

三棱柱阻流体无阀压电泵流量特性试验^{*}

张蕊华¹, 张建辉^{2,3}, 胡笑奇¹, 陈小元¹

(1. 丽水学院工程与设计学院 丽水, 323000)

(2. 广州大学机械与电气工程学院 广州, 510006)

(3. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 为了提高无阀压电泵的输出流量, 分析泵中无移动部件(三棱柱组)参数对泵输出流量的影响规律, 改进设计了 5 组三棱柱阻流体无阀压电泵, 并分别对其进行了流量试验。首先, 分析了该压电泵的结构和工作原理; 其次, 建立了压电泵的流量计算公式, 得到了泵输出流量与三棱柱组主要参数的关系表达式, 利用 MATLAB 软件绘制了三棱柱正反向流阻比、三棱柱个数与泵输出流量的关系曲线; 最后, 利用 3D 打印技术实际制作了 5 组三棱柱阻流体无阀压电泵, 并对其进行了流量试验。试验结果表明: 在驱动电压和驱动频率不变的条件下, 三棱柱组参数对泵的输出流量有较大的影响, 其中, 泵输出流量随三棱柱个数、高度的增加而增大, 随三棱柱与泵腔壁的间隙及三棱柱顶角的增大而减小; 另外, 泵的输出流量随相邻三棱柱间距的增大而增大, 当间距增加到一定值后, 泵的输出流量不再继续增大, 反而会减小, 其值接近于某一定值。

关键词 无阀压电泵; 三棱柱; 阻流体; 流阻; 流量

中图分类号 TH38; TN384

引言

无阀压电泵是以自身内部的特殊结构(无移动部件)来替代传统阀的功能, 以压电振子作为驱动元件来实现泵的传输功能。其工作原理为: 当给压电振子施加电压时压电振子做周期性振动, 从而引起泵腔容积呈周期性变化, 由于泵内部结构的不对称性使流体正反向流动时产生的流阻不同, 使泵腔两侧同时吸入和排除流体的流量不同, 从而使泵在宏观上产生了单向流动, 实现泵的传输功能。无阀压电泵具有结构简单、重量轻、易于微小化等优点, 在医疗、生物、微滴灌系统等领域具有广阔的应用前景^[1-6]。目前, 在无阀压电泵的结构中无移动部件阀相对于泵腔的位置主要有内置和外置两种。Stemme 等^[7]提出的锥形流管无阀压电泵, Foster 等^[8]提出的 Tesla 无阀压电泵, 张建辉等^[9]提出的“Y”型流管压电泵无阀压电泵中的无移动部件阀都是搁置在泵腔外部, 该类泵虽然能够传输流体, 但因其结构体积较大, 不易微小化。夏齐霄等^[10]将非对称坡面结构作为无移动部件阀内置在泵腔内部,

利用泵腔底部的不对称坡面, 使流体正反向流过时产生的流阻不同, 实现了流体的单向传输。该泵具有结构简单、更易微小化等优点, 但是也有不易加工、输出流量小的不足。为了提高泵的工艺性和输出流量特性, 笔者设计了无移动部件阀内置的三棱柱阻流体无阀压电泵, 该泵不仅具有较好的流量特性, 还具有结构简单、易加工、成本低、易微小化等优点。

为更好地防止泄漏, 笔者对三棱柱阻流体无阀压电泵的结构进行了改进设计, 泵体与泵盖的接触方式由玻璃胶粘接结构^[11]改为安装“O”型密封圈。建立了压电泵的流量计算公式, 利用 MATLAB 软件绘制了无移动部件参数对泵输出流量的曲线关系图, 使用 3D 打印技术制作了 5 组参数的三棱柱阻流体无阀压电泵, 并对其进行了流量试验。

1 泵结构及工作原理

三棱柱阻流体无阀压电泵主要由压电振子、泵盖、泵体、三棱柱组及导管等组成, 其结构如图 1 所示。图 1 中泵体与泵盖之间采用螺纹连接, 为了产

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51375227, 51207068); 浙江省自然科学基金资助项目(LY14E050002)
收稿日期: 2016-02-07; 修回日期: 2016-04-18

生流阻差,在泵腔中设计了一组呈同向“一”字均布排列的三棱柱组,其中三棱柱的尖端都朝向 A 端,相对应的棱边都朝向 B 端。该泵宏观上呈现的流体流动方向是从 A 端流向 B 端的单向流动。

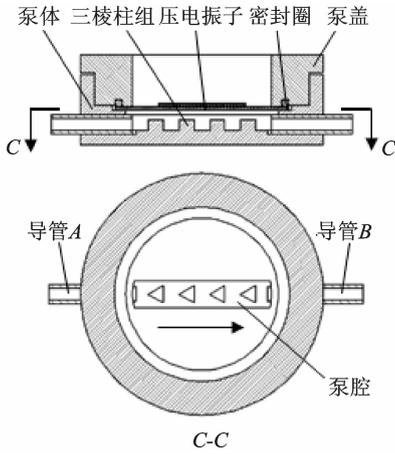


图 1 三棱柱阻流体无阀压电泵结构示意图

Fig. 1 The structure diagram of valveless piezoelectric pump with triangular prism bluff body

压电振子的周期性振动引起泵腔的体积和压力呈周期性变化,压电振子振动一个周期产生 2 个吸程和 2 个排程。以半个周期为例:当压电振子从平衡位置向上运动时,泵腔体积增大,压力降低,流体经导管 A 和 B 同时被吸入泵腔,该过程是吸程,见图 2(a);当压电振子从最高点向下运动时,泵腔的体积减小,压力升高,泵腔内的流体经导管 A 和流管 B 同时被排出泵外,该过程是排程,见图 2(b)。

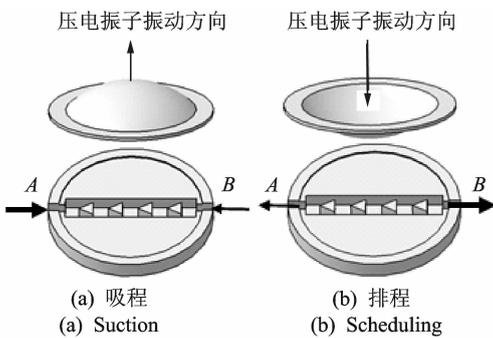


图 2 泵工作原理图

Fig. 2 Working process

当三棱柱的尖端及两侧面作为迎流面产生的流阻小于三棱柱棱边作为迎流面产生的流阻时,流体从导管 A 和 B 同时流入泵腔产生的流阻是不同的,从导管 A 进入泵腔的流体量多于从导管 B 进入的流体量;同理,当流体从泵腔排出时,从导管 A 排出的流体量少于从导管 B 排出的流体量。因此,泵从 A 端流入的流体量大于流出的,而从 B 端流出的流体量大于流入的,这样泵中的流体呈现出从 A 端向

B 端的单向流动,从而实现了泵的输送功能。

2 理论分析

图 3 为泵腔的结构示意图。其中: E 为泵腔宽度; H 为泵腔深度; h 为三棱柱的高度; n 为三棱柱个数; c 为三棱柱侧面与泵腔内壁的间隙; e 为三棱柱间的间距; a 为三棱柱顶角。

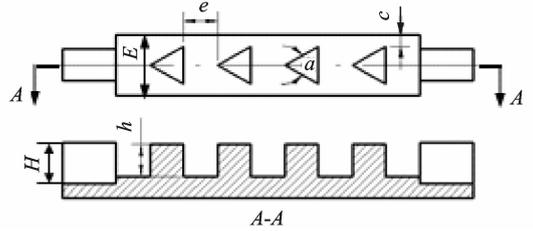


图 3 泵腔结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of the pump chamber

在泵工作的半个周期内经历一次吸程和一次排程,因此三棱柱组同时也要经历一次从左向右流动和从右向左流动的过程。以泵腔左端为例,见图 4。

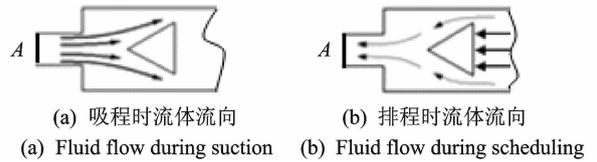


图 4 泵腔内流体流向示意图

Fig. 4 The diagram of pump chamber fluid flow

为了表述方便,笔者设定流体从 A 端流向 B 端为正向,从 B 端流向 A 端为反向。

根据 Singhal 等理论,当三棱柱的棱角处于迎流面时,流体流经第 i 个三棱柱时所产生的正向压强损失 ΔP_{zi} 和当三棱柱的棱边处于迎流面时,流体流经第 i 个三棱柱时所产生的反向压强损失 ΔP_{fi} 的表达式为

$$\begin{cases} \Delta P_{zi} = \xi_{zi} \rho u_z^2 / 2 \\ \Delta P_{fi} = \xi_{fi} \rho u_f^2 / 2 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

其中: ρ 为流体密度; u_z 为正向绕流三棱柱的平均速率; u_f 为反向绕流三棱柱的平均速率; ξ_{zi} 和 ξ_{fi} 分别为正、反向绕流第 i 个三棱柱时的阻力系数。

由于泵腔中非对称结构三棱柱组的存在,使得流体正反向绕流的阻力系数不等,流体正、反向绕流三棱柱组的总阻力系数表达式为

$$\begin{cases} \xi_z = \xi_{z1} + \xi_{z2} + \dots + \xi_{zn} + \dots \\ \xi_f = \xi_{f1} + \xi_{f2} + \dots + \xi_{fn} + \dots \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

其中: ξ_z 为正向总阻力系数; ξ_f 为反向总阻力系数。泵腔内的三棱柱呈单向前后排列,后面的三棱

柱处在前面三棱柱的尾流影响区内,前者对后者具有遮流作用,后者对前者也有反作用力。这种遮流作用使得流体流经后者时的水流发生变化,从而导致流体流经后者时的阻力发生变化。因此,相邻三棱柱阻力系数的关系表达式为

$$\begin{cases} \xi_{z(i+1)} = \beta_z \xi_{zi} \\ \xi_{f(i+1)} = \beta_f \xi_{fi} \end{cases} \quad (i=1,2,\dots) \quad (3)$$

其中: β_z 为流体正向遮流阻力影响系数; β_f 为流体反向遮流阻力影响系数。

联立式(2)和式(3)得三棱柱组正、反向总阻力系数表达式

$$\begin{cases} \xi_z = \xi_{z1} \sum_{i=1}^n \beta_z^{i-1} \\ \xi_f = \xi_{f1} \sum_{i=1}^n \beta_f^{i-1} \end{cases} \quad (4)$$

其中: n 为三棱柱的个数。

压电泵在半个振动周期内流量的近似表达式^[9]为

$$Q = \Delta V_f \frac{\xi_f - \xi_z}{2 + \xi_f + \xi_z} \quad (5)$$

联立式(4)和式(5)得三棱柱阻流体无阀压电泵的流量表达式

$$Q = \Delta V_f \frac{(\sum_{i=1}^n \beta_f^{i-1})^{\frac{1}{2}} - (\gamma \sum_{i=1}^n \beta_z^{i-1})^{\frac{1}{2}}}{2 + (\sum_{i=1}^n \beta_f^{i-1})^{\frac{1}{2}} + (\gamma \sum_{i=1}^n \beta_z^{i-1})^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

其中: γ 为第1个三棱柱的正反向阻力系数比值。

$$\gamma = \xi_{z1} / \xi_{f1} \quad (7)$$

为分析三棱柱组参数对泵输送流量的影响规律,采用MATLAB软件绘制泵输出流量的函数曲线,如图5、图6所示。图中计算参数为: $f=5\text{ Hz}$; $\beta_f=0.7$; $\beta_z=0.68$ 。

图5为三棱柱个数 n 与泵输出流量 Q 的关系曲线,图中 $\gamma=0.87$, $\Delta V=30\text{ mm}^3$ 。

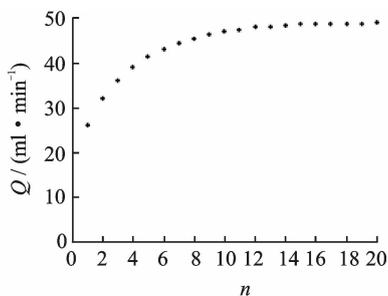


图5 三棱柱个数 n 与泵输出流量 Q 的关系曲线

Fig. 5 Curve of the number n triangular prism and the pump output flow rate Q

由图5可知,在驱动频率不变的条件下,泵的输出流量随三棱柱个数的增加而增大,当增大到一定

值后,流量不再继续增大,而是趋向于某一定值。

图6为参数 γ 对泵输出流量的影响曲线($n=4$)。图中泵的输出流量随正、反向阻力系数比 γ 的增加而减小,说明三棱柱正、反向流阻差越大,泵的输出流量也越大。

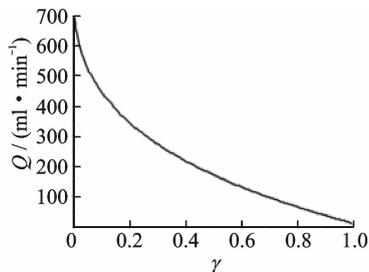


图6 阻力系数比 r 与泵输出流量 Q 的关系曲线

Fig. 6 Curve of the drag coefficient r and the pump output flow rate Q

3 试验研究

3.1 试验样件制作

本研究使用的压电泵试验样机全部使用天威准工业级M2020型桌面3D打印机加工制作,3D打印机的加工精度为 0.1 mm ,采用PLA材料。试验样件的参数(见图3)为:泵腔宽度 $E=8\text{ mm}$;深度 $H=4.5\text{ mm}$;三棱柱截面为边长 5 mm 的等边三角形;其他相关参数随试验条件而改变。

图7为三棱柱阻流体无阀压电泵样机实物图。压电泵参数如下:基片直径为 $50.0 \pm 0.1\text{ mm}$;瓷片直径为 $25.0 \pm 0.3\text{ mm}$;基片厚度为 $0.20 \pm 0.03\text{ mm}$;总厚度为 $0.40 \pm 0.05\text{ mm}$ 。

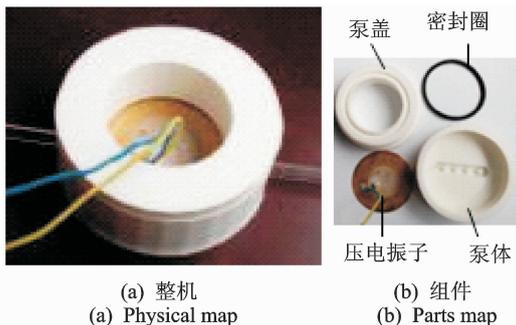


图7 三棱柱阻流体无阀压电泵实物图

Fig. 7 Valveless piezoelectric pump with triangular prism bluff body

3.2 压电泵流量试验

图8为压电泵的流量测量试验照片。试验中使用的是Tektronix的AFG3022C示波器,功率放大器是南京佛能科技实业有限公司的HVP-2070B。

试验驱动电压峰峰值为 550 V,采用的试验流体为去离子水。流量试验是通过改变压电振子的驱动频率来测量压电泵单位时间内的输出流量,从而可得出压电泵在 550V 电压下输出流量随频率变化的曲线。

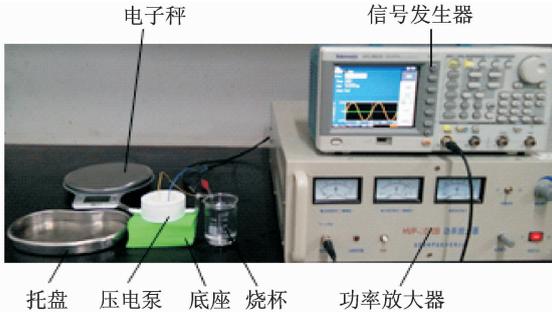


图 8 压电泵的流量测量试验照片

Fig. 8 The piezoelectric pump flow test

3.2.1 三棱柱个数对泵输出流量的影响

图 9 为一组参数 n 的压电泵泵体实物图 ($h = 4.3 \text{ mm}, c = 1.5 \text{ mm}, a = 60^\circ$)。

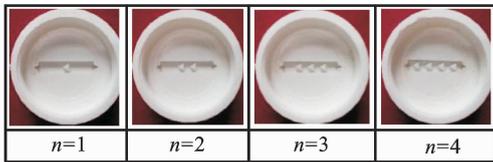


图 9 压电泵泵体实物图 (n 不同)

Fig. 9 The physical map of piezoelectric pump body (n different)

对图 9 中泵体样件分别进行流量测试试验得到了三棱柱个数变化条件下,泵的输出流量与驱动频率的关系曲线,如图 10 所示。

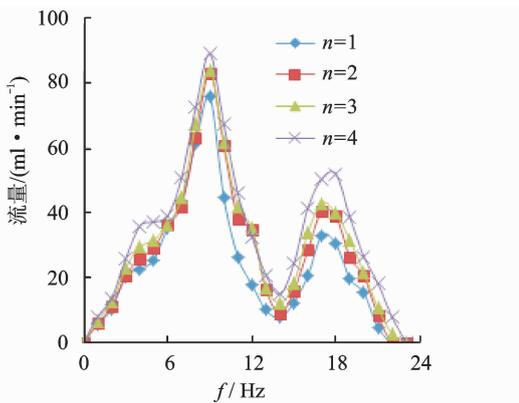


图 10 驱动频率与流量的关系曲线 (n 不同)

Fig. 10 Curves of flow rate vs driving frequency (n different)

由图 10 可知,在同一驱动频率条件下,泵的流量随着三棱柱个数的增多而增大。由于受振子实际尺寸的限制,泵体中三棱柱的个数 n 无法继续增大,因此不能得到 n 大于 4 的频率-流量曲线。但是根

据图 5 可以判定,泵的流量不会随三棱柱个数的增大无限增大,当 n 增加到一定数值后,泵的输出流量不再继续增大,而是趋于某一定值。

3.2.2 间隙对泵输出流量的影响

图 11 为一组参数 c 的泵体实物图 ($h = 4.3 \text{ mm}, n = 2, a = 60^\circ$)。图 12 为三棱柱与泵腔的间隙值对泵输出流量影响曲线图。

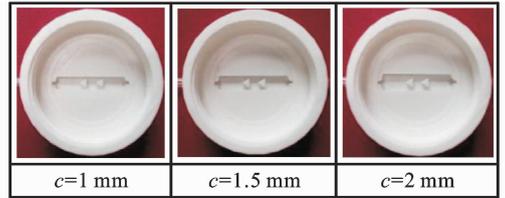


图 11 压电泵泵体实物图 (c 不同)

Fig. 11 The physical map of piezoelectric pump body (c different)

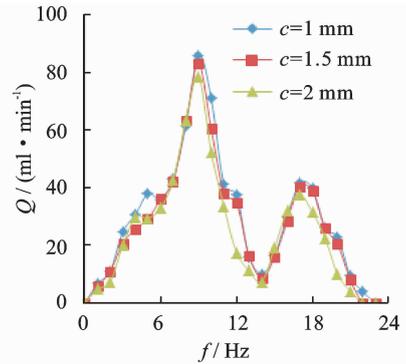


图 12 驱动频率与流量的关系曲线 (c 值不同)

Fig. 12 Curves of flow rate vs driving frequency (c different)

试验结果表明,在同一驱动频率条件下,三棱柱侧面与泵腔的间隙值对泵的输出流量有较大的影响,且泵的流量随着间隙的增大而减小,当间隙达到一定值后,泵的流量趋于零(见图 6)。这是由于间隙增大后,流体绕流三棱柱的程度变弱,更多的流体靠近泵腔壁没有阻碍的流过,三棱柱组正反向流阻差对流体流动的影响变弱,从而导致泵的流量变小。

3.2.3 三棱柱高度对泵输出流量的影响

图 13 为一组参数 h 的泵体实物图 ($c = 1.5 \text{ mm}, n = 4, a = 60^\circ$)。图 14 为三棱柱高度 h 对泵输出流量的影响规律曲线。

试验结果表明,当驱动频率不变时,泵的输出流量随着三棱柱高度值的增加而增大。三棱柱的高度增加,正反向流阻比增加, γ 变小,泵的输出流量增大。在实际中,三棱柱的高度受到进出口管道直径的限制,只有当高度 h 值不大于管道直径时,上述结论才会成立。

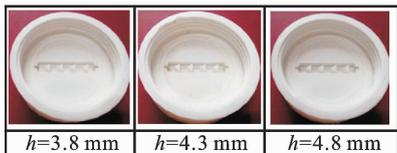


图 13 压电泵泵体实物图 (h 不同)

Fig. 13 The physical map of piezoelectric pump body (h different)

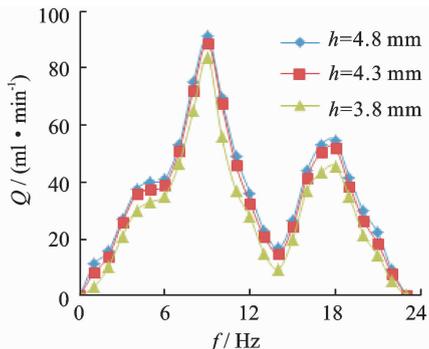


图 14 驱动频率与流量的关系曲线 (h 不同)

Fig. 14 The physical map of piezoelectric pump body (h different)

3.2.4 三棱柱顶角对泵输出流量的影响

图 15 为一组参数 a 的泵体实物图 ($c=1.5$ mm, $n=4$, $h=4.3$ mm)。图 16 为三棱柱顶角对泵输出流量影响曲线图。

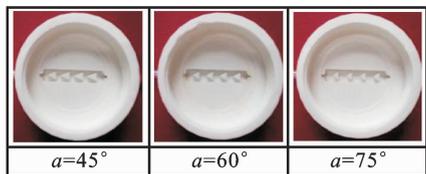


图 15 压电泵泵体实物图 (a 不同)

Fig. 15 The physical map of piezoelectric pump body (a different)

图 16 中,当驱动频率一定时,泵的输出流量随三棱柱顶角角度的增大而减小。由图可知,当顶角增大到接近 180° 时,泵的输出流量趋近于零。其原因是,顶角角度增大,使三棱柱的正方向流阻差减小, γ 值增大,导致泵的输出流量减小。

3.2.5 三棱柱的间距对泵输出流量的影响

图 17 为一组参数 e 的泵体实物图。图 18 为三棱柱顶角对泵输出流量影响曲线图。

试验结果表明,当三棱柱的间距小于一定值时,泵输出流体的流量随着间距的增大而增大。这是因为,前面的三棱柱对后面的三棱柱具有遮流作用,减弱了后面的三棱柱对流体的影响。随着间距的增

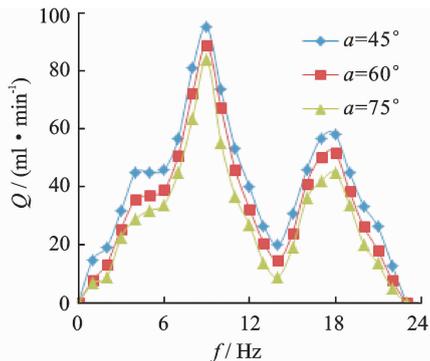


图 16 驱动频率与流量的关系曲线 (a 不同)

Fig. 16 Curves of flow rate vs driving frequency (a different)

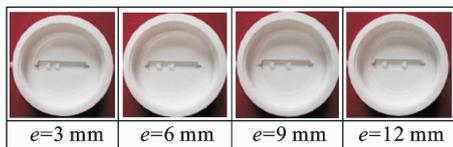


图 17 压电泵泵体实物图 (e 不同)

Fig. 17 The physical map of piezoelectric pump body (e different)

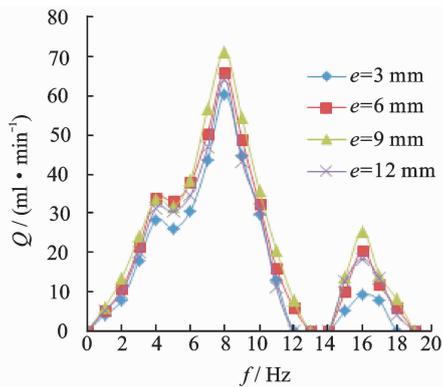


图 18 驱动频率与流量的关系曲线 (e 不同)

Fig. 18 The physical map of piezoelectric pump body (e different)

大,遮流变弱,总流阻差增大,从而流量增大。但是,当间距增加到一定值后,泵的输出流量不再继续增大,反而会减小,其值接近于某一定值,该试验结果与文献[12]的研究结果一致。

4 结 论

1) 建立了压电泵的流量计算公式,得到了泵输出流量与三棱柱组参数的关系表达式。

2) 利用 MATLAB 软件绘制得到了三棱柱组参数与泵输出流量关系曲线。

3) 使用3D打印技术制作了5组参数的三棱柱阻流体无阀压电泵样机,并进行了流量试验,试验结果表明,在驱动电压和驱动频率不变的条件下,三棱柱组参数对泵的输出流量都有较大影响:a. 泵的输出流量随着三棱柱个数 n 的增多而增大,当 n 增加到一定数值后,泵的输出流量不再继续增大,而是趋于定值;b. 三棱柱侧面与泵腔的间隙值对泵的输出流量有较大的影响,且泵的输出流量随着间隙的增大而减小,当间隙达到一定值后,泵的输出流量趋于零;c. 泵的输出流量随着三棱柱高度的增加而增大,在实际中,三棱柱的高度受到进出口管道直径的限制,当高度 h 值不大于管道直径时,该结论成立;d. 泵的输出流量随三棱柱顶角角度的增大而减小,当顶角增大到接近 180° 时,泵的输出流量趋于零;e. 泵的输出流量随着间距的增大而增大,当间距增加到一定值后,泵的输出流量不再继续增大,反而会减小,其值接近于某一定值。

参 考 文 献

[1] 阚君武,杨志刚,程光明. 压电泵的现状与发展[J]. 光学精密工程,2002,10(6):619-625.
Kan Junwu, Yang Zhigang, Cheng Guangming. Research on piezoelectric pump and its development [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(6):619-625. (in Chinese)

[2] Yoshida K, Watanabe K, Yokota S. Development of a piezoelectric micropump using resonantly-driven active check valve [C] // Proceedings of the SICE Annual Conference 2005 in Okayama. Okayama, Japan: [s. n.], 2005:2510-2513.

[3] Foster F K, Bardell R L, Blanchard A P, et al. Micropumps with fixed valves; US, 5876187 [P]. 1999-03-02.

[4] 程光明,姜德龙,孙晓锋,等. 双腔体四振子压电泵设计及试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(3):190-193.
Cheng Guangming, Jiang Delong, Sun Xiaofeng, et al. Design and experiment on dual-chamber piezoelectric pump with four actuators[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3):190-193. (in Chinese)

[5] 黄俊,张建辉,王守印. 变截面“Y”型流管无阀压电泵原理及试验[J]. 振动、测试与诊断,2014,34(1):15-19.
Huang Jun, Zhang Jianhui, Wang Shouyin. Theory and experimental verification on valveless piezoelectric pump with variable cross section Y-shape tubes[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(1):15-19. (in Chinese)

[6] 程光明,冯丽娜,曾平,等. 泵用压电振子与泵腔体积

变化的测试研究[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(4):412-416.

Cheng Guangming, Feng Lina, Zeng Ping, et al. Experimental study of piezoelectric vibrator deformation and cavity volume fluctuation of piezoelectric pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4):412-416. (in Chinese)

- [7] Stemme E, Stemme G. A valve-less diffuser/nozzle-based fluid pump[J]. Sensors & Actuators A Physical, 1993, 39(12):159-167.
- [8] Forster F K, Bardell L, Afromowitz M A, et al. Design, fabrication and testing of fixed-valve micropumps [C] // Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division. San Francisco: ASME Fluids Engineering Division, 1995:39-44.
- [9] 张建辉,王守印. 压电泵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 Jianhui, Wang Shouyin. 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. (in Chinese)
- [10] 夏齐宵,张建辉,李洪,等. 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 Qixiao, Zhang Jianhui, Li Hong, et al. Valve-less piezoelectric pump with unsymmetrical slope chamber bottom [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4):641-647. (in Chinese)
- [11] 张蕊华,张建辉. 三棱柱阻流体无阀压电泵的设计与试验[J]. 光学精密工程,2016,24(2):327-334.
Zhang Ruihua, Zhang Jianhui. Design and experimental of valveless piezoelectric pump with triangular prism bluff body [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2):327-334. (in Chinese)
- [12] 纪晶,张建辉,季瑞南,等. 半球缺纵向排列对半球缺阻流体无阀泵的影响[J]. 振动、测试与诊断,2014,34(6):1072-1079
Ji Jing, Zhang Jianhui, Ji Ruinan, et al. Influence characteristics of hemisphere-segment in longitudinal alignment on valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(6):1072-1079. (in Chinese)



第一作者简介:张蕊华,女,1970年4月生,博士后、副教授。主要研究方向为压电驱动技术和金属橡胶技术。曾发表《金属橡胶高压精密流量阀流场分析》(《振动、测试与诊断》2013年第33卷第1期)等论文。

E-mail: zhangrh_hit@sina.com

