

# 流线形流管无阀压电泵的仿真与实验\*

唐 茗, 包启波, 张建辉, 赖立怡, 黄 智, 杨冠宇, 潘殷豪

(广州大学机械与电气工程学院 广州, 510006)

**摘要** 基于现有无阀压电泵输送活体细胞或者长链功能性高分子时依然存在输送破坏与缠绕失性等缺点,提出了一种流线形流管无阀压电泵,研究了4组不同角度的流线形流管无阀压电泵的输出性能。首先,阐述了泵的结构及工作原理,建立泵的流量表达式;其次,采用Fluent流体分析软件对 $\beta$ 角度分别为 $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ 和 $25^\circ$ 的流管组成的无阀压电泵进行内部流场动网格仿真,发现内部流场稳定性随着 $\beta$ 角的增加而降低,而最佳输出流量伴随着角度的增加而增加,对比相同压差下流线形流管和锥形流管的仿真结果,发现流线形流管可有效提高流体流动的稳定性的;最后,对4组不同角度的样泵进行流量测量实验,并将实验结果与仿真结果进行对比。结果表明:实验得到的最佳输出流量变化趋势以及泵送方向均与仿真结果一致。本研究促进了流线形流管无阀压电泵在微活性物输送领域以及医疗保健领域的应用。

**关键词** 无阀压电泵;有限元仿真;流线形流管;流量  
**中图分类号** TH38; TN384

## 引 言

压电泵作为一种新型的压电驱动流体技术,具有结构简单、易于微型化、无电磁干扰及功耗低等特点,在生物医学、微生物输送以及医疗保健等领域有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。其中,无阀压电泵由于内部没有可移动部件阀,避免了流动滞后且消除了可动阀体对高分子、微生物等输送物的挤压伤害<sup>[4-6]</sup>,有利于将其用作活体细胞、真菌和长链高分子药物的输送,以促进现代生物医学领域的进一步发展。

国内外学者为此进行了大量的研究。张建辉等<sup>[7-8]</sup>为了输送高分子开发了一种Y型流管无阀压电泵,分析了分叉角度对高分子输送的影响规律,确立了不同角度的适用场合。文献<sup>[9-10]</sup>为了缩减医疗药物输送用泵的体积,提出了一种泵腔内置阻流体的半球缺阻流体无阀压电泵,研究了阻流体的排列大小等因素对泵送性能的影响。王记波等<sup>[11]</sup>分析了现有的液体微混合器存在的不足,提出了一种将阻流体内置在传统锥形流管内部的无阀压电泵微混合器,研究了内部参数对混合效果的影响。文献<sup>[12-13]</sup>通过对锥形流管无阀压电泵的研究,提出一种用于医疗雾化的动锥角压电雾化器,并研究了影响雾化效果的因素。文献<sup>[14]</sup>设计了一种可用于生

物输送的类十字流道无阀压电泵,利用仿真软件分析了压电振子的振动模态以及泵中流体的流动特性。由于无阀压电泵内部结构的特殊性,使其容易出现旋涡回流现象。

笔者提出一种流线形流管无阀压电泵,以改善现有无阀压电泵在生物医疗领域的流动不稳定性。首先,通过构建4组不同角度的流线形流管无阀压电泵,建立泵送流量的理论表达式;其次,利用Fluent软件模拟了流线形流管无阀压电泵内部流场特性和相同压差下流线形流管与锥形流管内部速度变化情况;最后,对泵送流量伴随角度特性变化的规律进行实验验证,并将实验结果与仿真结果进行对比分析。

## 1 结构及工作原理

### 1.1 结构特点

图1为流线形流管无阀压电泵示意图,包含泵盖、压电陶瓷和金属铜片组成压电振子、密封圈、设有流管安装孔和泵腔的泵体以及一对互相倒置的流线形流管。互相倒置的流线形流管安装在泵体的另一侧,与泵腔连通构成流体介质的进出口。

图2为流线形流管结构示意图。根据结构形状,可以近似等效为2段锥形角分别为 $2\alpha$ 和 $2\beta$ 的类

\* 国家自然科学基金资助项目(51375227);广州市属高校科研资助项目(1201610315)  
收稿日期:2019-04-01;修回日期:2019-05-22

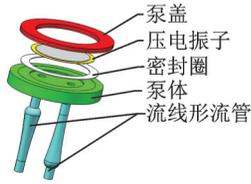


图 1 流线形流管无阀压电泵示意图

Fig.1 Schematic diagram of the streamlined flow tube valveless piezoelectric pump

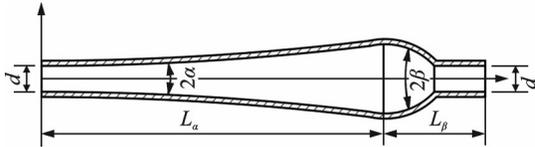


图 2 流线形流管结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the streamlined flow tube

锥形曲线对接而成的流管,使整个流管呈现既有收敛又有发散状的流线形结构。为了方便解释说明,定义流体从角度  $2\alpha$  段向角度  $2\beta$  段流动为正向流动,反之为反向流动。

### 1.2 工作原理

对压电振子施加正弦交变电压,泵腔内部的容积产生周期性变化,泵腔容积逐渐增大对应无阀泵的吸程阶段,容积减小为排程阶段。无论是吸程阶段还是排程阶段,进入流管内部的流体均先处于逆压力梯度流动状态:内部压力升高,流速降低,流动呈现发散状态。当越过流线形流管的最大过流截面后,其逆压力梯度流动状态瞬间转变为顺压力梯度流动状态:内部压力减小,流速增加,流动呈现收敛状态。

## 2 理论分析与模拟

### 2.1 理论分析

当对压电振子施加正弦交变电压时,压电振子开始做周期性往复运动。振子周边被固定,其振动形式为一抛物弧面,在极坐标下其抛物面截面构成的抛物线变化方程为

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

其中:  $R$  为压电振子的工作半径;  $\omega_0$  为压电振子的最大工作振幅。

压电振子振动变化引起的泵腔容积变化为

$$\Delta V = 2\pi \int_0^R \omega_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) r dr = \pi\omega_0 R^2/2 \quad (2)$$

根据曲线渐扩管/渐缩管内部的流体流动的阻力系数公式<sup>[15-16]</sup>,流体在流线形流管的  $2\alpha$  和  $2\beta$  段扩

散和收敛流动时受到的阻力系数为

$$\begin{cases} \xi_k = 3.2k \tan(\theta) \sqrt[4]{\tan\theta} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \\ \xi_s = \psi(\delta_p^3 + 2\pi\delta_p^2 - 10\delta_p) \\ \psi = -0.0125n^4 + 0.0224n^3 - 0.00732n^2 + \\ \quad 0.00444n - 0.00745 \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\xi_k, \xi_s$  分别为扩散流动和收敛流动对应的流阻系数;  $\theta$  为流线形流管的  $\alpha$  或者  $\beta$  角;  $n$  为最大与最小过流截面的比值;  $\delta_p$  为  $\alpha, \beta$  的弧度值。

在  $2\alpha, 2\beta$  段做扩散和收敛流动时所对应的流阻系数分别为  $\xi_{ak}, \xi_{\beta k}$  和  $\xi_{as}, \xi_{\beta s}$ , 流线形流管的正、反向流动时阻力系数分别为

$$\begin{cases} \xi^+ = (\xi_{ak} + \xi_{\beta s}) \\ \xi^- = (\xi_{\beta k} + \xi_{as}) \end{cases} \quad (4)$$

在其他参数保持不变的条件下,流线形流管组成无阀压电泵的流阻系数与  $\beta$  角呈正相关。根据文献[17-18]得到泵腔容积变化量、流量及频率三者间的关系,流线形流管无阀压电泵的流量表达式为

$$Q_v = \Delta V f \frac{\xi^+ - \xi^-}{2 + \xi^+ + \xi^-} = \frac{\pi\omega_0 R^2}{2} f \frac{\xi^+ - \xi^-}{2 + \xi^+ + \xi^-} \quad (5)$$

其中:  $Q_v$  为泵送流量;  $f$  为压电振子驱动频率。

### 2.2 模拟仿真

为了模拟流线形流管无阀压电泵内部的流场特性,固定  $\alpha=4^\circ$ , 以  $\beta$  角为变量,建立  $\beta=10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  和  $25^\circ$  的流线形流管组成的无阀压电泵的三维模型,并对流体区域进行简化。在简化后的流体区域建立三维状态下的有限元模型并划分网格,如图 3 所示。

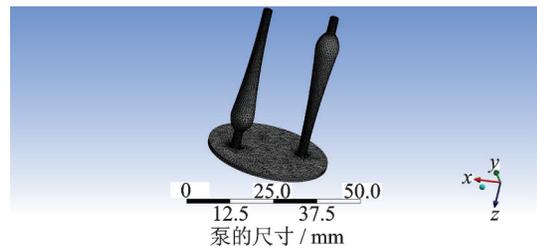


图 3 流线形流管无阀压电泵网格划分

Fig.3 The meshing of the streamlined flow tube valveless piezoelectric pump

模拟采用的压电泵基本参数如表 1 所示。仿真所用的流体介质是密度为  $1 \text{ g/cm}^3$  的水,运动黏度系数为 1.01,温度为  $20^\circ\text{C}$ ,采用  $k-\epsilon$  流体计算模型。根据压电振子在驱动电压有效值为  $100 \text{ V}$  时振幅变化的最大值来设立动网格的运动参数。不同角度的流

表 1 模拟用无阀压电泵尺寸参数

**Tab.1 Dimensional parameters of the valveless piezoelectric pump for simulation**

参数	数值
泵腔直径/mm	35
泵腔高度/mm	1
流管 $\beta$ 角/°	10, 15, 20, 25
密封圈厚度/mm	0.2

表 2 流管参数

**Tab.2 Parameters of flow tubes**

$\beta$ /°	$\alpha$ /°	$D$ /mm	$L_a$ /mm	$L_b$ /mm
10	4	2.5	30.00	14.00
15	4	2.5	32.57	11.43
20	4	2.5	34.40	9.60
25	4	2.5	35.40	8.60

线形流管参数如表 2 所示。

图 4 为吸程阶段速度云图。图 5 为吸程阶段速度流线图。图 6 为排程阶段速度云图。图 7 为排程阶段速度流线图。如图 4,5 所示,流线形流管无阀

压电泵处于吸程时,右边流管内部流体的流动速度大于左边流管内部的,且右边流管内部湍流和旋涡也小于左边流管,因而流体在右边流管内受到的阻力低。反之,如图 6,7 所示,在排程阶段流体在左边流管受到的阻力较右边流管内的低。由于流线形流

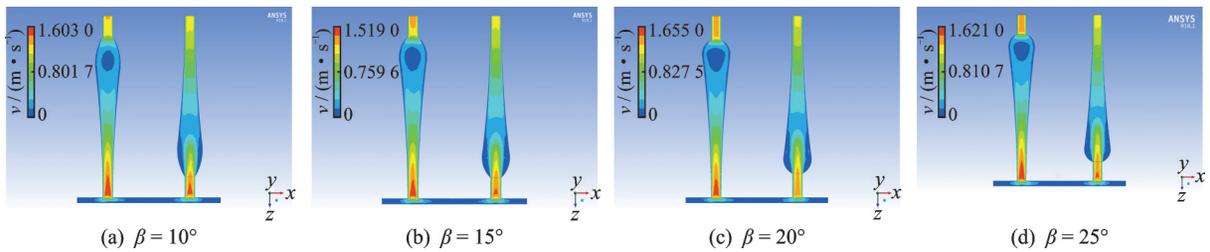


图 4 吸程阶段速度云图

Fig.4 The speed clouds in suction stroke

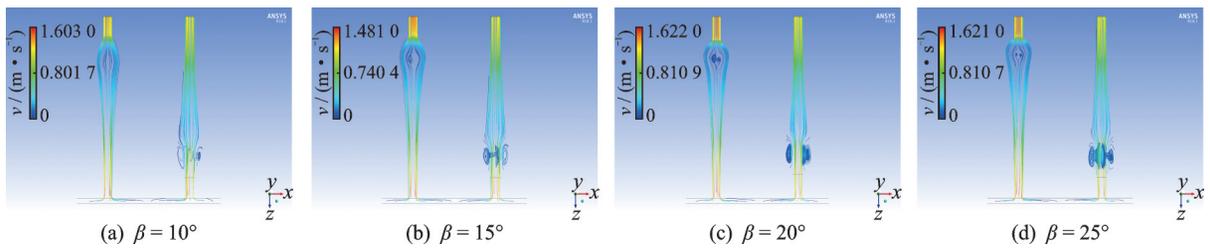


图 5 吸程阶段速度流线图

Fig.5 Streamline diagram in suction stroke

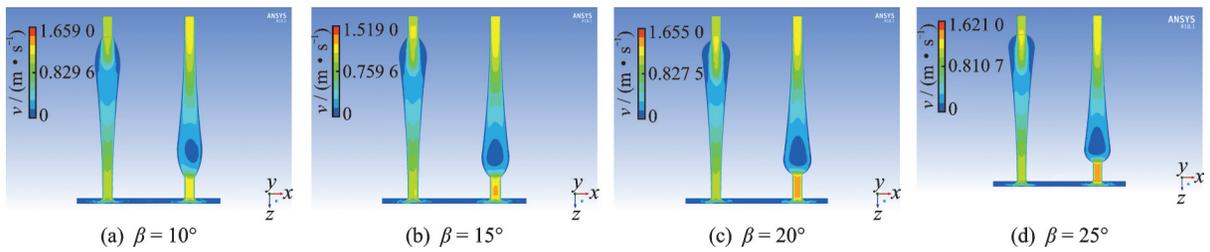


图 6 排程阶段速度云图

Fig.6 The speed clouds in compression stroke

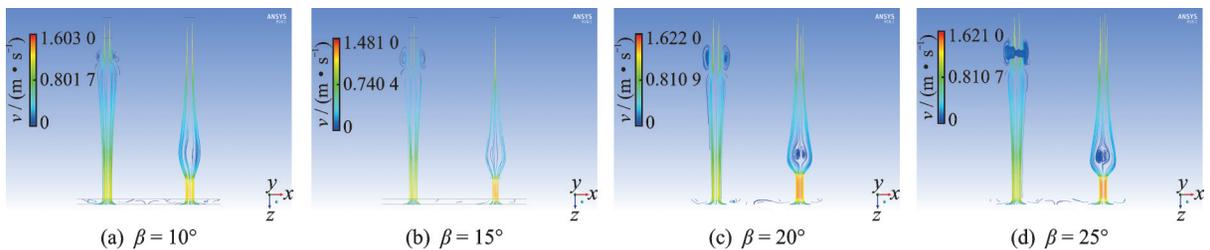


图 7 排程阶段速度流线图

Fig.7 Streamline diagram in compression stroke

管正反向流动时存在流阻不等的特性,因此可以推断该流线形流管无阀压电泵从右流管向左流管输送流体。根据图 5,7 所示的吸排程阶段的速度流线图可知,当 $\beta=10^\circ$ 和 $15^\circ$ 时,整个泵在送过程中,流管正向流动时均没有出现明显的旋涡现象,仅在反正流动时有少量的旋涡出现且分布规律;在 $\beta=20^\circ$ 和 $25^\circ$ 时,在流管的正向流动中出现了少量的旋涡且集中分布,反向的旋涡明显加大,数量增加不明显。表 3 为 $\beta$ 角与流场稳定性的关系。同时,流线形流管无阀压电泵在泵送流体时,左右两边流管内部流体的流速之差与角度变化呈正相关关系,即流线形流管无阀压电泵输出流量随着角度的增加而加大。

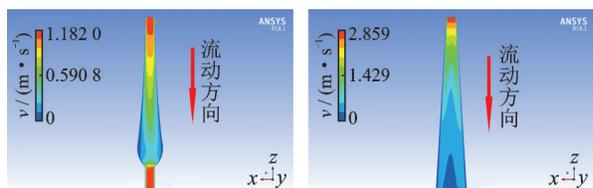
表 3  $\beta$ 角与流场稳定性的关系

**Tab.3 Relationship between  $\beta$  and flow field stability**

$\beta/(^\circ)$	稳定性
10	非常稳定
15	稳定
20	一般
25	较差

为了进一步探究流线形流管内部流场变化与传统的锥形流管内部流场变化的差异,选取 $\beta=15^\circ$ 的流线形流管和相同角度的锥形流管,利用 Fluent 模拟了 2 只流管在进出口压力差为 1kPa 条件下流管内部速度变化情况,如图 8 所示。模拟用锥形流管尺寸参数如表 4 所示。

图 8 为相同压差下,流线形流管和锥形流管的速度云图。在锥形流管中,内部流体一直处于逆压力梯度流动状态,流体速度急剧减小并在流管的 3/4 处出



(a) 流线形流管速度云图 (b) 锥形流管速度云图  
(a) Speed cloud of streamlined flow tube (b) Speed cloud of conical flow tube

图 8 流线形流管和锥形流管速度云图

Fig.8 Speed clouds of the streamlined flow tube and cone-shaped flow tube

表 4 锥形流管尺寸参数

**Tab.4 The parameters of conical flow tube**

参数	数值
流管长度/mm	44
锥形角/ $^\circ$	8
小径/mm	2.5
大径/mm	8

现速度完全为零的情况,有明显的旋涡出现并且以湍流状态进入到泵腔内部,同时有大量的回流现象出现扰乱了内部流动。在流线形流管内部,随着流体介质进入到流管后,流体首先处于逆压力梯度流动,在增压减速作用下流速逐渐减小,相对于锥形流管其速度变化缓慢;直到流体越过最大过流截面后,内部流体的压力梯度瞬间转变为顺压力梯度,此时速度又逐渐增加。对比两者内部的流场变化,流线形流管能够改善锥形流管结构带来的旋涡和湍流等问题。

### 3 流量实验

通过 3D 打印技术制作了 $\beta$ 角分别为 $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 和 $25^\circ$ 的流线形流管,并与泵体、泵盖、压电振子等组装成 4 个流线形流管无阀压电泵,如图 9 所示。

采用的压电振子参数如表 5 所示。利用示波器、函数信号发生器、功率放大器、电子天平和烧杯等实验器材设备,根据图 10 所示的实验原理搭建实验测试平台,如图 11 所示。首先,调节功率放大器的输出旋钮并结合示波器的监视功能使得输出电压保持有效值为 100 V;其次,通过信号发生器改变无阀泵的驱动频率;最后,通过电子天平称量流线形流

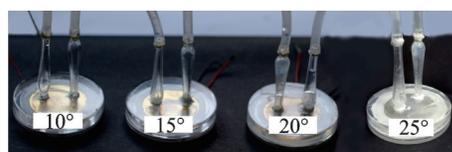


图 9 实验用流线形流管无阀压电泵示意图

Fig.9 Four groups of streamlined flow tube valveless piezoelectric pumps for experiment

表 5 压电振子尺寸参数

**Tab.5 The dimensional parameters of piezoelectric vibrator**

参数	数值
压电振子外径/mm	41
压电振子内径/mm	35
压电陶瓷厚度/mm	$0.23 \pm 0.01$
铜基厚度/mm	$0.25 \pm 0.01$

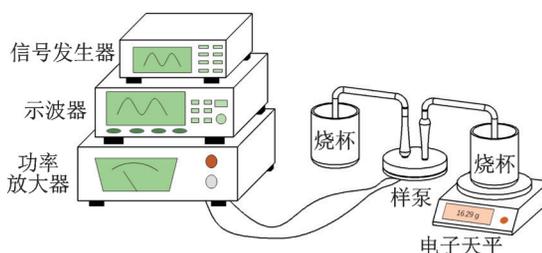


图 10 实验原理图

Fig.10 Experimental principle of flow-rate measurement



图11 实验测试平台

Fig.11 Experimental setup of flow-rate measurement

管无阀压电泵的泵送流量。

泵送流量与驱动频率之间的关系如图12所示。对同一无阀泵保持驱动电压不变,观察到压电泵的输出流量先随着驱动频率增加而增加,直到驱动频率达某一值后,输出流量随频率的增加而减小。最佳流量频率伴随 $\beta$ 角度的增加呈现出逐渐增加趋势。4组无阀泵最大泵送流量及其对应的驱动频率分别为:7.98 mL/min, 9 Hz ( $\beta=10^\circ$ ); 14.76 mL/min, 12 Hz ( $\beta=15^\circ$ ); 15.82 mL/min, 15 Hz ( $\beta=20^\circ$ ); 16.45 mL/min, 11 Hz ( $\beta=25^\circ$ )。

将实验结果和仿真结果进行对比分析,发现实验用的无阀泵泵送方向与根据仿真的速度云图分析得到的泵送方向完全一致。对比上述4组不同角度的压电泵实验获得的最佳输出流量与仿真模拟得到的最佳输出流量,发现两者变化趋势吻合度高,仿真流量与实验流量对比如图13所示。仿真时由于简

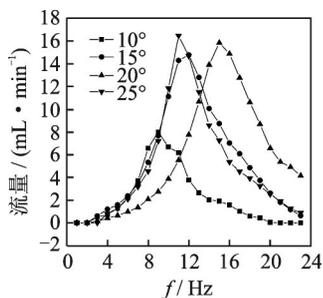


图12 流量和驱动频率之间的关系

Fig.12 Relationship between flow and frequency among four groups

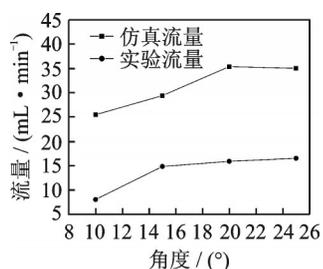


图13 仿真流量与实验流量对比

Fig.13 The experimental and simulated flow-rate results

化了模型,其流量较实际对应值大。

计算实验最佳流量和仿真流量两者之间的相对误差,得到相对误差与角度的变化关系如图14所示。最大误差为68.6%,对应角度 $\beta=10^\circ$ ;最小误差为49.7%,对应角度 $\beta=15^\circ$ 。导致实验结果与仿真结果误差出现的原因可以归为以下几点:①实验采用橡胶软管连接流管的进出口导致较大压力损失;②实验利用硅胶粘接振子和密封圈,导致泵腔的实际容积加大,某种程度上减小了容积变化率;③泵腔及流管内部存在气泡,影响了泵送性能。可见, $\beta=10^\circ$ 的无阀泵适用于流动稳定性高、输出流量要求不高的场合; $\beta=20^\circ$ 和 $25^\circ$ 的无阀泵适用于大流量输出、但对流动稳定性无要求的场合。

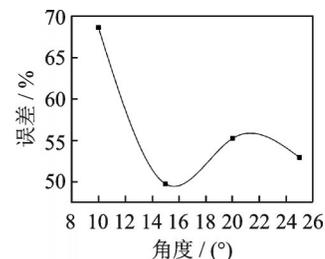


图14 相对误差与角度的变化关系

Fig.14 Relationship between the relative errors and the angles

## 4 结束语

提出一种流线形流管无阀压电泵,用于提高输送流体过程的稳定性。首先,推导了该泵的输出流量表达式;其次,建立有限元仿真的三维模型,并模拟安装角 $\beta$ 分别为 $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ 和 $25^\circ$ 的流线形流管各自内部的流场,发现内部流场的稳定性随着 $\beta$ 角的增加而降低,而最佳输出流量随着角度的增加而增加;然后,对比相同压差下流线形流管和锥形流管的仿真结果,发现流线形流管有效提高流体流动的稳定性;最后,对压电泵进行流量测量实验,将实验结果与仿真结果进行对比分析。结果表明:每组最佳输出流量变化趋势以及泵送方向均与仿真结果一致,仿真流量和实验流量之间最大误差为68.6%,最小误差为49.7%。流线型流管无阀压电泵有利于提高泵送的稳定性,为活体细胞输送、长链功能性高分子的输送用泵提供了借鉴基础。

## 参 考 文 献

- [1] 陈松,王淑云,谢心怡,等.组合式压电驱动芯片水冷系统[J].光学精密工程,2018,26(5):1140-1147.

- CHEN Song, WANG Shuyun, XIE Xinyi, et al. Practical research on computer chip water cooling system with combiner piezoelectric pump unit[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(5): 1140-1147. (in Chinese)
- [2] BAO Q B, ZHANG J H, TANG M, et al. A novel PZT pump with built-in compliant structures [J]. Sensors, 2019, 19(6): 1301.
- [3] 吴宣, 陈立国, 贺文元, 等. 面向压电泵脉动消除的流体滤波器设计与实验 [J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(6): 1123-1128.
- WU Xuan, CHEN Liguang, HE Wenyuan, et al. Investigation on milling stability lobe construction based on milling force simulation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis [J]. 2016, 36(6): 1123-1128. (in Chinese)
- [4] 吴越, 杨志刚, 刘勇, 等. 压电泵设计中阀的匹配方法 [J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(S2): 33-36.
- WU Yue, YANG Zhigang, LIU Yong, et al. Study on the performance optimization of check valve in piezoelectric pump[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(S2): 33-36. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] ZHANG J H, WANG Y, HUANG J. Advances in valveless piezoelectric pump with cone-shaped tubes [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(4): 766-81.
- [7] 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 & Precision Engineering, 2008, 16(4): 669-675. (in Chinese)
- [8] 张建辉, 黎毅力, 刘菊银, 等. “Y”形流管无阀压电泵流场分析 [J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(2): 126-132.
- ZHANG Jianhui, LI Yili, LIU Juyin, et al. Analysis of the flow field of the valveless piezoelectric pump with Y-shape tubes[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(2): 126-132. (in Chinese)
- [9] 纪晶, 张建辉, 季瑞南, 等. 半球缺纵向排列对半球缺阻流体无阀泵的影响 [J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(6): 1072-1079.
- JI Jing, ZHANG Jianhui, JI Ruinan, et al. Influence characteristics of hemisphere-segment in longitudinal alignment on valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(6): 1072-1079. (in Chinese)
- [10] 曹炳鑫, 张建辉, 陈道根, 等. 半球缺阻流体无阀压电泵流场分析 [J]. 压电与声光, 2014, 36(4): 515-518.
- CAO Bingxin, ZHANG Jianhui, CHEN Daogen, et al. Analysis of flow field of the valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(4): 515-518. (in Chinese)
- [11] 王记波, 刘国君, 马祥, 等. 无阀压电泵驱动的集成式微混合器 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(1): 92-99.
- WANG Jibo, LIU Guojun, MA Xiang, et al. An integrated micro-mixer driven by valveless piezoelectric pump[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2018, 52(1): 92-99. (in Chinese)
- [12] 蔡玉飞. 振动微锥孔式雾化器原理及冷却应用研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [13] CAI Y F, ZHANG J H, ZHU C L, et al. Theoretical calculations and experimental verification for the pumping effect caused by the dynamic micro-tapered angle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(3): 615-23.
- [14] FATHIMA M, GEHAN M, CHAMITHA A, et al. Development of PZT actuated valveless micropump[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1302.
- [15] 莫斯特柯夫 M A. 水力学手册[M]. 麦乔威, 译. 北京: 水利出版社, 1956: 299-319.
- [16] 依德利契克. 实用流体阻力手册[M]. 华绍曾, 杨学宁, 译. 北京: 国防工业出版社, 1985: 141-203.
- [17] 吴博达, 汤乐超, 李军, 等. 无阀压电泵的泵腔容积变化量 [J]. 压电与声光, 2002(2): 152-154.
- WU Boda, TANG Lechao, LI Jun, et al. The pump chamber of a valve-less piezoelectric pump [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2002(2): 152-154. (in Chinese)
- [18] 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 Jianhui, WANG Shouyin. Study of piezoelectric valveless diffuser/nozzle-based fluid pump: one-way flow principle and the pump flow [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2001, 23(1): 23-25. (in Chinese)



**第一作者简介:**唐茗,男,1994年2月生,硕士生。主要研究方向为无阀压电泵的结构设计及理论研究。

E-mail:gzdxtangming@foxmail.com