

对称螺旋线形阀压电泵的研究^{*}

王颖¹, 张建辉^{2,3}, 严秋锋³

(1. 泰州职业技术学院机电技术学院 泰州, 225300)

(2. 广州大学机械与电气工程学院 广州, 510006)

(3. 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 为克服单臂螺旋线形阀压电泵单臂阀运行时侧向力造成的阀体在开启与关闭中倾斜而产生的负面影响, 有效地发挥螺旋线形阀压电泵阀体“慢开启、快关闭”的优势, 首先, 构造了悬臂固支旋转对称双臂阀体结构, 并针对该阀体设计了对称螺旋线形阀压电泵; 然后, 进行了悬臂固支旋转对称双臂阀体的力学分析, 并据此进行了泵流量关系式的解析; 最后, 利用实际样机进行了单臂阀与旋转对称双臂阀的阀参数对泵参数影响的试验研究。试验结果表明: 在输入电压为 220 V、频率为 10 Hz 时, 旋转对称双臂阀的臂宽为 0.3 mm 时的泵流量最高, 达到 124.2 ml/min; 旋转对称双臂阀泵比单臂阀泵流量提高 1.25~2.84 倍; 对称阀的进出口阀臂宽不同时的泵流量大于阀臂宽相同时的泵流量, 且进口阀臂宽大出口阀臂宽小时的泵流量大于进口阀臂宽小出口阀臂宽大时的泵流量。

关键词 压电泵; 阀; 螺旋线形阀; 对称阀

中图分类号 TH35; TH38

引言

压电泵自出现以来各种结构的发明层出不穷, 性能得到大幅地提高, 因其摒弃了传统泵的驱动电机, 具有能耗小、成本低、结构简的优点, 在机电系统中具有广阔的应用前景^[1-7]。有阀压电泵因借助单向阀在排程时可以阻止流体回流, 输出流量比无阀压电泵大而应用广泛, 因此, 有阀压电泵中单向阀的通阻性能对压电泵输出性能的大小有着至关重要的影响。

1997 年, 日本铃木胜义等^[8-11]发现传统的阀与新颖的驱动相结合并不能实现大流量、大压差的理想。2000 年, 尹执中等^[12]研究了类板阀式简单悬臂梁阀在压电泵中的应用, 发现当阀片两侧压差变化时, 有产生泄漏甚至反向流动的可能。2005 年, 程光明等^[13]提出了有较高体积功能比的迭片式结构的简单悬臂梁阀压电泵。2006 年, 曾平等^[14]研究了整体开启阀微型压电泵。同年, 孙晓峰等^[15]对比研究了整体开启阀压电泵和悬臂梁阀压电泵性能, 结果表明整体开启阀压电泵输出性能好于悬臂梁阀压电泵; 2016 年, 张建辉等^[16]总结了有阀压电泵的发展历

程, 分析认为传统阀劣于类板阀形式的悬臂梁阀, 类板阀形式的悬臂梁阀劣于刚性材料的结构软质型阀。2016 年, 王颖等^[17-18]为提高有阀压电泵的输出性能, 发明了拟悬臂梁结构的单臂螺旋线形阀, 同时把该阀与压电振子组合开发了单臂螺旋线形阀压电泵。

为克服单臂螺旋线形阀压电泵单臂阀运行时侧向力造成的阀体开启与关闭中倾斜而产生的负面影响, 笔者将进行对称螺旋线形阀压电泵理论与试验方面的研究。首先, 构造悬臂固支旋转对称双臂阀体结构, 并针对该阀体设计对称螺旋线形阀压电泵; 然后, 进行悬臂固支旋转对称双臂阀体的力学分析并据此进行泵流量关系式的解析; 最后, 利用实际样机进行单臂阀与旋转对称双臂阀的阀参数对泵参数影响的试验研究。

1 单臂阀阀体运动分析

有阀泵的工作循环包含进口阀开启、出口阀关闭和进口阀关闭、出口阀开启的过程。单臂螺旋线形阀拟悬臂梁固支结构, 由定位器单端固定, 开启和关闭过程中阀体会发生倾斜。如图 1(a)(c)所示进

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51375227); 广州大学引进人才科研启动项目(ZJH3-2001); 泰州职业技术学院科研重点资助项目(TZYKYZD-17-2)

收稿日期: 2016-10-07; 修回日期: 2016-11-05

口阀开启过程中, 阀体在流体作用力 F_k 的作用下开启时, 由于阀体的倾斜会产生两个分力, 即法向分力 F_{Nk} 和侧向分力 F_{Sk} , F_{Nk} 使得阀体向上运动而开启, F_{Sk} 使得阀体趋向定位器的方向运动而发生相对于阀口中心的径向偏移量 e_k , e_k 的存在会降低进口阀的法向开启量。

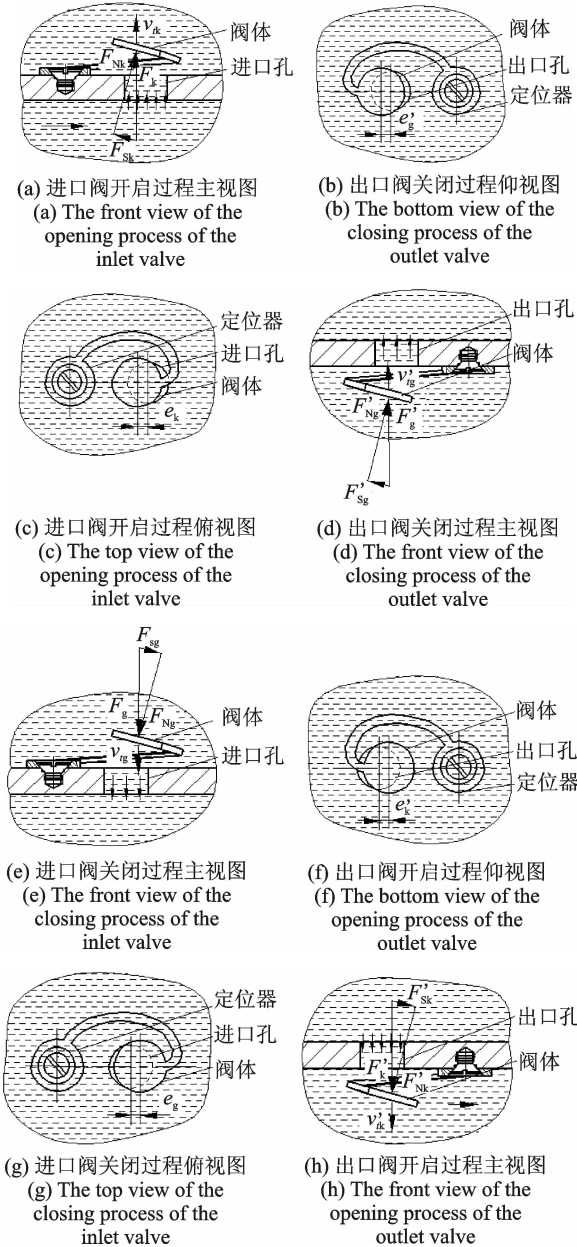


图 1 单臂阀开启和关闭过程受力示意图

Fig. 1 The force schematic diagram of the opening and closing process of the single-arm valve

图 1(b)(d) 所示出口阀关闭过程中, 受到流体作用力 F'_g , 由于阀体的倾斜会产生法向分力 F'_{Ng} 和侧向分力 F'_{Sg} , 其中 F'_{Ng} 使得阀体向上运动而关闭阀口, F'_{Sg} 使阀体向离开定位器的方向运动发生径向偏移量 e'_g , e'_g 会使得出口阀体与出口孔之间

出现间隙而关闭不严实, 导致流体回流。

图 1(e)(g) 进口阀关闭过程中, 受到流体作用力 F'_g , 由于阀体的倾斜, F'_g 同样会产生法向分力 F'_{Ng} 和侧向分力 F'_{Sg} , 其中 F'_{Ng} 使阀体向下运动而关闭, F'_{Sg} 使阀体向离开定位器的方向运动产生径向偏移量 e_g , e_g 使得进口阀关闭时与进口孔之间出现了间隙关闭不严实, 导致流体回流。

图 1(f)(h) 所示出口阀开启过程中, 阀体在流体作用力 F'_k 的作用下开启时, 同样会产生法向分力 F'_{Nk} 和侧向分力 F'_{Sk} , F'_{Nk} 的作用使得出口阀体向下运动而开启, 流体经出口孔流出泵体, F'_{Sk} 的作用使得阀体向靠近定位器的方向运动而产生径向偏移量 e'_k , e'_k 的存在同样也会降低出口阀的法向开启量。

这样在泵的工作循环过程中, 单臂阀开启和关闭时会出现阀体相对于阀口孔心的径向偏移, 开启时径向偏移量会降低阀体法向开启量, 关闭时径向偏移量会导致阀口闭合不严实而引起泄漏的现象, 降低了泵的输出性能。

2 阀和泵的结构

传统阀如锥阀和板阀中设计有导向结构如图 2 所示, 可避免开启和关闭过程中阀芯的歪斜。

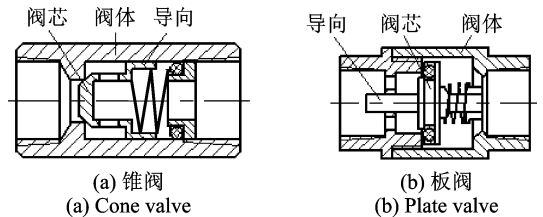


图 2 锥阀和板阀结构示意图

Fig. 2 The structural schematic diagram of cone valve and plate valve

Ham 等^[19] 设计了板式铰链阀压电泵 (见图 3(a))。曾平等^[14-15] 设计并研究了整体开启阀 (见图 3(b))。这两种阀均采用了整体作动式结构, 运动

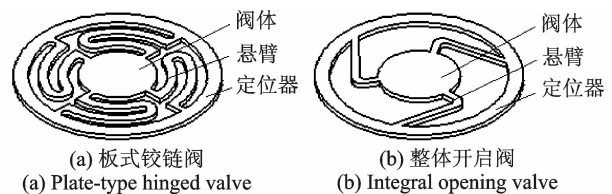


图 3 整体作动式阀结构示意图

Fig. 3 The structural schematic diagram of integral actuating valve

中阀体整体与定位器平行上下动作不会倾斜,避免了悬臂梁阀运动过程中产生的侧向分力 F_s 的影响。

受传统阀和上述两种整体作动式阀结构的启发,笔者设计一种旋转对称螺旋线形阀(简称对称曲臂阀、对称阀或双臂阀)如图 4 所示,该阀包含阀体、一对旋转对称曲臂和两个定位器。为了方便对比阀对泵输出性能的影响,构造了与前期单臂阀压电泵同样结构的对称曲臂阀压电泵,其结构如图 5 所示,主要由压电振子、泵盖、泵体、螺旋线形阀和底座等组成。泵体内安装有一对相互倒置的对称螺旋线形阀,安装在泵腔进水口处的为吸入阀,安装在泵腔出水口处的为排出阀。在交变电流作用下压电振子发生形变而上下振动,当振子由下向上振动至最高处时泵腔处于舒张状态,腔内的容积增大而出现负压,此时吸入阀打开,排出阀关闭,流体流入泵腔为泵的吸程;当振子由上向下振动至最低处时泵腔处于压缩状态,腔内容积减小而压强增大,此时排出阀打开,吸入阀关闭,流体流出泵腔,为泵的排程。如此循环往复,压电泵实现流体的吸入和排出。

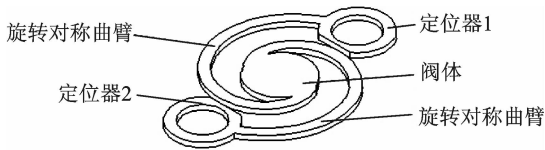


图 4 旋转对称螺旋线形阀

Fig. 4 Rotational symmetrical and spiral shaped valve

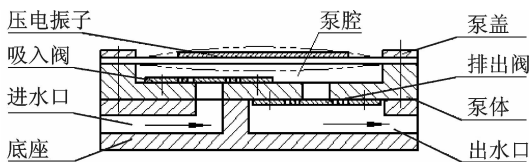


图 5 泵结构示意图

Fig. 5 The structural schematic diagram of the pump

3 对称曲臂阀阀体运动分析

如图 6 所示,在同样的流体作用力 F_k, F_g, F'_k 和 F'_g 的作用下,旋转对称曲臂阀因为对称曲臂的作用,无论是进口阀还是出口阀均可抵消单臂阀运动时受到的侧向力的作用,使阀体保持与阀口平行的运动状态,阀体所受法向力即为流体作用力。图中: v_{tk2} 为对称进口阀开启时的瞬时速率; v'_{tk2} 为对称出口阀开启时的瞬时速率; v_{tg2} 为对称进口阀开闭时的瞬时速率; v'_{tg2} 为对称出口阀开闭时的瞬时速率。

但是,由于对称曲臂间的相互作用阀体的开启运行速度会降低,即阀体的“慢开启”,阀的开启过程会延长,则开启过程中吸入的流体量增大,泵的输出提高。另一方面,又由于对称曲臂的共同作用,阀体的关闭速度比单臂阀阀体的关闭速度快,即“快关闭”,则流体回流少,提高了阀的截止性,而使泵输出进一步提高。

同时,由于螺旋线形曲臂等效于截锥螺旋拉伸弹簧,具有唯一的弹性变形系数,则阀体在流体作用下运动时,不仅具有“慢开启、快关闭”的优势,而且有效克服了图 3 所示的两种整体作动式阀在动作过程中可能出现的悬臂翘曲变形现象,从而实现闭合紧密、阻流完全的目标,提高了阀截止性能的可靠性。

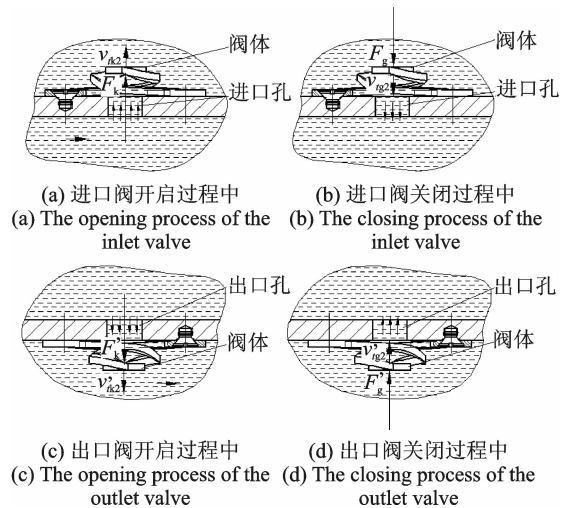


图 6 对称阀开启和关闭过程受力示意图

Fig. 6 The force schematic diagram of the opening and closing process of symmetric valve

4 理论分析

4.1 阀体受力与泵输出

如图 1 所示,阀体的运动与孔口轴线发生倾斜时,其受力关系为

$$F = \sqrt{F_N^2 + F_s^2} \quad (1)$$

其中: F 为阀体所受作用力; F_N 为单臂阀阀体作用力的法向分力; F_s 为单臂阀阀体作用力的侧向分力。

单臂阀中阀的开启量 f_{zt} 与作用力的关系^[18]为

$$\begin{cases} f_{zt} = \pi n R_l F_{zt} \\ e_{xt} = \frac{F_{xt}}{k_x} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $f_{z'}$ 为阀体的轴向开启量; n 为曲臂的实际最大圈数; $F_{z'}$ 为流体对阀体在轴向上的瞬时作用力, 即前述分析中阀体所受的轴向力 F_N ; R_t 为阀的材料和尺寸系数; $e_{x'}$ 为单臂阀阀体的径向偏移量; k_x 为曲臂的径向弹性系数; $F_{x'}$ 为流体对阀体在径向上的瞬时作用力, 即前述分析中阀体所受的侧向力 F_s 。

笔者前期研究^[17-18]中忽略了侧向分力 $F_{x'}$ (F_s), 而在泵实际工作过程中, 根据式(1)可知, 由于 $F_{x'}$ 的存在有 $F_{z'} < F < F'$ (即 $F_N < F$), 则式(2)中阀体的实际轴向开启量 $f_{z'}$ 会因为 $F_{z'}$ 的减小而变小, 泵输出也会降低。同时, $F_{x'}$ (F_s) 会引起阀体相对于阀口孔心产生径向偏移量 $e_{x'}$, 如图 1(b) (g) 中的 $e'_{g'}$ 和 e_g 所示, 这种偏移导致关闭时阀体跟阀口孔之间存在径向间隙而关闭不严, 出现流体回流而进一步减少了泵输出。

对称曲臂阀中, 阀体的位移量和力的关系为

$$\begin{cases} f'_{z'} = \pi n R_t F_{z'} \\ \Delta e_{x'} = \frac{F_{x'1}}{k_{x1}} + \frac{F_{x'2}}{k_{x2}} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $f'_{z'}$ 为对称曲臂阀阀体的轴向开启量; $\Delta e_{x'}$ 为对称曲臂阀阀体径向合成偏移量; $F_{x'1}$, $F_{x'2}$ 为在两对称曲臂作用下分别使阀体发生倾斜的侧向分力; k_{x1} , k_{x2} 分别为两对称曲臂的径向弹性系数。

由于两曲臂的旋转对称结构, 在制造误差允许范围内有

$$F_{x'1} \approx -F_{x'2} \quad (4)$$

$$k_{x1} \approx k_{x2} \quad (5)$$

将式(4), (5)代入式(3)有

$$\Delta e_{x'} \rightarrow 0 \ll e_{x'} \quad (6)$$

即对称曲臂阀阀体的合成径向偏移量 $\Delta e_{x'}$ 远远小于比单臂阀阀体的径向偏移量 $e_{x'}$, 接近于 0。

因此, 对称曲臂阀中阀体会以与孔口轴线接近垂直的状态上下运动, 则

$$F'_{s'} \approx 0 \quad (7)$$

其中: $F'_{s'}$ 为对称曲臂阀阀体所受作用的侧向分力。

而对称曲臂阀阀体同样具有式(1)的关系, 即

$$F = \sqrt{F'^2_{N'} + F'^2_{s'}} \quad (8)$$

其中: $F'_{N'}$ 为作用于对称曲臂阀阀体所受作用力的法向分力。

将式(7)代入式(8)可知, 对称曲臂阀阀体所受作用力 F 约等于其所受法向分力 $F'_{N'}$, 即

$$F \approx F'_{N'} \quad (9)$$

对比式(9)和式(1)可知, 在输入相同即流体作用力 F 相同的情况下, 有

$$F'_{N'} > F_N \quad (10)$$

即对称曲臂阀阀体所作用于开启的轴向作用力 $F'_{N'}$ 大于单臂阀阀体的轴向作用力 F_N 。因此, 式(3)中对称曲臂阀阀体的轴向开启量 $f'_{z'}$ 大于式(2)中单臂阀阀体的轴向开启量 $f_{z'}$, 而使得对称曲臂阀泵的输出会比单臂阀泵输出有所提高; 同时, 对称曲臂阀开启和关闭过程中阀体相对于阀口的径向偏移量接近于 0, 关闭时阀体可以有效阻断流体, 不会出现回流, 进一步提高了泵输出。

综上所述, 工作中对称曲臂阀阀体开启量比单臂阀阀体开启量大, 同时避免了由于阀体在开启和关闭过程中的倾斜引起的闭合不严, 提高了阀截止的可靠性, 从而进一步提高泵的输出。

4.2 单臂阀曲臂和对称阀曲臂的弹性系数关系

单臂阀工作时曲臂的工作过程等效于截锥螺旋拉伸弹簧^[17]。根据胡克定律

$$F = k_1 x \quad (11)$$

其中: k_1 为单臂螺旋线形阀的弹性系数; x 为阀体开启量(弹簧变形量)。

对称曲臂阀工作时曲臂的工作过程可以等效为两个同样的弹簧并联工作, 其弹性系数 k_2 为

$$k_2 = \frac{1}{2} k_1 \quad (12)$$

其中: k_2 为旋转对称螺旋线形阀的弹性系数。

由式(12)可知, 单臂螺旋线形阀的弹性系数是同结构尺寸对称曲臂阀弹性系数的 2 倍。

4.3 泵流量及其与曲臂宽度 a 的关系

如图 7 所示, R_1 为曲臂小端半径; R_2 为大端半径; θ 为极角; $A-A$ 为曲臂断面图。设对称曲臂材料

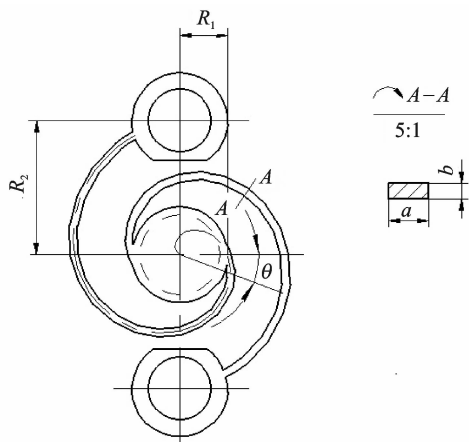


图 7 对称螺旋线形阀结构示意图

Fig. 7 The structural schematic diagram of symmetrical and spiral shaped valve

的截面宽度为 a , 高度为 b , 材料惯性模量为 G , 流体密度为 ρ_l , g 为重力加速度, 输入电压为 U 、频率为 f , d 和 δ 分别为压电振子的直径和厚度, d_{31} 为压电振子的压电常数, 泵流量^[18-19]为

$$Q = 3\pi^3 n \rho_l g r^2 \frac{d_{31} d^4 (R_1^2 + R_2^2) (R_1 + R_2)}{32 G k \delta^2 b^3 a} f U \quad (13)$$

其中: k 为材料截面系数, 当材料截面高度 b 为一定时与臂宽 a 有关, a 越大系数 k 也越大^[18]。

由式(13)可知, 流量 Q 与阀臂宽 a 呈负相关。

综合考虑式(12)和式(13)中弹性系数和臂宽 a 的影响, 为了对比单臂阀泵和对称曲臂阀泵的性能, 将对称曲臂阀压电泵与双倍其臂宽尺寸的单臂阀泵的输出进行对比分析。

5 试 验

笔者制作了 6 种臂宽 a 分别为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 和 0.8 mm 的对称螺旋线形阀, 阀片材料为厚 0.2 mm 弹簧钢, 如表 1 所示, 并制成压电泵样机, 双臂阀泵样机相关结构和参数与单臂阀压电泵样机^[17-18]相同, 材料是有机玻璃。表 2 为参与对比试验的相同材质单臂阀臂宽参数。试验流体介质同为蒸馏水。表 3 为使用的压电振子几何参数。

表 1 6 种双臂螺旋线形阀的臂宽 a 参数

Tab.1 The a parameter of arm width of six types of two-arm spiral shaped valve

a /mm	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
阀照片						

表 2 对比试验组中单臂阀的臂宽 a 参数

Tab.2 The a parameter of arm width of single-arm valve in the experimental group

灶自用 a /mm	0.5	0.75	1.0
单臂阀照片			

表 3 压电振子几何参数

Tab.3 The geometrical parameter of piezoelectric vibrator

黄铜基体直径	黄铜基体厚度	压电陶瓷直径	压电陶瓷厚度
50	0.2	25	0.2

图 8 为泵样机流量测试试验照片。试验中保持进水量杯的水面高度, 进水管高度和出水管高度

相同。

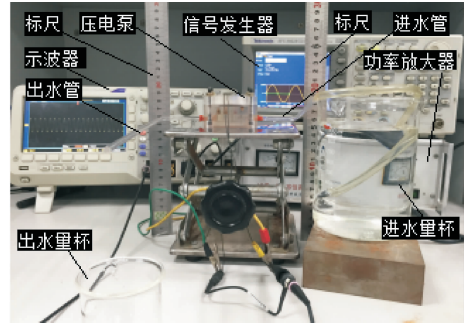


图 8 压电泵流量测试试验照片

Fig.8 The photographs from the experiment of the flow measurement of piezoelectric pump

5.1 臂宽 a 对对称阀泵输出性能的影响

图 9 所示为对称曲臂阀臂宽与泵流量关系。由试验数据可知, 当臂宽 a 由 0.3 mm 变化至 0.8 mm 时, 压电泵流量与臂宽 a 的关系呈负相关。当输入电压为 220 V、频率为 10 Hz、臂宽 a 为 0.3 mm 时, 流量最大为 124.2 ml/min。这是因为随着臂宽 a 的增大, 在泵输入参数一定时, 阀体的重量逐渐增大, 开启度就会逐渐变小, 从而使得输出逐渐降低。

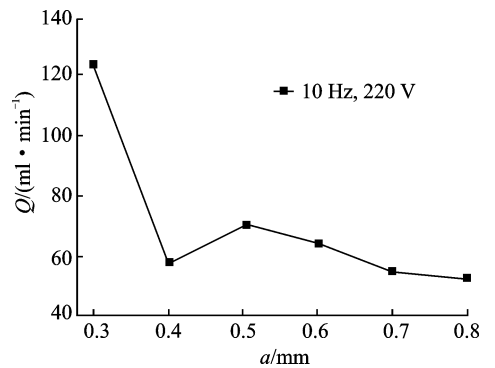


图 9 对称曲臂阀臂宽与泵流量关系

Fig.9 The relation between the arm width of the symmetrical valve and the pump flow

若图 9 中臂宽 a 在 0.3 mm 的基础上向反方向继续减小, 会导致阀的重量降低, 阀开启后的关闭速度会受影响而变小, 而影响到阀的截止速度, 泵输出会降低。由于在臂宽 $a < 0.3$ mm 时阀片曲臂会变形严重且加工时容易断裂, 所以研究中仅仅试验测试到阀的最小臂宽 $a = 0.3$ mm 时泵的输出。

5.2 对称阀泵与单臂阀泵输出性能对比

图 10 所示为对称阀臂宽 $a = 0.5$ mm 和单臂阀臂宽 $a = 1.0$ mm 时电压与泵流量关系对比。根据

试验数据可知,在输入电压为 220 V、频率为 10 Hz 时,对称阀臂宽 $a=0.5\text{ mm}$ 的流量为 70.2 ml/min,单臂阀臂宽 $a=1.0\text{ mm}$ 时流量为 48 ml/min,即此时对称阀臂宽 $a=0.5\text{ mm}$ 的泵流量接近单臂阀臂宽 $a=1.0\text{ mm}$ 时泵流量的 1.5 倍。

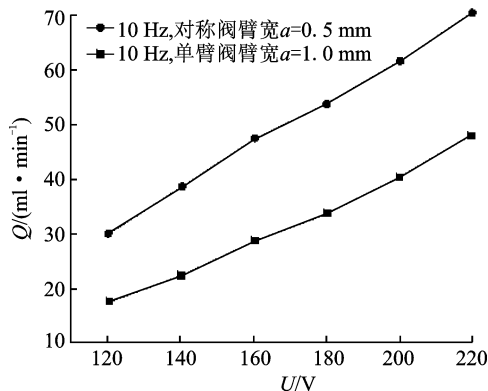


图 10 对称阀臂宽 $a=0.5\text{ mm}$ 和单臂阀臂宽 $a=1.0\text{ mm}$ 时电压与泵流量关系对比

Fig. 10 The relation between voltage and pump flow when the arm width of the symmetrical valve $a=0.5\text{ mm}$ and the arm width of the single-arm valve $a=1.0\text{ mm}$

图 11 所示为对称阀臂宽 $a=0.4\text{ mm}$ 和单臂阀臂宽 $a=0.75\text{ mm}$ 时电压与泵流量关系对比。试验数据显示,在输入电压为 220 V、频率为 10 Hz 时,对称阀臂宽 $a=0.4\text{ mm}$ 的流量为 49.2 ml/min,单臂阀臂宽 $a=0.75\text{ mm}$ 时流量为 39.6 ml/min,即此时对称阀臂宽 $a=0.4\text{ mm}$ 的泵流量约为单臂阀臂宽 $a=0.75\text{ mm}$ 时泵流量的 1.24 倍。

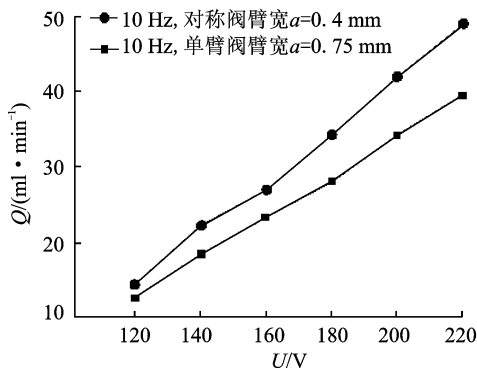


图 11 对称阀臂宽 $a=0.4\text{ mm}$ 和单臂阀臂宽 $a=0.75\text{ mm}$ 时电压与泵流量关系对比

Fig. 11 The relation between voltage and pump flow when the arm width of the symmetrical valve $a=0.4\text{ mm}$ and the arm width of the single-arm valve $a=0.75\text{ mm}$

臂宽 $a=0.5\text{ mm}$ 时电压与泵流量关系对比。试验数据显示,在输入电压为 220 V 时、频率为 10 Hz,对称阀臂宽 $a=0.3\text{ mm}$ 的流量为 124.2 ml/min,单臂阀臂宽 $a=0.5\text{ mm}$ 时流量为 43.8 ml/min,即此时对称阀臂宽 $a=0.3\text{ mm}$ 的流量约为单臂阀臂宽 $a=0.5\text{ mm}$ 时流量的 2.84 倍。

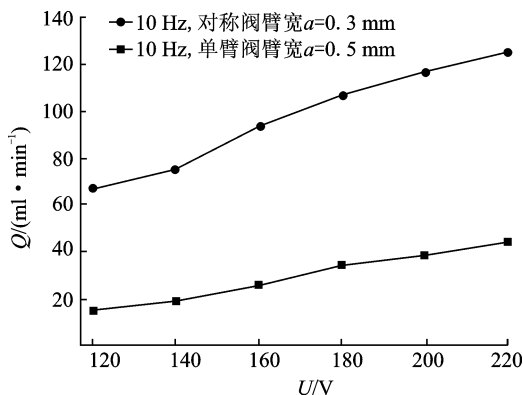


图 12 对称阀臂宽 $a=0.3\text{ mm}$ 和单臂阀臂宽 $a=0.5\text{ mm}$ 时电压与泵流量关系对比

Fig. 12 The relation between voltage and pump flow when the arm width of the symmetrical valve $a=0.3\text{ mm}$ and the arm width of the single-arm valve $a=0.5\text{ mm}$

这是由于对称阀曲臂对阀体的对称作用力,可以克服单臂阀工作过程中存在的侧向力 F_s 对阀体运动的影响,对称阀具有更好的截止性能;同时由于 $F'_N > F_N$ 即对称阀阀体所受的轴向力大于单臂阀的受力,对称阀的开启量更大,因此其泵流量比单臂阀的高。

5.3 对称阀进出口臂宽相同与不同时泵输出性能对比

图 13 所示为对称阀泵进出口臂宽相同与不同时电压与泵流量关系对比。由试验数据可知,在输入电压为 220 V、频率为 10 Hz 时,臂宽 $a_i=0.8\text{ mm}$, $a_o=0.4\text{ mm}$ (i :进口阀; o :出口阀)时泵流量为 78 ml/min,臂宽 $a_i=0.4\text{ mm}$, $a_o=0.8\text{ mm}$ 时泵流量为 67.2 ml/min,臂宽 $a_i=a_o=0.4\text{ mm}$ 时泵流量为 57.6 ml/min,臂宽 $a_i=a_o=0.8\text{ mm}$ 时泵流量为 48 ml/min。即输入电压和频率相同为 220 V, 10 Hz 的情况下,当进口阀臂宽大 ($a_i=0.8\text{ mm}$) 出口阀臂宽小 ($a_o=0.4\text{ mm}$) 时泵流量是进口阀臂宽小 ($a_i=0.4\text{ mm}$) 出口阀臂宽大 ($a_o=0.8\text{ mm}$) 时泵流量的 1.16 倍左右,是进、出口阀臂宽相同且小 ($a_i=a_o=0.4\text{ mm}$) 时泵流量的 1.35 倍左右,是进、

图 12 所示为对称阀臂宽 $a=0.3\text{ mm}$ 和单臂阀

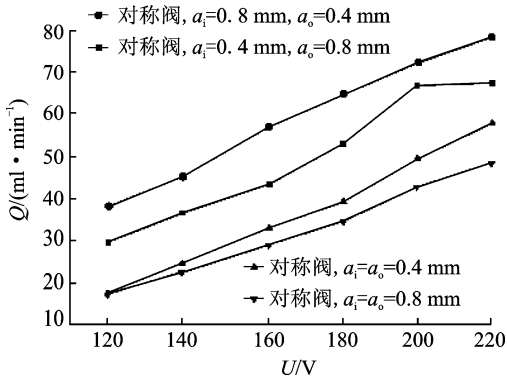


图13 对称阀泵进出口臂宽相同与不同时电压与泵流量关系对比(i:进口阀;o:出口阀)

Fig. 13 The relation between voltage and pump flow when the arm width of the inlet and outlet of the symmetrical valve is different and when the arm width of the inlet and outlet of the symmetrical valve are the same(i: inlet valve;o: outlet valve)

出口阀臂宽相同且大($a_i = a_o = 0.8 \text{ mm}$)时泵流量的1.63倍左右。

当臂宽 $a_i < a_o$ 时,因为泵结构设计中出口阀的安装位置朝下,出口阀的重量增大,在重力作用下出口阀开启时速度加快,关闭时速度降低,泵流量增大。当臂宽 $a_i > a_o$ 时,进口阀的重量大于出口阀的重量,则进口处吸程时阀的开启速度降低,而排程时关闭速度提高,扩大了对称曲臂阀“慢开启、快关闭”的优势,吸程中从进口流入泵腔的流体量更多,排程中从进口回流的流体更少,所以泵流量增大。因此,对称阀中当进出口阀臂宽不同时泵流量大于臂宽相同时的泵流量,且进口阀臂宽大于出口阀臂宽时的泵流量最大。

6 结束语

基于前期单臂螺旋线形阀压电泵试验研究,笔者首先分析了单臂阀阀体运动可能存在因为开启和关闭时侧向力的作用引起的阀体倾斜而降低流量的缺陷,构造悬臂固支旋转对称双臂阀体结构,并针对该阀体设计对称螺旋线形阀压电泵;然后,进行了悬臂固支旋转对称双臂阀体的力学分析并据此进行泵流量关系式的解析;最后,制作了6种臂宽 a 的对称螺旋线形阀和压电泵样机,利用实际样机进行单臂阀与旋转对称双臂阀的阀参数对泵参数影响的试验。

试验结果表明:输入电压为 220 V、频率为 10 Hz时,臂宽 a 为 0.3 mm 时的对称阀压电泵输出

流量为最高;旋转对称双臂阀泵流量比其2倍左右臂宽的单臂阀泵流量高1.25倍~2.84倍;对称阀泵进出口阀臂宽不同时的流量大于臂宽相同时的泵流量,且臂宽 $a_i > a_o$ 的泵流量大于 $a_i < a_o$ 时的泵流量。

针对阀结构及参数的变化对泵输出的影响做了理论和试验研究,还需要继续探讨泵体的结构及尺寸参数等对输出性能的影响,以获得更佳的效果。

参 考 文 献

- [1] Spencer W J, Corbett W T, Dominguez L R, An electronically controlled piezoelectric insulin pump and valves[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1978, 25(3):153-156.
- [2] 阙君武,杨志刚,唐可洪,等. 新结构药品输送压电泵的泵送特性[J]. 生物医学工程学杂志, 2004, 21(2): 297-301.
Kan Junwu, Yang Zhigang, Tang Kehong, et al. Pumping performance of a new piezoelectric pump for drug delivery[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2004, 21(2):297-301. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 张建辉,郭宗信,黄毅,等. 内外不等锥度的软质锥壳形单阀体压电泵的原理与试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24):143-149.
Zhang Jianhui, Guo Zongxin, Huang Yi, et al. Theory and experiment on the soft texture and conning shaped single valve piezoelectric pump with different interior and exterior taper[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24):143-149. (in Chinese)
- [5] 吴越,杨志刚,刘勇,等. 压电泵设计中阀的匹配方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(S2):33-36.
Wu Yue, Yang Zhigang, Liu Yong, et al. Study on the performance optimization of check valve in piezoelectric pump[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(S2):33-36. (in Chinese)
- [6] Hu Xiaohui, Zhang Jianhui, Huang Yi, et al. Principle

- and experimental verification of caudal-fin-type piezoelectric-stack pump with variable-cross-section oscillating vibrator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(1):128-136.
- [7] 胡笑奇,方雅敏,张蕊华,等. 刚柔结构仿尾鳍压电双晶片无阀泵的实验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(3):476-480.
- Hu Xiaochi, Fang Yamin, Zhang Ruihua, et al. Experimental study of caudal-fin-like piezoelectric -bimorph valveless pump with flexible-rigid structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(3):476-480. (in Chinese)
- [8] Fukazawa H. The research of piezoelectric pump[D]. Yamagata;Japan Yamagata University Dissertation for Master's Degree,1997.
- [9] Ito M. The research of piezoelectric pump[D]. Yamagata;Japan Yamagata University Dissertation for Master's Degree,1998.
- [10] Suzuki K, Fukazawa H. There search of piezoelectric pump[C]//Proceedings of Northeast Branch of the Japan Society of Mechanical Engineers, Lwaki the Local Courses Lecture Papers. Sendai;Japan Society of Mechanical Engineers, 1997:193-194.
- [11] Suzuki K, Suzuki K, Nakanishi T. The research of cone valve piezoelectric pump[C]//Proceedings of Society of Japan Design Engineering Northeast Branch, Yortheast Branch. Yonezawa, Japan; Society of Japan Design Engineering,2000:16-17.
- [12] 尹执中,庞江涛,胡桅林,等. 悬臂梁式微型阀[J]. 仪表技术与传感器, 2000(3):38-43.
- Yin Zhizhong, Pen Jiangtao, Hu Weilin, et al. Cantilever micro valve [J]. Instrument Technique and Sensor, 2000(3):38-43. (in Chinese)
- [13] 程光明,刘国君,杨志刚,等. 基于悬臂梁阀的微型压电泵的实验研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(10):1181-1221.
- Cheng Guangming, Liu Guojun, Yang Zhigang, et al. Experimental research on piezoelectric micro-pump using cantilever check valve[J]. Mechanical Science and Technology,2005,24(10):1181-1221. (in Chinese)
- [14] 曾平,林敬国,程光明. 整体开启阀微型压电泵实验研究[J]. 压电与声光, 2006, 28(5):594-597.
- Zeng Ping, Lin Jingguo, Cheng Guangming. A study on testing for micro piezo-pump with integral valve [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2006, 28(5):594-597. (in Chinese)
- [15] 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 Xiaofeng, Yang Zhigang, Liu Xiaolun, et al. Performance research on piezoelectric pumps based on holistic opening valve and cantilever valve[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4):648-651. (in Chinese)
- [16] Zhang Jianhui, Wang Ying, Fu Jun, et al. Development of piezoelectric pump with valve[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 33(3):260-273.
- [17] 王颖,张建辉,刘瑞峰. 螺旋线形阀压电泵的理论及试验研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20):144-150.
- Wang Ying, Zhang Jianhui, Liu Ruifeng. The Theoretical and experimental research on the piezoelectric pump with helical linear shaped valve [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20):144-150. (in Chinese)
- [18] 王颖,张建辉. 阀参数对螺旋线形阀压电泵输出性能的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4):800-806.
- Wang Ying, Zhang Jianhui. Influence of valve parameters on output performance of spiral linear valve piezoelectric pump[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4):800-806. (in Chinese)
- [19] Ham Y B, Son J J, Park J H. A study on the small size PZT pump for cooling water circulation[C]//International Joint International on Sice-icase. Bexco, Busan, Korea;[s. n.],2007:4126-4129.



第一作者简介:王颖,女,1970年11月生,副教授、高级工程师。曾发表《阀参数对螺旋线形阀压电泵输出性能的影响》(《机械工程学报》2016年第52卷第20期)等论文。

E-mail:450966011@qq.com

