

# 流体附加阻尼及其对微型泵输出性能的影响

阚君武, 彭太江, 董景石, 杨志刚, 吴博达

(吉林大学机械科学与工程学院, 130025, 长春)

**摘要:** 为提高微型泵的输出能力, 从理论上分析了流体对薄膜驱动器动态特性的影响规律, 建立了流体作用力及附加阻尼的计算模型. 通过理论分析, 说明减小流体黏度、增加腔体高度和阀孔直径会降低流体附加阻尼和减小流体对驱动器的反作用力, 从而可提高泵的最佳工作频率和输出流量. 设计制作了压电泵, 并进行了试验, 以水和空气为介质测试的压电振子的基频分别为 49.6 Hz 和 2.72 kHz, 说明流体黏度对薄膜驱动器的基频有很大影响. 试验结果表明, 流体黏度的增加会降低驱动器的基频, 增加阀孔直径可提高泵的输出流量和最佳工作频率.

**关键词:** 微型泵; 附加阻尼; 液体作用力

**中图分类号:** TH39 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)05-0548-03

## Liquid Added Damping and Its Influence on the Output Performance of Micropumps

Kan Junwu, Peng Taijiang, Dong Jingshi, Yang Zhigang, Wu Boda

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

目前, 国内外对微型薄膜泵的研究大多只是对驱动器进行动态分析, 而未考虑流体对驱动器性能的影响, 但是这种影响在实际中是存在的<sup>[1]</sup>, 因此理论分析的结果误差很大. Tikeswar Naik<sup>[2]</sup>通过对水中悬臂梁动态响应的研究证明, 流体对悬臂梁动态特性的影响程度不仅受流体密度、黏度的影响, 还与结构尺寸有关. 这说明流体是通过与结构的耦合而发生作用的, 因而泵的腔体高度和阀孔直径变化都可能对驱动器的动态特性产生影响. 因此, 流体阻尼是造成微型泵的最佳工作频率普遍较低(有些仅为几赫兹或十几赫兹<sup>[3]</sup>, 远低于驱动器在空气中的基频)的主要原因之一.

本文根据流体力学理论, 分析了流体阻尼对薄膜驱动器动态性能的影响规律, 建立了流体附加阻尼与腔体高度、阀孔直径的关系式, 并以压电泵为例进行了试验验证.

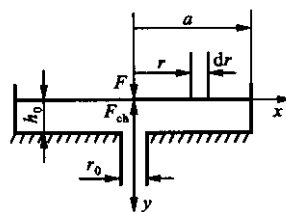
### 1 微型泵的简化模型

微型泵的最大特点是利用薄膜驱动器作往复弯

曲变形, 以改变泵腔内的流体压力, 带动单向阀的开启与闭合, 进而实现流体的传输. 由于薄膜驱动器的变形量很小(仅有数十微米), 因此可将其弯曲振动视为刚性平板的平动, 其结构可简化成图 1 所示的形式. 为便于分析, 薄膜驱动器通常被视为有限个不同刚度系数的弹簧<sup>[4]</sup>, 它与流体组成一个稳态的受迫振动系统<sup>[5]</sup>, 则驱动器的动力学方程

$$M\ddot{y} + ky = F\sin(\omega t) - F_{ch} \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为频率;  $t$  为时间;  $k$  为驱动器的等效刚度;



$y$ : 驱动器的等效振动位移;  $F$ : 驱动器的驱动力;  $F_{ch}$ : 与吸入和排出过程相关的泵腔内流体阻力;  $r$ : 薄层上的任意半径;

$h_0$ : 腔体的高度;  $a$ : 薄膜驱动器半径;  $r_0$ : 阀孔半径

图 1 微型泵的简化模型

$M$  为驱动器的等效质量。

## 2 流体阻力的计算

当腔体高度较小时,泵腔内流体属于间隙流,且呈轴对称径向流动。假设泵腔体内流体截面沿径向为不可压缩流,流体运动仅发生在径向平面内(不考虑  $y$  方向流体运动速度和同一半径处流体的周向运动),即为二维不可压缩流。在  $r$  处取一薄层  $dr$ ,此薄层展开后近似为宽度为  $2\pi r$  的平行板间隙流动,则流体沿径向的压力梯度为<sup>[6]</sup>

$$dp = -\frac{12\mu q_V}{2\pi r h_0^3} dr \quad (2)$$

式中: $q_V$  是通过任意半径处柱面的流量,它等于  $r$  以外流体被挤压出去的流量,即  $q_V = \pi(a^2 - r^2)\dot{y}$  (其中  $\dot{y} = \omega A_w \cos(\omega t)$ ,  $A_w$  为驱动器的振幅)。将式(1)积分,得到泵腔内流体压力的分布函数

$$p = p_0 + \frac{3\mu\dot{y}}{h_0^3} \left[ 2a^2 \ln \frac{r}{r_0} - r^2 + r_0^2 \right] \quad (3)$$

式中: $p_0$  是泵的进出口压力。在任意半径处取面积元素  $ds = 2\pi r dr$ ,将式(3)积分得到

$$F_{ch} = \int_0^a p ds = \frac{6\mu\pi\dot{y}}{h_0^3} \cdot \left( a^4 \ln \frac{a}{r_0} - \frac{1}{4} (3a^2 + r_0^2)(a^2 - r_0^2) \right) \dot{y} + 2\pi a^2 p_0 \quad (4)$$

式(4)表明,驱动器所受的流体阻力包括 2 部分,其中的常数项是由进出口压力决定的,一次项是速度的函数,其系数为流体的阻尼系数,即

$$c = \frac{6\mu\pi a^4}{h_0^3} \left[ \ln \frac{a}{r_0} - \frac{(3a^2 + r_0^2)(a^2 - r_0^2)}{4a^4} \right] \quad (5)$$

由式(5)可知,阻尼系数与腔体高度的 3 次方成反比,与驱动器直径的 4 次方成正比,随阀孔与驱动器的半径比成对数增加。将式(5)代入式(1),整理得到驱动器的动力学方程为

$$M\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F \sin(\omega t) - 2\pi a^2 p_0 \quad (6)$$

根据上式及振动分析理论,驱动器的振幅和基频分别为

$$A_w = \frac{F - 2\pi a^2 p_0}{M((\omega_a^2 - \omega^2)^2 + (c/M)^2 \omega^2)^{1/2}} \quad (7)$$

$$\omega_w = \omega_a (1 - (c/2(Mk)^{1/2})^2)^{1/2} \quad (8)$$

式中: $\omega_a = (k/M)^{1/2}$  为驱动器在空气中的基频。

由于微型泵的输出流量  $Q \propto A_w f$  ( $f < f_w$ ,  $f$  是工作频率,  $f_w = \omega_w/2\pi$ ),因此当阻尼系数降低时,泵的最佳工作频率和输出流量会增加。进口或出口压力通过改变振幅而影响流量,但对最佳工作频率无

影响。

## 3 试验与分析

制作了一组阀孔尺寸不同的压电泵,测试了相同工作条件下泵输出能力与阀孔直径间的关系,虽然增加腔体高度可减小流体阻力,但考虑到过大的腔内高度会增加空气含量和降低压缩比,导致输出压力下降<sup>[6]</sup>,因此试验中取压电振子的变形量作为腔体高度(0.1 mm),以保证获得最大的腔体压缩比和自吸性。

首先,利用阻抗分析仪测试同一个压电泵(阀孔直径为 2 mm)在泵送水和空气时的驱动器基频。当泵送水时,驱动器的基频仅为 49.6 Hz,远低于泵送空气时的基频 2.17 kHz,证明了流体黏度是影响驱动器动态特性的一个关键因素。然后,以水为工作介质,测得的输出流量与阀孔直径的关系如图 2 所示。从图中曲线的变化趋势可以看出,压电泵的最佳工作频率和输出流量均随阀孔的直径增加而单调增加,当阀孔的直径为 1 mm 时,压电泵的最佳工作频率和流量分别为 30 Hz 和 18.5 mL/min。当阀孔直径为 5 mm 时,压电泵的最佳工作频率和流量分别增加到 130 Hz 和 103 mL/min,这与理论分析结果是定性吻合的。当阀孔直径为 2 mm、压电泵的最佳工作频率在 60 Hz 附近时,接近利用阻抗分析测得的压电振子的基频 49.6 Hz,这说明压电泵的最佳工作频率即为相同工作条件下压电振子的基频。

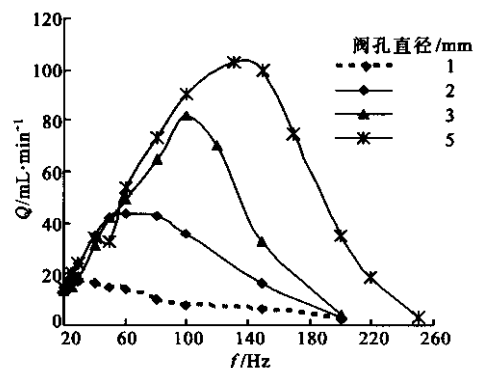


图 2 输出流量与频率的关系

## 4 结论

本文从理论上分析了流体对微型泵驱动器及输出特性的影响规律,给出了薄膜驱动器所受流体作用力及流体附加阻尼的计算方法,制作了不同阀孔直径的微型泵,并进行了试验研究。试验结果表明,

微型泵的最佳工作频率即为驱动器在相同工作条件下的基频。流体黏度及阀孔直径对泵的输出性能均有较大的影响,增加泵的阀孔直径有助于提高微型泵的输出流量和最佳工作频率,而且这与理论分析的结果也是一致的。

#### 参考文献:

- [1] Pan L S, Ng T Y, Liu G R, et al. Analytical solutions for the dynamic analysis of a valveless micropump—a fluid-membrane coupling study [J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, 93(2): 173-181.
- [2] Tikeswar N, Ellen K L, Susan C M. Dynamic response of a cantilever in liquid near a solid wall [J].

*Sensors and Actuators A*, 2003, 102(3): 240-254.

- [3] Stemme E, Stemme G. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump [J]. *Sensors and Actuators A*, 1993, 39(2): 159-167.
- [4] Olivier F, Isabelle D. Dynamic simulation of an electrostatic micropump with pull-in and hysteresis phenomena [J]. *Sensors and Actuators A*, 1998, 70(1-2): 56-60.
- [5] 阚君武. 悬臂梁阀压电泵的设计理论与试验研究 [D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2003.
- [6] 张也影. 流体力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1986, 239-240.

(编辑 管咏梅)

(上接第 543 页)

## 4 结 论

本文采用摄动分析的方法研究了微尺度条件下壁面粗糙度对流场的影响。研究表明,壁面相对粗糙度和粗糙元间距是影响微尺度流场结构的主要因素。相对粗糙度的改变将对扰动流函数峰值的大小产生影响,但不影响流场受扰区域的大小。改变粗糙元间距,即改变壁面粗糙曲线的空间波数,对抗扰动流函数的峰值及受扰区域的大小都有影响。研究表明,雷诺数的变化对流场扰动的发展也存在一定的影响,但影响较小。由于壁面粗糙元的存在,流场的近壁区出现明显的涡结构,这有助于揭示出微尺度与宏观尺度下的流动存在较大差别的内在机理。

#### 参考文献:

- [1] Wu P Y, Little W A. Measurement of the friction factors for flow of gases in very fine channels used for micro-miniature Joule-Thomson refrigerators [J]. *Cryogenics*, 1983, 23(5): 273-277.
- [2] Mala G M, Li D Q. Flow characteristics of water in microtubes [J]. *Int J Heat Fluid Flow*, 1999, 20(1): 142-148.
- [3] Qu W L, Mala G M, Li D Q. Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels [J]. *Int J*

*Heat Mass Transfer*, 2000, 43(3): 353-364.

- [4] Hu Y D, Werner C, Li D Q. Influence of three dimensional roughness on pressure-driven flow through micro channels [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2003, 125(4): 871-879.
- [5] 王 玮, 李志信, 过增元. 粗糙表面对微尺度流动影响的数值分析 [J]. *工程热物理学报*, 2003, 24(1): 85-87.
- [6] Kleinstreuer C, Koo L. Computational analysis of wall roughness effects for liquid flow in micro-conduits [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2004, 126(1): 1-9.
- [7] Van Dyke M. *Perturbation methods in fluid mechanics* [M]. New York: Academic Press, 1964.
- [8] Bontozoglou V, Papapolymerou G. Laminar film flow down a wavy incline [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1997, 23(1): 69-79.
- [9] Tözere H. Drag on eccentrically positioned spheres translating and rotating in tubes [J]. *J Fluid Mech*, 1983, 129(4): 77-90.
- [10] 李家春, 周显初. *数学物理中的渐进方法* [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] 陈矛章. *粘性流体动力学基础* [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.

(编辑 王焕雪)