

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.009

对称驱动式层叠压电泵的设计

郝云锋, 石树正, 吴慧强, 张兰娣

(河北建筑工程学院 机械工程学院, 河北 张家口 075000)

摘要:压电泵是一种利用压电材料逆压电效应实现液体定向流动的新型微流体输送仪器。由于压电材料的变形非常微小,限制了其输出能力;同时常规的压电泵工作频率较低,不能充分利用压电材料高频率下功率密度高的优势。为此,利用柔性铰链位移放大机构放大压电陶瓷的位移输出,并使其对称驱动 2 个压电容积泵,研制一种新型的层叠式双腔并联压电泵。通过有限元分析软件对柔性铰链放大机构以及压电泵简易模型进行仿真分析。结果显示:所设计的柔性铰链位移放大机构放大倍数可达 4.2,在对称驱动条件下压电泵工作频率最高可达 4 218 Hz,极大地提高了压电泵的理论工作频率。

关键词:柔性铰链;压电堆栈;并联;压电泵

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0048-04

Design of Symmetrical Drive Laminated Piezoelectric Pump

HAO Yunfeng, SHI Shuzheng, WU Huiqiang, ZHANG Landi

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: Piezoelectric pump is a new microfluidic conveying instrument which realizes directional flow of liquid by using inverse piezoelectric effect of piezoelectric materials. To address the problems of limited output capacity due to very small deformation of piezoelectric material and the low conventional piezoelectric pump operating frequency leading to failure in taking full advantage of the high power density of piezoelectric materials at high frequency, a novel laminated double-cavity parallel piezoelectric pump is developed by using flexure hinge displacement amplifying mechanism to amplify the output displacement of piezoelectric ceramics which drives two piezoelectric positive pumps symmetrically. Through finite element analysis, the flexible hinge amplifying mechanism and the simple model of the piezoelectric pump are simulated. The results show that the magnification of the flexible hinge displacement amplifying mechanism can reach 4.2, and the working frequency of the piezoelectric pump can be as high as 4 218 Hz under the symmetric driving condition, which greatly improves the theoretical working frequency of the piezoelectric pump.

Keywords: flexure hinge; piezoelectric stack; in parallel; piezoelectric pump

0 引言

压电泵是一种利用压电材料产生变形驱动流体定向传输的微型泵^[1-2]。传统的液压泵一般需要电机驱动,易受电磁信号的干扰,同时在一些需要精确控制流量的场合如药物输送和芯片散热等,传统的液压泵在体积及功能上不能满足这些要求。压电泵具有体积小、集成度高、控制精确、便于与其它微电子器件集成的特点,在微流控芯片、微型加热器、微喷雾器、微调节器等微纳技术领域被广泛应用^[3-4]。然而由于压电材料变形普遍较小,因此常常与微位移放大机构结合使用^[5-9]。

本文设计了一种基于柔性铰链放大机构的对称驱动式双腔并联压电泵,利用压电堆栈驱动放

大机构,放大其位移输出,可以大幅提高压电泵的流量输出性能,使其更好地应用在各种场景中。

1 柔性铰链压电驱动器的设计

1.1 驱动器结构设计

柔性机构是指通过机械结构中挠性部件的弹性变形,实现力的转换与传递。柔性铰链是一种通过铰链缺口产生的弹性变形而实现移动的机械装置,具有较高的运动精度和较短的工作冲程,适合用于微小变形的场合^[10-12]。本文设计了一种压电堆栈驱动的柔性铰链压电驱动器,包括 1 个柔性铰链位移放大机构和 1 个压电堆栈(5 mm×5 mm×18 mm),柔性铰链位移放大机构总长为 30 mm,厚度为 5 mm,由 8 个厚度为 0.8 mm、长为

第一作者简介:郝云锋(1995—),男,河北张家口人,讲师,硕士,研究方向为压电材料功能器件,hyf822101@163.com。

2 mm的柔性铰链组成。压电堆栈与放大机构的内侧两端进行胶粘链接,整体结构如图1所示。该机构结构紧凑且具有较高的共振频率和很好的动态特性,理论上位移放大比可以达到很大。由于放大机构承受压电堆栈的输出力作用,为了确保其能在放大器的输入端上均匀地加载,在设计时将放大装置内侧的两个输入口设计为凸起结构。

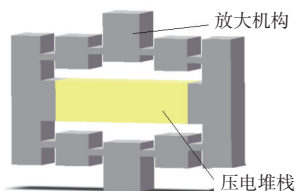


图1 柔性铰链压电驱动器结构示意图

1.2 放大倍数分析

由于压电堆栈的位移输出很小,因此本文利用柔性铰链放大机构对其位移输出进行放大,通过有限元分析对放大机构的放大倍数进行模拟计算。查阅所选用压电堆栈参数可以得到其最大输出位移为 20 μm ,因此在模拟时分别在放大机构内部两输入端口处分别施加 $\pm 10 \mu\text{m}$ 的输入位移,得到如图2所示的柔性铰链放大机构在输出方向上的位移变化云图。可以看出,柔性铰链位移放大器的最大输出位移为 84 μm 。因此,该机构的模拟放大倍数 β 为: $\beta = \Delta y / \Delta x = 84 / 20 = 4.2$ 。

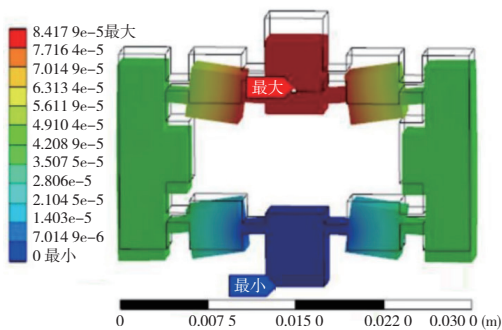


图2 柔性铰链放大机构输出位移变化示意图

2 对称驱动式层叠压电泵的设计

为了提高压电泵的输出性能,本文利用柔性铰链压电驱动器设计了一种对称驱动式双腔并联压电泵,主要包括完全相同并列放置的2个压电容积泵、1个柔性铰链驱动器驱动泵膜以及1个安装底座。

2.1 压电容积泵的设计

容积泵的工作原理如图3所示^[13-15]。容积

泵1个工作周期包括2种模式,分别为吸液模式和排液模式。当柔性铰链压电驱动器拉动泵隔膜向腔体外侧运动时,泵腔体容积增大,压强变小,腔内部压强小于外部大气压,因此液体从进口管道中流入,而出口管道处的出口阀由于压差作用关闭,无液体流出,此为吸液过程;当压电驱动器推动泵隔膜向泵腔内侧运动时,泵腔体容积变小,压强增大,大于外部大气压,液体由于压差作用通过出口阀从出水口排出,而进水口处的进口阀则在压差作用下关闭,液体无法流入,此为排液过程。通过泵腔体周期性地完成吸液和排液的过程,容积泵就实现了液体连续的吸入与排出^[16-17]。

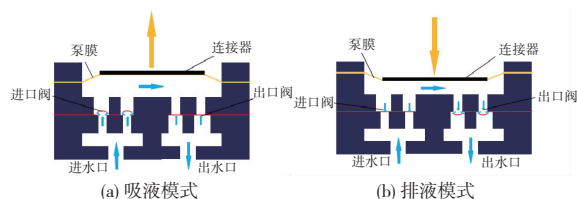


图3 容积泵工作原理

本文针对柔性铰链压电驱动器,设计了与之配合的方形压电容积泵。图4为本文所设计的方形压电容积泵结构示意图。容积泵的结构为层叠式,以保证制作和装配都简单方便。图5为所设计单个方形容积泵的结构爆炸图,主要包括泵腔体、单向阀组和进出水口通道3个部分。方形泵的主体框架主要由易于加工的有机玻璃板材构成;泵隔膜使用聚酰亚胺(PI)薄膜材料;进出水口阀由2个结构完全相同的伞形阀翻转放置组成;进水口与出水口分别胶粘于进出水口盖板之上;压电驱动器的位移输出通过输出端耦合输出至泵隔膜。

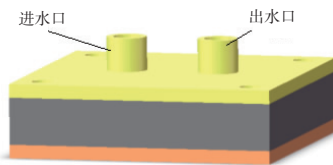


图4 方形容积泵结构示意图

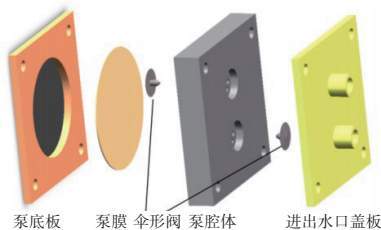


图5 方形容积泵结构爆炸示意图

伞形阀由伞盖、伞柄、卡环、圆锥导向柱组成,其结构如图6所示,安装时将中间伞柄插入阀体

基座,卡环将伞形阀与泵室的阀座紧密连接。常用的材质是高弹性的橡胶,采用注塑成型的方法。由于阀片较薄,橡胶材料的弹性模量较低,所以阀片所需的打开压力较低。阀片与泵体紧密结合,防止液体倒流,具有良好的单向导通和截止的能力。为了使伞阀更快的开启与关闭,其伞面采用了曲面设计,使覆盖水口出阀的厚度减小。为了安装方便,阀底采用了一个 60° 的导向圆锥;同时为了保证阀与阀座精密贴合,在伞柄上设有厚度为 0.5 mm 的卡环。该方案使阀的整体结构具有良好的密封性。

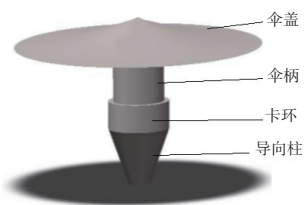


图6 伞形阀结构示意图

2.2 双腔并联压电泵的设计

双腔并联式的压电泵在结构上相当于将两个单独的容积泵排列在一起同时工作,单个容积泵的结构都是独立完整的,包括泵腔体、独立的单向阀和进出水口。一般多腔泵的腔体在位置排列上存在两种形式:一种为多个单腔泵一字排开,共用一个进水口和一个出水口,流体从进水口流入后通过各个泵腔体再从出水口流出,这种结构形式称作一字型并联泵。这种结构的并联泵不但整体尺寸较大,流体的沿程损失较多,而且需要使用多个驱动元件来工作,存在明显缺陷;另一种为多个容积泵上下排列,每个容积泵是独立的一部分,如图7所示。该泵上下两个容积泵可以根据菱形压电驱动器的工作模式同时吸水、排水或交替进行吸水、排水过程,结构紧凑,空间利用率较高。

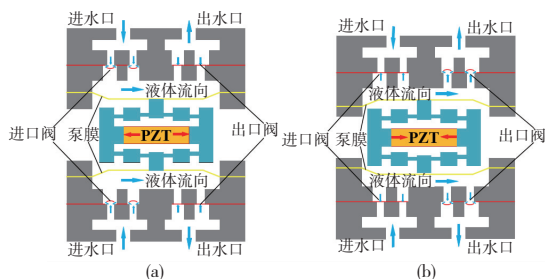


图7 双腔压电泵工作原理

本文设计的基于柔性铰链压电驱动器的双腔并联压电泵结构如图8所示。该泵结构共3层,

上下最外端为2个独立的方形容积泵,通过4根螺栓紧固在中间的连接架上。连接架中心为柔性铰链压电驱动器,它的2个输出端口同时驱动上下2个方形泵对称工作。整体结构非常紧凑,同时柔性铰链压电驱动器位于正中间的结构设计,使得驱动器的位置在工作时可保持不动,不会发生偏移。因此压电堆栈输出的能量可以完全转化为泵膜的运动,大幅减少能量的损耗。

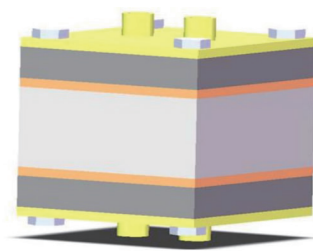


图8 双腔压电泵结构示意图

2.3 动态特性分析

为了研究对称驱动式并联压电泵的工作特性,本文通过对上下泵膜约束后的简易泵模型进行模态分析,获得各阶模态的振型及对应的固有频率。本文选取了包括目标振型在内的前6阶模态的振型,仿真结果如图9所示。各阶谐振频率分别为 448 Hz 、 $1\,421\text{ Hz}$ 、 $2\,140\text{ Hz}$ 、 $2\,499\text{ Hz}$ 、 $2\,582\text{ Hz}$ 和 $4\,218\text{ Hz}$ 。从模态振型图可以看出,第6阶模态振型为对称驱动式谐振压电泵的目标振型,柔性铰链压电驱动器的2个输出端口对称驱动泵膜运动,促使泵膜均匀变形,因此第6阶模态为泵的工作模式,其固有频率 $4\,218\text{ Hz}$ 为对称驱动谐振压电泵的工作频率。

通常菱形压电致动器的一个输出端是固定的,而另一端连接到外部负载。然而,在固定振动约束下,由于压电叠堆在位移输出方向上的惯性载荷较大,致动器的弯曲振动频率普遍较低。在对称约束下,菱形放大器位移输出方向上压电叠层的振动可以最小化,从而可以忽略其惯性载荷,这意味着菱形压电执行器可以具有更好的动态性能。从上述结果可以看出,本文设计的对称驱动型压电泵采用了双输入端且具有对称的结构。相较于传统底部固定、上端驱动的驱动模式,对称驱动式压电泵的工作频率有显著提高,这表明压电泵可以在对称驱动形式下以更高的工作频率工作,有利于充分发挥压电材料在高工作频率下稳定工作的优势。而随着工作频率的提高,其输出性能也会明显改善。

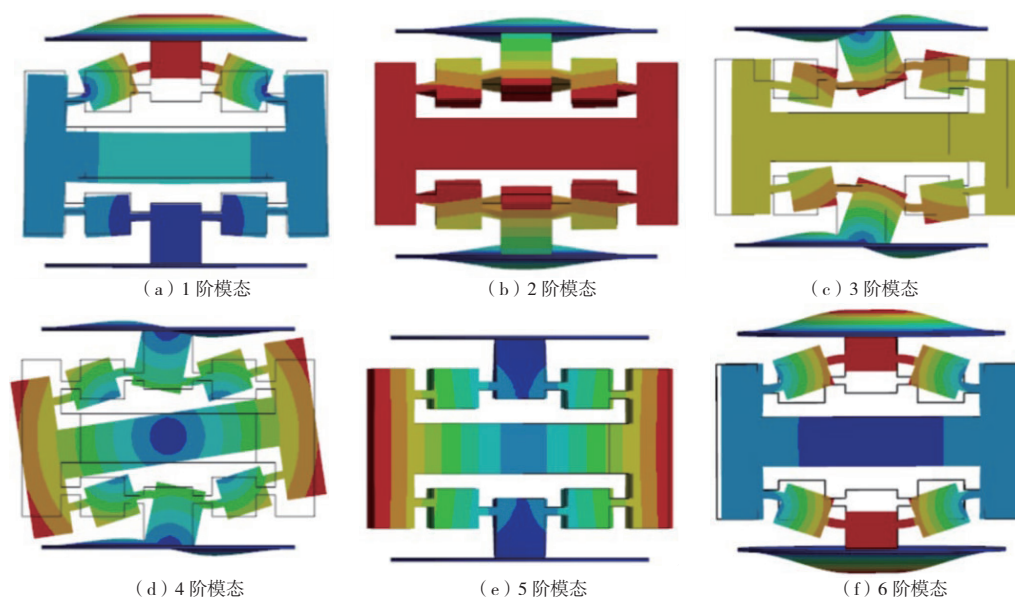


图9 双腔压电泵前6阶模态振型图

3 结语

针对目前压电泵输出流量偏低的现状,本文采用柔性铰链位移放大机构,设计了一种对称驱动式并联压电泵模型,并从理论方面和仿真试验方面对放大机构放大倍数以及简易泵模型进行分析,得到以下结论。

1) 本文使用柔性铰链位移放大机构放大压电堆栈的位移输出,并设计了柔性铰链压电驱动器的三维结构,利用有限元分析软件对放大机构放大倍数进行仿真分析,计算得出柔性铰链位移放大机构的位移放大比为4.2,可以大幅放大压电堆栈的位移输出。

2) 本文设计了一种对称驱动的双腔并联压电泵。对组成压电泵的单个微泵各个主要部件进行了结构设计,并设计了一种橡胶材料的伞形阀,并通过扣合的方式进行了固定。同时对泵的简易模型进行模态分析,结果表明:泵的对称工作模式出现在6阶振型,其工作频率为4 218 Hz,这表明在对称驱动形式下,压电泵可以以更高的工作频率工作,有利于发挥压电材料在高工作频率下功率密度高的优势。

参考文献:

[1] 齐振翔,接劼,马腾飞. 微流控系统中压电泵及其应用的研究进展[J]. 机电工程技术,2023,52(11):5-10,22.
[2] 张建辉,胡笑奇,赵淳生. 仿鱼摆动式无阀压电泵的新进展[J]. 振动·测试与诊断,2016,36(1):1-10,194.
[3] 吴晓强. 用于计算机芯片水冷系统的轮式阀压电泵的仿真与试验研究[D]. 长春:长春工业大学,2021.

[4] 张自强,刘夏,陈延伟,等. 基于半球壳式导流体无阀微型压电泵的3D打印机挤出机构设计[J]. 机械设计,2021,38(7):48-55.
[5] 华顺明,张宇,彭宇,等. 压电阀中的微位移放大机构[J]. 压电与声光,2021,43(1):134-141.
[6] LING M X, CAO J Y, ZENG M H, et al. Enhanced mathematical modeling of the displacement amplification ratio for piezoelectric compliant mechanisms[J]. Smart Materials and Structures,2016,25(7):075022.
[7] 李杨民,孟大帅. 一种新型微位移放大机构设计与特性分析[J]. 天津理工大学学报,2015,31(5):5-9.
[8] 李威,叶果,王禹桥,等. 一种桥式微位移放大机构的性能研究[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(2):310-314.
[9] 曾亿山,郝云锋,陈建,等. 菱形压电驱动器对称驱动形式的研究[J]. 液压气动与密封,2020,40(5):1-4.
[10] 孙晓锋,杨立奇,于文鑫,等. 压电泵用被动截止阀的发展[J]. 吉林化工学院学报,2018,35(11):22-24.
[11] 蒋鑫,朱玉川,张洛铭. 用于共振隔膜泵的大位移压电叠堆执行器研究[J]. 压电与声光,2023,45(6):833-838.
[12] CAZORLA P H, FUCHS O, COCHET M, et al. A low voltage silicon micro-pump based on piezoelectric thin films[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2016,250:35-39.
[13] 陈亮,孙晓锋,林燕霞,等. 层叠型双腔并联压电泵性能研究[J]. 液压与气动,2022,46(12):57-62.
[14] 刘彩霞,钟相强,荆盼盼,等. 新型压电叠堆泵设计及仿真[J]. 铜仁学院学报,2018,20(6):44-48,70.
[15] 孙晓锋,张慧,刘勇,等. 两种三腔并联压电泵结构设计与性能比较[J]. 机床与液压,2021,49(3):101-104.
[16] 齐振翔,接劼,马腾飞. 四腔混联压电泵结构设计与试验分析[J]. 吉林化工学院学报,2024,41(1):72-75.
[17] 李胜杰,朱亚妮,巫群洪,等. 压电谐振泵的仿真分析与试验研究[J]. 现代制造技术与装备,2022,58(6):35-38.

收稿日期:2023-09-22