

文章编号 1004-924X(2016)02-0327-08

## 三棱柱阻流体无阀压电泵的设计与试验

张蕊华<sup>1</sup>, 张建辉<sup>2,3\*</sup>, 朱银法<sup>1</sup>, 胡笑奇<sup>1</sup>

(1. 丽水学院 工程与设计学院, 浙江 丽水 323000;

2. 广州大学 机械与电气工程学院 广东 广州 510006;

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

**摘要:**以三棱柱阻流体为无移动部件阀, 结合 3D 打印技术的快速一体成型特点, 设计并制作了以压电振子为动力源的三棱柱阻流体无阀压电泵。分析了该无阀压电泵的工作原理、理论流量和振子振动特性, 推导出了它的流量表达式。利用有限元法对三棱柱阻流体的流阻特性进行了仿真模拟, 由其内部压强分布及进出口流速情况, 定性分析了三棱柱阻流体的正反向流阻大小。最后, 使用 3D 打印机制作了该无阀泵的试验样机, 并进行了流阻和流量测量试验。试验结果表明: 三棱柱阻流体具有正反向绕流流阻不等的特性, 当驱动电压为 550 V, 驱动频率为 8 Hz 时, 该压电泵的输出流量达到最大, 为 29.8 mL/min。结果证明了该三棱柱阻流体无阀压电泵具有良好的输送流体的能力。

**关键词:**无阀压电泵; 三棱柱; 阻流体; 流阻测量; 流量测量

**中图分类号:** TH38; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0327

## Design and experiment of valveless piezoelectric pump with triangular prism bluff body

ZHANG Rui-hua<sup>1</sup>, ZHANG Jian-hui<sup>2,3</sup>, ZHU Yin-fa<sup>1</sup>, HU Xiao-qi<sup>1</sup>

(1. College of Engineering and Design, Lishui University, Lishui 323000, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

3. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangjh@nuaa.edu.cn

**Abstract:** In combination of the rapid prototyping of 3D printing technology, a valveless piezoelectric pump in the micro-electromechanical system with a triangular prism bluff body was designed and fabricated. For the pump, a piezoelectric vibrator was used as its exciting source and a triangular prism bluff as its valve without moving parts. The working principles, theoretical flow and the vibration characteristics of vibrator were analyzed, and its flow expression was derived. Then, the flow resistance characteristics of triangular prism bluff body was simulated by using finite element method. On the basis of interior pressure distribution and flow speeds in the import and export of the pump, the flow resistances in positive and negative directions were analyzed qualitatively. Finally, an experimen-

收稿日期: 2015-09-20; 修订日期: 2015-10-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51375227, No. 51207068); 浙江省自然科学基金资助项目 (No. LY14E050002)。

tal prototype for the valveless piezoelectric pump was fabricated by using a 3D printing machine, and some experiments on flow resistances and flow rates of the pump were measured. The results show that the triangular prism bluff body has different flow resistances in positive and negative directions. The maximum flow rate of the piezoelectric pump obtained is 29.8 ml/min under peak-to-peak voltage of 550 V (8 Hz). The experimental results validate that the pumping performance of the valveless piezoelectric pump with triangular prism bluff body is excellent.

**Key words:** valveless piezoelectric pump; triangular prism; bluff body; flow resistance measurement; flow rate measurement

## 1 引言

以压电材料为动力源的压电泵作为一种新型的流体输送装置,因具有无电磁干扰、易于小型化和微型化以及可实现流量的精密控制等优点,在医疗、生物、精密化学等需要微流体传输领域具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。其中,采用无移动部件阀来控制流体单向输送的无阀压电泵,由于减少了活动阀体,因而也消除了机构间的磨损和润滑,具有加工成本低、便于集成化等特点,得到众多研究者的青睐<sup>[4-10]</sup>。

目前,较为常见的无阀压电泵多为在泵腔外部搁置无移动部件阀,如 Erik Stemme 等人提出的锥形流管压电泵<sup>[5]</sup>, Foster 等提出的 Tesla 阀压电泵<sup>[6]</sup>, 张建辉提出的“Y”型流管无阀压电泵<sup>[7]</sup>等。由于外置无移动部件阀会增大微泵体积,从而阻碍其在微机电系统中的进一步密集集成。为此,夏齐霄等人发明了非对称坡面无阀压电泵<sup>[8]</sup>,其利用流体流经非对称坡面形成的湍流与旋涡,实现了在传输过程中可以混合搅拌。随后,纪晶等设计了半球缺阻流体无阀泵<sup>[9-10]</sup>,利用阻流体的正反向流阻差实现流体的单向传输;该泵内部的半球缺绕流可加剧湍流的产生,实现对流体的高效混合。

虽然非对称坡面无阀压电泵和半球缺阻流体无阀泵都具有较好的流体输送能力,但是由于其结构中的坡面腔底和半球缺的阻流体面分别为坡面和球面,难于机械加工,具有周期长,成本高,不易微型化等不足,大大降低了该类无阀泵在微机电系统中的应用。因此,本文结合 3D 打印技术的快速一体成型特点,提出了三棱柱阻流体与泵腔一体化的三棱柱阻流体无阀压电泵,具有结构简单、易加工,成本低,更易微型化等优点,对

压电泵在微流体混合系统中的集成化应用具有促进作用。

本文以三棱柱阻流体为无移动部件阀,设计以压电单晶片为动力源的三棱柱阻流体无阀压电泵。首先,对该泵的工作原理、振子振动特性和泵理论流量进行理论分析;其次,利用有限元法对三棱柱阻流体的流阻特性进行计算;最后,使用 3D 打印机制作该无阀泵的试验样机,并进行流阻及泵特性试验,验证了设计方案的可行性。

## 2 泵结构及工作原理

三棱柱阻流体无阀压电泵主要由压电振子、泵盖、泵体、三棱柱组和流管等组成,其结构如图 1

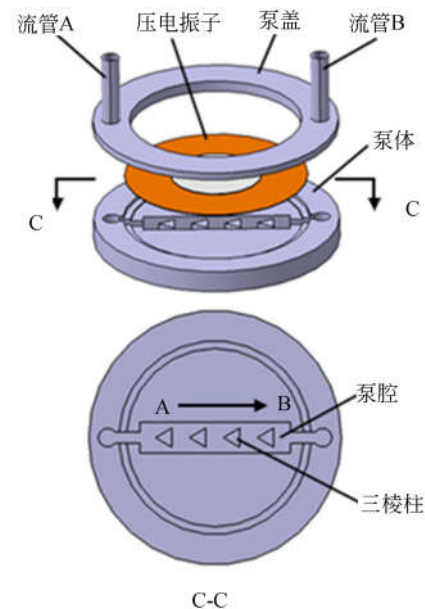


图 1 三棱柱阻流体无阀压电泵结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of valveless piezoelectric pump with triangular prism bluff body

所示。泵腔内的三棱柱组呈同向均布单行排列,棱边对应的流管为泵入口处,棱面对应的流管为泵出口处。为方便描述,规定流体由入口处流入、经出口处流出的流动为正向流动;反之,由出口处流入、经入口处流出为反向流动。

压电振子的往复振动引起泵腔的容积变化,使流体经由泵腔两端的流管流入腔内或由泵腔经两端的流管流出。具体过程为:当压电振子从平衡位置向上运动时,此时无阀泵处于吸程状态,泵腔体积增大、腔内压力降低,流体经泵腔两侧的流管 A 和 B 同时流入泵内,如图 2(a)所示;当压电振子由最高点向下运动时,此时无阀泵处于排程状态,泵腔体积减小、压力升高,腔内的流体经流管 A 和 B 同时被排出泵外,如图 2(c)所示。当压电泵处于吸程时,三棱柱的棱边作为迎流面的阻

力系数远小于棱面作为迎流面的阻力系数,因此从 A 端进入泵腔的流体体积多于从 B 端进入的体积(见图 2(b));同理,当压电泵处于排程时,棱边和棱面阻力系数差的存在,从 A 端流出的流体体积要小于从 B 端流出的体积(见图 2(d))。这样,在振子一个振动周期内,就实现了泵的一次吸入、排出的工作过程;随着振子的循环往复振动,泵腔内的流体在宏观上形成了单向流动。

### 3 理论分析

#### 3.1 压电振子振动分析

压电振子为圆形压电单晶片,如图 3 所示。为得到压电振子在工作中各点随时间变化的位置信息,以便进行泵腔容积变化的理论分析及计算,对该类压电振子的弯曲振动进行理论分析。

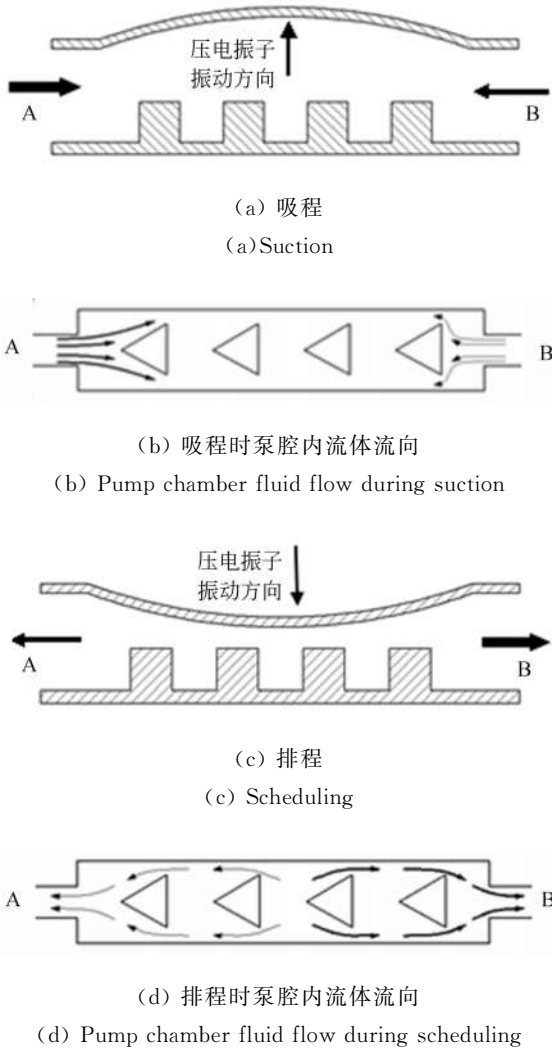


图 2 泵工作原理图

Fig. 2 Working process

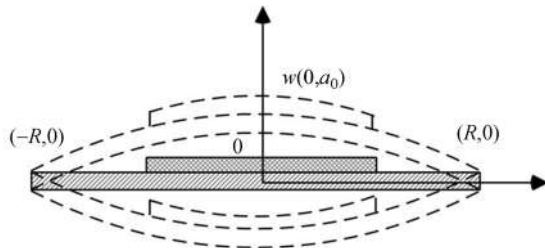


图 3 压电振子结构图

Fig. 3 Structure diagram of piezoelectric vibrator

取振子中心为坐标原点,在极坐标系下对其进行分析。 $R$ 为振子半径, $w$ 为振子弯度,则振子的 Euler 方程为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} (\nabla^2 - 1)(\nabla^2 - 1)w = 0 \\ \nabla^2 = \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{z^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $z = ar/R$ ;  $a^4 = \rho H \omega^2 R^4 / D$ ;  $D = (k_0 + k_c) H^3 / [24(1 - \nu^2)]$ ;  $r$ 为极径, $k$ 、 $\nu$ 分别为振子的弹性系数与泊松比, $H$ 为振子厚度。 $k = (k_0 + k_c) / 2$ ,  $\nu = \nu_0 = \nu_c$ ,其中  $k_0$ ,  $k_c$ ,  $\nu_0$ ,  $\nu_c$  分别为基体材料、压电陶瓷的弹性系数与泊松比。

式(1)的解可以表示为:

$$w = w_n(z) \cos(n\theta), \quad (2)$$

其中  $w_n$  为:

$$w_n = A J_n(z) + B I_n(z), \quad (3)$$

其中: $J_n(z)$ 、 $I_n(z)$ 为第一种 Bessel 函数, $I_n(z)$ 为第一种变形 Bessel 函数,A、B为任意常数。以上

方程即为振子振动形变方程。

由于圆形压电振子在往复运动中,其一阶振动变形曲面与旋转抛物面类似,为计算方便,采用抛物面的曲面方程模拟压电振子的振动形变。若设压电振子的初始状态( $t=0$ )时刻位置为水平位置,工作时开始向上振动,设压电振子上各点的振动幅值在压电泵的 4 个特征位置点保持不变,在每个阶段由振子振动形变而引起的泵腔容积变化量为<sup>[12]</sup>:

$$\Delta V = 2\pi \int_0^R r \cdot \omega(r, T/4) dr, \quad (4)$$

其中: $\omega(r, T/4)$ 为压电振子在各个工作阶段的各点振动幅值。

如图 3 所示,设压电振子中心的最大振幅为 $\omega(0, T/4) = a_0$ ,振子半径  $R$  处振幅为 $\omega(R, T/4) = \omega(-R, T/4) = 0$ 。可确定振子振动形变方程为:

$$\omega(r, T/4) = a_0(1 - r^2/R^2). \quad (5)$$

综合式(4)和式(5),可近似得到各个工作阶段泵腔容积变化量  $\Delta V$  为<sup>[10]</sup>:

$$\Delta V = 2\pi \int_0^R r \cdot a_0(1 - r^2/R^2) dr = \pi a_0 R^2/2. \quad (6)$$

由于振子的往复振动,导致泵腔容积发生周期性的变化,引起泵腔内压强的变化,从而实现泵的吸入、排出流体的工作过程。

### 3.2 泵流量分析

由于无阀压电泵的泵送性能取决于无移动部件阀的正反向流阻差<sup>[13]</sup>,则作为三棱柱阻流体无阀压电泵的核心部件,三棱柱的正反向流阻系数影响压电泵的流量。对于阻流体,其在绕流场内受到的阻力可分为摩擦阻力和形状阻力。因压电泵内的流动多为层流状态,所以起主导作用的是形状阻力。

当三棱柱的棱边处于迎流面时,形状阻力所产生的压强损失为:

$$\Delta p_p = \frac{\rho v_p^2}{2} C_{Dp}, \quad (7)$$

其中: $\Delta p_p$ 为三棱柱的正向绕流压强损失; $v_p$ 为正向绕流三棱柱的平均速率; $C_{Dp}$ 为正向绕流三棱柱的阻力系数; $\rho$ 为流体密度。

当三棱柱的棱面处于迎流面时,形状阻力所产生的压强损失为:

$$\Delta p_r = \frac{\rho v_r^2}{2} C_{Dr}, \quad (8)$$

其中: $\Delta p_r$ 为三棱柱的反向绕流压强损失; $v_r$ 为反向绕流三棱柱的平均速率; $C_{Dr}$ 为反向绕流三棱柱的阻力系数。

根据压强损失线性叠加原理<sup>[14]</sup>,当流体正、反向流经单列三棱柱组时有:

$$\sum \Delta p_p = \sum C_{Dp} \frac{\rho v_p^2}{2}, \quad (9)$$

$$\sum \Delta p_r = \sum C_{Dr} \frac{\rho v_r^2}{2}, \quad (10)$$

其中: $\sum \Delta p_p$ 、 $\sum \Delta p_r$ 分别为正、反向流总压强损失; $\sum C_{Dp}$ 、 $\sum C_{Dr}$ 分别为正、反向绕流三棱柱组的总阻力系数。

压电泵单位时间的泵流量分别可表示为<sup>[15]</sup>:

$$q_v = \Delta V f \frac{\sum C_{Dr} - \sum C_{Dp}}{2 + \sum C_{Dr} + \sum C_{Dp}}, \quad (11)$$

其中: $\Delta V$ 为压电泵一个振动周期内泵腔容积的最大变化量; $f$ 为压电振子振动频率。

由式(11)可知,当 $\sum C_{Dr} - \sum C_{Dp} \neq 0$ 时,则压电泵单位时间的流量 $q_v \neq 0$ ,从而可使泵产生单向流动。

由于三棱柱的棱边与棱面的形状阻力不同,所以三棱柱组的正、反向总流阻也不同,这种不为零的正反向流阻差使得三棱柱阻流体无阀压电泵能够单向泵送流体。

## 4 模拟分析

建立三棱柱阻流体无阀压电泵的流场模型,利用有限元软件 Fluent 进行计算,以分析三棱柱组的正反向流阻大小。模型中,泵腔宽度为 8 mm,深度为 4 mm,三棱柱底面为边长为 5 mm 的等边三角形,高度为 3.8 mm。模拟时,采用的工作介质为温度 20 °C 的水,其密度 $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ,动力黏度为 $1.003 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ ,进口压力为 100 Pa,出口压力为 0 Pa。图 4 和图 5 所示分别为三棱柱阻流体无阀压电泵泵腔内流场的速度流线和压强分布云图。

由图 4 可知,流体正向流经三棱柱组时,三棱柱之间形成的漩涡比较大,但进出口的流速并无

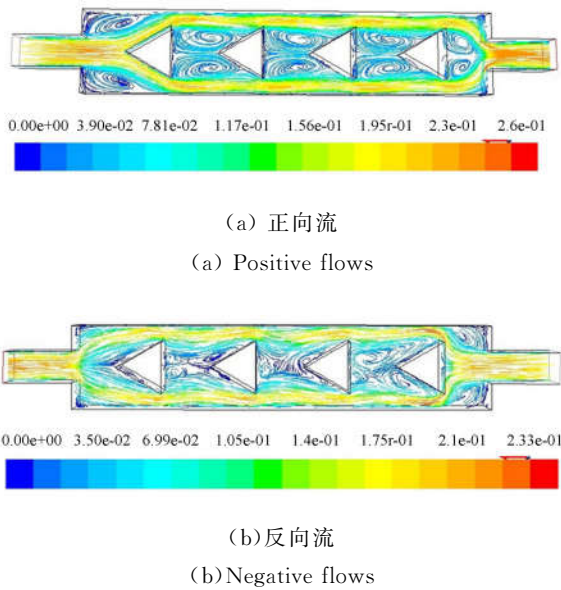


图 4 正反向流速度流线图

Fig. 4 Velocity vector distribution of positive and negative flows

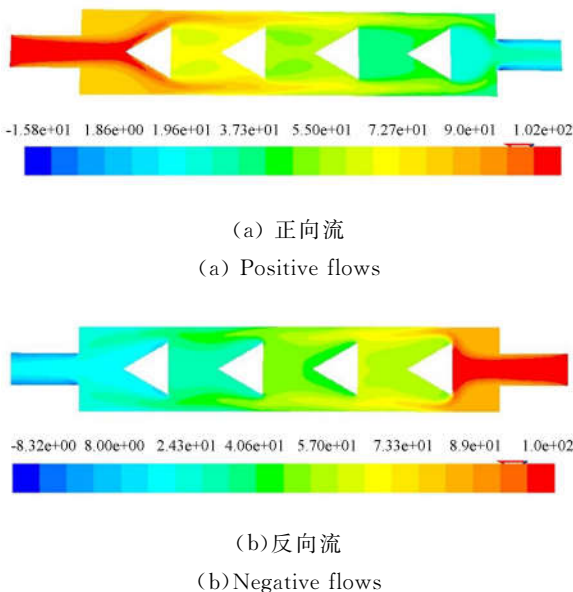


图 5 正反向流压强分布云图

Fig. 5 Pressure distribution of positive and negative flows

较大变化;流体反向流经三棱柱组时,棱柱间的涡流较小,为未充分发展状,进出口间的流速也无较大变化,但反向流速明显小于正向流速。由图 5 可知,流体正向流动时,三棱柱前后的压降要小于流体反向流动时的压降,且进出口间的压降也小于流体反向流动时的压降。由式(8)、(9)可知,正向绕流三棱柱组的总阻力系数  $\sum C_{Dp}$  要小于反向绕流三棱柱组的总阻力系数  $\sum C_{Dr}$ 。

### 4 试验研究

#### 4.1 流阻试验

为了测试三棱柱阻流体无阀压电泵的流阻大小及传输性能,采用天威(PrintRite)桌面 3D 打印机(见图 6)以 PLA 材料加工制作了三棱柱阻流体无阀压电泵的试验样机(见图 7),相关几何参数与模拟计算模型参数相同。图 6 中 3D 打印机的打印精度为 0.1 mm,图 7 中压电振子的参数为:基片直径为  $(50.0 \pm 0.1)$  mm,瓷片直径为  $(25.0 \pm 0.3)$  mm,基片厚度为  $(0.20 \pm 0.03)$  mm,总厚度为  $(0.40 \pm 0.05)$  mm。



图 6 泵体 3D 打印

Fig. 6 Pump body 3D printing



(a) 泵体

(b) 整机

(a) Pump body

(b) Physical map

图 7 三棱柱阻流体无阀压电泵

Fig. 7 Valveless piezoelectric pump with triangular prism bluff body

采用无阀压电泵的流阻测量方法<sup>[16]</sup>,测试三棱柱阻流体无阀压电泵的正反向流动阻力,流阻测试装置如图 8 所示。图 8 中  $H$  为水罐液面与泵入口端的高度差,通过改变水罐的液面高度来改变高度差  $H$  的值。让装有一定量液体(本试验为水)玻璃瓶与无阀压电泵正向连接,然后打开开

关并计时,测量单位时间内的出流液体质量,从而可得液面与出口流管在一定液面高度差下的泵出口质量流量;随后将该泵与玻璃瓶反向连接,重复上述测量方法,得到在一定液面高度差下(亦即进出口间压力差)泵内液体沿正向和反向流动时的出口质量流量。据此方法,改变不同液面高度差,即可得到泵内液体沿正、反向流动时的出口质量流量随进出口压力差的变化关系,从而可分析泵内液体沿正反向流动时的流阻大小。

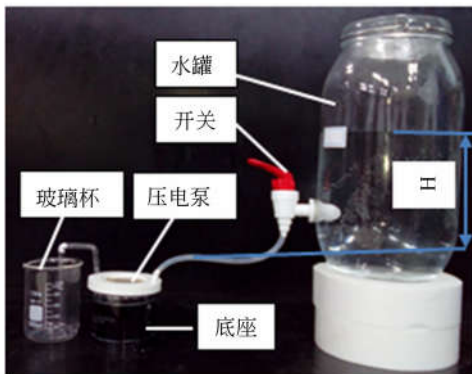


图 8 流阻测量试验图

Fig. 8 Flow resistance measuring experiment

图 9 所示为流体沿正向和反向流动时,三棱柱阻流体压电泵出口流量随进出口压差变化的曲线。

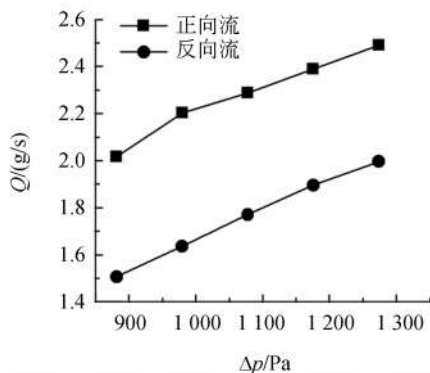


图 9 正反向流量随进出口压差的变化曲线

Fig. 9 Variation of positive/negative time difference valves vs pressure difference

图 9 中的试验结果表明:相同压差下,沿正向流动的出口流量大于反向流动的出口流量,即三棱柱阻流体具有正反向流阻不等的特性。

#### 4.2 泵流量试验

图 10 所示为压电泵的流量测量试验照片。使用的示波器型号为 Tektronix 的 AFG3022C,

功率放大器为南京佛能科技实业有限公司生产的 HVP-2070B。试验驱动电压峰值 550 V,采用的试验流体为去离子水,通过改变压电振子的驱动频率,来测量压电泵单位时间内的输出流量,从而得出压电泵在 550 V 电压下输出流量随频率变化的曲线。图 11 所示为三棱柱阻流体无阀压电泵的流量与频率曲线图。

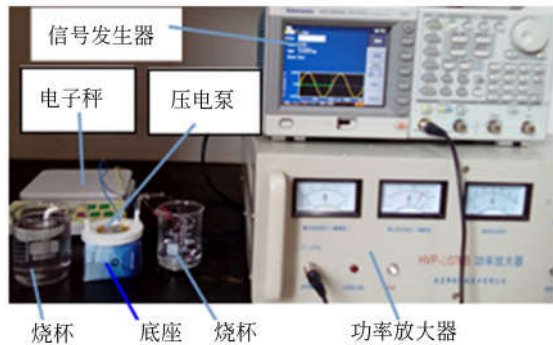


图 10 压电泵的流量测量试验照片

Fig. 10 Piezoelectric pump flow test

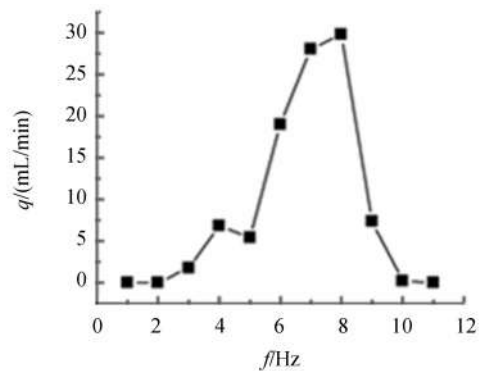


图 11 流量与驱动频率曲线图

Fig. 11 Curves of flow rate vs driving frequency

当驱动频率为 8 Hz 时,泵的最大输出流量达到最大,为 29.8 mL/min。说明压电振子的一阶固有频率接近 8 Hz,此时,压电振子的振幅最大,使得泵腔内吸入和排除流体的流量差最大。该试验证明了三棱柱阻流体无阀压电泵的有效性,也进一步证明了三棱柱阻流体的正向流动和反向流动时流阻不等的特性。

## 5 结 论

本文结合 3D 打印技术提出了三棱柱作为压电泵的无移动部件阀,设计并制作了三棱柱阻流

体无阀压电泵样机;理论分析了压电振子的振动特性,并根据阻流体的正反向绕流压强损失方程,推导出了该泵的流量表达式;对三棱柱阻流体无阀压电泵的流场进行了有限元模拟,由其内部压强分布及进出口流速情况,定性分析了三棱柱阻流体的正反向流阻大小;对该泵进行了流阻和流量测量试验。流阻试验结果表明,三棱柱阻流体

具有正反向绕流流阻不等的特性;流量试验结果表明,当驱动电压为 550 V,驱动频率为 8 Hz 时,该压电泵的输出流量达到最大,为 29.8 mL/min。试验证明了该泵具有良好的输送流体的能力。该泵实现了三棱柱阻流体与泵腔的一体化,有效减少了核心部件的数量,使工艺进一步简化。

#### 参考文献:

- [1] LINTEL H T G, POL F C M, BOUWSTRA S. A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon [J]. *Sensors and Actuators*, 1988, 15: 153-167.
- [2] 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.
- [3] 阙君武, 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. Research on piezoelectric pump and its development [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 619-625. (in Chinese)
- [4] 刘勇, 杨志刚, 吴越, 等. 压电泵吸程出流现象及其成因 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1104-1109.
- LIU Y, YANG ZH G, WU Y, *et al.*. Analysis on sucking process outflow phenomenon of piezoelectric pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1104-1109.
- [5] ERIK S, GORAN S. A valve-less diffuser/nozzle-based fluid pump [J]. *Sensors and Actuators*, 1993, 39(12): 159-167.
- [6] 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.
- [7] 张建辉, 王守印. 压电泵锥形流管无阀泵的研究—单向流动原理及泵流量 [J]. *压电与声光*, 2001, 23(1): 23-25.
- ZHANG J H, WANG SH Y. A study of piezoelectric valveless diffuser/nozzle-based fluid pump: one-way flow principle and the pump flow [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2001, 23(1): 23-25. (in Chinese)
- [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 Q X, ZHANG J H, LI H, *et al.*. Valveless piezoelectric pump with unsymmetrical slope chamber bottom [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 641-647. (in Chinese)
- [9] 张建辉, 曹炳鑫, 陈道根, 等. 半球缺阻流体无阀压电泵的实验验证 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 76-84.
- ZHANG J H, CAO B X, CHEN D G, *et al.*. Experimental verification on valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 76-84. (in Chinese)
- [10] 纪晶, 张建辉, 陈道根, 等. 无阀压电泵半球缺阻流体横向排列流阻干扰特性研究 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 340-346.
- JI J, ZHANG J H, CHEN D G, *et al.*. Flow resistance interference property of hemisphere-segment arranged in Transverse for Valve-less piezoelectric pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 340-346. (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 J F, JIANG Z T, SHI R D. *Piezoelectric Vibration* [M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [12] 张建辉, 路计庄, 夏齐霄, 等. 细胞或高分子输送用“Y”形流管无阀压电泵的工作原理及流量特性 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(9): 92-99.
- ZHANG J H, LU J ZH, XIA Q X, *et al.*. Working principle and flux characteristics of valve-less piezoelectric pump with Y-shape tubes for transporting cells and macromolecule [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(9): 92-99. (in Chinese)
- [13] SINGHAL V, GARIMELLA S, MURTHY J.

- Low Reynolds number flow through nozzle-diffuser elements in valveless micropumps[J]. *Sensors and Actuators*, 2004, 113(2): 226-235.
- [14] HUANG J, ZHANG J H, XUN X CH, *et al.*. Theory and experimental verification on valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tree-like bifurcate tubes[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 26(3): 462-468.
- [15] 张建辉, 王守印. 压电锥形流管无阀泵的研究—单向流动原理及泵流量[J]. *压电与声光*, 2001, 23(1): 23-25.  
ZHANG J H, WANG SH Y. Study of piezoelectric valveless diffuser/nozzle-based fluid pump: one-way flow principle and the pump flow [J]. *Piezoelectric & Acousto-optics*, 2001, 23(1): 23-25. (in Chinese)
- [16] 黄俊, 张建辉, 王守印. 类分形 Y 形分叉流管无阀压电泵的流阻分析[J]. *机械工程学报*, 2014, (16): 193-198.  
HUANG J, ZHANG J H, WANG SH Y. Analysis of the flow resistance characteristics of valveless piezoelectric pump with fractal-like Y-shape branching tubes [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, (16): 193-198. (in Chinese)

## 作者简介:



张蕊华(1970—),女,黑龙江海林人,博士后,副教授,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,2012-2013年于南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室做博士后,主要研究方向为压电驱动技术和金属橡胶技术。E-mail: zhangrh\_hit@sina.com

## 通讯作者:



张建辉(1963—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师。2001年于日本山形大学获得博士学位,主要从事机械设计及理论和压电作动器的研究。E-mail: zhangjh@nuaa.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)