

# 圆弧形流管无阀压电泵的工作原理及试验\*

唐娟<sup>1,2</sup>, 张建辉<sup>2</sup>, 张泉<sup>2</sup>, 冯会奎<sup>2</sup>

(1. 泰州职业技术学院机电技术学院 泰州, 225300)

(2. 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** 圆弧形管路中的液体在压电元件的作用下产生流动, 受到离心力和哥氏力的作用。利用上述现象提出了圆弧形流管无阀压电泵, 通过压电元件的逆压电效应使泵腔容积产生周期性变化, 利用地球自转对流管中流体的影响, 使流体顺时针和逆时针两种流动状态的流阻不同, 形成流体宏观单向流动。对原理样机进行的压差试验表明: 驱动电压保持为 130 V 不变, 当驱动频率为 14 Hz 时, 压差达到最大值为 17 mm 水柱; 当驱动频率为 30 Hz 时, 压差降至 3 mm 水柱。压差的产生源于地球自转的哥氏力, 流量或压差的大小能够反映泵结构整体的旋转速度, 可望通过地球转速的测量, 获得本地地理位置信息, 形成导航新原理。

**关键词** 无阀; 压电泵; 圆弧形流管; 流阻

**中图分类号** TH38; TN384

## 引言

无阀压电泵利用压电元件的逆压电效应实现驱动电能、压电振子势能、机械能及流体动能之间的转化, 是集驱动、执行和控制部件于一体的微型泵, 具有无电磁干扰、结构简单、体积小、重量轻、加工制作容易等优点, 在保健、医疗、卫生等领域有着广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。无阀压电泵根据其实现流阻差结构的不同又可分为锥型管无阀压电泵、非对称坡面无阀压电泵、“Y”流管无阀压电泵、异型管类无阀压电泵等<sup>[4-8]</sup>, 均以流道的特定结构实现“阀”的功能, 因此, 流道的设计成为无阀压电泵的关键。

科里奥利发现: 相对于地球运动的物体会受到一个惯性力作用, 在地球北半球, 运动的物体会在地球自旋力的作用下偏向右侧, 并且随着纬度升高, 偏向运动愈明显。故在北半球, 地球自转产生的哥氏力对顺时针运动流体有抑制作用, 而对逆时针方向运动的流体有促进作用<sup>[9]</sup>。1927 年 Dean<sup>[10]</sup> 对曲管中的流体进行了理论研究, 推导出了曲管截面上存在二次流动。曲管可以在管道内部形成与管的轴向垂直的二次流动, 这种二次流动与轴向主流复合成螺旋式的前进运动, 增强了流体的传质功能, 即实现流体输送和混合搅拌功能。张建辉等<sup>[11-14]</sup> 设计了

螺旋流管无阀压电泵, 即将互为逆向的一对螺旋流管安装在泵腔的出、入口, 实现了宏观上的单向流动。

由于哥氏力的存在, 圆弧形流管也能使流体在交变压力作用下形成单向流动, 且圆弧形流管内的二次流动也有利于流体的混合。那么按照这个思路, 提出了新型圆弧形流管无阀压电泵。泵的流道采用平面圆弧形结构, 以简化制造工艺、降低制造成本。此外, 由于流阻差对角速度和所处地理位置敏感, 通过对流量的测量可以反映压电泵所处纬度, 可能成为一种新型导航装置。

课题组通过对流体在圆弧形流管中流动的分析, 解析了圆弧形流管无阀压电泵的工作原理, 对制作的原理样机进行了初步试验, 为后续的导航功能研究打下了基础。

## 1 理论分析

为了对流体在圆弧流管中顺、逆时针流动特性进行理论分析, 首先建立柱坐标系和流体的控制方程, 柱坐标系如图 1 所示。几何模型研究对象为平面圆弧曲线, 该圆弧曲线方程为  $R = 2a \cos \theta$ , 其中  $R$  为平面圆弧曲线的半径,  $a$  为基圆半径,  $\theta$  为平面圆弧流管的转角。设流体为正压的、均匀不可压缩的、

\* 国家自然科学基金资助项目(51075201; 51375227); 江苏省高等职业院校高级访问学者计划资助项目(2013FX062)  
收稿日期: 2014-09-28; 修回日期: 2014-11-21

无粘性的理想流体,理想流体运动微分方程在柱坐标  $(r, \theta, z)$  下的表达式为

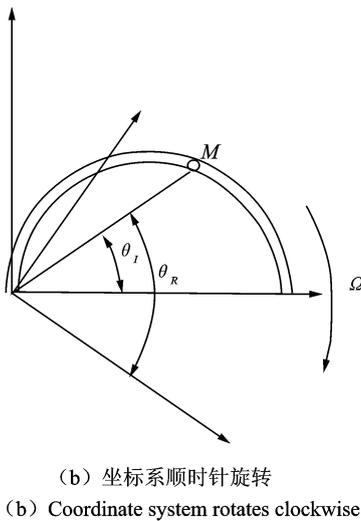
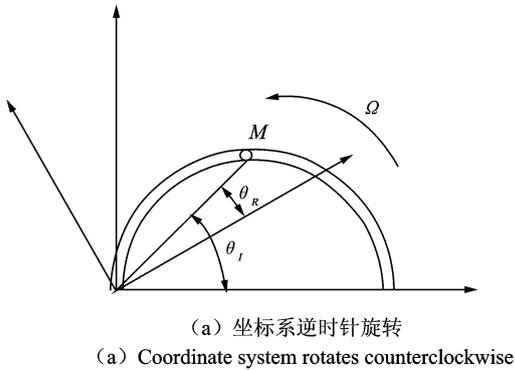


图 1 流体在圆弧流管中流动参考系统图  
Fig. 1 The diagram of flow in the arc tube

$$\begin{cases} \frac{du_I}{dt_I} - \frac{v_I^2}{r_I} = -\frac{\partial P_I}{\partial r_I} \\ \frac{dv_I}{dt_I} + \frac{u_I v_I}{r_I} = -\frac{1}{r_I} \frac{\partial P_I}{\partial \theta_I} \\ \frac{d\omega_I}{dt_I} = -\frac{\partial P_I}{\partial z_I} \end{cases} \quad (1)$$

其中:下标  $I$  表示惯性参考系中的量; $u, v, \omega$  分别表示沿着柱坐标 3 个坐标轴方向的速度分量;压力  $P$  为密度  $\rho$  的函数。

$$P_I = \frac{P}{\rho} + gz \quad (2)$$

当微元体在流管中运动时,相当于原来的惯性参考系发生了旋转,产生一个绕  $z$  轴以角速度  $\Omega$  旋转的柱坐标系。如图 1(a) 所示,当坐标系逆时针转动时,旋转的柱坐标系  $(r_R, \theta_R, z_R)$  与原坐标系间关系式为

$$\begin{cases} r_R = r_I = r \\ \theta_R = \theta_I - \Omega t_I \\ z_R = z_I = z \\ t_R = t_I = t \end{cases} \quad (3)$$

当  $t=0$  时,两个坐标系相互重合,沿旋转坐标系 3 个坐标轴方向的流速分量为

$$\begin{cases} u_R = \frac{dr_R}{dt_R} = \frac{dr_I}{dt_I} = u_I = u \\ v_R = \frac{d(r_R \theta_R)}{dt_R} = \frac{d(r_I \theta_I - r_I \Omega t_I)}{dt_I} = v_I - \Omega r \\ \omega_R = \frac{d\omega_R}{dt_R} = \frac{d\omega_I}{dt_I} = \omega_I = \omega \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(1),可以得到旋转参考系中的流体运动方程为

$$\begin{cases} \frac{du_R}{dt_R} - \frac{v_R^2}{r_R} - 2\Omega v_R - \Omega^2 r_R = -\frac{\partial P_I}{\partial r_R} \\ \frac{dv_R}{dt_R} + \frac{u_R v_R}{r_R} + 2\Omega u_R = -\frac{1}{r_R} \frac{\partial P_I}{\partial \theta_R} \\ \frac{d\omega_R}{dt_R} = -\frac{\partial P_I}{\partial z_R} \end{cases} \quad (5)$$

因为  $\frac{du_R}{dt_R} = 0$ , 对  $v$  进行分析,略去下标,则式(5)中的第 1 式可推导为关于  $v$  的方程

$$v^2 + 2\Omega r v + \Omega^2 r^2 - \frac{\partial P_I}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

同理,如图 1(b)所示,坐标系顺时针旋转时,旋转的柱坐标系  $(r_R, \theta_R, z_R)$  与原坐标系间关系式为

$$\begin{cases} r_R = r_I = r \\ \theta_R = \theta_I + \Omega t_I \\ z_R = z_I = z \\ t_R = t_I = t \end{cases} \quad (7)$$

推导出关于速度  $v$  的方程为

$$v^2 - 2\Omega r v + \Omega^2 r^2 - \frac{\partial P_I}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

比较式(6)和(8),设式(6)求出的速度值  $v$  为  $v_1$ ,式(8)求出的速度值  $v$  为  $v_2$ ,则可以得到坐标系顺时针、逆时针旋转时的速度差值

$$v_2 - v_1 = 2\Omega r = 4a\Omega \cos(\Omega t) \quad (9)$$

由式(9)可知,在坐标系发生顺时针、逆时针旋转时,产生了速度差,即流体在圆弧流管中顺、逆时针运动时产生了速度差,则必然会发生流量的变化,这主要是由于哥氏力的影响造成的。当  $\Omega=0$  时,流体在流管中不旋转时,速度差为 0,也不会产生流量的变化。转速与压差或流量的对应关系可用于构成转速传感器,通过速度检测,可以获得本地的地理位置信息。

## 2 结构和工作原理

图 2 为圆弧形流管无阀压电泵结构图,主要由泵盖,泵体、压电振子,一对旋向相反的半圆弧流管以及导管组成,压电振子的振动引起泵腔容积周期发生变化,带动泵内流体运动,圆弧形流管起到了单向阀的功能。

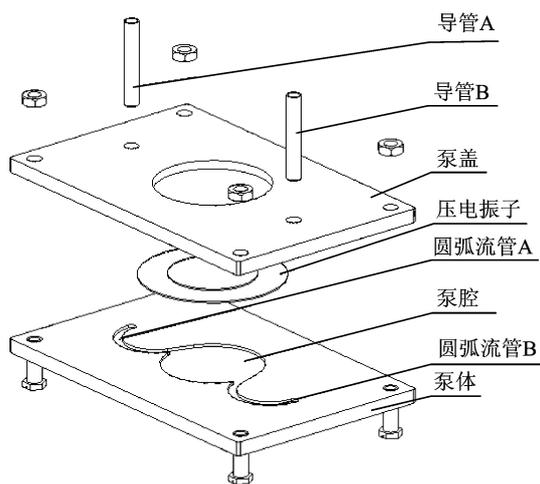


图 2 圆弧形流管无阀压电泵结构图

Fig. 2 Structure of valveless piezoelectric pump with arc tube

圆弧形流管无阀压电泵中流体的单向流动是由于地球自转引起流体在圆弧形流管内顺、逆时针流动时流阻不等的特性制成的。其工作原理如图 3 表示,向压电振子施加交流电压后,压电振子的逆压电效应会使压电振子产生振动,引起泵腔容积周期性增大和减小。

如图 3(a) 所示,当压电振子向上振动时,泵腔容积增大,泵内压强减小,泵腔进入吸程阶段,流体分别从流管 A, B 流入泵腔。此时流体从流管 A 逆时针流入泵腔,流阻系数小;从流管 B 顺时针流入泵腔,流阻系数大。流体从流管 A 流入的流量大于从流管 B 流入的流量,即  $Q_{in A} > Q_{in B}$ , 可表示为

$$Q_{in A} - Q_{in B} = \Delta Q \quad (10)$$

如图 3(b) 所示,当压电振子向下振动时,泵腔容积减小,泵内压强增大,泵腔进入排程阶段,此时,流体从流管 A, B 流出泵腔。流体从圆弧形流管 A 顺时针流出,流阻系数大;流体从流管 B 逆时针流出,流阻系数小,故流体从流管 A 流出的流量小于从流管 B 流出的流量。即  $Q_{out A} < Q_{out B}$ , 即

$$Q_{out A} - Q_{out B} = -\Delta Q \quad (11)$$

显然,式(10)和式(11)中,  $\Delta Q > 0$ , 综合压电振

子振动的一个周期,泵腔经过吸程和排程阶段后,流体在宏观上表现出单向流动,实现从流管 A 流入泵腔,从流管 B 流出泵腔,形成泵的功能。在压电振子一个振动周期内,泵的流量为  $2\Delta Q$ 。

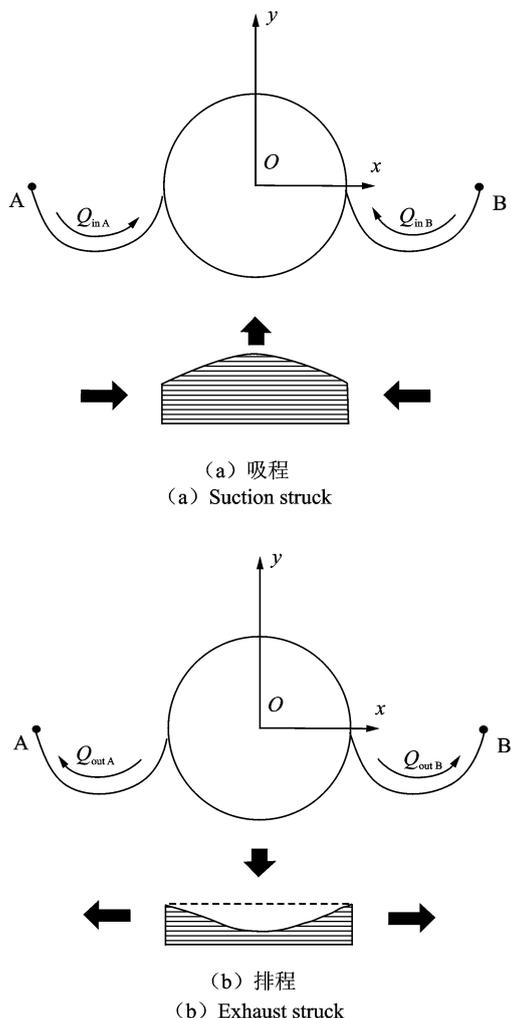


图 3 工作原理图

Fig. 3 The diagram of working process

由于该无阀压电泵的流管为圆弧形,曲管内存在的二次流实现了流体输送和混合搅拌功能,同时压电振子振动时,对流体也形成了混合搅拌功能。因此,圆弧形流管无阀压电泵既能传输流体,又能充分地对流体混合搅拌,有效拓宽了应用领域。

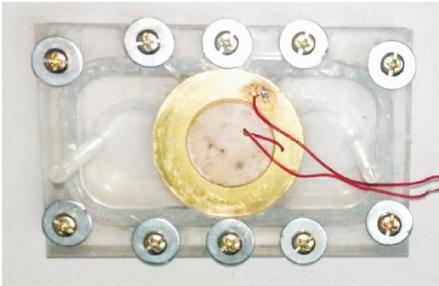
## 3 试验

为研究圆弧形流管无阀压电泵的有效性以及泵压差随驱动频率变化规律,制作了如图 4 所示的样泵。样泵中压电振子几何参数如表 1 所示,圆弧流道的圆弧半径为 12.5 mm,流道高度为 2 mm,宽度为 4 mm。图 5 为泵压差的测量试验示意图,图 6

为实际制作的圆弧形流管无阀压电泵压差测试照, 试验时, 驱动电压峰值为 130 V, 信号发生器中波形幅度为 10 V, 采用的试验介质为蒸馏水。



(a) 主视图  
(a) Front view



(b) 俯视图  
(b) Top view

图 4 圆弧形流管无阀压电泵

Fig. 4 Photo of valveless piezoelectric pump with arc tube

表 1 压电振子几何参数

Tab. 1 Geometrical parameters of piezoelectric vibrator mm

黄铜基底直径	黄铜基底厚度	压电陶瓷直径	压电陶瓷厚度
50	0.2	30	0.2

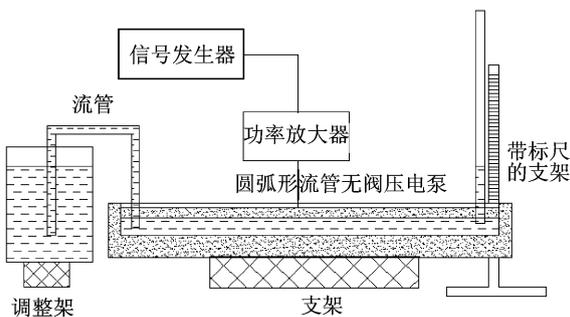


图 5 泵压差测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of back pressure test experiment

在压电泵几何参数一定的情况下, 泵流量正比于进出口端液柱高度差, 由于实际测量压电泵流量时, 容易因重力等其他因素产生测量误差, 为更精确地反映泵流量变化的规律, 本试验采用保证进口端液柱高度基本不变, 测量泵出口端液柱高度差的方法来研究泵流量。试验测得的圆弧形流管无阀压电

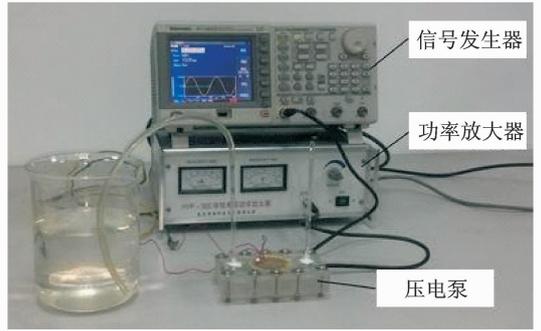


图 6 压电泵压差试验

Fig. 6 Experiment of variation of pressure

泵出口端液柱高度差随驱动频率变化的曲线如图 7 所示。由图 7 可知, 随着压电振子驱动频率从 0 Hz 开始逐渐增大, 压电泵的进出口压差逐渐增加, 当频率达到 14 Hz 时, 压差达到最大值为 17 mm 水柱, 之后随着频率的增大, 泵的进出口压差逐渐减小, 当频率达到 30 Hz 时, 泵压差降至 3 mm 水柱。该组试验证明了圆弧形流管无阀压电泵的有效性, 证明了流体在圆弧形流管中流动时具有顺时针、逆时针方向流阻不等的特性。

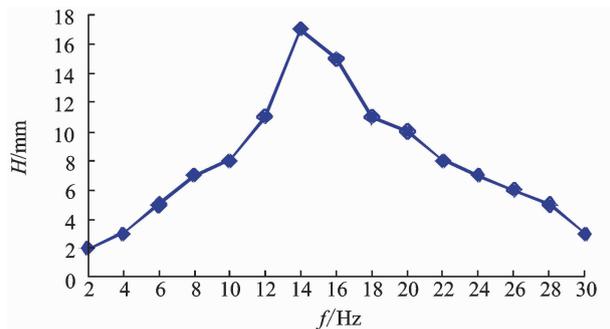


图 7 压电泵压差与驱动频率曲线

Fig. 7 Variation of positive/negative pressure margins with driving frequency

### 4 结束语

笔者设计了一种圆弧形流管无阀压电泵, 该泵中的流体受到驱动压力、哥氏力和离心力的作用, 实现了集流体传输与混合搅拌功能于一体。对流体在圆弧形流管中顺、逆时针流动进行理论分析, 结果表明, 坐标系发生顺、逆时针旋转时, 流体产生了速度差和流量差。

制作了圆弧形流管无阀压电泵样机, 在保持泵进口端液柱高度基本不变的情况下, 测试了压电泵出口端液柱高度差: 压电泵出口端压差随着频率的增大呈先增大后减小的趋势, 当频率为 14 Hz 时, 压

差达到最大值 17 mm 水柱,当驱动频率为 30 Hz 时,压差降至 3 mm 水柱。

试验结果表明:圆弧形流管可以构成无阀压电泵,且泵压差或流量与驱动频率存在对应关系,为圆弧形流管的导航功能研究打下了基础。

### 参 考 文 献

- [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]. Micro-motors, 2005, 38(5): 66-69. (in Chinese)
- [2] 阚君武,宣明,杨志刚,等. 微型药品输送压电泵的性能分析和试验研究[J]. 生物医学工程杂志,2005, 22(4):809-813.  
Kan Junwu, Xuan Ming, Yang Zhigang, et al. Analysis and test of piezoelectric micro-pump for drug delivery [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2005, 22(4): 809-813. (in Chinese)
- [3] 刘国君,程光明,杨志刚. 一种压电式精密输液微泵的试验研究[J]. 光学精密工程,2006,14(4):612-616.  
Liu Guojun, Cheng Guangming, Yang Zhigang. Experimental research on a piezoelectric micro-pump for precision pumping [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 612-616. (in Chinese)
- [4] Xia Qixiao, Zhang Jianhui, Lei Hong, et al. Theoretical analysis and experimental verification on flow field of piezoelectric pump with unsymmetrical slopes element[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(5): 735-744.
- [5] 黄俊,张建辉,王守印. 变截面“Y”型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 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] Ivano I, Dino A, Arianna M, et al. Modeling and experimental validation of a piezoelectric micropump with novel no-moving-part valves [J]. Sensors and Actuators A, 2002, 37(6): 323-328.
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] Xia Qixiao, Zhang Jianhui, Lei Hong, 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, 2012, 25(3):474-783.
- [9] Anders P. How do we understand the Coriolis force? [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(7): 1373-1385.
- [10] Dean W R. Note on the motion of fluid in a curved pipe [J]. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine, 1927, 4(7): 208-223.
- [11] Leng Xuefei, Zhang Jianhui, Jiang Yan, et al. Theory and experimental verification of spiral flow tube-type valveless piezoelectric pump with gyroscopic effect[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2013, 195:1-6.
- [12] 孙学成. 平面螺旋流管无阀压电泵的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [13] 姜燕. 新型螺线流管型陀螺原理与实验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [14] Leng Xuefei, Zhang Jianhui, Zhao Chunsheng. A spiral-tube-type valveless piezoelectric pump with gyroscopic effect [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(16): 1885-1889.



**第一作者简介:**唐娟,女,1974年6月生,副教授。主要研究方向机械设计及制造和压电作动器。曾主编《数控车编程与操作实训教程》(上海:上海交通大学出版社,2010年)等论著。  
E-mail: njhkhtj@163.com

