

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.049

压电泵泵阀高频振动时不完全关闭特性研究*

吴越 杨志刚 刘勇 董景石 林峰

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

摘要: 为了阐述压电泵高频工作时其阀的不完全关闭现象,并更好地利用该状态下压电泵特有的优点,分析了此条件下泵的输出机理,从理论上证明了现象的存在性,并得到预测依据。以流体作用在阀上的动压为基础,建立阀在液体中的振动力学模型,得到阀在压电泵工作状态下的频率响应,同时利用流体动力学分析阀在工作液体中的平均受力及位移,通过动态响应和平均位移的相对关系,得出阀不完全关闭的充分条件为振幅放大系数小于0.25。试验结果表明:80 Hz时阀处于可完全关闭状态;140 Hz时振幅放大系数小于0.25,阀的不完全关闭现象出现;随着频率升高振幅放大系数减小,260 Hz时阀的不完全关闭现象更加明显,阀与阀座的最小间距大于30 μm 。

关键词: 压电泵 单向阀 高频振动 动力学模型 工作机理

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0262-05

Incomplete Closure Characteristic of Piezoelectric Pump Check Valve in High Frequency

Wu Yue Yang Zhigang Liu Yong Dong Jingshi Lin Feng

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

Abstract: In order to find the interpretation of the incomplete closure of piezoelectric pump check valve in high frequency, the characteristic of the pump in that working conditions was analyzed, together with the judgment basis and theoretical demonstration of the existence for the phenomenon. The incomplete closure of piezoelectric pump check valve phenomenon was found, and frequency response of the check valve in water was obtained from its dynamic model. The mean force and displacement of valve was calculated in hydrodynamics. Relative reaction of the frequency response and mean displacement were analyzed. Sufficient condition for the check valve incomplete closure was obtained which was amplitude amplification less than 0.25. The results show that check valve can close completely operating at 80 Hz. When the amplitude amplification less than 0.25, the check valve incomplete closure phenomenon was observed at 140 Hz. With further increasing of the frequency, amplitude amplification factor decreases, the phenomenon is more obvious under the condition of low amplitude amplification factor, the minimum clearance between the check valve and valve seat more than 30 μm at 260 Hz.

Key words: Piezoelectric pump Check valve High frequency vibration Dynamic model Working principle

引言

压电泵是一种以压电晶片或叠堆为动力的微小流体驱动元件,由于其具有结构简单、体积小及便

于控制等优点,在仪器仪表、化工及 MEMS 领域有广泛应用前景^[1-4]。

目前,压电泵的研究主要包括有阀压电泵和无阀压电泵。有阀压电泵由于其具有性能高、可自吸

收稿日期:2012-10-25 修回日期:2012-11-12

* 国家自然科学基金资助项目(51175213)

作者简介:吴越,博士生,主要从事压电驱动与控制技术研究,E-mail:wuyues@163.com

通讯作者:杨志刚,教授,博士生导师,主要从事压电驱动与控制技术研究,E-mail:yzg@enpiezo.com

及结构设计灵活等优点,一直是微小型水泵研究比较集中的方向,对于压电泵静态^[5-6]及动态^[7-9]的工作机理、理论模型^[10]以及各种结构形式^[11-13]均有较成熟的研究;近年来由于无阀压电泵具有结构简单^[14-16]、寿命长以及便于微型化和集成化等特点而逐渐成为压电泵研究的热点。

有阀压电泵在性能方面优于无阀泵,但由于工作过程中存在阀的机械振动,特别是碰撞振动,使其在寿命及噪声方面的特性差于无阀泵,同时无阀泵具有更好的高频性能。以往大多针对有阀泵低频线性区进行研究,也有少部分对压电泵在整个频率区间进行理论分析的研究,但对高频下的工作特性及工作机理并无系统的研究。

试验发现,有阀压电泵在高频下工作时单向阀处于不完全关闭状态,这种特性使其在高性能、可自吸的基础上具备了无阀泵高寿命、低噪声的优点。

本文旨在揭示压电泵高频工作下阀的不完全关闭现象,并阐述有阀压电泵在阀不完全关闭工作条件下的出流机理。

1 有阀压电泵原理

最基本的有阀压电泵构成如图 1 所示,由泵体、出口阀、入口阀、压电振子等部分构成,压电振子在交变电压作用下产生正反两个方向的变形,最终产生腔体内的容积变化,通过单向阀的作用形成单向出流。

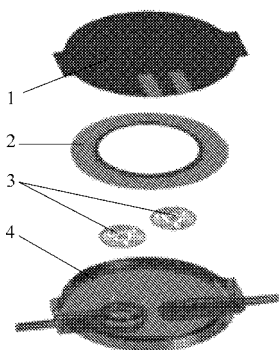


图 1 压电泵结构图

Fig. 1 Piezoelectric pump structure

1. 电极板 2. 压电振子 3. 轮式阀 4. 泵体

在压电陶瓷的额定电压区间内,压电泵的流量随着电压的增加基本呈增加趋势。其流量随频率的变化则相对复杂,如图 2 所示的压电泵流量-频率曲线可知:在低频区,泵的流量随频率的增加而线性增加,该区域为线性区;频率高于线性区后流量会急剧下降,该区域为相位区;在频率进一步增加后再次出现流量的局部最大值,此处称之为高频区。

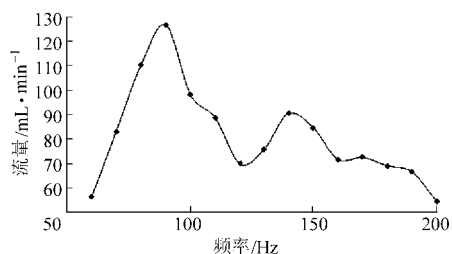


图 2 压电泵频率特性曲线

Fig. 2 Frequency characteristic of piezoelectric pump

2 阀的不完全关闭现象

压电泵频率不同时,其振子的位移变化并不明显,试验用振子为直径 35 mm,总厚度 0.7 mm 的压电单晶片,其位移在 21 ~ 23 μm 之间。使用激光测微仪对泵阀的运动进行测量,在第 2 个局部流量最大的频率点处,阀的位移-时间曲线如图 3 所示,该频率下稳定工作时阀在整个运动周期内都未完全关闭。

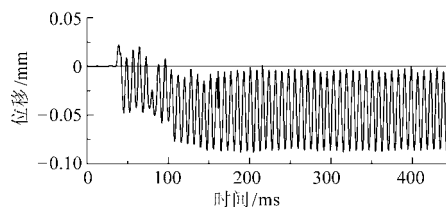


图 3 120 Hz 时阀的位移曲线

Fig. 3 Check valve displacement curve on 120 Hz

以往对有阀压电泵工作机理的解释是将泵整个工作过程分为 2 个阶段:吸入过程,压电振子变形,腔体体积增加,腔内压力降低,入口阀开启,出口阀关闭,流体从入口流入泵腔;排出过程,压电振子变形,腔体体积减小,腔内压力升高,入口阀关闭,出口阀开启,流体从出口流出。此时泵的流量随着频率的增加而线性增加,同时有研究指出在频率进一步增加后,由于阀的运动滞后于振子的驱动力,导致流量的急剧下降^[5]。

以上低频下压电泵的工作机理无法对阀不完全关闭条件下压电泵的出流作出解释,此时阀的作用通过正反向流阻的变化和出入口的流阻差来实现。

为了更好地解释该情况下泵的工作方式,首先将泵内流体分为 3 类:①弹性流体,该区域流体几乎不参与整体的出流过程,随着振子的变形而起到补充腔体内空间的作用,其质量在泵腔内移动,并未与出入口发生质量交换。②入口流体,在一个振动周期中该部分流体质量在入口和泵腔之间运动,未参加出口部分的质量交换。③出口流体,在出口和泵腔之间运动,未返回入口部分。

将流体从入口流向出口的方向定义为流动的正方向,并将振子的振动过程分为腔体体积增加的上升过程和腔体体积减小的下降过程。振子上升过程中,入口流体受到正向力的作用,流速增加,动压增加,阀开度加大,流阻减小,入口流速进一步增加;同时出口流体受到反向力的作用,流速降低,动压减小,阀开度减小,流阻增加,流速进一步降低,入口流量大于出口流量,流量差存储在泵腔内。振子下降过程中,入口流体受到反向力的作用,流速降低,动压减小,阀开度减小,流阻增加,流速进一步降低,出口流体受到正向力的作用,流速增加,动压增加,阀开度增加,流阻减小,流速进一步增加,出口流量大于入口流量。

工作在阀不完全关闭条件下的泵,其定向出流主要是靠两阀片与阀座间的距离变化所引起的流阻差来实现的,其精度及截止性对于性能的影响相对降低,同时该工作状态下阀板不与阀座接触,有效降低了阀冲击引起的疲劳破坏和水锤效应导致的断裂破坏。

3 阀的运动分析

由于压电泵中流体水力学直径小,雷诺数 Re 在 0.4 ~ 8.0 区间内,阀在液体中的受力要综合考虑压差阻力和摩擦阻力,其受到的合力为^[14]

$$F_D = C_D \rho \frac{v^2}{2} A$$

式中 A ——阀的面积

ρ ——水的密度

v ——流体的当量速度

C_D ——总阻力系数

在 Re 值小于 10 的情况下, C_D 可以使用斯托克斯公式进行计算

$$C_D = \frac{24}{Re}$$

$$F_D = 12\rho \frac{v^2}{Re} A \quad (1)$$

振子的振幅远小于其直径,可假设振子所引起的体积变化在时间上是均匀的,振子振动产生的平均流速为 v_A ,在阀可以完全关闭且出入口阀相位相差 90° 时, $v_A = \Delta V/T$,其中 ΔV 为振子一个周期内所产生的体积变化量, T 为一个周期的时间。当阀不完全关闭时平均流速小于该值,当两阀的相位差为零时,阀完全失去作用,此时 $v_A = (\Delta V/2)/T$,则有

$$\frac{\Delta V}{2T} < v_A < \frac{\Delta V}{T} \quad (2)$$

其中 $T = \omega/(2\pi)$, ω 为振子振动的角频率。

则阀的平均开启高度 H_A 为

$$H_A = \frac{F_D}{k} \quad (3)$$

式中 k ——阀的等效刚度

将式(2)代入式(1),将结果代入式(3),则有

$$\frac{12\pi^2 \rho A \Delta V^2}{k\omega^2 Re} < H_A < \frac{48\pi^2 \rho A \Delta V^2}{k\omega^2 Re}$$

为了计算工作过程中阀的位移,建立如图4所示的阀振动力学模型。

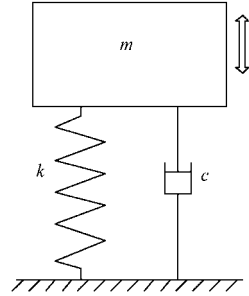


图4 阀在水中的振动力学模型

Fig. 4 Check valve dynamic model in water

图中 c 为运动过程中的粘性阻尼系数, m 为阀的质量。

阀在流体的作用下发生往复振动,其动力源为压电振子,振子的驱动信号为简谐波,因此阀的激振力可表示为

$$F(t) = F_0 \cos(\omega t)$$

则关于阀位移 x 的运动方程为

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F_0 \cos(\omega t)$$

振幅放大系数 M 的表达式为

$$M = \frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (4)$$

其中 $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$ $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ $\delta_{st} = F_0/k$

式中 δ_{st} ——静态力 F_0 作用下的变形量

ζ ——阻尼系数

ω_n ——固有频率

则阀的最大位移可表示为

$$X = \frac{F_0 M}{k} \quad (5)$$

由 F_0 的定义可知,其是一个运动周期内所能施加的最大力,将式(2)代入式(1)后的结果代入式(5),则有

$$X < \frac{48\pi^2 \rho A \Delta V^2 M}{k\omega^2 Re}$$

H_A 与 X 的关系如图5所示,当 H 的最小值大于 X 的最大值时,阀处于不完全关闭的振动状态,即

$$\frac{12\pi^2 \rho A \Delta V^2}{k\omega^2 Re} - \frac{48\pi^2 \rho A \Delta V^2 M}{k\omega^2 Re} > 0$$

可简化为

$$M < 0.25$$

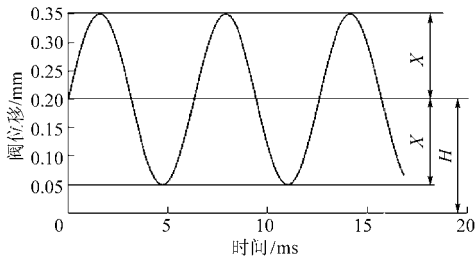


图 5 阀振幅与平衡位置关系示意图

Fig. 5 Amplitude and balance position of check valve

通过上述分析,从理论上解释了压电泵工作过程中阀不完全关闭的现象,其主要影响因素为阀振动系统中的振幅放大系数。

4 试验与结果分析

由式(4)可知,振幅放大系数与阀在流体中运动的阻尼系数及频率比有关,阀在流体中的阻尼系数 ζ 的计算过程复杂,且误差较大,因此考虑通过测试阀在流体中受冲击载荷的响应曲线计算相关参数^[15]。

泵阀在水中自由振动的位移-时间曲线如图 6 所示。由图可知,阻尼振动的周期为 0.019 s,第 1 个周期的振幅 $X_1 = 0.150$ mm,第 2 个周期的振幅 $X_2 = 0.059$ mm。

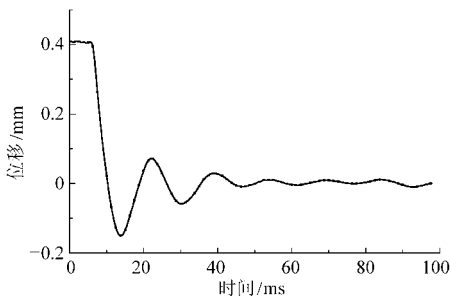


图 6 阀在水中的脉冲响应曲线

Fig. 6 Check valve impulse response in water

阀在水中的振动可等效为单自由度系统的有阻尼自由振动,可用相关理论进行分析,阀片在水中的对数衰减系数 σ 为

$$\sigma = \ln \frac{X_1}{X_2} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

其中
$$\zeta = \frac{\sigma}{\sqrt{4\pi^2 + \sigma^2}} \quad (6)$$

衰减振动周期 t_d 、阻尼振动频率 ω_d 与固有频率 ω_n 的关系为

$$t_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

即
$$\omega_n = \frac{2\pi}{t_d \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (7)$$

将测得的图 6 中数据代入式(6)可得该阀的阻尼系数 ζ 为 0.147,将其代入式(7)可得阀的固有频率 ω_n 为 317.6 rad/s。

阀在水中振动的振幅放大系数 M 与压电泵工作频率 f 关系曲线如图 7 所示,可知当驱动频率 f 高于 140 Hz 时,其振幅放大系数 M 小于 0.25,根据理论分析,泵工作频率高于 140 Hz 时阀处于不完全关闭状态。

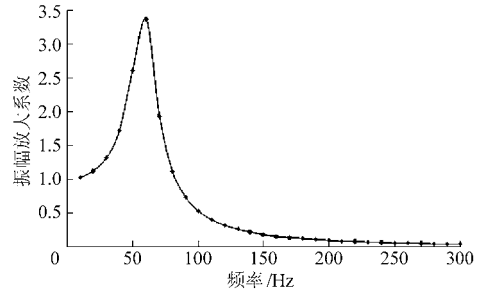


图 7 振幅放大系数与频率的关系曲线

Fig. 7 Frequency-amplitude amplification factor curve

用激光测微仪测量的阀位移曲线如图 8 所示,试验结果表明,工作频率为 140 Hz 时,阀工作在不完全关闭状态。

图 3 所示阀在 120 Hz 时同样工作在不完全关闭状态,主要是因为理论分析过程中所选用的是阀平衡位置的最小值,该过程会导致计算值高于实际临界频率值。图 8a 为 80 Hz 时工作在完全关闭状态下阀的位移曲线。通过图 8c 所示 260 Hz 时阀的位移曲线可看出,随着频率的进一步升高不完全关闭现象更加明显。

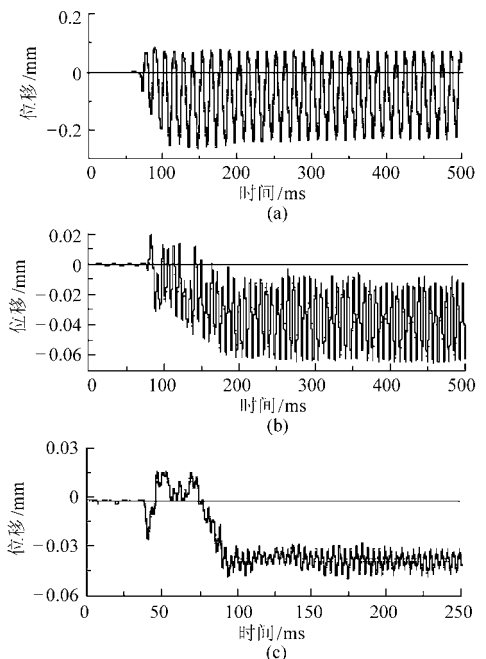


图 8 不同频率下阀的位移曲线

Fig. 8 Displacement-frequency curve of check valve

(a) 80 Hz (b) 140 Hz (c) 260 Hz

5 结论

(1)在研究单腔压电泵频率特性的过程中发现了阀的不完全关闭现象,分析表明阀不完全关闭时具有低噪声、低磨损、高寿命、可自吸及工艺性好等优点。

(2)理论上证明了阀不完全关闭现象的存在性,分析结果表明发生条件为阀振动系统振幅放大系数 M 小于 0.25。

(3)在压电泵正常出流且频率高于临界频率时,随着频率的增加,不完全关闭现象更加明显,在 260 Hz 时,阀与阀座的最小间距大于 30 μm 。

参 考 文 献

- 程光明,何丽鹏,曾平,等. 双晶片两主动阀式压电泵的设计及试验[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(2):315~318.
Cheng Guangming, He Lipeng, Zeng Ping, et al. Design and research on bimorph piezoelectric pump with two active valves[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(2):315~318. (in Chinese)
- Kenji Uchino, Jayne R Giniewicz. Micromechatronics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- Dau V T, Dinh T X, Sugiyama S. A MEMS-based silicon micropump with intersecting channels and integrated hotwires[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(12): 125016.
- 彭太江, 阚君武, 杨志刚. 新型压电-流体混合驱动精密位移机构[J]. 农业机械学报, 2005, 36(2):51~53.
Peng Taijiang, Kan Junwu, Yang Zhigang. New type of accurate-motion mechanism with hydro-piezoelectric drive [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(2):51~53. (in Chinese)
- 张建辉,王大康,王守印,等. 压电泵的研究——泵阀滞后性[J]. 机械工程学报,2003,39(5):107~110.
Zhang Jianhui, Wang Dakang, Wang Shouyin, et al. Research on piezoelectric pump—lagging of valve [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5): 107~110. (in Chinese)
- 郑炜,董景石,于洪洋,等. 单振子气体压电泵研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2):226~229.
Zheng Wei, Dong Jingshi, Yu Hongyang, et al. Kipp oscillator gas piezoelectric pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):226~229. (in Chinese)
- 阚君武,彭太江,董景石,等. 流体附加阻尼及其对微型泵输出性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(5):548~550.
Kan Junwu, Peng Taijiang, Dong Jingshi, et al. Liquid added damping and its influence on the output performance of micropumps [J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2005, 39(5): 548~550. (in Chinese)
- 刘勇,杨志刚,吴越,等. 压电泵吸程出流现象及其成因[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1 104~1 109.
Liu Yong, Yang Zhigang, Wu Yue, et al. Analysis on sucking process outflow phenomenon of piezoelectric pump[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1 104~1 109. (in Chinese)
- 高建民,任宁,谌志伟. 无阀微压电泵关键部件工作过程仿真[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2):130~133.
Gao Jianmin, Ren Ning, Chen Zhiwei. Simulation study on key part of a novel valveless piezoelectric pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2):130~133. (in Chinese)
- Koyama D, Wada Y, Nakamura K, et al. An ultrasonic air pump using an acoustic traveling wave along a small air gap[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(1): 253~261.
- 何秀华,张睿,邓许连,等. 基于有限元模拟的泵用压电振子正交优化设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8):219~222,226.
He Xiuhua, Zhang Rui, Deng Xulian, et al. Orthogonal optimum design of the actuator for the piezoelectric pump based on finite element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 219~222,226. (in Chinese)
- 程光明, 阚君武, 杨志刚, 等. 有阀压电薄膜泵性能研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5):84~87.
Cheng Guangming, Kan Junwu, Yang Zhigang, et al. Study on performance of a check-valved piezoelectric pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5):84~87. (in Chinese)
- 程光明,何丽鹏,曾平,等. 圆形双振子式主动阀压电泵设计与性能实验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 204~208.
Cheng Guangming, He Lipeng, Zeng Ping, et al. Design and performance test on circular two piezoelectric pump with active valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 204~208. (in Chinese)
- Ma H, Huang S, Chen B, et al. Numerical study of a novel micro-diaphragm flow channel with piezoelectric device for proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2008, 180(1): 402~409.
- Finnemore E J, Franzini J B. Fluid mechanics with engineering applications [M]. Noide, UP, India: Tata McGraw-Hill Education, 1989.
- Singiresu S Rao. Mechanical vibrations [M]. Prentice Hall Press, 2004.