

阀参数对螺旋线形阀压电泵输出性能的影响*

王颖^{1,3}, 张建辉^{2,3}, 付俊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 为了提高拟悬臂梁结构的螺旋线形阀压电泵输出性能,探讨了阀的几何参数和阀的材料参数与泵输出量之间的优化关系。首先,推导了泵流量输出与阀几何参数关系式;然后,在该理论指导下,通过多组试验研究了阀的几何参数对泵输出的量的影响关系,得出选用适当的螺旋极角以及适当降低阀的臂宽和厚度可以提高压电泵的输出;最后,对关键元器件螺旋线形阀材料参数的选用进行了比较,得出选用较低切变模量的阀材料可以提高压电泵输出。试验结果表明,要获得较高的泵流量,阀的极角取值为 1.5π 、阀厚度取值为 0.1 mm 时最佳,而流量受臂宽的影响呈单边的趋势性不明显;相同条件下,由于铍青铜的材料切变模量小于弹簧钢的材料切变模量,铍青铜阀压电泵的输出流量高于弹簧钢阀压电泵的输出流量。

关键词 压电; 泵; 压电陶瓷; 螺旋线形阀

中图分类号 TH35; TH38

引言

功能性材料除了具有一般的机械特性以外,还具有其他的功能特性,例如光电功能、磁功能、分离功能和形状记忆功能等,在传统机械和工程中的应用越来越广泛^[1-5]。压电泵是以压电陶瓷为驱动源的机械换能器,可以驱动液体和气体,具有无磁驱动、结构简单、体积小和重量轻等优点,在航空航天、微机械和生物医药工程等领域日益受到青睐。从1978年被发明以来,压电泵的发展与国民经济发展需求密切相关,其结构和形式多种多样,层出不穷^[6-12]。其中,有阀压电泵通过单向阀控制压电泵流体的输入输出方向。因为单向阀截止性能好,泵的输出流量较大,具有广阔的应用前景,且因结构简单、制造容易等因素受到研究人员的关注。但是,由于简单悬臂梁阀的悬臂短、开启度小、易屈服变形导致截止性降低等缺点,限制了简单悬臂梁阀压电泵的应用。

阙君武等^[13]建立了液体内悬臂梁阀片的动力学模型,分析了阀片结构参数、阀片与阀座间隙对液体内阀片基频的影响规律。程光明等^[14]在迭片式

结构的微型压电泵中使用了悬臂梁阀,研究发现适当减小悬臂梁的厚度及增大悬臂长度,有利于提高通过悬臂梁阀的流量。赵明丽等^[15]建立了悬臂梁阀单腔压电泵系统的动态模型,研究了出流形式对压电泵输出能力的影响。何丽红等^[16]采用理论分析与试验测试的方式,对采用伞形阀压电泵の出流孔位置及进出口位置进行了研究。为了更好地适应有阀压电泵巨大应用前景,王颖等^[17]开发了具有螺旋线形阀拟悬臂梁结构,臂长是简单悬臂梁阀臂长数倍的螺旋线形阀压电泵。

笔者在文献^[17]的基础上推导泵输出与阀参数的关系公式,结合试验对螺旋线形阀的几何参数和材料参数进行优化设计,制作压电泵样机对各组阀压电泵输出性能进行试验比较,以进一步提高螺旋线形阀压电泵的性能,扩展其用途。

1 螺旋线形阀压电泵结构

图1为螺旋线形阀压电泵结构示意图。压电泵主要由压电振子、泵盖、泵体、螺旋线形阀、底座和进/出水管组成。在泵体的进水口和出水口处分别安装有一对相互倒置的螺旋线形阀,安装在泵体进

* 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资助项目(ZJH3-2001);泰州职业技术学院院级科研重点资助项目(TZYKYZD-17-2)

收稿日期:2016-08-31;修回日期:2016-09-28

水口处的为吸入阀,安装在泵体出水口处的为排出阀。压电振子在交变电流作用下发生变形,当振子由下向上变形至最高处泵腔处于舒张状态时,泵腔的容积增大,腔内出现负压,此时排出阀关闭,吸入阀打开,流体流入泵腔,为泵的吸程;当振子由上向下变形至最低处泵腔处于压缩状态时,泵腔容积减小,腔内压强增大,此时吸入阀关闭,排出阀打开,流体流出泵腔,为泵的排程。如此循环往复,压电泵可实现流体的吸入和排出。

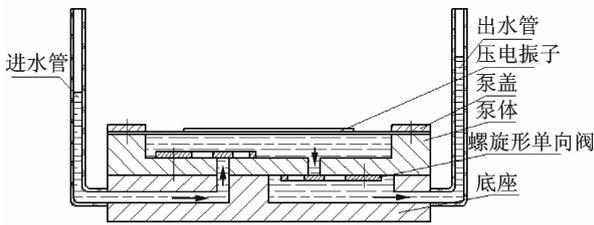


图 1 螺旋线形阀压电泵结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of piezoelectric pump of spiral linear valve

图 2 为拟悬臂梁结构的螺旋线形弹性固支阀(简称阀),包含定位器、螺旋线形曲臂(简称曲臂)和阀体。曲臂在水平面内的投影为阿基米德螺旋线,其截面为矩形,设螺旋极角为 θ ,截面宽为 a ,高为 b 。阀曲臂臂长为简单悬臂梁阀臂长的数倍,工作时开启度大,且因其螺旋线形弹性结构,在开启过程中,会逐渐增加开启的反弹力,在关闭过程中,会瞬间释放积聚的弹性力而使关闭快速完成。同时,阀体可以上下回位,左右也具有对中功能,不仅跟从性和截止性高,而且结构简单、制作成本低。

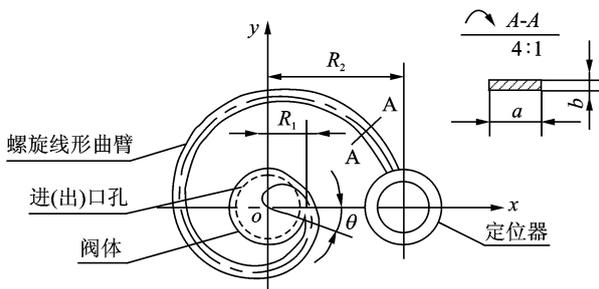


图 2 螺旋线形阀结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spiral linear valve

2 理论分析

螺旋线形阀压电泵流量公式^[18]为

$$Q = \pi^3 n \rho_l g r^2 R_f \frac{3d_{31}d^4}{16\delta^2} fU \quad (1)$$

其中: ρ_l 为流体密度; g 为重力加速度; r 为阀口半径; θ 为极角; 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; f 为压电振子的驱动频率; U 为压电振子的驱动电压。

n 为曲臂实际最大圈数,由图 2 可知

$$n = \frac{\theta}{2\pi} \quad (2)$$

R_f 为阀的材料和尺寸系数^[18]

$$R_f = \frac{(R_2^2 + R_1^2)(R_2 + R_1)}{2GI_p} \quad (3)$$

其中: G 为材料切变模量; I_p 为极惯性矩,当矩形截面的曲臂截面尺寸 $a > b$ 时, $I_p = k_1 ab^3$; k_1 为系数^[18],与 $\frac{a}{b}$ 有关,其值如表 1 所示; R_1 为曲臂小端即阀体半径,设计 $R_1 = 3 \text{ mm}$; R_2 为曲臂大端半径。

表 1 系数 k_1 的值

Tab. 1 Value of coefficient k_1

$\frac{a}{b}$	k_1
3.3	0.271 1
5	0.291 3
6.25	0.299 7
7.5	0.305 3
8.75	0.309 3
10	0.312 3

设计中曲臂采用的螺旋线参数方程为

$$\begin{cases} x(t) = 10.5t\cos(536.4t) \\ y(t) = 10.5t\sin(536.4t) \end{cases} \quad (4)$$

其中: $t \in [0, 1]$ 为参变量。

如图 2 所示,选取不同极角 θ 的螺旋线可得到大端半径 R_2 不同的曲臂阀。为简单起见,大端半径 R_2 表示为

$$R_2 = F(\theta) \quad (5)$$

设 $R(\theta, R_1) = (R_1^2 + R_2^2)(R_1 + R_2)$,代入式(3)得到

$$R_f = \frac{R(\theta, R_1)}{2GI_p} = \frac{R(\theta, R_1)}{2Gk_1 ab^3} \quad (6)$$

将式(2)和式(6)代入式(1),得到

$$Q = \pi^3 \rho_l g r^2 \frac{3d_{31}d^4}{32\delta^2} fU \frac{n}{Gk_1 ab^3} R(\theta, R_1) = K \frac{\theta}{Gk_1 ab^3} R(\theta, R_1) \quad (7)$$

其中: $K = \pi^2 \rho_l g r^2 \frac{3d_{31}d^4}{64\delta^2} fU$ 。

从式(7)可以看出,当 K 值一定时,压电泵输出流量与阀几何参数 $a, b, \theta, R(\theta, R_1)$ 和材料切变模量

G 相关,即

$$Q = K_{\theta} \theta R(\theta, R_1) \quad (8a)$$

$$Q = \frac{K_a}{k_1 a} \quad (8b)$$

$$Q = \frac{K_b}{k_1 b^3} \quad (8c)$$

$$Q = \frac{K_G}{G} \quad (8d)$$

其中: $K_{\theta} = \frac{K}{G k_1 a b^3}$, 为极角系数, 当 K_{θ} 为定值时, 流量 Q 受阀曲臂极角 θ 影响较复杂, 呈正相关; $K_a = \frac{K \theta}{G b^3} R(\theta, R_1)$, 为臂宽系数, 当 K_a 为定值时, 流量 Q 与阀曲臂的系数 k_1 和臂宽 a 有关, 由表 1 可知, 臂宽 a 越大, 系数 k_1 也越大, 因此流量 Q 与阀臂宽 a 呈负相关; $K_b = \frac{K \theta}{G a} R(\theta, R_1)$, 为厚度系数, 当 K_b 为定值时, 流量 Q 与阀曲臂的系数 k_1 和厚度 b 有关。

由表 1 可知, 虽然厚度 b 越大, 系数 k_1 越小, 但是厚度 b 的变化引起系数 k_1 值的变化量远小于 b 值本身的变化量, 因此流量 Q 与厚度 b 呈负相关。

$K_G = \frac{K \theta}{k_1 a b^3} R(\theta, R_1)$, 为材质系数, 当 K_G 为定值时, 流量 Q 与阀材料切变模量 G 呈负相关。

3 试验

分别选用 5 种极角 θ 、7 种臂宽 a 、5 种厚度 b 和 2 种材质的弹性金属片制作不同的螺旋线形阀片组制成压电泵样机。泵体、泵盖和底座材质使用有机玻璃, 阀口半径 r 为 2.5 mm, 试验流体介质为蒸馏水。表 2 为压电振子几何参数。图 3 为泵流量试验照片。

表 2 压电振子几何参数

Tab. 2 Geometrical parameters of piezoelectric vibrator

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

3.1 阀的极角 θ 对泵输出性能的影响

极角分别为 π 、 1.25π 、 1.5π 、 1.75π 和 2π 时的 5 种阀极角 θ 参数如表 3 所示。表 4 为不同极角 θ 时阀的其他几何参数, 阀片材料为弹簧钢。



图 3 泵流量试验照片

Fig. 3 Photo of test of piezoelectric pump flow

表 3 阀的极角 θ 参数

Tab. 3 Polar angle parameter θ of valve

θ/rad	π	1.25π	1.5π	1.75π	2π
阀照片					

表 4 不同极角 θ 时阀片组其他几何参数

Tab. 4 Other geometric parameters of valve plate with different polar angle θ

mm		
截面宽 a	截面厚度 b	阀体半径
1	0.2	3

图 4 为阀极角与泵进水管压差之间的关系。由试验数据可知: 当输入频率为 15 Hz 时, 压差在极角 $\theta < 1.5\pi$ 时变化不大; 当极角大于 1.5π 时呈逐渐增大的趋势; 在 $\theta = 2\pi$ 时压差最大, 且压差随着电压的提高而增大。

图 5 为阀极角与泵流量之间的关系。由试验数据可知, 当输入电压为 180 V、频率为 8 Hz 时, 泵流量在极角 θ 从 π 增大至 1.5π 时呈逐渐增大的趋势, 在极角 θ 从 1.5π 增大至 2π 时呈逐渐降低的趋势。

根据式(8a)可知, 流量 Q 与阀曲臂极角 θ 应该呈正相关。当极角 θ 从 π 增大至 1.5π 时, 随着极角 θ 的增大, 阀的臂长逐渐增大, 作用在阀体上的弯矩也变大, 使得阀的开启量变大, 泵流量呈逐渐增大的趋势。但是当极角 θ 从 1.5π 增大至 2π 时, 随着极角 θ 的增大, 阀的臂长增大有限, 而自重却增大较多, 使得阀开启时间和开启高度减小, 导致泵流量降低。可见, 为获得较高的压电泵输出流量, 阀的极角 θ 取值为 1.5π 时最佳。

3.2 阀臂宽 a 对泵输出性能的影响

分别制作臂宽 a 为 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5,

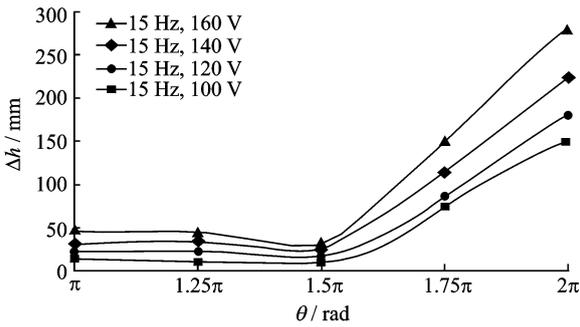


图 4 阀极角与泵进水管压差之间的关系
Fig. 4 Relationship between valve polar angle and differential pressure of piezoelectric pump water inlet and water outlet

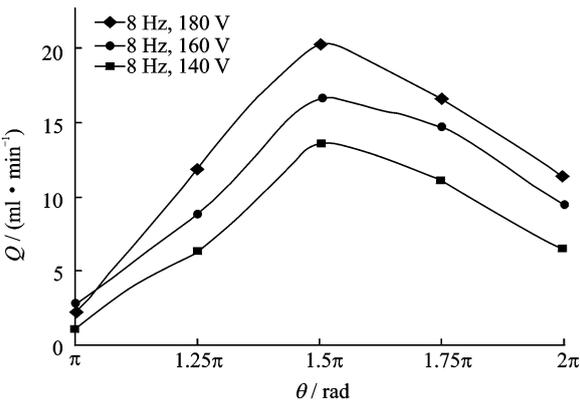


图 5 阀极角与泵流量之间的关系
Fig. 5 Relationship between valve polar angle and piezoelectric pump flow

1.75 和 2 mm 时的 7 种阀,如表 5 所示。表 6 为不同臂宽 a 时,阀片组的其他几何参数,阀片材料为弹簧钢。

表 5 阀的臂宽 a 参数

Tab. 5 Arm width parameter a of valve

a/mm	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2
阀照片							

表 6 不同臂宽 a 时阀片组其他几何参数

Tab. 6 Other geometric parameters of valve plate with different arm width a

厚度 b/mm	极角 θ/rad	阀体半径/ mm
0.2	1.5π	3

图 6 为阀曲臂宽与泵进水管压差之间的关系。图 7 为阀曲臂宽与泵流量之间的关系。由试验数据可知,在输入电压为 120 V、频率为 10 Hz、曲臂

宽 $a=1.5$ mm 时,压电泵进水管压差最大为 228 mm 水柱。在输入电压为 220 V、频率为 10 Hz、臂宽 $a=0.5$ mm 时,泵流量为 43.8 ml/min;臂宽 $a=1$ mm 时,泵最大流量为 48 ml/min;臂宽 $a=2$ mm 时,泵流量为 47.4 ml/min,与 $a=1$ mm 时的流量接近。

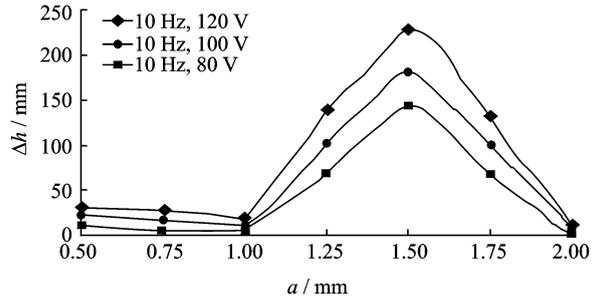


图 6 阀曲臂宽与泵进水管压差之间的关系
Fig. 6 Relationship between width of valve crank arm and differential pressure of piezoelectric pump water inlet and water outlet

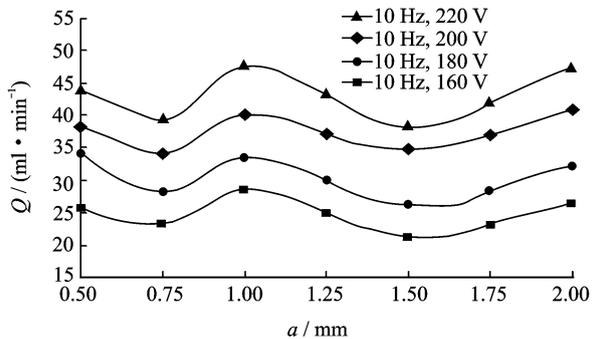


图 7 阀曲臂宽与泵流量之间的关系
Fig. 7 Relationship between width of valve crank arm and piezoelectric pump flow

根据式 (8b) 可知,流量 Q 与阀臂宽 a 呈负相关。由于泵流量与阀开启和关闭的时间直接相关,当臂宽 a 由小到大变化时,阀曲臂表面积增大。阀在运动过程中,受到阀体下方流体的作用力变化不大,随着臂宽 a 和表面积的增加,阀体上方流体作用力在变化,即开启时上方的阻力增大而慢开启,关闭时上方的关闭力也增大而快关闭,这两种因素对流量的影响是一个为正向,一个为负向,所以随着臂宽 a 的增大,泵流量所受影响不大,呈单边的趋势性不明显。

3.3 阀厚度 b 对压电泵输出性能的影响

制作厚度 b 为 0.1、0.2、0.3、0.4,和 0.5 mm 时

的5种阀如表7所示。表8为不同厚度*b*时阀片组的其他几何参数,阀片材料为弹簧钢。

表7 不同阀厚度*b*参数
Tab.7 Valve thickness parameters *b*

<i>b</i> /mm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
阀照片					

表8 不同厚度*b*时阀片组的其他几何参数

Tab.8 Other geometrical parameters of the valve plate with different thickness *b*

臂宽 <i>a</i> /mm	极角 θ /rad	阀体半径/mm
1	1.5π	3

图8为阀厚度与泵进出水管压差之间的关系。图9为阀厚度与泵流量之间的关系。由试验数据可知,在输入电压为200 V、频率为10 Hz时,阀厚度*b*从0.1 mm变化至0.5 mm时,泵进出水管压差从289 mm水柱变化至9.5 mm水柱,呈逐渐降低的趋势;在输入电压为220 V、频率为10 Hz时,厚度*b*从0.1 mm增大至0.5 mm时,泵流量从111 ml/min变化至0,呈逐渐减小的趋势。

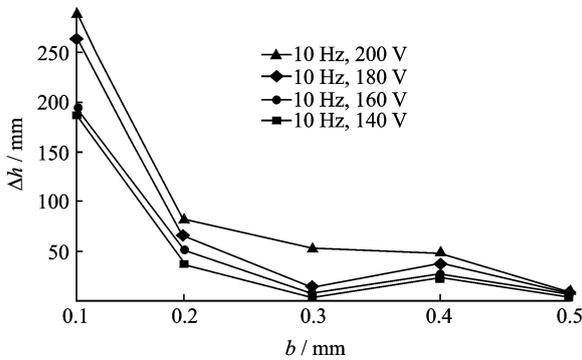


图8 阀厚度与泵压差之间的关系

Fig.8 Relationship between valve thickness and differential pressure of piezoelectric pump

从图8和图9的试验数据可知:泵进出水管压差和泵流量均随着阀厚度*b*的增大而逐渐降低。这是因为阀片材料厚度*b*越小,阀片的弹性系数会越高,重量也越轻,使得在相同输入的情况下,厚度越小,阀的开启度越大且关闭也越迅速,所以泵流量就越高。

可见,当阀片厚度*b*<0.1 mm时,应该会出现由于重量的减轻,阀片关闭速度降低而使得流量降低的情况,但由于市场上难以找到厚度*b*<0.1 mm

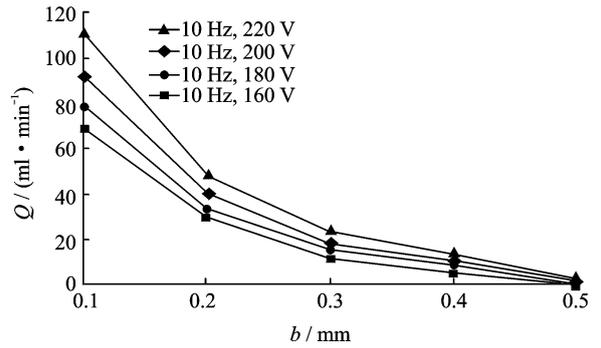


图9 阀厚度与泵流量之间的关系

Fig.9 Relationship between valve thickness and piezoelectric pump flow

的弹簧钢片,且材料厚度过小加工出来的阀片变形也较大,易出现阀片翘曲并容易断裂的现象,所以试验中阀厚度*b*值最小选取为0.1 mm,从而出现流量随厚度*b*值的变化单调降低的现象。

图10为进出口阀厚度不同与厚度相同时,电压与泵流量之间的关系对比。由试验数据可知,在输入相同电压为220 V、频率为10 Hz的情况下,当进出口阀片厚度*b*同为0.1 mm时,泵流量最高为111 ml/min;当进口阀厚度*b*为0.3 mm大于出口阀厚度0.1 mm时,泵流量次之为59.4 ml/min;当进口阀厚度*b*为0.1 mm小于出口阀厚度0.3 mm时,泵流量为53.4 ml/min;当进出口阀片厚度*b*同为0.3 mm时,泵流量最小为23.4 ml/min。可见,当阀片厚度*b*相同且为0.1 mm最薄时,泵流量最大;当进出口阀片厚度不同时,阀片厚度*b_i*>*b_o*时的流量比*b_i*<*b_o*时的流量大;当阀片厚度*b*相同且为0.3 mm最厚时,泵流量最小。

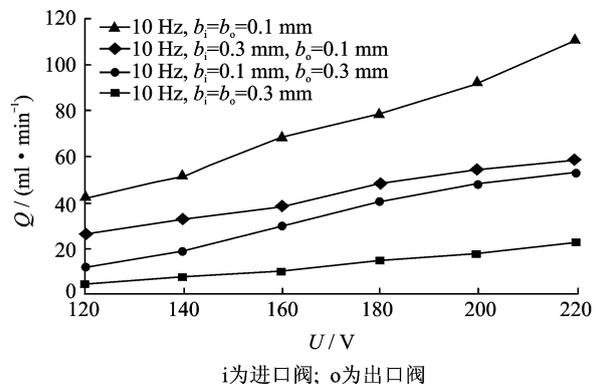


图10 进出口阀厚度不同和相同时,电压与泵流量之间的关系对比

Fig.10 Comparison of the relationship between voltage and pump flow of the different thickness and the same thickness of the inlet and outlet valve

当 b_i 与 b_o 相同时,其对流量的影响如前所述。当 b_i 与 b_o 不同时,阀的厚度越大,其关闭速度就越快,所以振子往下振动泵排水时,如果阀片厚度 $b_i > b_o$,则进口阀先于出口阀关闭,从进口回流的流体就会减少,从出口阀排出的流体就增多;如果 $b_i < b_o$,则出口阀先于进口阀关闭,泵的流量就会减小。可见,阀片厚度 $b_i > b_o$ 时的流量比 $b_i < b_o$ 时的流量大。为获得较高的压电泵输出流量,在所选的材料厚度中,阀厚度 b 取值同为 0.1 mm 时最佳。

3.4 阀材质对压电泵输出性能的影响

分别用弹簧钢和铍青铜制作 2 种阀,表 9 为两种材质阀片组的其他几何参数。

表 9 两种材质的阀片组其他几何参数

Tab. 9 Two kinds of material of the valve set of other geometric parameters

臂宽 a /mm	厚度 b /mm	极角 θ /rad	阀体半径/mm
1	0.4	1.5π	3

图 11 为两种材质阀的频率与泵流量之间的关系。由试验数据可知,在输入电压为 160 V、频率为 12 Hz 时,铍青铜阀压电泵输出流量最大为 12.6 ml/min,大于弹簧钢的最大输出流量 4.8 ml/min。图 12 为两种材质阀的电压与流量之间的关系。由试验数据可知,在输入电压为 220 V、频率为 15 Hz 时,铍青铜阀压电泵输出流量为 19.8 ml/min,大于弹簧钢阀压电泵的输出流量 4.2 ml/min。

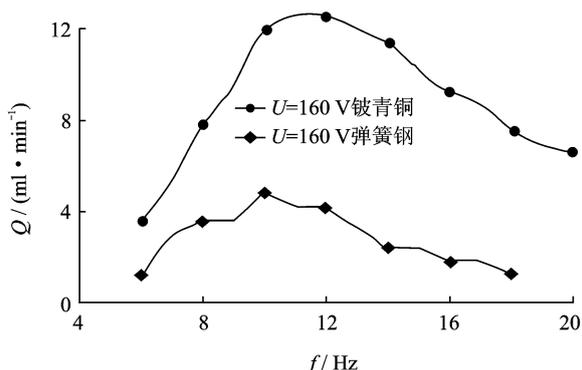


图 11 两种材质阀时频率与泵流量之间的关系

Fig. 11 Relationship between frequency and flow of valve piezoelectric pump in two materials

铍青铜的材料切变模量 G_B 远小于弹簧钢的材料切变模量 G_M (B 表示铍青铜, M 表示弹簧钢),根据式(8d)可知,泵流量 Q 与阀材料切变模量 G 呈负相关,试验结果显示,两种材质对压电泵输出的影响

趋势与理论分析一致。

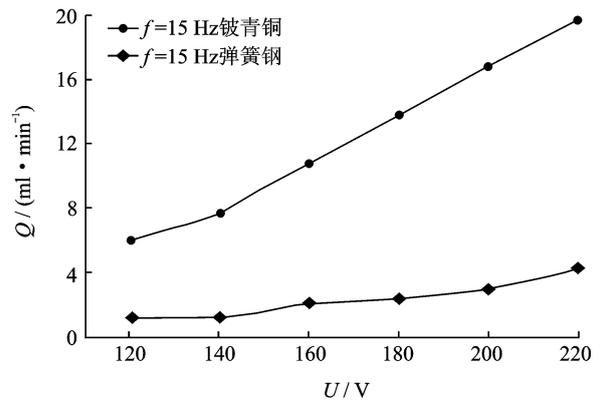


图 12 两种材质阀时电压与泵流量之间的关系

Fig. 12 Relationship between voltage and flow of valve piezoelectric pump in two materials

4 结束语

推导了螺旋线形阀压电泵输入和输出关系的理论公式,从理论上研究了阀参数对压电泵输出性能的影响。制作了 5 种极角 θ , 7 种臂宽 a , 5 种厚度 b 和 2 种材质的螺旋线形阀和压电泵样机,并进行各组阀压电泵输出性能试验比较。理论和试验同时证明,选用适当的阀参数可以提高泵输出。试验结果表明:相同条件下,要获得较高的泵流量,阀的极角 θ 取值为 1.5π , 阀厚度 b 取值为 0.1 mm 时为最佳,而臂宽 a 对流量的影响不大,呈单边趋势性不明显;铍青铜阀压电泵的输出流量高于弹簧钢阀压电泵的输出流量。

参 考 文 献

[1] 金家楣, 泮振锋, 钱富. 阶梯圆柱形压电振子直线型超声电机[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6): 715-719.
Jin Jiamei, Pan Zhenfeng, Qian Fu. Linear ultrasonic motor using notched cylindrical piezoelectric vibrator [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 715-719. (in Chinese)

[2] 姜恩宇, 朱晓锦, 邵勇, 等. SMA 机敏结构交替驱动恒流源及其振动控制[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(2): 204-209.
Jiang Enyu, Zhu Xiaojin, Shao Yong, et al. Alternative driven SMA smart structure based on constant current source for vibration control [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(2): 204-209. (in Chinese)

[3] 季忠, 胡锐兴. 基于 Photoplethysmography 和弹性常数的动脉弹性检测方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 34(5): 873-877.
Ji Zhong, Hu Ruixing. The detection of arterial elas-

- ticity based on Photoplethysmography and elastic constant[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 34(5):873-877. (in Chinese)
- [4] 胡俊辉, 汤强, 王旭. 超声纳米操控技术[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(2):203-211.
Hu Junhui, Tang Qiang, Wang Xu. Ultrasonic nano-manipulation technology [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(2):203-211. (in Chinese)
- [5] 李旭, 霍林生, 李宏男, 等. 混凝土结构中 PZT 传感器的多功能性分析及应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(4):709-714.
Li Xu, Huo Linsheng, Li Hongnan, et al. The analysis and application of multi-functional PZT sensors for health monitoring of concrete structures[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(4):709-714. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] 阚君武, 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)
- [8] 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.
- [9] 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)
- [10] 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, 30(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, 30(S2):33-36. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 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 Xiaohui, 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)
- [13] 阚君武, 吴一辉, 杨志刚, 等. 悬臂梁微型阀特性研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(2):190-193.
Kan Junwu, Wu Yihui, Yang Zhigang, et al. Study on the performance of micro-cantilever valve[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(2):190-193. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 赵明丽, 黄琴, 张玮, 等. 悬臂梁阀单腔压电泵设计方法研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4):607-611.
Zhao Mingli, Huang Qin, Zhang Wei, et al. Investigation on design method of single chamber piezoelectric pump with cantilever valve[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4):607-611. (in Chinese)
- [16] 何丽红, 侯铁成, 胡忆洵. 压电泵新型被动阀的结构研究[J]. *微计算机信息*, 2007, 23(12-1):118-120.
He Lihong, Hou Tiecheng, Hu Yiwei. Structure study of a novel passive valve for piezoelectric pump [J]. *Micro Computer Information*, 2007, 23(12-1):118-120. (in Chinese)
- [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] 张英会, 刘辉航, 王德成. 弹簧手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1997:304-305.



第一作者简介:王颖,女,1970年11月生,硕士、副教授、高级工程师。主要研究方向为机械设计及理论。曾发表《数控铣床编程与操作实训教程》(上海:上海交通大学出版社,2010年)等论著。
E-mail:450966011@qq.com

