

文章编号 1004-924X(2013)02-0423-08

多级“Y”型流管无阀压电泵的原理与试验验证

黄 俊¹, 张建辉^{1*}, 王守印²

- (1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对目前微流体混合器多需要外接动力源,且多数微混合器只能进行液体混合而不能输送液体的问题,提出将无阀压电泵引入微混合器领域,并研制了一种集混合与输送于一体的多级“Y”型流管无阀压电泵。首先,提出了多级“Y”型流管,进而设计了多级“Y”型流管无阀压电泵,并分析其工作原理;然后,对该无阀压电泵的流管流阻特性及泵流量进行理论分析;同时,利用有限元软件对多级“Y”型流管无阀压电泵进行了流场模拟,结果表明该压电泵具有单向传输作用。最后,制作了多级“Y”型流管无阀压电泵样机,并进行了泵流量与背压试验。试验结果显示:驱动电压峰值为 100 V,频率为 16 Hz 时,流量达到最大,为 16.2 ml/min;驱动电压峰值为 100 V,频率为 14 Hz 时,输出背压最大,约为 64 mm 水柱。得到的试验数据证明了多级“Y”型流管无阀压电泵的有效性。

关键词:多级“Y”型流管;压电泵;无阀泵;微混合器

中图分类号:TH38;TN384 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0423

Theory and experimental verification on valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes

HUANG Jun¹, ZHANG Jian-hui^{1*}, WANG Shou-yin²

- (1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
- * Corresponding author, E-mail: zhangjh@nuaa.edu.cn

Abstract: This paper researches how to improve the performance and applications of micromixers used in mixing micro-liquids, because most of the existing micromixers need external power sources, and can only mix fluids but can not transport them. A valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes which integrates both functions of mixing and transporting is developed to overcome above shortcomings. Firstly, a multistage Y-shape tube is proposed, then a valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes is designed and its working principle is analyzed. Furthermore, the flow resistance characteristics and the flow rate of the valveless piezoelectric pump are analyzed theoretically. Meanwhile, finite element software is employed in simulating the flow fields of the pump

收稿日期:2012-11-20;修订日期:2012-12-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075201;51275235)

numerically. The results show that the piezoelectric pump has a function of one-way transmission. Finally, the valveless piezoelectric pump is fabricated, the relationships between flow rate and driving frequency, as well as that between back pressure and driving frequency are experimentally investigated. The experimental results show that the maximum flow rate is 16.2 mL/min under a peak-to-peak voltage of power supply in 100 V (16 Hz), and the maximum back pressure is about 64 mmH₂O under a peak-to-peak voltage of power supply in 100 V (14 Hz). The obtained experimental results validate the feasibility of the valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes.

Key words: multistage Y-shape tubes; piezoelectric pump; valveless pump; micro mixer

1 引言

近年来,随着 MEMS 技术的飞速发展,各类集成化、微型化的器件层出不穷。作为 MEMS 中的一个重要分支,微流体控制系统由于体积小,能耗低,响应快等特点,受到各国学者广泛关注。用于混合微流体的微混合器是微流体控制系统中的一个重要组成部分,在化学分析、生物及化学传感等领域有着广泛的应用前景^[1]。

根据工作原理的不同,微混合器一般被分为被动式混合器和主动式混合器。被动式混合器是指除了外接微泵将流体以定流量的方式注入微混合器以产生驱动流体流动的作用力外,混合不借助于外力进行,主要依靠改变混合器中微通道的几何形状等方法来增加微流体的有效接触面积,从而增强微流体的分子扩散和对流,提高混合效率。主动式微流体混合器是在流道中放置可动元件或利用外加激励周期性地干扰流场以加强混合效果。

被动式混合器结构简单,成本较低,易与其他微型元件整合。其中,Gobby 等人通过改变 T 型混合器不同的入口角度来寻求最佳混合效果^[2]。Johnson 等人在 T 型微混合器的流道上激光蚀刻出一些凹槽,产生三维立体结构以提高混合效果^[3]。Stroock 等人在 PDMS 通道底部加工出交错排列的人字型凸脊,使流体流经时产生混沌移流来进行混合^[4]。

主动式混合器可通过调节外部输入能量大小来调配混合效果,已达到较好的混合效果。J. C. Rife 等人提出的应用于液体混合的压电装置^[5]。其实质是压电振子驱动搅拌池中障碍物以

产生漩涡,达到均匀混合的效果。Yang 等人在混合器底部安装压电材料,以其振动产生的超声波来对流场施加横向激励以提高混合效果^[6]。Lu 等人在流道中利用磁性材料做了一个搅拌器,通过外加一旋转磁场使之转动增加混合效果^[7]。

由此可见,目前微混合器普遍需外接动力源,不易集成化、微型化,且多数只能混合液体并无输送功能。无阀压电泵因其集驱动与传动于一体,且内部无活动部件阀等特点,被张建辉、夏齐霄等人引入了微混合器领域,并提出了一种集混合搅拌与液体输送为一体的非对称坡面无阀压电泵^[8-10]。但他们所提出的可应用于混合搅拌的非对称坡面腔底无阀压电泵,因其腔底为波纹单元,制作工艺复杂,提高了加工成本,并且混合方式较为单一。

本文根据张建辉提出的“Y”型流管正反向流动流阻不等原理^[11-12],设计了多级“Y”型流管无阀压电泵。多级“Y”型流管无阀压电泵以多级“Y”型流管作为压电泵的无移动部件阀,从而取代了有阀压电泵内部的起止阀,并且制作简单,降低了成本。同时,多级“Y”型流管融合了被动式混合器微通道的功能,故多级“Y”型流管无阀压电泵为主动式混合器与被动式混合器的集成,在输送流体的同时,可以充分地混合液体,从而减小了整个微混合系统的体积。因此该多级“Y”型流管无阀压电泵集成化程度高,易于微小化。

本文首先提出了多级“Y”型流管无阀压电泵设计方案,并分析其单向流动原理;然后,对多级“Y”型流管的流阻特性及泵流量进行理论分析;同时,对该无阀泵进行有限元仿真计算;最后,进行泵流量及压差的实验,以证明该泵原理的可行性。

2 泵结构与工作原理

多级“Y”型流管是对“Y”型流管进行多级分岔,得到一个平面结构(亦称二维半结构)的管网,如图 1 所示。

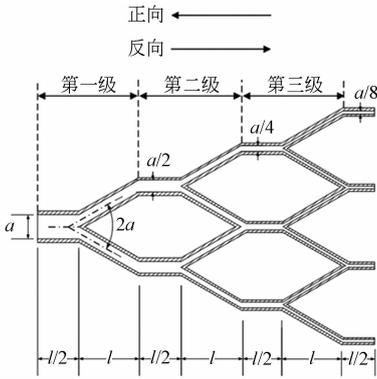


图 1 多级“Y”型流管结构图

Fig. 1 Structure of multistage Y-shape tube

设整个流管的正向出口宽为 a ,总长为 $5l$;每级“Y”型流管的支管宽度为该级合管宽度的一半,且各级“Y”型流管的分岔角相等都为 2α ;整管的高度为 h 。当流体在多级“Y”型流管中流动时,整个流管的合管作为输出口(定义为正向流),整个流管的 4 个分岔管作为输出口(定义为反向流),正、反向流动时的流动阻力是不同的。整个多级“Y”型流管无阀压电泵主要由压电振子、泵体及一对多级“Y”型流管组成,如图 2 所示。

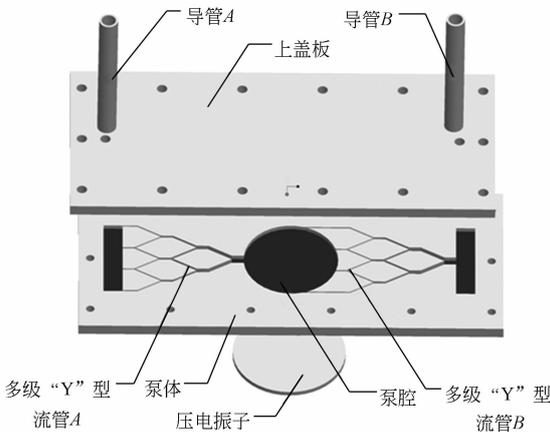


图 2 多级“Y”型流管无阀压电泵结构图

Fig. 2 Structure of valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes

对压电振子施加交变电压,将其产生振动,从

而引起泵腔容积周期性变化,带动腔内液体运动,此时多级“Y”型流管起到了阀的作用。当压电振子上下往复运动时,泵腔容积交替增大或减小,泵腔两端的多级“Y”型流管 A、B 同时吸入或排出液体。由于流体沿多级“Y”型流管正向和反向流动时,所受流阻不等,从而在宏观上使液体朝单一方向运动。

该无阀压电泵的多级“Y”型流管可作为被动式混合通道,通过将流体裂分并重新汇合的过程,扩大了液体间的接触面积,实现了更有效的混合。而压电振子与泵腔则组成了主动式混合器,极大地提高了混合效率。因此,多级“Y”型流管无阀压电泵在输送液体的同时,可以充分地进行液体混合,提高了微流体控制系统的集成度,拓展了无阀压电泵的应用领域。

3 流管流阻与泵流量分析

流体在流经多级“Y”型流管时会克服局部阻力和沿程阻力,从而产生压强损失。而多级“Y”型流管作为无阀压电泵中的无移动部件阀,利用的就是其正反向流动阻力的不等性。同时多级“Y”型流管是对“Y”型流管进行多级分叉得到的,所以本研究将利用基于宏观管道流阻分析方法^[13],首先讨论“Y”型流管分流合流时的流阻系数。

3.1 “Y”型流管的分流合流流阻系数

流体通过“Y”型流管时,由于流动方向的不同将产生分流和合流,如图 3 所示。分流和合流将在“Y”型流管分叉处产生不同的能量损失,从而产生了不同的流动阻力。因此,通过对“Y”型流管分流和合流流阻系数的计算,可以得出其能量损失。同时,无阀压电泵中压电振子的振动为微幅振动,所以其引起的泵腔内流体的流动可认为是层流。假设腔内液体的密度为固定值,“Y”型流管中 2 个分叉管内的流量相等,则流经流管的液体质量流率为:

$$\frac{d}{dt}m = \rho v A, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}m_2 = \frac{d}{dt}m_3, \quad (2)$$

式中 m 为液体质量, v 为流管中流体速度。 A 为

流管的截面积。下标 2,3 表示“Y”型流管的 2 个分叉管。

由于该“Y”型流管 2 个分叉管的截面积 $A_2 = A_3$, 合管截面积为 $A_1 = A_2 + A_3$, 根据连续性原理, 得出 $v_1 = v_2 = v_3$ 。

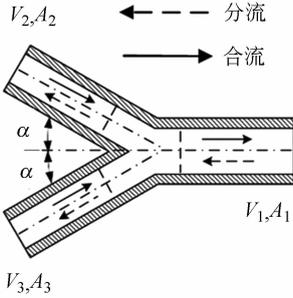


图 3 “Y”型流管示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Y-shape tube

根据 Bernoulli 方程可得分叉管 3 到合管 1 的流阻系数:

$$\xi_{3,1} = \frac{(P_3 + \frac{\rho}{2}v_3^2) - (P_1 + \frac{\rho}{2}v_1^2)}{\frac{\rho}{2}v_1^2} = \frac{P_3 - P_1}{\rho v_1^2 / 2}, \quad (3)$$

由文献[14]可得:

$$\xi_{3,1} = \frac{\Delta p_{3,1}}{\rho v_1^2 / 2} = a \frac{Q_3}{Q_1} + b \left[\left(\frac{Q_3}{Q_1} \right)^4 + \left(1 - \frac{Q_3}{Q_1} \right)^4 \right] - c \left(\frac{Q_3}{Q_1} \right)^2 - d. \quad (4)$$

该公式适用于本研究中 $A_2 = A_3$, $A_1 = A_2 + A_3$ 类型的“Y”型流管。其中, 参数 a, b, c, d 与“Y”型流管分叉角相关, Q 为流量, 下标 1,2,3 分别表示“Y”型流管的合管及其 2 个分叉管; $\Delta p_{3,1}$ 为分叉管 3 到合管 1 的压强损耗。本研究中“Y”型流管分叉角为 60° , 根据文献[15], 可得“Y”型流管合流时的流阻系数为:

$$\xi = \frac{Q_3}{Q_1} \xi_{3,1} + \frac{Q_2}{Q_1} \xi_{2,1}. \quad (5)$$

Fried 和 Idelchik^[14] 提供了所有相关的“Y”型流管分离流的流阻系数, 根据本研究所采用的“Y”型流管类型, 其合管 1 到分叉管 3 的流阻系数如下:

$$\xi_{1,3}' = S(1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos \alpha), \quad (6)$$

上式中参数 S 与横截面积及流速相关, $\lambda = v_3 / v_1$ 。

则“Y”型流管分流时的流阻系数为:

$$\xi' = \frac{Q_3}{Q_1} \xi'_{1,3} + \frac{Q_2}{Q_1} \xi'_{1,2}. \quad (7)$$

3.2 多级“Y”型流管流阻系数

如前所述, 图 1 所示的多级“Y”型流管是对“Y”型流管进行多级分叉而成, 则整个流管的流阻系数可近似认为由各级“Y”型流管的流阻系数叠加而成^[16]。

则当流体正向流动(合流)时, 整个流管的压强损耗可表达为:

$$\Delta p = \Delta p_{11} + \Delta p_{21} + \Delta p_{22} + \Delta p_{21}' + \dots + \Delta p_{ij} + \Delta p_{ij-1}' = \frac{\rho v_{11}^2}{2} \xi_{11} + \frac{\rho v_{21}^2}{2} \xi_{21} + \dots + \frac{\rho v_{ij}^2}{2} \xi_{ij} + \frac{\rho v_{ij}'^2}{2} \xi_{ij}', \quad (8)$$

式中, Δp 为流体沿合流方向, 正向流过多级“Y”型流管时产生的压强损耗; Δp_{ij} 为流体在流经各级“Y”型流管时产生的合流压强损失, i 为整个流管中“Y”型流管的级数, j 为各级“Y”型流管的个数, 本文中 $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$; $\Delta p'_{ij-1}$ 为流体在流经各级“Y”型分叉处产生的分离流压强损失; ξ_{ij} 为各级“Y”型流管合流的流阻系数; ξ_{ij}' 为各级“Y”型流管分流的流阻系数; v_{ij} 为流体沿合流方向, 正向流过多级“Y”型流管时, 流经 i 级“Y”型流管, j 个“Y”型分叉角的平均流速; ρ 为流体密度。

根据公式(1)和(2), 可得:

$v_{11} = v_{21} = v_{22} = v_{31} = v_{32} = v_{33}$, 又由于整个流管的各个分岔角度一致, 故各级“Y”型流管的流阻系数相同, 则式(8)为:

$$\Delta p = \frac{\rho v_{11}^2}{2} (\xi_{11} + \xi_{21} + \xi_{22} + \xi'_{21} + \dots + \xi'_{ij} + \xi'_{ij-1}) = \frac{\rho v_{11}^2}{2} \left(\sum_{i=1}^j i \xi + \sum_{i=1}^{j-1} (i-1) \xi' \right). \quad (9)$$

同理, 当流体反向流动(分流)时, 整个流管的压强损耗表达式为:

$$\Delta p' = \frac{\rho v_{11}'^2}{2} \left(\sum_{i=1}^j i \xi' + \sum_{i=1}^{j-1} (i-1) \xi \right), \quad (10)$$

式中 $\Delta p'$ 为流体沿分流方向, 反向流过多级“Y”型流管时的压强损耗; v_{11}' 为流体沿分流方向, 反向流过多级“Y”型流管时的平均流速;

则流体沿合流和分流方向流动时, 总的流阻系数分别表达为:

$$\begin{cases} \xi_M = \sum_{i=1}^j i \xi + \sum_{i=1}^{j-1} (i-1) \xi' \\ \xi_D = \sum_{i=1}^j i \xi' + \sum_{i=1}^{j-1} (i-1) \xi \end{cases}. \quad (11)$$

式中 ξ_M 为流体沿合流方向, 正向流经整个流管时

的流阻系数; ξ_D 为流体沿分流方向,反向流经整个流管时的流阻系数;

根据文献[17],压电泵的流量可以近似表达为:

$$q_V = \Delta V f \frac{\xi_D - \xi_M}{2 + \xi_D + \xi_M}, \quad (12)$$

式中: q_V 为流量; f 为压电振子驱动频率。

ΔV 可表示为:

$$\begin{cases} \Delta V = V_{T/2} - V_0 \\ V_{T/2} = 2\pi \int_0^{2R} \omega(r, T/2) dr \\ V_0 = 2\pi \int_0^{2R} \omega(r, 0) dr \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\omega(r, 0), \omega(r, T/2)$ 为压电振子在 0 时刻和 $T/2$ 时刻的位移量; R 为压电振子半径。

由方程式(12)可知,当 $\xi_D - \xi_M \neq 0$ 时,泵的流量 $q_V \neq 0$,从而可以使流体在宏观上产生单一方向上的流动。

4 流场模拟仿真

本文对图 2 中流体流经的区域建立几何体,从而对多级“Y”型流管无阀压电泵的流场进行有限元分析。该模型中各级“Y”型分叉处夹角 $2\alpha = 60^\circ$, D 为泵腔直径,具体参数见表 1。

表 1 多级“Y”型流管无阀压电泵几何参数

Tab.1 Geometrical parameters of piezoelectric pump(mm)

几何参数	数值
a	4
h	2
l	10
D	48

如图 2 所示,当压电泵处于吸入状态时,与压电振子接触的流体面向下隆起,流体从泵腔两侧的多级“Y”型流管流入泵腔。当压电泵处于排出状态时,与压电振子接触的流体面向上隆起,流体由泵腔向其两侧的多级“Y”型流管流出。因此,在模拟仿真计算时,将泵腔两侧多级“Y”型流管的端面设为一个标准大气压,而在压电振子接触的液面上施加一个随频率变化的位移载荷。

图 4 为压电振子在一个周期内运动到 4 个特征位置时,多级“Y”型流管无阀压电泵中间面上

的速度流线图。

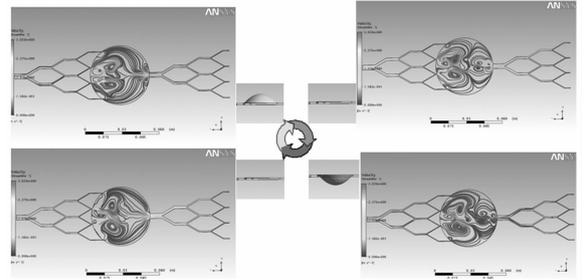


图 4 压电泵速度流线图

Fig.4 Velocity streamline pattern of piezoelectric pump

根据图 4 可知,在压电泵吸程和排程周期内,由泵腔两侧多级“Y”型流管流入和排出泵腔的流体流速不同。则在压电振子一个振动周期内,沿多级“Y”型流管分流方向流出泵腔的流体流量与沿合流方向流出的流量不等,从而在宏观上该泵具有单向传输作用。同时,由图 4 可得,随着与压电振子接触的流体面上上下下运动,泵腔内部形成了主动对流,从而产生了涡旋,这样更有利于混合搅拌。

由以上模拟结果可知:流体在流经多级“Y”型流管无阀压电泵时,经过多级“Y”型流管的分离和重新汇合,有效地扩大了流体间的接触面积。同时,泵腔中产生复杂漩涡流场,使进入泵腔的流体充分混合搅拌。这些特性为实现压电泵在流体输送时,完成两种及多种流体充分混合搅拌,实现泵和混合搅拌器的一体化提供了条件。

5 试验验证

图 5 所示为泵流量的测量试验示意图。图 6 为实际试作的多级“Y”型流管无阀压电泵样机的照片,其流管的几何参数和模拟计算参数一致。

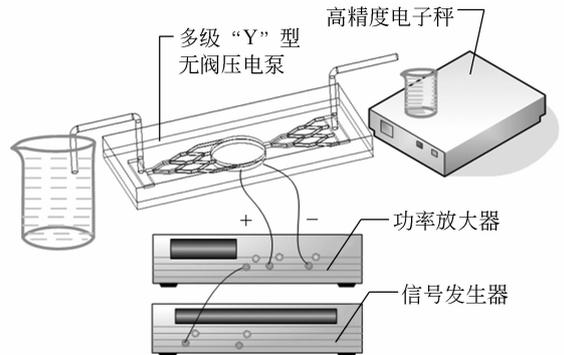


图 5 泵流量测量示意图

Fig.5 Schematic diagram of flow rate test experiment

其中,压电振子基底层材质为黄铜,其半径为 25 mm,厚度为 0.2 mm。压电陶瓷层半径为 15 mm,厚度为 0.2 mm。图 7 和图 8 分别为多级“Y”型流管无阀压电泵流量及背压试验照。试验驱动电压峰峰值为 100 V,采用的流体为去离子水,通过改变压电振子的驱动频率,来测量单位时间内压电泵的质量流,从而得出该压电泵在峰峰值为 100 V 的电压下,流量随频率变化曲线。试验结果如图 9 所示。

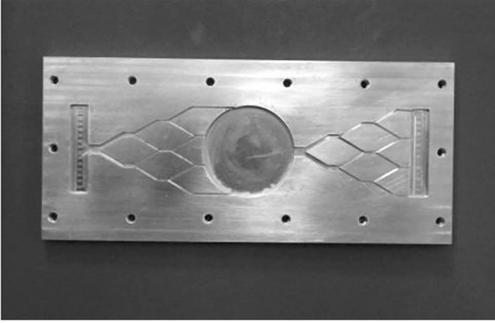


图 6 多级“Y”型无阀压电泵泵体

Fig. 6 Photograph of valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes

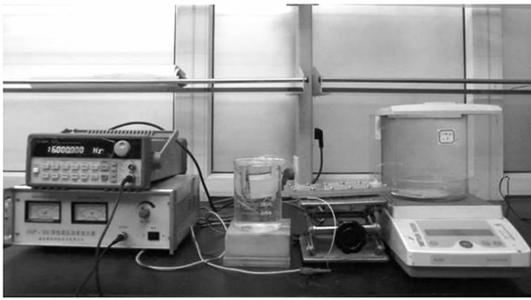


图 7 压电泵流量试验

Fig. 7 Set-up of flow rate experiment

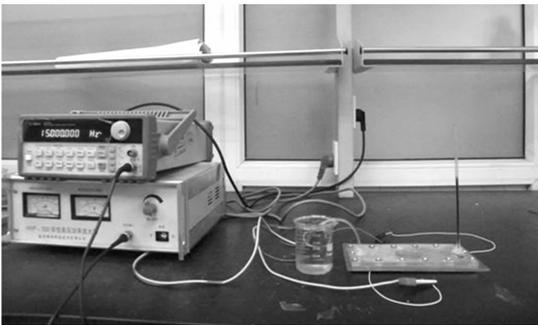


图 8 压电泵背压试验

Fig. 8 Experiment of back pressure

在频率为 16 Hz 时,该泵的流量达到最大为 16.2 ml/min。由图 9 可知,当压电振子驱动频率由 0 Hz 开始增加时,压电泵的流量随之增大;当频率达到 16 Hz 时,流量最大;之后随着频率的增加,流量开始减少。根据压电泵背压实验可得,当驱动电压峰峰值为 100 V,驱动频率为 14 Hz 时,该泵的输出背压达到最大约为 64 mmH₂O,结果如图 10 所示。

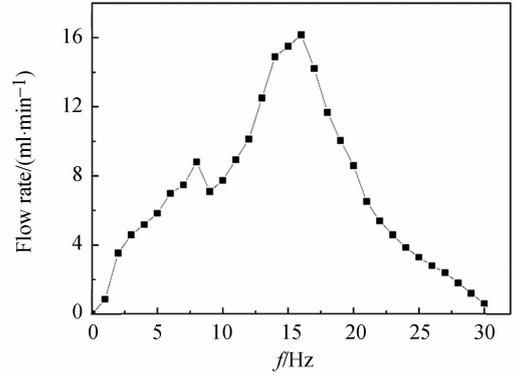


图 9 压电泵流量与频率曲线图

Fig. 9 Curve of flow rate vs driving frequency

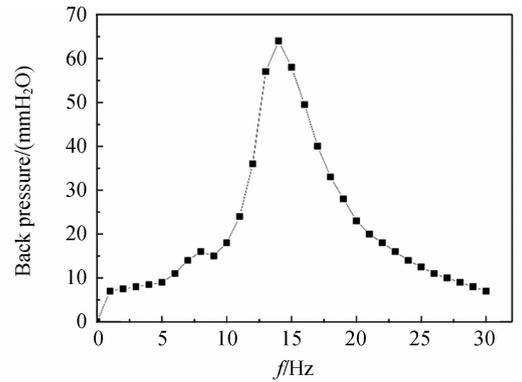


图 10 压电泵背压与频率曲线图

Fig. 10 Curve of back pressure vs driving frequency

该组试验表明了多级“Y”型流管无阀压电泵的有效性,证明了多级“Y”型流管具有正反向流动流阻不等的特性。

6 结 论

本文提出了一种多级“Y”型流管无阀压电泵。这种压电泵实现了集成液体输送与混合,使整体系统微小化成为可能;实现了集驱动与传动于一体、集传输与混合于一体的功能。

在分析了多级“Y”型流管无阀压电泵的工作原理及流管的流阻特性的基础上。采用有限元法对多级“Y”型流管无阀压电泵进行了流场模拟分析,得到了一个周期内多级“Y”型流管无阀压电泵的内部流场状况,仿真结果表明该泵具有单向传输作用;最后实际制作了多级“Y”型流管无阀

压电泵样机,并对该泵的流量及输出背压进行了测量。试验结果表明:当驱动电压峰峰值为100 V,驱动频率为16 Hz时,最大流量达到16.2 ml/min;当驱动电压峰峰值为100 V,驱动频率为14 Hz时,最大背压为64 mmH₂O。该组试验证明了该泵的有效性。

参考文献:

- [1] 林炳承,秦建华.微流控芯片实验室[M].北京:科学出版社,2006.
LIN B CH, QIN J H. *Laboratory on a Microfluidic Chip* [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [2] GOBBY D, ANGELI P, GAVRILIDIS A. Mixing characteristics of T-type microfluidic mixers [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2001, 11(2): 126-132.
- [3] JOHNSON T J, ROSS D, LOCASCIO L E. Rapid microfluidic mixing [J]. *Analytical Chemistry*, 2002, 74(1): 45-51.
- [4] STROOCK A D, DERTINGER S K W, AJDARI A, et al.. Chaotic mixer for microchannels [J]. *Science*, 2002, 295(5555): 647-651.
- [5] RIFE J C, BELL M I, HORWITZ J S, et al.. Miniature valveless ultrasonic pumps and mixers [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 86(1-2): 135-140.
- [6] YANG Z, MATSUMOTO S, GOTO H, et al.. Ultrasonic micromixer for microfluidic systems [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, 93(3): 266-272.
- [7] LU L H, RYU K S, LIU C. A magnetic micro-stirrer and array for microfluidic mixing [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(5): 462-469.
- [8] 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 Q X, ZHANG J H, LI H. Valveless piezoelectric pump with unsymmetrical slope chamber bottom [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 641-647. (in Chinese)
- [9] XIA Q X, ZHANG J H, LEI H, et al.. Analysis on flow field of the valveless piezoelectric pump with two inlets and one outlet and a rotating unsymmetrical slopes element [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 25(3): 474-483.
- [10] ZHANG J H, XIA Q X, HUANG Y, et al.. Theory and experimental verification of valveless piezoelectric pump with rotatable unsymmetrical slopes [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2011, 54(11): 3070-3077.
- [11] 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 J H, LI Y L, XIA Q X, et al.. Research on vibration and pump flow rate of valveless piezoelectric pump with Y-shape tubes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 922-929. (in Chinese)
- [12] 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 J H, LI Y L, LIU J Y, et al.. Simulation and experiment of valveless piezoelectric pump with Y-shape tubes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 669-675. (in Chinese)
- [13] FELDT C, CHEW L. Geometry-based macro-tool evaluation of non-moving-part valvular microchannels [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2002, 12: 662-669.
- [14] FRIED E, IDELCHIK I E. *Flow Resistance: A Design Guide for Engineers* [M]. New York: Hemisphere, 1989.
- [15] OKA K, NOZAKI T, ITO H. Energy losses due to combination flow at tees [J]. *Jap. Soc. Mech. Engrs Int. J.*, 1996, 39(3): 489-498.
- [16] 张也影.流体力学 [M].北京:高等教育出版社, 1999.
ZHANG Y Y. *Fluid Mechanics* [M]. Beijing:

Higher Education Press, 1999. (in Chinese)

- [17] 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 J H, WANG SH Y. A study of piezoelec-

tric valveless diffuser/nozzle-based fluid pump: one-way flow principle and the pump flow [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2001, 23(1):23-25. (in Chinese)

作者简介:



黄俊(1981—),男,安徽芜湖人,博士研究生,2006年于南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事压电型微流体作动器和流固耦合模拟仿真的研究。E-mail: huangjun551@nuaa.edu.cn



王守印(1956—),男,吉林长春人,研究员,1981年于长春光机学院获得学士学位,主要从事光电经纬仪光机结构总体设计方面的研究。E-mail: ciomp_wsy@yahoo.cn

导师简介:



张建辉(1963—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,2001年于日本山形大学获得博士学位,主要从事机械设计及理论和压电作动器的研究。E-mail: zhangjh@nuaa.edu.cn

(本栏目编辑:马健)

(版权所有 未经许可 不得转载)