

康达效应引导路径流动的压电泵仿真与实验*

孙业明, 李瑞鹏, 王俊尧, 李 驹

(东北电力大学机械工程学院 吉林, 132012)

摘要 涡流产生的阻力对正、反流阻差造成的干扰致使无阀压电泵的输出流量不稳定,且现阶段无阀压电泵的研究主要以设计阻件或流阻管道去抑制回流的产生,而仅靠流道结构产生的正、反流阻差对回流的抑制效果有限。针对此问题,应用康达效应原理提出一种无阀压电泵,利用局部产生的涡流疏导回流液体,使液体在正向、反向流动时的流动路径不同,从而实现液体的泵送。首先,通过“水枪”形流管的理想流阻模型阐述疏导回流液体思路的可行性;其次,应用 ANSYS 软件确定正反两方向的流动路径,得到输出流量;最后,通过加工实验样机,测试泵送流量。结果表明:随着频率的提高,泵送流量先增大后减小,在峰峰值为 115 V、频率为 19 Hz 时,流量达到最大为 12.69 mL/min;定频为 19 Hz 时,泵送流量随峰峰值增加的变化最为稳定。实验结果验证了无阀压电泵的工作有效性。

关键词 无阀压电泵;康达效应;选择性流动;ANSYS
中图分类号 TH38

引 言

作为一种新型的压电驱动流体技术,压电泵具有集成化高、控制简单、响应速度快、无电磁干扰及低噪声等特点,被广泛应用在药物输送系统、冷却系统和滴灌养殖等多领域^[1-5]。压电泵若按内部有无止回阀划分,可分为有阀压电泵^[6-7]和无阀压电泵^[8-9]。其中,有阀压电泵通过单向阀体实现液体泵送,但单向阀体具有明显的滞后性^[10],且与无阀压电泵中的管道阻件相比寿命较低,对装配精度也有一定的要求。无阀压电泵则是依靠正、反流阻不等的管道结构和阻件实现液体泵送,解决了单向阀体滞后性问题,且相对于有阀压电泵,无阀压电泵的寿命更高,在一定领域已突显出优势。

学者们对无阀压电泵技术的研究主要包括两方面:①改变压电振子的数目^[11-13],使压电振子串并联,以异步或同步的驱动方式实现流体输送;②通过设计螺线形管^[14-16]、非对称管^[17]和 Y 形流管^[18]等流阻管道上的改进,使设计的流道结构具有良好的单向流通能力。

虽然涡流会造成液体流动的不稳定性,但其具有使液体散热快、混合效率高的特点,在水冷系统和混合领域中能够得到很好的利用。为了推动涡流在无阀压电泵上的应用,文献[19]提出了利用涡流实

现无阀压电泵的液体泵送,采用增大单管的正反向流阻的方式,虽基本能够实现泵送,但对回流的抑制效果有限。Yang 等^[20]利用康达效应(指流体有偏离原本流动方向的趋势,若管道曲率不大,流体将顺着管道表面流动)设计了一种管道无正反流阻差的无阀压电泵,但没有疏导回流,且输出的流量较低。

针对涡流引起的输出流量紊乱和管道正、反流阻差抑制回流效果有限的问题,笔者利用康达效应将涡流应用于无阀压电泵结构设计中,提出了一种路径选择性流动的无阀压电泵。首先,分析了路径选择性流动无阀压电泵的工作原理,阐述正反路径不同的原因,搭建流阻模型,建立输出流量的理论公式;其次,利用 ANSYS 软件仿真该泵工作时的流线和进、出口流速的变化,以及“水枪”形流管内的液体在正、反向流动时管道 1 和管道 2 的流量差值;最后,制作实验样机,验证仿真结果,得出泵送流量和频率、电压的关系。相比于其他无阀压电泵,该泵管道内部存在多个分支管道,通过疏通回流液体和正、反流阻差异的方式,使回流液体和正向液体流向阻力不同的管道,从而增加回流在管道内的流动时间,减小正流在管道内的流动时间,使正向与反向流动在相同时间内产生流量差,实现无阀压电泵的液体泵送。

* 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:2022-05-06;修回日期:2022-06-20

1 泵结构建模和工作机理分析

1.1 泵结构设计与组成

路径选择性流动无阀压电泵结构示意图如图1所示,主要由“水枪”形流管、泵腔、压电振子、橡胶圈及方转圆转换头组成。其中,“水枪”形流管是结合变面积矩形管道、基于康达效应原理设计的一种管道结构。“水枪”形流管结构示意图如图2所示。其采用“合-分-合”的管道结构,在总管5和3之间通过2条长度不同的管道线路连接(定义路径管道1和4为线路1;管道2和6为线路2)。管道1和2为变面积矩形管;管道3,4和5为恒定面积矩形管;管道6为半环形变面积矩形管。

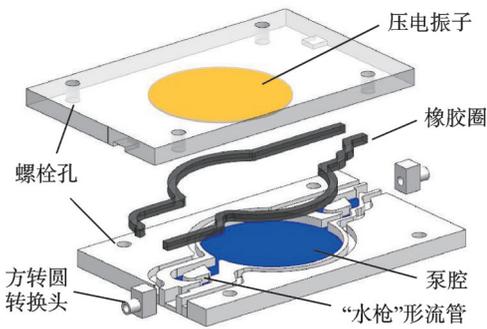


图1 路径选择性流动无阀压电泵结构示意图

Fig.1 Structural diagram of path-selectable flow valveless piezoelectric pump

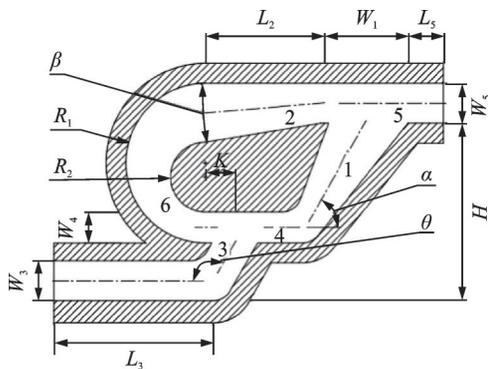


图2 “水枪”形流管结构示意图

Fig.2 Structural diagram of "water gun" shaped flow pipe

对于“水枪”形流管,管道3连接进口,管道5连接出口。液体由进口流入、出口流出视为正向流动,反之视为反向流动。

1.2 流管液体流动机理分析

当“水枪”形流管内的液体处于正向流动时,根据速度方向不能突变原理,在管道3与管道4,6结构夹角为钝角、锐角的共同作用下,管道3内的液体主

要流向管道4。由于线路1的长度小于线路2,且管道1为扩散管,管道2为收缩管,保证了正向流动的液体主要流经线路1。

当“水枪”形流管的液体处于反向流动时,由于康达效应的影响,回流液体会在管道1和5接口处产生涡流^[20],阻碍液体流向管道1,增加了回流液体流向线路2的比重,且此时管道2为扩散管,管道1为收缩管,进一步疏导回流液体流入线路2。管道6与3的结构夹角为锐角,使得管道6液体不利于流向管道3,且管道6与4液体产生冲击,再次减少了回流液体流向管道3。

由于正向流动路径比反向流动路径短,且正、反方向存在的流阻差异,使得在相同时间内正向流动比反向流动的输出流量大,促成该“水枪”形管道具有单向流通性,而“水枪”形流管的单向流动特性让路径选择性流动的无阀压电泵具有泵送功能。无阀压电泵吸程和排程时流动状态示意图分别如图3,4所示。

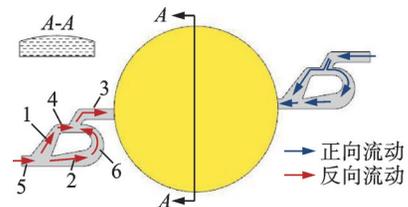


图3 吸程时流动状态示意图

Fig.3 Schematic diagram of flow state during suction

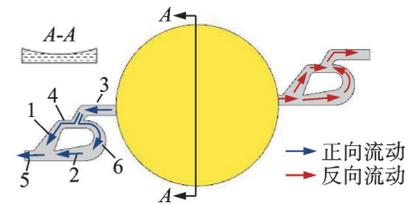


图4 排程时流动状态示意图

Fig.4 Schematic diagram of flow state during scheduling

2 流量分析和选择性流动状态分析

2.1 “水枪”形流管净流量理论分析

根据电液类比法^[21],电压 U 类比压电振子的输出压力 P ,电阻 R 类比管道流阻 R_e ,电流 I 类比输出流量 Q 。“水枪”形流管理想流阻模型如图5所示。

将管道1和2先视为直管,由“水枪”形流管的结构可知,线路2的管道长度大于线路1,根据流阻影响因素可得 $R_{e2} > R_{e1}$ 。

设两管道每 1° 的结构夹角对液体从其中一管道流向另一管道的促进效果为 R_0 ,当“水枪”形流管正向流动时,管道3与4的结构夹角为 120° ,与管道

6 结构夹角为 60° ，液体流向线路 1 和线路 2 的促进效果相差 $60R_0$ 。反向流动时，管道 5 与 2 的结构夹角为 180° ，与管道 1 的结构夹角为 120° ，同样使线路 1 和线路 2 的促进效果相差 $60R_0$ 。将流阻二极管类比为相差结果，即 $R_{e0}=60R_0$ ，分别与流阻 R_{e1} 和 R_{e2} 串联，并设反向击穿流阻二极管时的流阻为 R_{e0} ，正向穿过流阻二极管时流阻为 0。

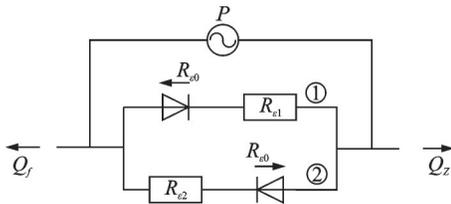


图5 “水枪”形流管理想流阻模型

Fig.5 Flow resistance model of "water gun" flow tube

在正向流动时，输出流量 Q_z 可表示为

$$Q_z = P/R_{e1} + P/(R_{e2} + R_{e0}) \quad (1)$$

反向流动时，输出流量 Q_f 可表示为

$$Q_f = P/(R_{e1} + R_{e0}) + P/R_{e2} \quad (2)$$

令 $L = R_{e1} + R_{e2} + R_{e0}$ ，则净流量 ΔQ 可表示为

$$\Delta Q = Q_z - Q_f = \frac{R_{e0}(R_{e2} - R_{e1})}{R_{e1}R_{e2}(R_{e2} + R_{e0})(R_{e1} + R_{e0})} LP \quad (3)$$

由于 $R_{e2} > R_{e1}$ ，故 $Q_z - Q_f > 0$ ，则净流量 $\Delta Q > 0$ ，由此证明了以疏导回流液体为思路设计无阀压电泵的可行性。将管道 1 和 2 设为变面积管可使路径选择性流动的效果更加明显，所以该“水枪”形流管具有单向流通能力。

2.2 介质流动模拟

路径选择性流动的无阀压电泵几何参数如表 1 所示。整个模型采用六面体网格，网格尺寸为 0.3 mm ，网格质量为 0.97 (无量纲)。网格划分后，选用不可压缩的液态水为流动介质，定义输入输出口的压力边界为 0。为简化计算，仿真时将压电振子视为刚性平移运动，编译压电振子的动网格函数，经 ANSYS Fluent 模块分析计算出结果。

表 1 路径选择性流动的无阀压电泵几何参数

Tab.1 Geometric parameters of valveless piezoelectric pump with path-selectable flow

W_1/mm	W_3/mm	W_4/mm	W_5/mm	L_2/mm	L_3/mm	L_5/mm
4	2	1.55	2	6.2	8	1.8
H/mm	R_1/mm	R_2/mm	K/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	$\beta/(\text{^\circ})$	$\theta/(\text{^\circ})$
9	4	1.75	1.5	60	9	120

2.2.1 工作机理

模拟电压峰峰值 U_{pp} 为 115 V 、频率为 19 Hz 时路径选择性流动无阀压电泵的流动状态，得到 $1/4$ 周期吸程时的流线图。路径选择性流动无阀压电泵流线图如图 6 所示。此时泵腔右侧“水枪”形流管内的液体为正向流动，管道 1 比管道 2 的流线密集且流线值更大，这说明液体主要流向管道 1。对于泵腔左侧“水枪”形流管，其内部的液体为反向流动，在管道 1 与 5 交界处有明显的涡流出现，其产生的阻力确保回流液体流向管道 2，即该泵工作原理正确。

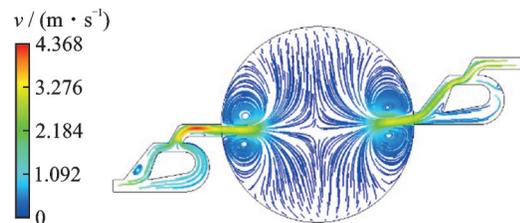


图6 路径选择性流动无阀压电泵流线图

Fig.6 Streamline diagram of path-selective flow valveless piezoelectric pump

2.2.2 净流量模拟

一个周期内无阀压电泵的输出流量为

$$\Delta Q = \text{Out}_p - \text{Out}_x \quad (4)$$

其中： Out_p 为排程出口流量； Out_x 为吸程出口流量。

由于该泵是通过泵腔将 2 个“水枪”形流管串联而成，即“水枪”形流管的正反流量差值决定输出流量。该泵在吸程时包含了“水枪”形流管的正、反两个状态，则一个周期内输出流量为

$$\Delta Q = \text{Int}_x - \text{Out}_x \quad (5)$$

其中： Int_x 为吸程进口流量。

截取该泵 $1/4$ 周期吸程时进、出口速度云图，如图 7 所示。在同一图例、相同截面面积下，进口比出口的流速要大。

在一个周期内，流速要完成加速、减速和方向的变化。该泵 1 s 内就包含 19 个周期，流速变化极快。

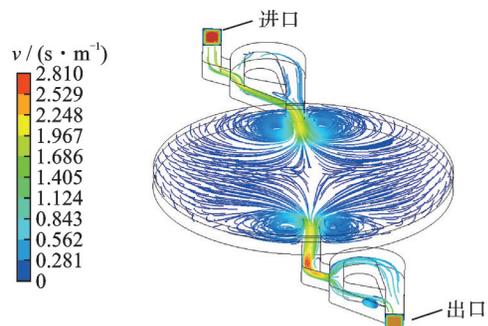


图7 进、出口速度云图

Fig.7 Inlet and outlet flow velocity

根据面积积分原理,1/4周期的瞬时流速可看成平均流速,则一个周期内流量可表示为

$$Q = \frac{V}{2n} S \quad (6)$$

其中:V为1/4周期时的瞬时流速;S为截面面积;n为1s内的周期数。

计算得出该泵输出流量为13.47 mL/min,说明该泵具有泵送功能。

2.2.3 路径选择性流动模拟

正向流动时管道1和管道2的速度云图如图8所示。由图可知,管道1和2流速差异较大,此时 $Q_1 - Q_2$ 的流量为174.55 mL/min,即正向流动时主要流经管道1。反向流动时管道1和管道2的速度云图如图9所示。由图可知,管道1和2流速差异不明显,此时 $Q_1 - Q_2$ 的流量为23.11 mL/min。因此,正向和反向流动路径不同。

管道1和管道2的流量差值随流量变化曲线如图10所示。由图可得:泵在工作时,随着输出流量

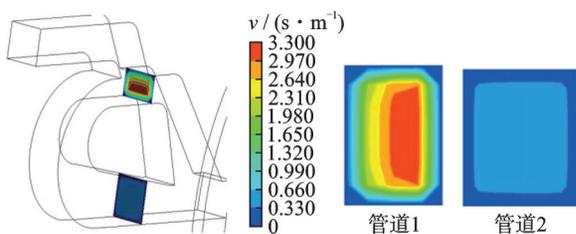


图8 正向流动时管道1和管道2的速度云图

Fig.8 Flow velocity diagram of pipeline 1 and pipeline 2 under forward flow

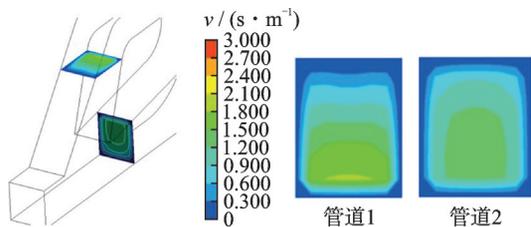


图9 反向流动时管道1和管道2的速度云图

Fig.9 Flow velocity diagram of pipeline 1 and pipeline 2 under reverse flow

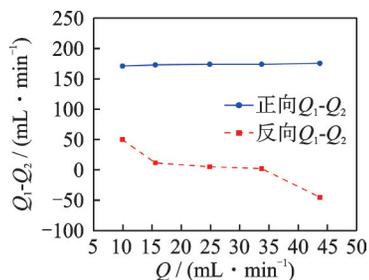


图10 管道1和管道2的流量差值随流量变化曲线

Fig.10 Variation curve of flow difference of pipeline 1 and pipeline 2 with flow

的增加,管道1和2的差值随之增大,即正向流动时,液体输入的主要路径是线路1;反向流动时,液体输入的主要路径是线路2。

3 性能测试与结果

3.1 实验样机与实验平台

为验证仿真结果,制作了实验样机,如图11所示。本次实验样机由精雕机加工,加工材料采用聚甲基丙烯酸甲酯(亚克力),加工精度为±0.1 mm,整体样机尺寸为74 mm×45 mm×9.6 mm。选用直径为35 mm、厚为0.2 mm的压电振子,泵腔及流管深度为2 mm,其他尺寸同仿真一致。

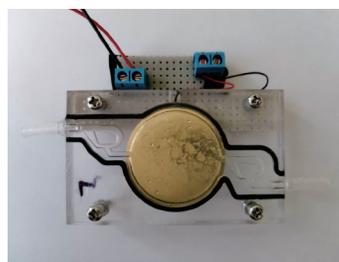


图11 实验样机

Fig.11 Experimental prototype

实验平台示意图如图12所示,主要由信号发生器、功率放大器、示波器和精密电子秤等组成。压电振子的驱动信号采用信号发生器提供的变频、变电压的正弦波,其输出电压为0~120 V_{pp},频率为0~200 Hz。为减少压电泵在工作中产生的气泡,降低灌泵时排除气泡的难度,采用蒸馏水为介质,通过电子天平测量每分钟的液体质量,计算每分钟的泵送流量,得出泵送流量随频率、电压变化的规律。

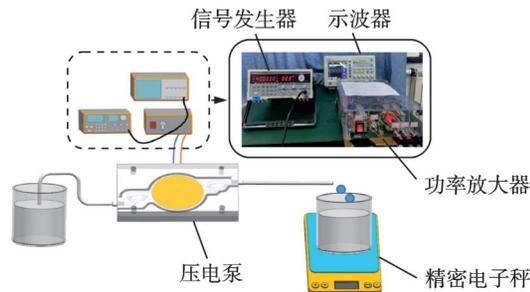


图12 实验平台示意图

Fig.12 Schematic diagram of experimental platform

3.2 测试结果分析

图13为泵送流量与频率的变化曲线。随着频率的增加,无阀压电泵存在一个输出流量最大的工

作频率,经测试无阀压电泵不同电压峰峰值下流量随频率的变化,得到输出流量最大的工作频率均在19 Hz。这是因为“水枪”形流管提供了形成涡流的地方,虽然电压峰峰值的变化可以改变液体流动状态,在管道内容易引起涡流,造成不同电压峰峰值下最大流量的频率值不一致现象,但对于“水枪”形流管来说,电压峰峰值的变化并不能改变涡流的位置。因此,电压峰峰值的变化对最大输出流量的工作频率的影响较小,说明该泵工作稳定性较高。

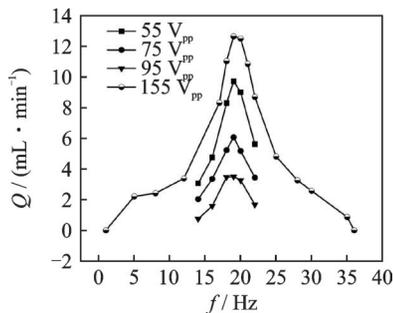


图13 泵送流量与频率的变化曲线

Fig.13 Variation curve of pumping flow and frequency

相对于其他电压峰峰值来说,19 Hz时的输出流量最大。为检测电压峰峰值115 V时该泵的工作区间,频率从1 Hz开始增加,随着压电振子振动加快,单位时间内泵腔容积变化量增大,泵送流量从0开始不断增大。当频率为19 Hz时,泵送流量达到最大,为12.69 mL/min。之后,随着压电振子振动速度加快,流速的变化跟不上泵腔体积的变化,使得液体来不及响应,处于“原位振荡”状态。当频率升高时,压电振子振幅不会一直保持恒定,甚至可能降低,造成泵送流量逐渐减小,当频率为36 Hz时泵送流量减小至0,表明其工作区间较宽。

固定频率、改变不同电压峰峰值,观测无阀压电泵泵送流量的变化,得到各频率下泵送流量与电压的变化曲线,如图14所示。由于电压峰峰值的增大,压电振子的振幅增加,泵腔的容积变化增大,因

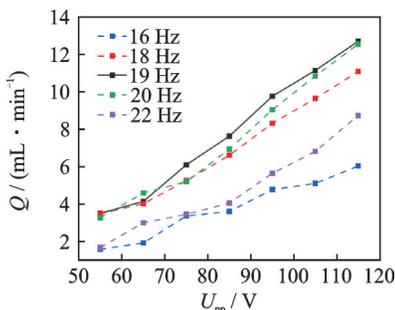


图14 泵送流量与电压的变化曲线

Fig.14 Variation curve of pumping flow and voltage

此泵送流量呈现逐渐增大的趋势。相比于其他频率下流量随电压的变化,当频率为19 Hz时,泵送流量随峰峰值的变化时增加的幅度最为稳定。

通过实验可知,该泵能够正常工作,即“水枪”形流管具有单向流通性。

4 结 论

1) 针对涡流引起的输出流量紊乱和管道正、反流阻差抑制回流效果有限的问题,提出了一种应用涡流来疏导回流的路径选择性流动的无阀压电泵。通过分析该泵的工作原理,阐述了正、反路径不同的原因,结合简易理想流阻模型对单个“水枪”形流管的输出流量进行理论分析,以疏导回流液体为思路设计的无阀压电泵能够实现液体泵送。

2) 利用ANSYS软件分析内部流场,验证了工作原理的正确性。截取进、出口流速,得到路径选择性流动无阀压电泵的泵送流量为13.47 mL/min,判定该泵具有泵送功能。

3) 模拟计算得到“水枪”形流管在正、反向流动时管道1和管道2的流量差值,验证了无阀压电泵正、反向流动时路径的不同。通过分析管道1和管道2流量差随流量的变化,得出当输出流量增加,正向流动时流向管道1的液体比重增加,反向流动时流向管道2的液体比重增加。

4) 制作实验样机,搭建实验平台,定压分析出泵送流量和频率的关系。随着频率的增大,输出流量先增大后减小。当频率为19 Hz、电压峰峰值为115 V时,输送流量最大,达到12.69 mL/min。定频19 Hz分析泵送流量和电压的关系可知,电压越大则输出流量越大。

参 考 文 献

- [1] 林峰. 压电驱动血液泵的设计及实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [2] KACAR A, OZER M B, TASCIOGLU Y. A novel artificial pancreas: energy efficient valveless piezoelectric actuated closed-loop insulin pump for T1DM [J]. Applied Sciences, 2020, 10(15): 5294.
- [3] 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)
- [4] 陈松,王淑云,谢心怡,等.组合式压电驱动芯片水冷却系统[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 combined piezoelectric pump unit [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(5): 1140-1147. (in Chinese)
- [5] 田鹏,黄俊,施卫东.非对称分叉流管无阀压电泵的设计及实验[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)
- [6] 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.
- [7] 黄俊,朱宜超,施卫东,等.铍型开槽式阀压电泵的设计[J].光学精密工程,2017,25(11):2914-2922.
HUANG Jun, ZHU Yichao, SHI Weidong, et al. Design of cymbal shape slotted valve based piezoelectric pump [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(11): 2914-2922. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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.
- [10] 张建辉,王大康,王守印,等.压电泵的研究:泵阀滞后性[J].机械工程学报,2003,39(5):107-110.
ZHANG Jianhui, WANG Dakang, WANG Shouyin, et al. Research on piezoelectric pump: lagging of valve [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5): 107-110. (in Chinese)
- [11] KIM B H, KIM I C, KANG Y J, et al. Effect of phase shift on optimal operation of serial-connected valveless micropumps [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 209: 133-139.
- [12] JENKE C, KAGER S, RICHTER M, et al. Flow rate influencing effects of micropumps [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 276: 335-345.
- [13] MA H K, SU H C, WU J Y. Study of an innovative one-sided actuating piezoelectric valveless micropump with a secondary chamber [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 171(2): 297-305.
- [14] ZHANG J H, LENG X F, ZHAO C S. A spiral-tube-type valveless piezoelectric pump with gyroscopic effect [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(16): 1885-1889.
- [15] HE X H, BIAN R Q, LIN N, et al. A novel valveless piezoelectric micropump with a bluff-body based on Coanda effect [J]. Microsystem Technologies, 2019, 25(7): 2637-2647.
- [16] 王颖,张建辉,刘志玲,等.螺线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)
- [17] 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.
- [18] HUANG J, ZHANG J H, XUN X C, et al. Theory and experimental verification on valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape treelike bifurcate tubes [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 462-468.
- [19] HUANG J, ZOU L, TIAN P, et al. Development of a valveless piezoelectric pump with vortex diodes [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2019, 29(12): 125006.
- [20] YANG S, HE X H, YUAN S Q, et al. A valveless piezoelectric micropump with a Coanda jet element [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 230: 74-82.
- [21] 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 Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(1): 92-99. (in Chinese)



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