

MEMS 超声分离腔二维简正模式谐振频率的研究

华晨辉, 李彦彦

(1. 电子科技大学 成都学院, 四川 成都 611731; 2. 河南城建学院 土木与材料工程系, 河南 平顶山 467036)

摘 要:以基于二维简正模式的微机电系统(MEMS)超声分离器的结构模型为研究对象, 首先根据声电类比原理, 得到超声分离腔的二维等效电路模型, 通过该模型分析计算二维简正模式的谐振频率; 接着通过 Ansys 软件对 MEMS 超声分离器进行有限元的仿真分析, 验证了等效电路模型的可行性, 并得到了最佳激发频率; 最后在实验中分别采用单片 PZT 激发(2,1)阶和双片反相位 PZT 激发(1,1)阶的简正模式, 均取得了一定分离的效果。

关键词:简正模式; 驻波; 超声分离; 等效电路

中图分类号: TB559

文献标识码: A

Research on Two Dimensional Normal Vibration Modes Resonance Frequency of MEMS Ultrasonic Separator

HUA Chenhui, LI Yanyan

(1. University of Electronic Science and Technology of China Chengdu Institute, Chengdu 611731, China;

2. Faculty of Civil & Materials Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

Abstract: A structure model of Micro Electro Mechanical System (MEMS) ultrasonic separator which based on the two-dimensional normal vibration modes was chosen as the research object in this paper. Firstly, in accordance with the theory of electricity-sound analogy, a two-dimensional equivalent circuit model of the rectangular section of the fluid cavity was figured out. According to this model, the resonance frequencies of the two-dimensional normal mode were listed. Secondly, Simulations using finite-element method with ANSYS software was used to demonstrate the validity of the model and helped to select the best exciting frequencies; in the end the frequencies of two-dimensional normal vibration modes(2,1) and (1,1) were chosen in this paper to excite the ultrasonic. The results showed good separation.

Key words: normal vibration modes; standing wave; ultrasonic separation; equivalent circuit

0 引言

微机电系统(MEMS)是集微型化、集成度高、多功能、智能化等特点于一体的综合技术。MEMS 技术在生物医学检测、医疗器材、精密机械、微光学应用、无线通讯等多个领域已有广泛的应用, 在微流体系统中的应用也越来越受到人们的关注, 其中液固分离技术作为微流体系统中重要的基础技术更是如此, 其应用非常广泛, 如在微生物领域用于样品的预处理, 分离培养液中的细胞等, 在微化工领域用于微流路的净化, 过滤有害颗粒等^[1]。在微流体系统中常规的液固分离技术有许多不便, 因此采用超声波作为外场来分离悬浮微粒的方法引起越来越多的关注。超声波器件体积小, 在制造工艺上与 MEMS

便于兼容, 在 MEMS 层次上, 这种方法展示出了其独特的优势。

采用超声波作为外场来分离悬浮微粒, 是因为流体中的声波能对流体中声速、密度等特性不同于流体的悬浮微粒产生一个声辐射力。在超声波驻波场作用下, 悬浮微粒会在声辐射力作用下向波节或波腹处运动, 并彼此碰撞凝聚达到平衡。因此, 可以合理利用超声驻波场设计微分离器, 通过调节超声波频率将层流中的悬浮颗粒移到特定位置, 再经由微分离器出口导流分离出洁净流和浑浊流, 达到分离的目的。国内, 白晓清等开展过利用声波辐射力对悬浮微粒凝聚去除的实验研究^[2], 英国的 Harris、Hill 和 Beeby 等用硅片和 Pyrex 玻璃(硼硅酸玻璃

收稿日期: 2011-01-15

作者简介: 华晨辉(1984-), 女, 湖北崇阳人, 硕士, 主要从事精密仪器测控技术的研究。E-mail: huachenhui2010@gmail.com

的商标名),结合 MEMS 制作工艺制成了一个超声微分离器^[8],该超声分离器是基于二维简正振动模式超声场对悬浮微粒的声辐射力的作用进行分离,在侧面分别将洁净和浊流导出。

1 二维简正模式的 MEMS 超声分离器

MEMS 超声分离器目前主要在一维模式下进行研究,国外也有人开始研究基于二维模式的超声驻波场汇聚及分离悬浮颗粒^[4-5]。为了激发微流道中的二维超声谐振,人们提出基于压电换能器的方案^[6-7],基于管道几何结构的方案^[8-9]或两者相结合^[10]的方案。然而,所有的分离器都工作在单频或两个相近的频率,导致产生的二维声场的正交因素耦合强烈,颗粒汇聚的特点不可预测,汇聚图形复杂。

在此基础上,提出了一个基于二维简正模式的 MEMS 超声分离器模型^[11],如图 1 所示,这种模型在二维简正模式下进行超声分离,在实现颗粒横向汇聚,便于 MEMS 层工艺制作,层流分区导出等,在目前超声分离悬浮颗粒方法中有其特别的优势。

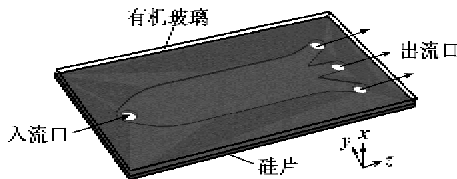


图1 二维简正模式的超声微分离器结构模型

图1中,分离腔用 MEMS 刻蚀和键合工艺制成,其 y 方向尺寸远小于 z 、 x 方向尺寸,且 x 方向尺寸约为 y 方向尺寸的整数倍。该结构仍采用 Groschl 的多层谐振结构模型,悬浮液沿 z 方向从左端进入分离腔,超声换能器被贴在匹配层硅片上来激发在 $x-y$ 平面上的二维简正波,使悬浮颗粒最终汇聚为一束,最后通过右端的出口进行分流。分离腔两端的导流槽保证了层流的稳定性,且其“锯齿形”设计也避免了 z 方向上的声谐振。

为了进一步研究二维简正模式下超声分离情况,本文对这种新型结构模型进行二维简正模式的谐振频率的研究。

2 等效电路法求谐振频率

2.1 矩形截面的二维等效电路模型

基于二维简正模式的超声分离器的流体腔构成了一个二维声振动系统,但目前在广泛应用的纵向超声振动系统中,当振动体横向尺寸小于 $1/4$ 波长

时,可用一维纵向振动理论进行分析和设计^[12],并由此可得到一维等效电路模型;当横向尺寸大于 $1/4$ 波长时,其横向尺寸不能忽略,但完全满足边界条件的矩形截面的二维振动系统的解析解尚未见报道。本文从波动方程出发,忽略流体的粘滞性,推导了矩形截面二维超声振动的一组解析解,建立了矩形截面的二维等效电路模型。图2为矩形截面受力分析示意图。直角坐标系选取如图2所示, b 为横向宽度, a 为纵向高度的矩形截面。假设流体层中宽度方向上即 x 方向声场的分布关于 y 轴对称,设截面上各面上分别受到力 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 的均匀作用,边壁为非刚性。

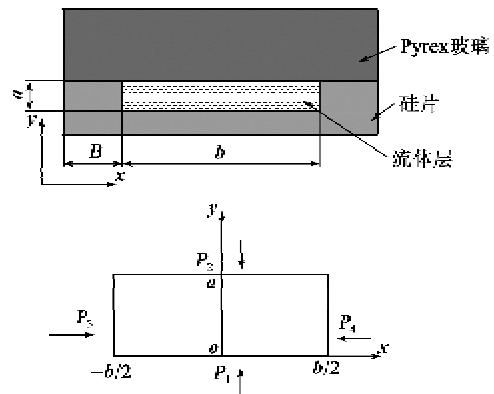


图2 矩形截面受力分析示意图

由于 x 方向是对称结构,二维声波方程的声压通解为^[13]

$$P = A_x \cos k_x x \cdot (A_y \cos k_y y + B_y \sin k_y y) \cdot \exp(j\omega t) \quad (1)$$

式中: ω 为振动圆频率; t 为时间; k_x 、 k_y 分别为分离腔内 x 、 y 方向的波数; A_x 、 B_y 分别表示 x 、 y 方向的声压幅值。

根据振速和声压的关系,得到流体腔中质点的振速为

$$\begin{cases} v_x(x, y, t) = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial P}{\partial x} dt \\ v_y(x, y, t) = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial P}{\partial y} dt \end{cases} \quad (2)$$

即

$$\begin{cases} v_x(x, y, t) = \frac{k_x}{j\rho_0\omega} A_x \sin k_x x \cdot (A_y \cos k_y y + B_y \sin k_y y) \cdot \exp(j\omega t) \\ v_y(x, y, t) = \frac{k_y}{j\rho_0\omega} A_x \sin k_x x \cdot (-A_y \sin k_y y + B_y \cos k_y y) \cdot \exp(j\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

式中 ρ_0 为媒质密度。现假设流体腔在垂直于 xy 平面上流体流动方向的宽度为 l , 声压力在流体腔各内表面上分布均匀, 且表面上各点的振速相等, 则有

$$\begin{cases} P_1 = \iint_{y=0} P ds \\ P_2 = - \iint_{y=a} P ds \\ P_3 = \iint_{x=-b/2} P ds \\ P_4 = - \iint_{x=b/2} P ds \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} v_1 = v_y |_{x=0, y=0} \\ v_2 = -v_y |_{x=0, y=a} \\ v_3 = v_x |_{x=-b/2, y=0} \\ v_4 = -v_x |_{x=b/2, y=0} \end{cases} \quad (5)$$

由式(3)~(5)可得

$$\begin{cases} P_1 = \frac{Z}{j \tan k_y a} v_1 + \frac{Z}{j \sin k_y a} v_2 \\ P_2 = \frac{Z}{j \sin k_y a} v_1 + \frac{Z}{j \tan k_y a} v_2 \\ P_3 = -P_4 = Z_l (v_1 + v_2) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $Z = \frac{2l\rho_0\omega\sin(k_x b/2)}{k_x k_y}$; $Z_l = \frac{l\rho_0\omega\cos(k_x b/2)}{jk_y^2}$, 利用声电类比原理, 式(6)可用如图 3 所示的等效电路来描述, 其中, $Z_1 = Z_2 = jZ \tan(k_y a/2)$, $Z_3 = -j \frac{Z}{\sin k_y a}$, 该等效电路可看作是由流体腔的纵向和横向通过阻抗 Z_l (其中 l 为流体腔中垂直于 xy 平面上流体流动方向的宽度)机械耦合而成。

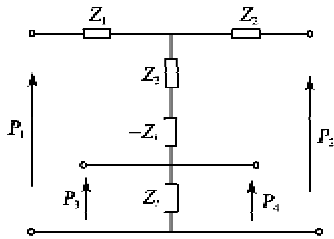


图 3 流体腔的二维等效电路

2.2 由二维等效电路求谐振频率

由图 3 可推导出声波在流体腔中的阻抗转移公式即输入声阻抗, 由于横向边壁是刚性边界条件, 即在 $x = -b/2, x = b/2$ 处分别有 $Z_{b/2} \rightarrow \infty, Z_{-b/2} \rightarrow \infty$, 相当于图 3 等效电路 P_3, P_4 处开路。假设流体腔上端面为空载时, 即 P_2 处以导线相接, 则左端输入声阻抗率为

$$Z_{in} = jZ \tan k_x a \quad (7)$$

根据声学原理, 发生谐振时, 式(7)虚部等于 0, 则有

$$\sin(k_x b/2) \cdot \tan(k_y a) = 0 \quad (8)$$

即

$$\begin{cases} k_x b/2 = m\pi \\ k_y a = n\pi \end{cases} \quad (9)$$

频率 $f = \omega/2\pi$, 而 $\omega = kc$, 其中 k 为波数, $c = 1.48 \text{ km/s}$ 为声波在水中的传播速度。根据基于二维简正模式的超声分离器设计的尺寸取 $b = 5 \text{ mm}$, $a = 137 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 可分别求得 x, y 方向上的频率:

$$\begin{cases} f_x = 0.296m(\text{MHz}) & (m=1, 2, \dots) \\ f_y = 5.401n(\text{MHz}) & (n=1, 2, \dots) \end{cases} \quad (10)$$

所以 (m, n) 阶模态的二维简正频率有

$$\begin{cases} f_{m-2, n-0} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = 0.592(\text{MHz}) \\ f_{m-0, n-1} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = 5.401(\text{MHz}) \\ f_{m-1, n-1} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = 5.409(\text{MHz}) \\ f_{m-2, n-1} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = 5.433(\text{MHz}) \\ f_{m-3, n-1} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = 5.474(\text{MHz}) \end{cases} \quad (11)$$

该计算结果与按二维腔体的简正频率 $f = \frac{c}{2\sqrt{\left(\frac{2m}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{a}\right)^2}}$ 计算的结果一致^[13]。

3 二维流体腔有限元方法仿真分析

为了进一步验证上述等效电路法求得的谐振频率, 用 Ansys 有限元软件对二维流体腔谐振进行仿真分析。为了保证与上述等效电路法的假设条件一致, 采用单片或双片 PZT 压电片 (PZT 压电陶瓷是将二氧化铅、锆酸铅、钛酸铅在 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 高温下烧结而成的多晶体) 对分离器进行同相激发, 对分离器底面均匀加载。

图 4 为 $5.4 \sim 5.5 \text{ MHz}$ 范围内的声压-频率的关系曲线, 它是 $5.40 \sim 5.41 \text{ MHz}$ 范围的 10 个频率点和 $5.41 \sim 5.50 \text{ MHz}$ 范围的 10 个频率点分别仿真得到的声压值连成的声压-频率曲线图。由图可知, 最高峰值点出现在 5.401 MHz 和 5.430 MHz , 根据式(11)可知, 5.401 MHz 恰好是模态 $(m=0, n=1)$ 的谐振频率, 而 5.43 MHz 非常接近 $(m=2, n=1)$ 的谐振频率; 而次高峰值点出现在 5.409 MHz 和 5.47 MHz , 恰好是模态 $(m=1, n=1)$ 和 $(m=3, n=1)$ 的谐振频率。该结果与下列结论吻

合,即当超声分离器底面采用 PZT 压电片同相激发(在仿真中采用同向位移加载)时, m 为奇数的简正模式会受到抑制,但由于激发的不是理想的平面波时,这些模式仍可被激发制^[14]。

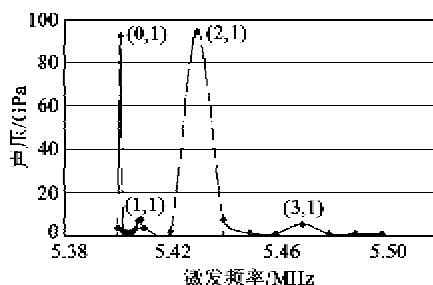


图4 声压-激发频率关系曲线

为方便观察最高峰值点激发频率为 5.401 MHz 时分离器流体腔中的声压分布,后处理时只导出了流体腔的声压分布,如图 5(a)所示,在 x 方向几乎没有出现波峰,而在 y 方向上有且仅有 1 阶驻波,正好证明了($m=0, n=1$)阶模式被激发了。这样从理论上说明,在分离腔的整个 xy 平面都会出现颗粒的汇聚。

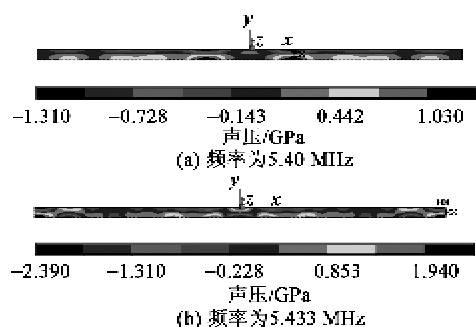


图5 分离器流体腔中不同位置的声压分布图

另一最高峰值点激发频率为 5.433 MHz 时,分离器流体腔中的声压分布如图 5(b)所示,在 x 方向刚好有两阶驻波,在 y 方向上有且仅有 1 阶驻波,恰好证明是($m=2, n=1$)阶模式被激发了。这样从理论上说明,颗粒汇聚在在声压为 0 的波节面处应会出现两束颗粒。

4 基于二维简正模式的超声分离实验

本文超声分离器采用 SOI 片和 Pyrex7740 玻璃片制备,为了减小加工难度,增大了分离腔尺寸厚为 200 μm ,宽为 8 mm。采用这种尺寸的分离器进行超声分离实验。本文采用单片 PZT 激发分离腔中的(2,1)阶简正模式,采用双片反相位 PZT 激发分离腔的(1,1)阶简正模式,并成功实现悬浮液中悬浮颗粒的分离。悬浮液选用酵母菌作为悬浮颗粒,水

作为溶剂。摄像机选用德国 BASLER, A101fc 系列,用 IEEE1394 连接到电脑进行输出,像素可达 1 300(水平) $\times$ 1 030(垂直),速率 11.75 帧/s,快门控制时间 20 $\mu\text{s}\sim$ 1.31 s。

单片 PZT 激发分离腔中的(2,1)阶简正模式,根据式(11)计算得到其谐振频率为 3.718 MHz,理论上颗粒汇聚在分离腔的左右两侧^[18],图 6(a)为摄像机记录的实验分离效果,颗粒基本上还是汇聚在分离腔左右两侧,但并不是只有两束颗粒汇聚条纹,而是另外还有很多细小条纹,即其他模式可能同时也被激发了。

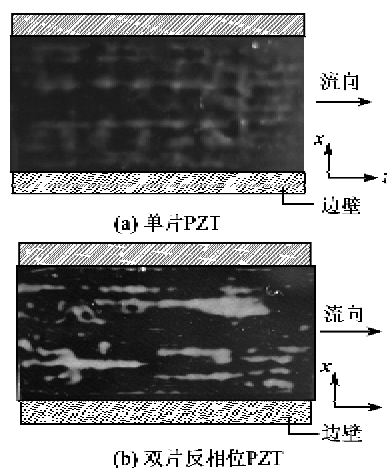


图6 实验分离效果

双片反相位 PZT 激发分离腔的(1,1)阶简正模式,其谐振频率为 3.705 MHz,酵母菌的高密度,高压缩性使其汇聚在分离腔的两侧^[16],图 6(b)为摄像机记录的实验分离效果,颗粒基本上也是汇聚在分离腔左右两侧,但分布两侧并不规整也可能是还有其他模式被激发了。

从悬浮颗粒汇聚的情况来看,上述两个实验的分离效果并没有激发理想的(2,1)或(1,1)阶简正模式,但实现了悬浮颗粒的分离,如图 7 所示,分离器两侧出流口的软管均有浊流流出,而中间的出流口软管中看到的几乎是清水,即颗粒汇聚于分离腔



图7 超声分离实验效果

宽度方向的两侧,成功实现了在二维简正模式下分离悬浮颗粒。

5 结束语

本文从波动方程出发推导出了基于二维简正模式的 MEMS 超声分离器的类比等效电路,通过等效电路图得到了阻抗转移公式,并且求得二维模式下的谐振频率。

通过 Ansys 有限元软件对 MEMS 超声分离器进行二维数值仿真,得到其谐振频率,与等效电路求得的谐振频率有良好的吻合。

超声分离实验中采用单片 PZT 激发分离腔中的(2,1)阶简正模式,采用双片反相位 PZT 激发分离腔的(1,1)简正模式,成功实现了在二维简正模式下分离悬浮颗粒。

必须指出的是,本文的所有求解及仿真过程中,都是假定流体腔中的流体为理想流体。

参考文献:

- [1] KARUMANCHI R, DODDAMANE S N, SAMPANGI C, et al. Field-assisted extraction of cells, particles and macromolecules[J]. *Trend in Biotechnology*, 2002, 22(2): 72-78.
- [2] 白晓清, 李东辉, 张林, 等. 流动液体中夹杂物超声去除的影响因素[J]. *金属学报*, 2002, 38(5): 483-489.
BAI Xiaoqing, LI Donghui, ZHANG Lin, et al. Factors influencing ultrasonic removal inclusions in the liquid flow[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38(5): 483-489.
- [3] HARRIS N R, HILL M, BEEBY S, et al. A silicon microfluidic ultrasonic separator[J]. *Sens Actuators B*, 2003, 95(1/3): 425-434.
- [4] MANNEBERG O, SVENNEBRING J, HERTZ H M, et al. Wedge transducer design for two-dimensional ultrasonic manipulation in a microfluidic chip[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18(9): 1-9.
- [5] NEILD A, OBERTI S, RADZIWIŁ G, et al. Simultaneous positioning of cells into two-dimensional Arrays using ultrasound[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, 97(5): 1335-1339.
- [6] LILLJEHORN T, NILSSON M, SIMU U, et al. Dynamic arraying of microbeads for bioassays in microfluidic channels[J]. *Sensors & Actuators B*, 2005, 106(2): 851-858.
- [7] EVANDER M, JOHANSSON L, LILLJEHORN T, et al. Noninvasive acoustic cell trapping in a microfluidic perfusion system for online bioassays[J]. *Anal Chem*, 2007, 79(7): 2984-2991.
- [8] HAGSÄTER S M, GLASDAM J T, BRUUS H, et al. Acoustic resonances in microfluidic chips: Full-image micro-PIV experiments and numerical simulations[J]. *Lab on a Chip*, 2007, 7(10): 1336-1344.
- [9] TOWNSEND R J, HILL M, HARRIS N R, et al. Investigation of two-dimensional acoustic resonant modes in a particle separator[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44(Suppl. 1): e467-e471.
- [10] OBERTI S, NEILD A, DUAL J. Manipulation of micrometer sized particles within a micromachined fluidic device to form two-dimensional patterns using ultrasound[J]. *J Acoust Soc Am*, 2007, 121(2): 778-785.
- [11] 肖茜元, 丁杰雄, 王宇翔. 基于二维简正模式的 MEMS 超声分离器模型研究[J]. *压电与声光*, 2008, 30(6): 708-711.
XIAO Xiyuan, DING Jiexiong, WANG Yuxiang. Research on MEMS ultrasonic separator's model based on two-dimensional normal vibration modes[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2008, 30(6): 708-711.
- [12] 凤飞龙, 沈建中, 邓京军. 用二维等效电路模型研究大截面圆柱变幅杆的振动[J]. *声学技术*, 2007, 26(1): 149-152.
FENG Feilong, SHEN Jianzhong, DENG Jingjun. Research the large cross-section cylindrical horn vibration with two-dimensional equivalent circuit model[J]. *Acoustic Technique*, 2007, 26(1): 149-152.
- [13] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. *声学基础*[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 201-489.
- [14] HUA Chenhui, DING Jiexiong, WANG Yuxiang. Research on normal vibration modes and lateral standing wave in MEMS ultrasonic separator[C]//Changchun, China; In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2009: 318-322.
- [15] WANG Yuxiang, DING Jiexiong, CHEN Yong, et al. MEMS ultrasonic resonance separator based on two-dimensional normal mode[C]//Japan; In Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2008, FD1-1: 924-929.