排灌机械工程学报
2012 年 9 月 Sept. 2012
第 30 卷 第 5 期 Vol. 30 No. 5
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2012.05.010

并联压电泵腔体初始容积设计

孙晓锋[1]，杨志刚[2]，姜德龙[1]，何丽红[1]，姜斌[3]
（1. 吉林化工学院机电工程学院，吉林 吉林 132022；2. 吉林大学机械科学与工程学院，吉林 长春 130025；3. 吉林农业大学发展学院，吉林 长春 130025）

摘 要：为探究腔体初始容积对压电泵性能的影响，设计了双腔体并联压电泵. 通过理论分析，确定了双腔并联压电泵能够工作时泵腔初始容积的取值范围，根据理论公式设计制作了 6 种不同腔体初始容积的双腔并联有阀压电泵样机，对泵腔初始容积的变化与泵工作性能关系进行研究. 在 110 V 工作电压下，工作频率小于 400 Hz 范围内，用压电双晶片进行驱动，分别以液体水和空气为介质，对不同压缩比（压电振子振动产生的泵腔容积变化量与泵腔初始容积的比值）下的并联泵进行了试验测试. 结果表明，当泵送液体水时，压缩比为 1/18 时泵的整体输出流量最好，最大输出流量可达 1 330 mL/min，压缩比越大，泵的输出压力和自吸能力越好，最大输出压力和自吸高度分别为 58.5 kPa 和 69 cm；当泵送气体空气时，压缩比越大，泵的输出能力越好，最大输出流量和压力分别为 850 mL/min 和 6.5 kPa，当压缩比小于 1/32 时，泵已经失去了输出气体能力.

关键词：压电泵；双腔；并联；初始容积；压缩比
中图分类号：S277.9；TH38　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2012)05-0543-05

Design of initial volume of parallel double-chamber of piezoelectric pump

Sun Xiaofeng[1], *Yang Zhigang*[2], *Jiang Delong*[1], *He Lihong*[1], *Jiang Bin*[3]
(1. Department of Machinery and Electricity Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin, Jilin 132022, China; 2. Mechanical Science and Engineering College of Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China; 3. Development College of Agriculture University, Changchun, Jilin 130025, China)

Abstract: In order to explore influence of initial volume of the pumping chamber on performance of a piezoelectric pump, several piezoelectric pumps with parallel double-chamber and a check-valve were manufactured, in which six different initial volumes were designed. The performance of those pumps was measured under different compression ratios (the ratio of stroke volume over the initial volume) when they were driven by a bimorph actuator at the 110 V driving voltage and frequency of less than 400 Hz, in the cases that water and air were handled, respectively. The results showed that a pump has the best output flow rate when its compression ratio was 1/18 for water, and the highest flow rate as high as 1 330 mL/min. A larger compression ratio could result into a higher output pressure and a better self-priming capability. The maximum output pressure and the highest self-priming water column height were 58.5 kPa and 69 cm, respectively. For air, however, the larger the compression ratio, the better the pump output performance. The maximum output flow rate and the highest output pressure were 850 mL/min and 6.5 kPa, respectively. When the compression ratio was less than 1/32, the

收稿日期：2010-10-25
基金项目：国家 863 计划项目(2007AA04Z336)；吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(2012286)
作者简介：孙晓锋(1974—)，男，吉林公主岭人，副教授，博士(sxflxm@126.com)，主要从事压电驱动与控制技术研究.
杨志刚(1957—)，男，吉林长春人，教授，博士生导师(yzg@jlu.edu.cn)，主要从事压电驱动与控制技术研究.

pump performance would be breakdown.

Key words: piezoelectric pump; double-chamber; in parallel; initial volume; compression ratio

压电泵是通过压电振子在交变电压作用下产生往复振动,使泵的腔体容积发生变化,腔体内部和外界环境间产生压差,实现流体的泵送流动. 查阅国内外关于压电泵研究资料可发现,有阀压电泵的输出流量和输出压力主要受以下几个因素影响[1-3]: ①单个循环周期内的体积变化量,也即在循环中泵腔最大体积与最小体积差. 这主要是由压电振子变形能力所决定,同时也和加在压电振子上的电压大小及振子的周边固定方式有关. ②泵腔的初始容积 V_0. ③泵的工作频率 f,也就是加载在泵上交流工作电压的频率. ④阀的性能. ⑤工作流体的性能. 此外,泵的不同结构形式也是影响压电泵输出性能的重要因素. 对于理想阀和不可压缩流体,由质量守恒得到流量与泵腔容积变化量 ΔV 和工作频率 f 有关.

由于压电振子在安全交变电压作用下产生的振幅非常小(一般为 10 ~ 100 μm),因此泵腔的容积变化量也非常小,泵腔的初始容积大小是决定压电泵能否产生足够大的压差,实现泵正常工作的关键因素.

现在大多关于压电泵的研究主要集中在单腔泵上,关于多腔泵的研究资料还不多,文中设计了一种双腔并联压电泵,在理论上对泵腔的初始容积取值范围进行确定,并通过试验方式,验证腔体初始容积对双腔并联压电泵性能的影响.

1 双腔并联压电泵结构设计

双腔体并联压电泵是因在其工作时,流体从进口通道进入泵中,分成 2 路进入 2 个泵腔,经压电振子驱动后,同时向外界输出,在形式上相当于把 2 个单腔泵并在一起,故称为双腔并联泵. 由于并联泵的 2 个腔体在结构上是相对独立的,因此每个腔体都有进口阀和出口阀,属于 4 阀结构.

双腔并联泵 2 个振子电信号驱动方式可有 2 种,一种是“同步驱动”,另一种是“异步驱动”. “同步驱动”是指 2 个压电振子在同一时刻振动使泵腔容积变化量同时增大或减小,只需压电振子连接信号源时极性相同;“异步驱动”是指压电振子在同一时刻振动各自引起泵腔容积变化量恰恰相反,须使压电振子上施加的信号源极性相反(2 个振子的电信号相位差为 180°),双腔并联泵的结构原理图如图 1 所示.

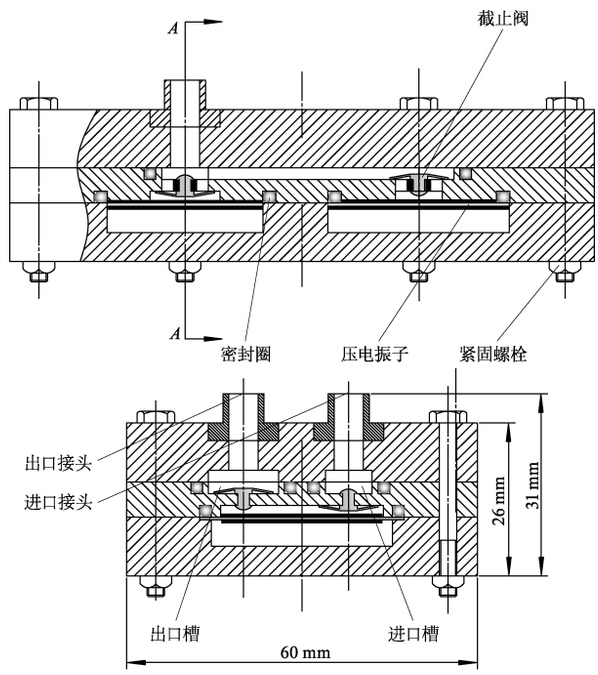


图 1 双腔并联泵的结构原理图

Fig. 1 Structural principle of piezoelectric pump with double-chamber in parallel

2 确定泵腔初始容积

定义单个冲程压电振子振动使腔体容积产生变化量 ΔV 与泵腔体初始容积 V_0 的比值为压缩比[4-6],则有压缩比

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_0}. \tag{1}$$

因为腔体容积变化量很小,腔体的初始容积又相对较大,所以压缩比通常很小. 在腔体容积变化过程中,腔体内外产生的最大压差为 $|\Delta p|$,对于有阀压电泵来说,阀能够开启的临界压力为 $|\Delta p_{crit}|$,因此泵能够工作必须满足的条件是

$$|\Delta p| > |\Delta p_{crit}|. \tag{2}$$

当泵送气体时,假设泵送的是理想气体,腔体变化过程为绝热变化过程,绝热系数为 γ(对于空气 $\gamma = 1.4$),大气压力 p_0,腔体容积变化产生的最大压力差为 Δp,由气体绝热过程公式有

$$p_0 V_0^{\gamma} = (p_0 + \Delta p)(V_0 + \Delta V)^{\gamma}, \tag{3}$$

将方程(1),(3)代入方程(2)得

$$\varepsilon_{\mathrm{gas}} > \left(\frac{p_0}{p_0 - |\Delta p_{\mathrm{crit}}|}\right)^{1/\gamma} - 1 . \tag{4}$$

泵工作在较低频率时,可看作是等温过程,此时绝热系数 γ 趋近等于1,临界压力比大气压力要小得多,这时方程(4)为

$$\varepsilon_{\mathrm{gas}} > \frac{1}{\gamma}\frac{|\Delta p_{\mathrm{crit}}|}{p_0} . \tag{5}$$

当泵送的介质为液体时,设液体的压缩比为 κ,发生在腔内的最大压差为 Δp,由振子振动引起的腔体容积变化量为 ΔV,则有

$$V_0 + \Delta V = V_0(1 - \kappa \Delta V) . \tag{6}$$

联立方程(1),(2)和(6)得

$$\varepsilon_{\mathrm{lq}} > \kappa |\Delta p_{\mathrm{crit}}| . \tag{7}$$

由于液体的压缩性很小(水的压缩比 $\kappa = 0.5 \times 10^{-8}\ \mathrm{m^2 \cdot N^{-1}}$),因此这个条件很容易达到,但这里推导过程中考虑的仅是泵腔内完全充满液体,而没有残留气体产生.

在相同条件下,双振子驱动大大增大了泵腔容积变化产生的压差 Δp,更加容易实现阀的开启,从而保证双振子压电泵具有更好的工作性能.

对于结构完全对称的双腔并联压电泵腔体初始容积的确定,可以通过确定一个腔体的初始容积,进而获得整个泵的初始容积.

假设压电振子在工作时的中心点最大振幅为 $w_{\max}$,腔体为圆柱体,半径为 R,为保证振子能够自由振动,则

$$w_{\max} < \frac{V_0}{\pi R^2} , \tag{8}$$

同时,为保证泵能够打开阀开始工作,当泵送气体时由公式(5)得

$$V_0 < \frac{\gamma \Delta p_0}{|\Delta p_{\mathrm{crit}}|} , \tag{9}$$

由公式(8),(9)可得泵送气体时气体的初始容积为

$$\pi R^2 w_{\max} < V_0 < \gamma \frac{\Delta V p_0}{|\Delta p_{\mathrm{crit}}|}; \tag{10}$$

当泵送液体时由公式(7)得

$$V_0 < \frac{1}{\kappa}\frac{\Delta V}{|\Delta p_{\mathrm{crit}}|} , \tag{11}$$

由式(8),(11)得

$$\pi R^2 w_{\max} < V_0 < \frac{1}{\kappa}\frac{\Delta V}{|\Delta p_{\mathrm{crit}}|} . \tag{12}$$

对于文中所研究的双腔体并联压电泵,所用的压电振子,在安全使用电压小于110 V的情况下,中心点最大振幅不超过0.1 mm,因此在设计时腔高一般要大于0.1 mm,以使振子和阀能充分自由振动.

取 $w_{\max} = 0.1$ mm,振子在110 V工作电压下振动引起的容积变化量理论值[7]为 $2.7 \times 10^{-8}\ \mathrm{m^3}$,阀开启的临界压力为300 Pa,由公式(10)计算得到泵送气体时泵腔体初始容积的取值范围为

$$7.5 \times 10^{-8}\ \mathrm{m^3} < V_0 < 1.276 \times 10^{-5}\ \mathrm{m^3} . \tag{13}$$

由公式(12)计算得到泵送液体时泵腔体初始容积的取值范围为

$$7.5 \times 10^{-8}\ \mathrm{m^3} < V_0 < 1.8 \times 10^{-2}\ \mathrm{m^3} . \tag{14}$$

根据以往的研究可知,圆形压电振子变形曲面为抛物面[8-9],径向截面的变形曲线为抛物线,其抛物线方程可表示为[10]

$$w(x) = -\frac{h}{(R-b)^2} \times x^2 + h \quad (0 \leqslant x \leqslant R-b) , \tag{15}$$

式中:圆形压电振子的半径为 R,中心点振幅为 h,夹持边的宽度为 b,圆形压电振子径向截面上的点距圆心的距离为 x. 文中泵用的压电振子半径 $R = 17.5$ mm,夹持边的宽度 $b = 2$ mm. 在工作电压为110 V时,振子中心点的振幅为85 μm,振子的振动使泵腔产生的容积变化量为

$$\Delta V = 2\pi \int_0^{R-b} w(x) x \mathrm{d}x , \tag{16}$$

代入各变量可得单个振子工作时最大容积变化量为 $3.2 \times 10^{-8}\ \mathrm{m^3}$.

3　腔体初始容积对泵性能影响试验

3.1　输送液体时腔体初始容积对泵影响

泵腔初始的大小一定程度上决定了泵工作时压缩比的大小,为了探究压缩比对双腔体并联压电泵工作性能的影响,分别设计了腔体高度为0.1,0.3,0.6,0.9,1.5,5.0 mm几种不同尺寸的并联结构进行试验,试验装置有量筒、数显压力表、可调频电源、计时器等. 在110 V正弦交流工作电压下,以液体水为介质进行试验测试的曲线如图2-4所示.

从图2的流量曲线可以看出,泵的腔体高度为0.3 mm时输出流量最好,此时单个腔体的初始容积为 $56.75 \times 10^{-8}\ \mathrm{m^3}$(压缩比 $\varepsilon = 1/18$),此后随着腔体初始容积的增加,压缩比的减小,流量输出的能力逐渐减弱. 这说明适当的压缩比有利于泵输出流量的提高.

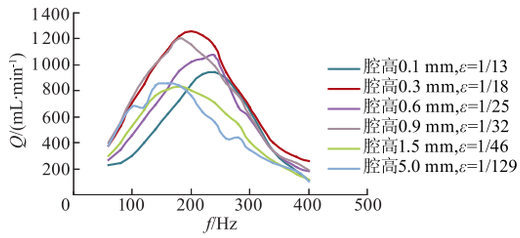


图2 输出液体流量随频率变化曲线

Fig. 2 Relationship between flow rate and driving frequency when pumping water

从图3的压力曲线中发现,输出压力会随着腔体初始容积的增加,压缩比的减小,输出能力越来越弱.

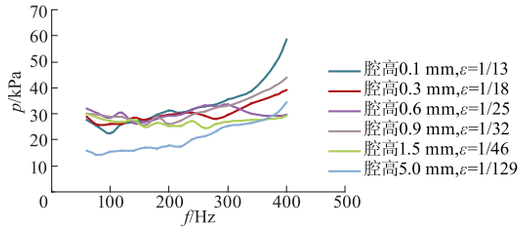


图3 泵送液体时输出压力随频率变化曲线

Fig. 3 Relationship between output pressure and driving frequency when pumping water

图4是对不同腔高(不同压缩比)泵的自吸性试验结果.

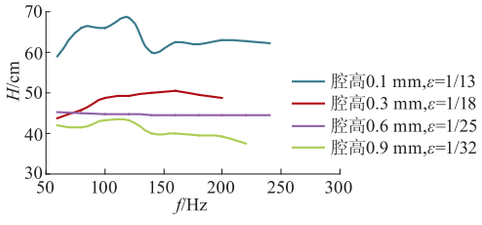


图4 自吸高度随频率变化曲线

Fig. 4 Relationship between self-priming height and driving frequency

泵的自吸性是指在泵腔干燥(仅有空气存在)情况下自我灌泵的能力.由于压电振子往复振动,泵腔体内的空气不断被排出并产生内外压差,使液体进入腔内.自吸能力的好坏常用泵自吸液体的高度来衡量,它也是衡量泵性能的一项重要指标.一般而言,泵的自吸性能主要受阀体密封性能的影响,但腔体高度的大小(压缩比的大小)也是影响其自吸性能的主要因素.从试验中发现,自吸高度随着泵工作时压缩比的减小,自吸性能越来越差,当腔体高度超过0.9 mm(压缩比 $\varepsilon=1/32$)时,泵已经失去了自吸能力.

3.2 输送气体时腔体初始容积对泵的影响

压电泵输送气体和输送液体的差别很大,气体的压缩性要远远大于液体,而气体在常温下的黏度却远远小于液体.泵送气体时,由于气体的压缩性比较大,黏度较小,在腔内气体的附加质量也比较小,因此气体对阀和振子的阻尼同液体比也会小得多,阀和振子工作时同步性更好.

在实验室中准确测定气体流量要比液体难很多,文中用排水法直接测量压电泵输出气体的流量,试验原理如图5所示.泵把气体由出气口B排出注入气体接收器中,由于气体接收器采用有机玻璃为主要加工材料,属于刚性容器,所以气体接收器的空腔体积 V 是固定的.当注入气体不断增加时,气体接收器压力会升高 Δp,当 Δp 增加到大于 Δh(接收器与软管C出口间液面差)水柱所产生的压力时,气体接收器内的液体由软管C右端流出.待液体流速稳定时,这时开始测量单位时间内由软管C流出的液体流量即是所测得气体实际输出流量.

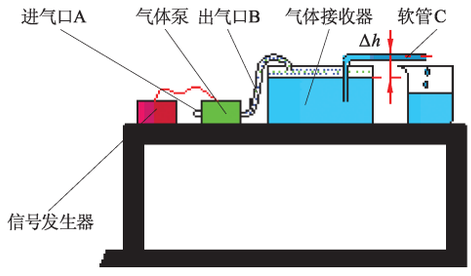


图5 测量气体流量的测试系统

Fig. 5 Test system of measuring gas-flow rate

图6,7是不同初始容积的双腔并联压电泵泵送气体时的输出流量和输出压力曲线.从试验中可以发现,在保证压电振子能够自由振动的情况下,腔体的初始容积越小,泵送气体时输出效果越好.当腔体的初始容积大于0.9 mm(ε 小于1/32)时,泵开始失去工作能力.

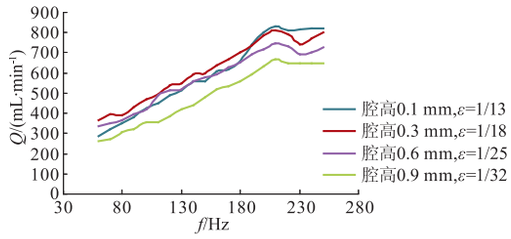


图6 输出气体流量随频率变化曲线

Fig. 6 Relationship between flow rate and driving frequency when pumping air

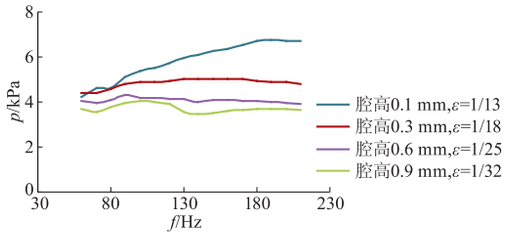


图7　泵送液体时输出压力随频率变化曲线
Fig. 7　Relationship between output pressure and driving frequency when pumping air

从并联压电泵输送液体和气体的试验可以看出,在能够使压电振子和阀自由充分振动情况下,腔体的初始容积越小,压缩比越大,在相同条件下泵腔内外产生的压差也越大,从而使输出性能提高.

4　结　论

通过理论分析与试验测试相结合的方法,分析了双腔并联有阀压电泵在不同压缩比下的工作状态,分别以水和空气为介质进行试验测试,得出以下结论:

1) 压缩比对双腔并联压电泵输送水和空气均有影响:对于文中所设计的压电泵,当输送水时,压缩比 $\varepsilon = 1/18$ 时泵的整体输出流量最好;当输送空气时压缩比越大输出流量越好,压缩比小于1/32时不能再泵送气体.

2) 所设计的双腔并联压电泵在110 V驱动电压下,压缩比最佳时,输送水,最大输出流量和压力可达1 330 mL/min及58.5 kPa;输送空气时最大输出流量和压力可达850 mL/min及6.5 kPa.

参考文献(References)

[1] Laser D J, Santiago J G. A review of micropumps[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004, 14(6): 35 – 64.

[2] 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)

[3] Anis Y, Houkal J, Holl M, et al. Diaphragm pico-liter pump for single-cell manipulation[J]. Biomedical Microdevices, 2011, 13(4):651 – 659.

[4] Geipel A, Goldschmidtboing F, Doll A, et al. An implantable active microport based on a self-priming high-performance two-stage micropump[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2008, 145/146: 414 – 422.

[5] Ma H K, Huang S H, Chen B R, 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.

[6] Wiederkehr R S, Salvadori M C, Brugger J, et al. The gas flow rate increase obtained by an oscillating piezoelectric actuator on a micronozzle[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 144(1): 154 – 160.

[7] 姜德龙,程光明,孙晓锋,等. 输送流体双腔并联压电泵性能分析与试验研究[J]. 西安交通大学学报,2010,44(3):82 – 85.
Jiang Delong, Cheng Guangming, Sun Xiaofeng, et al. Performance analysis and experimental study on delivery fluid of double-chamber piezoelectric pump in parallel [J]. Journal of Xi′an Jiao Tong University, 2010, 44(3):82 – 85. (in Chinese)

[8] Wang Baowei, Chu Xiangcheng, Li Enzhu. Simulations and analysis of a piezoelectric micropump[J]. Ultrasonics, 2006, 44(S1):643 – 646.

[9] Papila M, Sheplak M, Cattafesta L. Optimization of clamped circular piezoelectric composite actuators[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2008, 147(1):310 – 323.

[10] 李鹏. 主动阀压电泵的理论与试验研究[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院,2007.

(责任编辑　谈国鹏)