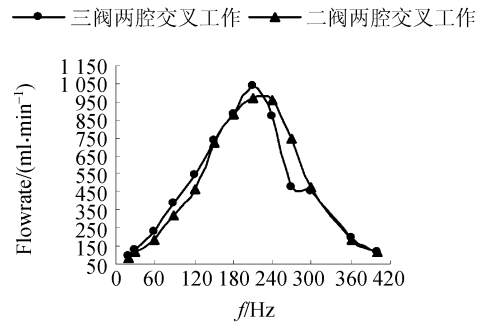


图 4 交叉工作时流量与频率的关系

Fig. 4 Relation between flowrate and frequency while two chambers alternately working

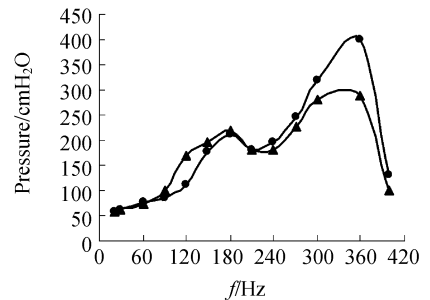


图 5 交叉工作时压力与频率的关系

Fig. 5 Relation between pressure and frequency while two chamber working alternately

整体的输出效果要好于两阀泵,输出流量和输出压力均随着电源信号的频率变化而变化,在频率

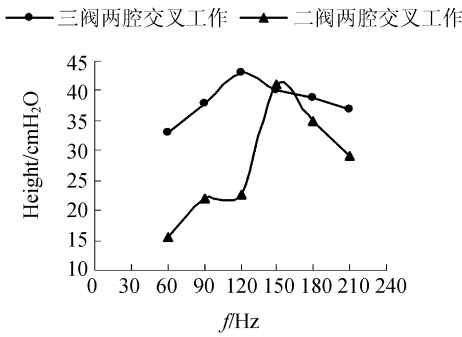


图 6 交叉工作时自吸高度与频率的关系

Fig. 6 Relation between self-suction height and frequency while two chambers alternately working

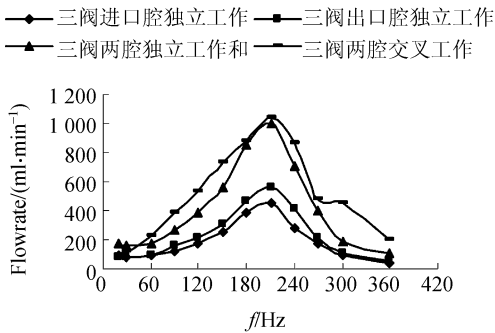


图 7 三阀泵单个腔体独立工作时流量与频率关系

Fig. 7 Relation between flowrate and frequency while single chamber of three-valved piezoelectric pump working

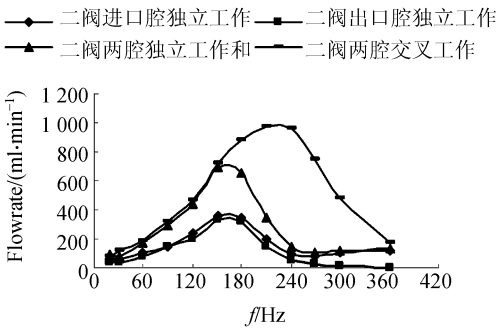


图 8 两阀泵单个腔体独立工作时流量与频率关系

Fig. 8 Relation between flowrate and frequency while single chamber of two-valved piezoelectric pump working

时,零流量下输出压力达到最大值,分别为 40 kPa 和 28.7 kPa。由此可以看出,最佳输出流量和最佳输出压力并不在同一频率,后者均要高于前者。

图 6 为两阀泵与三阀泵自吸性能的试验曲线。对压电泵而言,泵的自吸性是指在泵腔干燥(仅有空气存在)情况下自我灌泵的性能。它是由于压电振子往复振动,使泵腔体内的空气不断被排出并产生内外压差,使液体进入腔内。自吸能力的好坏常用泵自吸液体的高度多少来衡量,它是衡量泵性能的一项重要指标。一般说来,泵的自吸性能主要受泵腔内外压差的影响,内外压差越大,自吸液体高度越高。通过试验测试发现三阀泵的自吸性能也整体上好于两阀泵,自吸高度最高时的最佳频率分别为 120 Hz 和 150 Hz,自吸高度为 0.43 m 和 0.41 m 水柱高。

图 4、5、6 实验曲线有力地说明关于双腔体两阀泵与三阀泵理论分析与实验的结果是一致的。

图 7、8 为两阀泵与三阀泵一个腔单独工作时流量和频率的关系曲线。实验发现,三阀泵的出口腔单独工作时的出流效果要好于进口腔,而且两腔单独工作时的出流量之和与两腔交叉工作时的出流量很接近。而两阀泵恰恰相反,进口腔单独工作时的出流效果要好于出口腔,并且两腔单独工作时的出流量之和与两腔交叉工作时的出流量相差较大,其最佳工作频率也有较大差异。

## 4 结 论

(1) 双腔串联三阀泵和两阀泵,在工作频率范围内均存在最佳工作频率。在频率 210 Hz 时,零压力下输出流量达到最佳值,分别为 1 035 ml/min 和 972 ml/min;在频率 360 Hz 时,零流量下输出压力达到最大值,分别为 40 kPa 和 28.7 kPa。从实验数据看出前者的整体工作性能要好于后者。

(2) 双腔串联三阀泵与两阀泵,均属于大流量、高压微小型泵,且具有良好的自吸能力。自吸高度最高时的最佳频率分别为 120 Hz 和 150 Hz,自吸高度为 0.43 m 和 0.41 m 水柱高。

(3) 实验所得结果对压电泵的优化设计具有指导意义,为压电泵在实践中的应用打下了良好的基础。

210 Hz 时,零压力下输出流量达到最佳值,分别为 1 035 ml/min 和 972 ml/min;在频率 360 Hz

## 参考文献:

- [1] LINNEMANN R, WOIAS P, SENFFT C D, *et al.*. A self-priming and bubble-tolerant piezoelectric silicon micropump for liquid and gases [C]. *Proc. of the 11<sup>th</sup> IEEE MEMS 1998 Technical Digest*, Heidelberg, 1998; 532-537.
- [2] RICHTER M, LINNEMANN R, WOIAS P. Robust design of gas and liquid micropumps [J]. *Sensors and Actuator A*, 1998, 68: 480-486.
- [3] CUNNEEN J, LIN Y CH, CARAFFIN S, *et al.*. A positive displacement micropump for micro-dialysis [J]. *Mechanics*, 1998, 8: 561-583.
- [4] KOCH M, HARRIS N, EVANS A G R, *et al.*. A novel micromachined pump based on thick-film piezoelectric actuation [J]. *Sensor Actuator A*, 1998, 70: 98-103.
- [5] B H M S, OLTHUIS W, BERGVELD P. A plastic micro-pump constructed with conventional techniques and materials [J]. *Sensor Actuator* 77, 1999, 223-228.
- [6] 杨树臣, 程光明, 刘国君, 等. 微型压电泵系统的设计研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 318-323.  
YANG SH CH, CHENG G M, LIU G J, *et al.*. Design of piezoelectric micro-pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 318-323. (in Chinese)
- [7] 赵明丽, 黄琴, 张玮, 等. 悬臂梁阀单腔压电泵设计方法研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 607-611.  
ZHAO M L, HUANG Q, ZHANG W, *et al.*. Investigation on design method of single chamber piezoelectric pump with cantilever valve [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 607-611. (in Chinese)
- [8] 孙晓锋, 杨志强, 刘晓论, 等. 整体开启阀与悬臂梁阀压电泵性能研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 648-651.  
SUN X F, YANG ZH Q, LIU X L, *et al.*. Performance research on piezoelectric pumps based on holistic opening valve and cantilever valve [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 648-651. (in Chinese)
- [9] 程光明, 杨志刚, 曾平. 压电泵腔体体积变化量研究[J]. 压电与声光, 1998, 20(6): 389-392.  
CHENG G M, YANG ZH G, ZENG P. Research on the cavity volume fluctuations of piezoelectric pump [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 1998, 20(6): 389-392. (in Chinese)
- [10] 李军, 程光明, 杨志刚, 等. 一种改进的平板式无阀压电流体泵[J]. 压电与声光, 2001, 23(5): 351-353.  
LI J, CHENG G M, YANG ZH G, *et al.*. A plate valveless piezoelectric pump with improved structure [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2001, 23(5): 351-353. (in Chinese)
- [11] SCHABMUELLER C G J, KOCH M, MOKHTARI M, *et al.*. Self-aligning gas/liquid micropump [J]. *J. Micro-mech Microeng*, 2002, 12: 420-424.
- [12] 夏齐霄, 张建辉, 李洪. 非对称坡面腔底无阀压电泵[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 641-647.  
XIA Q X, ZHANG J H, LI H. Valveless piezoelectric pump with unsymmetrical slope chamber bottom [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 641-647. (in Chinese)
- [13] 阚君武, 杨志刚, 刘品宽, 等. 两腔体串联压电驱动微型泵的输出特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(10): 1347-1350.  
KAN J W, YANG ZH G, LIU P K, *et al.*. Output characters of piezoelectric micropumps with double series-wound chambers [J]. *J. Harbin Ins. Technol.*, 2004, 36(10): 1347-1350. (in Chinese)
- [14] 曾平, 程光明, 刘九龙, 等. 双腔薄膜阀压电泵的试验研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 311-316.  
ZENG P, CHENG G M, LIU J L, *et al.*. Experimental research on double-chambered piezoelectric pump with membrane valves [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 311-316. (in Chinese)

作者简介: 杨志刚(1956—), 男, 吉林长春市人, 吉林大学机械学院博士生导师, 主要从事压电驱动与控制技术方向的研究。E-mail: yzg@jlu.edu.cn