

Y型双入-双出水流道无阀压电泵研究

王洪臣¹, 杨利¹, 张立敏², 王桂文², 董景石³

1. 长春工程学院工程训练中心, 长春 130012
2. 长春工业大学机电工程学院, 长春 130012
3. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025

摘要 针对Y型单入-单出水流道无阀压电泵的输送流量较小,设计了一种Y型双入-双出水流道无阀压电泵结构。根据压电振子的结构尺寸、坐标及力学模型,对压电振子中心振幅与理论容积变化量进行分析。对Y型双入-双出水流道无阀压电泵流量进行理论计算。对两种压电泵进行流阻和流量的对比实验。结果表明:Y型双入-双出水流道无阀压电泵效率及流量均大于Y型单入-单出水流道无阀压电泵,实验结果与理论分析基本一致。

关键词 压电泵;无阀泵;Y型流道;压电振子;输送流量

中图分类号 TN384, TH32

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.11.014

Research on a Y type double inflow double outflow valveless water piezoelectric pump

WANG Hongchen¹, YANG Li¹, ZHANG Limin², WANG Guiwen², DONG Jingshi³

1. Engineering Training Center, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China
2. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China
3. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

Abstract To increase the quantity of flow for the piezoelectric pump with single input channel and single output channel of Y type, a valveless piezoelectric pump with double input channels and double output channels in Y type is presented. The design and working principle of the pump are described. The central displacement of the actuator and the volume variation for the pump are analyzed according to the dimensions, coordinates and the mechanical model of the piezoelectric vibrator. The quantity of flow for the double Y channel piezo-pump is calculated and contrast experiments for the single and double Y channel piezo-pumps are presented. Both theoretic and experimental results have shown that the efficiency and flow rate of the double Y channel piezo-pump are greater than those of the Y single channel pump.

Keywords piezoelectric pump; valveless pump; Y type channel; piezoelectric vibrator; flux

由于压电泵的核心部件——压电振子是将执行元件与动力元件合二为一,因此压电泵具有构造简单,压电振子具有不受电磁干扰,机电转化效率高,易于精确控制等优点,近年来吸引了大批学者对压电泵进行探究,提出多种不同原理不同类型的压电泵结构^[1],提高了压电泵的流量及控制精度。1993年,ErikSteme^[2]利用流体在流经收缩管/扩张管的过

程中流阻不同的原理,首次制作了收缩管/扩张管无阀压电泵。其后无阀压电泵的研究得到了长足发展,国内外学者先后提出V型流道、螺旋型流道、Y型流道等不同流道的无阀压电泵结构^[3-5],并分别进行分析研究。基于有限元的分析可知,Y型流道结构的无阀压电泵在输送流体的过程中,流体流动平缓,基本无涡流,减少了大范围湍流的形成,若输送血细

收稿日期:2014-12-29;修回日期:2015-03-08

基金项目:国家自然科学基金项目(50977037);吉林省科技发展计划项目(20120352)

作者简介:王洪臣,讲师,研究方向为压电驱动与控制技术,电子信箱:whcwanghongchen@126.com;张立敏(通信作者),副教授,研究方向为压电驱动与控制技术、数控机床可靠性,电子信箱:383629034@qq.com

引用格式:王洪臣,杨利,张立敏,等.Y型双入-双出水流道无阀压电泵研究[J].科技导报,2015,33(11):79-83.

胞,可以减少细胞间的摩擦与挤压,减少对血细胞的破坏,有效减少血栓形成,若输送生物大分子基团时则可以减少分子间的相互缠绕、拉断,降低对生物活性的破坏,从而能够满足在医药、生物领域的应用^[6-8]。但Y型单入水单出水流道结构流阻差较小,流量不高的缺点限制了这种类型无阀压电泵的使用范围。

本文提出一种新型结构的Y型流道无阀压电泵——双入水双出水无阀压电泵,并进行理论分析和实验对比。

1 Y型流道无阀压电泵结构及工作原理

图1为Y型双入水双出水无阀压电泵结构示意图,由泵盖,泵体,压电振子Y型流道,缓冲腔等构成,两端进水口和出水口与外界相连。进水流道,出水流道依图示安置,连通缓冲腔与泵腔。装配时,压电振子做绝缘处理。泵体与泵盖之间用一层特殊的胶黏结,并用螺栓连接上下泵体,以保证泵整体的密封性。

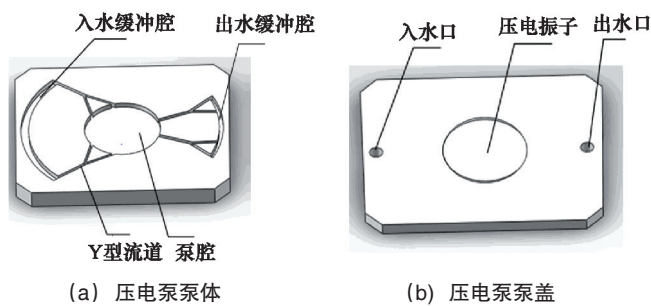


图1 Y型双入水双出水无阀压电泵结构示意图
Fig. 1 Structure of Y-type double inflow double outflow valveless piezoelectric pump

工作时,接通电源,压电振子产生变形,引起泵腔体积变化,泵腔和缓冲腔之间产生压差,流体沿着Y型流道流动,由于入水流道与出水流道对流体的阻力不同,流体流向出水口的总量比流向入水口的总量多,即产生宏观流动。吸程时,压电振子向上振动,泵腔体积变大,压力变小,两端缓冲腔内的流体沿着压力差,顺着Y型流道流向泵腔,由于此时出水流道的阻力较入水流道的阻力大,故由入水缓冲腔进入泵腔的流体较由出水缓冲腔进入泵腔的流体更多,相应地,排程时,压电振子向下振动,泵腔体积变小,压力变大,流体沿着压力顺着Y型流道向两端缓冲腔流动,由于此时入水流道的阻力较出水流道的阻力大,故由出水缓冲腔流出的流体较入水缓冲腔流出的流体更多,如此反复,实现流体的输送。

2 压电振子中心振幅与理论容积变化量分析

图2为压电振子实物,压电陶瓷黏贴于铜基板上表面。本实验采用的压电振子铜基板及压电陶瓷厚度均为0.2 mm,铜基板直径为50 mm,压电陶瓷直径为25 mm。根据薄板翘

曲理论知识,铜基板及压电陶瓷的厚度与直径比均在薄板范围内,可根据薄板翘曲理论分析压电振子的中心振幅^[9-11],并进一步推导出由压电振子变形引起的泵腔容积变化量。

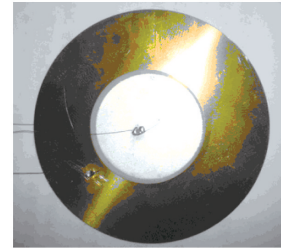


图2 压电振子实物
Fig. 2 Physical piezoelectric vibrator

图3为压电振子结构尺寸、坐标及压电振子力学模型。

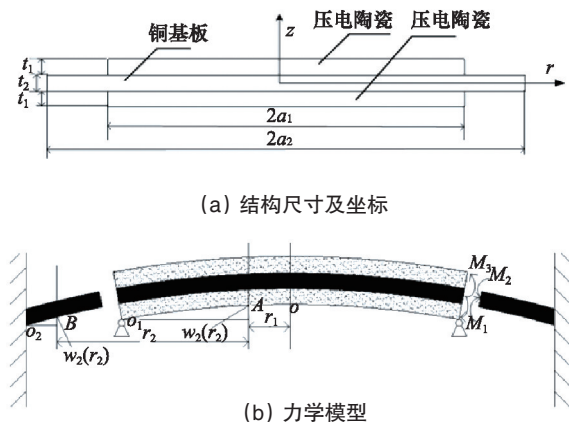


图3 压电振子的结构尺寸、坐标及力学模型
Fig. 3 Structure size, coordinates and mechanical model of the piezoelectric vibrator

对于距压电振子平面中心距离为 $r_1 \leq a_1$ 的部分可以看做简支,变形为纯弯曲变形,由薄板翘曲理论可知在此范围内任意A点的振幅为

$$w_1(r_1) = \frac{M_2}{2D''(1+\mu'')} (a_1^2 - r_1^2) \quad 0 \leq r_1 \leq a_1 \quad (1)$$

式中, D'' 为三复合层的等效弯曲刚度, μ'' 为三复合层的等效泊松比, M_2 瞬时作用在三复合层外边缘的净弯矩, a_1 为压电陶瓷的半径。

对三复合层的等效模量 E'' 、泊松比 μ'' 、等效弯曲刚度 D'' ,有

$$E'' = C_1' E' + C_2' E_p + \frac{C_1' C_2' E' E_p (\mu' - \mu_p)^2}{C_1' E' (1 - \mu_p^2) + C_2' E_p (1 - \mu'^2)} \quad (2)$$

$$\mu'' = \frac{C_1' \mu' E' (1 - \mu_p^2) + C_2' \mu_p E_p (1 - \mu'^2)}{C_1' E' (1 - \mu_p^2) + C_2' E_p (1 - \mu'^2)} \quad (3)$$

$$D'' = \frac{E'' (t_1 + 2t_2)^3}{12(1 - \mu''^2)} \quad (4)$$

式中, $C_1 = \frac{t}{t_{\text{all}}}$, $C_2 = \frac{t_1}{t_{\text{all}}}$, $t_{\text{all}} = 2t_1 + t_2$, $t = t_1 + t_2$, t_1 为压电陶瓷的厚度, t_2 为铜基板的厚度, E' 为单层压电陶瓷的等效弹性模量, μ' 为单层压电陶瓷泊松比, μ_p 为压电陶瓷的泊松比。计算公式为

$$E' = C_1 E_p + C_2 E_m + \frac{C_1 C_2 E_m E_p (\mu_p - \mu_m)^2}{C_1 E_p (1 - \mu_m^2) + C_2 E_m (1 - \mu_p^2)} \quad (5)$$

$$\mu' = \frac{C_1 \mu_p E_p (1 - \mu_m^2) + C_2 \mu_m E_m (1 - \mu_p^2)}{C_1 E_p (1 - \mu_m^2) + C_2 E_m (1 - \mu_p^2)} \quad (6)$$

双层压电陶瓷所产生的弯矩为

$$M_0 = D'' \frac{-2d_{31} U / t_2}{\frac{t_{\text{all}}}{2} + \frac{2}{t_{\text{all}}} \left(\frac{2}{E_p t_2} + \frac{1}{E_m t_2} \right) (2D_p + D_m)} \quad (7)$$

压电陶瓷的弯曲刚度 D_p 为

$$D_p = \frac{E_p t_1^3}{12(1 - \mu_p^2)} \quad (8)$$

基板的弯曲刚度 D_m 为

$$D_m = \frac{E_m t_2^3}{12(1 - \mu_m^2)} \quad (9)$$

式中, E_p 为压电陶瓷的弹性模量, E_m 为铜基板的弹性模量, U 为驱动电源电压。对于外面的基板环形部分, B 点处铜基板的振幅为

$$\omega_2(r_2) = \frac{M_1 a_1^2 (r_2^2 - 2a_2^2 \ln \frac{r_2}{a_2} - a_2^2)}{2D_p [(1 + \mu_m) a_1^2 + (1 - \mu_m) a_2^2]} \quad a_1 \leq r_2 \leq a_2 \quad (10)$$

式中, μ_m 为铜基板泊松比, M_1 为压电陶瓷作用在基板环形部分的弯矩。

$$M_2 = M_0 - M_1 \quad (11)$$

中心点处的振幅为

$$\omega_{\text{max}} = \omega'_1(0) + \omega_2(a_1) \quad (12)$$

对于整个结构相对于 O_2 的振幅为

$$\omega_1(r_1) = \omega'_1(r_1) + \omega_2(a_1)$$

$$= \frac{M_2}{2D''(1 + \mu'')} (a_1^2 - r_1^2) + \frac{M_1 a_1^2 (a_1^2 - 2a_2^2 \ln \frac{r_1}{a_2} - a_2^2)}{2D_m [(1 + \mu_m) a_1^2 + (1 - \mu_m) a_2^2]} \quad 0 \leq r_1 \leq a_1 \quad (13)$$

$$\omega_2(r_2) = \frac{M_1 a_1^2 (r_2^2 - 2a_2^2 \ln \frac{r_2}{a_2} - a_2^2)}{2D_m [(1 + \mu_m) a_1^2 + (1 - \mu_m) a_2^2]} \quad a_1 \leq r_2 \leq a_2 \quad (14)$$

由连续方程

$$\left. \frac{d\omega_1(r_1)}{dr_1} \right|_{r_1=a_1} = \left. \frac{d\omega_2(r_2)}{dr_2} \right|_{r_2=a_1} \quad (15)$$

可得

$$M_1 = M_0 \frac{D_m [(1 - \mu_m) a_1^2 + (1 - \mu_m) a_2^2]}{D_m [(1 - \mu_m) a_1^2 + (1 - \mu_m) a_2^2] + D''(1 + \mu'')(a_2^2 - a_1^2)} \quad (16)$$

$$\omega_1(r_1) = \frac{M_0 \left[(a_2^2 - a_1^2)(a_1^2 - r_1^2) + a_1^2 \left(a_1^2 - 2a_2^2 \ln \frac{a_1}{a_2} - a_2^2 \right) \right]}{2 \left\{ D_m [(1 + \mu_m) a_1^2 + (1 - \mu_m) a_2^2] + D''(1 + \mu'')(a_2^2 - a_1^2) \right\}} = \frac{(a_2^2 - a_1^2)(a_1^2 - r_1^2) + a_1^2 \left(a_1^2 - 2a_2^2 \ln \frac{a_1}{a_2} - a_2^2 \right)}{K} \quad (17)$$

$$\omega_2(r_2) = \frac{M_0 a_1^2 \left(r_2^2 - 2a_2^2 \ln \frac{r_2}{a_2} - a_2^2 \right)}{2 \left\{ D_m [(1 - \mu_m) a_1^2 + (1 - \mu_m) a_2^2] + D''(1 + \mu'')(a_2^2 - a_1^2) \right\}} = \frac{a_1^2 (r_2^2 - 2a_2^2 \ln \frac{r_2}{a_2} - a_2^2)}{K} \quad (18)$$

式中

$$K = \frac{2 \left\{ D_m [(1 + \mu_m) a_1^2 + (1 - \mu_m) a_2^2] + D''(1 + \mu'')(a_2^2 - a_1^2) \right\}}{M_0}$$

整个压电振子的变形量

$$\omega(r) = \begin{cases} \omega_1(r_1) & 0 \leq r_1 \leq a_1 \\ \omega_2(r_2) & a_1 \leq r_2 \leq a_2 \end{cases} \quad (19)$$

得压电泵腔容积变化量公式为

$$\Delta V_{\text{th}} = \frac{\pi a_1^4}{2K} \left(a_1^2 - 4a_2^2 \ln \frac{a_1}{a_2} - a_2^2 \right) + \frac{\pi a_1^2}{2K} \left[8a_2^3 - 8a_1 a_2^2 - (a_2^2 - a_1^2)^2 + 8a_1 a_2^2 \ln \frac{a_1}{a_2} \right] \quad (20)$$

3 泵流量计算

根据Singhal等的理论^[7,8], 流体流经合流道与分流道的压强损失可统一表示为

$$\Delta p = \xi \rho \bar{v}^2 / 2 \quad (21)$$

式中, ξ 为流体流经流道时的流阻系数, \bar{v} 为流体的平均速度, ρ 为流体的密度。流体正反方向上流动压强损失, 分别为

$$p_p = 2p_b + p_m + p_{cp} \quad (22)$$

$$p_n = 2p_b + p_m + p_{cn} \quad (23)$$

式中, p_b 为支流道中的压强损失, p_m 为合流道中的压强损失, p_{cp}, p_{cn} 分别为正反方向上两支流道汇流处的压强损失。

由式(22)、式(23)对比看出正向流动与反向流动过程中, 是由于流体在流经交汇处时压力差和流速的不同, 导致流体可以实现正向流动与反向流动。

设流体不可压缩, 且令 $\lambda = S \sqrt{2\Delta p / \rho}$, 由式(21)可得出流体在流道内流动时的瞬时流量

$$Q = S v = S \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{\xi}} = \lambda \xi^{-1/2} \quad (24)$$

式中, S 为流道横断面面积, v 为流体在流道内的速度。

当压电振子由平衡位置到达振幅位置的过程中, 出水流

道与入水水道都处于入流状态,此时泵的净流量 ΔQ 表达式为

$$\Delta Q = \bar{Q}_p + \bar{Q}_n = \lambda(\xi_p^{-1/2} + \xi_n^{-1/2}) \quad (25)$$

式中, \bar{Q}_p, \bar{Q}_n 分别为压电振子由平衡位置达到振幅位置的过程中,流体正流与反流量的平均值。 ξ_p 为流体正向压强损失系数, ξ_n 为反向压强损失系数。

相应地当压电振子由振幅位置到达平衡位置的过程中,出水水道入水水道都处于出流状态,此时泵的净出水量 $\Delta Q'$ 表达式为

$$\Delta Q' = \bar{Q}_p - \bar{Q}_n = \lambda(\xi_p^{-1/2} - \xi_n^{-1/2}) \quad (26)$$

由文献[4]可知,式(25)、式(26)中 λ 的表达式为

$$\lambda = \pi w_0 R^2 / [2(\xi_p^{-1/2} + \xi_n^{-1/2})] \quad (27)$$

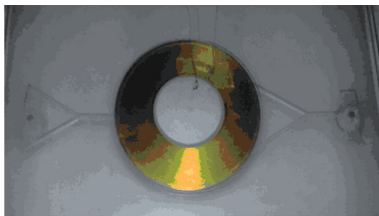
由于一个周期内,压电振子做往复运动,设压电振子的振动频率为 f ,则泵的总流量可以表示为

$$Q = \pi w_0 R^2 f \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \quad (28)$$

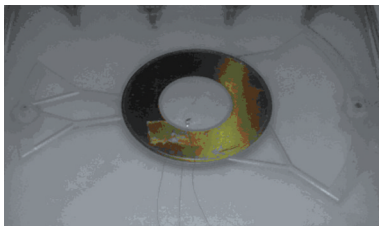
本文中采用双出水双入水水道结构,由于增加了水道数目,理论上 $\Delta Q, \Delta Q'$ 均为单出水单入水流道的2倍,故理论流量应为单出水单入水压电泵的2倍。

4 流阻实验

图4分别给出了实际制作的单入水水道单出水水道压电泵及双入水水道双出水水道压电泵,根据文献[7],Y型流道的总长为30 mm,合流道长为15 mm,宽为1.6 mm,两支水道夹角为60°,宽为1.2 mm,支水道和主流道的高均为1.5 mm。



(a) 单入水水道单出水水道



(b) 双入水水道双出水水道

图4 单入水水道单出水水道及Y型双入水水道双出水水道压电泵

Fig. 4 (a) Y type single inflow single outflow water piezoelectric pump, (b) Y type double inflow double outflow water piezoelectric pump

为了测定两种压电泵正反向流动的流阻变化规律,本文设计了一个测定流阻的实验,实验装置如图5所示。

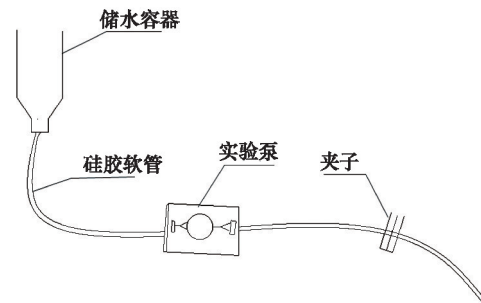


图5 流阻测试示意

Fig. 5 Schematic diagram of flow resistance test

实验前先将试验泵用水灌注,储水容器中装入1000 mL水,打开夹子后,水即顺流而下,记录储水容器内水流尽时的时间,如此重复3次,将均值作为实验结果。分别将单入水水道单出水水道压电泵,双入水水道双出水水道压电泵依次正装/反装于此系统,记录相应的时间。

根据上述实验方法,测得单入水水道单出水水道压电泵,双入水水道双出水水道压电泵正装/反装于此系统的用时见表1。

表1 流阻实验结果

Table 1 Flow resistance experiment results

压电泵	正装用时/s	反装用时/s
单入水水道单出水水道	515	338
双入水水道双出水水道	542	373

由结果可以看出两种结构的泵反装用时均比正装用时长,但双入水水道双出水水道压电泵反装用时和正装用时的差值较单入水水道单出水水道压电泵反装用时和正装用时的差值大,初步证明了这种结构设计有效提高了泵的效率。

5 单入-单出与双入-双出水水道压电泵流量对比

实验主要使用的材料设备有HPV型压电陶瓷驱动电源,硅胶软管,烧杯,止流夹,量筒等,图6为测试系统实物。



图6 流量测试系统

Fig. 6 Physical flow test system

实验采用100 V电压,频率由30 Hz开始测定,每增10 Hz测定1次,1次测定10 min用以计算流量值。

实验结果如图7所示,由实验结果可以得出随着频率的增大,两种结构的泵流量均增大,双入水通道双出水通道压电泵的流量明显高于单入水通道单出水通道压电泵的流量,但两者之间并非呈倍数关系,产生这种结果除了与实验误差有关外,主要是因为增加了流道以后,流道之间相互分流作用加强,水流入缓冲腔后,压强也相互抵消,缓冲腔体积增大,水实际上为非牛顿流体,在缓冲腔内被压缩的体积增大,压强进一步削减。

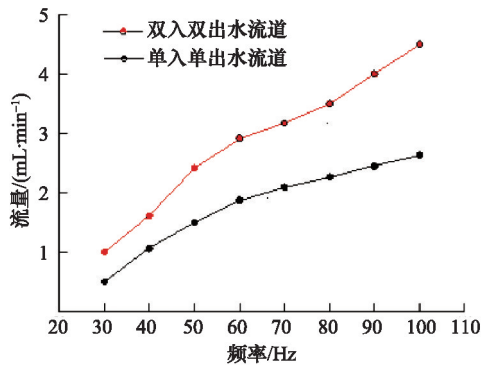


图7 两种泵流量测试结果

Fig. 7 Two kinds of pump flow test results

6 结论

1) 根据薄板翘曲理论,结合压电振子的中心振幅变形量,推导出压电泵泵腔的理论容积变化量公式。根据Singhal等^[7,8]的理论,推导出泵总流量计算公式。

2) 实际制作两种结构的泵,进行了流阻实验,初步验证了采用双入水通道双出水通道压电泵能有效提高泵的效率。

3) 测试了两种结构压电泵的流量特性,实验表明双入水通道双出水通道压电泵的流量高于单入水通道单出水通道压电泵的流量。

参考文献(References)

- [1] 阚君武, 杨志刚, 程光明. 压电泵的现状与发展[J]. 光学精密工程, 2002, 10(6): 619-625.
Kan Junwu, Yang Zhigang, Cheng Guangming. Research on piezoelectric pump and its development[J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(6): 619-625.
- [2] 张建辉, 王守印. 压电锥形流管无法压电泵的研究—单向流动原理及泵流量[J]. 压电与声光, 2001, 23(1): 23-25.
Zhang Jianhui, Wang Shouyin. Study of piezoelectric valveless diffuser/nozzle-based fluid pump: One-way flow principle and the pump flow [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2001, 23(1): 23-25.
- [3] 何秀华, 张睿, 杨嵩, 等. “V”型无阀压电泵的流阻特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 242-246.
He Xiuhua, Zhang Rui, Yang Song, et al. Property of flow resistance for piezoelectric pump with “V”-shape tube[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 242-246.
- [4] 林晓光. 螺旋流管无阀压电泵实验与研究[D]. 南京: 南京航空航天大学

学, 2012.

Lin Xiaoguang. Research on valve-less piezoelectric pump with spiral tube element[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

- [5] 张建辉, 黎毅力, 刘菊根, 等. “Y”形流管无阀压电泵模拟与试验[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 669-675.
Zhang Jianhui, Li Yili, Liu Jugen, et al. Simulation and experiment of valveless piezoelectric pump with Y-shape tubes[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4): 669-675.
- [6] 张建辉, 路计庄, 夏齐霄, 等. 细胞或高分子输送用“Y”形流管无法压电泵工作原理及流量特性[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 93-99.
Zhang Jianhui, Lu Jizhuang, Xia Qixiao, et al. Working principle and flux characteristics of valve-less piezoelectric pump with Y-shape tubes for transporting cells and macromolecule[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 93-99.
- [7] 张建辉, 黎毅力, 刘菊根, 等. Y型流道无阀压电泵流场分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(2): 126-132.
Zhang Jianhui, Li Yili, Liu Jugen, et al. Analysis of the flow field of the valveless piezoelectric pump with Y-shape tubes[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(2): 126-132.
- [8] 张建辉, 黎毅力, 夏齐霄. Y型流道无阀压电泵流量及流道流阻特性分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 136-141.
Zhang Jianhui, Li Yili, Xia Qixiao. Analysis of the pump volume flow rate and tube property of the piezoelectric valveless pump with Y-shape tubes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 136-141.
- [9] 刘孝敏. 工程材料的微细观结构和力学性能[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2004.
Liu Xiaomin. Structure and mechanical properties of micro engineering material view[D]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2004.
- [10] 姜德龙. 多腔串联压电泵结构设计及关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Jiang Delong. Structural design and key technology study on multi-chamber series piezoelectric pump[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [11] 程光明, 杨志刚, 曾平. 压电泵泵腔体积变化量研究[J]. 压电与声光, 1998, 20(6): 389-392.
Cheng Guangming, Yang Zhigang, Zeng Ping. Research on the cavity volume fluctuations of piezoelectric pump[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 1998, 20(6): 389-392.

(责任编辑 赵业玲)

《科技导报》“科技工作大家谈”栏目征稿

“科技工作大家谈”栏目专门刊登科技工作者近期提出的与科学技术相关的工作意见、建议和看法。该栏目内容着眼于科技研究、发展、应用、政策等领域的实际问题,要求有明确、具体的内容,方法上尽量具有可操作性。文字应简洁明了,全文不超过2200字。欢迎国内外科技工作者及各级科协、学会投稿。在线投稿: www.kjdb.org。