

文章编号 1004-924X(2005)03-0311-07

双腔薄膜阀压电泵的实验研究

曾平¹,程光明¹,刘九龙¹,孙晓锋^{1,2},赵艳龙¹

(1. 吉林大学机械科学与工程学院,吉林 长春 130022;

2. 吉林化工学院机电系,吉林 吉林 132022)

摘要:实验研究了理论所不能解释的多种因素对双腔压电泵输出流量的影响规律。选取了一种高效的橡胶薄膜阀片,设计并制作了具有较高输出能力的双腔泵样机。120 V 交流信号下,双腔串联压电泵最佳工作频率为 180 Hz,输出参数为 520 ml/min、22 kPa;双腔并联压电泵最佳工作频率为 420 Hz,输出参数为 980 ml/min、28 kPa。通过实验确定了双腔压电泵的最佳腔体高度及双腔串联、并联压电泵压电片的最佳驱动方式。

关键词:双腔;薄膜阀;压电泵;实验测试

中图分类号:TH38;TN384 **文献标识码:**A

Experimental research on double-chambered piezoelectric pump with membrane valves

ZENG Ping¹, CHENG Guang-ming¹, LIU Jiu-long¹, SUN Xiao-feng^{1,2}, ZHAO Yan-long¹

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

Abstract: By experiment, many factors affecting the output ability of piezoelectric (PZT) pumps with double chambers are studied, which can't be explained with theories. A high efficient rubber membrane valve was made, and double-chambered PZT pump with high output capability was designed and fabricated. When powered by AC 120 V, series-wound PZT pump has a output of 520 ml/min, 22 kPa, and parallel-connected PZT pump has a output of 980 ml/min, 28 kPa. The optimal chamber height is found, and PZT diaphragm actuating ways in series-wound and parallel-connected pumps are proved.

Key words: double chamber; membrane valve; piezoelectric pump; experimental test

1 引言

压电泵是利用压电片作为换能器的流体传输装置。根据压电片能量转化方式,压电泵分为压电薄膜泵^[1-8]和压电超声泵^[9-12]2 大类。根据阀的结构特点,压电薄膜泵又分为有阀压电薄膜泵(悬臂梁、浮动球阀或锥型阀等)^[1-5,7,8,13]和无阀压电薄膜泵(如锥型管泵^[14]等),每种压电薄膜泵又包括压电片驱动^[1-4]和压电叠堆驱动^[5,7]、单腔体和双腔无阀压电薄膜泵^[13,15-19],温控制动阀压电薄膜泵^[13,15,20,21]等多种结构。同传统泵相比,压电泵结构简单、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^[2,4]、化学分析^[5,22]以及汽车发动机燃料供给^[6]等领域得以应用^[23]。

双腔压电泵较单腔体压电泵具有明显的优势,输出压力和流量都比单腔泵大大增强。本文试制的具有相同结构参数、相同阀片的单腔压电泵样机在 120 V 电压下,最佳流量为 120 ml/min,输出压力为 12 kPa;而双腔泵样机在 120 V 电压下的输出流量均超过 500 ml/min,输出压力均超过 22 kPa。

2 实验研究的必要性

当压电泵工作频率远远低于压电片谐振频率,其压电片中心变形量可视为常数,当用交流信号激励时,每个交流信号周期的单个泵腔变形量为^[17]

$$\Delta V = \frac{3\pi d_{31} U d^4}{32t^2} = A_a \frac{\pi \times d^2}{8}, \quad (1)$$

式中, $A_a = \frac{3d_{31}U}{4t^2}d^2$ 为压电片的中心变形量, d 和 t 分别为压电片的直径和厚度, d_{31} 是压电常数, U 为压电片驱动电压。则压

电泵的流量为

$$Q(U, f) = 2\eta\Delta Vf = \frac{\eta f \pi A_a d^2}{4}, \quad (2)$$

式中, η 为压电泵效率,该参数的关键影响因素是薄膜阀片的截止性能, f 为压电泵的驱动电信号的频率。

从式(2)可知压电泵的输出流量不仅与压电片的本身特性有关,还与驱动电压、驱动信号频率及薄膜阀的截止性能有关。但是在实验测试中,作者发现双腔压电泵的输出流量并非单腔体压电泵的简单叠加,其输出流量还与单个工作腔体积、薄膜阀片的具体形式、压电片激励方式等因素有关。因为双腔压电泵的各工作腔相互影响,薄膜阀片都是被动阀片,其动作无法控制和测量,被驱动流体(通常为水)的气化,以及压电片振动、压电片激励造成流体的紊流和阀片受激励后的响应三者间的关系很难用理论模型来预测和解释,所以双腔压电泵的实验研究具有重要的意义。

测量双腔压电泵输出压力时泵要在零流量下工作,这样对压电泵输出性能影响极大,输出流量骤降。这是因为零流量下压电片负载过大导致破裂;工作腔内流体不流动,导致腔内流体温度过高,压电片迅速老化。本文没有得出双腔压电泵输出压力受各因素的影响规律,只给出了关键点处的压力值。

3 双腔压电泵的实验测试

3.1 双腔压电泵的分类及工作原理

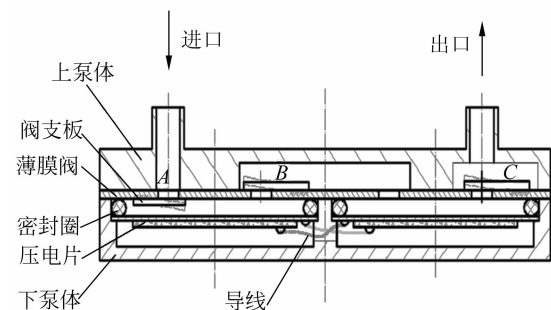
据工作腔之间的关系,双腔压电泵可分为串联泵和并联泵,每种泵又可根据压电片的激励方式分为电信号同步和异步激励。压电片异步激励的双腔并联和双腔串联压电泵的工作原理图见图 1。

双腔串联压电泵如图 1(a)所示,在双腔串联泵中,并联连接两压电片,且使两压

电片的电极所加电信号相反,以使压电片异步振动。将左腔压电片向上弯曲、右腔压电片向下弯曲时设为分析的起始时刻,若不考虑单向截止阀片的滞后致使流量损失阶段,双腔串联压电泵的一个工作周期可分为两个阶段:(1)左腔压电片向上弯曲,右腔压电片向下弯曲,进口阀 A 关闭,左腔出口阀 B 打开,右腔出口阀 C 关闭,左腔将流体通过两腔连接管路排入右腔,右腔将流体从左腔吸至该腔,左右腔的共同作用,增强了流体的单向流动;(2)当交流电激励信号换向时,左腔压电片向下弯曲,右腔压电片向上弯曲,左腔进口阀 A 开启,出口阀 B 关闭,左腔从外界吸入流体,右腔

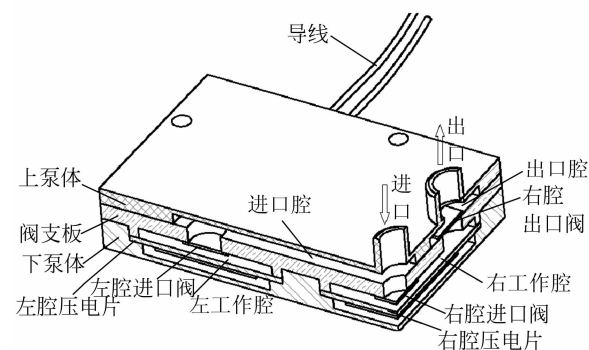
进口阀 B(与左腔共用)关闭,出口阀 C 开启,流体由右腔排出,这样就完成了双腔串联压电泵的一个工作周期。第 1 阶段实现流体从左腔到右腔的输送,第 2 阶段实现流体在外界与泵之间的输入输出。

双腔并联压电泵如图 1(b)(3/4 部分剖切视图)所示,若忽略单向截止阀片的开启/关闭滞后延迟导致的流量损失阶段,双腔压电泵的一个工作周期可分为 2 个阶段。(1)设分析的起始时刻左腔压电片向上、右腔压电片向下振动,左腔进口阀关闭,出口阀开启,水由左腔压入出口腔,右腔进口阀开启,出口阀关闭,水由进水腔进入右腔,在出口腔中,右腔的出口阀关闭,左腔压入水,水从出口排出;(2)第 2 阶段,左腔压电片向下振动,右腔压电片向上振动,左腔进口阀开启,出口阀关闭,左腔中流体由进口腔进入,右腔进口阀关闭,出口阀开启,流体由右腔经出口腔排出。可见,不同阶段,两腔交叉输出流体。这样,减小了流量的脉动性。



(a) 双腔串联压电泵

(a) PZT pump with double series-wound chambers



(b) 双腔并联压电泵

(b) PZT pump with double parallel-connection chambers

图 1 双腔压电泵工作原理图

Fig. 1 Function schematic of double-chambered PZT pump

3.2 实验仪器

本文采用 XD-7 低频信号发生器作为压电泵的激励信号源,该信号发生器具有输出功率大,频率、电压可调范围宽($f: 10 \sim 200 \text{ kHz}; U: 0 \sim 250 \text{ V}$)的优点。为了测试压电泵的输出流量,使用了 LZB-10 玻璃转子流量计,其测量范围为 $10 \sim 100 \text{ L/H}$ ($167 \sim 1\,667 \text{ ml/min}$),为了测量 200 ml/min 以下的流量,还使用了烧杯、量筒和秒表。

3.3 实验测得各因素对压电泵输出流量的影响

3.3.1 压电片激励频率/电压对压电泵输出性能的影响

分别使用电压为 120 V 和 140 V 的交流信号激励装有伞形橡胶阀的同一双腔并联泵的压电片,测得流量见图 2。由图可见,当使用 120 V 交流电信号激励压电片

时,不同频率下压电泵的输出流量不同,通常压电泵输出流量只有一个极大值,对应一个固定频率,不因施加电压方向(电压由小变大或是由大变小)而改变。若泵体选定,装有不同阀片的压电泵最佳流量对应的频率也不同,该频率由阀的刚性及固有频率决定。压电泵输出流量受激励电压影响最大,激励电压越大,压电泵的流量越大。这是因为相同频率的交流电信号激励时,电压越大,压电片的变形越大,泵腔体积变化量越大,压电泵的输出流量也就越大。

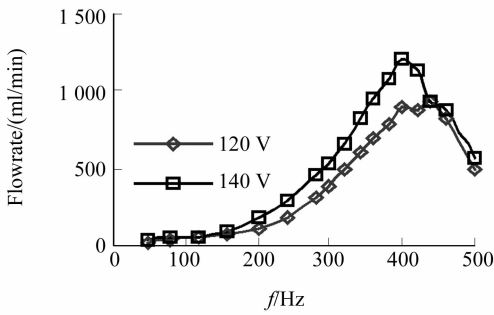


图 2 双腔并联压电泵输出流量

Fig. 2 Output flowrate of PZT pump with double parallel-connected chambers

3.3.2 泵腔高度对输出流量的影响

在双腔压电泵中,工作腔高度(或腔体容积)对压电泵的输出性能有很大的影响。本文以双腔串联压电泵为例,在交流电压 120 V 下测得的压电泵输出流量见图 3。由图中曲线可见,当泵工作腔高度由 0.05 mm 增大时,输出流量也在增加,增至 0.8 mm 时,泵输出流量达到最大值,随泵腔高度的继续增加,输出流量减小。据该实验,本文设计的双腔并联和双腔串联压电泵的工作腔体高度均为 0.8 mm。

3.3.3 压电片激励方式对压电泵输出流量的影响

压电片与激励电信号连接的方式可分为串联和并联,在每种连接方式中,又分为

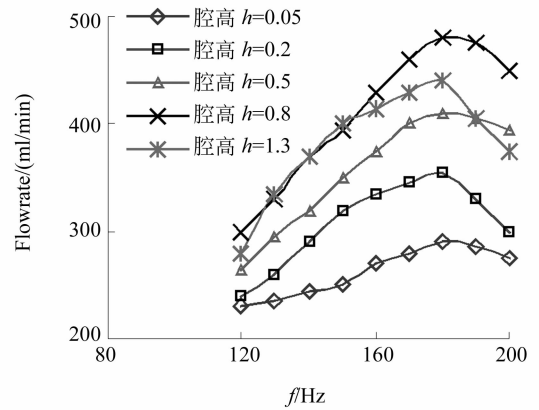
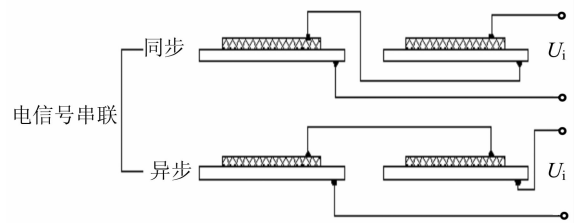


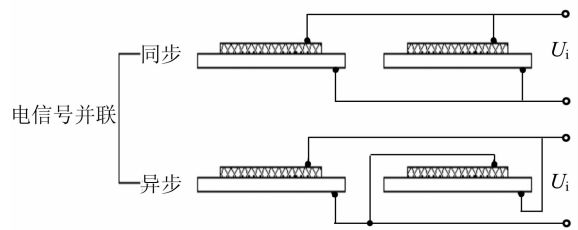
图 3 不同泵腔高度时双腔串联压电泵的输出流量

Fig. 3 Output flowrate of PZT pump with double series-wound chambers of different heights



(a) 电信号串联

(a) Series-wound connection of actuating signal



(b) 电信号并联

(b) Parallel connection of actuating signal

图 4 压电片的激励方式

Fig. 4 Actuated way of piezoelectric diaphragm

同步激励和异步激励。如图 4 所示,压电片的图示安放方向与实际应用时一致,这样,由于电信号接法的不同,会导致振动方向相同或相异。“同步”是指压电片在同一时刻向相同方向振动,只需压电片连接信

号源时极性相同;“异步”是指压电片在同一时刻振动方向相反,须使压电片上施加的信号源极性相反。

本实验中使用装有4个伞形橡胶阀的双腔并联压电泵,分别用激励信号并联/串联的同步/异步接法驱动压电片。并联接法时信号发生器输出电压为120 V,串联接法时信号发生器输出电压为240 V,以保证加到每个压电片上的电压为120 V。测得压电泵的输出流量见图5。

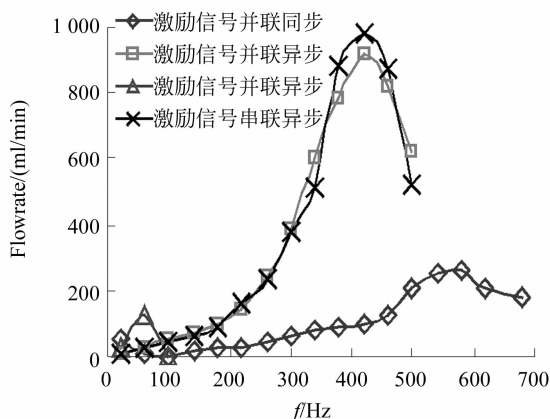


图5 不同激励方式下压电泵输出流量

Fig. 5 Output flowrate of PZT pump under different actuating ways

由图可见,压电片在交流信号激励下,异步方式的流量比同步方式时的流量显著提高。这是由于两腔并联压电泵两工作腔的进口、出口同腔,异步方式激励时,当一工作腔腔体容积变大时,另一腔体容积变小,同一进/出口腔的2个阀片动作正好相反,排水腔产生的压力差促进了吸水腔出口阀的关闭,吸水腔产生的压力差促进了排水腔进口阀的关闭,从而减小单向阀的反向泄漏损失,提高了阀片的单向截至效率,进而提高了压电泵的输出流量。

3.3.4 阀片数量对压电泵输出性能的影响

分别制作了具有2个和4个伞形橡胶阀的双腔并联压电泵样机,4阀双腔并联压电泵的结构简图见图1。2阀双腔并联压电泵与之区别是泵的两个工作腔共用2个

伞形橡胶阀作为工作腔的进口阀和出口阀,分别位于进口腔和出口腔的端口处。

实验中,压电泵两腔的压电片都是用120 V的交流电信号并联激励,测试结果如图6所示。

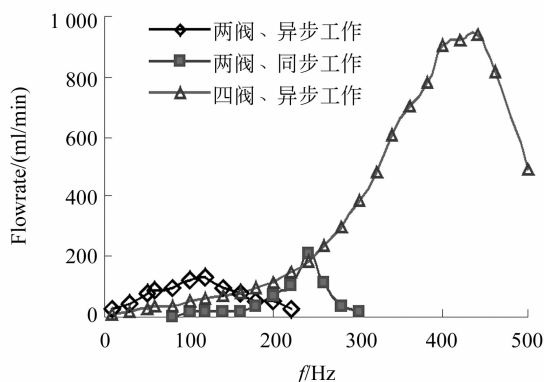


图6 2阀与4阀双腔并联压电泵输出流量
Fig. 6 Output flowrate of double-chambered parallel-connected pump with two and four valves

两阀双腔并联压电泵工作时,由于2个工作腔共用进/出口阀片,异步工作状态下,两工作腔吸/排水动作恰好相反,这样一工作腔排出的水一部分会被吸入另一工作腔,致使压电泵输出的流量并非是排水腔的体积变化量;同步工作状态下,由于2个压电片并非完全相同,所以步调并非完全一致,加上进出口处单向阀泄漏较大,所以压电片并联同步工作时的流量比4阀异步工作时的也要小。由图中可见,4阀压电泵的输出流量明显优于2阀压电泵的输出流量。

3.3.5 工作腔数目对压电泵输出性能的影响

令双腔并联压电泵的2个压电片其中的一个工作,激励信号均为120 V时,测试单腔工作和双腔工作的差别,实验数据如图7所示。由图中可见,单腔工作与双腔工作时流量的差别并非是2倍的关系。这是因为当双腔一起工作时,两腔吸水/排水的动作正好相反,这样对同一进口/出口

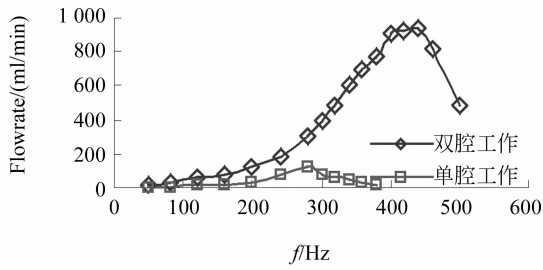


图 7 工作腔数目对双腔并联压电泵输出流量的影响

Fig. 7 Influence of number of working chamber on PZT pump output flowrate

腔内的 2 阀片的动作起到了相互促进作用, 有利于阀片的开启和关闭, 减小了单向截

止阀的流量损失, 显著提高了泵的输出流量。

4 结 论

压电泵的输出流量与电压成正比, 最佳输出流量对应的频率不受电压影响。双腔泵的关键结构参数-泵腔高度最佳为 0.8 mm, 串联泵应采用并联异步交流信号激励, 并联泵应采用串联异步交流信号激励。对于双腔并联压电泵, 应采用 4 个橡胶薄膜阀片。双腔串联压电泵输出流量、压力较双腔并联压电泵小, 最佳流量时的工作频率较双腔并联压电泵也要低。

参考文献:

- [1] SPENCER W J, CORBETT W T, DOMINGUEZ L R, *et al.* An electronically controlled piezoelectric insulin pump and valves[J]. *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics*, 1978, SU-25(3):153-156.
- [2] van LINTEL H T G, VAN DE POL F C M, BOUWSTRA S. A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon [J]. *Sensors and Actuators*, 1988, 15:153-167.
- [3] LINNEMANN R, WOIAS P, SENFF C D, *et al.* A self-priming and bubble-tolerant piezoelectric silicon micropump for liquids and gases [C]. *Proc. 12th IEEE MEMS 1998 Technical Digest, Heidelberg, Germany*, 1998:532-537.
- [4] MAILEFER D, van LINTEL H, MERMET G R, *et al.* A high-performance silicon micropump for an implantable drug delivery system [C]. *Proc. of the 12th IEEE MEMS 1998 Technical Digest, Orlando, Florida, USA*, 1/17-21/1999:541-546.
- [5] SHOJI S, NAKAGAWA S, ESASHI N. Micropump and sample-injector for integrated chemical analysis system [J]. *Sensors and Actuators A*, 1990, 21-23:189-19.
- [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] LI H Q, RIBERTS D C, STEYN J L, *et al.* A high frequency high flow rate piezoelectrically driven MEMS micropump [C]. *Proceeding IEEE Solid State Sensors and Actuators Workshop Hilton Head*, 2000.
- [8] MICHAEL K, NICK H, EVANS AL G R. A novel micromachined pump based on thick-film piezoelectric actuation [J]. *Sensors and Actuators A*, 1998, 70: 98-103
- [9] NGUYEN N T, WHITE R M. Design and optimization of an ultrasonic flexural plate wave micropump using simulation [J]. *Sensors and Actuators*, 1999, 77:229-236.
- [10] COHEN Y B, CHANG Z. Piezoelectrically actuated miniature peristaltic pump [J]. *SPIE*, 2002, 3992:669-676.
- [11] MENG A H, NGUYEN N T, WHITE R M. Focused flow micropump using ultrasonic flexur-

- al plate waves [J]. *Biomedical Microdevices*, 2000,2(3): 169-174.
- [12] COHEN Y B, CHANG Z. Piezoelectrically actuated miniature peristaltic pump [J]. *SPIE*, 2001,4327:425-432.
- [13] KOJIMA Y, OKUSAWA T, TSUBOUCHI K, *et al.* Fundamental investigation of a piezoelectric pump for a trace liquid feed [J]. *JMSE International Journal, Series C*, 1995, 38(3): 531-537.
- [14] STEMME E, STEMME G. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump [J]. *Sensors and Actuators A*, 1993,39:159-167.
- [15] ULMANN A. The piezoelectric valveless pump-performance enhancement analysis [J]. *Sensors and Actuators A*, 1998,69:97-105.
- [16] GERLACH T, SCHUENEMANN M, WURMUS H. A new micropump principle of the reciprocating type using pyramidic micro flowchannels as passive valves [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 1995,5:199-201.
- [17] GERLACH T, WURMUS H. Working principle and performance of the dynamic micropump [J]. *Sensors and Actuators A*, 1995,50:135-140.
- [18] 程光明,杨志刚,曾平,等. 压电薄膜流体泵的初步研究[J]. *压电与声光*. 1998,20(4):233-236.
CHENG G M, YANG ZH G, ZENG P, *et al.* Primary research on piezoelectric membrane fluid pump [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 1998,20(4):233-236. (in Chinese)
- [19] MATSUMOTO S, KLEIN A, MAEDA R. Development of bi-directional valve-less micropump for liquid [C]. *Proc. IEEE MEMS*, 1999:141-146.
- [20] OLSON A, STEMME G, STEMME E. A valveless planar fluid pump with two pumps chambers [J]. *Sensors and Actuators A*, 1995,46-47:549-556.
- [21] OLSON A, STEMME G, STEMME E. A numerical design study of the valveless diffuser pump using a lumped-mass model [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 1999,9:34-44.
- [22] 张建辉,夏齐霄,王大康等. 抽样定理在周期性非连续信号的压电泵气穴现象中的应用方法[J]. *光学精密工程*, 2002,10(5):476-482.
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. (in Chinese)
- [23] 阚君武,杨志刚,程光明. 压电泵的现状与发展[J]. *光学精密工程*. 2002,10(6):619-625.
KAN J W, YANG ZH G, CHENG G M. Actuality and development of piezoelectric pump [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(6): 619-625. (in Chinese)

作者简介:曾平(1957—),女,吉林长春人,吉林大学机械科学与工程学院,教授在读博士,现主要从事机械设计、压电驱动与控制技术的教学及科研工作。