

文章编号 1004-924X(2011)05-1104-06

压电泵吸程出流现象及其成因

刘 勇*, 杨志刚, 吴 越, 刘 磊, 董景石
(吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:研究了被动阀压电泵在方波驱动下出现的吸程出流现象,建立了被动阀压电泵的流体力学模型与振动模型,依此对吸程出流现象的物理过程进行了理论分析,推出了吸程时出口阀开启高度的计算公式。测量了吸程时压电泵在 0.4, 0.8, 6, 45 Hz 等不同工作频率下出口阀的开启高度,并对公式中影响吸程出流的其余因素进行了实验验证。理论分析指出,流动惯性是产生吸程出流现象的根本原因,同时惯性流在排程中亦存在。实验结果表明,压电泵工作频率增加时出口阀的吸程开启高度会减小,出口阀刚度、入口与出口负载增大时吸程流会减小,实验结果与理论计算公式符合较好。分析认为,压电泵的输出流量应当包含容积流与惯性流两部分,在进行压电泵精密流量控制时应同时考虑这两部分的作用。

关键词:压电泵;吸程出流;惯性流;精密流量控制

中图分类号: TN384; TH137.33 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111905.1104

Analysis on sucking process outflow phenomenon of piezoelectric pump

LIU Yong*, YANG Zhi-gang, WU Yue, LIU Lei, DONG Jing-shi

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

* Corresponding author, E-mail: liuyong412108@yahoo.com.cn

Abstract: The sucking outflow phenomena of a passive piezoelectric pump under the square wave driving is studied and a hydrodynamics model and a vibration model of the passive piezoelectric pump are built to analyze theoretically the physical process of the sucking outflow process. Then, an open height formula of the exiting valve in sucking processing is derived. The open height of the piezoelectric pump is measured during the sucking outflow process under different frequencies of 0.4, 0.8, 6, 45 Hz, and the other factors effecting on the sucking outflow in the formula are verified. In the theoretical analysis, it points out that the flow inertia is the root cause for the outflow sucking phenomena, and the inertial flow also exists during the draining process. The experiment indicates that when the piezoelectric frequency increases, the open height of the exiting valve during sucking process decreases. When the exiting valve rigidity and the loadings in input and output increase, the outflow decreases. The results above are coincident with the formula well. It concludes that the output flow of the piezoelectric pump should include two parts: cubage flow and inertial flow, which should be considered in the same time when the flow of the piezoelectric pump is controlled precisely.

Key words: piezoelectric pump; sucking outflow; inertial flow; precisely flow control

收稿日期: 2010-09-01; **修订日期:** 2010-10-27.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA04Z336); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50735002); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 20070183212)

1 引言

压电泵因其易于微型化、功耗低、控制方便而成为微流体控制系统中流体驱动元件的首选。随着研究的深入,压电泵的性能逐步提高,不过由于其结构比较简单,研究者们对其出流过程未作深入的探讨。目前比较一致的看法是,压电振子往复振动引起泵腔容积变化,泵腔内的两个单向阀对应动作,形成吸程与排程两个工作阶段。吸程时容积扩张,入口阀开启、出口阀关闭,流体被吸入;排程时容积缩小,出口阀开启、入口阀关闭,流体被泵出;如此循环从而实现持续的单向流动^[1-2]。研究者们还认为,由于驱动电压与压电振子的变形之间有良好的线性对应关系^[3],改变驱动电压即可改变泵腔容积变化量,从而实现流量的精密控制^[4-6]。而笔者在研究中发现,压电泵工作时除了有因容积变化形成的容积流外,还有因流动惯性而形成的惯性流。本文通过分析压电泵吸程出流现象,解释了惯性流的成因及其影响因素。

2 压电泵吸入过程的出流现象

图1为实验所用压电泵的结构,包括电极板、压电振子、泵体与2个单向阀。

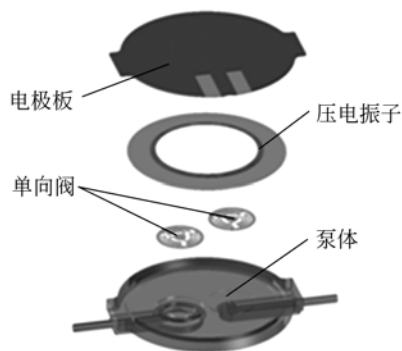


图1 压电泵结构图
Fig. 1 Configuration of piezoelectric pump

为了使压电泵能在更低的频率下工作,2个单向阀的刚度设计得足够小,并经过了研磨与热处理,得到了很高的光洁度与平面度,保证了压电泵良好的截止性。将制得的压电泵置于测试台

上,管路入口与出口为大气压,两者高度差为30 mm。由信号发生器与功率放大器为其提供驱动信号,以水为工作介质,驱动电压为方波120 V,试验过程中观察到以下现象:频率 $f=0.4$ Hz时,压电泵在压电振子的一个振动周期内(包括吸程与排程)两次出流,一次喷射距离较远,另一次喷射距离较近(如图2所示),其时间间隔为1.25 s,恰好为每半个周期出流一次,两次出流的流量相差不大。以激光测微仪检测压电振子的变形情况并结合出流时间,发现前者发生在压电泵排程(泵腔容积缩小时),后者发生在压电泵吸程(泵腔容积扩大时),当频率增至 $f=6$ Hz时,间歇式的喷射出流逐渐演变为连续流(如图3所示),但可观察到明显的流动分叉,即吸程仍有出流。

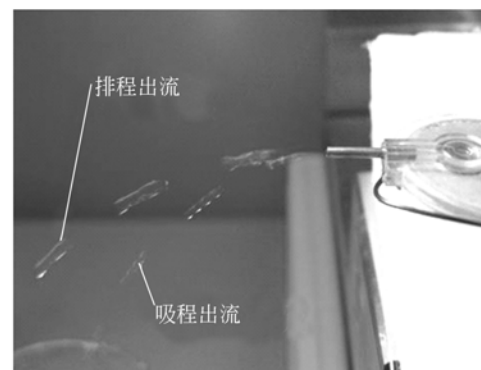


图2 0.4 Hz时压电泵出流现象
Fig. 2 Pump outflow phenomenon ($f=0.4$ Hz)

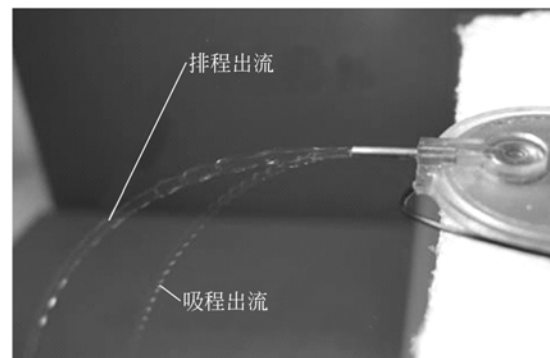


图3 6 Hz时压电泵出流现象
Fig. 3 Pump outflow phenomenon ($f=6$ Hz)

当频率增至 $f=45$ Hz时,分叉流逐渐合并,观察不到明显的吸程出流现象,此时流量达到最大值。

3 理论模型

压电泵是一个典型的流固耦合系统,由于腔体高度较小(通常在 2 mm 以内),腔内完全充液时流体的总量亦很小,在不含气的情况下,受力时可忽略其体积变化,将其视为不可压缩流体。又由于压力波在液体中的传播速度为该液体中声速,设压电泵腔高为 2 mm,工作介质为水(水中声速约为 1 400 m/s),则压电振子振动产生的压力波传导到阀片上仅需 14 μ s,而本文实验所用压电振子得振动周期长达 2.5 s,相比之下压力变化的延迟时间可忽略不计,因此,可认为流体在腔内的流动与压电振子的运动一致。相对径向尺寸来说,压电振子工作时厚度方向的变形量很小,为了分析方便可以将其简化为受周期力 $F(t)$ 作用的弹簧-活塞流固耦合系统,简化后的压电泵结构如图 4 所示。

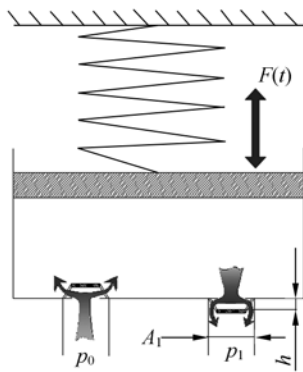


图 4 压电泵简化模型

Fig. 4 Simplified model of piezoelectric pump

建立振动模型如图 5 所示,其中 k 为压电振子的等效刚度, c 为压电振子、流体、及阀孔的等效阻尼系数, m 为压电振子质量与流体附加质量之和,则系统的微分方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + F(t), \quad (1)$$

压电振子在周期 $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$ 的方波驱动下,一个周期内产生的外力

$$F(t) = \begin{cases} F_0, & 0 \leq t \leq \frac{\tau}{2} \\ -F_0, & \frac{\tau}{2} \leq t \leq \tau \end{cases}, \quad (2)$$

式中, F_0 为方波驱动时相应电压下压电振子产生

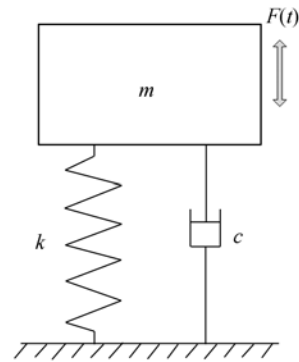


图 5 压电泵振动模型

Fig. 5 Vibration model of piezoelectric pump

的驱动力。

将式(2)展开为傅里叶级数

$$F(t) = \frac{4F_0}{\pi} \sum_{j=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{j} \sin(j\omega t), \quad (3)$$

则方程(1)的解为

$$x(t) = \sum_{j=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4F_0/k}{\pi j \sqrt{(1-j^2 r^2)^2 + (2\zeta_j r)^2}} \sin(j\omega t - \phi_j) \quad (4)$$

式中, $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$ 。

由于工作流体的不可压缩性,可认为泵腔内流体流动速度与活塞的运动速度一致。设泵腔内的流体在极短的时间间隔 Δt 内速度变化了 Δv ,则压力的改变 $\Delta p = \rho c_j \Delta v$,式中 c_j 为压力波在水中的传播速度^[7-10],写成微分形式为 $dp = \rho c_j dv$,设活塞的加速度为 $a = \ddot{x}(t)$,流体的运动速度与活塞的运动速度相等,则 $dv = a dt$,经过时间 t 泵腔内压力的总变化

$$\Delta p = \int_0^t \rho c_j a dt, \quad (5)$$

由于单向阀的存在,压力变化引起的压力波会单向释放。以吸程为例,流体加速引起的负压会使入口阀开度增大从而迅速实现压力平衡,如果吸入端无负载且忽略流阻,由于阀的刚度较小,则泵腔内的压力始终接近于初始压力 p_0 ,而流体减速引起的压力增大则会使入口阀开度减小,阻碍压力的释放,导致泵腔内的压力不断增加。因此吸程时泵腔即时压力为:

$$p(t) \approx \begin{cases} p_0, & 0 \leq t \leq t_0 \\ p_0 + \Delta p, & t_0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega} \end{cases}, \quad (6)$$

其中

$$\Delta p = \int_{t_0}^t \rho c_j a dt, \quad (7)$$

其中 t_0 为流体开始减速的时刻,此时振子的加速度为零且运动速度已达到最大值,因此 t_0 可由下式求得

$$\ddot{x}_{t_0} = 0, 0 \leq t_0 \leq \frac{\pi}{\omega}.$$

将方程(4)代入方程(7)求得

$$\Delta p = \frac{4\rho c_j F_0}{\pi \omega k} \sum_{j=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{j}{\sqrt{(1-j^2 r^2)^2 + (2j\zeta r)^2}} \times [\cos(j\omega t - \phi_j) - \cos(\omega t_0 - \phi_j)], \quad (8)$$

其中 $\phi_j = \arctan \frac{2\zeta jr}{1-j^2 r^2}, \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, r = \frac{\omega}{\omega_n}.$

当 $t \geq t_0$ 时,泵腔内的即时压力为 $p = p_0 + \Delta p$,出口管路压力为 p_1 ,则作用于出口阀两端的压差为 $\Delta p + p_0 - p_1$,得到出口阀片的开启高度

$$h = \frac{A_1 (\Delta p + p_0 - p_1)}{k_1}, \quad (9)$$

式中, A_1 为出口阀孔面积, k_1 为出口阀刚度。

4 理论计算与实验

文中节二所用压电泵出口阀孔径为 1.2 mm,则阀孔截面积 $A_1 = 1.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2$;入口流道与出口流道距液面高度均小于 20 mm,则有 $p_0 \approx p_1 \approx p_a$,其中 p_a 为大气压;出口阀片厚度为 0.03 mm,测得其刚度 $k_1 = 1.12 \text{ N/m}$,同时测得压电振子的等效刚度(压电振子中心点受力与位移之比) $k = 1.31 \times 10^5 \text{ N/m}$;驱动电压为 150 V 时以激光测微仪测得压电振子的最大静变形为 $x_0 = 0.144 \text{ mm}$,则 $F_0 = kx_0 = 18.84 \text{ N}$ 。系统的振动质量 $m = 0.3 \times 10^{-3} \text{ kg}$,则 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = 6.6 \text{ kHz}$,以阻抗分析仪测得系统的固有频率 $\omega_1 = 2.5 \text{ kHz}$,根据公式 $\omega_1 = \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n$,求得 $\zeta = 0.925$ 。将以上参数代入式(8)求得各工作频率 f 下, Δp 的最大值 Δp_{\max} ,并根据式(9),求出吸程末了阀片的最大开启高度 h_{\max} ,同时以激光测微移测出吸程时不同下阀片的实际最大开启高度 h'_{\max} ,如表 1 所示。

表 1 不同频率下吸程时出口阀的理论与实际开启高度
Tab. 1 Theory and real opening clearances of outlet valve in different frequencies

f/Hz	$\Delta p_{\max}/\text{Pa}$	h_{\max}/mm	h'_{\max}/mm
0.4	250	0.252	0.15
0.8	130	0.131	0.12
6	17.5	0.017	0.011
45	2.3	0.002	0.001

由表 1 可知 $f = 0.4 \text{ Hz}$ 时, Δp_{\max} 最大,相应的 h_{\max}' 亦最大,因此可明显观察到吸程出流现象,但此时最大开启高度的理论值 h_{\max} 远小于实际值 h'_{\max} ,而 $f = 0.8 \text{ Hz}$ 时,两者相差不大,其原因在于当阀片开启到一定高度并形成出流后,泵腔内压力从出口释放,泵腔压力不再上升。因此,此时压力增加的实际最大 $\Delta p'_{\max} = k_1 h'_{\max} = 168 \text{ Pa}$,小于理论值 Δp_{\max} 。

由表 1 可知,当 f 增加时,出口阀的开启高度随之减小。当 $f = 6 \text{ Hz}$ 时,由于吸程出流的频率大大增加,因此观察到为分叉的连续流。当 $f = 45 \text{ Hz}$ 时,出口阀的开启高度趋向于零,吸程出流的流量很小,不能明显地观察到。

为了进一步验证式(9)中各因素对吸程出流的影响,同时做了如下实验:

(1) 延长出流管长度并提升其高度,当出流管液面达到一定的竖直高度时(相当于 p_1 逐渐增大),吸程出流现象消失,而延长入流管长度并减小 p_0 亦有同等效果;

(2) 增加出口阀片的厚度至 0.2 mm,此时测得其刚度 $k_1 = 100 \text{ N/m}$,各频率下均没有观察到明显的吸程出流现象,此时计算值 $h_{\max} = 0.003 \text{ mm}$,测量值 $h'_{\max} = 0.002 \text{ mm}$,说明出口阀刚度 k_1 的大小对吸程出流有明显的影响, k_1 越小、越容易产生吸程出流现象。

因此,确如式(9)所示,压电泵吸程出流与泵腔压力的增量 Δp ,初始压力 p_0 ,出口管路压力 p_1 ,出口阀的刚度 k_1 ,出口阀孔面积 A_1 有关。

吸程出流的物理过程在第四节中已有论述,具体来说是由于吸程后半段流体运动速度减小,与压电振子接触的流体首先受压,泵腔内压力瞬

时增大,并以压力波的形式反向传播,而入口单向阀的存在阻止了压力波从入口释放,使得腔内压力持续增大,直至将出口阀打开形成出流。结合上文的计算与实验得出结论为,流体流动惯性是形成吸程出流的根本原因,从能量角度讲是动能和势能在不同条件下的转化。进一步推断认为,同样由于惯性,压电泵在排程末了会使泵腔内出现一定的负压,促使入口阀打开,流体从入口直接流向出口,形成出流,可将这种因惯性而形成的出流统称为惯性流。因此,压电泵出流应当包括两部分,一部分由腔体容积变化造成,可称为容积流;另一部分是惯性流。压电泵工作时出现的惯性流现象说明以容积变化量为依据的流量计算公式有一定的局限性。因此,要实现压电泵流量的精密控制必须考虑工作过程中出现的惯性流。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 杨志刚,孙晓锋,张德君,等. 双腔串联两阀与三阀压电泵的性能研究 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(2):219-223.
YANG ZH G, SUN X F, ZHANG D J, *et al.*. Performance research on double-valved and three-valved piezoelectric pumps with double series-wound chambers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(2):219-223. (in Chinese)
- [3] 张建辉,黎毅力,夏齐霄,等. “Y”形流管无阀压电泵振动分析及泵流量计算[J]. 光学精密工程, 2007,15(6):922-929.
ZHANG J H, LI Y L, XIA Q X, *et al.*. Research on the vibration and pump flow rate of valveless piezoelectric pump with Y-shape tubes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(6):922-929. (in Chinese)
- [4] 刘国君,程光明,杨志刚. 一种压电式精密输液微泵的试验研究[J]. 光学精密工程, 2006,14(4):612-616.
- [5] LIU G J, CHENG G M, YANG ZH G. Experimental research on a piezoelectric micro-pump for precision pumping[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):612-616. (in Chinese)
- [6] YE F, LI Y L, ZHANG J H. Dynamic research on actuator for valveless piezoelectric pump with Y-shape tubes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2358-2365.
- [7] 阙君武,杨志刚,唐可洪. 新结构药品输送压电泵的泵送特性[J]. 生物医学工程学杂志, 2004, 21(2):297-301.
KAN J W, YANG ZH G, TANG K H. Pumping performance of a new piezoelectric pump for drug delivery [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2004,21(2):297-301. (in Chinese)
- [8] E. 约翰芬纳莫尔,约瑟夫 B. 弗朗兹尼. 流体力学及其工程应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
JOHN FINNEMORE E, JOSEPH FRANZINI B. *Fluid Mechanics with Engineering Applications* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)
- [9] LIA B, CHEN Q F, LEE D G, *et al.*. Development of large flow rate, robust, passive micro check valves for compact piezoelectrically actuated pumps [J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, 117(2):325-330.

5 结 论

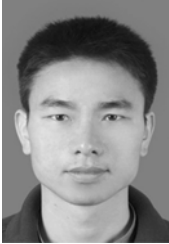
本文研究了被动阀压电泵在方波驱动下出现的吸程出流现象,研究表明,方波驱动时,压电泵存在吸程出流现象的原因在于:泵腔内流体在某一时刻后流速锐减使腔内压力骤增,当增大的压力足以克服阀片刚度与外部负载时,即形成出流;同理,排程末了亦可能因泵腔压力骤减而形成出流。当工作频率、出口阀刚度、入口与出口负载增大时均会使吸程出流减小。因此,压电泵的流量应当包括容积流与惯性流两部分,单纯依据容积变化来估算压电泵流量有一定的局限性。进一步的研究表明,吸程出流现象与驱动电压的波形也有一定的关系,下一步将重点研究驱动电压波形对压电泵惯性流的影响。

- [9] SATYAJIT K, SCOTT M, SEAN M, *et al.*. Piezoelectric mechanical pump with nanoliter per minute pulse-free flow delivery for pressure pumping in pulse-free flow delivery for pressure pumping in micro-channels[J]. *Analyst*, 1998,123(6):1435-1441.
- [10] 吴丽萍,程光明,杨志刚,等. 双作用压电泵绝缘压

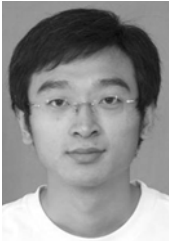
电泵的研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 103-107.

WU L P, CHENG G M, YANG ZH G, *et al.*. Research on insulated bimorph in piezoelectric pump with double functions[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):103-107.

作者简介:



刘 勇(1981—),男,湖南岳阳人,博士研究生,2006年于长春理工大学获得学士学位,2008年于吉林大学获得硕士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械的研究。E-mail:liuyong412108@yahoo.com.cn



吴 越(1984—),男,黑龙江望奎人,博士研究生,2007年于黑龙江科技学院获得学士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械的研究。E-mail:wuyues@163.com



刘 磊(1985—),男,辽宁开原人,硕士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事压电驱动与控制技术的研究。E-mail:lonelylight1985@yahoo.com.cn



董景石(1973—),男,吉林长春人,副教授,主要从事压电驱动与控制技术方面的研究。E-mail:dongjs@jlu.edu.cn

导师简介:



杨志刚(1956—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,1998年于吉林工业大学获得博士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械方面的研究。E-mail:yzg@jlu.edu.cn

(本栏目编辑:曹 金)