

变截面“Y”型流管无阀压电泵原理及试验*

黄俊¹, 张建辉¹, 王守印²

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

(2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春, 130033)

摘要 根据三通全扩散/收缩流管的结构形式,设计了一种无阀压电泵——变截面“Y”型流管无阀压电泵。首先,分析了变截面“Y”型流管无阀压电泵的工作原理;然后,对变截面“Y”型流管流阻和泵流量进行理论分析,对变截面“Y”型流管进行模拟,得到流管正反向压强损失系数;最后,制作变截面“Y”型流管无阀压电泵样机,并进行流量试验。试验表明:当驱动电压为 100 V、驱动频率为 12.4 Hz 时,流量达到最大,为 25.7 ml/min;使用定频 12.4 Hz 改变电压,当电压为 200 V 时,最大流量达到 41.6 ml/min。该组试验证明了变截面“Y”型流管无阀压电泵的有效性。

关键词 压电; 泵; 无阀; 变截面“Y”型流管

中图分类号 TH38

引言

将具有逆压电效应的压电振子作为驱动源,由具有正反向流阻不同特性的异型结构流管作为阀,以驱动流体做宏观上单向流动的无阀压电泵。因其结构简单、加工方便和易于微小化等优点,吸引了众多研究者的青睐^[1-11]。

目前,多种结构形式的无阀压电泵应用于生物、医疗和卫生等领域。Stemme 等^[3]设计了圆锥形流管无阀压电泵。Gerlach^[4]设计了方锥形流管无阀压电泵,锥形流管结构简单、易于加工,但会产生大范围的涡旋。Foster 等^[5]利用 Tesla 阀设计了双环管无阀压电泵,但该流管结构复杂,沿程损耗大。张建辉等^[6]发明了“Y”型流管,并设计了“Y”型流管无阀压电泵,其结构简单,内部涡旋范围小,但泵流量较小。夏齐霄等^[7-10]设计了非对称坡面腔底无阀压电泵,该泵结构紧凑,易于微型化、集成化,但非对称坡面腔底的存在增加了泵腔内部涡旋范围,不利于在生物、医疗领域应用。何秀华等^[11]提出了三通全扩散/收缩管,利用有限元软件对其进行了数值分析。

可见,各类无阀压电泵在生物、医疗和卫生等领域均有优缺点,为了抑制大涡旋的缺点并发挥大流量的优点,笔者根据三通全扩散/收缩流管的结构形

式,设计了一种变截面“Y”型流管无阀压电泵。首先,分析变截面“Y”型流管无阀压电泵的工作原理;然后,对变截面“Y”型流管流阻和泵流量进行理论分析,对变截面“Y”型流管进行模拟,得到流管正反向流阻;最后,制作变截面“Y”型流管无阀压电泵样机并进行流量试验,以证明该原理的可行性。

1 泵结构与工作原理

变截面“Y”型流管是由一支合管及两支完全相同的支管组成。流管的 3 支管皆为方形锥形管,两支管 1,2 与合管 3 呈中心对称分布,支管 1,2 的几何参数完全相同,如图 1 所示。设合管 3 扩散角为 α ,正向入口宽为 a ,长为 l ;两支管的扩散角为 β ,正向出口宽为 b ,夹角为 2θ ;整管长为 L ,整管的高度为 h 。

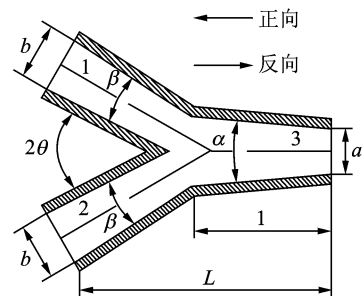


图 1 变截面“Y”型流管结构图

Fig. 1 Variable cross section Y-shape tube

* 国家自然科学基金资助项目(51075201,51275235)
收稿日期:2012-12-27;修回日期:2013-01-15

变截面“Y”型流管无阀压电泵主要由压电振子、泵体及一对变截面“Y”型流管组成,如图2所示。

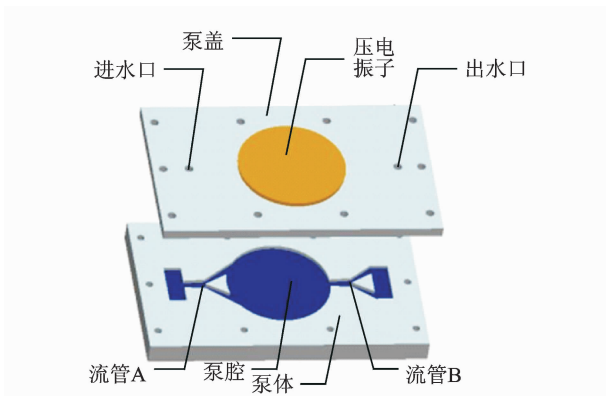


图2 变截面“Y”型流管无阀压电泵结构图

Fig.2 Valveless piezoelectric pump with variable cross section Y-shape tubes

对压电振子施加交变电压,其将产生振动,从而引起泵腔容积周期性变化,带动腔内液体运动,此时变截面“Y”型流管起到了阀的功能。当压电振子上下往复运动时,泵腔容积交替增大或减小,泵腔两端的变截面“Y”型流管A,B同时吸入或排出液体。由于流体沿变截面“Y”型流管正向和反向流动时,所受流阻不等,即当流体在变截面“Y”型流管中流动时,合管3的端口作为输入口、两支管1,2的端口作为排出口(定义为正向流)与合管3的端口作为排出口、两支管1,2的端口作为输入口(定义为反向流)的流动阻力是不同的,从而在宏观上使液体朝单一方向运动。

2 流管流阻与泵流量分析

流体在流经变截面“Y”型流管时会克服局部阻力和沿程阻力,从而产生压强损失。根据图1和Bernoulli方程可知,当流体沿正向分流时,合管3到分叉管1的压强损失为

$$\Delta P_{3,1} = P_3 + \frac{\rho}{2}v_3^2 - (P_1 + \frac{\rho}{2}v_1^2) \quad (1)$$

合管3到分叉管1的压强损失系数为

$$K_{3,1} = \frac{P_3 + \frac{\rho}{2}v_3^2 - (P_1 + \frac{\rho}{2}v_1^2)}{\frac{\rho}{2}v_3^2} \quad (2)$$

该损失系数包括沿程阻力和局部阻力的压强损失系数。

同理,合管3到分叉管2的压强损失系数为

$$K_{3,2} = \frac{P_3 + \frac{\rho}{2}v_3^2 - (P_2 + \frac{\rho}{2}v_2^2)}{\frac{\rho}{2}v_3^2} \quad (3)$$

根据文献[12]可得出变截面“Y”型流管的分流压强损失系数为

$$K_D = \frac{Q_1}{Q_3}K_{3,1} + \frac{Q_2}{Q_3}K_{3,2} \quad (4)$$

当流体沿反向合流时,分叉管1到合管3的压强损失系数为

$$K_{1,3} = \frac{P_1 + \frac{\rho}{2}v_1^2 - (P_3 + \frac{\rho}{2}v_3^2)}{\frac{\rho}{2}v_3^2} \quad (5)$$

分叉管2到合管3的压强损失系数为

$$K_{2,3} = \frac{P_2 + \frac{\rho}{2}v_2^2 - (P_3 + \frac{\rho}{2}v_3^2)}{\frac{\rho}{2}v_3^2} \quad (6)$$

变截面“Y”型流管的合流压强损失系数为

$$K_M = \frac{Q_1}{Q_3}K_{1,3} + \frac{Q_2}{Q_3}K_{2,3} \quad (7)$$

对圆形压电振子施加正弦电压产生上下振动,使泵腔容积变化,以驱动腔内流体的运动。当驱动频率一定时,压电振子振型曲面近似为旋转抛物面,最大振幅出现在压电振子的中心。设压电振子半径为 R ,最大振幅为 w_0 ,该振型可表示为

$$w(r) = w_0(1 - r^2/R^2) \quad (8)$$

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} 为

$$\Delta V_{\max} = 2\pi \int_0^R w(r)rdr \quad (9)$$

根据文献[6]可知,在压电振子振动频率为 f 时,压电泵的流量可以近似表达为

$$Q = 2\Delta V_{\max}f \frac{\eta - 1}{\eta + 1} \quad (10)$$

$$\eta = \sqrt{K/K'} \quad (11)$$

由式(11)可知,当 $K \neq K'$ 时,则泵的流量 $Q \neq 0$,从而使流体在宏观上产生单一方向的流动。由于流管的压强损失系数难以用解析方法得到,因此本研究通过有限元软件对单支变截面“Y”型流管进行模拟分析,以确定该流管的损失系数,证明变截面“Y”型流管具有阀的特性。

3 模拟分析

建立变截面“Y”型流管几何模型。支管夹角 $2\theta = 60^\circ$, $\alpha = \beta = 8^\circ$,其他参数如表1所示。

表 1 变截面“Y”型流管几何参数

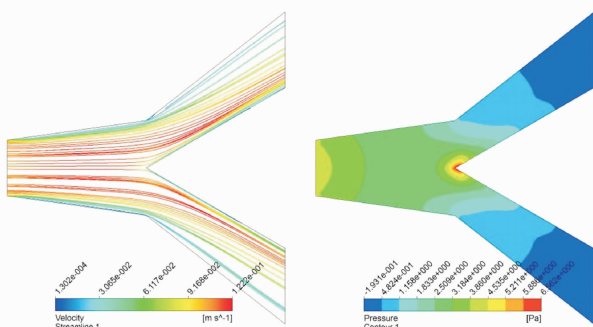
Tab. 1 Geometrical parameters of variable cross section

Y-shape tube

a/mm	h/mm	l/mm	L/mm
2	2	10	20

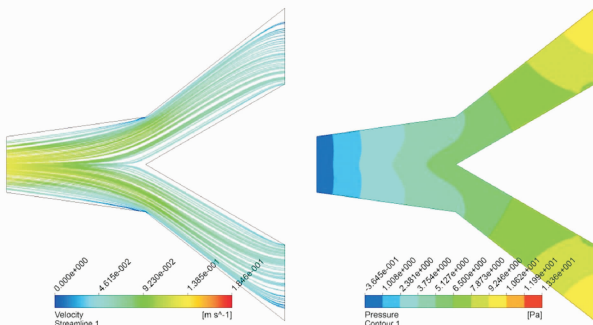
将所建立的模型导入有限元软件中,选用水为模拟介质,定义流管两端为压强载荷。无阀压电泵中压电振子的振动为微幅振动,引起泵腔内流体的流动可认为是层流,则流管两端面施加的压强差值不能过大。通过对流管流场的模拟计算,得到沿分流和合流方向流动时变截面“Y”型流管进出口端的平均速度。将其代入式(2~4)中,求出在一定压降下的压强损失系数。

图 3 为 $\Delta p=10 \text{ Pa}$ 时,变截面“Y”型流管内流体分流和合流的压强分布云图与速度流线图。



(a) 分流时速度流线图和压强分布云图

(a) Velocity streamlined pattern and pressure contour pattern of the tube along dividing flow



(b) 合流时速度流线图和压强分布云图

(b) Velocity streamlined pattern and pressure contour pattern of the tube along merging flow

图 3 $\Delta p=10 \text{ Pa}$ 时,变截面“Y”型流管分流和合流时速度流线图和压强分布云图

Fig. 3 Velocity streamlined patterns and pressure contour patterns of the tube, when $\Delta p=10 \text{ Pa}$

图 4 为分流和合流时,变截面“Y”型流管压强损失系数与压降关系曲线。

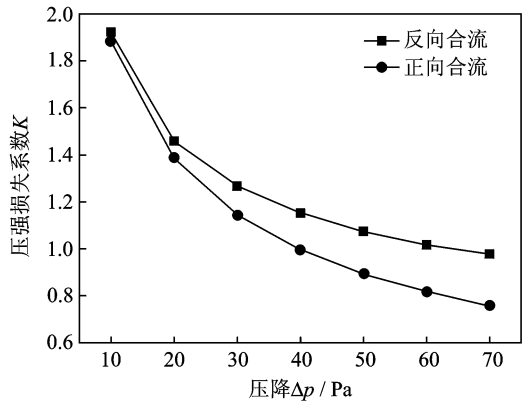


图 4 变截面“Y”型流管正反向流压强损失系数与压降关系曲线

Fig. 4 The curves between pressure drop and pressure loss coefficient of the tube along dividing flow and merging flow

模拟结果表明,随着压降的增加,沿变截面“Y”型流管分流和合流方向的压强损失系数逐渐减小,且分流时的损失系数小于合流时的损失系数。可知,流管分合流的压强损失系数比值均大于 1,由此可证明变截面“Y”型流管具有阀的特性。

4 试验验证

图 5 为实际制作的变截面“Y”型流管无阀压电泵样机的泵体部分,其流管的几何参数和模拟计算参数一致,泵腔直径为 48 mm。本研究采用的压电振子基底层材质为黄铜,其半径为 25 mm,厚度为 0.2 mm。压电陶瓷层半径为 15 mm,厚度为 0.2 mm。图 6 为泵流量测量试验图。试验驱动电压为 100 V,采用的流体为去离子水,通过改变压电振子的驱动频率来测量单位时间内压电泵的质量流,从

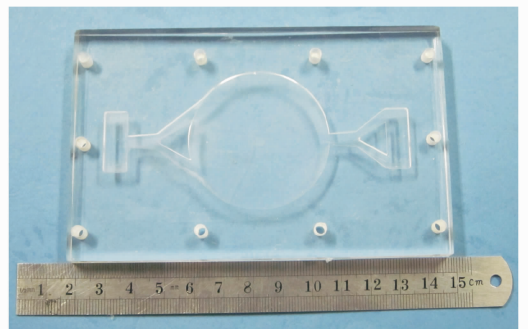


图 5 变截面“Y”型流管无阀压电泵泵体

Fig. 5 The photograph of the valveless piezoelectric pump with variable cross section Y-shape tubes

而得出该压电泵在 100 V 电压下流量随频率变化曲线,如图 7 所示。

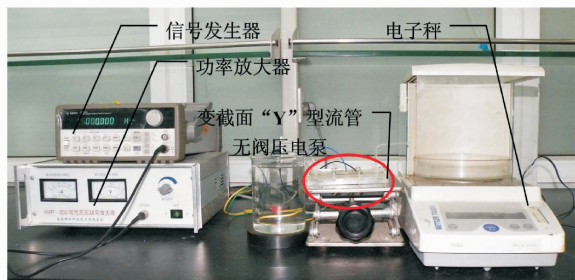


图 6 泵流量测试图

Fig. 6 Set-up of flow rate experiment

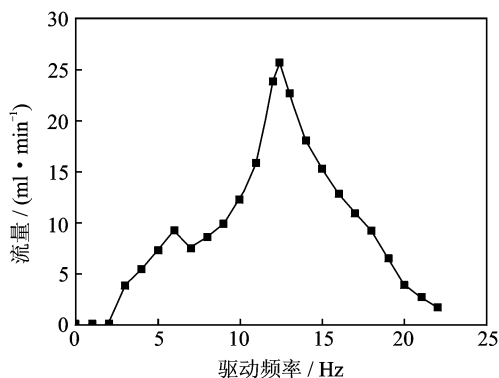


图 7 压电泵流量与驱动频率曲线图

Fig. 7 The curve between the flow rate and the driving frequency

试验可得,当频率为 12.4 Hz 时,该泵的流量达到最大为 25.7 ml/min。由图 7 可知,当压电振子驱动频率由 0 Hz 开始增加时,压电泵的流量随之增大;当频率达到 12.4 Hz 时,流量最大;之后随着频率的增加,流量随之减少。

当试验频率为 12.4 Hz 时,改变压电振子的驱动电压,得到该泵的流量与电压曲线如图 8 所示。该图表明压电泵的流量随电压增加而增加。当电压为 200 V 时,该泵流量达到 41.6 ml/min。

该组试验表明了变截面“Y”型流管压电泵的有效性,证明了变截面“Y”型流管具有正反向流动流阻不等的特性。

5 结论

1) 分析了变截面“Y”型流管无阀压电泵的工作原理。对变截面“Y”型流管正反向流动的压强损失系数进行了理论分析,并结合压电振子的振型表达式,对变截面“Y”型流管无阀压电泵的流量进行

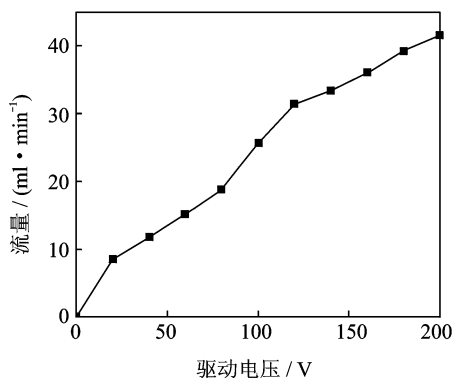


图 8 压电泵流量与驱动电压曲线

Fig. 8 The curve between the flow rate and the driving voltage

了理论分析。

2) 采用有限元法对变截面“Y”型流管进行了模拟仿真,得到了不同压降下流管正反向流的压强损失系数。结果表明,该流管具有阀的特性。

3) 实际制作了变截面“Y”型流管无阀压电泵,并对该泵的流量进行了测量。试验结果表明:使用定压 100 V 改变频率,当频率为 12.4 Hz 时,最大流量达到 25.7 ml/min;使用定频 12.4 Hz 改变电压,当电压为 200 V 时,最大流量为 41.6 ml/min。这个结果证明了变截面“Y”型流管无阀压电泵的有效性,也证明了变截面“Y”型流管具有正反向流动流阻不等的特性。

参 考 文 献

- [1] 黄毅,成伟,张建辉,等. 非对称坡面腔底无阀压电泵流场分析[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(3):295-299.
Huang Yi, Cheng Wei, Zhang Jianhui, et al. Analysis of flow field of piezoelectric pump with unsymmetrical slopes element[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(3):295-299. (in Chinese)
- [2] 胡笑奇,张建辉,黄毅. 仿尾鳍压电双晶片无阀泵的模拟与试验[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(2):193-197.
Hu Xiaoqi, Zhang Jianhui, Huang Yi. Simulation and design of caudal-fin-type valveless pump driven by piezoelectric bimorphs[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011,31(2):193-197. (in Chinese)
- [3] Stemme E, Stemme G. A valve-less diffuser/nozzle-based fluid pump[J]. Sensors and Actuators A, 1993,

- 39(12):159-167.
- [4] Gerlach T. Microdiffusers as dynamic passive valves for micropump applications[J]. Sensors and Actuators A, 1998, 69:181-191.
- [5] Forster F K, Bardell R L, Afromowitz M A, et al. Design, fabrication and testing of fixed-valve micropumps[C]//Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division. San Francisco: ASME Fluids Engineering Division, 1995, 234:39-44.
- [6] 张建辉,黎毅力,夏齐霄.“Y”形流管无阀压电泵流量及流管流阻特性分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11):136-141.
Zhang Jianhui, Li Yili, Xia Qixiao. Analysis of the pump volume flow rate and tube property of the piezoelectric valveless pump with Y-shape tubes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11):136-141. (in Chinese)
- [7] Xia Qixiao, Zhang Jianhui, Lei Hong, et al. Analysis on flow field of the valveless piezoelectric pump with two inlets and one outlet and a rotating unsymmetrical slopes element[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(3):474-483.
- [8] 夏齐霄,张建辉,李洪,等.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 Qixiao, Zhang Jianhui, Li Hong, et al. Valve-less piezoelectric pump with unsymmetrical slope chamber bottom[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4):641-647. (in Chinese)
- [9] Xia QiXiao, Zhang JianHui, Lei Hong, et al. Theoretical analysis of novel valveless piezoelectric pump with cluster of unsymmetrical hump structure[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12):2391-2397.
- [10] Xia Qixiao, Zhang Jianhui, Lei Hong, et al. Theoretical analysis and experimental verification on flow field of piezoelectric pump with unsymmetrical slopes element[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(5):735-744.
- [11] 何秀华,王健,杨嵩,等.三通全扩散/收缩管无阀压电泵的流阻性能[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(6):497-501.
He Xiuhua, Wang Jian, Yang Song, et al. Flow resistance characteristics of valveless piezoelectric pump with three-way diffuser/nozzle tube[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(6):497-501. (in Chinese)
- [12] Oka K, Nozaki T, Ito H. Energy losses due to combination flow at tees[J]. Japan Society Mechanical Engineering, 1996, 39(3):489-498.



第一作者简介:黄俊,男,1981年2月生,博士研究生。主要研究方向为压电型微流体作动器的研究及流固耦合仿真分析。

E-mail: huangjun551@nuaa.edu.cn

