

锥管坡面腔底无阀压电泵流场分析

张蕊华, 肖俊, 程玉晨, 吴启帆, 易健

(南昌大学机电工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要:针对坡面腔底无阀压电泵流量小的问题,提出并研制了一种锥管坡面腔底无阀压电泵,即将锥管与坡面腔底组合式新结构作为其无移动部件阀。首先,提出了锥管坡面腔底无阀压电泵结构并分析其工作原理,对泵流量进行理论分析;同时,运用 Fluent 软件的动网格功能对其内部流场模拟分析。仿真结果表明,该泵具有单向流动特性,在泵腔内部产生漩涡利于液体的混合搅拌。最后,加工制作了锥管坡面腔底无阀压电泵样机,并对该泵进行了流量试验。试验结果表明,驱动电压峰值为 250 V,频率为 5 Hz 时,最大流量为 25.9 mL/min,证明了锥管坡面腔底无阀压电泵的有效性。

关键词:无阀压电泵;锥管;坡面腔底;Fluent 动网格;混合搅拌;流量

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Analysis of Flow Field on Valveless Piezoelectric Pump With Taper Pipe Slopes Element

ZHANG Ruihua, XIAO Jun, CHENG Yuchen, WU Qifan, YI Jian

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Aiming at the small flow rate problem of valveless piezoelectric pump with slopes element, a structure of valveless piezoelectric pump with taper pipe slopes element is proposed and fabricated, that is, using the new combination structure of the taper pipe and slopes element as its non-mobile components of the valve. Firstly, the structure of valveless piezoelectric pump with taper pipe slopes element is designed and its working principle is analyzed, then its flow rate of the pump is analyzed theoretically. Meanwhile, the Fluent software and its dynamic grid function is employed in simulating the flow fields of the pump. The simulation results show that the pump has a function of unidirectional flow characteristics, and fluid swirl in favor of mixing liquid inside the pump chamber. Finally, we manufactured the valveless piezoelectric pump, and the experimental results shows that the maximum flow rate of the valveless pump with taper pipe slopes element is 25.9 mL/min at a driving power supply peak voltage of 250 V and frequency of 5 Hz. These results demonstrate the feasibility of the valveless piezoelectric pump with taper pipe slopes element.

Key words: valveless piezoelectric pump; taper pipe; slopes element; Fluent dynamic mesh; mixing; flow rate

0 引言

无阀压电泵是新型流体泵中一个重要分支,是利用压电材料的逆压电效应将电能转换为机械能的装置。压电振子在交变驱动电压作用下发生交变弯曲振动,导致其泵腔容积变化;利用无移动部件阀正、反流阻不等的特性使泵吸入、吐出流体流量不等,宏观上产生单向流动而实现输送流体的目的^[1]。与传统泵相比,无阀压电泵具有结构简单、能耗小、无电磁干扰及易微小型化等优点。自 Erik Stemme

等提出锥形流管无阀压电泵^[1-2]以来,越来越多的研究者投入到无阀压电泵的研究^[1-11]中。其主要无移动部件阀有收缩管/扩张管^[3]、双环管^[4-5]和“Y”型流管^[6-7]等,此类泵的非移动部件阀大多安装在泵腔外部,未考虑利用泵腔内部空间。黄毅等^[8]提出在泵腔内安装一系列非对称坡面嵌块,但输出流量较小,泵的输出效率较低。因此,本文提出一种锥管与非对称坡面楔块组合式结构,形成一种性能更优的集流体输送与混合搅拌于一体的锥管坡面腔底无阀压电泵。

收稿日期:2015-08-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50965014);浙江省自然科学基金资助项目(LY14E050002)

作者简介:张蕊华(1970-),女,黑龙江海林人,副教授,博士,主要从事金属橡胶技术、压电驱动技术及流体传动与控制等研究。

本文提出并研制了锥管坡面腔底无阀压电泵,首先分析其单向流动工作原理,并对其流量进行理论分析;同时,对泵腔内部流场进行数值仿真分析;最后对该泵进行泵流量试验,以证明锥管坡面腔底无阀压电泵的有效性。

1 泵的结构及工作原理

锥管坡面腔底无阀压电泵的结构如图1、2所示。主要由泵体、泵腔、一对同向布置的锥管(锥管A、B)、一组非对称坡面楔块、压电振子、上盖、压板和导管等组成。

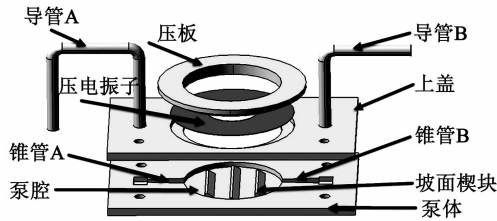


图1 锥管坡面腔底无阀压电泵

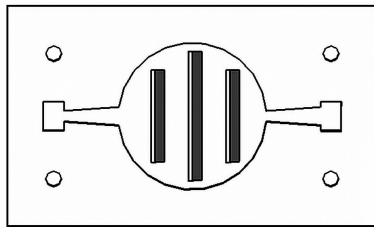


图2 泵体俯视图

无阀压电泵产生单向流动的实质是泵内正、反流流阻不等,本文提出的锥管坡面腔底无阀压电泵,通过一组非对称坡面楔块与一对同向布置的锥管的组合式结构以加大正、反流流阻的差值。本文定义流体从导管A端流向导管B端为正流方向,从导管B端流向导管A端为反流方向。

对压电振子施加周期性的交变驱动电压,压电振子产生周期性往复运动,泵腔内部体积变化,导致压强随之改变,继而流体同时吸入或排出泵腔。当压电振子向上运动时,泵腔内压强减小,流体吸入泵腔。由于流体正流时流经锥管A和坡面楔块组竖直迎流面时的总流阻小于反流时流经锥管B和坡面楔块组倾斜面时的总流阻,导致从A端流入泵腔的液体多于从B端流入的液体。当振子向下运动时,泵腔内压强增大,流体排出泵腔。此时,流体流经坡面楔块组倾斜面和锥管A的总流阻大于流体流经坡面楔块组合锥管B的总流阻,导致从A端流出泵腔的液体小于从B端流出的液体。因此宏观上形成了单向流动,具备泵的单向传输功能。

2 理论分析

压电振子在正弦驱动电压作用下做周期性上、下振动,当压电振子从平衡位置运动到最大位移 w_0 时,设压电振子半径为 R ,其变形类似于旋转抛物面^[9],在极坐标下该旋转抛物面方程为

$$w(r) = w_0(1 - r^2/R^2) \quad (1)$$

式中 r 为极坐标下振子上某一点到原点的距离。由此可得压电振子从平衡位置到最大位移时泵腔容积变化量为

$$\Delta V_{\max} = 2\pi \int_0^R w_0(1 - r^2/R^2)rdr = \pi w_0 R^2/2 \quad (2)$$

在锥管坡面腔底无阀压电泵中,流体从导管A端向导管B端流动为正流方向,从导管B端流向A端为反流方向。其正、反方向流动时的压强损失有如下关系^[10]:

$$\Delta p_z = \xi_z \rho v_z^2/2 \quad (3)$$

$$\Delta p_f = \xi_f \rho v_f^2/2 \quad (4)$$

式中: ξ_z 、 ξ_f 分别为正、反流压强损失系数; v_z 、 v_f 分别为正、反流平均速率; ρ 为流体密度。

泵工作时,设流体不可压缩,流体输入、输出口压力相等,即 $\Delta p_z = \Delta p_f = \Delta p$ 。由式(3)、(4)可推出正、反流平均速率,其中令 $\lambda = \sqrt{2\Delta p/\rho}$,则

$$v_z = \sqrt{\frac{2\Delta p_z}{\rho \xi_z}} = \lambda \xi_z^{-1/2} \quad (5)$$

$$v_f = \sqrt{\frac{2\Delta p_f}{\rho \xi_f}} = \lambda \xi_f^{-1/2} \quad (6)$$

由式(5)、(6)可计算出正、反流平均流量值分别为

$$\overline{Q}_z = S v_z \quad (7)$$

$$\overline{Q}_f = S v_f \quad (8)$$

式中 S 为流道横截面积。

当压电振子运动到最高点时,

$$\Delta V_{\max} = \overline{Q}_z + \overline{Q}_f = S \lambda (\xi_z^{-1/2} + \xi_f^{-1/2}) \quad (9)$$

由式(2)、(9)可解得

$$\lambda = \pi w_0 R^2 / [2S(\xi_z^{-1/2} + \xi_f^{-1/2})] \quad (10)$$

压电振子从最大位移处运动到平衡位置时,流体从导管A、B两端同时排出液体,排出的流量

$$\overline{Q} = \overline{Q}_z - \overline{Q}_f = S \lambda (\xi_z^{-1/2} - \xi_f^{-1/2}) \quad (11)$$

无阀压电泵在一个周期内总共有两次液体排出泵腔^[11]。当压电振子的驱动电压的频率为 f 时,该泵的输出流量为

$$Q = 2f \overline{Q} = \pi w_0 R^2 f \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \quad (12)$$

式中 $\xi = \sqrt{\xi_t/\xi_z}$ 。

分析式(12)可知,只要 $\xi_z < \xi_t$,即正流流阻小于反流流阻,则 $\xi \geq 1, Q > 0$,流体从导管 A 端吸入液体,导管 B 端排出液体。

3 流场模拟分析

对锥管坡面腔底无阀压电泵工作时其内部流场变化情况进行模拟分析,将图 1 所示的压电泵进行简化,提取出流体所流经的区域,建立封闭几何实体,并建立其对应的有限元模型,如图 3 所示。

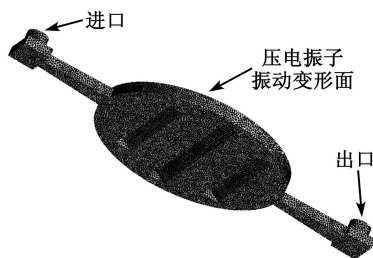


图 3 锥管坡面腔底无阀压电泵有限元模型

泵腔直径为 $\varnothing 40$ mm,泵腔高为 2 mm。一组坡面楔块长度分别为 25 mm、35 mm、25 mm,坡度均为 30° ,间距均为 6.5 mm。同向布置的一对锥管小端长为 3 mm,大端长为 5 mm,两端直线距离为 14.6 mm。进、出口面直径均为 $\varnothing 5$ mm。

运用 Fluent 商用软件模拟泵腔内部流场变化情况^[8],选用 RNG $\kappa \sim \epsilon$ 湍流模型,工作介质为水,温度 20°C ,其密度为 998.2 kg/m^3 ,动力黏度为 $0.001\text{ 003 kg/m}\cdot\text{s}$,进、出口分别设为压力入口和压力出口,均定为 101.325 kPa 。因对压电振子施加驱动电压后产生类似旋转抛物面的变形,即为压电振子变形面采用 Fluent 动网格技术中用户自定义函数(UDF)将其在 z 方向的变形加载到压电振子振动变形面上。

图 4 为选取锥管坡面腔底无阀压电泵泵腔内一等高面的速度迹线图,同时选取压电振子 4 个特殊时刻作为观测泵腔内迹线的时间点。

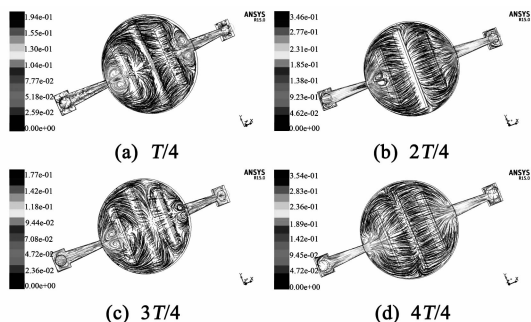


图 4 泵腔内速度迹线图

由图 4 可知,在 $0 \sim T/4$ 时刻内压电振子从平衡位置向上运动至最高点,进、出口面同时吸入流体; $T/4 \sim 3T/4$ 时刻内压电振子从最高点向下运动经平衡位置至最低点,进、出口面同时排出流体; $3T/4 \sim T$ 时刻内压电振子从最低点回到平衡位置,进、出口同时吸入流体。流体同时吸入或排出泵腔时流速不等,验证了该泵正、反流阻不等的特性。流体流入、流出泵腔时在锥管与坡面楔块之间形成大漩涡,利于泵腔内的流体更充分地混合搅拌,为输送且需混合搅拌的流体或药物提供一种可能。该泵集传输与混合搅拌功能于一体,一定程度上拓展了无阀压电泵的应用范围。

图 5、6 为 5 个周期内对其进、出口面进行质量流量监测曲线。

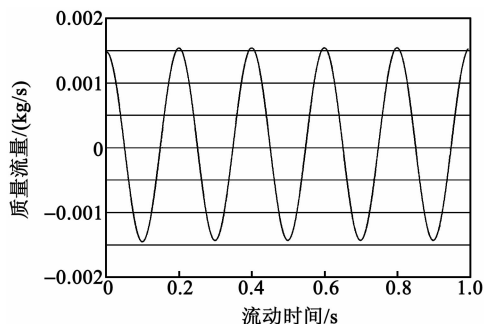


图 5 5 个周期内进口面质量流量监测曲线

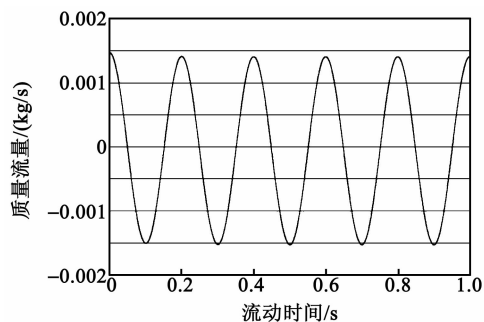


图 6 5 个周期内出口面质量流量监测曲线

由图 5、6 可知,在压电泵工作的一个周期内,流体流经进、出口面的流量不等,同时吸入液体时进口面流入流量大于出口面流入流量,而同时排出液体时进口面流出流量小于出口面流出流量。因此,一个周期内宏观上形成了单向流动,表明该泵具有单向传输流体作用。

4 试验验证

为了验证锥管坡面腔底无阀压电泵的有效性,实际加工制作了泵的样机,其几何尺寸参数与仿真模拟计算参数一致。泵样机如图 7 所示。

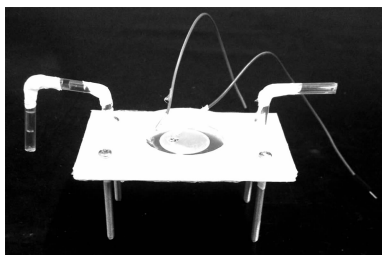


图7 锥管坡面腔底无阀压电泵样机

压电振子基底层材料为黄铜,直径为 $\varnothing 25$ mm,厚为0.2 mm。压电陶瓷层直径为 $\varnothing 25$ mm,厚为0.2 mm。图8为锥管坡面腔底无阀压电泵的流量试验图。试验中,正弦交流驱动电压峰值为250 V,流体为去离子水,测量单位时间内压电泵的质量流量随频率变化的曲线,如图9所示。

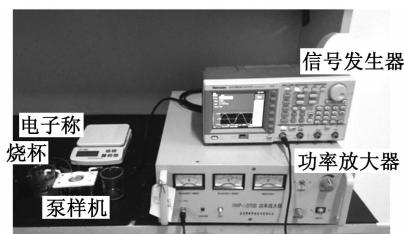


图8 锥管坡面腔底无阀压电泵流量试验

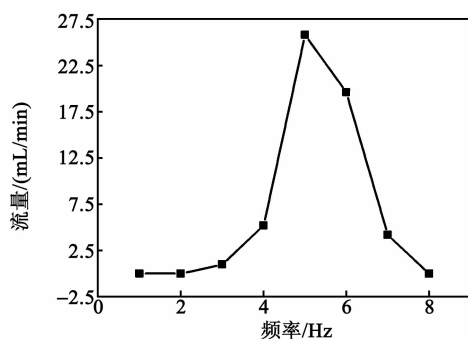


图9 压电泵流量与频率曲线图

由图9可知,当驱动频率由2 Hz开始增加时,压电泵的流量随之增大;当频率达到5 Hz时,输出最大流量值为25.9 mL/min;之后随着频率的增加,流量开始逐步减小,当驱动频率为8 Hz时,该压电泵已基本无输出流量。试验表明了锥管坡面腔底无阀压电泵的有效性,具有单向传输流体的功能。

5 结束语

本文提出了一种锥管坡面腔底无阀压电泵。将锥管与坡面腔底的组合式新结构以加大正、反流阻差值,提高泵的输出流量特性。该泵结构简单,易加工,具有单向传输和混合搅拌的功能。

在对锥管坡面腔底无阀压电泵的工作原理及泵流量理论分析的基础上,采用商用软件 Fluent 对泵

腔内部流场变化情况进行模拟仿真。仿真结果表明,该泵具有正、反流阻不等的特性,有单向传输流体的功能,且锥管与坡面楔块之间形成漩涡利于液体混合搅拌。最后实际制作了锥管坡面腔底无阀压电泵样机,并对该泵进行了流量试验。试验结果表明,驱动电压峰值为250 V,驱动频率为5 Hz时,该压电泵最大流量为25.9 mL/min。试验验证了锥管坡面腔底无阀压电泵的有效性。

参考文献:

- [1] ERIK S, GÖRAN S. A valve-less diffuser/nozzle-based fluid pump[J]. Sensors and Actuators, 1993, 39(12): 159-167.
- [2] GERLACH T. Micro diffusers as dynamic passive valves for micropump applications[J]. Sensors and Actuators A, 1998, 69: 181-191.
- [3] 李军,吴博达,程光明,等.收缩管/扩张管无阀压电泵的工作原理[J].压电与声光,2000,22(6): 376-378.
LI Jun, WU Boda, CHENG Guangming, et al. The principle of diffuser/nozzle-based valveless piezoelectric pump[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2000, 22(6): 376-378.
- [4] FORSTER F K, RONALD L B, MARTIN A A, et al. Design, fabrication and testing of fixed-valve micro-pumps[J]. Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division, 1995, 234: 39-44.
- [5] FORSTER F K, BARDELL R L, BLANCHARD A P, et al. Micropumps with fixed valves; US, 5876187[P]. 1999-06-03.
- [6] 张建辉,黎毅力,刘菊银,等.“Y”形流管无阀压电泵模拟与实验[J].光学精密工程,2008,16(4): 669-675.
ZHANG Jianhui, LI Yili, LIU Juyin, et al. Simulation and experiment of valves piezoelectric pump with Y-shape tubes[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4): 669-675.
- [7] 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 Shouying. Theory and experimental verification on valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 423-430.
- [8] 黄毅,成伟,张建辉,等.非对称坡面腔底无阀压电泵流场分析[J].振动、测试与诊断,2010,30(3): 295-299.
HUANG Yi, CHENG Wei, ZHANG Jianhui, et al. Analysis of flow field of piezoelectric pump with unsymmetrical slopes element[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(3): 295-299.

(下转第397页)