DOI: 10.3901/JME.2020.04.239

螺线形流管无阀压电泵的试验研究*

王 颖¹ 张建辉^{2,3} 刘志玲⁴ 刘永强¹

(1. 泰州职业技术学院机电技术学院 泰州 225300;

2. 广州大学机械与电气工程学院 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 南京 210016;

4. 南通新朗置业发展有限公司 南通 226600)

摘要: 流体在螺线形流管中流动时受到的哥氏力,能够增强流体的传质效果,实现输送流体的功能。研究表明进出流管一侧为斜线另一侧为螺旋线的单螺线形流管无阀泵具有泵功能,而进出流管形状为异向螺线时相较于单螺线形流管哪种泵输出性能更优,以及进出流管形状为同向螺线形时是否具有“泵”功能,或者其输出是否低于异向螺线形流管无阀泵,却没有相关研究。为了更好地发挥螺线形流管在无阀压电泵中的优势,拓展该种类无阀泵的应用场合,需要进一步探讨螺线形流管的布局方式对泵输出性能的影响。分析流体在螺线形流管内部的流动情况,推导顺、逆时针流动时的速度差公式,认为螺线形流管无阀泵流量是由进、出水流的流阻差造成的。利用 3D 打印技术,设计制作同向螺线、异向螺线以及单螺线形流管三种不同流管布局的无阀压电泵,测量不同频率下三种泵的流量。发现相同电压下,单螺线形流管无阀泵的流量最大,且其最佳工作频率也最大;同向螺线形流管无阀泵也有泵输出,但是输出量很小;当螺线形流管无阀泵的驱动功率较小,其驱动力不足以抵抗流管沿程的流阻损失时,反而体现不出其螺线形流管的优点。

关键词: 压电泵;无阀泵;螺线形流管;哥氏力;流管

中图分类号: TH35; TH38

Experimental Studies on Valveless Piezoelectric Pump with Spiral Flow Tubes

WANG Ying¹ ZHANG Jianhui^{2,3} LIU Zhiling⁴ LIU Yongqiang¹

(1. College of mechanical and Electrical Technology, Taizhou Polytechnical Institute, Taizhou 225300 ;

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

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

4. Nantong Xinlang Estates Development Company, Nantong 226600)

Abstract: When fluid flows in a spiral tube, the Coriolis force can enhance the mass transfer effect of the fluid and realize the function of conveying fluid. The research shows that the single-screw flow tube without valve pump has the pump function, while the shape of the flow pipe is different from that of the single-screw flow tube, which is better than the one-way pump output, and whether the shape of the flow tube has a pump function or whether its output is lower than the abnormal spiral flow pipe without valve pump, but no relevant research is conducted. In order to better utilize the advantages of the spiral flow tube in the valveless piezoelectric pump, the influence of the arrangement mode of the spiral tube on the output performance of the pump is needed. In this paper, the flow of fluid in the spiral tube is analyzed, and the velocity difference formula between clockwise and anticlockwise flow is derived. It is believed that the flow of the valveless pump in the spiral tube is caused by the flow resistance difference between the inlet and outlet flow tubes. Using the 3D printing technology, a valveless piezoelectric pump with three different flow tube layouts of the same direction spiral, the anomalous spiral and the single spiral flow tube is designed and manufactured, and the flow rate of three kinds of pumps under different frequencies is measured. It is found that the single-screw flow tube has the largest flow of valveless pump at

* 国家自然科学基金(51375227)、广州大学引进人才科研启动(ZJH3-2001)、广州市属高校科研(1201610315)、泰州职业技术学院科研(TZYKY-18-20)资助项目。20190329 收到初稿,20190926 收到修改稿

the same voltage, and the best working frequency is also the best; the pump output is also given to the valveless pump of the concentric spiral tube, but the output is small, the driving force is not enough to resist the flow resistance loss along the pipeline, but it can not reflect the advantages of its spiral tube.

Key words: piezoelectric pump; valveless pump; spiral flow tube; Coriolis force; flow tube

0 前言

无阀压电泵具有结构简单、功耗低、易携带等优点被广泛地应用于医疗、卫生等领域^[1-3]。通常由泵体、压电陶瓷片以及进、出水管组成。无阀压电泵通过流道中特定的结构来实现“阀”的功能，从而驱动流体形成单向流动。

流管结构是无阀压电泵中最重要的元素，它形成的正、反流阻差与压电振子上、下振动形成的容积变化使流体产生宏观上的单向流动，实现泵的功能。多年来研究人员发明了多种结构形式流管的无阀压电泵。瑞典的 ERIK 等^[4]开创性地提出了第一只无阀压电泵——锥形流管无阀压电泵，研究人员基于他们的发明，后续对锥形流管无阀泵的原理、结构和性能做了大量的研究和探讨^[5-7]；TESLA^[8]发明了双环管道阀(简称“Tesla 阀”)；张建辉等^[9]提出了“Y”形流管无阀压电泵；JIANG 等^[10]利用双环管道阀，设计了 T45/4×2 型异型管无阀压电泵。

LENG 等^[11-12]利用哥氏力的作用，发明了由不对称斜线流管和平面螺旋线流管构造进出流管的单螺旋形无阀压电泵。然而进出流管形状为异向螺旋线时比较于单螺旋形流管哪种泵输出性能更优，以及进出流管形状为同向螺旋线形时是否具有“泵”功能，或者其输出是否低于异向螺旋线形流管无阀泵，却没有相关研究。为了更好地发挥螺旋形流管在无阀压电泵中的优势，拓展该种类无阀泵的应用场合，需要进一步探讨螺旋形流管的布局方式对泵输出性能的影响。

本研究将设计同向螺旋形流管、异向螺旋形流管和单螺旋形流管三种布局平面螺旋形流管无阀压电泵，分析他们的工作原理，推导螺旋形流管速度差计算公式。由于螺旋形流管泵的加工和装配较为复杂，密封要求高，而且装配式结构体积较大，研究拟借助 3D 打印技术，分别制作三种布局的螺旋形流管无阀泵，通过试验比较他们的输出性能。

1 流管内部流动分析

为了分析流体在螺旋形流管中正、反向流动

特性，建立了图 1 所示的柱坐标系以及对应的控制方程。几何模型研究对象为阿基米德螺旋线形平面曲线结构，该阿基米德曲线方程为 $R=a\theta$ ，其中 R 为平面螺旋形流管的半径， a 为基圆半径， θ 为螺旋形流管的转角。设流管中的流体为理想非黏性液体。

图 1 流体在螺旋形流管中流动参考系统图

根据流体力学基本方程和平面螺旋形流管的几何特性在柱坐标系 (r, θ, z) 下建立理想流体的运动方程，如下

$$\begin{cases} \frac{du_I}{dt_I} - \frac{v_I^2}{r_I} = -\frac{\partial P_I}{\partial r_I} \\ \frac{dv_I}{dt_I} + \frac{u_I v_I}{r_I} = -\frac{1}{r_I} \frac{\partial P_I}{\partial \theta_I} \\ \frac{dw_I}{dt_I} = -\frac{\partial P_I}{\partial z_I} \end{cases} \quad (1)$$

式中， I 表示惯性参考系中的量， (u, v, w) 分别为沿柱坐标 (r, θ, z) 三个坐标轴方向的速度分量，其中 r 表示径向坐标分量， θ 表示切向坐标分量， z 表示垂直坐标分量。

而流体是正压的， P 为密度 ρ 的函数，设流体为均匀不可压缩液体，则有

$$P_I = \frac{P}{\rho} + gz \quad (2)$$

在研究螺旋形流管中的流体时，将其看成是微元体来研究。为了分析方便，假定微元体不动，惯性坐标系 (r_R, θ_R, z_R) 以角速度 Ω 绕 z 轴旋转。其中， R 为旋转坐标系中的分量。旋转后的惯性坐标系 (r_R, θ_R, z_R) 与原先的坐标系 (r_I, θ_I, z_I) 关系如下

$$\begin{cases} r_R = r_I = r \\ \theta_R = \theta_I - \Omega t_I \\ z_R = z_I = z \\ t_R = t_I = t \end{cases} \quad (3)$$

式中, $t=0$ 时, 上述两个坐标系重合。

沿三个坐标系的流速分量如下

$$\begin{cases} u_R = \frac{dr_R}{dt_R} = \frac{dr_I}{dt_I} = u_I = u \\ v_R = \frac{d(r_R\theta_R)}{dt_R} = \frac{d(r_I\theta_I - r_I\Omega t_I)}{dt_I} = v_I - \Omega t \\ w_R = \frac{dw_R}{dt_R} = \frac{dw_I}{dt_I} = w_I = w \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入到式(1)即可获得旋转参考系中流体运动方程为

$$\begin{cases} \frac{du_R}{dt_R} - \frac{v_R^2}{r_R} - 2\Omega v_R - \Omega^2 r_R = -\frac{\partial P_I}{\partial r_R} \\ \frac{dv_R}{dt_R} + \frac{u_R v_R}{r_R} + 2\Omega u_R = -\frac{1}{r_R} \frac{\partial P_I}{\partial \theta_R} \\ \frac{dw_R}{dt_R} = -\frac{\partial P_I}{\partial z_R} \end{cases} \quad (5)$$

本研究中, 螺旋形流管为阿基米德螺旋线, 即有 $r=a\theta$; 其中 $\theta = \Omega t$, 因此有 $r = a\Omega t$ 。

$$\begin{cases} \frac{\partial P_I}{\partial r} = \frac{\partial P_I}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{1}{a\Omega} \frac{\partial P_I}{\partial t} \\ \frac{\partial P_I}{\partial \theta} = \frac{\partial P_I}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{1}{\Omega} \frac{\partial P_I}{\partial t} \end{cases} \quad (6)$$

为了方便, 省略下标 R , 将式(5)和式(6)代入式(4)可以获得关于下列关于 v 的公式

$$-\frac{v^2}{a\Omega t} - 2\Omega v - a\Omega^3 t = -\frac{1}{a\Omega} \frac{\partial P_I}{\partial t} \quad (7)$$

$$v = \sqrt{\frac{\partial P_I}{\partial t} t} - a\Omega^2 t \quad (8)$$

同理, 坐标系顺时针旋转时, 旋转后的惯性坐标系(r_R, θ_R, z_R)与原先的坐标系(r_I, θ_I, z_I)关系如下

$$\begin{cases} r_R = r_I = r \\ \theta_R = \theta_I + \Omega t \\ z_R = z_I = z \\ t_R = t_I = t \end{cases} \quad (9)$$

同样可以推导出关于 v 的方程

$$-\frac{v_1^2}{a\Omega t} + 2\Omega v - a\Omega^3 t = -\frac{1}{a\Omega} \frac{\partial P_I}{\partial t} \quad (10)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{\partial P_I}{\partial t} t} + a\Omega^2 t \quad (11)$$

因此, 坐标系顺、逆时针旋转时的速度差

$$\Delta v = 2a\Omega^2 t \quad (12)$$

由式(12)可知, 在坐标系发生顺、逆时针旋转时, 会产生一个速度差, 即流体在流管中顺、逆时针流动时将会产生速度差, 从而产生流量差, 这是

由哥氏力造成的。当 Ω 为 0 时, 流体在流管中不发生旋转, 此时速度差为 0, 坐标系发生顺、逆时针旋转时不会产生流量差。同时, 坐标系旋转的角速度 Ω 越大, 产生的流量差就会越大。

2 泵结构及工作原理

2.1 泵结构

图 2 所示为螺旋形流管无阀压电泵的结构示意图, 压电泵由进水管、进水螺旋形流管、泵体、压电陶瓷片、泵腔、出水螺旋形流管以及出水管组成。工作过程中, 在交流电压的激励作用下, 压电振子周期性上下振动, 引起泵腔容积的周期性变化, 从而带动泵内流体的流动, 螺旋形流管起到了单向阀的作用。

图 2 螺旋流管无阀压电泵的结构示意图

1. 进水管 2. 进水螺旋形流管 3. 泵体 4. 压电陶瓷片 5. 泵腔
6. 出水螺旋形流管 7. 出水管

2.2 工作原理

在地球自转作用下, 流体在螺旋形流管无阀压电泵中的单向流动是因为受到哥氏力的作用, 在流管内顺、逆时针流动时受到的流阻不等而实现的。图 3 所示为异向螺旋形流管无阀泵工作原理。压电振子在交流电的激励作用下上、下振动, 引起泵腔容积周期性的增大和减小。

图 3 异向螺旋形流管无阀泵工作原理

图 3a 中, 当压电振子向上运动时, 泵腔内部容积增大, 腔内压强减小, 流体分别从流管 A 和流管 B 进入腔内。此时, 流管 A 内流体是逆时针流入泵腔, 流阻系数小, 流管 B 内流体是顺时针流入泵腔,

流阻系数大。则从流管 A 流入的流体量大于从流管 B 流入的流体, 即 $Q_{YinA} > Q_{YinB}$ (Q_Y 表示流过异向螺线形流管的流体量), 宏观上流体从流管 A 吸入, 压电振子一个振动周期内泵吸入流体量为

$$Q_{YinA} - Q_{YinB} = \Delta Q_Y \quad (13)$$

图 3b 中, 当压电振子向下运动时, 泵腔内部容积减小, 腔内压强增大, 流体分别从流管 A 和流管 B 流出泵腔。此时, 流体经流管的流动状况与图 3a 吸程时相反, 流管 A 内流体是顺时针流出, 流阻系数大, 流管 B 内流体是逆时针流出泵腔, 流阻系数小。则从流管 A 流出的流体量小于从流管 B 流出的流体量, 即 $Q_{YoutA} < Q_{YoutB}$, 则宏观上流体从流管 B 排出, 压电振子一个振动周期内泵流出流体量

$$Q_{YoutA} - Q_{YoutB} = -\Delta Q_Y \quad (14)$$

则压电振子振动的一个周期内, 即泵腔经过一次吸程和排程的过程, 流体从宏观上表现为单向流动, 而实现从流管 A 流入泵腔, 从流管 B 流出泵腔, 实现泵的功能。在压电振子一个振动周期内, 泵送的流体量为 $2\Delta Q_Y$ 。

图 4 所示为同向螺线形流管无阀泵工作原理。压电振子在交流电的激励下上、下振动, 引起泵腔容积周期性的增大和减小。

图 4 同向螺线形流管无阀泵工作原理

图 4a 中, 压电振子向上运动时, 泵腔内部容积增大, 腔内压强减小, 流体分别从流管 A 和流管 B 进入腔内。此时, 流管 A 内流体是逆时针流入泵腔, 流阻系数比较小, 流管 B 内流体也是逆时针流入泵腔, 与流管 A 内流体流入的流阻系数相近。则从流管 A 流入的流体量接近于从流管 B 流入的流体量, 即 $Q_{TinA} \approx Q_{TinB}$ (Q_T 表示流过同向螺线形流管的流体量), 泵吸入流体量 ΔQ_T 趋近于 0, 即

$$Q_{TinA} - Q_{TinB} = \Delta Q_T \rightarrow 0 \quad (15)$$

图 4b 中, 当压电振子向下运动时, 泵腔内部容积减小, 腔内压强增大, 流体分别从流管 A 和流管 B 流出泵腔。此时, 流管 A 和流管 B 内流体均是顺

时针流出, 流阻系数比较大且接近。则从流管 A 和流管 B 流出的流体量也接近, $Q_{ToutA} \approx Q_{ToutB}$, 泵排出流体量 ΔQ_T 也趋近于 0, 即

$$Q_{ToutA} - Q_{ToutB} = -\Delta Q_T \rightarrow 0 \quad (16)$$

则压电振子振动的一个周期内, 即泵腔经过一个吸程和排程周期后, 理论上同向螺线形流管无阀压电泵流体的流入量与流出量相同, 从而不会实现“泵”的功能。

图 5 所示为单螺线形流管无阀泵工作原理。压电振子在交流电的激励下上、下振动, 引起泵腔容积周期性的增大和减小。

图 5a 中, 当压电振子向上运动时, 泵腔内部容积增大, 腔内压强减小, 流体分别从流管 A 和流管 B 进入腔内。此时, 流管 A 内流体沿直线与泵腔相切流入泵腔, 哥氏力有一定促进作用, 流阻系数小, 而流管 B 内流体是顺时针流入泵腔, 哥氏力的作用下, 流阻系数大。则从流管 A 流入的流体量大于从流管 B 流入的流体量, 即 $Q_{DinA} > Q_{DinB}$ (Q_D 表示流过单螺线形流管的流体量), 该泵吸程下吸入流体量为

$$Q_{DinA} - Q_{DinB} = \Delta Q_D \quad (17)$$

图 5b 中, 当压电振子向下运动时, 泵腔内部容积减小, 腔内压强增大, 流体分别从流管 A 和流管 B 流出泵腔。此时, 流体沿流管 A 直线方向流出, 哥氏力的有一定的阻碍作用, 流阻系数大, 流管 B 内流体是逆时针流出泵腔, 哥氏力的作用下, 流阻系数小。则从流管 A 流出的流体量小于从流管 B 流出的流体量, 即 $Q_{DoutA} < Q_{DoutB}$ 。该泵排程下泵出的流体量

$$Q_{DoutA} - Q_{DoutB} = -\Delta Q_D \quad (18)$$

图 5 单螺线形流管无阀泵工作原理图

压电振子振动的一个周期内, 即泵腔经过一次吸程和排程的过程, 流体从宏观上表现为单向流动, 表现为从流管 A 流入泵腔, 从流管 B 流出泵腔, 实现泵的功能。在压电振子一个振动周期内, 泵送的流体量为 $2\Delta Q_D$ 。

3 试验研究

为了验证螺线形流管无阀压电泵的输出性能与驱动频率、驱动电压以及流管布局形式的关系, 制作了如图 6 所示的 3 种螺线形流管无阀压电泵。其中流管螺线采用的是阿基米德螺线, 流管的高度为 2 mm, 宽度为 2 mm, 压电振子基体直径为 41 mm, 厚度为 0.2 mm, 压电陶瓷直径为 35 mm, 厚度为 0.3 mm。为进一步简化泵结构, 及便于观察内部情况, 泵体利用 3D 打印技术制作, 打印材料选择无色透明树脂。图 7 所示为螺线形流管无阀压电泵流量试验照。试验中采用的流体介质为蒸馏水。

图 6 螺线形流管无阀压电泵及流管布局示意图

图 7 压电泵流量试验

图 8 所示为同向螺线形流管无阀压电泵的流量与驱动频率的关系。根据试验可知, 可能由于有机玻璃流管、泵腔 3D 打印等材料存在纹理方向性, 流体在两个方向流动的流阻不同, 造成了同向螺线

图 8 同向螺线形流管无阀泵流量-频率关系

形流管无阀泵试验流量不为 0, 在电压为 140 V, 频率为 18 Hz 时, 泵流量为最大 2.33 mL/min。此时, 若继续增大驱动频率, 泵流量会逐渐趋向于 0。

图 9 所示为异向螺线形流管无阀压电泵的流量与驱动频率的关系。由试验数据可知, 随着电压的增大, 泵最大流量也在增大, 在驱动为 140 V、23 Hz 时, 泵流量最大为 3.38 mL/min, 之后, 随着频率的增大, 泵流量也逐渐趋向于 0。

图 9 异向螺线形流管无阀泵流量-频率关系

图 10 所示为单螺线形流管无阀压电泵的流量与驱动频率的关系。由试验数据可知, 随着电压的增大, 泵最大流量增大, 在驱动电压为 140 V, 频率为 29 Hz 时, 泵流量最大为 5.81 mL/min, 之后, 随着频率的增大, 泵流量也逐渐趋向于 0。

图 10 单螺线形流管无阀泵流量-频率关系

由图 8~10 中试验数据可知, 三种泵都有一个最佳驱动频率, 在最佳驱动频率处流量最大。且驱

动电压越大, 其输出最大流量也越大。这是由于随着电压的增大, 压电振子的振幅增大, 泵腔的容积变化增大, 流量就越大。

图 11 所示电压分别为 100 V、120 V、140 V 时三种螺线形流管泵流量-频率关系对比。由试验数据对比可知, 电压相同时, 单螺线形流管无阀压电泵流量最大, 同向螺线形流管无阀压电泵流量最小。这是因为试验用异向螺线形流管无阀泵中流管比较长, 流体流过流管所需要的时间较长, 一个振动周期内, 流体不能完全流出流管, 且流管越长, 其沿程流阻损失也越大, 所以单螺旋流管无阀泵的流量大于异向螺线形流管无阀泵的流量, 且其最佳工作频率也最大。而同向螺线形流管无阀泵因为进、出流管不具有哥氏力的差异化作用, 所以流量最小。

图 11 压相同时三种布局流管无阀泵流量-频率关系对比

因此, 当螺线形流管无阀泵的驱动功率较小, 其驱动力不足以抵抗流管沿程的流阻损失时, 反而

体现不出其螺线形流管的优点, 这时流管螺线圈数宜选用较小值; 如果振子的振动强度能进一步增加, 异向螺线形流管泵输出性能就可能优于单螺线形流管泵, 螺线流管圈数多的泵其输出性能也会更好。压电振子驱动力高低与螺线形流管无阀泵的特性见表 1。

表 1 压电振子驱动力与螺线形流管无阀泵特性比较

压电振子 驱动力	推荐螺线 流管圈数	推荐螺线流管 最大转角	推荐流管布局
高	多	大	异向螺线形流管
低	少	小	单螺线形流管

4 结 论

本研究设计了同向螺线形流管、异向螺线形流管和单螺线形流管三种无阀压电泵。对流管内部流体的流动情况进行了分析, 推导了流体顺、逆时针流动时的流速差, 认为流量差是因为流体在流管中因受到哥氏力作用造成的流阻差产生的。

利用 3D 打印技术, 制作了三种不同布局的螺线形流管无阀压电泵。测量了不同频率下同向螺线形流管、异向螺线形流管以及单螺线形流管无阀压电泵的流量, 得出如下结论。

(1) 单螺线形流管无阀泵的流量最大, 且其最佳工作频率也最大。这是因为异向螺线形流管泵的流管比较长, 流体流过流管所需要的时间也较长, 一个振动周期内, 流体不能完全流出流道, 且流管越长, 其沿程流阻损失也越大, 所以流量反而低于单螺线形流管泵。

(2) 同向螺线形流管无阀泵可能由于有机玻璃流管、泵腔 3D 打印等材料存在纹理方向性, 流体在两个方向流动的流阻不同, 其试验流量不为 0, 也有泵输出, 但是输出量很小。

(3) 当螺线形流管无阀泵的驱动功率较小, 其驱动力不足以抵抗流管沿程的流阻损失时, 反而体现不出其螺线形流管的优点。

(4) 本文采用逆时针方向螺线形流管, 由于哥氏力在南北半球对运动物体的影响相反, 所以如果是在南半球, 则应该采用顺时针方向螺线形流管。

参 考 文 献

- [1] 阚君武, 宣明, 杨志刚, 等. 微型药品输送压电泵的性能分析和试验研究[J]. 生物医学工程杂志, 2005, 22(4): 809-813.
- KAN Junwu, XUAN Ming, YANG Zhigang, et al. Analysis and test of piezoelectric micro-pump for drug

- delivery[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2005, 22(4): 809-813.
- [2] 刘国君, 程光明, 杨志刚. 一种压电式精密输液微泵的试验研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 612-616.
LIU Guojun, CHENG Guangming, YANG Zhigang. Experimental research on a piezoelectric micro-pump for precision pumping[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 612-616.
- [3] 王颖, 张建辉, 刘瑞峰. 螺旋线形阀压电泵的理论及试验研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 144-150.
WANG Ying, ZHANG Jianhui, LIU Ruifeng. Theoretical and experimental research on the piezoelectric pump with helical linear shaped valve[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20): 144-150.
- [4] ERIK S, GORAN S. A valveless Diffuser/nozzle-based fluid pump[J]. Sensors and Actuators A(Physical), 1993, 39: 159-167.
- [5] 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 Shouying. Study of piezoelectric valveless diffuser/nozzle-based fluid pump — one-way flow principle and the pump flow[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2001, 23(1): 23-25.
- [6] SHEN Cheyi, LIU Hsienkuang. Fabrication and drive test of piezoelectric PDMS valveless micro pump[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2008, 31(4): 615-623.
- [7] ZHANG Jianhui, WANG Ying, HUANG Jun. Advances in valveless piezoelectric pump with cone-shaped tubes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(4): 766-781.
- [8] TESLA N. Valvular conduit: US, 1329559[P].1920-02-03.
- [9] 张建辉, 黎毅力, 夏齐霄, 等. “Y”形流管无阀压电泵振动分析及泵流量计算[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 922-929.
ZHANG Jianhui, LI Yili, XIA Qixiao, et al. Research on vibration and pump flow rate of valveless piezoelectric pump with Y shape tubes[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(6): 922-929.
- [10] JIANG L S, MORRIS C J, SHARMA N R, et al. Transport of particle-laden fluids through fixedwave micropump[J]. Microelectromechanical Systems (MEMS) ASME, 1999, 1: 503-509.
- [11] LENG Xuefei, ZHANG Jianhui, JIANG Yan, et al. Theory and experimental verification of spiral flow tube-type valveless piezoelectric pump with gyroscopic effect[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 195: 1-6.
- [12] LENG Xuefei, ZHANG Jianhui, JIANG Yan, et al. Simulation analysis and experimental verification of spirral-tube-type valveless piezoelectric pump with gyroscopic effect[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4): 822-829.

作者简介: 王颖, 女, 1970 年出生, 副教授, 高级工程师。主要研究方向为机械设计及理论。

E-mail: 450966011@qq.com

张建辉(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械设计及理论和压电作动器。

E-mail: zhangjh@nuaa.edu.cn