

文章编号 1004-924X(2006)05-0858-04

压电薄膜喷流泵研究

李欣欣,方科,程光明,杨志刚,曾平

(吉林大学机械科学与工程学院,吉林长春130025)

摘要:将压电流体驱动技术和仿生技术、喷流推进技术结合,提出了一种新型的压电喷水推进装置,并对该装置的核心部件—压电喷流泵进行了研究。详细分析和介绍了泵的结构及工作原理,设计制作了实验用样机,并进行了性能测试。实验测试表明,该泵工作性能稳定,喷流量大,在正弦信号激励下,电压为190 V,工作频率为140 Hz时,最大喷流量可达到714 ml/min。

关键词:压电薄膜;喷流泵;喷水推进;压电振子

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Study on piezoelectric jet pump

LI Xin-xin, FANG Ke, CHENG Guang-ming, YANG Zhi-gang, ZENG Ping

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

Abstract: In combination with the hydro-piezoelectric drive, bionics and water-jet thrust technology, a novel piezoelectric water-jet thrust was introduced, and the core of the thrust—piezoelectric jet pump was studied. The design, principal, process and performance of the pump jet were presented, and a prototype pump was designed and manufactured in the laboratory. Through a series of experiments and tests, It is concluded that the piezoelectric pump jet is characterized by stable performance and bulky volume of liquid flow, the optimization frequency is 1250 Hz. With the sine wave signal actuated, the maximum liquid flow rate of the pump jet is 714 ml/min when driving voltage is 190 V.

Key words: piezoelectric membrane; jet pump; water-jet thrust; PZT actuator

1 引言

最早的喷水推进装置是1661年由英国人图古德和海斯发明的,但是直到1839年英国人摩里斯·思凡发明的一种喷水推进装置才较为成熟。20世纪70年代以来,世界各国对影响喷水推进性能的各种因素做了大量的实验研究,使得喷水

技术有了较大的发展^[1]。由国内外关于喷水推进技术研究情况分析,喷水推进方式在近几年已经成为一种重要的推进技术得到国内外广泛重视,并在实际应用中得到较大的发展,且具有较光明的发展前景。从目前的喷水推进技术研究情况来看,喷水推进是通过推进泵产生推力,利用泵喷出水流的反作用力推动船舶前进。所以,泵作为推进的动力源在喷水推进技术中居于重要的地

收稿日期:2006-01-16;修订日期:2006-07-18.

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划基金(No. 2002AA431250)

位。目前喷水推进装置中采用的推进泵是轴流泵和导叶式混流泵^[2],这种泵可以产生较大的输出功率,但是需要较大的原动机和工作机构(泵装置),对于小功率的微型推进装置,这样的喷水推进器结构过大。对此,本文提出利用压电泵结构紧凑(压电元件既是原动机又是工作机)、单位体积输出能量高、无电磁干扰、可控性好等特点,探讨研制采用压电驱动的流体泵作为喷水推进装置的推进器,形成具有新意的微型喷水推进装置的研究设想,扩大喷水推进装置的应用范围,同时为压电泵的应用提供新的领域。本文分析了压电喷水推进装置的核心部件—压电喷流泵的工作原理,并对其性能进行了实验研究。

2 喷流泵的结构设计与工作原理

压电喷流泵结构如图 1 所示,压电喷流泵的入口采用单向阀元件,为提高喷流性能,出口处采用无阀直通结构。泵的整体尺寸为 50 mm×50 mm×10 mm,入口和出口直径分别为 10 mm、3.4 mm。振子为压电复合板,由压电陶瓷圆片和铜片粘结而成,采用简支方式固定。工作时对压电振子施加交流电信号,在电信号作用下,压电晶体产生径向收缩、伸长振动变形,带动压电振子产生向上、向下的弯曲变形,从而使泵腔容积发生改变^[3]。流量是压电泵重要的性能指标之一,而阀片的结构和材料对流量的影响起着重要作用。由文献^[4]可知,采用整体开启橡胶阀的压电泵输出流量明显优于不完全开启悬臂梁阀的压电泵。为此,设计的压电喷流泵入口采用了整体开启橡胶阀结构。

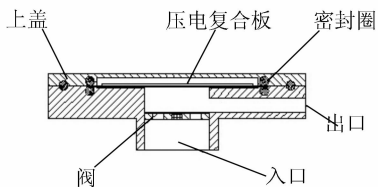


图 1 压电喷流泵的结构示意图

Fig.1 Schematic of piezoelectric pump jet

压电薄膜振动时,变形为抛物面状态,薄膜中心点的变形量最大。因此,喷流泵工作时,薄膜中心正下方所获得的压力差是最大的。故在设计阀

腔时,将阀腔置于薄膜中心正下方,阀片可以获得比较大的开度和较高响应。

流量是喷流泵重要的性能指标之一,而阀片的结构和材料对流量的影响起着关键作用。由文献^[3]可知,采用整体开启橡胶阀压电泵的输出流量明显好于不完全开启悬臂梁阀压电泵阀片。

根据文献^[5],压电泵要具有自吸能力,其压缩比应满足 $\zeta = \Delta V/V_0 > 0.075$ 。式中 ΔV 是工作时泵腔体积的变化量; V_0 是喷流泵初始的泵腔体积。为了尽可能降低流道阻力对喷流性能的影响,提高喷流效率,出口处采用无阀直通结构。边界支撑条件是影响压电薄膜振动幅度的主要因素,喷流泵用压电薄膜采用柔性简支支撑方式,以获得较大变形量。

工作时将喷流泵置入水中,此时,压电振子向上弯曲振动时腔体体积增大,入口阀片打开,流体从出口和入口流道进入腔体;当压电振子向下弯曲振动时,入口阀关闭,流体由出口喷射。如此循环往复,宏观上实现了流体从进口到出口的单向流动。

3 喷流泵管内压强分布

喷流泵通过压电薄膜振动引起腔体容积变化,致使腔内压强变化,达到喷射目的。由于固体与流体的耦合作用,压电薄膜的周期性振动必然使流体的流场也随时间发生改变,即运动中流体质点的物理量随时间的改变而改变。因此,对于喷流泵的流体动力学分析属于非定量流体分析范畴。

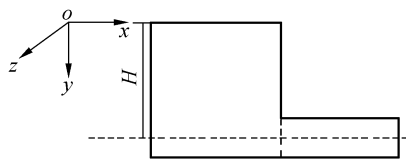


图 2 孔口出流原理

Fig.2 Principle on fluid flow of orifice

为简便起见,只分析喷射时管内的压强分布。忽略进口对流体的影响,针对不可压缩的理想流体进行层流分析(图 2)。压电薄膜的弯曲变形量很小,为了分析方便,假设其为上下往复振动的平板。

3.1 竖直圆管压力分布的分析

假设腔体只提供压电薄膜振动时的活动空间,对流体无影响。取 $Oxyz$ 坐标系,使 y 轴与管线轴重合,因为层流中没有纵向跳动,故

$$v_y \neq 0, v_x = v_z = 0,$$

而管路是竖直的,则

$$f_x = f_y = 0, f_z = g,$$

于是 $N-S$ 方程变为

$$\left. \begin{aligned} -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

式中 ρ 为流体密度, p 为管内压强。

显而易见,轴向压强分布是关于 y 和时间 t 的函数。不可压缩流体的连续性方程

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{\partial v_y}{\partial y} = \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (2)$$

很明显

$$\frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

理想流体的圆管流动是轴对称的,因而速度 v_y 沿 x 方向、 z 方向以及任意半径方向的变化规律相同,且

$$\frac{\partial v_y}{\partial x} = \frac{\partial v_y}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

由式(2),式(3)可知理想流体的轴向速度 v_y 是关于时间 t 函数。

将式(3)代入式(1)可得

$$g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial v_y}{\partial t}, \quad (5)$$

假设与物面接触的流体始终保持与薄膜同时振动,平板简谐振动的运动方程为

$$y = A \sin(\omega t), \quad (6)$$

其中, A 为振幅, ω 为频率。

理想流体在管内流动时能量无损耗,可知

$$v_y = A \omega \cos(\omega t), \quad (7)$$

将式(7)代入式(5),积分并整理得

$$p(y, t) = \rho(g + A\omega^2 \sin \omega t)y + C(t), \quad (8)$$

其中, $C(t)$ 是关于时间 t 的函数。

根据文献[5],压电振子产生的压力可表示为

$$p_{\text{pzt}} = \frac{N_a C_e U}{N_a^2 C_e + C_M}, \quad (9)$$

若激励信号为正弦交流信号,则式(9)变为

$$P_{\text{pzt}} = \frac{N_a C_e U \sin(\omega t)}{N_a^2 C_e + C_M}, \quad (10)$$

式中, C_e 为压电陶瓷电容, $N_a = \frac{3\pi g_{31}}{8} \frac{d^2}{t}$, $C_M =$

$\frac{1}{64\gamma_{11}^D} \frac{d^6}{t^3}$, d, t 分别为压电薄膜的直径和厚度, γ_{11}^D

为压电材料弹性常数。

由式(10)可知,当 $y=0$ 时

$$p(0, t) = \frac{N_a C_e U \sin(\omega t)}{N_a^2 C_e + C_M}, \quad (11)$$

将式(11)代入式(8),得 y 轴方向流体瞬时压强的参数表达式为

$$p(y, t) = \rho[g + A\omega^2 \sin(\omega t)]y + \frac{N_a C_e U \sin(\omega t)}{N_a^2 C_e + C_M}, \quad (12)$$

由于理想流体在水平管内无压降,因此,水平管内的压强可近似为

$$p = \rho[g + A\omega^2 \sin(\omega t)]H + \frac{N_a C_e U \sin(\omega t)}{N_a^2 C_e + C_M}, \quad (13)$$

综合以上所述,不可压缩的理想流体在流道内的压力分布随时间正弦变化。

4 压电薄膜振动特性的实验研究

单位时间内泵的喷流量是由很多个周期的压电振子容积变化量累积叠加所形成的,为了研究喷流泵喷水状态时,最佳工作频率与谐振频率的相互关系以及频率、振幅对流量的影响程度,对压电振子振动特性的实验研究是非常必要的。

实验样机采用的压电复合板各项参数:金属基板直径为 35 mm,压电陶瓷晶片直径为 25 mm,金属基板厚度为 0.3 mm,压电陶瓷晶片厚度为 0.23 mm。实验时,低频信号发生器向压电振子施加不同的电压和频率,使压电振子产生不同的振动位移量,这些位移量通过精密激光测绘仪测得,并输入到傅里叶分析仪,以波形显示。

图 3 是电压恒定为 100 V,喷流泵喷水工作时获得的频幅特性曲线(正数表示振子工作在向下径向弯曲状态,负数表示振子工作在向上径向弯曲状态)。由图可见,喷流泵工作在 25 Hz 时,振幅达到最大值,说明振子已在谐振频率下工作;而压电振子在自由边界条件下,由阻抗分析仪所测得的谐振频率为 3 kHz,这一结果主要是由于

泵工作时,流固耦合的作用导致。前、后半周期的振幅都随驱动频率增加近似成线性显著减小。

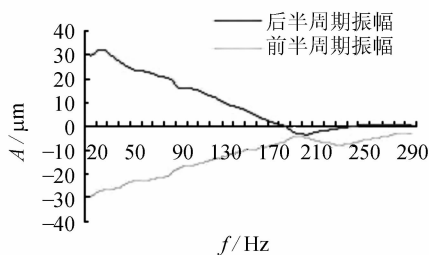


图 3 喷流泵压电振子的幅频特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of frequency and amplitude

图 4 是在一系列特定电压条件下测得的频率与前、后半周期的振幅差值的曲线图。假设泵腔的初始状态为 V,前半周期压电振子向上弯曲振动,容积增大 ΔV_1 ;后半周期压电振子向下弯曲振动,容积减小 ΔV_2 ;由图可知,喷流泵工作在 50 Hz 时,两者的振幅差值近似为 0,说明此时两半周期的振幅相等, $\Delta V_1 = \Delta V_2$ 。当大于 50 Hz 时,两半周期的振幅值又发生偏差,其前半周期的振幅明显大于后半周期的振幅,此时 $\Delta V_1 > \Delta V_2$ 。造成不对称振动波主要是由于单陶瓷片振子本身的物理参数所引起。不对称振动波对压电喷射泵输出性能的影响有待于深入研究。

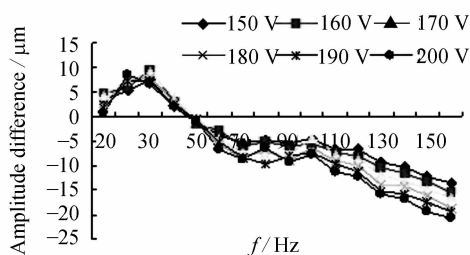


图 4 频率与幅值差特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of frequency and amplitude difference

5 喷流泵的输出性能测试

5.1 流量和背压性能测试

工作介质:水。

工况条件:出入口不附加导管。

电源信号:正弦信号。

图 5 是电压恒定,出口零压力条件下获得的喷流泵的流量与频率之间的关系曲线。由图可见,频率低于 140 Hz 时,喷流量随频率的增加也相应增加,在频率 140 Hz 时出现最大喷流量,190 V 电压下,最大喷流量为 714 ml/min。

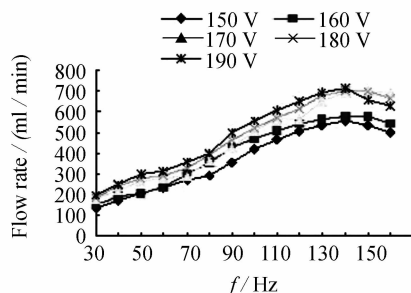


图 5 频率 - 流量特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of frequency and volume of liquid flow

图 6 是电压为 100 V 时,喷流泵喷水工况下测得的振子振动幅值和流量随频率变化曲线图。由图可知,当压电振子振动的峰 - 峰值减小时,喷流量反而增大,在 140 Hz 时流量达到最大值 555 ml/min,峰 - 峰值为 18.9 μm 。而当压电喷流泵工作谐振频率为 25 Hz 时,喷流量只有 40 ml/min,但峰 - 峰值高达 59.5 μm 。并且在 30~140 Hz 频率段,随着峰 - 峰值减小,频率增大,流量相应增大。结合图 5 与图 6 可知,在较大的频率范围内,曲线近似呈线性关系,当振动频率大于 140 Hz 时,喷流量呈下降趋势,这是因为振动频率在达到 140 Hz 时,振动频率与整体阀之间配合特性

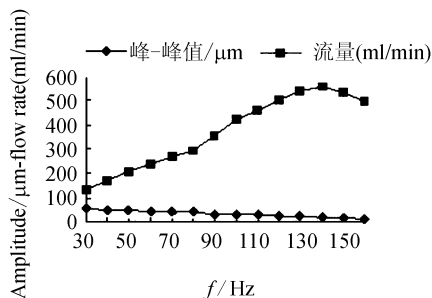


图 6 喷流泵喷水时振子振动幅值和流量随频率变化曲线

Fig. 6 Influential curve of amplitude and volume of liquid flow when pump is working