

# 电磁驱动主动阀压电泵的设计及其性能

李 鹏, 程光明, 董景石, 杨志刚, 曾 平

(吉林大学 机械科学与工程学院,长春 130022)

**摘要:**提出并设计了一种新型的主动阀压电泵。与被动阀压电泵通过流体流动开启阀片方式不同,该泵通过电磁驱动方式控制压电泵的进出口阀的开启、关闭,从而降低了阀在开启、关闭时压电泵腔内流体的能量损失。同时可以根据压电泵工作性能的需要,通过调整控制信号的占空比和相位控制阀的开启、关闭时间,这不仅可实现单一机械结构下对液体泵送方向的主动控制,而且对于流体的流量也可进行控制,为提高压电泵的性能提供了一种新的手段。试验表明:该泵在 30 Hz 的条件下工作时,最大输出流量为 160 mL/min。

**关键词:**仪器仪表技术;压电泵;主动控制;阀;电磁线圈

**中图分类号:**TH38    **文献标识码:**A    **文章编号:**1671-5497(2008)Sup.-0111-04

## Piezoelectric pump with active electromagnetic driven valve

Li Peng, Cheng Guang-ming, Dong Jing-shi, Yang Zhi-gang, Zeng Ping

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A new type of piezoelectric pump with active electromagnetic driven valve was developed. Compared with the piezoelectric pump with the passive valve which is opened by the flowing fluid, the valve of this pump is opened by the electromagnetic force, so can save the energy consumption of fluid inside the piezoelectric pump chamber when the valve works. Moreover, according to the requirements of working condition, the value timing can be controlled by adjusting the duty cycle and phase of the control signal of the valve. This makes the pump not only be able to pump the liquid forward and backward actively, but also to control the flow rate accurately, which provides a new approach of improvement of the piezoelectric pump performance. The experimental results show that the maximum flow rate of the pump was 160 mL/min at frequency 30 Hz.

**Key words:** technology of instrument and meter; piezoelectric pump; active control; valve; electromagnetic coil

压电泵是微流体机械系统的重要部件,它具有体积小,重量轻,结构简单,成本低廉,电源驱动简单,无电磁干扰等优点,现已广泛应用于医药、机械、化工等领域<sup>[1-3]</sup>。目前压电泵按其阀的类型

可分为无阀和有阀压电泵,有阀压电泵又分为被动阀压电泵和主动阀压电泵。被动阀压电泵多以金属或橡(硅)胶作为阀片的材料,被动阀一般是通过泵腔内液体压力变化,有序控制开启和关闭,

收稿日期:2007-04-06.

基金项目:国家自然科学基金项目(50575093).

作者简介:李鹏(1979-),男,博士研究生.研究方向:微小型机电液系统. E-mail:paul.lee.cn@163.com

通讯联系人:程光明(1957-),男,教授,博士生导师.研究方向:微小型机电液系统. E-mail:cgm123@163.com

因为被动阀的开启、关闭是在泵腔内压力变化后动作的,所以被动阀的动作在时间上要在腔内压力变化到一定程度后才会动作,这样在压电泵工作时会产生流体的倒流现象,导致压电泵工作性能下降;主动阀压电泵是通过主动控制泵腔进出口处单向阀的开启、关闭动作,完成流体的定向输送运动,因此可以缓解由于流体输送过程中的倒流现象,提高压电泵的工作性能,因此主动阀压电泵的研究是目前的一个热点。从国内外的研究状况看,国外对于主动阀压电泵的研究已有许多年<sup>[4-6]</sup>,但多局限于 MEMS 领域的应用;国内对于主动阀压电泵的研究尚处起步阶段。作者提出了一种由电磁驱动方式控制单向阀的开启、关闭运动,采用圆形压电振子作为驱动泵腔体积变化的动力源的主动阀压电泵,并对压电泵的理论流量和可行工作频率进行了阐述和分析,最后对设计的主动阀压电泵实验装置进行了实验测试。

## 1 机械结构与工作原理

图 1 为设计的主动阀压电泵的原理图。该阀主要由进口阀、振子、出口阀三大部分组成,进口阀和出口阀分别由两个电磁线圈来驱动,泵腔内液体的流动主要由压电振子的上下振动来实现。当压电振子向下运动时,进口阀的电磁线圈通电,在电磁力的吸引下,进口阀开启,泵腔体积随着压电振子的运动而变大,压力降低,液体流入泵腔内,实现了压电泵的吸入过程。当振子向上运动时,进口阀电磁线圈断电,在弹簧恢复力的作用下进口阀片关闭,同时出口阀的电磁线圈通电,出口阀开启,由于泵腔内体积减小,压力增大,液体从出口排出泵腔。综合以上两个过程,主动阀压电泵实现了液体的输送过程。

传统压电泵均使用被动单向截止阀,即进口阀片只能向泵腔体内部开启,出口阀片只能向泵

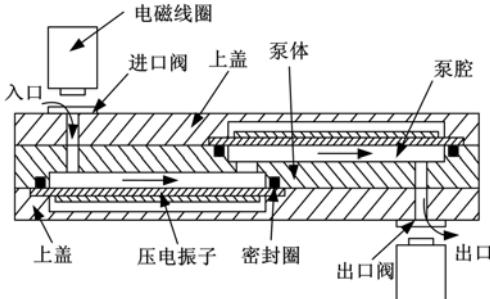


图 1 主动阀压电泵的结构原理图

Fig. 1 Structure of piezoelectric pump with active valve

腔体外侧开启,阀片开启完全靠流体的液动力,这也直接导致了传统压电泵流体泵送的单向性。与其不同的是,主动阀压电泵由于实现了阀片开启的主动控制,因此进出口阀片均可自由开启,这也使得流体的泵送方向可以直接通过控制进出口阀的开启相位来改变,实现了流体泵送的双向性。机构中压电振子由直径 23 mm、厚 0.2 mm 的压电陶瓷,以及直径 35 mm、厚 0.3 mm 的黄铜基板构成,压电陶瓷和基板间由胶粘结。电磁线圈工作电压为 12 V 直流,阻值 165 Ω。

## 2 压电振子性能测试及泵理论流量的计算

压电振子是压电泵的核心部件,它的性能直接影响泵的性能,因此首先利用激光测振仪对选用的压电振子进行了性能测试。实验中对压电振子分步施加由 20 V 到 140 V 的静态电压,测得对应的位移曲线,如图 2 所示。

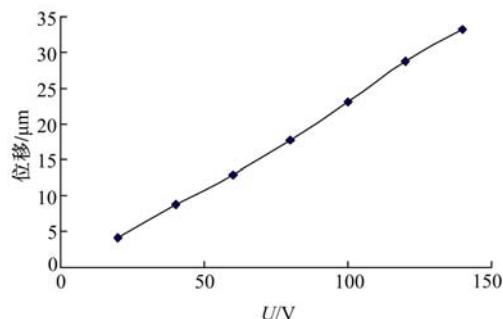


图 2 压电振子中心点电压-位移静态特性曲线

Fig. 2 Displacement of center of piezoelectric unimorph under different supplied voltages

由图 2 可知,压电振子中心点的位移随着输入电压的增大而线性增大。当输入电压为 140 V 时,其单侧最大输出位移为 33.2 μm。

压电振子的变形形状为圆心点为顶点的抛物面<sup>[7]</sup>,由上述数据即可得到压电振子径向的变形方程

$$w(r) = 1.0873 \times 10^{-4} \times r^2 + 0.0332$$

式中:w 为径向位移,mm;r 为压电振子半径(距圆心距离),mm。

因此压电泵的理论流量可通过对径向变形曲线取积分求得

$$V = \int_0^{2\pi} \int_0^a w(r) r d\theta dr = 2\pi \int_0^a w(r) r dr$$

式中:a 为压电振子基板半径值。

### 3 主动阀压电泵性能测试

在进行泵性能测试以前,除了压电振子的性能测试外,对电磁线圈、阀片、弹簧构成的阀片系统的特性也进行了测试,发现该系统可工作的最高频率为 30 Hz。因此该主动阀泵的最高工作频率为 30 Hz。

为了提高电磁线圈的响应速度,并使其与压电振子协调工作,实验选择了方波作为阀片和压电振子的驱动信号。

由于压电泵输出流量随压电振子变形量即输入电压大小、系统工作频率以及阀片控制信号的变化而变化。因此,该泵的性能测试围绕以上几方面进行。选择水为实验用液体。

#### 3.1 相位,占空比-流量特性

由于主动阀压电泵可自由控制阀片相对于压电振子振动位置开和闭以及开启时间长短,因此控制信号的相位及占空比对泵的性能均有影响。

当压电振子仍处于吸水状态时,如果进口阀开启太晚或关闭太早,出口阀开启太早或关闭太晚,会影响泵的吸水效率;压电振子仍处于排水状态时,进口阀开启过早或关闭过晚,出口阀关闭过早或开启过晚,都会影响泵的出水流量。进出口阀的开启时间主要由相位来决定。

进口阀若开启时间较长,有利于泵吸水,但易造成水的回流;开启时间短,能有效阻止水的回流,但要牺牲一部分流量。对于出口阀开启时间长短同理。进出口阀的开启时间长短由占空比来决定。因此,为使压电泵的性能较优,应给进出口阀的控制信号选择合理的相位和占空比。

为了保证压电振子能够最有效的工作,压电振子驱动信号的占空比始终选择为 50%,这意味着在一个周期内,压电振子用半个周期来吸水,另半个周期来排水。因此无论阀开启时间长短(占空比大小,应该 $\leqslant 50\%$ ),要通过调整相位来保证阀和压电振子之间的对应开启关系。此外,为保证进出口阀工作的对称性,进出口阀采用了相同的占空比。文中使用的阀片及压电振子驱动信号的相位和占空比的关系如表 1 所示。

鉴于压电振子在较高电压下可获得较大的位移,以及该泵的最大工作频率为 30 Hz,因此选择 140 V、30 Hz 方波作为压电泵在该项测试中的驱动信号。

表 1 测试用占空比与相位

Table 1 Duty cycle and phase used during test

占空比/%	相位(°)		
	入口阀	出口阀	压电振子
30	-35	-217	0
40	-18	-198	0
50	0	180	0

图 3 给出了在表 1 测试条件下的压电泵的流量,由图可以看出,随着占空比的增大即阀片的开启时间的延长,泵的流量也不断加大。当占空比为 50%,两阀片的相位差为 180°时(其中一个阀片与压电振子同步),泵的流量达到最大。

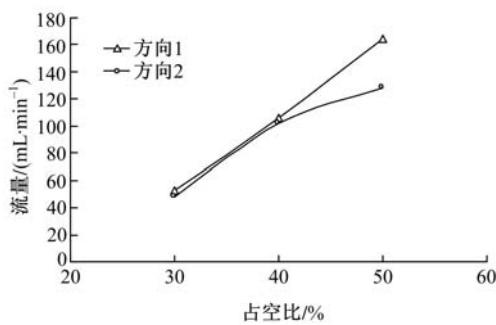


图 3 不同占空比和相位下泵的流量

Fig. 3 Pump flow volume under different duty cycles and phases

压电泵在最大流量下正反两个方向流量的不同主要是由于泵机械结构及阀密封性的不完全对称导致的。

#### 3.2 频率-流量特性

泵的工作频率是泵工作快慢的标志,如果泵能随着频率的增加而正常工作,那么泵的流量会随着工作频率的上升而提高。文中也对压电泵的频率-流量特性进行了测试。选择的工作频率分别为 10、15、20、25、30 Hz。试验波形为方波,电压为 140 V,实验结果如图 4 所示。

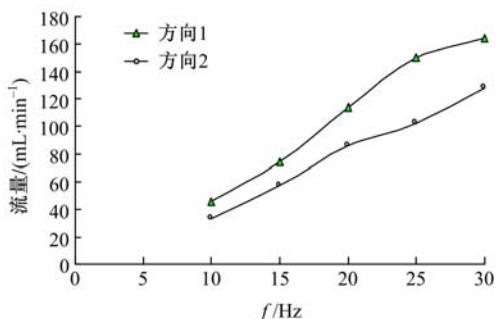


图 4 泵工作在不同频率下流量的变化

Fig. 4 Pump flow volume under different frequencies

由图4可见,随着工作频率的升高,压电泵的流量几乎是线性增加的,方向一的最大流量为160 mL/min,但方向二的最大流量为128 mL/min,可见流量在两个方向上的不对称在不同频率下仍然存在,并随着流量的增大而加大。

### 3.3 电压-流量特性

在不同的驱动电压下,压电振子的变形不同,而压电振子变形的不同直接导致了泵单次输出流量的不同,因而泵的总流量会随着驱动电压的变化而变化。

用30 Hz方波,在80、100、120、140 V驱动下分别对压电泵的流量进行了测试,实验结果如图5所示。

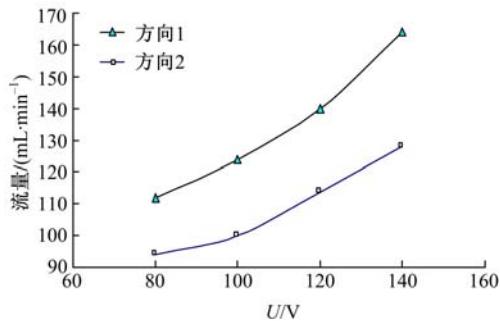


图5 泵工作在不同驱动电压下流量的变化

Fig. 5 Pump flow volume under different voltages

泵的流量随着驱动电压的增大变化十分明显。在方向1,泵流量从80 V下的112 mL/min增大到140 V下的160 mL/min;在方向2,泵流量也从95 mL/min增大到了128 mL/min。由此可见在较高的驱动电压下泵的流量较大。主动阀压电泵样机如图6所示。

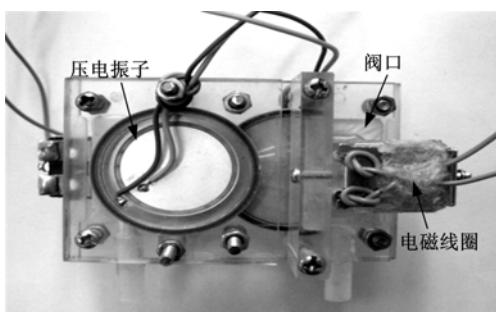


图6 主动阀压电泵样机

Fig. 6 Prototype of designed piezoelectric pump

## 4 结束语

提出了电磁方式驱动阀片的主动阀压电泵。相对于被动阀压电泵而言,该泵通过主动控制电磁驱动开启、关闭进出口单向阀的方式,缓解了流

体倒流现象,从而使该型泵具备提高压电泵工作性能的潜力。同时由于进出口阀实现了主动控制,可以通过改变单向阀、关闭顺序,实现压电泵输送液体的方向变化,从而实现在单一泵体结构下,达到液体泵送的双向可控性。此外,泵的流量也可以通过调整阀控制信号的占空比来控制。

### 参考文献:

- [1] 刘国君,范尊强,董景石,等.用于胰岛素推注的压电微泵[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(2):372-376.  
Liu Guo-jun, Fan Zun-qiang, Dong Jing-shi, et al. Piezoelectric micro-pump for insulin injection [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(2): 372-376.
- [2] Ng T Y, Jiang T Y, Li Hua, et al. A coupled field study on the non-linear dynamic characteristics of an electrostatic micro-pump[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(4/5): 989-1006.
- [3] 沈传亮,刘国君,董景石,等.压电型多振子单腔精密药物输送泵[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(1): 89-94.  
Shen Chuan-liang, Liu Guo-jun, Dong Jing-shi, et al. Piezoelectric multi-vibrator and single-chamber pump for precise drug delivery[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(1): 89-94.
- [4] Doll A, Wischke M, Schrag H J, et al. Characterization of active silicon microvalves with piezoelectric membrane actuators[J]. Microelectronic Engineering, 2007, 84(5-8): 1202-1206.
- [5] Stehr M, Messner S, Sandmaier H, et al. New micropump with bidirectional fluid transport and self-blocking effect[C]// Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 1996: 485-490.
- [6] Roberts D C, Li Han-qing, Steyn Lodewyk, et al. A piezoelectric microvalve for compact high-frequency, high-differential pressure hydraulic micropumping systems[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2003, 12(1): 81-92.
- [7] 程光明,杨志刚,曾平,等.压电泵泵腔体积变化量研究[J].压电与声光,1998,20(6):389-392.  
Cheng Guang-ming, Yang Zhi-gang, Zeng Ping, et al. Research on the cavity volume fluctuations of piezoelectric pump[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 1998, 20(6):389-392.