

文章编号 1004-924X(2007)06-0922-08

“Y”形流管无阀压电泵振动分析及泵流量计算

张建辉^{1,2}, 黎毅力², 夏齐霄³, 路计庄²

(1. 南京航空航天大学 精密驱动研究所, 江苏 南京 210016;

2. 北京工业大学 机械工程及应用电子技术学院, 北京 100022; 3. 北京联合大学 机电学院, 北京 100020)

摘要:为了解决医疗、卫生、保健领域进行细胞或高分子等输送工作的需要,研制了一种新型的压电泵——“Y”形流管无阀压电泵,并对其压电振子振动特性及泵流量计算进行了研究。介绍了“Y”形流管无阀压电泵及其流管的结构和特点;基于圆形薄板弯曲振动理论对压电振子振动进行了理论分析;然后讨论了泵及其流管内流体的流动特性,建立了泵流量方程。最后,基于有限元法对流管内流体流动状态进行了模拟,得到了正反流压强变化规律及正反流流阻。实验结果表明:理论泵流量与实验泵流量变化趋势一致,且两者最小相对误差为12%,证明了理论分析与数值模拟的有效性和正确性。

关键词:压电泵;流阻 “Y”形流管;振动分析;流量计算;有限元法

中图分类号:TH38;TN384 **文献标识码:**A

Research on vibration and pump flow rate of valveless piezoelectric pump with Y-shape tubes

ZHANG Jian-hui^{1,2}, LI Yi-li², XIA Qi-xiao³, LU Ji-zhuang²

(1. *Precision Driving Laboratory, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;*

2. College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

3. College of Mechanical & Electronic Engineering, Beijing Union University, Beijing 100020, China)

Abstract: In order to meet the needs of transporting cells and macromolecules in such areas as medical mechanism, sanitation and health care, a new type of piezoelectric pump, the Valveless Piezoelectric Pump with Y-shape Tubes(VPPYT), is presented and its vibration and pump flow rate are analyzed. The structures and characteristics of VPPYT and its tubes are introduced firstly. Then, based on the bending vibration theory of thin circular board, the vibration of the piezoelectric actuator is analyzed theoretically. After that, through analyzing the fluid state in VPPYT and its tubes, the equation for the calculation the pump flow rate is established. Finally, Finite Element Method (FEM) is employed to simulate the flow state in the Y-shape tubes to obtain the flow resistances and pressure variation rules along the positive and negative directions, respectively. The experimental results show that the theoretical and experimental pump flow rates follow the same variation trend, and the minimum rela-

收稿日期:2006-12-11;修订日期:2007-03-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50575007);北京市教育委员会科技发展计划项目(No. -KM-200510005014)

tive error between the two results is 12%. Thus the validity and correctness of the theoretical analysis and the numerical simulation are proved.

Key words: piezoelectric pump; flow resistance Y-shape tube; vibration analysis; flow rate calculation; FEM

1 引言

无阀压电泵是以无移动部件阀代替传统的可移动阀,以具有逆压电效应的压电振子作为动力源而实现传送流体和能量的泵。无阀压电泵因省略了传统压电泵中阀的开启闭合过程而在微流体领域有着广阔应用前景,从而吸引了众多研究者的关注^[1-6]。

在医疗、卫生、保健等领域进行活体细胞和长链高分子细胞的输送工作时,活体细胞极易被挤压而失去活性;长链高分子细胞也极易发生相互缠绕、拉断而使局部分子量增大或减小,使其失去原有的机能与性质。压电泵要从事这方面的工作,就需要尽量避免其内部出现速度、压强变化显著的湍流场。同时,考虑到传染与污染等原因,在医疗、卫生、保健等领域一般需要一次性应用,这就要求压电泵的制作成本低廉。

“Y”形流管无阀压电泵^[7]是将一种三通形的流管——“Y”形流管作为无移动部件阀而制作的。这种流管结构简单、加工制作方便、流管内涡旋小、速度压强变化平缓,能满足活体细胞或长链高分子细胞输送的需要。

迄今为止,对“Y”形流管无阀压电泵的研究还仅限于基础的原理证明与实验研究阶段^[8],流管的流态解析以及泵特性等许多问题还没有进行研究,这些基础性问题阻碍了该泵的应用与产业化进程。

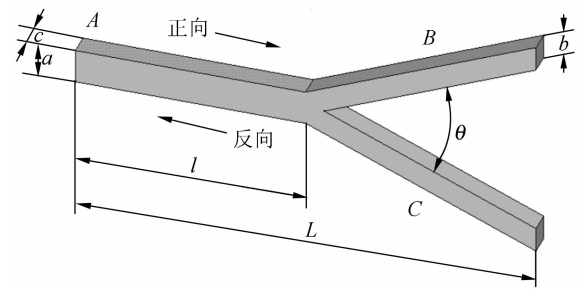
本文将首先对压电振子的振动特性及流管流阻特性进行理论分析;然后,对“Y”形流管进行模拟分析;最后,将对理论与实验泵流量进行比较,并对比较结果及误差产生原因进行讨论。

2 “Y”形流管无阀压电泵的结构

图1所示为“Y”形流管无阀压电泵及其流管结构图。“Y”形流管(图1(a)所示)由合管A及两支管B、C组成,两支管B、C与合管A呈中心

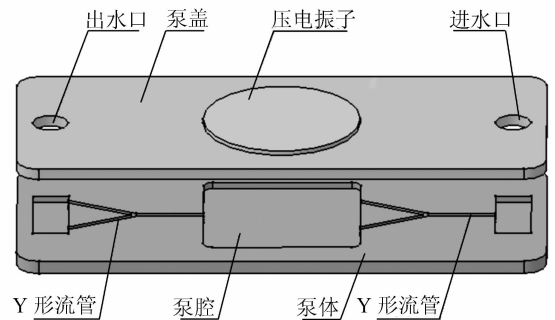
对称分布,选用完全相同的参数,整管的形状像大写的英文字母“Y”,因而称为“Y”形流管。设两支管宽度为 b ,夹角为 θ ;合管宽为 a ,长为 l ;整管高为 c ,长为 L 。

当流体在“Y”形流管中流动时,合管A的端口作为输入口、两支管B、C的端口作为排出口(定义为正流)与合管A的端口作为排出口、两支管B、C的端口作为输入口(定义为反流)的流动阻力是不同的。将这样一对“Y”形流管互相倒置地装在压电泵泵腔的两端,则形成一种新型的压电泵——“Y”形流管无阀压电泵(图1(b)所示)。



(a) “Y”形流管

(a) Y-shape tube



(b) “Y”形流管无阀压电泵

(b) Valveless piezoelectric pump with Y-shape tubes

图1 “Y”形流管无阀压电泵及其流管结构图

Fig. 1 Structures of the valveless piezoelectric pump with Y-shape tubes

3 压电振子振动特性分析

3.1 自由振动应变能与动能

“Y”形流管无阀压电泵采用的压电振子的尺寸如图 2 所示,因为电极层和粘接层厚度相对于基底层和压电陶瓷层很薄,可将其忽略。压电振子基底层半径为 R ,PZT 层半径为 $r=\alpha R$,基底层厚度为 a ,PZT 层厚度为 $b=\beta a$ 。假设压电振子振动时,压电陶瓷层与基底层无相对滑动。建立如图 2 所示的柱坐标系,其 $r\theta$ 平面位于基底层的中间面上,坐标原点为圆心, z 轴为压电振子的对称轴。

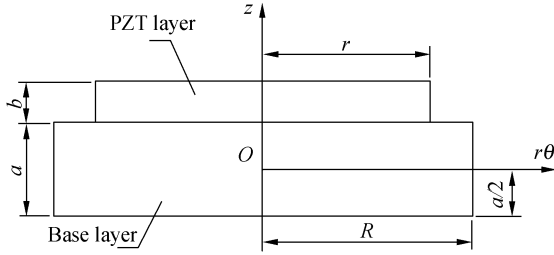


图 2 压电振子几何尺寸

Fig. 2 Geometrical dimensions of piezoelectric vibrator

假设压电振子做简谐振动,其弯曲是轴对称的,根据薄板小挠度弯曲理论和克希霍夫假设,有^[9]: $S_z=0, \gamma_z=0, \gamma_{\theta}=0, \gamma_{\theta}=0$,且径向和环向应变分量 S_r, S_{θ} 为: $S_r = -z \frac{d^2 w}{dr^2}, S_{\theta} = -\frac{z}{r} \frac{dw}{dr}$ 。

基底层微元体上的应力分量与其挠度之间的关系如下^[9]:

$$\begin{cases} T_{r1} = -\frac{c_1 z}{1-\nu_1^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu_1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \\ T_{\theta 1} = -\frac{c_1 z}{1-\nu_1^2} \left(\nu_1 \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $-a/2 < z < a/2$; c_1, ν_1 分别为基底材料的弹性模量和泊松比。

压电陶瓷层的压电方程为^[10]:

$$\begin{cases} T_{r2} = -\frac{c_2 z}{1-\nu_2^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu_2}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \frac{c_2 g_{31}}{1-\nu_2} D_3 \\ T_{\theta 2} = -\frac{c_2 z}{1-\nu_2^2} \left(\nu_2 \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \frac{c_2 g_{31}}{1-\nu_2} D_3 \\ E_3 = \frac{c_2 g_{31} z}{1-\nu_2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\beta_{33}^T D_3}{1-k_p^2} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $a/2 < z < a/2 + b$; g_{31} 为压电常数; E_3, D_3

为 z 方向的电场强度分量和电位移分量; k_p 为平面机电耦合系数; β_{33}^T 为倒介电常数; $c_2 = 1/S_{11}^D$; $\nu_2 = -S_{12}^D/S_{11}^D$ 。

将 E_3 沿压电陶瓷厚度方向积分即得加在压电层上的电压 U ,并可解得^[10]:

$$D_3 = -\frac{c_2 g_{31} (1-k_p^2)(a+b)}{2(1-\nu_2)\beta_{33}^T} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right] + \frac{1-k_p^2}{\beta_{33}^T b} U. \quad (3)$$

当圆形压电振子作轴对称弯曲振动时,其挠度与 θ 无关,基底层周边固定,必有 $\partial^2 w / \partial r^2 = \partial w / \partial r = 0$ 。于是,经计算可得压电振子中基底层运动的应变能为:

$$E_1 = \frac{1}{2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_0^{2\pi} \int_0^R (S_r T_{r1} + S_{\theta} T_{\theta 1}) r dr d\theta dz = C_1 \int_0^R \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right)^2 + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \right] r dr, \quad (4)$$

式中 $C_1 = \frac{\pi c_1 a^3}{12(1-\nu_1^2)}$ 。

陶瓷层周边不固定,其运动的应变能为:

$$E_2 = \frac{1}{2} \int_{a/2}^{a/2+b} \int_0^{2\pi} \int_0^{aR} (S_r T_{r2} + S_{\theta} T_{\theta 2}) r dr d\theta dz = C_2 \int_0^{aR} \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right)^2 + \frac{2\nu_2}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \right] r dr + C_3 \int_0^{aR} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 r dr + C_4 U \int_0^{aR} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 r dr, \quad (5)$$

式中: $C_2 = \frac{\pi c_2 a^3 (4\beta^3 + 6\beta^2 + 3\beta)}{12(1-\nu_2^2)}$;

$$C_3 = \frac{-\pi g_{31}^2 c_2^2 a^3 (1-k_p^2)(1+\beta)^2 \beta}{4\beta_{33}^T (1-\nu_2)^2};$$

$$C_4 = \frac{\pi c_2 g_{31} a (1-k_p^2)(1+\beta)}{2\beta_{33}^T (1-\nu_2)}.$$

基底层运动的总动能^[11]:

$$T = \pi \rho_1 a \int_0^R \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 r dr + \pi \rho_2 b \int_0^{aR} \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 r dr, \quad (6)$$

式中 ρ_1, ρ_2 分别为基底层和 PZT 层的密度。

令:

$$w = [A(1-r^2/R^2)^2 + B(1-r^3/R^3)^2] \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

式中 $\omega = 2\pi f$, f 即为压电振子自由振动的固有频率。

显然,式(7)中的两个函数 $A(1-r^2/R^2)^2$ 和 $B(1-r^3/R^3)^2$ 都满足压电振子周边固定的位移

边界条件。令 $\sin(\omega t + \varphi) = 1, k_1 = dw/dr, k_2 = d^2w/dr^2, k_3 = A(1 - r^2/a^2)^2 + B(1 - r^3/a^3)^2$, 则压电振子总应变能和总动能可表示为:

$$E_{\max} = E_{1\max} + E_{2\max} = C_1 \int_0^R (k_2^2 + k_1^2/r^2) r dr + C_2 \int_0^{aR} (k_2^2 + 2v_2 k_1 k_2/r + k_1^2/r^2) r dr + C_3 \int_0^{aR} (k_2 + k_1/r)^2 r dr + C_4 U \int_0^{aR} (k_2 + k_1/r) r dr, \quad (8)$$

$$T_{\max} = \pi \omega^2 \left(\rho_1 a \int_0^R k_3^2 r dr + \rho_2 b \int_0^{aR} k_3^2 r dr \right), \quad (9)$$

且有^[11,12]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial A} (E_{\max} - T_{\max}) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial B} (E_{\max} - T_{\max}) = 0, \end{cases} \quad (10)$$

3.2 自由振动固有频率和振幅

求压电泵压电振子自由振动固有频率时,有电压 $U=0$ 。综合式(8)~(10),可得到以 A, B 为未知数的方程组:

$$\begin{cases} k_4 A + (k_5 - k_6 \omega^2) B = 0 \\ (k_5 - k_6 \omega^2) A + k_7 B = 0, \end{cases} \quad (11)$$

式中 k_4, k_5, k_6, k_7 为经计算得到的由 $k_1, k_2, k_3, \rho_1, \rho_2$ 组成的常数。

由式(11)关于 A, B 的系数行列式等于零,可解得压电振子轴对称弯曲振动的最低谐振频率为:

$$f = [(k_5 - \sqrt{k_4 k_7})/k_6]^{1/2} / 2\pi, \quad (12)$$

当压电陶瓷两电极上加上交流电压时,有 $U \neq 0$,压电振子的最大位移出现在圆心处,在式(7)中,令 $r=0, \sin(\omega t + \varphi) = 1$,则中心点振幅为 $w_0 = A + B$,此时方程组(11)变为:

$$\begin{cases} k_4 A + (k_5 - k_6 \omega^2) B = C_4 U (4\alpha^2 - 4\alpha^4) \\ (k_5 - k_6 \omega^2) A + k_7 B = C_4 U (6\alpha^3 - 6\alpha^6), \end{cases} \quad (13)$$

由方程组(13)可解得压电振子最大振幅为:

$$w_0 = \left[4(1 - \alpha^2) + \frac{4(1 - \alpha^2)(k_5 - k_6 \omega^2) - 6k_4(\alpha - \alpha^4)}{(k_5 - k_6 \omega^2)^2 - k_4 k_7} \times (k_4 - k_5 + k_6 \omega^2) \right] C_4 U \alpha^2 / k_4, \quad (14)$$

4 泵流量分析

流体在“Y”形流管中正反向流动时的压强损

失满足如下关系^[1,3,13]:

$$\Delta p_z = \xi_z \rho v_z^2 / 2, \quad (15)$$

$$\Delta p_f = \xi_f \rho v_f^2 / 2. \quad (16)$$

式中: Δp_z 为正流压强损失, ξ_z 为正流压强损失系数, v_z 为正流平均速率, ρ 为流体密度, Δp_f 为反流压强损失, ξ_f 为反流压强损失系数, v_f 为反流平均速率。

泵工作时,流体输入口和排出口压强相等,即 $\Delta p_z = \Delta p_f = \Delta p$, 流体不可压缩,令 $\lambda = S(2\Delta p/\rho)^{1/2}$,由式(15),(16)可计算出流管内正反向流动时的瞬时流量:

$$Q_z = S v_z = S \sqrt{\frac{2\Delta p_z}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{\xi_z}} = \lambda \xi_z^{-1/2}, \quad (17)$$

$$Q_f = S v_f = S \sqrt{\frac{2\Delta p_f}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{\xi_f}} = \lambda \xi_f^{-1/2}. \quad (18)$$

式中: S 为合管的横截面积, Q_z 为正流瞬时流量, Q_f 为反流瞬时流量。

轴对称圆形压电振子在正弦电压的驱动下振动时,其变形曲面近似为旋转抛物面^[14],最大振幅出现在压电振子的中心,按图2所示坐标系,中心点的振幅为 w_0 ,则该抛物面的方程可表示:

$$w(r) = w_0 (1 - r^2/R^2), \quad (19)$$

于是,可得到压电振子从平衡位置运动到最大位置时的泵腔容积变化量 ΔV_{\max} :

$$\Delta V_{\max} = 2\pi \int_0^R w_0 (1 - r^2/R^2) r dr = \pi w_0 R^2 / 2, \quad (20)$$

当压电振子从平衡位置向泵腔外运动到最大位置时,泵腔吸入流体,两只“Y”形流管有一只处于正流状态,另一只处于反流状态,结合式(17),(18)可得:

$$\Delta V_{\max} = \bar{Q}_z + \bar{Q}_f = \lambda (\xi_z^{-1/2} + \xi_f^{-1/2}), \quad (21)$$

式中 \bar{Q}_z, \bar{Q}_f 为压电振子从平衡位置运动到最大位置时间段内 Q_z, Q_f 的平均值。

由式(20),(21)可解得 λ :

$$\lambda = \pi w_0 R^2 / [2(\xi_z^{-1/2} + \xi_f^{-1/2})], \quad (22)$$

同理,当压电振子从最大位置向泵腔内运动到平衡位置时,泵腔排出流体,不计流体压强对振动的影响,则泵排出的流体量也可用式(21)表示,但此时流体流动方向完全改变,原来处于正流状态的流管变为反流,而原来处于反流状态的流管则变为正流。因此,总的泵流量可以用流进流出其中任意单只“Y”形流管流量的差 $\Delta V'$ 来表示。

$$\Delta V' = \lambda(\xi_z^{-1/2} - \xi_i^{-1/2}), \quad (23)$$

由于一个周期内单只流管经过两次变换。于是,当振动频率为 f 时,单位时间内的泵流量可表示为:

$$V = 2f\Delta V' = \pi\omega_0 R^2 f \frac{\eta - 1}{\eta + 1}, \quad (24)$$

式中 $\eta = \sqrt{\xi_i/\xi_z}$ 。

计算泵流量时,流阻 ξ_z, ξ_i 的值难于用解析方法得到。本研究采用有限元法,对单只“Y”形流管进行建模,求出其进出口端的压强损失及平均速率,然后将模拟结果代入式(21),(22)中,即可求得一定几何参数下“Y”形流管的流阻。

5 “Y”形流管的有限元分析

5.1 建模与边界条件

利用 ANSYS 软件对“Y”形流管内的流体流动状态进行模拟分析。选用 FLUID142 单元建立三维模型来描述“Y”形流管,在建模过程中为了能更清楚地分析分叉处流体的状态,网格从管的端口往中间分叉处逐渐变密,尖角周围网格密度是端口附近网格密度的 6 倍,建模时“Y”形流管几何参数如表 1 所示(参见图 1)。

表 1 “Y”形流管几何参数

Tab. 1 Geometrical dimensions of Y-shape tube

参数	L	l	a	b	c
值(mm)	30	15	1.6	1.2	1.5

改变支管夹角 θ 的值,使其在 $5^\circ \sim 60^\circ$ 之间变化,每隔 5° 建立一个“Y”形流管的有限元模型,分别进行分析求解。图 3 所示为支管夹角 $\theta = 45^\circ$ 的“Y”形流管的有限元模型。

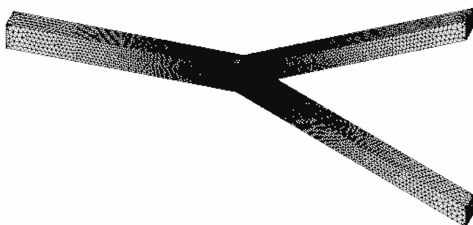


图 3 “Y”形流管的有限元模型($\theta = 45^\circ$)

Fig. 3 Finite element model of Y-shape tube ($\theta = 45^\circ$)

模拟过程中,分析所选用的流体为水,其密度 $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$,动态粘性系数为 1.01。加载时,在进口截面上加上非零速度载荷,出口截面上加上零压力载荷,其它各面加上零速度载荷。

5.2 求解结果

图 4 与图 5 分别列出了载荷相同的条件下支管夹角为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 的“Y”形流管正流和反流压强场变化图。

由图 4,图 5 可知,“Y”形流管内的压强变化均比较平缓,正流的压强变化随着支管夹角的增大而趋于平缓而反流的压强变化随着支管夹角的增大而趋于剧烈。但无论处于正流状态还是反流状态,“Y”形流管内总的压强变化都比较平缓。

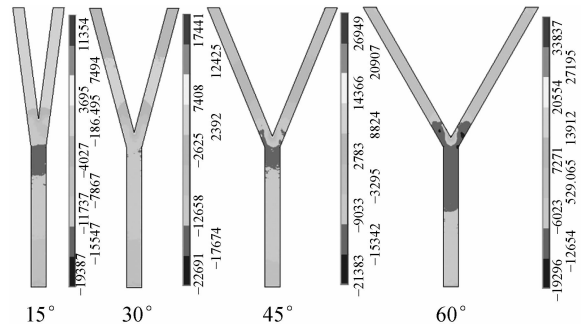


图 4 不同支管夹角下的正流压强变化

Fig. 4 Pressure variation at different branch angles along positive direction

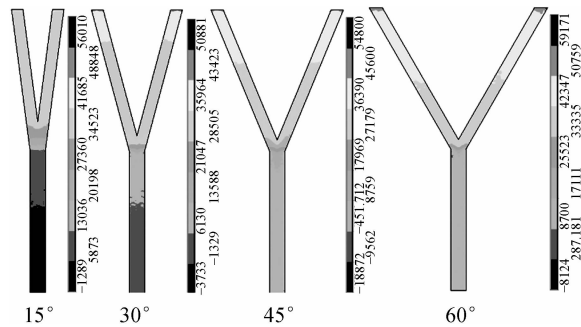


图 5 不同支管夹角下的反流压强变化

Fig. 5 Pressure variation at different branch angles along negative direction

对各个角度的“Y”形流管进行模拟,得到正反流进出口的压强差即为正反流压强损失,并计算得到正反向流阻,按这些流阻值绘出了正反向流阻值随支管夹角变化的曲线如图 6。

由图 6 可知,当支管夹角增大时,流管正反向流阻系数均随之增大。另外,正向流阻系数均不

等于反向流阻系数, 这证明“Y”形流管具有正反向流阻系数不等的特性, 可以用来制作无阀压电泵。

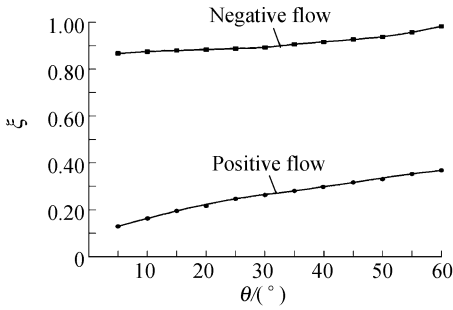
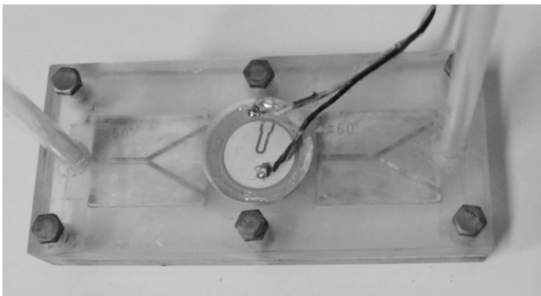


图 6 流阻系数随支管夹角变化曲线

Fig. 6 Variation curves of flow resistance coefficients with branch angles

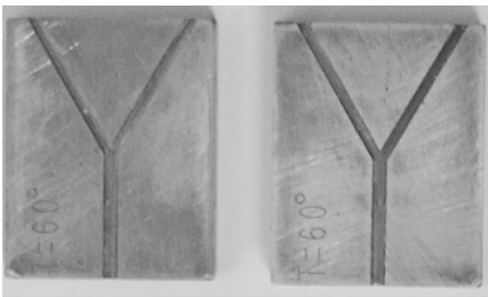
6 理论与实验比较

图 7 所示为实际试作的“Y”形流管无阀压电泵及其流管的照片。“Y”形流管几何参数如表 1 所示, 其支管夹角 $\theta=60^\circ$; 压电振子几何参数为: $R=25\text{ mm}$, $r=20\text{ mm}$, $a=0.34\text{ mm}$, $b=0.20\text{ mm}$; 各层材料性能参数如表 2 所示。



(a) “Y”形流管无阀压电泵

(a) Piezoelectric valveless pump with Y-shape tubes



(b) “Y”形流管

(b) Y-shape tubes

图 7 实验用泵及“Y”形流管

Fig. 7 Experimental pump and its Y-shape tubes

表 2 压电振子各层材料性能参数

Tab. 2 Property parameters of piezoelectric vibrator

参数	材料	
	PZT	Brass
密度 (kg/m^3)	7 750	8 700
弹性模量 (GPa)	/	98
泊松系数	/	0.34
S_{11}^D ($10^{-12}\text{ m}^2/\text{N}$)	10.1	/
S_{12}^D ($10^{-12}\text{ m}^2/\text{N}$)	5.34	/
g_{31} ($10^{-3}\text{ V}\cdot\text{m}/\text{N}$)	-11.1	/
β_{33}^T ($10^7\text{ m}/\text{F}$)	6.65	/
k_p	0.58	/

实验时所加的电压 $U=110\text{ V}$, 根据式(12)计算得到压电振子谐振频率为 $f=2\ 096\text{ Hz}$ 。根据式(14)计算压电振子的振幅时, 振幅值与频率变化有关系, 但在低频段频率对振幅的影响很小, 本文取 $f=50\text{ Hz}$ 时的振幅进行计算, $\omega=0.097\text{ mm}$ 。从图 6 可得 $\theta=60^\circ$ 的“Y”形流管正反向流阻分别为 $\xi_z=0.35$, $\xi_l=0.98$ 。将 ξ_z , ξ_l , ω 及振动频率 f 代入式(24)中, 即可得到各个频率下的理论泵流量。

图 8 所示为实验泵流量与理论泵流量随频率变化的曲线。由图 8 可知, 理论与实验泵流量都随频率的增大而增大, 且两者数值吻合较好, 当压电振子振动频率为 30 Hz 时, 两者相对误差为 12% , 这说明上述理论分析及数值模拟是正确的。

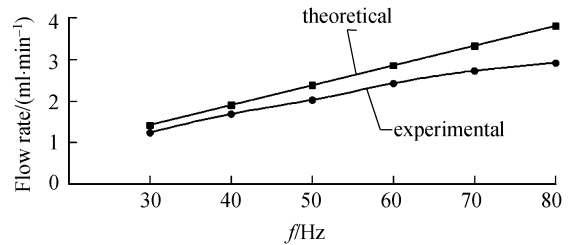


图 8 压电泵的理论 and 实验流量

Fig. 8 Experimental and theoretical pump flow rate

但理论泵流量与实验泵流量之间存在一定程度的误差, 且误差值随频率增大而增大。产生这个现象的原因是理论计算没考虑泵腔内流体压力对振幅的影响、实验误差以及压电泵气穴的影响^[15]。流体压力使压电振子向泵腔内振动的最大振幅小于向泵腔外振动的最大振幅; 气穴的产生在一定程度上将减小泵流量, 理论值与实验值的差值也在一定程度上反映了气穴对压电泵的影响。

响大小;另外,实验测量误差也对理论值与实验值的误差有较大影响。

7 结 语

(1)对“Y”形流管无阀压电泵压电振子的振动特性及其流管内的流动特性进行了理论分析,建立了压电振子谐振频率及振幅的计算公式和泵流量计算公式;

(2)基于有限元法,对“Y”形流管内流体流动

状态进行了模拟,得到流管内正反流压强变化均比较平缓的结论;同时,根据模拟结果,经计算得到了“Y”形流管正反向流阻;

(3)将理论泵流量与实验泵流量进行了比较,结果表明理论泵流量与实验泵流量随频率变化趋势一致,且两者最小相对误差为12%;随后对理论泵流量与实验泵流量之间的误差变化及产生原因进行了分析,证明了理论分析及模拟结果的正确性。

参考文献:

- [1] ERIK S, Göran S. A valve-less diffuser/nozzle-based fluid pump[J]. *Sensors and Actuators A*, 1993, 39(12): 159-176.
- [2] FORSTER F K, BARDELL R L, AFROMOWITZ M A, *et al.*. Design, fabrication and testing of fixed-valve micro-pumps[C]. *Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division*, 1995, 234: 39-44.
- [3] IZZO I, ACCOTO D, MENCIASSI A, *et al.*. Modeling and experimental validation of a piezoelectric micropump with novel no-moving-part valves[J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, 133(1): 128-140.
- [4] 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. Valve-less piezoelectric pump with unsymmetrical slope chamber bottom[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 641-647. (in Chinese)
- [5] 张建辉, 路计庄, 夏齐霄, 等. 压电振子及流体对泵近场噪声的影响[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 628-634.
ZHANG J H, LU J ZH, XIA Q X, *et al.*. Influence of piezoelectric vibrator and fluid on close noise field of pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 628-634. (in Chinese)
- [6] 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, CHEN G M. Research on piezoelectric pump and its development[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 10(6): 619-625. (in Chinese)
- [7] 张建辉. “Y”形流管无阀压电泵[P]. 中华人民共和国专利, ZL99110248. 7
ZHANG J H. Y-Shape piezoelectric valveless pump[P]. Patent of P. R. C, ZL99110248. 7. (in Chinese)
- [8] ZHANG J H, LI Y L, XIA Q X. Research on the Valve-less Piezoelectric Pump with Y-shape Pipes[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 2007, 2(2): 144-151.
- [9] 王敏中, 王炜, 武际可. 弹性力学教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
WANG M ZH, WANG W, WU J K. *Courses of Elastic Mechanics*[M]. Beijing: Publication Company of Beijing University, 2002. (in Chinese)
- [10] 栾桂东, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能矩阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
LUAN G D, ZHANG J D, WANG R Q. *Piezoelectric Energy Reverse Equipment and Matrix*[M]. Beijing: Publication Company of Beijing University, 1990. (in Chinese)
- [11] 王矜奉, 姜祖桐, 石瑞大. 压电振动[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
WANG Q F, JIANG Z T, SHI R D. *Piezoelectric vibration*[M]. Science Publication Company, 1989. (in Chinese)
- [12] 张志明, 张开达, 杨乃宾. 复合材料结构力学性能[M]. 北京航空航天大学出版社, 1993.
ZHANG ZH M, ZHANG K D, YANG N B. *Structural and Mechanical Properties of Compound Material*[M]. Beijing: Publication Company of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 1993. (in Chinese)
- [13] ULLMANN A. The piezoelectric valve-less pump-performance enhancement analysis[J]. *Sensors and Actuators A*, 1998, 69: 97-105.

- [14] 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)
- [15] ZHANG J H, XIA Q X, LAI D H, *et al.*. Discovery and analysis on cavitation in piezoelectric pumps[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 17(4): 591-594.

作者简介:张建辉(1963—),男,日本国立山形大学工学博士,主要研究方向为压电陶瓷在流体机械方面的应用研究。E-mail:zhangjh@nuaa.edu.cn

(本栏目编辑 李树军)