

半球缺阻流体无阀压电泵流场分析

曹炳鑫¹, 张建辉¹, 陈道根¹, 纪晶^{1,2}

(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. 青岛农业大学机电工程学院, 山东青岛 266109)

摘要:为使半球缺阻流体无阀压电泵在医疗、保健、航空航天等领域得到更好的应用,需对半球缺阻流体无阀压电泵的工作特性进行相关的研究分析。该文首先对半球缺阻流体无阀压电泵的结构和工作原理进行了分析,并对泵内流阻特性进行理论分析;同时,采用有限元软件对半球缺阻流体无阀压电泵内部流场进行了模拟分析,结果表明,泵内流体正反向流时的流速随半球缺半径的增大呈递减趋势,泵腔内部的压强变化平缓。实际加工了样泵及多组不同半径的半球缺组并进行了实验,结果表明,泵的最大输出流量随半球缺半径增大而减小,在工作电压为150 V,半球缺半径为4.0 mm时,泵的最大输出流量值为121.4 mL/min,验证了半球缺能作为无阀压电泵的无移动部件阀及半球缺阻流体无阀压电泵的有效性。

关键词:无阀;压电泵;半球缺;流场;有限元法

中图分类号:TM282;TH38;TH384

文献标识码:A

Analysis of Flow Field of the Valve-less Piezoelectric Pump with Hemisphere-segment Bluff-body

CAO Bingxin¹, ZHANG Jianhui¹, CHEN Daogen¹, JI Jing^{1,2}

(1. State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: In order to make the valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body meet well with the needs in such areas as medical treatment and aeronautics and astronautics, the performance of this pump needs to be analyzed. Firstly, the structure and working principle of valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body are introduced. Secondly, the flow resistance of the pump is analyzed theoretically. A simulation analysis of the flow field of this pump is carried out by using the finite method. From the result of simulation, we can found that during the positive and negative direction the fluid's velocity decrease with increasing hemisphere of radius, and the amplitude of variation of pressure in the chamber is gentle. Finally we manufactured a sample pump and some series of hemisphere-segment bluff-body with different radius. The experiment results show that the maximum output flow rate decreases with increasing hemisphere of radius, and the maximum output flow rate is 121.4 mL/min when the radius of the hemisphere-segment bluff-body is 4.0 mm and the voltage is 150 V. These results demonstrate the hemisphere-segment bluff-body can be used as no-moving-parts valve, and the feasibility of this pump.

Key words: valve-less; piezoelectric pump; hemisphere-segment bluff-body; flow field; finite element method

0 引言

无阀压电泵依靠其自身特殊结构的无移动部件迫使泵腔内的流体产生单向流动,从而实现泵送流体的功效,克服了有阀压电泵存在的泵阀滞后性^[1],同时减小了阀体的能量消耗,故无移动部件阀

的结构对无阀压电泵的工作性能具有较大影响。然而,现有泵用的无移动部件阀要么结构复杂不利于加工制作,在泵送液体过程中产生大涡旋不利于药物的输送,要么将其无移动部件阀置于泵腔两端,阻碍了泵的微型化^[2]。这些问题的存在在一定程度上

收稿日期:2013-08-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075201,51205193),国家自然科学基金重大研究计划基金资助项目(91223201)

作者简介:曹炳鑫(1988-),男,江西九江人,硕士生,主要从事微型泵的结构设计及优化分析。张建辉(1963-),男,江苏南京人,博士生导师,主要从事压电陶瓷在流体机械方面的应用研究。

制约了无阀压电泵在医学、保健、航空航天等领域的应用^[3-5]。

针对解决无阀压电泵所存在的上述问题,发明了一种阻流体阻流无阀压电泵^[6],在泵腔内部安装一个由多个相同几何特性的半球缺构成的半球缺组,当泵工作时半球缺组相当于无移动部件阀迫使流体产生单向流动。该种阻流体阻流无阀压电泵一方面将无移动部件阀安装于泵腔的内部,使该泵结构简单、易于微型化,另一方面采用半球缺组作为泵的无移动部件阀,增大了泵工作时正反向流产生的流阻差大,使泵的单向流动特性明显,输出流量大,同时工作时不会产生局部大涡旋。

为了获得半球缺阻流体无阀压电泵的相关特性,更好地应用于各个领域,本文首先对泵内部流阻特性建立了一组相关的理论分析,同时采用有限分析法对泵腔内部流场进行了模拟分析,最后通过实验验证了泵的可行性。

1 泵的结构及工作原理

图 1 为半球缺阻流体无阀压电泵的结构图。在泵腔内部设有一半球缺组作为该种无阀泵的无移动部件阀,半球缺组由 5 个几何参数相同的半球缺构成且呈相同的姿态均布于泵腔,整泵主要由泵盖、泵体、压电双晶片、半球缺组、流管等组成,其中半球缺为 1/4 球,具有 1/2 圆形迎流面和 1/4 球形迎流面。

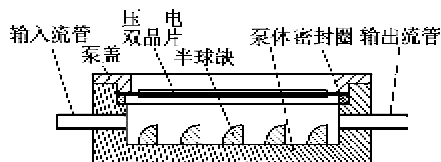


图 1 半球缺阻流体无阀压电泵的结构示意图

当给压电振子施加交变驱动电压时,压电振子作往复振动,从而引起泵腔内部的体积、压强发生周期性变化。流体从泵腔左、右两端的流管流入、流出泵腔时,由于半球缺阻流体两迎流面的结构不同,流经其两迎流面的流体所受流动阻力不等,在泵腔两端产生流量差,从而在宏观上实现流体的单向流动,达到泵送流体的功能。

2 理论分析

当正弦驱动电压作用于压电振子时,压电振子做周期性往复运动,从而带动泵腔内部压强周期性的增大与减小,流体从泵腔两端流管流入、流出泵腔。定义流体先上行流经半球缺的 1/4 球形迎流

面,再下行流经半球缺的 1/2 圆形迎流面的过程为流体运动的正向流动。根据 singhal 等的无阀泵正反向流动压强损失理论^[7]可知,损失压强 P 与流体的流阻系数 ξ 、流速 v 、密度 ρ 存在如下关系:

$$P = \xi \rho v^2 / 2 \quad (1)$$

故流体正向流动时整泵所受正向压强损失量为

$$\Delta P_p = \Delta P_{p1} + \Delta P_{n1} + \Delta P_{p2} + \Delta P_{n2} + \dots +$$

$$\Delta P_{pi} + \Delta P_{ni} = \sum_{i=1}^n (\Delta P_{pi} + \Delta P_{ni}) \quad (2)$$

式中: ΔP_{pi} 为流体流经第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 个 1/4 球形迎流面时压强损失量; ΔP_{ni} 为流体流经第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 个 1/2 圆形迎流面时压强损失量。结合式(1)可得

$$\Delta P_p = \sum_{i=1}^n (\Delta P_{pi} + \Delta P_{ni}) = \frac{\rho v^2}{2} \sum_{i=1}^n (\xi_{pi} + \xi_{ni}) \quad (3)$$

式中: ξ_{pi} 为第 i 个 1/4 球形迎流面的流阻系数; ξ_{ni} 为第 i 个 1/2 圆形迎流面的流阻系数。

同理,当流体反向流时,即先上行流经 1/2 圆形迎流面,再下行流经 1/4 球形迎流面,此时的泵腔内部反向压强损失为

$$\Delta P_n = \sum_{i=1}^n (\Delta \tilde{P}_{pi} + \Delta \tilde{P}_{ni}) = \frac{\rho v^2}{2} \sum_{i=1}^n (\tilde{\xi}_{pi} + \tilde{\xi}_{ni}) \quad (4)$$

在此设流体正向流时所受总流阻系数为 ξ_{ps} , 流体反向流时所受到的总流阻系数为 ξ_{ns} 综合式(3)、(4)可知

$$\begin{cases} \xi_{ps} = \sum_{i=1}^n (\xi_{pi} + \xi_{ni}) \\ \xi_{ns} = \sum_{i=1}^n (\tilde{\xi}_{pi} + \tilde{\xi}_{ni}) \end{cases} \quad (5)$$

依据文献[8]可知泵的流量 Q 与压电振子的振动频率 f 之间的关系可近似表示为

$$Q = \Delta V f \frac{\xi_{ps} - \xi_{ns}}{2 + \xi_{ps} + \xi_{ns}} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta V = V_{t_0/2} - V_0 \\ V_{t_0/2} = 2\pi \int_0^{2R} \omega(r, t_0/2) dr \\ V_0 = 2\pi \int_0^{2R} \omega(r, 0) dr \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\omega(r, 0)$, $\omega(r, t_0/2)$ 分别是半径为 R 的压电振子在 0 时刻和 $t_0/2$ 时刻的位移量; V 为泵腔体积。

由式(7)可知,只要满足 $\xi_{ps} - \xi_{ns} \neq 0$, 即泵正反向流时的总流动阻力系数不等,泵就具有一定的输出流量 Q , 从而实现流体的单向流动,达到泵送流

体的功能。

3 泵内流场模拟分析

3.1 有限元建模及边界条件

本文采用 Fluent 软件对半球缺阻流体无阀压电泵的内部流场进行模拟分析,为了研究不同半径大小的半球缺对泵的流场特性的影响,针对流体流经泵腔内的区域建立有限元模型,在模拟过程中采用流体介质为液态水,在一个标准大气压下,其 ρ 为 998.2 kg/m^3 ,动力粘度系数为 $0.001 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$,输入、输出口分别设为压力入口和压力出口。同时改变泵腔内部的半球缺半径大小,使其在 $4.0 \sim 6.0 \text{ mm}$ 间变化,图 2 为 $R=5.0 \text{ mm}$ 的半球缺阻流体无阀压电泵内部流场有限元模型。

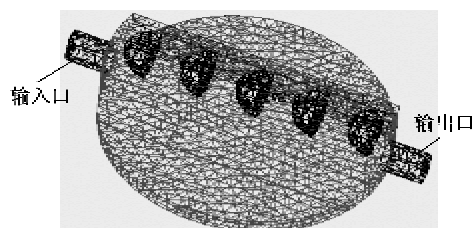


图 2 半球缺阻流体无阀压电泵的有限元模型

3.2 泵内流速变化规律

图 3、4 为泵正反向流及 $R=4.0 \text{ mm}$ 、 5.0 mm 、 6.0 mm 时泵内流速模拟结果。为了清晰地观察泵腔内部速度场的变化,取泵腔中的一等高面作为研究面。

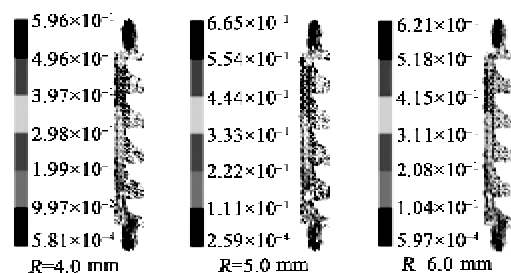


图 3 不同半径的半球缺下泵正向流流速模拟结果

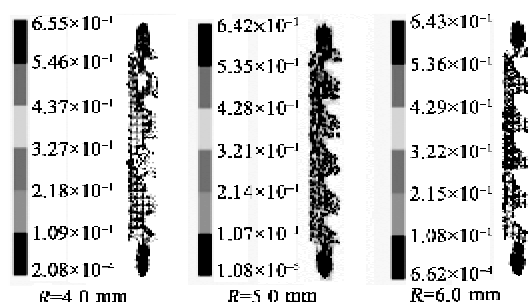


图 4 不同半径的半球缺下泵反向流流速模拟结果

由图 3 可知,泵腔内流体的流速沿半球缺分布

方向呈减小的趋势,减速平缓,且随着半球缺半径的增大,流速减小趋势越平缓,同时半球缺与半球缺之间形成涡旋,其中第一半球缺与第二个半球缺之间形成的涡旋最大。分析图 4 可知,反向流时泵腔内流体的流速同样存在沿半球缺分布方向呈减小的趋势。综合分析图 3、4 可知,半球缺 $1/2$ 圆面对液体的阻力大于半球缺 $1/4$ 球表面对液体的阻力,且不同半径的半球缺对流经其流体所产生的流动阻力不等,半径越大的半球缺其正反向流时的流阻差越小,表明了半球缺阻流体无阀压电泵具有正反向流阻不等的特性,进一步论证了半球缺无移动部件阀的可行性。

3.3 泵内压强变化规律

为了分析半球缺阻流体无阀压电泵内部压强的变化规律,对 $R=4.0 \text{ mm}$ 、 5.0 mm 、 6.0 mm 的半球缺无阀压电泵内的压强进行了模拟,为了观察泵腔内部压强的变化取泵腔中的一等高面作为研究面,如图 5、6 所示。

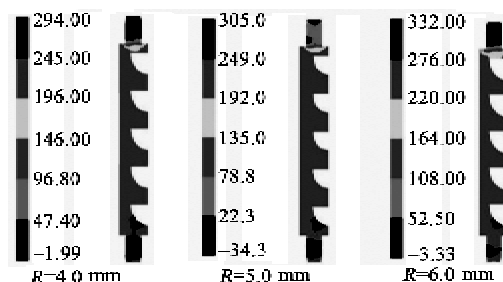


图 5 不同半径的半球缺下泵正向流压强模拟结果

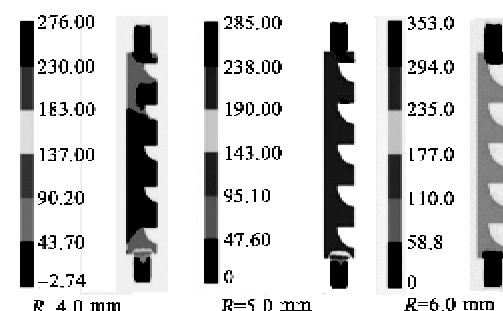


图 6 不同半径的半球缺下泵反向流压强模拟结果

通过对比分析图 5、6 可知,泵正向流时的压强变化趋势比反向流时压强变化平缓,在样泵的输入口与输出口两端口压强变化较大,在泵腔中间部位压强基本保持不变,且无论是正向流还是反向流泵腔内的压强变化随半球缺的半径增大而趋于平缓。因此,在研究半球缺阻流体无阀压电泵正反向流压强变化规律的过程中,应着重考虑该泵的输入口与

输出口端的压强变化。

4 实验研究

为了研究泵的特性,实际加工了如图 7 所示的半球缺阻流体无阀压电泵样泵,并针对该样泵进行流量实验。



图 7 半球缺阻流体无阀压电泵样泵

图 8 为工作电压 150 V 下样泵的最大输出流量 Q_s 随 R 变化曲线。由图可知,样泵的输出流量随 R 增大总体上呈递减曲线,与仿真结论一致。在 $R=4.0$ mm 时,泵的输出流量达到最大值(121.4 mL/min),进一步论证了该种泵的可行性,说明了 R 的大小对泵的输出流量具有较大的影响。

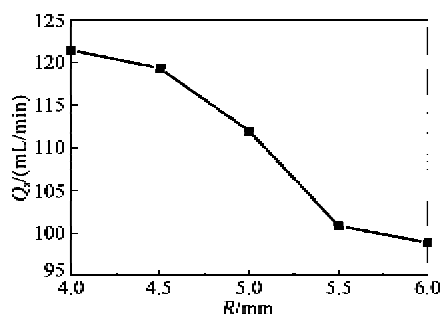


图 8 Q_s 与 R 的实验结果

5 结论

1) 分析了半球缺阻流体无阀压电泵的结构及工作原理,建立泵流量分析公式。

2) 采用有限元法模拟分析半球缺阻流体无阀压电泵内部流场特性,模拟结果表明,泵内流体正、反向流时的流速随半球缺半径的增大呈递减趋势,泵腔内部的压强变化平缓,正、反向流时流体所受到的来自半球缺组的流动阻流不等,验证了半球缺无移动部件阀的有效性。

3) 实际加工制作了实验样泵,并对样泵进行了

相关的实验研究,结果表明,半球缺阻流体无阀压电泵的最大输出流量随半球缺半径的增大呈递减趋势变化。

参考文献:

- [1] 张建辉,王大康. 压电泵的研究——泵阀的滞后性[J]. 机械工程学报,2003,39(5):107-110.
ZHANG Jianhui, WANG Dakang. Research on piezoelectric pump-lagging of valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5): 107-110.
- [2] 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,2003,14(4):641-647.
XIA Qixiao, ZHANG Jianhui, LI Hong. Valveless piezoelectric pump with unsymmetrical slope chamber bottom[J]. Opt Precision Eng, 2006, 14(4): 641-647.
- [3] STEMME E, STEMME G. A valve-less diffuser/nozzle-based fluid pump[J]. Sensor and Actuator A, 1993, 39(12):159-176.
- [4] GERLACH T. Microdiffusers as dynamic passive valves for micropump applications[J]. Sensor and Actuator A, 1998, 69(12):181-191.
- [5] 贺琳,纪秀,郑文,等. 新型金属阀在小型压电泵中的应用[J]. 压电与声光,2011,33(1):72-76.
HE Lin, JI Xiu, ZHENG Wen, et al. Application of new type of metal check valve to compact piezoelectric pump[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(1): 72-76.
- [6] 纪晶. 阻流体阻流无阀压电泵: 中国专利, ZL2012-10396143. X[P]. 2012-10-18.
- [7] 程光明,杨志刚,曾平. 压电泵腔体积变化量研究[J]. 中国机械工程,1998,20(6):389-392.
CHENG Guangming, YANG Zhigang, ZENG Ping. Research on the cavity volume fluctuations of piezoelectric pump[J]. Chinese Mechanic Engineer, 1998, 20(6): 389-392.
- [8] 张建辉,王守印. 压电锥形流管无阀压电泵的研究——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. A study of piezoelectric valveless diffuser/nozzle-based fluid pump: one-way flow principle and the pump flow[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2001, 23(1): 23-25.