

文章编号 1004-924X(2014)01-0076-09

## 半球缺阻流体无阀压电泵的实验验证

张建辉<sup>1\*</sup>, 曹炳鑫<sup>1</sup>, 陈道根<sup>1</sup>, 纪晶<sup>1,2</sup>, 黄俊<sup>1</sup>

(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, 江苏 南京 210016;

2. 青岛农业大学 机电工程学院, 山东 青岛 266109)

**摘要:**设计了一套压电双晶片作为激励源的半球缺阻流体无阀压电泵。分析了该压电泵的结构及工作原理,并采用有限元软件对其内部流场进行模拟分析。仿真结果表明:该泵存在正反向流阻不等特性,半球缺阻可以作为泵的无运动部件阀。最后,实际制作了半球缺无阀压电泵和多组半径不等的半球缺,并进行了泵的流阻及流量实验。实验结果表明:该泵正反向流时间差随入口压强增大而减小;当驱动电压为 150 V,频率为 17 Hz,半球缺半径为 4.0 mm 时,泵的输出流量达到最大,其值为 121.4 ml/min;同时,该泵单位时间内的输出流量随半球缺半径增大而呈递减的变化趋势,而且半球缺的半径大小对该类无阀压电泵的工作效能有较大的影响。

**关键词:**无阀压电泵;半球缺;流阻;有限元法

**中图分类号:**TH38;TN384 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142201.0076

## Experimental verification on valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body

ZHANG Jian-hui<sup>1\*</sup>, CAO Bing-xin<sup>1</sup>, CHEN Dao-gen<sup>1</sup>, JI Jing<sup>1,2</sup>, HUANG Jun<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;*

2. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China*)

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

**Abstract:** A valve-less piezoelectric pump with a Hemisphere-segment Bluff-body (HSBB) was designed by using a piezoelectric bimorph as exciting source. The structure and working principle of the piezoelectric pump were analyzed theoretically, then the finite element software was employed in simulating the flow fields of the pump. The theoretical analysis show that the positive and negative flow resistances of the pump are unequal, so the HSBBs can be used as no-moving parts in the pump. Finally, a sample pump based on the HSBB was fabricated and a series of HSBBs with different radiuses were produced. Some experiments on flow resistances and output flow rates of the pump were performed. The experiment results indicate that the time difference between the positive and negative flows decreases with increasing the pressure difference. The maximum flow rate of the pump obtained

收稿日期:2013-09-20;修订日期:2013-10-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075201;51205193);国家自然科学基金重点项目(No. 91223201);院士工作站资助项目(No. BM2011033);江苏高校优势学科建设工程资助项目

is 121.4 ml/min under a operating frequency of 17 Hz and the HSBB's radius of 4.0 mm. Moreover, the experiments give a relationship that the flow rate of the pump increases with the decreasing size of HSBB's radius during the unit time under keeping the peak-to-peak voltage of 150 V, which has a greater influence on the working efficiency of the pump.

**Key words:** valve-less piezoelectric pump; hemisphere-segment bluff-body; flow resistance; finite element method

## 1 引言

无阀压电泵是新型流体泵的一个重要分支,以具有逆压电效应的压电振子作为驱动源,当施加驱动电压时压电振子做周期性振动从而引起泵腔容积的规律性变化,通过特殊结构的无运动部件阀迫使流体正反向流时所受的流动阻力不等,使流经泵腔内部的流体产生单向流动,实现泵送流体的功能。无阀压电泵与传统液体泵相比,具有结构简单、重量轻、耗能低、易于微小化、输出流量大、易控制等优点<sup>[1-2]</sup>,在医疗、器件散热以及燃料电池等领域具有广泛的应用前景<sup>[3-5]</sup>,近年来越来越多的国内外学者投身于无阀压电泵的研究工作<sup>[1-12]</sup>。

目前国内外比较典型的无阀压电泵有:Erik Stemme 等发明的锥形流管压电泵<sup>[8]</sup>,该种泵在泵腔两侧外安装一对互为倒置的锥形流管。Nicola Tesla 发明的 Tesla 阀<sup>[9]</sup>,该种泵利用特殊结构的双环管道作为泵的无运动部件阀从而迫使流体产生单向流动。上述无阀泵将无运动部件阀置于泵腔的外部,难于实现泵的微小化,而且阀体结构复杂、加工难度高。针对上述无阀泵所存在的问题,夏齐霄等发明了一种非对称坡面无阀压电泵<sup>[10-11]</sup>,该种泵在泵腔内部设有多个非对称坡面结构,但流体流经非对称坡面结构时沿程损耗较大,造成流体在泵腔内单向流动特性不明显、泵的输出流量小。上述问题在一定程度上阻碍了无阀泵在某些特定领域的应用,限制了无阀压电泵的发展。为了促进无阀压电泵的微小化、提升泵工作时的混合搅拌性能及提高泵的输出流量,本

研究小组的纪晶发明了一种阻流体阻流无阀压电泵<sup>[12]</sup>,在泵腔内部安装一组半球缺组,来实现泵送流体的功能。该种阻流体阻流无阀压电泵将无移动部件阀安装于泵腔的内部,使得该泵结构简单、易于微小化,而且该泵在工作时正反向流产生的流阻差大,泵的单向流动特性明显、输出流量大。

本文设计了一套压电双晶片作为激励源的半球缺阻流体无阀压电泵,以研究半球缺该种无运动部件阀的几何特性及分布姿态对无阀泵的性能影响。针对该种无阀泵建立了理论分析公式,并采用有限元法分析了泵腔内部的速度场和压力场的分布状况;制作了该无阀泵的实验样泵及多组不同几何特性的半球缺,并对样泵的流阻、输出流量随半球缺的几何特性变化的规律进行了实验验证。

## 2 结构和工作原理

图 1 所示为半球缺阻流体无阀压电泵的结构,主要由泵盖、泵体、压电双晶片、半球缺组、流管等组成。泵盖与泵体之间用螺栓连接,为了防止液体外泄,在泵盖与泵体之间设有一密封圈,为了放大泵正反向流阻差,采用 5 个几何参数相同的半球缺构成的半球缺组并呈相同的姿态均布于泵腔,使泵正向流时流阻系数减小,反向流时流阻系数增大<sup>[13]</sup>。

实验时将半球缺组的 1/4 球形迎流面正对于泵的流管 A 分布、其 1/2 圆形迎流面正对于泵的流管 B 分布。当给压电振子施加正弦驱动电压时,压电振子做周期性往复运动,假定压电振子由

水平位置向上振动到最大位移处为压电振子工作的第一阶段,依次可以将压电振子的另外3/4工作周期定义为压电振子工作的第二、三、四阶段。

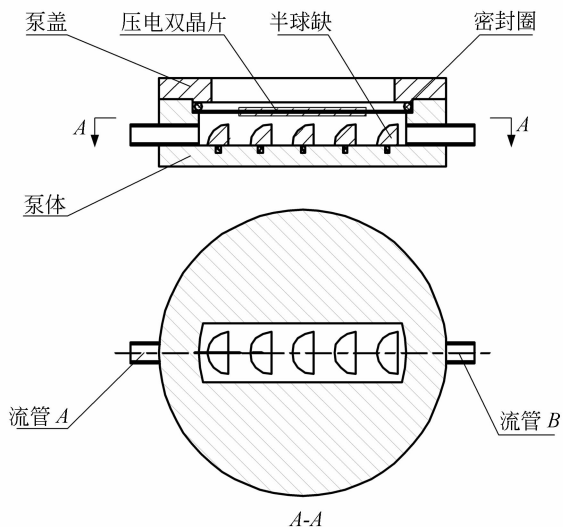


图 1 半球缺阻流体无阀压电泵

Fig. 1 Structure of valve-less piezoelectric pump with HSBB

压电振子的周期性往复振动引起泵腔内部的体积、压强发生周期性变化,当压电振子的振动引起泵腔内部压强的增大时,泵同时从两端流管吸入流体,由于半球缺的 1/4 球迎流面对流经其的流体产生的阻力远远小于 1/2 圆迎流面产生的阻力,故从泵的流管 A 吸入的液体量大于流管 B 吸入液体量,定义该过程为泵的吸入过程(第一、四阶段),如图 2(a)所示。当压电振子的振动引起泵腔内压强的减小时,泵同时从两端流管排出流体,由于半球缺的 1/4 球迎流面对流经其的流体产生的阻力远远小于 1/2 圆迎流面产生的阻力,从泵的流管 A 排出的液体量小于流管 B 排出液体量,称该过程为泵的排出过程(第二、三阶段),如图 2(b)所示。将从流管 A 吸入液体,流管 B 排出液体定义为泵的正向流,同时将流管 A 排出液体,从流管 B 吸入液体定义为泵的反向流。通过上述分析可以发现在压电振子的一个工作周期内该半球缺阻流体无阀压电泵具有两个吸入过程

和两个排出过程,而且当压电振子周期循环振动时,该种无阀泵能够持久地实现从流管 A 吸入液体,从流管 B 排出液体,迫使泵腔内的流体发生单向流动,达到泵送液体的效果。

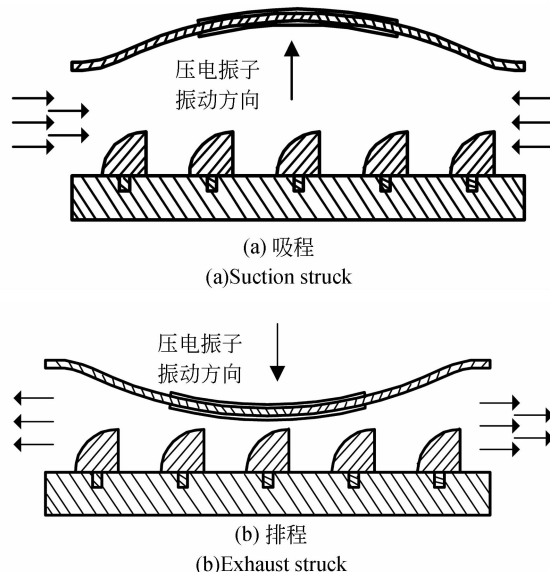


图 2 工作原理图

Fig. 2 Working process

### 3 理论分析

当正弦驱动电压作用于压电振子时,压电振子做周期性往复运动,半径为  $R$  的压电振子在其工作周期的第一阶段内,泵腔体积逐渐增大,压电振子做由水平位置向上隆起运动,压电振子最大振幅  $\omega_0$  出现在其中心位置,该阶段内振子的变形类似于如图 3 所示的旋转抛物面<sup>[14]</sup>,在极坐标下该变形抛物面的变化方程为:

$$\omega(r) = \omega_0 (1 - r^2/R^2). \quad (1)$$

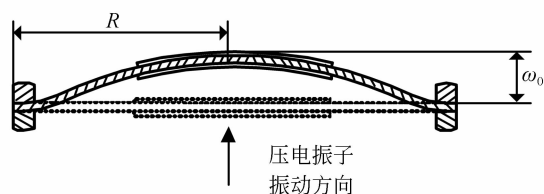


图 3 压电振子工作示意图

Fig. 3 Working process of piezoelectric vibrator

对该阶段内压电振子的变形量进行积分就可以得出压电振子从平衡位置到最大位移处时的泵

腔体积的最大变化量:

$$\Delta V_{\max} = 2\pi \int_0^R \omega_0 (1 - r^2/R^2) r dr = \pi \omega_0 R^2 / 2. \quad (2)$$

泵在该阶段内同时从流管 A、B 吸入流体,从流管 A、B 吸入流体的体积量等于泵腔体积的变化量,故该阶段泵腔体积最大变化量  $\Delta V_{\max}$  还可以表示为:

$$\Delta V_{\max} = \bar{Q}_p + \bar{Q}_n = S v_p + S v_n, \quad (3)$$

式中: $\bar{Q}_p$  为正向流平均流量值; $\bar{Q}_n$  为反向流平均流量值; $S$  为正反向流管的横截面积; $v_p$  为正向流平均速率; $v_n$  为反向流平均速率。

根据 singhal 等的无阀泵正反向流动压强损失理论<sup>[16]</sup>,可知损失压强  $p$  与流体的流阻系数  $\xi$ 、流速  $v$ 、密度  $\rho$  存在如下关系:

$$p = \xi \rho v^2 / 2, \quad (4)$$

依据式(4)可以推理该无阀泵正反流的平均速率,其中令  $\delta = \sqrt{2\Delta p_n / \rho}$ ,则:

$$v_p = \sqrt{\frac{2\Delta p_p}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{\xi_p}} = \delta \xi_p^{-1/2}, \quad (5)$$

$$v_n = \sqrt{\frac{2\Delta p_p}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{\xi_n}} = \delta \xi_n^{-1/2}, \quad (6)$$

式中: $\xi_p$  为正向压强损失系数; $\xi_n$  为反向压强损失系数; $\Delta p_p$  为正流压强损失量; $\Delta p_n$  为反流压强损失量。

假设泵送的液体不可压缩,泵工作时流体输入口处的压力  $\Delta p_p$  与输出口处的压力  $\Delta p_n$  相等,即  $\Delta p_p = \Delta p_n$ ,由式(2)、(3)、(5)、(6)解得:

$$\delta = \pi \omega_0 R^2 S^{-1} / [2(\xi_p^{-1/2} + \xi_n^{-1/2})]. \quad (7)$$

压电振子在其工作的第二阶段内由最大位移处运动到平衡位置,泵在该阶段同时从流管 A、B 排出流体,因此该阶段内泵的排出流量  $\bar{Q}$  可以由正反向流量差表示:

$$\bar{Q} = \bar{Q}_p - \bar{Q}_n = S\delta(\xi_p^{-1/2} - \xi_n^{-1/2}). \quad (8)$$

同理,泵在第三(排出流体)、第四(吸入流体)阶段内流量也可使用上述理论表示,由上述分析可知泵在一个周期 4 个阶段中共有 2 个阶段排出液体。故压电振子在频率为  $f$  驱动电压作用时,通过简化上述方程,泵的输出流量  $Q$  可以表示为:

$$\begin{cases} Q = \pi \omega_0 R^2 f \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \\ \xi = \sqrt{\xi_n / \xi_p} \end{cases} \quad (9)$$

通过分析上述方程可知,若正向压强损失系数  $\xi_p$  大于反向压强损失系数  $\xi_n$ ,即  $\xi < 1$ ,流管 A 的吸入的流体量小于流管 B 排出的流体量,泵流量  $Q < 0$ ;反之若正向压强损失系数  $\xi_p$  小于反向压强损失系数  $\xi_n$ ,即  $\xi > 1$ ,流管 A 的吸入的流体量大于流管 B 排出的流体量,泵流量  $Q > 0$ 。若可以得到泵的输出流量  $Q$ 、正向流平均速率  $v_p$ 、 $v_n$  及正流压强损失量  $\Delta p_p$ 、 $\Delta p_n$  就可以得到流阻  $\xi_p$ 、 $\xi_n$  之间的关系,以便对该泵的特性及可行性进行论证分析。

## 4 模拟分析

### 4.1 有限元建模及边界条件

为了模拟半球缺阻流体无阀压电泵内部流场特性,将图 1 所示的压电泵流体所流经的区域进行简化并参照其几何参数建立有限元模型。模型中所采用泵的几何参数如表 1 所示,仿真时采用  $k-\epsilon$  湍流模型进行模拟仿真泵腔的内部流场,所选用的流体介质为不可压缩水,其密度为  $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$ ,运动黏性系数为 1.01。

表 1 仿真用泵的几何参数

Tab. 1 Result of system scale calibration

名称	半球缺半径/mm	半球缺数量	球 振子直径 /mm	泵腔高度/mm	泵腔宽度 /mm
尺寸	5	5	50	7	14

为了分析该种无阀泵正向流时半球缺对流体所产生的流动阻力及内部流场特性,同时与实验所测量的结果对比。故在仿真泵的正向流动特性时,泵的流管 A 设为压强输入口,并分别将此输入端口处的压强分别设为 250、300、350、400 和 450 Pa,流管 B 设为压强输出口,并将此输出口处的压强设为固定值零个标准大气压,分别得出上述 5 组不同输入端口压强下,泵正向流时,单位时间内的输出流量。同理在仿真泵的反向流动特性时,泵的流管 B 设为压强输入口,并分别将此输入端口处的压强分别设为 250、300、350、400 和 450 Pa,流管 A 设为压强输出口,并将此输出口处的压强设为固定值 0 个标准大气压,分别得出上述 5 组不同输入端口压强下,泵正向流时,单

位时间内的输出流量。通过模拟分析得出在不同入口压强时,泵正反向流时单位时间内的输出流量,从而可判断该泵在不同压差下的正、反向流阻。

#### 4.2 泵正反向流时速度场的变化规律

图 4 所示为泵正反向流时速度场的变化规律。为了观察泵腔内部速度场的变化,取泵腔中的一等高面作为研究面,其中左图为正向流时的速度矢量图,由该图可知泵正向流时,流体主要受到来自半球缺 1/4 球面的流动阻力,流速沿半球缺分布方向呈减小的趋势而且减速平缓,同时半球缺与半球缺之间形成涡旋,其中第一个半球缺与第二个半球缺之间形成的涡旋最大。由右图可知泵反向流时,流体主要受到来自半球缺 1/2 圆面的流动阻力,泵腔内部的流体流速骤然减小。比较分析两图可知,在相同的入口压强下,泵的正反向流时内部流体流速变化相差较大,可知半球缺 1/2 圆面对流体的阻力大于半球缺 1/4 球表面对流体的阻力,不仅表明半球缺阻流体无阀压电泵具有正反向流阻不等的特性,且腔体内部涡旋的存在,使得该泵还可用于液体的搅拌。

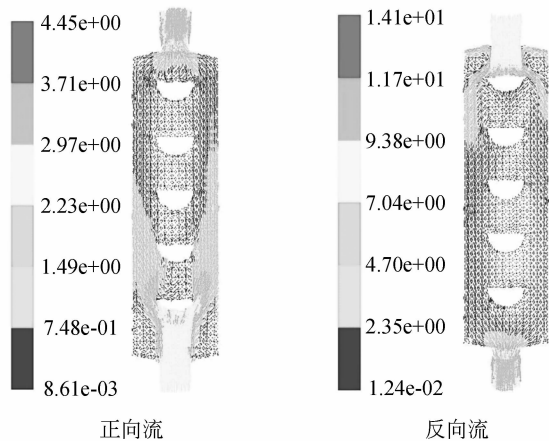


图 4 正反向流速度矢量分布图

Fig. 4 Velocity vector distribution of positive and negative flows

#### 4.3 泵正反向流时压强变化规律

图 5 所示为泵正反向流时压强变化规律。为了观察泵腔内部压强的变化取泵腔中的一等高面作为研究面,其中左图为正向流时泵腔内部的压强分布图,由该图可知泵正向流时的压强变化趋势比反向流时压强变化平缓,在泵腔的输入口与

输出口两端压强变化较大,在泵腔中间部位压强基本不变。分析可得在研究半球缺阻流体无阀压电泵正反向流压强变化规律的过程中,应着重考虑该泵的输入口与输出口端的压强变化。

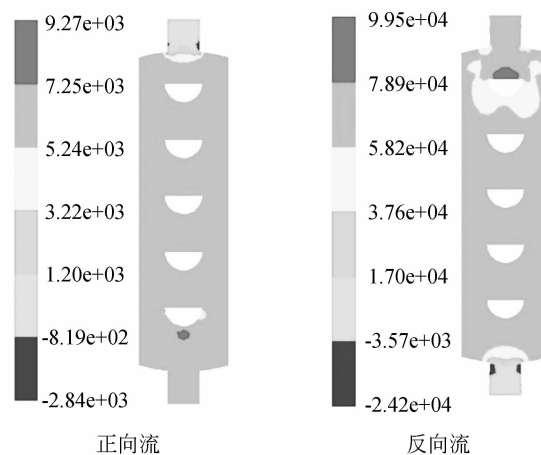


图 5 正反向流压强分布图

Fig. 5 Pressure distribution of positive and negative flows

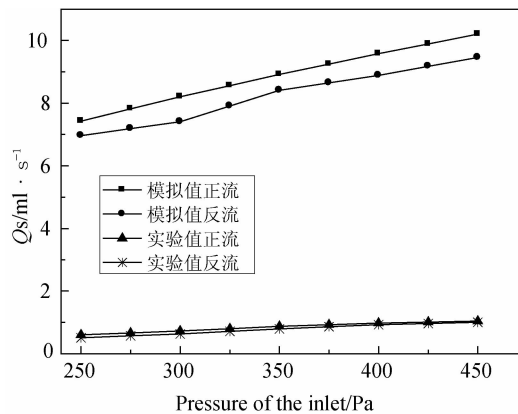


图 6 模拟与实验流量值随入口压强对比曲线

Fig. 6 Flow rates of simulation and experiment vs pressure of inlet

图 6 所示为在不同的入口压强下,模拟及实验所得泵在单位时间内输出流量的对比,可以得出在相同的入口压强下泵正向流时单位时间内的输出流量大于反向流时单位时间内的输出流量,而且正反向流时仿真模拟值与实验值变化趋势一致,再一次论证了半球缺该种阻流体存在正反向流阻不等的特性。同时还可以发现仿真模拟值与实验值存在一定程度上的误差,误差随入口压强的增大而增大,原因是模拟仿真时将入口压强设

为恒定值,而实验时入口压强不能够保持始终恒定而是存在一定的波动;其次由于实验所采用的样泵流管及泵腔内部存在损耗,该损耗对泵的流体产生一定的阻碍作用,而模拟仿真是在理想状态下进行的;同时实验时所产生的实验误差及测量误差也进一步加大模拟值与实验值之间的误差。

## 5 实验研究

### 5.1 流阻实验

为了研究不同几何尺寸的半球缺对压电泵正反向时间差影响变化规律,设计了一套流阻测量装置,其原理如图 7 所示,主要由储液箱、给液箱、开关、样泵、量杯等组成。

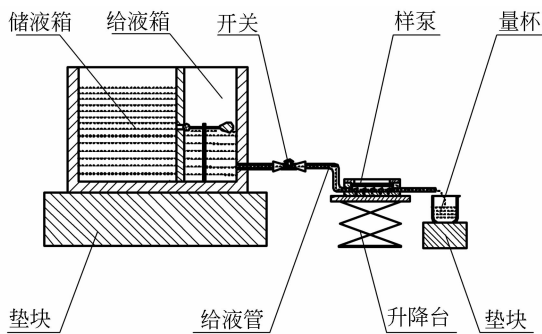


图 7 流阻测试装置原理图

Fig. 7 Pressure distribution of positive/negative flows

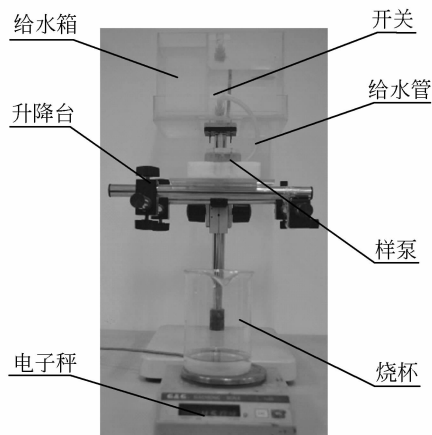


图 8 流阻测量装置

Fig. 8 Measuring devices for flow resistance

实际制作了一套如图 8 所示的流阻测量装置,

所采用的储液箱具有自动上水装置,给液箱在给液过程中损失的液体可以得到左侧的储液箱补给,从而维持实验过程中水箱液面与泵液面之间的压力差  $\Delta p$  不变。实验时在储液箱中盛一定量的液体(本实验中为蒸馏水),同时将样泵放置于升降台上,样泵的输入口与储液箱处的给液管相连,然后打开储液箱的控制开关并开始计时,当流入烧杯中的液体量为 300 mL 时停止计时,如此重复 3 次后计算平均时间,这样就得到正向流时同等体积液体流经设有半径的半球缺样泵所耗的时间。在相同的实验条件下,将样泵的输出口与储液箱给液管相连,同样重复 3 次后计算平均时间,同样可以得到反向流时同等体积液体流经设有半径的半球缺样泵所耗的时间。对上述样泵正反向流所耗时间求差,就得到同体积液体正反向流经设有半径的半球缺样泵所耗的时间差。更换不同半径的半球缺样泵并测量在不同储液箱液面与样泵液面之间的压力差  $\Delta p$  下样泵正反向流所耗的时间差,就可得到 5 条同体积液体流经样泵时的正反向流动时间差随压力差  $\Delta p$  变化的曲线。

制作了 5 组不同半径的半球缺组。每组半球缺组由 5 个相同几何参数的半球缺构成,图 9 所示为  $R=4.0, 4.5, 5.0, 5.5$  和  $6.0$  mm 时的半球缺组。

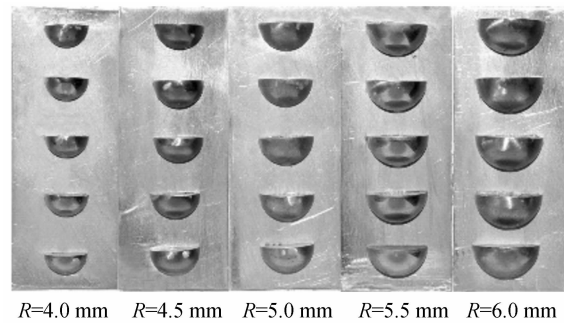


图 9 不同半径的半球缺

Fig. 9 HSBB with different radiies

图 10 所示为通过实验得到定量流体在不同高度下流经样泵时的正反向时间差随高度变化曲线。由图中数据可知,在同一压力差  $\Delta p$  下,同体积液体流经样泵正反向所耗时间差随半球缺半径增大呈递减趋势;同一组半球缺的正反向流时间差随水箱液面与泵输入口液面之间的压力差  $\Delta p$  增大而减少。通过分析可以发现半球缺阻流体无阀压电泵存在正反向流阻不等的特性,说明了半

球缺这种阻流体可以作为无运动部件阀使用,同时也为半球缺阻流体无阀压电泵的实现提供了充足的实验依据,进一步了解了该种半球缺阻流体无阀压电泵的工作特性。

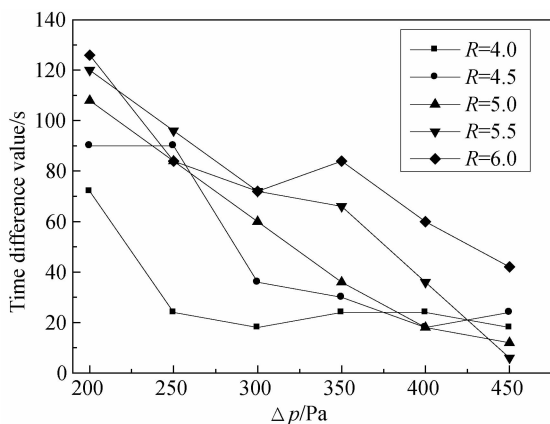


图 10 正反流时间差随压力差  $p$  变化曲线

Fig. 10 Variation of positive/negative time difference valves vs pressure difference  $p$

## 5.2 流量实验

为了研究半球缺阻流体无阀压电泵的流量随半球缺半径变化规律,制作了如图 11 所示的样泵。样泵采用双晶压电振子,其基底层材质为黄铜,半径为 50 mm,厚度为 0.4 mm,压电陶瓷层半径为 30 mm,厚度为 0.2 mm,泵腔高度为 7 mm,泵腔宽度为 14 mm。图 12 为半球缺阻流体无阀压电泵的流量实验装置,本实验以蒸馏水为试验介质,实验驱动电压峰峰值为 150 V,在该条件下不断改变工作频率,并记录上述 5 组样泵单位时间内的输出流量随工作频率变化曲线。

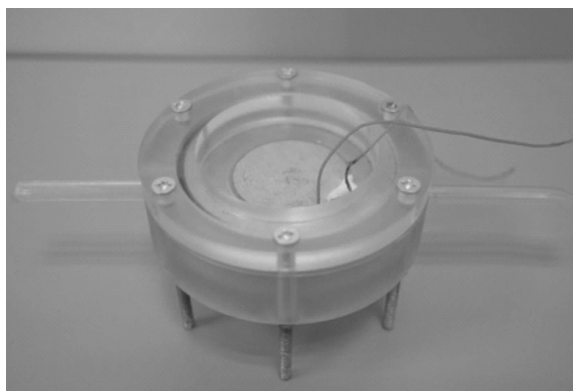


图 11 半球缺阻流体无阀压电泵

Fig. 11 HSBB sample pump

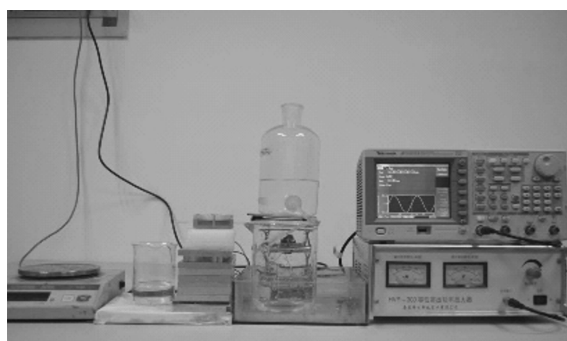


图 12 压电泵的流量实验

Fig. 12 Set-up of flow rate experiment

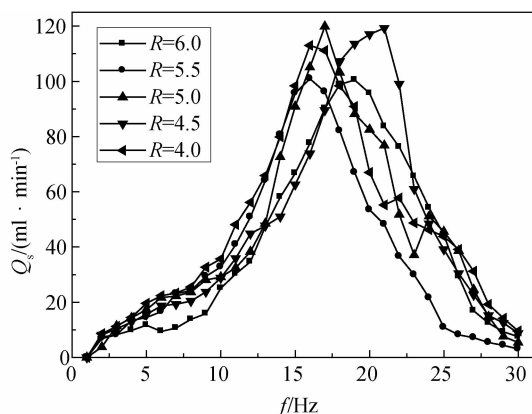


图 13 压电泵流量与频率曲线图

Fig. 13 Curves of flow rate vs driving frequency

图 13 为压电泵的输出流量与工作频率的变化曲线图,可以得出 5 组样泵单位时间内的输出流量随频率变化趋势总体上一致,随着频率从 0 Hz 不断的增大时,泵的输出流量也不断的增加,当频率增加到一定值之后,输出流量随频率增大而减小。在同一频率下,泵单位时间内流量随半球缺半径增大呈递减趋势,可见半球缺的几何参数对泵输出流量具有较大的影响,在驱动频率为 17 Hz 时,驱动电压峰峰值为 150 V,半径  $R$  为 4.0 mm 半球缺组的样泵输出流量达到最大值 121.4 ml/min。

## 6 结 论

分析了半球缺阻流体无阀压电泵的结构及工作原理,建立了泵流量分析公式。采用有限元法模拟分析了半球缺阻流体无阀压电泵内部流场特性,并对模拟值与实验值进行了比较。分析显示:

半球缺该种阻流体能够迫使流体产生单向流。制作了5组半球缺组并进行了相应的流阻及流量实验,通过实验得出在同一压力差 $\Delta p$ 下,同体积液体流经样泵正反向所耗时间差随半球缺半径增大呈递减趋势;同一组半球缺的正反向时间差随储

液箱液面与泵入口之间的压力差 $\Delta p$ 增大而减少。当驱动电压为150 V、频率为17 Hz、半球缺组的半径为4.0 mm时,泵的流量达到最大,其值为121.4 ml/min,论证了半球缺的半径大小对该半球缺阻流体无阀压电泵的工作效能具有较大的影响。

### 参考文献:

- [1] 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)
- [2] 张建辉,黎毅力,夏齐霄,等.“Y”形流管无阀压电泵的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 vibration and pump flow rate of valve-less piezoelectric pump with Y-shape tubes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(6):922-929. (in Chinese)
- [3] YOSHIDA K, WATANABE K, YOKOTA S. Development of a piezoelectric micro-pump using resonantly-driven active check valve[C]. *Proceedings of the SICE Annual Conference, Okayama*, 2005: 2510-2513.
- [4] ZHANG T, WANG Q M. Valve-less piezoelectric-micro-pump for fuel delivery in direct methanol fuel cell (DMFC) devices [J]. *Journal of Power Sources*, 2005,140(1):72-80.
- [5] LINTEL V H T G, POL V D F C, BOUWSTRA S. A piezoelectric micro-pump based on micromachining of silicon [J]. *Sensors and Actuators*, 1988, 15(2):153-167.
- [6] 黄俊,张建辉,王守印. 多级“Y”型无阀压电泵的原理与实验论证[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 423-430.  
HUANG J, ZHANG J H, WANG SH Y. Theory and experimental verification on valve-less piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 423-430. (in Chinese)
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] STEMME E, STEMME G. A valve-less diffuser/nozzle-based fluid pump [J]. *sensor and Actuator A*, 1993, 39(12):159-176.
- [9] GERLACH T. Microdiffusers as dynamic passive valves for micropump applications[J]. *sensor and Actuator A*, 1998, 69,181-191.
- [10] XIA Q X, ZHANG J H, LEI H, *et al.*. Analysis on flow field of the valve-less piezoelectric pump with two inlets and one outlet and a rotating unsymmetrical slope element[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011,25(3):474-483.
- [11] 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)
- [12] 纪晶. 阻流体阻流无阀压电泵:中国, ZL201210396143. X [P]. 2012-10-18.  
JI J. Valve-less piezoelectric pump with hemisphere segment bluff-body China: ZL201210396143. X [P]. 2012-10-18. (in Chinese)
- [13] 姜仲霞,姜川涛,刘桂芳. 涡街流量计[M]. 北京:中国石化出版社, 2006:62-66.  
JIANG Z X, JIANG C D, LIU G F. *Vortex shedding Flowmeter* [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2006:62-66. (in Chinese)
- [14] 程光明,杨志刚,曾平. 压电泵泵腔体积变化量研究[J]. 中国机械工程, 1998,20(6):389-392.

CHENG G M, YANG ZH G, ZENG P. Research on the cavity volume fluctuations of piezoelectric pump [J]. *Chinese Mechanic Engineer*, 1998, 20(6):389-392. (in Chinese)

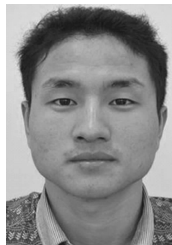
[15] SINGHAL V, GARIMELLA S, MURTHY J. Lowreynolds number flow through nozzle-diffuser elements in valve-less micro-pumps[J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 113(2):226-235.

作者简介:



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

通讯作者:



曹炳鑫(1988—),男,江西九江人,硕士研究生,主要研究方向为微型泵的结构设计及优化分析。E-mail: bxcao528@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)