

文章编号 1004-924X(2016)01-0112-07

无阀压电泵的流固耦合仿真及试验验证

曾 平¹, 李立安¹, 胥 锋¹, 刘国君^{1*}, 温建明²

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 浙江师范大学 精密机械研究所, 浙江 金华 321004)

摘要:提出利用结构分析软件 ANSYS 和流体分析软件 ANSYS CFX 对无阀压电泵进行流固耦合仿真分析,以研究无阀压电泵的输出性能。分别对进口在中间出口在一侧、出口在中间进口在一侧、进出口对称布置的 3 种不同结构形式的无阀压电泵进行了流固耦合仿真分析。结果显示,上述 3 种无阀压电泵中,出口在中间进口在一侧结构形式的无阀压电泵的宏观输出流量最大。制作了 3 种无阀压电泵的试验样机,并搭建了相应的试验测试系统,在幅值为 45 V、频率为 0~700 Hz 的正弦信号激励下对其输出流量进行了测试。结果表明,3 种不同结构形式的无阀压电泵的最大输出流量分别为 3.8、6.0 和 4.0 ml/min,出口在中间进口在一侧的压电泵输出流量最大,与流固耦合仿真分析的结果相吻合,验证了本文提出的流固耦合仿真分析的方法可以指导压电泵的设计。

关键词:无阀压电泵;流固耦合;仿真;ANSYS;ANSYS CFX

中图分类号:TN384;TH38 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162401.0112

Structural-fluid coupling simulation and experimental verification on valveless piezoelectric pump

ZENG Ping¹, LI Li-an¹, XU Feng¹, LIU Guo-jun^{1*}, WEN Jian-ming²

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Institute of Precision Machinery, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

* Corresponding author, E-mail: gjliu@jlu.edu.cn

Abstract: The structural software ANSYS and the fluid software ANSYS CFX. were used to simulate the structural-fluid coupling of a valveless piezoelectric pump and to research its output performance. Three different kinds of valveless pumps, the pump with middle inlet, the pump with middle outlet and the pump with side inlet/outlet were designed. The structural-fluid coupling on these valveless piezoelectric pumps was simulated by the software ANSYS and the software ANSYS CFX. The simulation results show that the pump with middle outlet has the maximum output flow rate. The prototypes of the three kinds of piezoelectric pumps were fabricated and a corresponding testing system for the pumps was set up and test experiments were performed under a sinusoidal AC excitation signal of 45 V and the frequency of 0-700 Hz. The results show that the maximum output flow rates of the three kinds of valveless pumps are 3.8 ml/min, 6.0 ml/min and 4.0 ml/min, respectively. Among them the pump with middle outlet has the maximum output flow rate, which is consistent with the results of the structural-fluid coupling simulation and verifies that the simulation

收稿日期:2015-06-18;修订日期:2015-07-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375207, No. 51205369)

method proposed by this paper can guide the design of piezoelectric pumps.

Key words: valveless piezoelectric pump; structural-fluid coupling; simulation; ANSYS; ANSYS CFX

1 引 言

压电泵作为一种流体驱动装置,具有体积小、结构简单、能耗低、不受电磁干扰、便于携带、能够精密控制输出微小流量等优点,在航空航天、机器人、汽车、医疗器械、生物基因工程、微型机械等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。通过对压电泵进行仿真分析可以得出压电泵泵腔内流体的流动形态、各结构处的压力分布、压电振子的各阶固有频率和振动模态以及压电泵的输出性能,为压电泵的设计与试验研究提供数据参考。

压电泵的工作过程为流体、截止阀、压电振子等的流固耦合过程。对于压电泵流固耦合作用的研究,国外只有韩国建国大学等几个科研机构对其进行了仿真分析,多数科研机构仅是在考虑了流固耦合作用的基础上,建立压电振子的数学模型,对其进行数值分析;Van 等^[4]对某种特定结构的无阀压电泵进行了流固耦合仿真分析及试验测试,研究结果显示,仿真结果与试验测试数据存在一定的偏差,但相差不大,吻合程度较好,可以用来预测压电泵的输出特性。Dinh 等^[5]在考虑了压电泵固体部分与流体部分的双向流固耦合力的基础上,建立了压电振子的数学模型,对其进行了数值分析。而国内对于压电泵的仿真分析,基本上是利用 ANSYS 软件对压电振子进行静力学分析、模态分析、结构参数优化设计结构仿真分析,或是利用 CFX、Fluent 等流体分析软件对泵腔区域进行流体仿真分析^[6-10],缺少对压电泵的流固耦合分析方法。

本文在总结国内外对压电泵研究现状的基础上,提出利用结构分析软件 ANSYS 和流体分析软件 ANSYS CFX 对无阀压电泵进行流固耦合仿真分析,研究了无阀压电泵在流固耦合作用下泵腔内流体的流动形态和流速分布情况,为进一步提高压电泵的输出性能奠定理论基础。

2 结构及工作原理

无阀压电泵由泵体、压电振子、进口、出口以

及一对扩散管和收缩管等组成,流体流过扩散管和收缩管时所承受的阻力不同。当泵腔容积增大时,流体同时从进口和出口流入泵腔,但由于进口的流体压力损失小于出口,故进口流入的液体量更多;当泵腔容积减小时,流体同时从出口和进口排出泵腔,但由于出口的流体压力损失小于进口,故出口排出的液体量更多,宏观上呈现出进口吸水、出口泵水的现象,因此当泵腔容积不停地交替变化使流体实现宏观的单向流动。

为了研究无阀压电泵进/出口位置分布不同对其输出性能所产生的影响,设计并制作了进口在中间出口在一侧、出口在中间进口在一侧、进出口对称布置 3 种不同结构形式的无阀压电泵,这 3 种压电泵除进出口的位置分布不同外,其余结构尺寸均相同,外形尺寸均设计为 70 mm × 70 mm × 20 mm,腔高均为 0.5 mm,驱动元件均采用同一片圆形压电振子,压电振子的基板直径为 55 mm、陶瓷直径为 50 mm、基板和陶瓷厚度均为 0.2 mm。3 种压电泵主要组成部件的具体参数如表 1 所示。以进/出口对称布置的压电泵为例,其结构原理如图 1 所示。

表 1 压电泵样机主要构件参数

Tab. 1 Main structural parameters of piezoelectric pump

零件名称	数量	几何尺寸/mm	材料
铜基板	1	R27.5	铍青铜
压电陶瓷	2	R25	PZT
顶盖	1	70×70×5	有机玻璃
中间板	1	70×70×5	有机玻璃
下壳体	1	70×70×10	有机玻璃
伞形阀	2	R5	橡胶

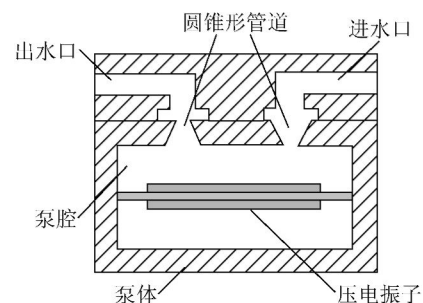


图 1 结构原理图

Fig. 1 Structure of dual-entrance Piezoelectric Pump

3 流固耦合仿真分析

3.1 压电振子有限元模型的建立

在建立压电振子的几何模型时,先建立位于中间的压电陶瓷与金属基板复合层的几何模型,再建立位于外围的环形金属基板的几何模型,然后通过 VGLUE 命令粘结到一起。压电陶瓷的单元类型选择八节点的六面体单元 solid5^[11,12],铜基板的单元类型选择常用的结构件单元 solid45^[13]。模型网格划分时,控制程序生成六面体网格单元,网格大小设置为 1 mm,单元划分结果如图 2 所示。

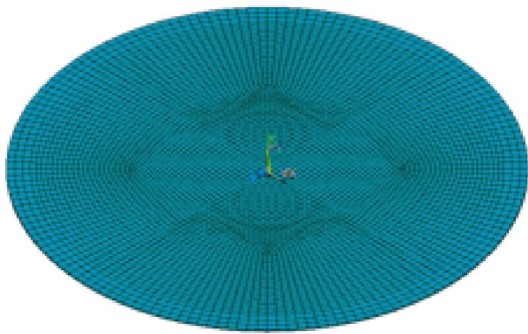


图 2 压电振子网格划分模型

Fig. 2 Meshing model of piezoelectric vibrator

3.2 流体域有限元模型的建立

无阀压电泵的流体区域包括泵腔与进/出口管道,以进出口对称布置的压电泵为例,其结构模型如图 3 所示。假设流体不可被压缩且其温度、密度及黏度等属性不随时间变化,则在建立流体区域的几何模型时,先建立直径为 55 mm、深度为 0.5 mm 的薄圆柱状的泵腔区域模型,再建立作为进/出口的 2 个圆锥形管道的模型,其中两个圆锥形管道的管长均为 1 mm、管口最大直径均为 4.8 mm、管口最小直径均为 2.8 mm,最后利用 VGLUE 命令将所建立的几何模型全部粘结到一起。由于是三维流固耦合场分析,泵腔壁以及流固耦合面的单元类型选择 mesh200 单元,流体的单元类型选择 fluid142 单元。模型网格划分时,采用自由网格划分,网格形状为四面体单元,网格大小设置为 0.5 mm。将生成的网格文件导入 CFX 前处理器中,然后设定仿真模型的模拟类

型、边界条件以及初始条件等属性。

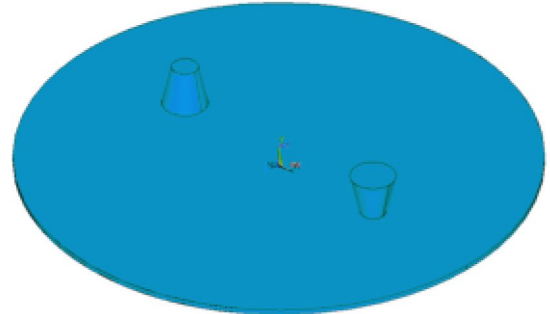


图 3 流体域模型图

Fig. 3 Model diagram of fluid domain

3.3 流固耦合仿真的求解设置

利用 Mechanical APDL 对压电振子进行结构分析,利用 CFX 进行流体分析,求解器采用 MFX 多场求解器,并采用顺序求解方式,通过指定流体计算域和固体计算域的求解顺序依次求解。对于压电泵,压电振子是在电源激励信号的作用下率先弯曲振动,对流体产生驱动作用,因而整个流固耦合分析开始时是由固体变形引起流场变化,所以仿真分析中先对压电振子进行求解,把结构分析计算结果通过流固耦合面传递给流体域,然后再对已经接收位移数据的流体域进行求解,并将流体计算结果传递回压电振子,如此反复,直至计算结束。然后分别从 CFX 和 ANSYS APDL 导出 *.def 和 *.dat 格式的结果文件,利用 Mechanical APDL Product Launcher 对双向耦合分析进行设置,最后生成对应流体区域的 *.res 格式的流体结果文件和对应压电振子的 *.db 格式的固体结果文件,具体流程如图 4 所示。

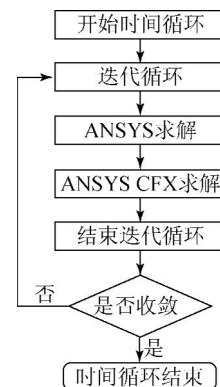


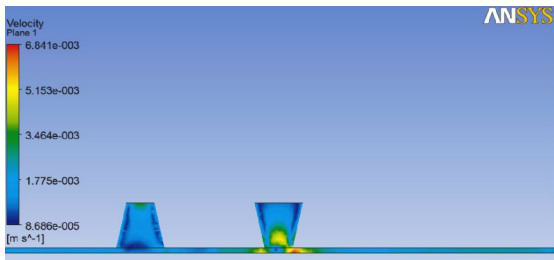
图 4 流固耦合求解流程图

Fig. 4 Flowchart of structural-fluid coupling simulation

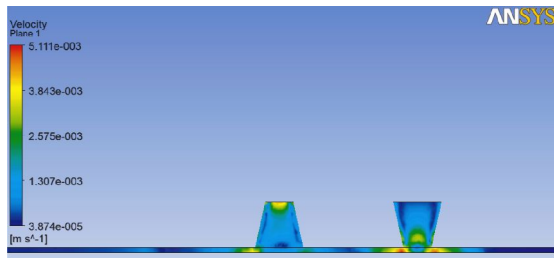
3.4 压电泵流固耦合仿真的结果分析

在 45 V 阶跃信号激励作用下分别对进口在中间出口在一侧、出口在中间进口在一侧、进出口对称布置的 3 种形式的无阀压电泵进行流固耦合仿真分析,流体介质为纯净水。设定分析总时长为 1.0 s,时间步长和结果文件保存频率分别定为 0.05 s 和 0.1 s,比较每一时间步 3 种形式压电泵的流体出流情况。在 CFX 软件的后处理器中导入 *.res 格式的流体结果文件,得到 3 种形式压电泵每一时间步所对应的速度流线图,其中在 0.1 s 时刻时,3 种泵的仿真结果如图 5~7 所示。

对比分析 0.1 s 时刻 3 种形式压电泵的速度分布,从图 5 可以看出,由于扩散/收缩管道结构设计的影响,3 种形式压电泵的最大流速均集中于进水管的小管口处。



(a) 进口在中间的压电泵
(a) Piezoelectric pump with middle inlet

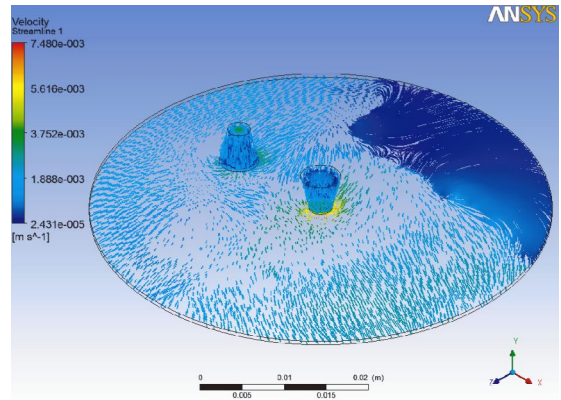


(b) 出口在中间的压电泵
(b) Piezoelectric pump with middle outlet

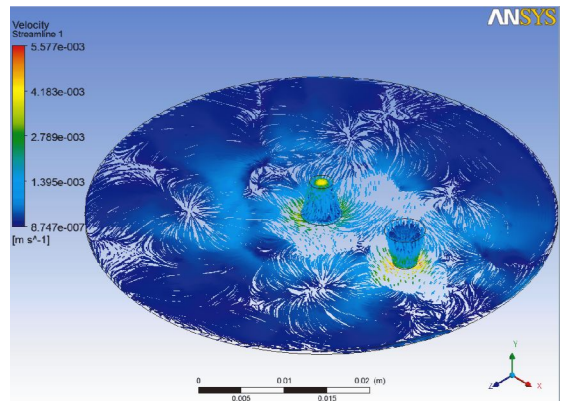


(c) 进出口对称布置的压电泵
(c) Piezoelectric pump with symmetrical inlet/outlet

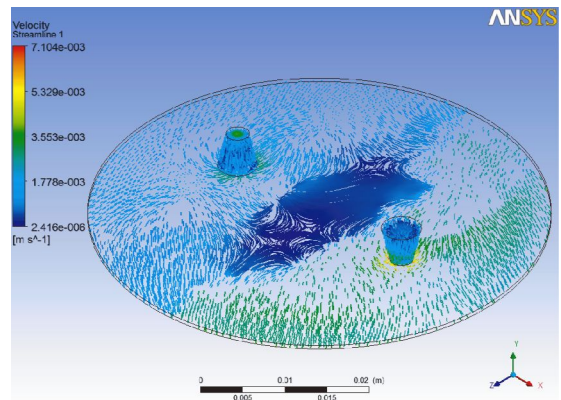
图 5 3 种无阀泵直径纵切面的速度分布图
Fig. 5 Velocity profiles of longitudinal sections



(a) 进口在中间的压电泵
(a) Piezoelectric pump with middle inlet



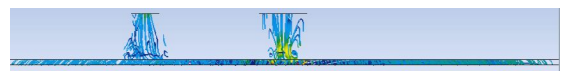
(b) 出口在中间的压电泵
(b) Piezoelectric pump with middle outlet



(c) 进出口对称布置的压电泵
(c) Piezoelectric pump with symmetrical inlet/outlet

图 6 3 种无阀泵的速度流线图

Fig. 6 Velocity stream diagrams



(a) 进口在中间的压电泵
(a) Piezoelectric pump with middle inlet

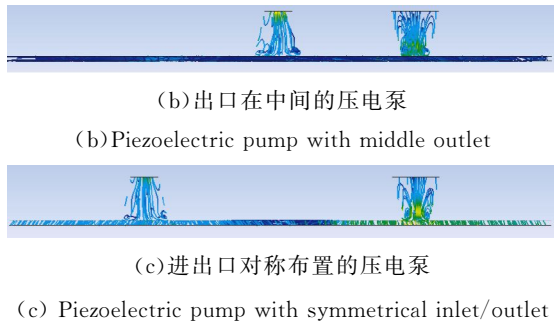


图 7 3 种无阀泵的速度流线图的主视图

Fig. 7 Main view of velocity stream diagrams

由于水是不可压缩的,在相同幅值的电压激励下,在压电振子向上拱起往外排水的过程中,进口和出口会同时向外排水,但其总排水量不变,为一个工作行程下泵腔容积的变化量。因此,当进水管小管口处的流速较大时,泵水时的回流量相应就会增大,出口处的出水量相应就会减小,整个压电泵所呈现出的宏观出水量就会较小。由 0.1 s 时刻 3 种形式压电泵的速度流线图(图 6)可以看出,对于进水管小管口处的流速,进口在中间的压电泵最大,为 7.48×10^{-3} m/s,进出口对称布置的压电泵次之,为 7.104×10^{-3} m/s,出口在中间的压电泵最小,为 5.577×10^{-3} m/s,因此,在 0.1 s 时刻,出口在中间的压电泵的宏观输出流量最大,进口在中间的压电泵的宏观输出流量最小。对比图 7 可以看出,进口在中间的压电泵泵腔内流体的流动状态紊乱,在流动过程中的能量损失会较大,而出口在中间的压电泵其泵腔内的流动相对最稳定,因此其能量损失会相对较小,泵水量也会相对较高。

3 种形式压电泵的流固耦合仿真中,分析总时长和时间步长分别设为 1.0 s 和 0.05 s,包括 20 个时间步,为了更直接更全面地比较每一时间步 3 种形式压电泵的流量特性,根据流固耦合仿真结果绘制了 1.0 s 内 3 种压电泵的进水口小管口处的最大流速与时间的关系曲线,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,在压电泵泵水的每一时刻,进水口小管口处的最大流速均为进口在中间的压电泵最大,进出口对称布置的压电泵次之,出口在中间的压电泵最小,因此侧面反映出,在压电泵工

作的整个过程中,出口在中间的压电泵宏观输出流量最大。

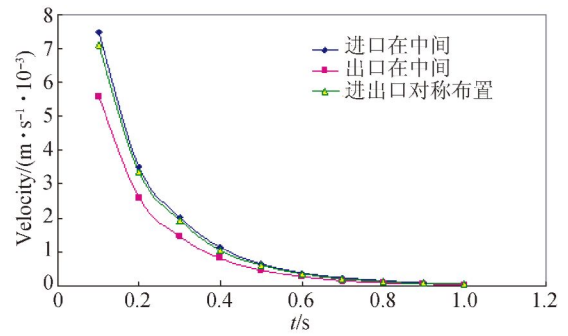


图 8 3 种形式无阀泵的最大流速-时间特性曲线

Fig. 8 Maximum flow velocity-time curves

4 试验测试与分析

为了验证流固耦合仿真结果的正确性,搭建了试验平台并对这 3 种形式压电泵的输出流量进行了测试,测试时所使用的流体介质均采用纯净水。测试系统实物如图 9 所示,主要包括 XFD-8B 信号发生器、精密气浮隔振台、电子秤、台虎钳、秒表、烧杯以及水盆等。以进/出口对称布置的压电泵为例,其样机如图 10 所示。

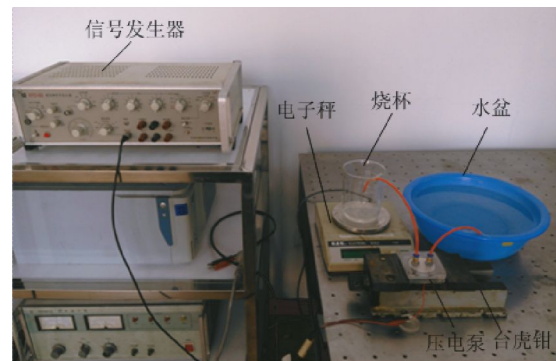


图 9 压电泵测试系统实物图

Fig. 9 Test system of piezoelectric pump

分别对进口在中间出口在一侧、出口在中间进口在一侧、进出口对称布置的 3 种形式的无阀压电泵施加电压幅值为 45 V 的正弦交流激励信号,测量其输出流量与驱动电源频率之间的关系,得到了在 0~700 Hz 频率内压电泵的输出流量值,如图 10 所示。

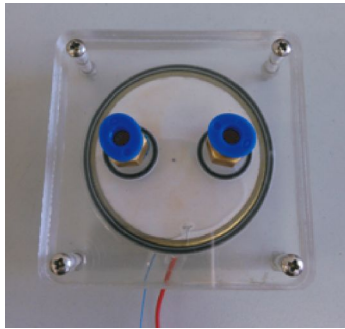


图 10 样机实物图

Fig. 10 Prototype physical figure

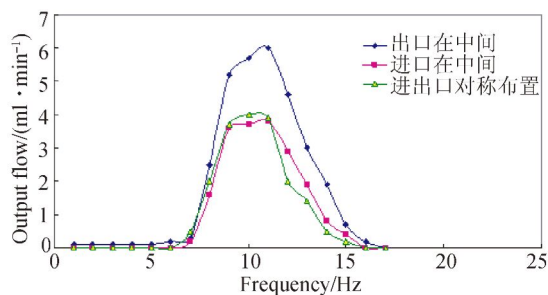


图 11 3 种形式无阀泵的输出流量-频率关系曲线

Fig. 11 Output flow-frequency curves

从图中可以看出,在 0~10 Hz 左右的频率内,进口在中间、出口在中间、进出口对称布置 3 种形式的无阀压电泵的输出流量均随驱动频率的增加而增加,并在 10 Hz 频率点时输出流量达

到最大,分别为 3.8 ml/min、6.0 ml/min 和 3.9 ml/min;在 10 Hz 以后输出流量均随驱动频率的增加而降低,并最终减小至零。在整个泵水过程中,出口在中间的压电泵的输出流量最大,与流固耦合仿真分析的结果相一致。

5 结 论

为研究进/出口的分布位置对压电泵输出流量的影响规律,设计了 3 种不同结构形式的无阀压电泵,并对其工作原理进行了分析。基于结构分析软件 ANSYS 和流体分析软件 ANSYS CFX,对进口在中间出口在一侧、出口在中间进口在一侧、进出口对称布置 3 种形式的无阀压电泵进行了流固耦合仿真分析,仿真结果显示,出口在中间的无阀压电泵的宏观输出流量最大。搭建了压电泵的试验测试系统,对 3 种不同结构形式的无阀压电泵进行了试验测试。进口在中间、出口在中间、进出口对称布置三种形式压电泵的流量最佳频率均为 10 Hz,最大流量分别为 3.8 ml/min、6.0 ml/min 和 4.0 ml/min,出口在中间的压电泵的输出流量最大,与流固耦合仿真分析的结果相吻合,证明了流固耦合仿真分析的正确性,为压电泵泵腔的分析奠定了基础。

参考文献:

- [1] PARK J H, SEO M Y, HAM Y B, *et al.*. A study on high-output piezoelectric micropumps for application in DMFC [J]. *Journal of Electroceramics*, 2013, 30(1-2): 102-107.
- [2] WANG X Y, MA Y T, YAN G Y, *et al.*. High flow-rate piezoelectric micropump with two fixed ends polydimethylsiloxane valves and compressible spaces [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 218: 94-104.
- [3] HUANG J, ZHANG J, WANG S, *et al.*. Analysis of the flow rate characteristics of valveless piezoelectric pump with fractal-like Y-shape branching tubes [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(3): 628-634.
- [4] PHAN V P, GOO N S, HAN C H. Pumping performance of a valveless micropump using three-dimensional electro-fluid-structural Interaction simulation [C]. ASME 2008 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. American Society of Mechanical Engineers, 2008: 371-377.
- [5] DINH T X, OGAMI Y. A dynamic model of valveless micropumps with a fluid damping effect [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(11): 1-5.
- [6] 白兰, 冯志庆, 吴一辉. 无阀微泵动态特性的固液耦合分析[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(7): 69-74. BAI L, FENG ZH Q, WU Y H. Solid-liquid coupling analysis of valveless micropumps dynamic characteristics [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(7): 69-74. (in Chinese)
- [7] CUI Q, LIU C, ZHA X F. Simulation and optimization of a piezoelectric micropump for medical applications [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 36(5-6): 516-524.

- [8] 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):423-480.
HUANG J, ZHANG J H, WANG SH Y. Theory and experimental verification on valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):423-480. (in Chinese)
- [9] 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 J H, CAO B X, CHEN D G, *et al.*. Experimental verification on valveless piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):76-84. (in Chinese)
- [10] 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.
FENG L N. *Research on valveless piezoelectric pump with asymmetric nozzle/diffuser elements* [D]. Jinhua: Zhejiang Normal university, 2013. (in Chinese)
- [11] 王新荣, 陈永波. 有限元法及 ansys 基础应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
WANG X R, CHEN Y B. *Method of Finite Element and Based Applications of ANSYS* [M]. Beijing: science Press, 2008. (in Chinese)
- [12] 刘振华, 刘华巍, 曾祥君, 等. 压电复合元件耦合振动模态分析[J]. 压电与声光, 2010, 32(4):588-590.
LIU ZH H, LIU H W, ZENG X J, *et al.*. Piezoelectric modal coupling vibration analysis of composite components [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2010, 32(4):588-590. (in Chinese)
- [13] 孙静. ANSYS 有限元分析在压电泵研究中的应用[J]. 技术与教育, 2009, 23(1):8-11.
SUN J. The application of ANSYS finite element analysis in the piezoelectric pump [J]. *Technique & Education*, 2009, 23(1):8-11. (in Chinese)

作者简介:



曾平(1957—),女,吉林长春人,教授,博士生导师,主要从事机械设计及理论、压电驱动技术的研究。E-mail: zengping321@163.com

通讯简介:



刘国君(1972—),男,吉林长春人,博士,副教授,硕士生导师。2003年、2005年于吉林大学分别获得硕士、博士学位,2008年至2009年于日本京都大学(工学研究科マイクロエンジニアリング専攻)田畑修教授研究室进行博士后研究。主要从事压电驱动与控制技术研究、微流控技术研究、微泵、微混合器及微反应器等器件研发、贵金属纳米粒子可控合成等方面的研究。E-mail: giliu@jlu.edu.cn