

微型压电泵中引流道对气泡控制的影响

陈松¹ 刘勇² 阚君武¹ 杨志刚² 温建明¹ 程光明¹

(1. 浙江师范大学精密机械研究所, 金华 321004; 2. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

摘要: 提出了在泵腔内加工引流道, 以促使气泡迅速而有效地排除。从腔内压力方面分析气泡的滞留与输出性能的关系, 同时从气泡压力降和流体阻尼方面分析引流道对气泡滞留的影响, 最后通过实验验证引流道的引入对压电泵输出性能的影响以及对气泡滞留的优化效果。实验结果表明, 引流道的引入能在一定程度上增强压电泵的输出压力和输出流量, 引流道宽度为 2.0 mm 时, 输出压力和输出流量分别达到 17.4 kPa 和 20.8 mL/min; 当引流道宽度为 1.1 mm 和 1.5 mm 时, 压电泵具有很强的气泡排除能力, 并根除了断流现象的发生, 120 个 0.02 mL 气泡进入后, 压电泵仍具有稳定的输出压力 (5.8 kPa 和 5.6 kPa) 和输出流量 (16 mL/min 和 5.6 mL/min)。在泵腔内加工引流道可以使气泡得到迅速而有效的排除, 并减少气泡在泵腔内滞留。

关键词: 微型压电泵; 引流道; 气泡滞留; 断流现象

中图分类号: TH38 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0379-06

Effect of Lead-flow Path on Bubble Controlling in Piezoelectric Micro-pump

Chen Song¹ Liu Yong² Kan Junwu¹ Yang Zhigang² Wen Jianming¹ Cheng Guangming¹

(1. Institute of Precision Machinery and Instrument, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The retention of gas bubbles causes serious damage to the performance of piezoelectric micro-pump, and bubble retention occurs mainly in the pump cavity, thus reducing bubble retention in the pump cavity can greatly improve the reliability of piezoelectric micro-pump. The bubble has been eliminated quickly and effectively through the method of processing lead-flow path in pump cavity. The method has the advantages of easy processing, good universality and strong operability. The relationship between bubble retention and output performance through the pressure of pump cavity and the influence of lead-flow path on bubble retention through pressure drop of the bubble and flow resistance were analyzed. Finally, the effect of lead-flow path on output performance and bubble retention was verified by experiments. The experiment results showed that the output performance of piezoelectric micro-pump can be enhanced through processing lead-flow path in pump cavity, when the lead-flow path width was 2.0 mm, the output pressure and output flow reached 17.4 kPa and 20.8 mL/min, respectively; when the lead-flow path width was 1.1 mm and 1.5 mm, the piezoelectric micro-pump had a strong ability to eliminate air bubbles. After entering 120 bubbles of 0.02 mL, the piezoelectric micro-pump still had a stable output pressure (5.8 kPa and 5.6 kPa) and output flow (16 mL/min and 5.6 mL/min). Processing lead-flow path in pump cavity can eliminate the bubbles quickly and effectively and reduce bubble retention in pump cavity.

Key words: piezoelectric micro-pump; lead-flow path; bubble retention; flow-stopping phenomenon

收稿日期: 2016-09-07 修回日期: 2016-10-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(51205369, 51406065)和浙江省自然科学基金项目(LY15E050010)
作者简介: 陈松(1988—), 男, 讲师, 博士, 主要从事压电驱动与控制技术和微小及精密机械研究, E-mail: chensong@zjnu.edu.cn
通信作者: 阚君武(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事能量回收与自供电技术和微小及精密机械研究, E-mail: jutkw@163.com

引言

微型压电泵由于体积小、耗能低和工作寿命长的特点,在医疗、生物工程和精密机械等领域具有广泛的应用前景^[1-5]。现有微型压电泵对气泡极为敏感,一旦有气泡出现,输出性能即急剧下降^[6-8]。当气泡在泵腔内滞留时,容易导致压电泵出现断流甚至气泡阻塞现象,使其无法工作。蒋丹等^[9]通过建立无阀压电微泵的数学模型,分析了腔内滞留气泡对无阀微泵驱动压力的影响,并通过实验对分析结果进行了验证,实验结果表明气泡的出现急剧削弱了微泵的驱动压力。王皓^[10]通过对气泡在微流道中的作用机理分析得到,在无阀微泵中,气泡的滞留使得驱动膜片输出力和位移出现缓冲和滞后,从而在很大程度上降低了微泵的工作性能。

为了减少气泡的滞留,文献[11-13]进行了相关的研究。本文提出在泵腔入口与出口之间引入引流道,以促使气泡迅速而有效的排除。分析气泡滞留泵腔与输出性能的关系,同时从气泡压力降和流体阻尼方面分析引流道对气泡移动的影响,最后通过实验验证引流道的引入对压电泵输出性能的影响以及对气泡滞留的优化效果。

1 断流现象和引流道

图1展示了微型压电泵结构图,微型压电泵主要由出口阀、入口阀、盖板、泵体和压电振子组成。本次实验中入口阀和出口阀均采用轮式单向阀结构。泵体采用透明的有机玻璃(PMMA)加工制作。微型压电泵在周期交变电压驱动下,压电振子上下往复振动,泵腔体积随之变化,结合出口阀和入口阀的单向流动特性,从而实现流体的单向流动^[14-16]。

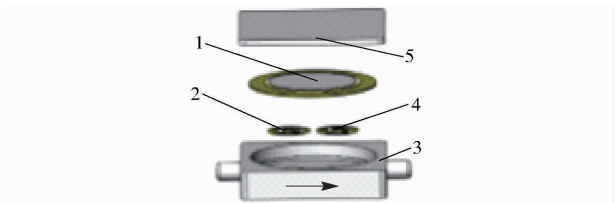


图1 压电泵结构图

Fig.1 Structure diagram of piezoelectric pump

1. 压电振子 2. 入口阀 3. 泵体 4. 出口阀 5. 盖板

实际使用中发现,气泡易在泵腔滞留并聚集,当滞留气泡达到一定量时,压电泵将无法工作。图2展示了压电泵在进入0.02 mL气泡后,无法工作,在3 s后部分气泡被排除,恢复了部分工作能力,通常这种由气泡引起的短暂丧失工作能力现象被称为断流现象^[17]。断流现象的发生会使得微型压电泵无法实现精密的流量输出乃至无法正常工作,限制了

压电泵的应用。

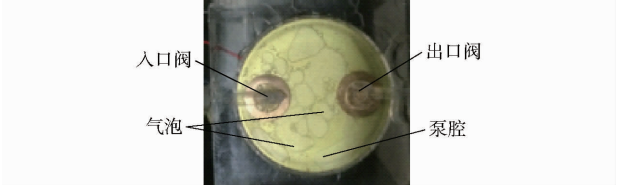


图2 压电泵的断流现象

Fig.2 Flow-stopping phenomenon of piezoelectric pump

为了加快气泡的排除,消除断流现象,本文引入引流道的设计。引流道设计如图3所示,引流道设置在出口和入口之间(斜线区域),引流道宽度为 a ,本文设置3种宽度,分别为1.1、1.5、2.0 mm,引流道相对泵腔平面下加工深度为0.15 mm。图4为具有引流道的压电泵实物。

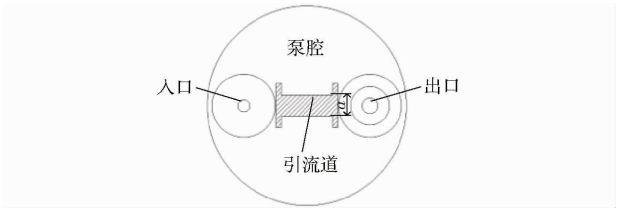


图3 引流道的加工区域(斜线)

Fig.3 Machining region of lead-flow path (slash)

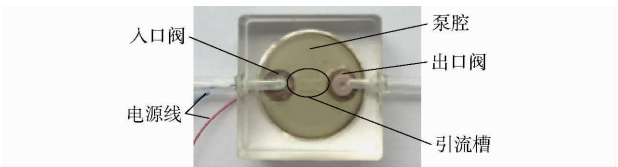


图4 加工引流道的压电泵实物

Fig.4 Piezoelectric pump with lead-flow path

2 理论建模

2.1 气泡滞留与断流现象

气泡在泵腔出现滞留时,液体的等效体积模量可以表示^[17]为

$$K_{ef} = \frac{V_0 K_A K_L}{K_L V_A + V_0 K_A} \tag{1}$$

式中 V_A ——气泡体积
 V_0 ——泵腔初始体积
 K_A ——气泡在等温下的体积模量
 K_L ——液体的等效体积模量

可知 $K_A = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$,其中工作液体为水,在常温和标准大气压下,水的体积模量 $K_L = 2.22 \times 10^9 \text{ N/m}^2$,实验中压电泵的腔高为0.15 mm,所以 $V_0 = 4.253 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ 。将以上数据代入式(1)可以得到

$$K_{ef} = \frac{4.295 \times 10^{-3}}{V_A + 1.935 \times 10^{-12}} \tag{2}$$

从式(2)可知随着气泡在泵腔内滞留的体积增

大,腔内液体的等效体积模量将急剧变小。根据等效体积模量的定义,压电泵可获得腔内压力可以表示为

$$p_1 = K_{ef} \frac{\Delta V_1}{V_0}$$

(3)

式中 ΔV_1 ——压电振子引起的容积变化量

压电泵在液体输出过程中包含液体压缩和液体排出 2 个阶段,在液体排出阶段,腔内压力 p_1 大于出口阀开启所需的压力,出口阀打开,液体开始输出^[18]。压电泵可获得的最大腔内压力为

$$p_{\max} = \frac{K_{ef} \Delta V_{\max}}{4.253 \times 10^{-8}}$$

(4)

式中 $\Delta V_{\max}$ ——压电振子最大容积变化量

根据球缺体积计算公式,同时压电振子最大位移远小于泵腔半径,所以压电振子最大容积变化量可以表示^[17,19]为

$$\Delta V_{\max} = \frac{H\pi b^2 U}{2}$$

(5)

式中 H ——与压电振子结构和安装方式相关的常量

b ——泵腔半径 U_1 ——驱动电压振幅

可知 $b = 9 \text{ mm}$, $U_1 = 110 \text{ V}$ 。结合式(2)~(5)

可得

$$p_{\max} = \frac{6 \times 10^{-5} H}{V_A + 1.935 \times 10^{-12}}$$

(6)

根据式(6)可知,当腔内聚集 1% 体积分数的气泡时, $p_{\max}$ 将降为无气泡时的 0.45%, 气泡的出现将使得腔内最大压力 $p_{\max}$ 急剧下降。如果 $p_{\max}$ 无法克服出口阀开启压力时,液体将无法排出,液体输出过程中只有压缩阶段,压电泵即发生断流现象。所以气泡的滞留极易诱发断流现象的发生,减少气泡在泵腔内的滞留时间,加快气泡的排除,可以有效地减少断流现象。

2.2 气泡滞留与输出性能

为了便于分析,视压电泵在液体输出过程中没有出现反向泄露,入口阀关闭。微型压电泵的最大输出压力可以表示为

$$\Delta p = p_{\max} - p_v$$

(7)

式中 p_v ——出口阀开启压力

当压电泵驱动条件和结构不变时, p_v 为固定值。在实际压电泵产品中,最大输出压力是一项重要的输出性能,通常称之为压电泵的输出压力。从式(6)可知气泡的滞留会急剧地减小腔内的最大压力,所以结合式(7)可知,气泡在泵腔内的滞留会急剧地削弱压电泵的输出压力。

压电泵一个工作周期内,液体的输出体积^[18]为

$$\Delta V = \Delta V_{\max} - \Delta V'$$

(8)

式中 $\Delta V'$ ——液体输出过程中,出口阀开启时腔内液体压缩量

根据等效体积模量定义,腔内液体压缩量可以表示为

$$\Delta V' = \frac{p_v V_0}{K_{ef}}$$

(9)

压电泵的流量可以表示为

$$V = f \Delta V$$

(10)

式中 f ——压电泵工作频率

结合式(8)~(10),压电泵流量可以表示为

$$V = \left(\Delta V_{\max} - \frac{p_v V_0}{K_{ef}} \right) f$$

(11)

在压电泵结构和驱动条件固定时,阀门开启压力 p_v , 泵腔初始体积 V_0 和工作频率 f 将保持不变,同时根据式(5),压电振子最大容积变化量 $\Delta V_{\max}$ 也将保持不变。所以根据式(11),压电泵的输出流量与腔内液体的等效体积模量呈正比关系。从 2.1 节可知,气泡的滞留会使泵腔内液体的等效体积模量急剧减小,气泡的滞留同样会在很大程度上削弱压电泵的输出流量。综上所述,气泡在泵腔内滞留会使压电泵的输出压力和输出流量急剧削弱。

2.3 引流道与气泡移动

微型压电泵在入口与出口之间加工引流道后,流体经过引流道的流阻将降低很多,工作液体和气泡将主要从引流道通过并排出^[20]。气泡经过引流道时,为了便于分析,视其通过截面为细小平板狭缝,所以气泡在通过引流道时产生的压降^[21]为

$$\Delta p_1 = M_d \left(\frac{\mu U}{\sigma} \right)^{\frac{2}{3}}$$

(12)

式中 μ ——工作流体的运动粘度

σ ——液体的表面张力

M_d ——由管路形状决定的常量

U ——气泡运动速度

60℃时,水的运动粘度 $\mu = 0.00047 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, $\sigma = 0.066 \text{ N}/\text{m}$,平板缝隙时 $M_d = 5.009$ ^[21]。代入相关数值,式(12)可以简化为

$$\Delta p_1 = 0.185 U^{\frac{2}{3}}$$

(13)

由式(13)可知,气泡移动的速度决定了其在经过引流道的压降,通过减少气泡的移动速度 U 可以降低压降 Δp_1 。在主流道上加设引流道后,主流道的截面面积增大,在驱动条件和流量不变时,气泡移动速度会减小。所以通过加设引流道,可以减少气泡运动时的压降。由于流体主要从引流道通过,为了便于分析,可视腔内压力施加于引流道两端,所以在液体输出过程中,气泡移动时两端的压力差可以

表示为

$$\Delta p' = p_1' - \Delta p_1 - \Delta p_2 \tag{14}$$

式中 p_1' ——出口阀开启压力
 Δp_2 ——液体通过泵腔时的损失压力

在工作环境和出口阀结构不变时, p_1' 将保持不变。同时在排出过程中液体径向流动的阻尼系数与腔体高度的三次方呈反比^[20]。在主流道上设置引流道, 将使得液体通过时的腔体高度增加很多, 从而极大地降低 Δp_2 。综上所述, 在压电泵中加设引流道将加大驱动气泡移动的压差 $\Delta p'$, 从而加快气泡的排除。所以引流道可以有效地减少气泡在泵腔的滞留时间, 并达到消除断流现象的目的。

3 实验设置

设计了3种不同宽度引流道的压电泵和不具有引流道的压电泵, 首先测试了4种压电泵在没有气泡滞留时的输出压力和输出流量, 以测试引流道的加入是否对压电泵的输出性能产生影响。同时搭建了如图5所示的气泡滞留实验装置, 该装置用于验证引流道对气泡滞留的影响。实验装置通过气缸的运动带动入口脱离液面, 并利用入口脱离液面的时间来控制进入气泡的大小。为了便于观察进入气泡的实际大小, 在入口管上印制了相应的刻尺。恒温水箱保持在55~60℃, 该温度下液体水中气体含量少。

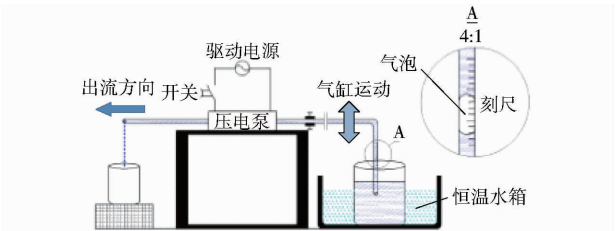


图5 气泡滞留实验装置
Fig. 5 Test device for air bubble retention

采用固定数量的气泡作为一组进行实验, 控制单个气泡之间的距离保持一定, 在每组气泡全部进入微型压电泵后, 测量微泵的输出性能。当上一组气泡实验完成后, 在入口盛器中加入工作液体, 确保入口液面与上一组实验时保持一致, 从而进行下一组气泡的实验。对引流道宽度为1.1 mm和1.5 mm 2组压电泵进行了气泡滞留实验。实验参数如表1所示。

4 实验结果与分析

图6为不同引流道宽度压电泵的输出压力和输出流量的关系曲线, 其中未加工引流道的压电泵在图中以引流道宽度为0 mm表示, 另外3组压电泵的

表 1 气泡滞留实验参数	
Tab. 1 Parameters of test for air bubble retention	
参数	数值
泵外形尺寸/(mm×mm×mm)	27×27×7
泵体材料	PMMA(有机玻璃)
单向阀类型	轮式阀
单向阀材料	铍青铜
单向阀厚度/μm	20
压电振子厚度/mm	0.4
压电振子外径/mm	Φ20
气泡体积/mL	0.02
泵腔高度/mm	0.15
引流道宽度 a/mm	1.1、1.5、2.0
引流道深度/mm	0.15
驱动类型	110 V, 方波

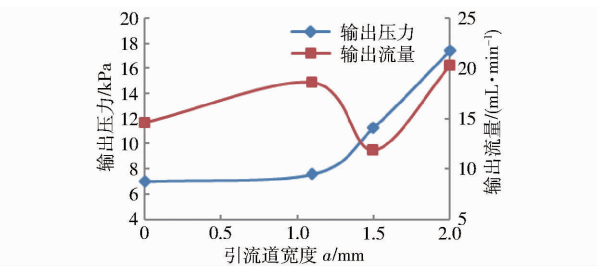


图6 引流道宽度与输出压力和流量的关系曲线
Fig. 6 Relationship curves between lead-flow path width and output pressure and flow

引流道宽度分别为1.1、1.5、2.0 mm。由图6可知, 随着引流道宽度的增加, 输出压力随之增大, 在引流道宽度为2 mm时, 压电泵输出压力达17.4 kPa。输出流量随着引流道宽度的增加, 也呈现了上升的趋势, 但是在引流道宽度 $a = 1.5$ mm时, 输出流量降为11.8 mL/min, 随后在引流道宽度 $a = 2.0$ mm时, 输出流量上升到20.3 mL/min。通过实验发现, 引流道的引入并未削弱压电泵的输出压力和输出流量, 反而在一定程度上加强了压电泵的输出性能。

图7为引流道宽度为1.1 mm和1.5 mm时, 输入气泡数量与输出压力和输出流量的关系曲线。由图7可知, 在进入30个气泡前, 2种压电泵(a 分别为1.1 mm和1.5 mm)的输出性能都出现了较大的削弱。但是随着进入气泡的增多, 压电泵的输出性能得到了部分的恢复。引流槽宽度 $a = 1.1$ mm时, 在120个气泡进入后, 输出压力和输出流量分别恢复到5.8 kPa和16 mL/min, 展现了很强的气泡排除能力, 而 $a = 1.5$ mm在进入120个气泡后, 输出压力和输出流量分别恢复到5.6 kPa和5.6 mL/min。实验过程中气泡进入后能很快地从引流道通过并排除, 气泡在腔内的滞留时间短, 但引流道以外的泵腔区域容易滞留破裂出微小气泡, 滞留微小气泡随着实验的进行会聚集成大气泡, 从而被排除。

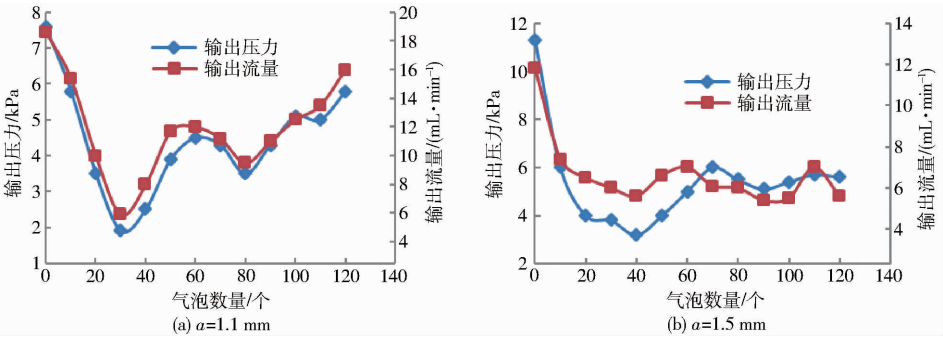


图 7 输入气泡数量与输出压力和流量的关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between input bubble number and output pressure and flow

图 8 展示了引流道宽度 $a = 1.1$ mm 时,压电泵进入不同数量气泡后,腔内气泡滞留情况。在进入 50 个气泡后,引流道较近处气泡排除效果好,气泡能迅速地从引流道内通过并排出,但是远离引流道的其他泵腔区域气泡滞留多。随着输入气泡的增多,滞留气泡区域气泡并未增多,在进入 70 个气泡和 50 个气泡时,腔内滞留的气泡数量并未出现大的改变,所以有效和迅速地排除了气泡。实验中得知,

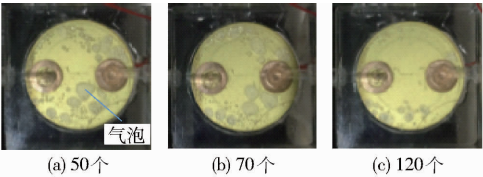


图 8 $a = 1.1$ mm,输入不同数量气泡下泵腔的气泡滞留情况

Fig. 8 Bubble retention with inputting different numbers of bubbles when a was 1.1 mm

随着实验的进行,滞留的小气泡会聚集成大气泡,并最终被排出,在 120 个气泡进入后,腔内滞留气泡已明显减少。所以具有引流道的压电泵具有很强的排气泡能力,有效地排除了气泡。

5 结论

- (1) 气泡在泵腔内滞留会急剧降低压电泵的输出压力和输出流量,从而诱发断流现象的发生。通过促使气泡迅速而有效的排除,可以避免断流现象。
- (2) 引流道的加设可以减少液体的流阻和气泡移动的压力降,从而减少气泡在泵腔内的滞留时间。
- (3) 引流道的加设没有削弱压电泵的输出性能,反而在一定程度上加强了压电泵的输出性能,同时引流道的加设促使气泡迅速而有效地排除,根除了断流现象。

参 考 文 献

- 1 孙业明,曾平,程光明,等. 单腔单振子压电泵流量自测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3):327–332.
SUN Yeming, ZENG Ping, CHENG Guangming, et al. Flow self-measurement method for single chamber and single vibrator piezoelectric pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3):327–332. (in Chinese)
- 2 MA H K, CHEN R H, HSU Y H. Development of a piezoelectric-driven miniature pump for biomedical applications[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2015, 234:23–33.
- 3 阚君武,杨志刚,程光明,等. 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, et al. Research on piezoelectric pump and its development[J]. Optics & Precision Engineering, 2002, 10(6):619–625. (in Chinese)
- 4 吴越,杨志刚,刘勇,等. 压电泵泵阀高频振动时不完全关闭特性研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1):262–266.
WU Yue, YANG Zhigang, LIU Yong, et al. Incomplete closure characteristic of piezoelectric pump check valve in high frequency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1):262–266. (in Chinese)
- 5 郑伟,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)
- 6 蒋丹,李松晶,杨平. 气泡对无阀微泵动态特性影响的实验研究[J]. 实验流体力学,2010,24(3):34–38.
JIANG Dan, LI Songjin, YANG Ping. Experimental study on the influence of bubbles on dynamic characteristics of valve-less micropump[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010,24(3):34–38. (in Chinese)
- 7 DOLŽAN T, PEČAR B, MOŽEK M, et al. Self-priming bubble tolerant microcylinder pump[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2015, 233:548–556.
- 8 INMAN W, DOMANSKY K, SERDY J, et al. Design, modeling and fabrication of a constant flow pneumatic micropump[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2007, 17(5):102–107.
- 9 蒋丹,李松晶,杨平. 无阀微泵腔内气泡对周期驱动压力的影响[J]. 物理学报, 2013, 62(22):224703.
JIANG Dan, LI Songjin, YANG Ping. Influence of gas bubbles in valve-less micropump chamber on periodic driving pressure [J].

- Acta Physica Sinica, 2013, 62(22):224703. (in Chinese)
- 10 王皓. 微流控芯片的微机械往复无阀泵技术研究[D]. 北京:中国科学院光电技术研究所, 2005.
WANG Hao. Study on the micro mechanical valve-less pump of lab-on-a-chip[D]. Beijing: Institute of Optoelectronics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- 11 RICHTER M, LINNEMANN R, WOIAS P. Robust design of gas and liquid micropumps[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 1998, 68(1-3):480-486.
- 12 CHEN S, LIU Y, SHEN Y H, et al. The structure of wheel check valve influence on air block phenomenon of piezoelectric micropump[J]. Micromachines, 2015, 6(11):1745-1754.
- 13 孙晓锋, 李欣欣, 杨志刚, 等. 带整体开启阀的双腔串联压电薄膜泵[J]. 吉林大学学报:工学版, 2006, 36(4):529-533.
SUN Xiaofeng, LI Xinxin, YANG Zhigang, et al. Piezoelectric membrane pump with series-connected double chambers and holistic opening valve[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(4):529-533. (in Chinese)
- 14 谢海峰, 接劼, 康晓涛, 等. 压电共振型隔膜气泵设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12):246-250.
XIE Haifeng, JIE Meng, KANG Xiaotao, et al. Design of piezoelectric resonant diaphragm air pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):246-250. (in Chinese)
- 15 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)
- 16 Ren Y J, Ma Y T, Huang D, et al. Elastic string check valves can efficiently heighten the piezoelectric pump's working frequency[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2016, 244:126-132.
- 17 陈松. 液体压电泵中气泡控制的机理、方法及效果研究[D]. 长春:吉林大学, 2016.
CHEN Song. Mechanization, method and effect of the liquid piezoelectric pump bubble controlling[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- 18 王淑云, 阚君武, 马继杰, 等. 腔高对压电液压驱动器性能的影响[J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(6):515-520.
WANG S Y, KAN J W, MA J J, et al. Influence of pump-chamber height on performance of piezohydraulic actuator[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2011, 9(6):515-520. (in Chinese)
- 19 刘勇. 轮式阀微型压电泵的设计理论及试验研究[D]. 长春:吉林大学, 2012.
LIU Y. Theoretical & experimental study on wheel valve micro-piezoelectric pump[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- 20 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 Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(5):548-550. (in Chinese)
- 21 WONG H, RADKE C J, MORRIS S. Motion of long bubbles in polygonal capillaries. Part 2. Drag, fluid pressure and fluid flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 292:95-110.

(上接第 397 页)

- 16 孙冬野, 秦大同. 金属带无级自动变速车辆调速特性研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6):5-7.
SUN Dongye, QIN Datong. Study on the ratio characteristics of a metal pushing belt continuously variable transmission for vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6):5-7. (in Chinese)
- 17 孙冬野, 秦大同, 廖建. 金属带-行星齿轮无级变速传动效率特性分析[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5):12-15.
SUN Dongye, QIN Datong, LIAO Jian. Analysis of transmission efficiency characteristics of a metal belt and planetary gear continuously variable transmission system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5):12-15. (in Chinese)
- 18 WANG Weihua, SONG Ruifang, GUO Mingchen, et al. Analysis on compound-split configuration of power-split hybrid electric vehicle[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 78:272-288.
- 19 SINGH T, NAIR S S. A mathematical review and comparison of continuously variable transmissions[C]. SAE Paper 922107, 1992.
- 20 孙冬野, 秦大同. 基于无级变速传动的并联式混合动力汽车动力学仿真研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(1):79-83.
SUN Dongye, QIN Datong. Simulation on dynamic characteristic of a parallel hybrid car with a metal belt-planetary gear continuously variable transmission[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(1):79-83. (in Chinese)
- 21 罗勇, 孙冬野, 秦大同, 等. 考虑 CVT 效率的无级变速车辆最佳经济性控制[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4):80-86.
LUO Yong, SUN Dongye, QIN Datong, et al. Fuel optimal control of CVT equipped vehicles with consideration of CVT efficiency[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(4):80-86. (in Chinese)