

非对称分叉流管无阀压电泵的设计及试验^{*}

田 鹏¹, 黄 俊¹, 施卫东^{1,2}

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心 镇江, 212013) (2. 南通大学机械工程学院 南通, 226019)

摘要 具有微混合功能的多级 Y 型流管无阀压电泵存在着输出流量与振子带载能力不平衡的问题。为此, 提出了一种非对称分叉流管无阀压电泵。首先, 理论分析了该无阀压电泵输出流量与流管流阻间的关系; 其次, 利用有限元软件数值计算了多级 Y 型流管的流阻特性; 最后, 采用光固化快速成型技术加工了样机, 并进行了泵特性试验和振子振动测试。试验结果表明: 在峰峰值 200 V 正弦波交流电驱动下, 该压电泵的流量、扬程和压电振子的振幅都随驱动频率增加呈现先增大后减小的趋势; 当驱动频率为 31 Hz 时, 最大流量为 4 g/min; 驱动频率为 38 Hz 时, 最大扬程为 40.5 mmH₂O。在试验施加电压范围内, 该泵的输出性能与驱动电压呈正相关性。本研究验证了非对称流道树型无阀压电泵的可行性, 为非对称无阀压电泵在微流道滴灌和微混合等领域的应用提供了参考。

关键词 压电泵; 无阀泵; Y 型流管; 非对称

中图分类号 TH38

引 言

作为农业灌溉中最节水的灌溉技术之一, 滴灌技术可有效缓解水资源紧张, 提升节能减排效率^[1-8]。然而, 现有的小型灌水器存在着结构复杂、流量难以精确控制等缺点, 并且整个滴灌系统还需配备肥液注入及混合装置, 不利于系统的小型化, 从而不适用于农作物的小面积精确培育^[9-11]。利用压电材料驱动无阀压电泵, 具有结构简单、输出流量精确可控以及易于功能集成等优点, 可作为一种肥液传输装置应用于滴灌领域, 特别是实验室用新作物培育的微滴灌系统^[12-16]。

Stemme 等^[17]利用收缩管/扩张管的正反向流阻不等的特性制作了无阀压电泵。各国学者围绕流阻不等性这一核心, 提出了各种特殊流管无阀压电泵, 比较典型的是锥形流管无阀压电泵^[18]、TESLA 管无阀压电泵^[19]、Y 型流管无阀压电泵^[20]和三棱柱阻流体无阀压电泵^[21]等。随着微加工技术的发展及各领域对于微流量传输需求的提高, 无阀压电泵也在不断地拓展功能性集成研究。文献^[22-23]提出了非对称坡面腔底无阀压电泵, 便于流体在传输过程中实现混合搅拌功能, 但非对称坡面结构增加了压电泵结构的复杂性。胡彩旗等^[24]提出了半

球缺无阀压电泵, 通过在泵腔内加入半球缺挡块实现单向流动, 并使得腔内产生强烈的涡旋以达到均匀混合的目的, 但半球缺的安装增加了泵的加工工艺难度。黄俊等^[25-26]在融合了被动式混合器微通道功能的基础上, 设计了多级 Y 型流管无阀压电泵, 该泵采用了对称式布局, 即多级 Y 型流管互为倒置的装于泵腔两侧。虽然分叉交汇的流管结构有效地增加了混合液体间的接触面积, 但较大的流管流阻也增加了驱动源-压电振子的负载。

为解决这一矛盾, 笔者综合考虑了输出流量和负载间的关系, 设计了一种非对称流道的无阀压电泵, 既保留了流管流阻的不等性, 又避免了流阻太大而减小无阀压电泵的输出性能。首先, 提出了非对称流道无阀压电泵的设计方案, 并对其泵送机理进行理论分析; 其次, 利用有限元计算软件对该泵中的流阻差型流管进行计算, 分析其正反向流阻的大小; 最后, 进行压电泵输出性能试验, 以验证该类型泵原理的可行性。

1 结构设计与工作原理

图 1 所示为非对称流管无阀压电泵的结构示意图, 该泵由锥形流管、多级 Y 型流管、压电振子及泵腔组成。其中, 多级 Y 型流管和锥形流管作为流阻

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51605200); 江苏大学高层次人才启动基金资助项目(14JDG145)
收稿日期: 2018-12-11; 修回日期: 2019-03-07

差型流管,起到单向截止阀的作用,如图 2 所示。多级 Y 型流管是对 Y 型流管进行多级分叉所得,其中,主合管的宽度为 a ,各级分叉管的宽度为该级合管宽度的一半,且各级流管的分叉角相等,都为 2α 。由于以流管的主合管作为输出口(定义为合流方向)和以流管的 4 个分叉管作为输出口(定义为分流)时,流体所受的阻力不等,因此可作为截止阀置于泵腔一侧。锥形流管的扩散角为 β ,长度为 L ,最小宽度为 W ,如图 3 所示。由文献[27]可知,当扩散角 β 为 7° ,长宽比 L/W 为 13.7 时,锥形流管的正反向流阻比值最大。因此,锥形流管也可作为截止阀置于泵腔另一侧。

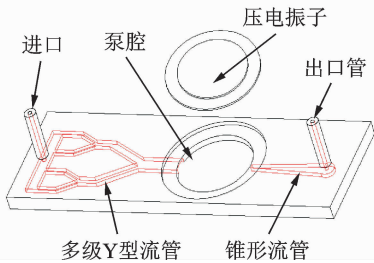


图 1 非对称流管无阀压电泵的结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of the valveless piezoelectric pump with asymmetrical bifurcated channels

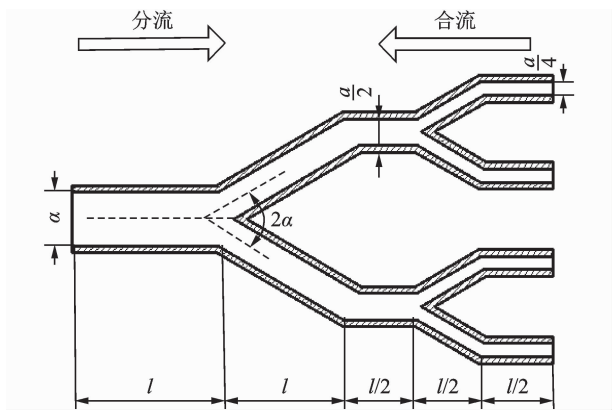


图 2 多级 Y 型流管结构图
Fig. 2 Structure of multistage Y-shape tube

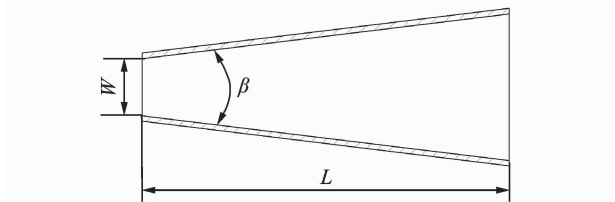


图 3 锥形流管结构图
Fig. 3 Structure of the diffuser/nozzle

压电振子受到交变激励后,其将产生振动引起

泵腔容积变化。当泵腔容积增大时,腔内压强减小,在内外压差的作用下,外部流体介质分别由多级 Y 型流管和锥形流管流入泵腔,此过程称之为压电泵的吸程;当泵腔容积减小时,腔内压强增大,内部流体介质又分别由多级 Y 型流管和锥形流管流出泵腔,此过程称之为排程。由于锥形流管和多级 Y 型流管的双向流阻系数不等,从而可使非对称流管无阀压电泵实现对于流体的单向运输。同时,多级 Y 型流管可作为混合微通道,在输运流体的过程中将待混流体进行汇合,从而实现混合的功能。

2 理论分析

在压电振子一个振动周期内,压电泵将分别经历吸程和排程两个过程。因压电振子为微幅振动,所以泵腔内液体介质压缩性可忽略,即密度 ρ 可视为不变。压电泵外界压力为一个标准大气压,则泵腔与多级 Y 型流管端面 A 和锥形流管端面 B 之间的压力差 ΔP 相同。为便于理解与说明,下列涉及物理量中,下标“Y”表示多级 Y 型流管的物理量,下标“n”表示锥形流管的物理量,上标“'”表示吸程时的物理量,上标“''”表示排程时的物理量。图 4 所示为非对称流管无阀压电泵的流动原理示意图。

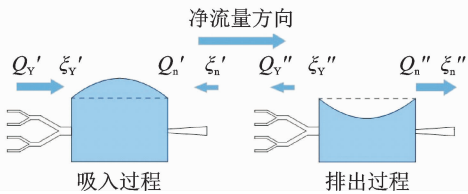


图 4 压电泵流动原理示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the flow principle of the piezoelectric pump

通过锥形流管和多级 Y 型流管的压力差可以表示为

$$\Delta P = \xi \rho v^2 / 2 \tag{1}$$

其中: ΔP 为压力差; ξ 为流阻系数; v 为流体流速。

流过流管的液体介质瞬时体积流量可以表示为

$$Q = Sv \tag{2}$$

其中: Q 为瞬时流量; S 为流管截面积。

令 $C = S(\frac{2\Delta P}{\rho})^{1/2}$, 由式(1)、式(2)计算可得

$$Q = S(\frac{2\Delta P}{\rho})^{1/2} (\frac{1}{\xi})^{1/2} = C \xi^{-1/2} \tag{3}$$

泵腔瞬时体积为

$$V = V_0 + V_x \sin(\omega t) \tag{4}$$

其中： $\omega=2\pi f$ ； V_0 为振子在平衡位置时的泵腔体积； V_x 为振子在极限位置时泵腔体积的增量； f 为驱动频率。

泵腔体积变化率为

$$\Delta V=Q_Y+Q_n=\frac{dV}{dt}=V_x\omega\cos(\omega t)\tag{5}$$

在吸入过程中，液体介质流动方向与图示方向相同

$$\Delta V'=Q'_Y+Q'_n=V_x\cos(\omega t)\tag{6}$$

在吸入过程中， $\Delta V'=Q'$ ，由式(3)、式(5)知

$$C'=V_x\omega\cos\omega t/(\xi_Y^{-1/2}+\xi_n^{-1/2})\tag{7}$$

吸入过程中流入断面 B 的瞬时流量为

$$Q'=C'\xi'^{-1/2}=V_x\omega\cos\omega t/((\xi'_n/\xi'_Y)^{1/2}+1)\tag{8}$$

在排出过程中

$$\Delta V''=(-Q''_Y)+(-Q''_n)=V_x\cos(\omega t)\tag{9}$$

结合式(1)、式(2)得

$$C''=-V_x\omega\cos\omega t/(\xi''_Y^{-1/2}+\xi''_n^{-1/2})\tag{10}$$

在泵出过程中流入断面 B 的瞬时流量为

$$Q''=C''\xi''^{-1/2}=V_x\omega\cos\omega t/((\xi''_n/\xi''_Y)^{1/2}+1)\tag{11}$$

在一个工作周期内，泵的流量为

$$Q=\int_{-T/4}^{T/4}Q'dt+\int_{T/4}^{3T/4}Q''dt=\\ \frac{2V_x}{(\xi'_n/\xi'_Y)^{1/2}+1}\int_{-T/4}^{T/4}\omega\cos\omega tdt+\\ \frac{2V_x}{(\xi''_n/\xi''_Y)^{1/2}+1}\int_{T/4}^{3T/4}\omega\cos\omega tdt=\\ 2V_x\left(\frac{1}{(\xi'_n/\xi'_Y)^{1/2}+1}-\frac{1}{(\xi''_n/\xi''_Y)^{1/2}+1}\right)\tag{12}$$

由式(12)可知，当 $\xi'_n/\xi'_Y\neq\xi''_n/\xi''_Y$ 时，即 $\xi'_n/\xi'_Y\neq\xi''_Y/\xi'_Y$ ，非对称流管无阀压电泵在一个工作周期内可以产生净流量。由文献[28]可知，锥形流管的流阻系数 $\xi'_n>\xi''_n$ ，而多级 Y 型流管分流和合流的流阻系数 ξ_Y 难以通过理论方法求解获得，为此，本研究将采用有限元法计算多级 Y 型流管分流与合流的流阻。

3 有限元分析

对多级 Y 型流管进行建模并网格划分，通过 ANSYS CFX 对其进行计算，以分析流管分流、合流的流阻大小。表 1 所示为流管的结构参数，图 5 所示为流管的有限元模型。整个模型采用结构化网格，网格数量为 9.34×10^4 ，网格质量为 0.5(无量纲)。不考虑换热情况，所选用的流体介质为不可压缩的水，密度为 1000 kg/m^3 。

表 1 多级 Y 型流管结构尺寸

Tab. 1 Structure parameters of the multistage Y-shape tube

a/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	L/mm	D/mm
4	60	10	1

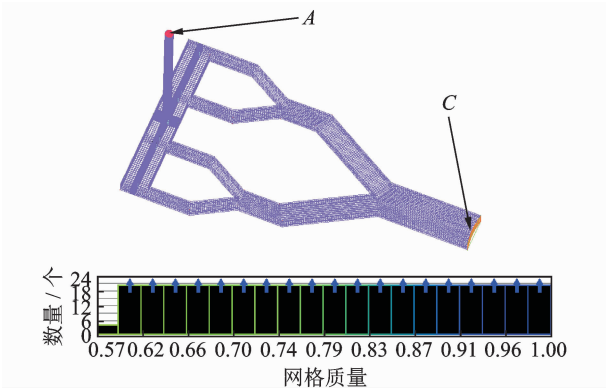


图 5 多级 Y 型流管有限元模型及网格质量

Fig. 5 Finite element model of the multistage Y-shape tube and mesh quality

将流管的端面 A 设为压力入口，端面 C 设为压力出口并定为一个标准大气压，来计算进出口不同压差下流管的合流输出流量。同理，将流管的端面 C 设为压力入口，端面 A 设为压力出口并定为一个标准大气压，来计算进出口不同压差下流管的分流输出流量。通过上述对于合流和分流输出流量的计算，可揭示流管合流和分流的流阻大小。

图 6 所示为不同压差下，数值计算得到的流管合流与分流的出口流量曲线。由图 6 可得，随着进出口压差的增大，分流与合流的输出流量都随之增大；同时在相同压差下，合流的输出流量明显高于分流，说明多级 Y 型流管合流的流阻小于分流的流阻，即 $\xi'_Y<\xi''_Y$ 。

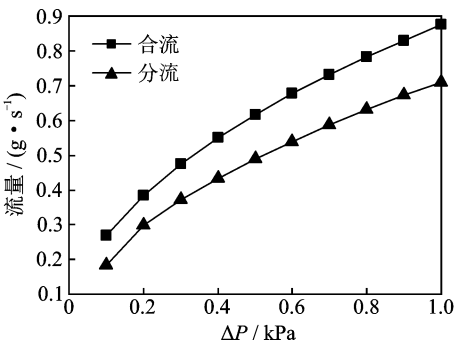


图 6 流管的流量-压差曲线

Fig. 6 Curves between the pressure drop and mass flow

由式(12)可知， $\xi'_n/\xi''_n>1>\xi'_Y/\xi''_Y$ ，则多级 Y 型流管无阀压电泵在压电振子一个振动周期内输出的净流量不为 0，即该泵具有单向传输性能。

4 试验验证

利用光固化快速成型技术加工制作了非对称流管无阀压电泵样机,如图 7 所示。泵腔直径为 20 mm,深度为 1.5 mm,锥形流管结构参数如表 2 所示。压电振子的金属基底为铍青铜,直径为 27 mm,其性能参数如表 3 所示。

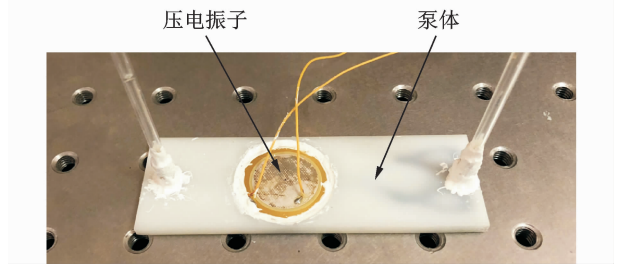


图 7 试验样机模型
Fig. 7 Prototype of the piezoelectric pump

表 2 锥管几何参数

Tab.2 Geometrical parameters of pump chamber and diffuser/nozzle tube

$\beta/(^{\circ})$	W/mm	L/mm
7	1	20

表 3 压电振子性能参数

Tab.3 Performance parameters of piezoelectric vibrator

共振频率/ kHz	共振 阻抗/ Ω	工作 温度/ $^{\circ}\text{C}$	存储 温度/ $^{\circ}\text{C}$	120 Hz 下的 电容/nF
3.9 $\pm$	≤ 300	-20 $\sim$	-30 $\sim$	25 $\pm$
0.5		+70	+800	30%

图 8 所示为非对称流管无阀压电泵的泵性能试验照片。信号发生器为定制,功率放大器为南京佛能科技实业生产的 HVP-300B,本试验以去离子水为工作介质,对压电振子施加峰峰值为 200 V 的正弦交流电压,测量在不同驱动频率下压电泵的输出流量和输出扬程。同时,利用激光位移传感器测量压电振子的中心点振幅。为得到驱动电压对压电泵输出性能的影响,在输出扬程最大时所对应的驱动频率下,通过改变驱动电压,获得不同电压下的输出扬程。

5 结果与讨论

图 9 所示为非对称流管无阀压电泵的流量、振幅随驱动频率变化曲线。由图 9 可以看出,压电泵的输出流量和振子中心点振幅都随着驱动频率的增

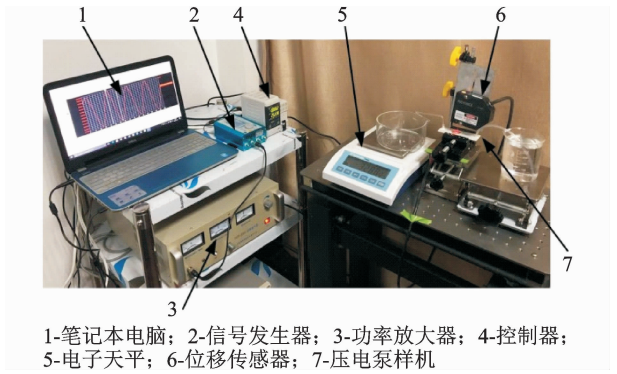


图 8 压电泵性能试验照片
Fig. 8 Performances test of the piezoelectric pump

加呈先增大后减小的趋势。驱动频率为 31 Hz 时,压电泵输出流量达到最大,为 4 g/min;驱动频率为 32 Hz 时,振子中心点的单峰振幅达到最大,为 23.75 μm 。最大振幅对应的频率高于最大流量对应的频率,这表明单位时间内压电泵的输出流量不仅与泵腔容积变化有关,也与驱动频率相关。

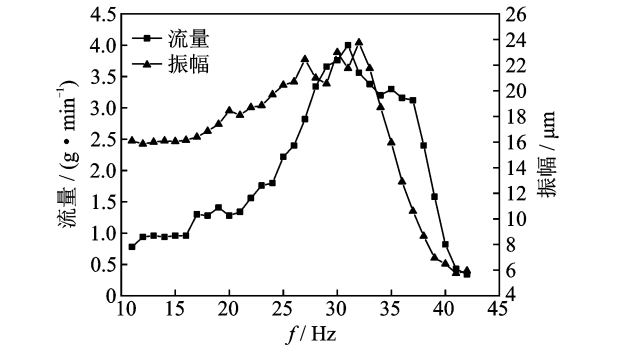


图 9 流量、振幅随频率变化曲线
Fig. 9 Curves of mass flow and amplitude

图 10 所示为不同驱动频率下压电泵的扬程与振子中心点振幅曲线。由图 10 可知,非对称流管无阀压电泵的扬程与振子振幅都随着频率的增加先增大后减小。驱动频率为 38 Hz 时,该无阀压电泵的扬程达到最大,为 40.5 mmH₂O;振子中心点的单峰振幅在 33 Hz 时达到最大,为 23.45 μm 。

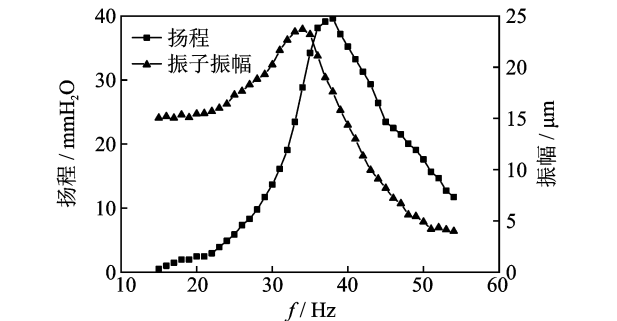


图 10 扬程、振幅随频率变化曲线
Fig. 10 Curves of head and vibrator amplitude

通过改变驱动电压,测量最大输出扬程随电压的变化情况。驱动电压从 40 V 到 220 V,每隔 20 V 测量 1 组数据,试验结果如图 11 所示。由图可知,该泵的输出扬程与驱动电压呈正相关。这是由于随着驱动电压的增加,压电振子的振幅增大,使得泵腔的容积变化率也增大,导致输出扬程升高。

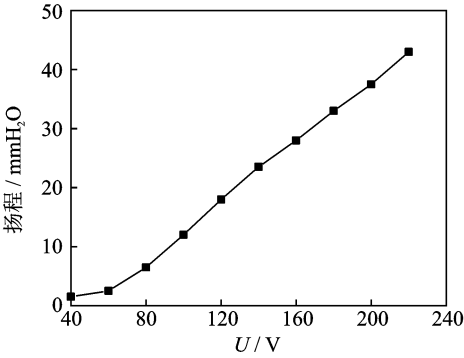


图 11 扬程随电压变化曲线

Fig. 11 Curves of mass flow and head

6 结 束 语

针对无阀压电泵的输出性能与振子负载间的关系,提出了非对称流管无阀压电泵。由理论分析得到了非对称流管无阀压电泵的输出流量公式,并通过模拟计算获得多级 Y 型流管的流阻,证明了该非对称流管应用于无阀压电泵的可行性。加工了非对称流管无阀压电泵样机,并进行了泵性能测试。试验表明,当驱动电压为峰峰值 200 V、驱动频率为 31 Hz 时,流量最大为 4 g/min;驱动频率为 38 Hz 时,压电泵的扬程达到最大,为 40.5 mmH₂O。在压电泵子正常工作电压范围内,通过改变驱动电压,得到流量与扬程和驱动电压呈正相关性。

参 考 文 献

[1] THOMPSON T L. The potential contribution of sub-surface drip irrigation to water-saving agriculture in the western USA[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 8(7):850-854.

[2] MANSOUR H A G, TAYEL M Y, LIGHTFOOT D A, et al. Energy and water saving by using modified closed circuits of drip irrigation system. [J]. *Agricultural Sciences*, 2010, 1(3):154-177.

[3] PISCIOTTA A, LORENZO R D, SANTALUCIA G, et al. Response of grapevine (cabernet sauvignon cv) to above ground and subsurface drip irrigation under arid conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 197:122-131.

[4] STOOCHNOFF J A, GRAHAM T, DIXON M A. Drip irrigation scheduling for container grown trees based on plant water status[J]. *Irrigation Science*, 2018(2):1-8.

[5] MO Y, LI G, WANG D. A sowing method for sub-surface drip irrigation that increases the emergence rate, yield, and water use efficiency in spring corn[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 179:288-295.

[6] SKAGGS T H, TROUT T J, ROTHFUSS Y. Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(6):1886-1896.

[7] SHAMSHERY P, WANG R, TRAN D V, et al. Modeling the future of irrigation: a parametric description of pressure compensating drip irrigation emitter performance[J]. *Plos One*, 2017, 12(4):e0175241.

[8] LEONOR R S, MARÍA G, RAÚL S, et al. Evaluation of drip and subsurface drip irrigation in a uniform loamy soil[J]. *Soil Science*, 2012, 177(177):147-152.

[9] WANG W, GENG Y, WU W. Background-free piezoresponse force microscopy for quantitative measurements[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(7):1400-1404.

[10] KOZIELSKI L, ADAMCZYK M, ERHART J, et al. Application testing of Sr doping effect of PZT ceramics on the piezoelectric transformer gain and efficiency proposed for MEMS actuators driving[J]. *Journal of Electroceramics*, 2012, 29(2):133-138.

[11] SHEN Y, XI N, LAI K W C, et al. A novel PVDF microforce/force rate sensor for practical applications in micromanipulation [J]. *Sensor Review*, 2004, 24(3):274-283.

[12] 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 Junwu, YANG Zhigang, CHENG Guangming. Research on piezoelectric pump and its development [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6):619-625. (in Chinese)

[13] 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. (in Chinese)

[14] IZZO I, ACCOTO D, MENCIASSI A, et al. Modeling and experimental validation of a piezoelectric micropump with novel no-moving-part valves[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2007, 133(1):128-140.

[15] 孙夫纯, 胡彩旗, 李胜多, 等. 滴灌压电泵的驱动电

- 源设计与试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(9):761-766.
- SUN Fuchun, HU Caiqi, LI Shengduo, et al. Design and experiment on driving power supply for drip irrigation piezoelectric pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(9): 761-766. (in Chinese)
- [16] 李定华, 贾君瑞, 李彦霖, 等. 不同激励信号驱动下压电泵的输出性能[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(11):941-946.
- LI Dinghua, JIA Junrui, LI Yanling, et al. Output performance of piezoelectric pump driven by different excitation signals[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(11): 941-946. (in Chinese)
- [17] STEMME E, STEMME G. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump [J]. Sensors & Actuators A Physical, 1993, 39(2):159-167.
- [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]. Piezoelectric & Acoustooptics, 2001, 23(1):23-25. (in Chinese)
- [19] FORSTER F K, BARDELL L, AFROMOWITZ M A, et al. Design, fabrication and testing of fixed-valve micro-pumps[J]. Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division, 1995, 234:39-44.
- [20] 张建辉, 路计庄, 夏齐霄, 等. 细胞或高分子输送用 Y 形流管无阀压电泵的工作原理及流量特性[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 92-99.
- ZHANG Jianhui, LU Jizhuang, XIA Qixiao, et al. Working principle and flux characteristics of valve-less piezoelectric pump with Y-shape tubes for transporting cells and macromolecule[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 92-99. (in Chinese)
- [21] 张蕊华, 张建辉, 胡笑奇, 等. 三棱柱阻流体无阀压电泵流量特性试验[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(3): 580-585.
- ZHANG Ruihua, ZHANG Jianhui, HU Xiaochi, et al. Experimental study on flow characteristics of valveless piezoelectric pump with triangular prism [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(3): 580-585. (in Chinese)
- [22] 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)
- [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 Yingfa, et al. Principles and experimental verification of piezoelectric pump with taper pipe slope elements[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(2): 378-382. (in Chinese)
- [24] 胡彩旗, 纪晶. 半球缺无阀压电泵泵送性能优化分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 325-332.
- HU Caiqi, JI Jing. Optimization analysis of pumping performance for valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 325-332. (in Chinese)
- [25] 黄俊, 张建辉, 王守印. 多级 Y 型流管无阀压电泵的原理与试验验证[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 423-430.
- HUANG Jun, ZHANG Jianhui, WANG Shouyin. Theory and experimental verification on valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 423-430. (in Chinese)
- [26] 黄俊, 张建辉, 王守印. 变截面 Y 型流管无阀压电泵原理及试验[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(1):15-19.
- HUANG Jun, ZHANG Jianhui, WANG Shouyin. Theory and experimental verification on valveless piezoelectric pump with variable crass section Y-shape tubes[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(1):15-19. (in Chinese)
- [27] OLSSON A, ENOKSSON P, STEMME G, et al. Micromachined flat-walled valveless diffuser pumps [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1997, 6(2):161-166.
- [28] MU Y H, HUNG N P, NGOI K A. Optimisation design of a piezoelectric micropump[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, 15(8):573-576.



第一作者简介:田鹏,男,1993 年 1 月生,硕士。主要研究方向为微泵的结构设计及传热分析。

E-mail: tianpengyix@163.com