

锥形阶梯流管无阀压电泵仿真及实验*

孙业明, 李 驹, 苏天一, 王俊尧, 李瑞鹏

(东北电力大学机械工程学院 吉林, 132012)

摘要 针对锥形流管无阀压电泵输出流量小、回流流量多等问题,结合锥形流管和溢流坝阶梯式结构的阻流作用,研制了一种锥形阶梯流管无阀压电泵。对锥形阶梯流管的流阻特性进行了理论分析,利用有限元软件对锥形阶梯流管无阀压电泵和锥形无阶梯无阀压电泵进行了流场仿真对比,制作了锥形阶梯流管无阀压电泵实验样机,测量不同频率和驱动电压下两种泵的流量。实验结果表明:当驱动电压峰值为 180 V、驱动频率为 18 Hz 时,锥形无阶梯流管无阀压电泵流量最大为 6.20 ml/min,锥形阶梯流管无阀压电泵输出流量最大为 8.04 ml/min,与锥形无阶梯流管无阀压电泵相比泵最大输出流量提升了 29%,验证了锥形阶梯流管无阀压电泵能有效抑制锥形流管中的回流现象,且相比于无阶梯流管无阀压电泵具有更好的输出流量。

关键词 无阀压电泵;锥形阶梯流管;有限元仿真;流量实验

中图分类号 TH38

引 言

压电泵分为有阀压电泵和无阀压电泵,以其体积小、精度高等特点广泛应用于生物医学、燃料供应、液体冷却等领域^[1-2]。相较于有阀压电泵,无阀压电泵不会产生泵滞滞后现象,其内部无移动部件阀式结构,不会破坏活体细胞的机能和结构,且不会产生移动阀部件的疲劳损伤^[3-8]。通常将无阀压电泵分为外置流管式无阀压电泵与内置结构式无阀压电泵^[9]。内置结构式无阀压电泵有半球缺阻流体无阀压电泵^[10]、非对称群峰结构无阀压电泵^[11]、非对称坡面腔底无阀压电泵^[12]及三棱柱阻流体无阀压电泵^[13]等。外置流管式无阀压电泵有锥形泵^[14]、螺线形无阀泵^[15]、非对称分叉流管无阀压电泵^[16]、“Y”形流管无阀泵^[17]及流线型流管无阀泵^[18]等。外置流管式无阀压电泵在泵腔中不设置阻流体,泵腔里的涡旋平缓,流速平稳,无大体积阻流体,一般不会对医疗、化工等大分子液体产生挤压和破坏^[19],而其中锥形流管的结构简单稳定,得到最广泛的研究^[14,20-23]。

为提升锥形无阀泵的抑制回流性能、增大液体的单向流通,通常是缩减流管入口的尺寸、增大出口的尺寸^[24],或是在泵腔中设置阻流体。这两种方式会在入口或是泵腔的底部形成大面积的涡旋,还会形成流体分离现象,过小尺寸的入口不利于固液双

相混合物的运输。工程建设中,台阶式溢流坝的阶梯结构可有效减少水流的能量和冲击^[25]。

笔者结合溢流坝中阶梯状阻流体对水流动能的消能与锥形流管收缩和扩张方向流动阻力不等的特性,设计出一种锥形阶梯流管无阀压电泵。相较于其他同类型无阀压电泵,阶梯状阻流体正反向具有不同的流动规律,实现抑制回流的功能,使得液体在泵送过程中产生流量差,且阶梯状结构可以设置在水平设计的泵体中,减少重力对进出口流体的影响。

1 压电泵结构及理论分析

1.1 泵结构

图 1 为锥形阶梯流管无阀压电泵的结构示意图。泵由上泵盖、泵腔、下泵盖、双晶片压电振子及

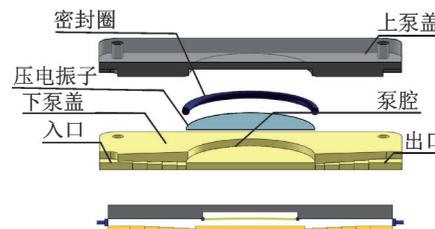


图 1 锥形阶梯流管无阀压电泵结构示意图

Fig.1 Structure schematic diagram of valveless piezoelectric pump with tapered step tube

* 国家自然科学基金资助项目(51505077);吉林市科技创新发展计划资助项目(201750230)

收稿日期:2022-11-29;修回日期:2023-04-20

密封圈组成,其中锥形阶梯流管是基于阶梯形阻流体和扩散/收缩流管流阻特性组合而成,在锥形流管中设置类似于溢流坝式的阶梯,共设置5级阶梯。

1.2 理论分析

1.2.1 阶梯消能

正反向流体绕流阶梯阻流体示意图如图2所示。流体正向流动至阶梯阻流体时,流体不会受到水平方向的阶梯压差阻力和竖直方向的重力阻碍作用。流体反向流动至阶梯阻流体时,阶梯形阻流体不会产生形变,流体受到水平方向100%的压差阻力和竖直方向重力的消能,由于体积碰撞,阶梯表面处与斜向的滑行水流间会形成涡旋。

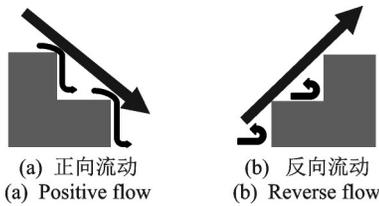


图2 正反向流体绕流阶梯阻流体示意图

Fig.2 Schematic diagrams of forward and reverse fluid

1.2.2 锥形阶梯流管流阻特性分析

在阶梯状结构中有伯努利方程

$$\Delta P = \gamma(Z_a - Z_b) \quad (1)$$

其中: ΔP 为流体流动时的压强损失; Z 为液体的位置水头,即液体的动能、压强势能及重力势能;下标 a, b 分别表示不同位置; γ 为液体容重。

正向流动时,液体受到阶梯结构的消能小于反向流动,则有 $\Delta P_1 < \Delta P_2$,下标1,2分别表示正反两个不同方向。流体流经阶梯结构时克服沿程阻力和局部阻力所造成的压强损失,即

$$\Delta P = \xi \rho v^2 / 2 \quad (2)$$

其中: ξ 为流体流经管道的压强损失系数; ρ 为流体密度; v 为流管中流体的平均速度。

正向流动时阶梯状结构和锥形结构的协同作用产生总的正向压强损失与压强损失系数为

$$\begin{cases} \Delta p = \Delta p_s + \Delta p_t \\ \xi = \xi_s + \xi_t \end{cases} \quad (3)$$

其中:下标 s, t 分别表示锥形结构与阶梯结构。

在阶梯结构上正反向流动的压强损失系数为 ξ_{s1} 和 ξ_{s2} ,由于阶梯结构的消能作用,存在 $\xi_{s1} < \xi_{s2}$ 。对锥形流管有正反向压强损失系数 ξ_{t1} 和 ξ_{t2} 。根据文献[26],在锥形流管中存在任意大于0的锥形角,使得 $\xi_{t1} < \xi_{t2}$ (正向为液体从小横截面方向流向大横截

面方向)。

对于整个锥形流管阶梯无阀泵有 $\xi_1 < \xi_2$,锥形阶梯流管的流阻效率 ϵ 可用正反流向的压强损失系数之比来表示,即

$$\epsilon = \xi_2 / \xi_1 > 1 \quad (4)$$

正反流向的压强损失系数之比大于1,则泵具有单向传输的功能。

流体在一个周期 T 内的输出流量为

$$Q = \frac{2\Delta V_{\max}}{T} \left(\frac{\epsilon^{1/2} - 1}{\epsilon^{1/2} + 1} \right) \quad (5)$$

其中: ΔV_{\max} 为压电振子运动到最大振幅处时的泵腔的容积变化值; T 为压电振子振动产生容积变化的周期。

无阀泵的输出流量取决于 ϵ ,当 $\epsilon \neq 1$ 时,无阀泵可出流。 ϵ 的大小与锥形流管流阻系数和阶梯结构流阻系数的复合流阻系数有关,当流体正向流入压电泵时,台阶式结构对出口流管的液体产生消能作用,锥形流管在出口处呈扩散形状,也可减少出口液体的流出,此时 $\epsilon > 1, Q > 0$ 。

1.3 锥形阶梯流管无阀泵的工作原理

锥形阶梯流管无阀压电泵的工作原理如图3所示。左侧为扩散流管结构,是压电泵的入口;右侧为收缩流管结构,是压电泵的出口。对压电振子施加交变电压时,其产生周期性振动,从而带动泵腔体积发生周期性变化。分析该泵的工作原理时,可将锥形阶梯流管视作是阶梯形结构和锥形流管的组合。

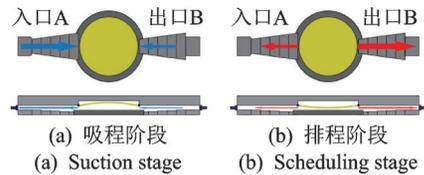


图3 锥形阶梯流管无阀压电泵工作原理

Fig.3 Working principle of valveless piezoelectric pump with tapered step tube

1) 吸程阶段。如图3(a)所示,压电振子在正弦交变电压的激励下向上振动,泵腔内容积增大,泵腔处于吸程阶段,此时流体从收缩/扩散流管同时流入泵腔,受到收缩/扩散流管和阶梯状结构的消能。流体由入口进入泵腔,阻力较小;从出口进入泵腔,阻力较大。因此,由入口A流入泵腔的流量高于出口B进入的流量, $Q_{inA} > Q_{inB}$ 。

2) 排程阶段。如图3(b)所示,压电振子在正弦交变电压的激励下向下振动,泵腔容积减小,泵腔处

于排程阶段,此时流体从收缩/扩散流管同时流出泵腔,受到收缩/扩散流管和阶梯状结构的消能。流体由入口A排出泵腔,阻力较大;从出口B排出泵腔,阻力较小。因此,由入口A排出泵腔的流量低于出口B排出的流量, $Q_{outA} < Q_{outB}$ 。

一个完整周期内压电泵产生的流量差为流入口A的流量与出口B的流量差值,即

$$\Delta Q = \Delta Q_A - \Delta Q_B = (Q_{inA} - Q_{inB}) - (Q_{outA} - Q_{outB}) > 0 \quad (6)$$

压电泵工作整个周期内产生了 ΔQ 的流量差值,宏观上表现为单向流动,即从入口A流入泵腔,从出口B流出泵腔。

2 无阀泵流场模拟仿真

2.1 仿真设置

采用 Fluent 软件进行模拟仿真,流体介质为密度 0.9982 g/cm^3 的水,运动黏度系数为 1.003,采用 k-omega 流体计算模型。流管几何参数见表 1。

表 1 流管几何参数

Tab.1 Flow pipe geometry parameters

阶梯高度/ mm	流管深度/ mm	流管长度/mm	扩散角/(°)
0.2	2	20	20

根据台阶消能理论,台阶式结构会在流体与阶梯之间形成涡旋来抑制流体的回流。当阶梯高度过大时,正向流动的水流可能会与台阶表面行成空腔,影响流动的稳定性,需设置多级阶梯来平衡这种影响,设置的 5 级阶梯总高度为流管深度的一半值。流管的深度等同于泵腔深度,这是为了保证泵体各结构在横向尺寸上呈同一水平。扩散角影响锥管的流阻系数,过大的扩散角会使出入口处的涡旋增加,影响泵腔内部流体的稳定性,过小的扩散角无法提供足够的流管流阻。在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间,扩散角各项属性均衡,泵送较为平稳。

为了模拟锥形阶梯流管无阀压电泵内部的流场特性,提取出泵体内部流域,建立封闭几何实体的三维模型。泵体几何参数如表 2 所示。

泵体尺寸根据实际加工条件与振子尺寸设置,

表 2 泵体几何参数

Tab.2 Pump body geometric parameters mm

泵腔深度	泵腔直径	振子直径	出入口尺寸
2	35	30	$5 \times 8 \times 4$

泵腔直径需要略大于振子直径。出入口尺寸设置是为了平缓地将流体过渡到流管,当其较小时,附近流体的涡旋会增加,影响泵送效率与平稳性。

对流体区域进行一定程度的简化,再对三维流域进行网格划分。网格划分图如图 4 所示。编译用户自定义函数 UDF 设置动网格,在振子靠近液面的一侧施加随频率变化的正弦运动载荷,来模拟压电振子的简谐运动。

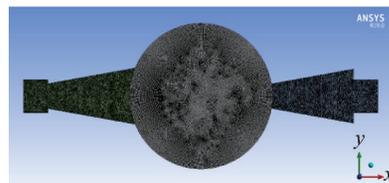


图 4 网格划分图

Fig.4 Mesh schematic

2.2 仿真结果

一个周期结束时,锥形阶梯流管无阀泵仿真分析图如图 5 所示,从左至右分别为速度矢量图、速度流线图、流管处流线的左视图和压力云图。由图可知,泵腔中的压电振子回到初始位置,此时泵腔内液体流动平缓无涡流,压力云图从左至右沿着阶梯分布逐级变化,每级阶梯处为流场速度变化的驻点,速度降低,压力升高。这表明锥形阶梯流管中流体速度的变化受到阶梯状结构的影响,该结构能够影响液体的回流,且流管处流线的左视图流线沿着阶梯结构分布。

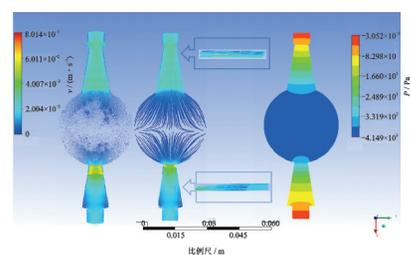


图 5 锥形阶梯流管无阀泵仿真分析图

Fig.5 Simulation analysis diagram of tapered stepped flow pipe valveless pump

在锥形阶梯流管无阀压电泵出口处设置监测节点,监测周期末即 T 时刻的瞬时速率,通过改变 UDF 中的参数值来改变模拟振子的载荷变化频率。仿真瞬时流率曲线如图 6 所示,可以反映锥形阶梯流管无阀泵流量 q 与频率之间的大致趋势。

图 7,8 分别为锥形阶梯流管无阀泵和锥形无阶梯流管无阀泵吸程/排程流场仿真图,从左至右分别为速度矢量图、速度流线图、流管处流线的左视图。

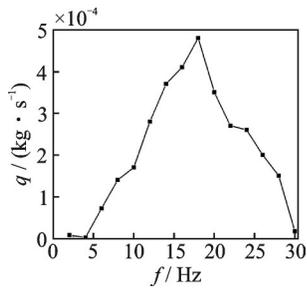


图 6 仿真瞬时流率曲线

Fig.6 Simulate instantaneous flow rate plots

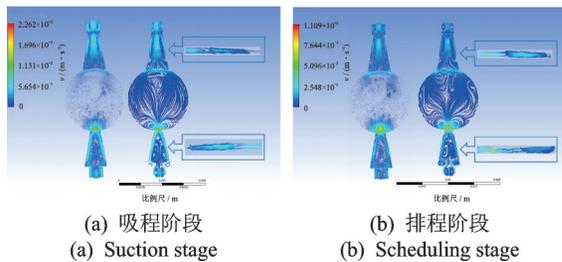


图 7 锥形阶梯流管无阀泵吸程/排程流场仿真图

Fig.7 Flow field simulation diagram of tapered stepped flow pipe valveless pump suction/schedule

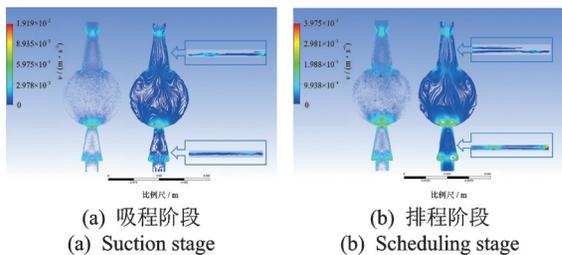


图 8 锥形无阶梯流管无阀泵吸程/排程流场仿真图

Fig.8 Flow field simulation diagram of tapered stepless flow pipe valveless pump suction/discharge

对比吸程阶段和排程阶段的流管左视图可知,在吸程阶段出口流管的涡旋大于排程阶段,进口流管的涡旋小于排程阶段。对比图 7,8 可得,锥形阶梯流管无阀泵流管处的速度矢量和流线较锥形无阶梯流管无阀泵更密集,流体速度变化更剧烈,锥形阶梯流管中速度流线在左视方向上有呈阶梯分布的涡旋。

由仿真图像可得,锥形阶梯流管与锥形无阶梯流管在工作过程中的主要差异体现在流管内部沿阶梯分布的涡旋。在吸程阶段,阶梯结构阻碍出口流管液体的流出;在排程阶段,阶梯结构阻碍进口流管液体的流入。锥形阶梯泵有更好的抑制回流的性能。

在进出口流管的两端设置监测点,可以得到不同时刻的进出口压差和泵流量,分别如表 3,4 所示。压差数据可以表示流阻损失,锥形无阶梯流管在不同时刻的进出口压差均小于锥形阶梯流管,锥形阶梯结构在理论上相较于传统的锥形结构能够提供更

高的液体流阻,能更好地抑制液体的回流现象。因此,在泵体仿真过程中,锥形阶梯无阀压电泵的输出流量高于锥形无阶梯无阀压电泵。

表 3 不同时刻的进出口压差

Tab.3 Inlet and outlet pressure difference at different times Pa

时刻	无阶梯流管		阶梯流管	
	进口压差	出口压差	进口压差	出口压差
吸程	244	256	778	1 038
排程	323	298	1 828	872

表 4 不同时刻的泵流量

Tab.4 Pump flow at different times kg/s

时刻	锥形无阶梯泵流量	锥形阶梯泵流量
吸程	0.000 043 8	0.000 120
排程	0.000 155 0	0.000 194

3 泵流量测试结果与分析

3.1 实验平台搭建与样机的制作

实验平台示意图如图 9 所示,包括示波器、信号发生器、功率放大器、电子天平、蓄水槽及烧杯等。实验用样机如图 10 所示。采用有机玻璃板由数控雕铣机床加工完成,机床加工精度为 ±0.1 mm,压电振子为压电双晶片振子。



图 9 实验平台示意图

Fig.9 Schematic diagram of the experimental platform



图 10 实验用样机

Fig.10 Diagram of experimental prototype stepped flow pipe

3.2 实验结果分析

图 11 为有/无阶梯结构的无阀泵流量与频率关

系。当驱动电压保持不变,逐步调节驱动频率,观察到压电泵的输出流量随着驱动频率的增加先增加后减小,泵流量均在驱动频率为18 Hz时达到峰值。当驱动电压峰峰值为180 V、驱动频率为18 Hz时,锥形流管无阀压电泵流量达到最大,为6.20 ml/min。当驱动频率为18 Hz时,锥形阶梯流管无阀压电泵流量达到最大,为8.04 ml/min。对比图7中的仿真曲线,实验曲线中低频部分的趋势略有不同,在进行仿真建模时,为了便于分析,对模型进行了一定程度的简化。实验的低频部分,压电振子的振动会影响固定在实验平台的泵体;而当频率提升到10 Hz之后,这种影响逐渐减弱。

驱动电压与流量的关系如图12所示。当驱动频率一定时,泵流量均随驱动电压的增加而增加。分析可知,锥形流管无阀泵与锥形阶梯流管无阀泵的流量与驱动频率的曲线趋势基本一致,符合Fluent仿真模拟中对出口流量监测的瞬时流率趋势。在18 Hz时,两种泵的流量达到峰值,但无论是流量峰值或平均流量值,锥形阶梯流管泵的工作性能都要优于锥形无阶梯泵,最大流量提升了29%。

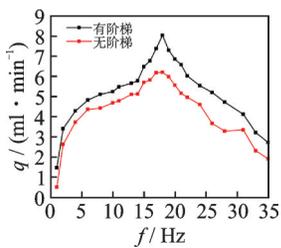


图11 有/无阶梯结构的无阀泵流量与频率关系

Fig.11 Flow rate-frequency comparison of valveless pump with/without stepped construction

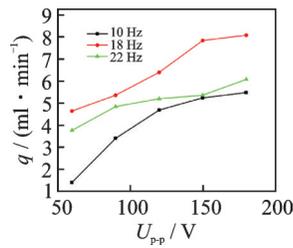


图12 驱动电压与流量的关系

Fig.12 Comparison of voltage and flow rate

4 结论

1) 提出了一种新型锥形阶梯流管无阀压电泵,分析了流管的流阻特性,确定了流体在锥形阶梯流管中正、反向的压力损失系数不等,并对泵的工作原理进行了研究,证明了锥形阶梯结构理论的可行性。

2) 采用Fluent对泵体内流场变化进行模拟仿真,分析了不同时刻的流场流线图,并对锥形阶梯流管无阀泵与锥形无阶梯流管无阀泵的流线图进行了对比。仿真结果表明,该泵具有正、反流阻不等的特性,锥形阶梯结构相比于传统的锥形结构能够更有效地抑制液体的回流。

3) 对锥形流管泵和锥形阶梯流管泵进行流量对比实验,实验结果符合仿真模拟的结论,仿真流率图与泵实验测得流量图趋势吻合。实验结果表明,锥形阶梯流管无阀泵的传输性能要优于锥形流管泵,最大流量提升了29%。

参 考 文 献

- [1] LI H Y, LIU J K, LI K, et al. A review of recent studies on piezoelectric pumps and their applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 151: 107393.
- [2] CHEN S, QIAN C P, CHENG W T, et al. A low frequency driven piezoelectric pump with flexible valve[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 319: 112567.
- [3] 王颖, 张建辉, 严秋锋. 对称螺旋线形阀压电泵的研究[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(5): 1025-1032. WANG Ying, ZHANG Jianhui, YAN Qiufeng. Study on piezoelectric pump with symmetrical and spiral shaped valve[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(5): 1025-1032. (in Chinese)
- [4] WANG J T, LIU Y, SHEN Y H, et al. A resonant piezoelectric diaphragm pump transferring gas with compact structure[J]. Micromachines, 2016, 7(12): 219.
- [5] LIU G J, WANG M, LI P F, et al. A micromixer driven by two valveless piezoelectric pumps with multi-stage mixing characteristics[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 333: 113225.
- [6] HUANG J, ZOU L, LI Z J, et al. Development and performance comparison of valveless piezoelectric pumps with asymmetrical channels[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 314: 112241.
- [7] 付俊, 张建辉, 王颖, 等. 半柔性阀压电泵理论与实验[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(5): 1005-1010. FU Jun, ZHANG Jianhui, WANG Ying, et al. Research on semi-flexible valve piezoelectric pump[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(5): 1005-1010. (in Chinese)
- [8] 田晓超, 杨志刚, 吴越, 等. 无阀气体压电泵仿真分析与实验[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(4): 785-791. TIAN Xiaochao, YANG Zhigang, WU Yue, et al. Simulation analysis and experiment of valve-less gas piezoelectric pump[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(4): 785-791. (in Chinese)
- [9] 黄俊. 流阻差型无阀压电泵的原理与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [10] 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 Jianhui, CAO Bingxin, CHEN Daogen, et al. Experimental verification on valve-less piezoelectric

- pump with hemisphere-segment bluff-body [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 76-84. (in Chinese)
- [11] 夏齐霄, 张建辉, 雷红, 等. 非对称群峰结构无阀压电泵的理论分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2391-2397.
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. (in Chinese)
- [12] 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 Qixiao, ZHANG Jianhui, LI Hong. Valve-less piezoelectric pump with unsymmetrical slope chamber bottom [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 641-647. (in Chinese)
- [13] 张蕊华, 张建辉, 朱银法, 等. 三棱柱阻流体无阀压电泵的设计与试验[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 327-334.
ZHANG Ruihua, ZHANG Jianhui, ZHU Yinfa, et al. Design and experiment of valveless piezoelectric pump with triangular prism bluff body [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 327-334. (in Chinese)
- [14] STEMME E, STEMME G. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1993, 39(2): 159-167.
- [15] 王颖, 张建辉, 刘志玲, 等. 螺旋形流管无阀压电泵的试验研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 239-245.
WANG Ying, ZHANG Jianhui, LIU Zhiling, et al. Experimental studies on valveless piezoelectric pump with spiral flow tubes [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(4): 239-245. (in Chinese)
- [16] 田鹏, 黄俊, 施卫东. 非对称分叉流管无阀压电泵的设计及试验[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(6): 1178-1183.
TIAN Peng, HUANG Jun, SHI Weidong. Design and experimental study of valveless piezoelectric pump with asymmetrical bifurcated channels [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(6): 1178-1183. (in Chinese)
- [17] 张建辉, 黎毅力, 刘菊银, 等. "Y"形流管无阀压电泵模拟与试验[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 669-675.
ZHANG Jianhui, LI Yili, LIU Juyin, et al. Simulation and experiment of valveless piezoelectric pump with Y-shape tubes [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4): 669-675. (in Chinese)
- [18] 唐茗, 包启波, 张建辉, 等. 流线形流管无阀压电泵的仿真与实验[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(1): 56-61.
TANG Ming, BAO Qibo, ZHANG Jianhui, et al. Simulation and experiment of streamlined flow tube valveless piezoelectric pump [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1): 56-61. (in Chinese)
- [19] BIAN K, HUANG Z, BAO Q B, et al. Design and experiment of streamlined piezoelectric pump with low vortex and large flow rate [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37(1): 155-163. (in Chinese)
- [20] 李军, 程光明, 杨志刚, 等. 一种改进的平板式无阀压电泵[J]. 压电与声光, 2001, 23(5): 351-353.
LI Jun, CHENG Guangming, YANG Zhigang, et al. A plate valveless piezoelectric pump with improved structure [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2001, 23(5): 351-353. (in Chinese)
- [21] LEE S C, HUR S, KANG D, et al. The performance of bioinspired valveless piezoelectric micropump with respect to viscosity change [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2016, 11(3): 036006.
- [22] EHRLICH L, PUNCH J, JEFFERS N, et al. Experimental characterization of novel microdiffuser elements [C]//Eurotherm Seminar 102: Thermal Management of Electronic Systems. Limerick: IOP Publishing Ltd, 2014: 012008.
- [23] 张蕊华, 张建辉, 朱银法, 等. 3D打印的锥管坡面腔底无阀压电泵[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(2): 378-382.
ZHANG Ruihua, ZHANG Jianhui, ZHU Yinfa, et al. Principles and experimental verification of valveless piezoelectric pump with taper pipe slopes element [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(2): 378-382. (in Chinese)
- [24] 冯丽娜. 非对称锥形管无阀压电泵的研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2013.
- [25] 杨庆. 阶梯溢流坝水力特性和消能机理试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2002.
- [26] SINGHAL V, GARIMELLA S V, MURTHY J Y. Low Reynolds number flow through nozzle-diffuser elements in valveless micropumps [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 113(2): 226-235.



第一作者简介:孙业明,男,1978年7月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为压电执行器机构设计及驱动控制技术。曾发表《单腔单振子压电泵流量自测量方法研究》(《农业机械学报》2014年第45卷第3期)等论文。
E-mail: 790005813@qq.com