

文章编号 1004-924X(2007)07-1044-05

# 单振子双腔体无阀压电泵结构与机理分析

吴丽萍<sup>1,2</sup>,程光明<sup>1</sup>,曾平<sup>1</sup>,杨志刚<sup>1</sup>,吴银柱<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院,吉林 长春 130025;2. 长春工程学院,吉林 长春 130012)

**摘要:**提出了一种单振子双腔体无阀压电泵,应用小挠度弹性弯曲理论导出了圆形复合压电振子的弹性曲面微分方程,分析了采用一个压电振子形成两个工作腔体压电泵的结构和工作机理,并与单振子单腔体压电泵对比分析了该结构与输出流量的关系。设计研制了结构独特、输出性能更高的单振子双腔体无阀压电泵,通过试验表明:单振子双腔体无阀压电泵比单振子单腔体无阀压电泵输出流量有明显提高。

**关键词:**单振子双腔体;无阀压电泵;机理分析;输出流量

**中图分类号:**TH38;TN384 **文献标识码:**A

## Structural design and mechanism analysis of a valveless piezoelectric pump with single bimorph and double chambers

WU Li-ping<sup>1,2</sup>, CHENG Guang-ming<sup>1</sup>, ZENG Ping<sup>1</sup>, YANG Zhi-gang<sup>1</sup>, WU Yin-zhu<sup>2</sup>

(1. *College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;*  
2. *Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China*)

**Abstract:** A valveless piezoelectric pump with single bimorph and double chambers was put forward for improving its flow rate. Some elastic curved surface differential equations of circular piezoelectric composite laminates were derived from the theory on the elastic thin plate bending with small deflection. The structure and working principle of the piezoelectric pumps consisted of one PZT bimorph to fabricate two chambers were introduced. The relations of structure and flow rate were analyzed by comparing with the single bimorph and single chamber piezoelectric pump. The valveless piezoelectric pump with single bimorph and double chambers was designed and fabricated. It has unique structure and high flux output. Experimental results show that the flow rate of piezoelectric pump with single bimorph and double chambers is obviously improved comparing with the flux output of the single bimorph and single chamber piezoelectric pump.

**Key words:** single bimorph and double chambers; valveless piezoelectric pump; principle; flow rate

## 1 引言

传统的流体泵由电磁机械或电机驱动,受其工作原理和结构限制很难实现微小流量的控制。20世纪70年代压电泵作为一种新型的流体泵得到有关研究人员的重视。压电泵利用压电片或压电叠堆作为流体传输的驱动器,将传统泵的驱动源、传动系统及泵体三部分合为一体,具有结构简单、体积小、质量轻、无电磁干扰、耗能低等特点。压电泵根据阀的结构可分为有阀压电泵(悬臂梁阀、球阀、浮动阀等)<sup>[1-3]</sup>和无阀压电泵(锥形管、异型管、温控阀等)<sup>[4-6]</sup>。与有阀压电泵相比,无阀泵结构简单,主要由压电振子和泵体两部分组成,泵体与压电振子形成腔体,压电振子产生振动使腔体体积发生改变,没有单向阀,利用进、出水口的结构不同,通过收缩管/扩张管流体流阻不等的特性来实现流体的单向流动,因此无阀压电泵在输送带悬浮颗粒的液体中具有重要作用。

本文从提高压电泵输出流量角度出发,在对单振子单腔体无阀压电泵的组成结构、工作原理和输出性能等分析的基础上,从驱动部分入手,充分利用压电振子产生的变形,有效利用压电振子在一个周期内做功的次数,提高其工作效率。将压电振子绝缘处理后,利用其两个侧面与泵体构成的两个腔体作为工作腔,设计研制了一种新颖、结构简单、输出性能更高的单振子双腔体无阀压电泵。

## 2 圆形复合压电振子的弹性曲面微分方程

由于压电陶瓷本身硬且脆,所产生的位移或力很小,因而压电陶瓷本身不能直接作为压电振子,通常将压电陶瓷与某种金属弹性材料粘接在一起共同构成振动体,该振动体被称为复合压电振子。本文采用将压电陶瓷粘接在金属基板上构成圆形复合压电振子作为压电泵的驱动元件。圆形复合压电振子坐标的选取及其结构如图1所示。

图中 $r_1$ 和 $h_1$ 分别为复合压电振子金属基板的半径和厚度; $r_2$ 和 $h_2$ 分别为压电陶瓷的半径和

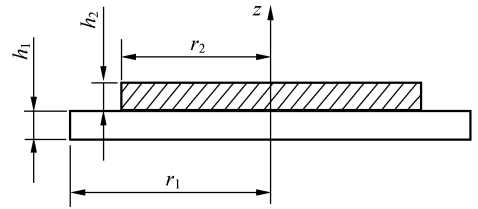


图1 圆形复合压电振子

Fig. 1 Circular piezoelectric composite laminate

厚度; $z$ 轴为圆形复合压电振子的对称轴。根据小挠度弹性弯曲理论以及复合压电振子的结构形式作如下假设<sup>[7]</sup>:

- (1) 将圆形复合压电振子视为径向对称薄板;
- (2) 压电振子的金属基板与压电陶瓷薄膜在接触面处牢固粘合,粘接处应力分量与应变分量是连续的,忽略粘合剂对整个复合压电振子的力学性能的影响;
- (3) 圆形复合压电振子发生变形属于完全弹性变形且表现为各向同性,极化方向垂直于基板表面 $z$ 方向;
- (4) 压电陶瓷中电场强度沿厚度方向是均匀的。

根据克希霍夫假设<sup>[8]</sup>,圆形压电振子薄板小挠度弯曲变形的应变与挠度的几何方程为

$$\epsilon_r = \frac{du_r}{dr} = -\frac{d^2w}{dr^2}z, \quad (1)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{u_r}{r} = -\frac{1}{r} \frac{dw}{dr}z. \quad (2)$$

式中: $u_r$ 为径向位移; $w$ 为 $z$ 方向变形位移,即挠度; $\epsilon_r$ 为径向应变分量; $\epsilon_\theta$ 为环向应变分量。

圆形复合压电振子薄板的应力 $\sigma$ 、应变 $\epsilon$ 及电场 $E$ 关系的压电方程为

$$\sigma_r = \frac{c}{1-\mu^2}(\epsilon_r + \mu\epsilon_\theta) - \frac{cd_{31}}{1-\mu}E, \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{c}{1-\mu^2}(\mu\epsilon_r + \epsilon_\theta) - \frac{cd_{31}}{1-\mu}E. \quad (4)$$

其中: $d_{31}$ 为压电应变常数, $c$ 为压电陶瓷的弹性模量, $\mu$ 为压电陶瓷的泊松比, $E$ 为施加在压电振子上的电场强度,从而得出弯矩和载荷表示的平衡方程为

$$\frac{d^2M_r}{dr^2} + \frac{d}{dr} \left( \frac{M_r - M_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{dM_r}{dr} + \frac{M_r - M_\theta}{r^2} + p = 0, \quad (5)$$

圆形复合压电振子薄板的弹性曲面的微分方程为

$$D\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}\right) + \nabla^2 w = q_E + p, \quad (6)$$

$$\text{其中: } D = \frac{c(Z_2^3 - Z_1^3)}{3(1 - \mu^2)}$$

$$\nabla^2 w = \frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr}$$

$$M_E = \frac{cd_{31}}{1 - \mu} \int_{z_1}^{z_2} EZ dz$$

$$q_E = \nabla^2 M_E = \frac{d^2 M_E}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dM_E}{dr}$$

$$= -\frac{cd_{31}}{1 - \mu} \int_{z_1}^{z_2} z \left( \frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} \right) dz$$

$q_E$  为逆压电效应的等效横向荷载,  $p$  为液体对压电泵膜的压强。

### 3 单振子单腔体无阀压电泵工作原理

基于锥形管型无阀压电泵工作原理设计并制作了单振子单腔体无阀压电泵,其工作过程为:压电振子在正弦交变信号的作用下,产生弯曲变形,当压电振子向右凸起时,左侧腔体容积增大,压力减小,流体在外界大气压作用下由进水口进入腔体;随后,压电振子从右侧最大变形处恢复到初始平衡状态,并向左侧凸起变形,左侧腔体容积由最大状态逐渐变为最小状态,腔体内压力增大,且大于外界大气压,流体在压力差作用下,由出水口排出;与此同时,有少量的流体从进水口排出,随后压电振子又回到初始平衡状态,这样就实现了一个完整的吸水、排水全过程。如此反复形成了无阀压电泵的不断排水。

从单振子单腔体无阀压电泵的结构和工作过程分析来看,只是利用压电振子的一个侧面与泵体构成的腔体作为工作腔,另一侧面因粘贴了压电陶瓷和连接导线,通电时,不能与水直接接触,虽与泵体也构成了腔体,但不能作为压电泵的工作腔。经过绝缘处理后,避免了上述缺点,充分利用了压电振子两个侧面分别与泵体构成两个工作腔,提高了压电泵的工作效率。本文在单振子单腔体无阀压电泵的基础上,设计制作了单振子双腔体无阀压电泵,

### 4 单振子双腔体无阀压电泵结构和工作机理

单振子双腔体无阀压电泵结构如图 2 所示,其结构采用左右对称形式。

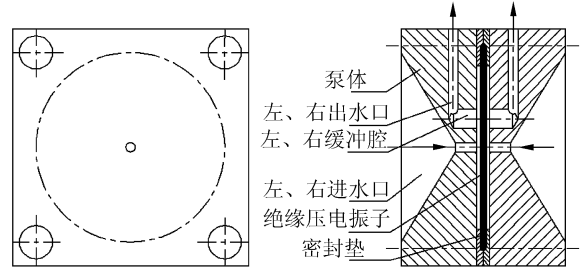


图 2 单振子双腔体无阀压电泵结构简图

Fig. 2 Structural schematics of valveless piezoelectric pump with single bimorph and double chambers

由图 2 可看出,当向绝缘压电振子施加正弦交变电压信号时,周边被固定的压电振子产生弯曲变形,绝缘压电振子与泵体形成的两个腔体体积发生变化。压电振子在整个周期变形过程中,单振子双腔体压电泵左、右出水口一直在交替排水,同时左、右进水口一直在交替进水。即一个振动周期内,吸水两次、排水两次,也就是在左进水口吸水的同时,右出水口进行排水,反之亦然,吸水与排水同时进行,使吸水、排水周期缩短一倍。单振子单腔体压电泵,当压电振子向左、右弯曲变形,即一个振动周期内,吸水一次,排水一次。因此理论上单振子双腔体压电泵输出流量比单振子单腔体压电泵的输出流量提高一倍。

由于单振子双腔体压电泵在一个振动周期内,吸水两次、排水两次,缩短了吸水和排水的周期,即利用两个腔体交叉工作,一个腔体输出,紧接另一腔体输出,使输出流体形成一个输出流,从而实现连续低脉动输出,避免了一个工作周期内,半个周期腔体吸入流体,没有输出;半个周期排出流体,但没有吸入流体,尤其是在低频率工作时,出流断续,冲击大、不平稳、脉动输出严重。使输出流量由波动趋于平稳,减小输出脉冲,提高了输出流量,从而提高了压电泵工作效率。

### 5 双腔体与单腔体压电泵瞬时流量对比分析

单振子双腔体无阀压电泵在一个周期内可完成两次吸入、两次排出工作过程,双腔体压电泵的理论瞬时流量是两个单腔体压电泵的理论瞬时流量的叠加值,其合成曲线按正弦曲线规律变化。如图 3(a)、(b)所示分别为单振子单腔体、单振子双腔体无阀压电泵的理论瞬时流量曲线图。图中以横坐标代表压电振子一个完整的振动周期,纵坐标代表理论瞬时流量和理论平均流量,并可直观地看出压电泵的最大理论瞬时流量和最小理论瞬时流量与压电振子变形的关系。在压电振子变形达到最大时,瞬时流量值也达到最大;在压电振子变形恢复到平衡位置时,瞬时流量值达到最小。

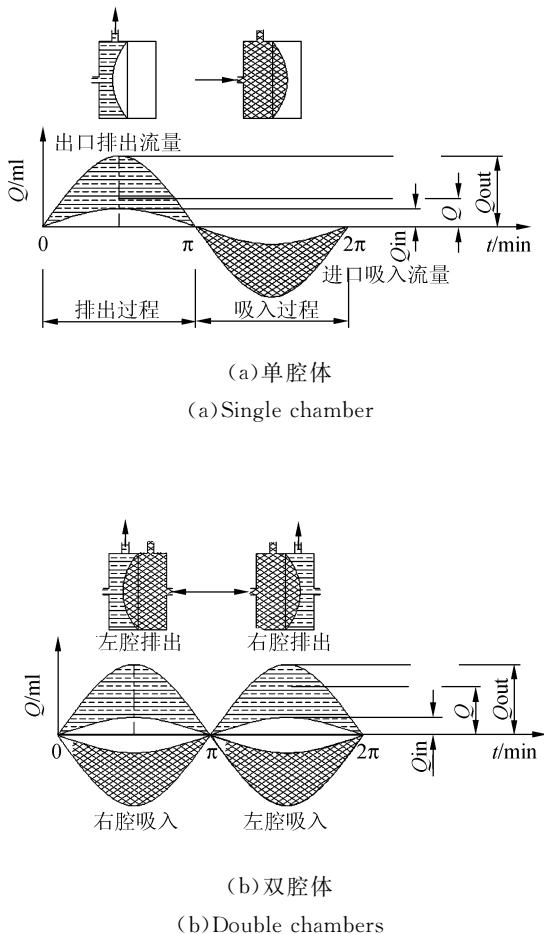


图 3 压电泵的理论瞬时流量曲线

Fig. 3 Theoretic instantaneous curve of flow rate

由图 3(a)可以看出,在一个周期内,单振子单腔体无阀压电泵在  $0 \sim \pi$  周期内有流量输出;在  $\pi \sim 2\pi$  周期内没有流量输出。在整个周期内平均输出流量为  $Q = (Q_{out} - Q_{in}) / 2$ 。

由图 3(b)可以看出,在一个周期内,单振子双腔体无阀压电泵在  $0 \sim \pi$  周期内左腔体输出流量;在  $\pi \sim 2\pi$  周期内右腔体输出流量。在整个周期内平均输出流量为  $Q = (Q_{out} - Q_{in})$ 。通过分析得出,单振子双腔体无阀压电泵平均输出流量比单振子单腔体无阀压电泵平均输出流量提高一倍。

### 6 双腔体与单腔体压电泵输出流量实验对比

为了便于实验比较,分别制作了尺寸、材料、压电振子等参数相同的单振子单腔体和单振子双腔体压电泵的实验样机。实验所用仪器:AG1200 信号发生器、7058 功率放大器、LV-1610 多普勒激光测试仪、CF5220 傅里叶分析仪等。由图 4 看出:在 110 V, 250 Hz 下,双腔体是单腔体压电泵输出流量的 1.82 倍,而且单腔体与双腔体最佳输出流量范围较宽,在 190~280 Hz,单振子双腔体是单腔体压电泵输出流量的 1.6~1.8 倍,可见,在提高驱动电压的前提下,双腔体比单腔体压电泵输出流量有明显提高。此外,在测定流量实验中,发现双腔体流量的输出脉动小,输出流更加平稳。

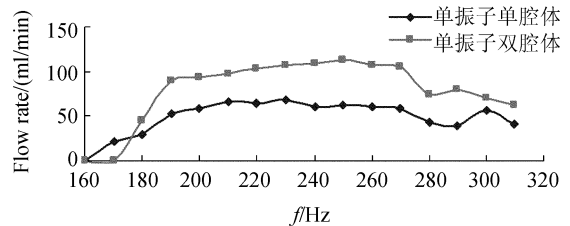


图 4 单腔体与双腔体压电泵输出流量对比曲线  
Fig. 4 Comparison of flow rates double chambers with single chamber

### 7 结束语

利用小挠度弹性弯曲理论给出了圆形复合

压电振子的弹性曲面微分方程;提出了单振子双腔体无阀压电泵的结构,并通过与单振子单腔体压电泵在结构和工作机理上的对比分析,确认单振子双腔体无阀压电泵在一个周期内可完成两次吸入、两次排出工作过程,比单振子单腔体压电泵

理论上输出流量提高一倍,进一步通过实验研究证明单振子双腔体无阀压电泵比单振子单腔体无阀压电泵输出流量有明显提高,而且实现了连续低脉动输出,提高了压电泵工作效率。

#### 参考文献:

- [1] LI H Q, RIBERTS D C, STEYNJ L, *et al.*. A high frequency high flow rate piezoelectrically driven MEMS micropump [C]. *Proceeding IEEE Solid State Sensors and Actuators Workshop Hilton Head*, 2000.
- [2] 曾平,程光明,刘九龙,等. 双腔薄膜阀压电泵的实验研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3): 312-313.  
ZENG P, CHENG G M, LIU J L, *et al.*. Experimental research on double-chambered piezoelectric pump with membrane valves [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 312-313. (in Chinese)
- [3] 孙晓锋,杨志强,刘晓论,等. 整体开启阀与悬臂梁阀压电泵性能研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 648-651.  
SUN X F, YANG ZH Q, LIU X L, *et al.*. Performance research on piezoelectric pumps based on holistic opening valve and cantilever valve [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 648-651. (in Chinese)
- [4] 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 J, WU B D, CHENG G M, *et al.*. The principle of diffuser/nozzle based valveless piezoelectric pump [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2000, 22 (6): 376-378. (in Chinese)
- [5] 阙君武,彭太江,唐可宏,等. 两腔压电泵结构与特性[J]. *压电与声光*, 2006, 28(1): 39-40.  
KAN J W, PENG T J, TANG K H, *et al.*. The structure and performance of double-chamber piezoelectric pumps [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2006, 28(1): 39-40. (in Chinese)
- [6] 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 G J, CHENG G M, YANG ZH G. Experimental research on a piezoelectric micro-pump for precision pumping [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 612-616. (in Chinese)
- [7] 贾建援,黄新波,康春霞. 微泵的结构与流体分析[J]. *微纳电子技术*, 2004, 41(5): 41-44.  
JIA J Y, HUANG X B, KANG CH X. Analysis on the structure and hydrokinetics of micropump [J]. *Micronano-electronic Technology*, 2004, 41(5): 41-44. (in Chinese)
- [8] 曲庆璋,梁兴复. 弹性理论[M]. 北京:冶金工业出版社,1997.  
QU Q ZH, LIANG X F. *Elastic Theory* [M]. Beijing: Metallurgy Industry Publisher, 1997. (in Chinese)

作者简介:吴丽萍(1965—),女,河北石家庄人,吉林大学机械科学与工程学院博士生,长春工程学院副教授,主要从事机械设计、压电驱动与控制技术的教学、科研工作。E-mail: wzywlp@163.com