排灌机械工程学报 2010年11月 Nov. 2010 第28卷 第6期 Vol. 28 No. 6
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

三通全扩散/收缩管无阀压电泵的流阻性能

何秀华，王 健，杨 嵩，毕雨时，禚虹彩
（江苏大学 能源与动力工程学院，江苏 镇江 212013）

摘 要：针对传统扩散/收缩管无阀压电泵效率低的不足，提出一种新型三通全扩散/收缩管无阀压电泵. 为了寻求新型三通全扩散/收缩管流管的最佳几何尺寸参数，在有限元仿真试验方法的基础上，将新型三通全扩散/收缩管与传统扩散/收缩管进行性能对比分析. 分别改变三通全扩散/收缩管的分流锥管长度 L_2、分流锥管夹角 φ、分流锥管的锥角 θ_2 和分流锥管宽度 b_2，研究分流锥管结构参数对三通全扩散/收缩管流阻特性的影响. 结果表明，相对于传统扩散/收缩管，三通全扩散/收缩管的反向流阻系数与正向流阻系数之比 λ 在较高雷诺数下大于传统扩散/收缩管，可提高无阀压电泵的效率；在不同雷诺数流动下，三通全扩散/收缩管的最优结构参数相差较大，设计时必须要根据实际工况选用合适的结构参数.

关键词：无阀压电泵；三通全扩散/收缩管；数值模拟；流阻特性；优化设计
中图分类号：S277.9；TH38 **文献标志码**：A **文章编号**：1674-8530(2010)06-0497-05

Flow resistance characteristics of valveless piezoelectric pump with three-way diffuser/nozzle tube

He Xiuhua, Wang Jian, Yang Song, Bi Yushi, Zhuo Hongcai
(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: For the disadvantage of inefficient of the traditional diffuser/nozzle-based valveless piezoelectric pumps, a new type of valveless piezoelectric pump with three-way diffuser/nozzle tube was proposed through the advanced design by analyzing the flow characteristics of the traditional diffuser/nozzle tube. Based on the numerical simulation, the three-way diffuser/nozzle tube and traditional diffuser/nozzle tube was compared. The effects of the flow resistance property of the three-way tube was analyzed by changing the structural parameters of the shunts, including the length L_2, the angle φ, the cone angle θ_2 and the width b_2 of the shunts. Compared with the traditional tube, the results show that the λ which is the ratio of the reverse flow resistance coefficient to forward flow resistance coefficient as a function of Reynolds number, is higher under high Reynolds number. So the efficiency of the valveless piezoelectric can be increased. The optimum structural parameters of the three-way diffuser/nozzle tube differ greatly under different Reynolds number. The appropriate structural parameters should be chosen according to the actual working condition when designing.

Key words: valveless piezoelectric pump; three-way diffuser/nozzle tube; numerical simulation; flow resistance; optimal design

收稿日期：2010-03-31
基金项目：江苏省高校自然科学研究计划项目(04KJB470026)
作者简介：何秀华(1961—)，女，四川成都人，副教授(zddeng@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械内部流动及性能的研究.
王 健(1987—)，男，江苏泰州人，硕士研究生(arieskin@126.com)，主要从事流体机械内部流动及性能的研究.

万方数据

无阀压电泵是利用压电振子的往复运动和特殊流管正反向流阻不同的特性实现流体定向输送的，其泵腔内无可动阀体结构，易于微型化，可用作微流体系统的流体驱动部件，具有广泛的应用前景[1-3].

最早开发出的无阀压电泵为扩散/收缩管无阀压电泵[4]，该结构泵在过去的十几年里已经被广泛的研究和应用，但由于扩散/收缩管正反向流阻相差较小，造成扩散/收缩管无阀压电泵效率偏低，限制了其应用范围. 管体结构的流阻特性很大程度上决定了压电泵的性能，为了提高无阀压电泵的效率，对传统扩散/收缩管进行了改进设计，作者提出新型三通全扩散/收缩管，并利用 CFD 技术进行数值模拟和对三通全扩散/收缩管和传统扩散/收缩管中的流动进行对比分析，研究三通全扩散/收缩管结构对其流阻性能的影响.

1 新型无阀压电泵及其流管结构

1.1 新型无阀压电泵结构

设计的三通全扩散/收缩管无阀压电泵为平板式结构，易于 MEMS 加工，其结构如图 1 所示，由压电振子、泵体、泵盖组成，其通道与腔体结构可用 MEMS 技术在泵体表面加工而成. 三通全扩散/收缩管无阀压电泵的工作原理和传统扩散/收缩管无阀压电泵类似，当压电振子上下振动时，泵腔容积发生变化，从而将流体由进口向出口输出.

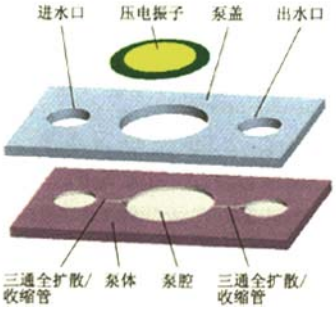

图 1 三通全扩散/收缩压电泵结构图

Fig. 1 Stuctual drawing of valveless piezoelectric pump with three-way diffuser/nozzle tube

1.2 三通全扩散/收缩管结构

图 2 为三通全扩散/收缩管结构示意图. 该管由一个锥形汇流管与两个锥形分流管组成，其结构与传统扩散/收缩管相比多出两个锥形分流管，两种流管的扩散方向流动损失较小，收缩方向流动损失大. 设流动损失小的方向为正向，流动损失大的方向为反向，其流动的正向和反向如图 2 所示.

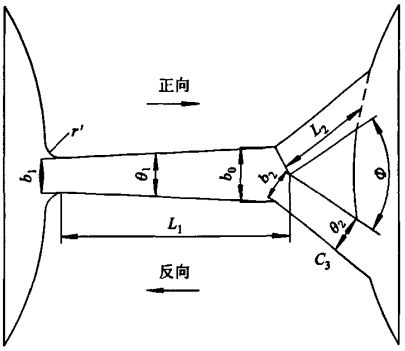

图 2 三通全扩散/收缩管结构示意图

Fig. 2 Schematic of three-way diffuser/nozzle tube

2 流阻系数比

无阀压电泵利用了特殊流管正反向流阻不同的特性. 为了衡量流管正反向流阻的不对称性，提出流管流阻系数比 λ，该系数为反向流阻系数与正向流阻系数之比[5]，计算式为

$$\lambda = \frac{\xi_f}{\xi_z}, \tag{1}$$

式中 ξ_f 为反向流阻系数；ξ_z 为正向流阻系数. 其计算式为

$$\xi_f = \frac{2\Delta p_f}{\rho v_f^2}, \tag{2}$$

$$\xi_z = \frac{2\Delta p_z}{\rho v_z^2}, \tag{3}$$

式中 Δp_f 为流管两端的反向流动压差；Δp_z 为流管两端的正向流动压差；v_f 为流管最小截面的反向流动速度；v_z 为流管最小截面的正向流动速度.

λ 反映了流管流动时其正反向流阻的不对称特性. λ 值越大，流管的正反向流阻差别越大，无阀压电泵的效率越高.

当正反向流动雷诺数相同即 $v_f = v_z$ 时，将式(2)和式(3)代入式(1)，可得同雷诺数下的流管流阻系数计算式为

$$\lambda = \frac{\Delta p_f}{\Delta p_z}. \tag{4}$$

3 两种流管的数值模拟及对比分析

3.1 模型建立与参数设置

三通全扩散 / 收缩管的结构参数如图 2 所示.

万方数据

参考一些传统扩散/收缩管结构与性能研究的文献[6-8],选取传统扩散/收缩管结构参数为:流管长度 $L = 1\ 200\ \mu m$,流管最小截面 $b = 80\ \mu m$,锥角 $\theta = 7°$,管口圆角 $r = 40\ \mu m$;三通全扩散/收缩管的汇流管结构参数与传统扩散/收缩管结构参数相同,设置 $L_1 = L, b_1 = b, \theta_1 = \theta$ 和 $r' = r$;设置分流锥管结构参数为:分流锥管长度 $L_2 = 400\ \mu m$,分流锥管最小正截面宽度 b_2 为汇流管最大正截面宽度 b_0 的一半,即 $b_2 = 113.7\ \mu m$,分流锥管锥角 θ_2 为汇流管锥角的一半,即 $\theta_2 = 3.5°$,两分流锥管夹角 $\varphi = 90°$,两流管深度都为 80 μm.

两种流管都是对称结构且其流动也对称,所以只需建立一半模型并在对称面上加载对称边界条件.选用结构网格对模型进行网格划分,其中三通全扩散/收缩管的计算区域网格如图3所示.利用CFD软件对两种流管在不同雷诺数 Re 下的正反向稳态流动进行模拟[9],进口加载速度边界条件,出口为自由出流,流动介质为不可压缩的水.选取的流动雷诺数范围设为0到2 000之间,通过文献[10]可估计出流管中流体流动的转捩雷诺数在450~600,所以流动大都处于湍流状态,选用SST湍流模型.

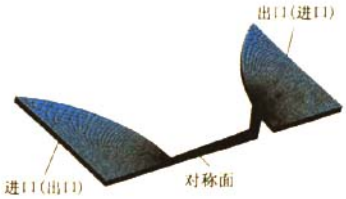

图3 三通全扩散/收缩管的计算区域网格
Fig. 3 Grid of calculation extent

3.2 结果分析

利用CFD软件进行数值模拟可得到两种流管在不同雷诺数下流动的正反向压差曲线如图4所示.

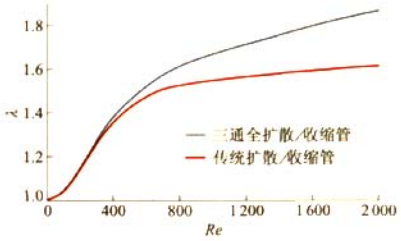

图4 两种流管在不同雷诺数下流动的压差比较
Fig. 4 Pressure distribution with different Reynolds numbers in two kinds of tubes

由图4可知,正向流动时,传统扩散/收缩管和三通全扩散/收缩管压差曲线几乎重合,雷诺数较高时,传统扩散/收缩管略大于三通全扩散/收缩管;反向流动时,三通全扩散/收缩管压差明显大于传统扩散/收缩管,且雷诺数越高,两者相差越大.

通过图4中的数据和式(4)可得到不同雷诺数下两种流管流动的 λ 曲线如图5所示.

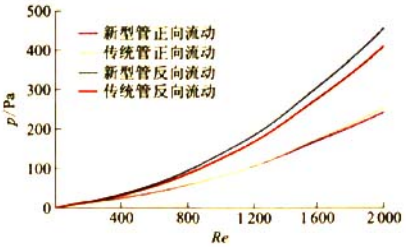

图5 两种流管在不同雷诺数下流动的 λ 值比较
Fig. 5 λ distribution with different Reynolds numbers in two kinds of tubes

由图5可知,两种流管的 λ 都随着雷诺数的提高而提高,而三通全扩散/收缩管流阻系数比 λ 值在高雷诺数下明显大于传统扩散/收缩管,且前者增长率高于后者,所以雷诺数越大两者差值越大,当雷诺数为2 000时,前者的 λ 值比后者高出约15%.可见三通全扩散/收缩管能够提高无阀压电泵的效率.

4 分流锥管结构对其流阻特性的影响

三通全扩散/收缩管的分流锥管结构造成了与传统扩散/收缩管流阻的差异,所以要研究分流锥管结构对流阻特性的影响.

4.1 分流锥管长度

改变三通全扩散/收缩管的分流锥管长度 L_2 分别为50,100,200,400和800 μm,得到不同分流锥管长度 L_2 的流管在不同雷诺数下流动的 λ 曲线如图6所示.

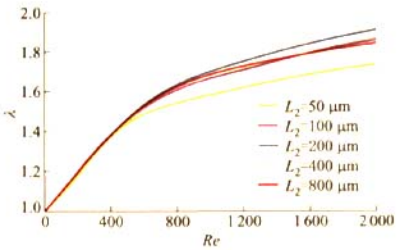

图6 不同分流锥管长度的流管在不同雷诺数下流动的 λ 比较
Fig. 6 λ distribution with different Reynolds numbers in various lengths of shunt tubes

万方数据

由图6可知，当雷诺数小于400时，各流管的 λ 曲线区别不大；当雷诺数超过400时，L_2 分别为50，100和200 μm的流管的 λ 值在相同雷诺数下随着 L_2 的增大而增大，L_2 超过200 μm后的流管 λ 值相对较低，其中 L_2 为100，400和800 μm的流管 λ 曲线基本重合；当雷诺数为2 000时，L_2 为200 μm的流管的 λ 值只比 L_2 为100，400和800 μm的流管高出3%～4%. 这说明 L_2 在一个很大的区间里对流管的 λ 值的影响不大.

4.2 分流锥管夹角

改变分流锥管夹角 φ 分别为15°，30°，60°，90°和120°，得到不同分流锥管夹角 φ 的流管在不同雷诺数下流动的 λ 曲线如图7所示.

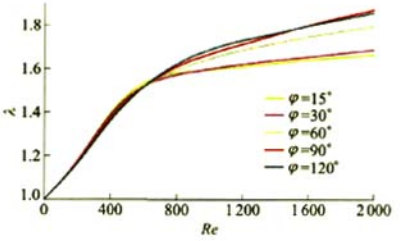

图7 不同分流锥管夹角的流管在不同雷诺数下流动的 λ 比较

Fig. 7 λ distribution with different Reynolds numbers in various angles between two shunt tubes

由图7可知，当雷诺数低于600时，小夹角流管的 λ 值略高，与大夹角流管相差不大，各流管的 λ 曲线基本相同；当雷诺数高于600时，小夹角流管的 λ 值增长率下降较快，大夹角流管的 λ 值开始高于小夹角流管，且随着雷诺数的增大，大夹角流管与小夹角流管的 λ 差值也在增大；但当雷诺数大于1 400后，分流锥管夹角 φ 为120°的流管 λ 值增长减慢，其 λ 值小于分流锥管夹角 φ 为90°的流管，可见分流锥管夹角过大的流管在高雷诺数流动下流阻性能会下降，这是因为过大的分流锥管夹角使得正向流动时从汇流管到分流锥管的流动分离比较严重，产生了较大的漩涡，增加了流管的正向流动损失.

4.3 分流锥管锥角

分流锥管锥角 θ_2 分别为0°，3.5°，7.0°，10.5°和14.0°时，得到不同分流锥管锥角 θ_2 的流管在不同雷诺数下流动的 λ 曲线如图8所示.

由图8可知，当雷诺数低于1 200时，大锥角的流管 λ 值相对较高；当雷诺数高于1 200时，小锥角的流管 λ 值相对较高. 这是因为当雷诺数较低时，大锥角的流管正向流动的出口较大，出口处突扩流动损失小，正向流动损失比小锥角的流管小，虽然其反向流动损失也小于小锥角的流管，但在低雷诺数下相差不大，所以低雷诺数下大锥角流管的 λ 值相对较大；而进入高雷诺数流动后，大锥角的流管中易出现流动分离，加大了正向流动损失，其损失开始接近小锥角流管的流动损失，而反向流动损失仍小于小锥角的流管，所以高雷诺数下大锥角流管的 λ 值相对较小.

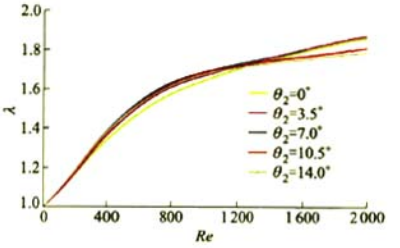

图8 不同分流锥管锥角的流管在不同雷诺数下流动的 λ 比较

Fig. 8 λ distribution with different Reynolds numbers in various cone angles of shunt tubes

4.4 分流锥管宽度

改变分流锥管宽度 b_2，使得 b_2/b_0 分别为0.250，0.375，0.500，0.625和0.750，得到不同分流管宽度 b_2 的流管在不同雷诺数下流动的 λ 曲线如图9所示.

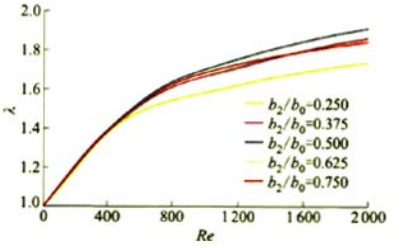

图9 不同分流锥管宽度的流管在不同雷诺数下流动的 λ 比较

Fig. 9 λ distribution with different Reynolds numbers in various widths of shunt tubes

由图9可以看出，雷诺数在1 000以下时，$\frac{b_2}{b_0}=0.500$ 和 $\frac{b_2}{b_0}=0.625$ 的流管 λ 值较高，其次是 $\frac{b_2}{b_0}=0.375$，而 $\frac{b_2}{b_0}=0.750$ 和 $\frac{b_2}{b_0}=0.250$ 的流管 λ 值最低；雷诺数在1 000以上时，$\frac{b_2}{b_0}=0.375$ 的流管的 λ 值大于其他流管，其次是 $\frac{b_2}{b_0}=0.500$，而 $\frac{b_2}{b_0}=0.250$，$\frac{b_2}{b_0}=$

万方数据

0.625 和$\frac{b_2}{b_0}=0.750$ 的流管 λ 值相对较低. 所以$\frac{b_2}{b_0}$的比值不宜太大或太小,若流动雷诺数较低,可选用$\frac{b_2}{b_0}$的值略大于 0.500 的流管;若流动雷诺数较高,可选用$\frac{b_2}{b_0}$的值略小于 0.500 的流管.

5 结 论

提出了一种新型三通全扩散/收缩管,利用 CFD 软件对其管中流动进行数值模拟,并与传统扩散/收缩管进行对比分析;分别改变三通全扩散/收缩管的分流锥管结构参数并进行数值模拟,研究了分流锥管结构参数对流管流阻特性的影响. 结论如下:

(1)三通全扩散/收缩管与传统扩散/收缩管相比,正向流动时两者压差基本相同,反向流动时前者压差要大于后者,使得前者的流阻系数比 λ 更高,即三通全扩散/收缩管可提高传统扩散/收缩管无阀压电泵的容积效率.

(2)分流锥管结构参数对流阻特性的影响比较复杂,在低雷诺数下,分流锥管长度和分流锥管夹角的改变对流管的 λ 值影响不大;分流锥管锥角越大,λ 值相对较高;分流锥管宽度与汇流锥管出口宽度的比值 b_2/b_0 略大于 0.500 时,λ 值相对较高. 在高雷诺数下,当分流锥管长度 $L_2=200$ μm 时,流管的 λ 值相对最高;分流管夹角 $\varphi=90°$时,λ 值在雷诺数为 800 到 1 400 之间最大,在雷诺数高于 1 400 时,$\varphi=120°$时 λ 值最高;分流锥管锥角越小,λ 值相对较小;b_2/b_0 略小于 0.500 时,λ 值相对较大. 因此,设计时必须要根据实际工况的雷诺数范围选用合适的结构参数.

参考文献(References)

[1] 焦小卫,黄卫清,赵淳生. 压电泵技术的发展及其应用[J]. 微电机,2005,38(5):66-69.
Jiao Xiaowei, Huang Weiqing, Zhao Chunsheng. The piezoelectric pump technology and its application[J]. *Micromotors Servo Technique*, 2005, 38(5):66-69. (in Chinese)

[2] 何秀华,张 睿,蒋权英. 基于 MEMS 的压电泵及其研究进展[J]. 排灌机械,2007,25(4):64-68.
He Xiuhua, Zhang Rui, Jiang Quanying. Progress on piezoelectric micropump based on MEMS[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(4):64-68. (in Chinese)

[3] Liu G, Shen C, Yang Z, et al. A disposable piezoelectric micropump with high performance for closed-loop insulin therapy system [J]. *Sensors and Actuators A*, 2010, 163(1):291-296.

[4] Stemme E, Stemme G. A valveless diffuser/nozzle based fluid pump [J]. *Sensors and Actuators A*, 1993, 39(2): 159-167.

[5] 李 军,吴博达,程光明,等. 收缩管/扩张管型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 & Acoustooptics*, 2000, 22(6):376-378. (in Chinese)

[6] Heschel M, Mullenborn M, Bouwstra S. Fabrication and characterization of truly 3-D diffuser/nozzle microstructures in silicon[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1997, 6(1):41-47.

[7] Singhal Vishal, Garimella, S V. Low Reynolds number flow through nozzle—diffuser elements in valveless micropumps[J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 113:226-235.

[8] Wang Yichun, Hsu Juicheng, Kuo Pingchi, et al. Loss characteristics and flow rectification property of diffuser valves for micropump applications [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52:328-336.

[9] 王 伟,刘世炳,陈 涛,等. 无阀微泵泵腔中流体流动的有限元模拟与分析[J]. MEMS 器件与技术,2005(9):415-419.
Wang Wei, Liu Shibing, Chen Tao, et al. Finite element simulation and analysis for flowing of liquid in chamber of valveless micropump [J]. *Micronanoelectric Technolgy*, 2005(9):415-419. (in Chinese)

[10] Gravesen P, Branebjerg J, Jensen O S. Microfluidics—a review[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1993, 3(4): 168-182.

(责任编辑 徐云峰)

万方数据