文章编号:1004-2474(2016)03-0372-05

中间固定式双压电晶片大流量压电泵的研究

黄 丹1,马玉婷2,潘巧生1,任艺军1,冯志华1

(1. 中国科学技术大学 工程科学学院,安徽 合肥 230027;

2. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 中国科学院生物医学检验技术重点实验室, 江苏 苏州 215163)

摘 要:为实现结构紧凑、大流量泵在便携产品中的应用,提出以中间固定的圆形双晶片压电振子为激励的压电泵。通过仿真及理论计算对比可得,与传统的边沿支撑振子的压电泵相比,在振子振动单个周期内,中间固定式的泵的腔体体积变化量提高了近 50%。实验所用样泵的尺寸为 42 mm×42 mm×14 mm,用锆钛酸铅压电陶瓷(PZT)尺寸为Ø25 mm×0.2 mm的压电双晶片激励,该泵在 380 Hz,320 V的正弦激励下,最大流量可达到 800 mL/min。

关键词:压电泵;中间固定;大流量;紧凑 中图分类号:TN384;TH32 文献标识码:A

Research on Large Flow-Rate Piezoelectric Pump Powered by Centrally Clamped Bimorph Actuator

HUANG Dan¹, MA Yuting², PAN Qiaosheng¹, REN Yijun¹, FENG Zhihua¹

(1. School of Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. CAS Key Lab. of Bio-Medical Diagnostics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Suzhou 215163, China)

Abstract:For the application of the compact large flow-rate pump to the portable products, a compact piezoelectric hydraulic pump actuated by a round piezoelectric bimorph plate is introduced in this study. Compared with a conventional pump, the chamber volume change of the proposed pump increases by more than 50% in one vibrating cycle. A prototype pump with dimensions of 42 mm×42 mm×14 mm was developed and excited by a piezoelectric bimorph and the PZT with a diameter of \emptyset 25 mm×0. 2 mm. The prototype can pump water at a flow rate of 800 mL/min under a driving voltage of 320 V at 380 Hz.

Key words: piezoelectric pump; centrally clamped; large flow rate; compact

0 引言

压电泵是利用压电元件的逆压电效应实现驱动 电能、压电振子机械能向流体动能转化,集驱动、执 行和控制部件于一体的微型泵,具有无电磁干扰,结 构简单,体积小,质量小及易加工制作等优点,广泛 应用于如燃料电池^[1]、生物医疗^[2-3]、芯片冷却^[4]等 各领域^[5-6]。压电泵因其低噪声,低功耗的优点,在 冷却系统,特别是在便携电子产品的冷却中运用广 泛。以气体为输送介质的压电泵被广泛研究^[7]。但 随着微电子电功率密度的增加,各部件产生的热量 随之增加,传统的气体冷却无法达到理想的冷却效 果^[8],因此,大流量,结构紧凑型的液体泵的研究具 有重大意义。针对大流量液体泵,也有不少学者做 了深入研究,如利用压电堆作为驱动^[9],流量可达到 3 L/min,其泵整体尺寸为Ø38 mm×140 mm。压 电堆驱动的优点是输出力大,但价格贵,泵的成本 高,且不利于小型化。用压电晶片作为驱动元件的 压电泵则成本低,结构简单。通常将圆形压电晶片 直接作为泵腔膜并沿边缘固定^[10],多腔泵的性能流 量优于单腔泵^[11],故在大流量泵应用场合,通常采 用多个泵腔的串联或并联,如双腔并联压电泵,在 110 V 驱动电压下,工作频率小于 400 Hz 时,输送 液体最大输出流量为 1 330 mL/min,泵体积为

收稿日期:2015-07-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305439);江苏省国家自然科学基金资助项目(BK20141205)

作者简介:黄丹(1989-),女,湖北宜昌人,硕士生,主要从事压电微泵结构的优化和分析的研究。冯志华(1964-),男,安徽亳州人,博士生导师,主要从事压电传感器、压电制动器、压电变压器及涡流传感器的研究。

Ø60 mm×26 mm^[12]。双腔串联泵在驱动电压为 220 V,频率为150 Hz时的流量可达1260 mL/min, 泵体体积为72 mm×36 mm×16 mm^[13]。本文提 出的一种中间固定支撑双压电晶片的压电泵,与传 统的利用圆形压电双晶片为振子的压电泵相比,该 支撑方式能获得更大的腔体体积变化,从而提高泵 的流量。

1 样泵的设计与制造

传统的圆形压电晶片振子通常有两种支撑方 式:

1)四周固定支撑,即固定振子边沿,其周边的运动几乎被完全限制,如图1(a)所示。

2) 简支支撑(见图 1(b)),即沿圆周线支撑,振 子周边可绕支点转动,以上两种支撑方式的最大变 形在振子的圆心处。本文提出一种新的支撑方式, 即固定压电振子的中心,如图 1(c)所示,圆心处位 移近似为 0,沿径向增大,振子边缘位移最大。



率低于压电振子的谐振频率,故采用静态分析对比

各支撑方式下,振子的位移大小。采用 ANSYS 软件 建立上述模型并进行静态仿真分析,其中中间固支用 直径分别为 \emptyset 1 mm 和 \emptyset 6 mm 的圆柱加持建模,施加 的电压激励为 100 V,分析结果如图 1(d)所示,其中 D为离振子中心的距离,S为振子在该点的位移。由 图可见,边沿固支与边沿简支的最大位移在振子中 心,分别为 21.0 μ m 与 24 μ m;中间固支的最大位移 在振子边沿,最大为 32.8 μ m。在此位移条件下,进 一步用积分计算出单个振动周期内振子振动引起的 腔体的体积变化量。结果显示中间固支条件下,泵腔 的体积变化量提高了近 50%,如表 1 所示。

表1 不同振子支撑方式腔体体积变化量比较

	边沿固支	边沿简支	中间固支	中间固支
			(Ø6 mm)	(Ø1 mm)
最大位移/μm	21.0	24.1	27.0	32.8
单次振动周期	0.013 6	0.017 3	0.026 6	0.035 4
腔体体积变化				

设计的压电泵包含振子、泵腔、单向阀和气泡腔 4 部分,如图 2(a)所示,该泵的工作原理如图 3 所 示。振子边缘向上运动,腔体体积增加,腔内压强小 于出入水口压强,入口阀打开,出口阀关闭,泵吸水, 吸水的同时,气泡腔膜向上鼓起,辅助推动腔内液体 进入泵体,以减小振子的负载,如图 3(a)所示。振 子边沿向下运动,腔体体积减小,腔内压强大于出入 水口压强,出口阀打开,入口阀关闭,泵排水,排水的 同时,气泡腔腔膜向下鼓,便于液体排出泵腔,以减 小振子的负载,如图 3(b)所示。





图 3 泵工作原理示意图

两片极化方向均沿轴向的压电陶瓷片 (Ø25 mm×0.2 mm)粘贴在铜片(Ø35 mm× 0.2 mm)上、下两面形成泵的振子,振子粘贴在橡胶 薄膜上构成圆柱形腔体的上端面,腔体直径为 Ø37 mm。该结构的设计既形成了密封的腔体,又 保证了圆形振子边缘的变形,振子用直径为Ø6 mm 的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)圆柱上、下加持固 定。该泵的单向阀由16 组阀构成,单个阀的结构如 图 4 所示,上、下是两块经过预加工的 PMMA 板, 中间为厚为 0.1 mm 的聚二甲基硅氧烷(PDMS) 膜,膜上划有两条流道口,其距离大于底板圆孔直径 而小于上板矩形宽度,阀工作时,打开成拱桥状,液 体通过小孔,沿流道流入(出)^[14]。气泡腔由弹性薄 膜加持在带孔的两块 PMMA 板之间构成,孔的位 置与上述阀孔相对应。将上述部分按图 2(a) 顺序 组合固定,构成整个泵,其尺寸为42 mm×42 mm× 14 mm,结构如图 2(b)、(c)所示。



2 实验装置

实验装置如图 5 所示,信号发生器(Rigol, DG1022)产生的正弦信号经放大器(ApexPA94)放 大,激励振子运动。测试所用液体为常温自来水,通 过测量单位时间内泵出液体的质量测得泵流量。称 重用精度为 0.1 g 的电子称。泵压用精度为 0.1 kPa 的数字压力计测量。用激光位移传感器(ILD2300-10)测量振子的位移,其测试结果通过计算机采集。



3 实验结果及分析

3.1 泵膜及阀膜对泵流量的影响

容积泵的性能依赖于腔体体积的变化,对此泵 而言,泵的流量依赖于泵膜的性能,泵膜弹性越高, 泵腔体积变化越大,流量越大。实验分别用橡胶膜 (杨氏模量:84 MPa)和 Kapton(杨氏模量: 850 MPa)膜作为泵膜并测试流量,实验结果如图 6(a)所示。激励电压均为 270 V,以橡胶膜为泵膜 的泵的最大流量为 623 mL/min, 而以 Kapton 为泵



图 6 不同材料泵膜、不同厚度阀膜泵流量与频率的关系

量大。

膜的泵的最大流量仅 322 mL/min,可见,弹性好的 膜有利于提高泵的流量。该泵的阀是被动阀,当阀 两边有压差,两端固定的矩形 PDMS 阀膜由于其弹 性,打开呈拱桥型,流体从两侧流出。阀口打开时, 阀口越大,流体阻力越小,流量越大。实验分别用不 同厚度的 PDMS 薄膜作为阀膜测试泵的流量,结果 如图 6(b)所示。由图可见,阀膜为 0.1 mm 的泵流 量远大于阀膜为 0.2 mm 的泵流量。当阀膜打开 时,薄的阀膜开启程度大,流道口宽,流体阻力小,流

3.2 频率及电压的影响

为测试频率和激励电压对流量和泵压的影响, 分别测试了不同频率和不同电压下泵的流量、振子 振幅及泵压情况,测试结果如图7所示。由图7(a) 可见,在零背压条件下,测试距振子边沿0.5 mm 处 点的位移峰-峰值,随着频率的增加,振幅先增大后 减小,振动引起的泵腔体积变化也先增大后减小,因 而,泵流量也先增大后减小,最佳工作频率为 380 Hz,此时最大流量为623 mL/min,随后流量减 小。当激励信号片频率从200 Hz 变化至500 Hz 时,泵的流量变化仅为20%,故此泵可用于环境条 件多变、流量要求相对稳定的场合。由图7(b)可 见,零流量条件下,泵压随着测试频率的增大而呈现 先增大后减小的关系。其最大泵压频率点高于流量



最大频率点,原因是在零流量条件下,泵膜因压差强 度增加,使泵压最大频率点偏高。在最大流量频率 点即 380 Hz 分别测试了电压对振子振幅、流量及背 压的影响,结果如图 7(c)、(d)所示。振子振幅、零 背压流量及零流量泵压均随激励电压的增加而增 加,当电压增加到 320 V时,最大流量可达 800 mL/ min。在实际应用中,可根据需要调节激励电压来调 节泵的流量。

3.3 背压-流量关系

泵的流量与背压关系如图 8 所示。由图可见, 流量随背压的增大近似线性减小,这是由于背压的 存在使压电振子的变形量减小,引起泵腔的容积变 化量减小,因而流量随之减小。



4 结束语

本文提出一种由中心固定的圆形压电双晶片为 振子的压电泵,通过仿真分析及理论计算,得出了此 固定方式与传统的边沿支撑方式相比,能使泵腔体 积变化量提高约 50%。实验所用样泵尺寸为 42 mm×42 mm×14 mm,对所设计的泵而言,弹性 较大的橡胶膜更有助于增加泵腔体积变化而增大泵 流量。0.1 mm 的硅胶膜作为单向阀膜工作时,能 打开更大的流道,获得更大的流量。泵流量的最佳 工作频率为 380 Hz,当正弦激励电压为 270 V时, 此频率下泵的流量为 623 mL/min。流量随激励电压 的增大而增大,当激励电压为 320 V时,最大流量达 到 800 mL/min。泵结构紧凑,流量大,可用于便携电 子产品的冷却及其他需要大流量且体积受限的场合。

参考文献:

 PARK J H, SEO M Y, HAM Y B, et al. A study on high-output piezoelectric micropumps for application in DMFC[J]. Journal of Electroceramics, 2012, 30(1/2): 102-107.

- [2] LIU G, SHEN C, YANG Z, et al. A disposable piezoelectric micropump with high performance for closedloop insulin therapy system[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 163(1):291-296.
- [3] 张芷菁,王葳,陈信元. 胰岛素注射用压电微泵的性能 研究[J]. 中国医疗器械杂志,2015,39(1):64-67.
 ZHANG Zhiqing,WANG Wei,CHEN Xinyuan. Study on the performance of piezoelectric micro pump for insulin injection[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation,2015,39(1):64-67.
- [4] 曾平,程光明,刘九龙,等. 压电泵为动力源的计算机 芯片水冷系统研究[J]. 压电与声光,2006,28(4):403-406.

ZENG Ping, CHENG Guangming, LIU Jiulong, et al. Practical research on water cooling system with computer chip driven by PZT pump[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2006, 28(4): 403-406.

- [5] WOIAS P. Micropumps-past, progress and future prospects [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2005,105(1):28-38.
- [6] 焦小卫,黄卫清,赵淳生. 压电泵技术的发展及其应用
 [J]. 微电机,2005,38(5):66-69.
 JIAO Xiaowei, HUANG Weiqing, ZHAO Chunsheng.
 The piezoelectric pump technology and its application
 [J]. Micromotors,2005,38(5):66-69.
- [7] 吴越,杨志刚,刘勇,等. 一种新型共振式气体压电泵
 [J]. 排灌机械工程学报,2012,30(4):390-394.
 WU Yue,YANG Zhigang,LIU Yong, et al. A novel resonantly-driven piezoelectric gas pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(4):390-394.
- [8] DE LIMA C R, VATANABE S L, CHOI A, et al. A biomimetic piezoelectric pump: Computational and experimental characterization[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 152(1):110-118.
- [9] VALDOVINOS J, WILLIAMS R J, LEVI D S, et al.

Evaluating piezoelectric hydraulic pumps as drivers for pulsatile pediatric ventricular assist devices[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013,25(10):1276-1285.

- [10] 曹炳鑫,张建辉,陈道根,等. 半球缺阻流体无阀压电 泵流场分析[J]. 压电与声光,2014,36(4):515-518.
 CAO Bingxin,ZHANG Jianhui,CHEN Daogen, et al.
 Analysis of flow field of the valve-less piezoelectric pump with Hemisphere-Segment Bluff-body[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2014,36(4):515-518.
- [11] 曾平,程光明,刘九龙,等.双腔薄膜阀压电泵的实验研究[J].光学精密工程,2005,13(3):311-317.
 ZENG Ping, CHENG Guangming, LIU Jiulong, et al.
 Experimental research on double-chambered piezoelectric pump with membrane valves[J]. Optics and Precision Engineering,2005,13(3):311-317.
- [12] 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, 2010,4(3):82-85.

JIANG Delong, CHEN 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 Jiaotong University, 2010,4(3):82-85.

- [13] 彭太江,杨志刚,程光明,等. 双腔体压电泵的设计
 [J]. 光学精密工程,2009,17(5):1078-1084.
 PENG Taijiang, YANG Zhigang, CHENG Guangming, et al. Design of double-chamber piezoelectric pump[J]. Optics and Precision Engineering,2009,17 (5):1078-1084.
- [14] WANG X Y, MA Y T, YAN G Y, et al. High flowrate piezoelectric micropump with two fixed ends polydimethylsiloxane valves and compressible spaces [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 218: 94-104.