

压电 MEMS 超声换能器阵列声场研究

宋蕊,张明,冯怡斯

(中国人民解放军理工大学理学院,江苏南京 211101)

摘要:研究了一种基于微电子和微机械加工技术的六边形压电超声换能器阵列。依据活塞声源辐射声场特性,采用瑞利积分法计算了方形膜声压及指向性函数;运用惠更斯原理,仿真模拟了阵列远场声压分布。理论分析了阵元边长、阵元中心间距和阵元数目等结构参数对阵列波束宽度、方向锐度角和旁瓣级的影响。结果表明,该阵列模型不仅能完全消除栅瓣,有效抑制旁瓣,减小主瓣宽度,且在低频(约 10 kHz 量级)范围有很高的指向性。通过优化阵列参数,可获得最佳的声压分布,进而为阵列设计和声场分析提供理论参考。

关键词:压电超声换能器;六边形阵列;远场分析;声压分布;指向性;数值仿真

中图分类号:TN64;TB532 **文献标识码:**A

Research on Sound Field of MEMS Piezoelectric Ultrasonic Transducer Array

SONG Rui,ZHANG Ming,FENG Yisi

(College of Science, People's Liberation Army University of Science & Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: A hexagon ultrasonic transducer array based on MEMS is presented in this paper. According to the radiation sound field of square piston, the sound pressure intensity and directivity formula of individual array element has been calculated using Rayleigh-integration. The amplitude distribution of array has been plotted out by numerical method based on Huygens's principle. Several factors such as element size, spacing and number that affect the wave width, sharpness angle and sidelobe level are analyzed theoretically. The results show that the proposed hexagon array not only can eliminate the grating lobe, suppress side lobe and reduce the major beam width, but also has a very intensive directivity at low frequency (~ 10 kHz). The optimization of array parameters can provide guidance for array design and sound field distribution analysis.

Key words: ultrasonic transducer; hexagon array; far-field analysis; sound pressure distribution; directivity; numerical simulation

0 引言

自 20 世纪 90 年代以来,基于微电子和微机电系统(MEMS)制备的压电超声换能器(p-MUT),已从原型样品的研究,逐步走进医疗成像、空气传感成像、麦克风、无损检测和远程测距等应用领域^[1]。多阵元高密度的 p-MUT 阵列具有传统压电换能器无可比拟的优势。二维阵列中,平行排列的矩形相控阵列由于计算简单最常见,国内不少学者通过实验或计算仿真等方法,针对矩形、环形等超声波换能器阵列的声场分布进行了研究^[2-4]。与矩形阵列不同的是六边形阵代表了另外一类阵元规则分布的平面阵列。关于平面六边形超声换能器的实验研究较多^[5-7],但对于该类阵列的指向性研究和声场

仿真模拟却鲜见报道。本文从建立六边形换能器阵列辐射声场的数学模型出发,研究了 p-MUT 基元尺寸、阵列尺寸和工作频率与声场分布的内在联系,通过 MATLAB 仿真模拟出不同参数对波束宽度、方向锐度角和旁瓣级的影响。

1 p-MUT 阵列声场

1.1 声场模型

设多个边长为 a 的锆钛酸铅(PZT)方形膜沉积于无限大硅晶片上(此类沉积并非直接生长,单个换能器基元是周边夹紧的复合方形板,由 PZT 厚膜、氮化硅及缓冲层组成),静止时方形膜表面与晶片表面平行,当方形膜振动时,就向晶片前面的半空间辐射声波,这构成了 PZT 方形膜换能器声源系统。图

收稿日期:2014-07-23

基金项目:中国人民解放军理工大学预研基金资助项目(20110514);理学院青年科研基金资助项目(KYLYZL001209)

作者简介:宋蕊(1979-),女,湖北谷城人,讲师,主要从事铁电电压电薄膜的制备及性能研究。

1 为所建立的坐标系,取厚膜表面为 xoy 平面,在满足 $dy=\sqrt{3}dx$ 的矩形栅格位置 (x_i, y_i) 中,在 $x_i + y_i$ 为偶数处制备方形膜,构成等边三角形栅格排列的平面阵。由图可看出,除原点处放置的阵元外,平面六边形阵列可看成由 L 层六边形环阵组成,从内向外的六边形环阵的边长分别为 $d, 2d, 3d, 4d, \dots, Ld$ (d 为两阵元中心间距, L 为六边形层数)。设各阵元规格尺寸相同,每个环阵由 $6l$ 个阵元组成, l 为六边形环阵层数 (l 取值为 $1, 2, 3, \dots, L$)。故正六边形相控阵列阵元总数 $N_i = 1 + 3L(L+1)$ 。

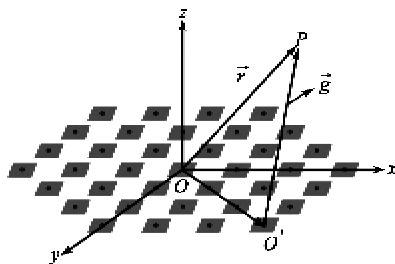


图1 六边形 p-MUT 阵声场模型

1.2 阵列远场声压分布

就坐标原点 O 处阵元而言,可将膜表面分成无限多个小面元,每一个面元均可看作一点声源,只考虑远场,根据瑞利积分式可得到方形 PZT 厚膜换能器在声场空间任一点 P 处的声压为

$$p_0 = j \frac{kcu_a \rho_0}{2\pi r} \times \exp[j(\omega t - kr)] \times D_1 \quad (1)$$

式中: $k=2\pi f/c$ 为波数, f 为工作频率; ω 为圆频率; c 为媒质中声传播的速度; ρ_0 为媒质密度; r 为相控阵列阵元中心到场点距离; u_a 为方形 PZT 厚膜振幅值。

根据惠更斯原理,各阵元具有相同灵敏度的阵列,六边形阵在远场的声压为

$$p = j \frac{kcu_a \rho_0 a^2}{2\pi r} \times \exp[j(\omega t - kr)] \times D_1 \times D_2 \quad (2)$$

式中:

$$D_1 = \frac{4 \sin\left(\frac{k a \sin \theta \sin \alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{k a \sin \theta \cos \alpha}{2}\right)}{k^2 a^2 \sin^2 \theta \sin \alpha \cos \alpha};$$

$$D_2 = \sum_l \sum_m \sum_n \exp[jkr_{lm} \sin \theta \cos(\alpha - \alpha_{lm})];$$

r_{lm} 为第 l 层六边形环阵上阵元距原点的距离, α_{lm} 为第 l 层六边形环阵上阵元与 x 轴正方向的夹角 ($m=1, 2, 3, \dots, l$)。

1.3 阵列声场模拟及分析

本文将采用式(2)研究六边形阵声场的分布及

指向性图参数优化问题。在实际运算模拟过程中,参数的选取与文献[6]中阵元和阵列设计尺寸相同,实验测量数据基本一致,再结合阵列换能器的设计要求和实际应用中涉及的诸多因素,本文取媒质密度 $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $c = 340 \text{ m/s}$, 研究边长 $a = 2 \text{ mm}$ 的方形膜,阵元间距 $d = 2.5 \text{ mm}$, $L = 8$ 的六边形 p-MUT 阵列在工作频率为 160 kHz 时的声场分布特性。图 2 为焦平面 $z = 300 \text{ mm}$ 上声压分布。

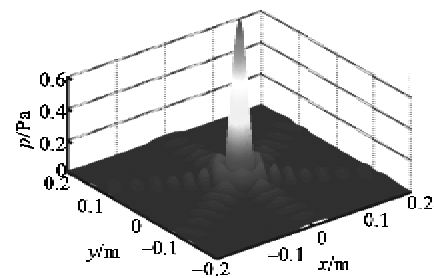


图2 焦平面上的声压分布

由图 2 可看出,六边形 p-MUT 阵列的声压幅值最大值出现在 z 轴上,该阵列声场易沿中心轴聚焦。式(1)中远场区声压幅值与距离成反比,而六边形阵列可获得较大的功率,在距离阵列所在平面为 300 mm 处,声压最大值为 1.02 Pa ,对应的声压级为 94 dB 。此外,阵列所产生的超声波束有尖锐的指向性,可用于如高频率三维生物医学成像和空气中的目标检测。

2 p-MUT 阵列指向性

指向性函数 $D(\alpha, \theta)$ 是声源辐射声场的空间分布函数,它是设计换能器阵列的一个主要指标,表明阵列所辐射的声场分布情况、发射声功率的集中程度、定位的准确性与分辨能力及抗干扰能力等^[8]。在指向性图中,常用方向锐度角 θ_0 (主波束两侧出现的第一个极小值间的夹角)和波束宽度 $\theta_{-3\text{dB}}$ (指向性函数值从主极大向两侧下降到主极大值的 0.707 倍时的夹角,又称为半功率点开角)来评价阵主瓣尖锐程度。旁瓣级 M_{dB} 是在指向性图中最大旁瓣(通常为第一旁瓣)幅值归一化的声级,它反映了声系统抑制噪声干扰和假目标的能力。

Z. Wang 等^[6]对 p-MUT 阵列的指向性进行了测量,我们以优化阵列换能器的 θ_0 、 $\theta_{-3\text{dB}}$ 和 M_{dB} 为目的,采用 matlab 仿真模拟研究阵列中的各参量(包括 a 、 d 、工作频率 f 或 λ , L (或 N_i))对阵列指向性图的影响。

2.1 波束宽度和方向锐度角

由式(2)计算可得 p-MUT 正六边形阵的指向

性函数为

$$D(\alpha, \theta) = |D_1| |D_2/N_L| \quad (3)$$

式中: $|D_1|$ 为单一阵元方形膜指向性函数; $|D_2/N_L|$ 为六边形基阵的指向性函数。图 3、4 分别为空间角 $\alpha = \pi/6$ 的定向面上 p-MUT 方形膜阵元及六边形阵列在直角坐标系下的指向性图。

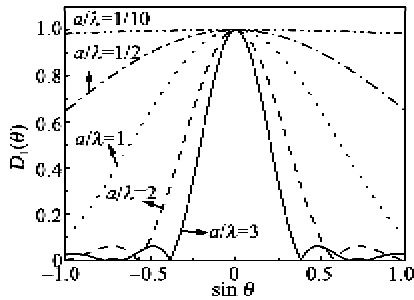


图 3 阵元指向性图

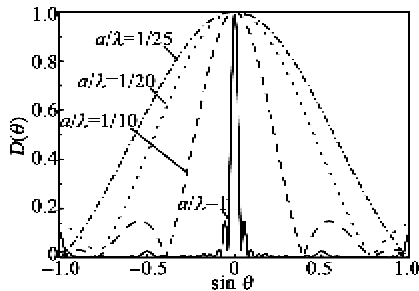


图 4 六边形阵列指向性图

由图 3 可看出,阵元尺寸与辐射声源波长比 (a/λ) 值越大,单一阵元指向性越好,此结果与文献 [9] 的结果一致。但从生产工艺上来讲,基于微电子和微机械加工技术制作的新型超声换能器 p-MUT 的尺寸范围在几百微米至几个毫米之间^[1],模拟过程中 p-MUT 方形膜边长 $a = 2 \text{ mm}$,该单一阵元只有工作频率大于 170 kHz 时才出现明显指向性。为使换能器适用于低频 ($< 100 \text{ kHz}$ 量级) 范围,故 p-MUT 常被制作成多阵元高密度的换能器阵列。图 3 为 $L = 8$ (阵元数为 217)、定向面 60° 时六边形阵列指向性图。由图可看出,当 $a = 2 \text{ mm}$,工作频率为 6.8 kHz 时阵列仍具有较好的指向性,六边形阵列指向性图不仅无栅瓣,旁瓣也被有效抑制。由图 3 还可知,阵元尺寸对阵列指向性影响较明显,随着阵元尺寸的增大,阵列主瓣越来越尖锐,然而阵元尺寸过大又会对设备便携性和低功耗带来不利。因此,在参数优化过程中,阵元尺寸选为 2 mm,频率为 160 kHz。同时,为精准研究阵列指向性函数,本文还将在不作任何近似的前提下,考虑单一阵元及基阵的指向性对阵列波束指向特性的影响。 Θ_0 和

$\Theta_{-3\text{dB}}$ 是评价主瓣尖锐程度的两个重要参量。阵元间距与阵元边长比 d/a 对 Θ_0 和 $\Theta_{-3\text{dB}}$ 的影响如图 5 所示。随着 d 的增大, Θ_0 和 $\Theta_{-3\text{dB}}$ 都减小,表明阵列沿 z 方向指向性增强。图 6 为 N_L 对 Θ_0 和 $\Theta_{-3\text{dB}}$ 的影响。由图可看出, N_L (即阵列六边形层数 L) 的增加同样会导致 Θ_0 和 $\Theta_{-3\text{dB}}$ 减小。理论上讲,增大 d 和 N_L 均可提高阵列指向性,但 α 会受到制备技术和阵列换能器体积的限制。

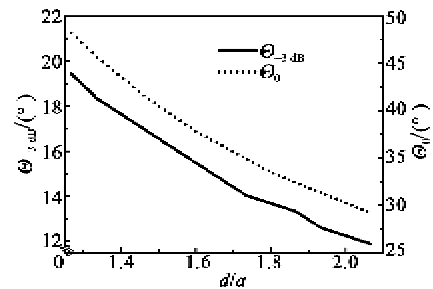


图 5 d/a 对 Θ_0 和 $\Theta_{-3\text{dB}}$ 的影响

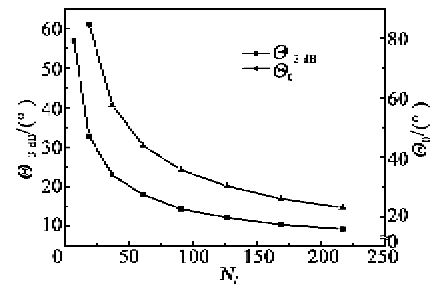


图 6 N_L 对 Θ_0 和 $\Theta_{-3\text{dB}}$ 的影响

此外, p-MUT 阵列的指向性函数还与空间角有关,表 1 为不同定向面下指向性图的主瓣 Θ_0 和 $\Theta_{-3\text{dB}}$ 。由表可看出, Θ_0 在任意定向面上始终保持为 12.24° , 但 $\Theta_{-3\text{dB}}$ 在定向面 $0, \pm\pi/3$ 上具有最小值 29.52° , 而当 $\alpha = \pm\pi/6, \pi/2$ 时会出现最大值 30.24° , 其余定向面上 $\Theta_{-3\text{dB}}$ 均为 29.88° , 这是由于正六边形关于中心轴 (z 轴) 具有 $\pi/3$ 旋转对称性。主波束宽度在特定定向面上取值会不同,这也是正六边形阵列与平面圆环阵列的区别,在阵列设计和使用时应充分考虑到。

表 1 不同的定向面下正六边形阵列指向性图主瓣 Θ_0 和 $\Theta_{-3\text{dB}}$ 的值

	$\Theta_0 / (^\circ)$	$\Theta_{-3\text{dB}} / (^\circ)$
$\alpha = 0, \pm\pi/3$	12.24	29.52
$\alpha = \pm\pi/6, \pi/2$	12.24	30.24
$\alpha \neq 0, \pm\pi/6, \pm\pi/3, \pi/2$	12.24	29.88

2.2 旁瓣级

p-MUT 超声阵列旁瓣级大小与 d, N_L 和定向

面的选取有关。图7为 d/a 对旁瓣级的影响。由图可看出,随着 d 的增加,旁瓣级明显增大,阵列旁瓣数目并未发生显著变化。图8为 N_i 对旁瓣级的影响。由图可看出, N_i 的增多不仅提高了主瓣尖锐程度,且可抑制旁瓣,故高密度多阵元的阵列制备尤为重要,制备均一性高的多阵元阵列则对MEMS制备技术提出了更高的要求。与环形阵列不同的是定向面的选取会影响旁瓣级大小。为进一步定量表征,表2为不同定向面上旁瓣级的取值情况。当 $\alpha=0, \pm\pi/3$ 时,主瓣最尖锐,相应的旁瓣级最高为 -16.47 dB;而当定向面取 $\pm\pi/6, \pi/2$ 时,最大旁瓣级降为 -18.96 dB。

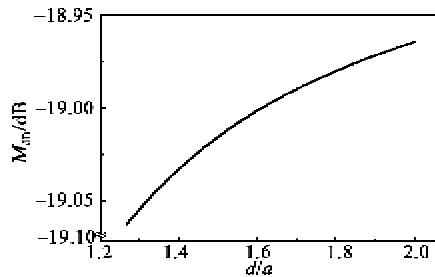


图7 d/a 对旁瓣级的影响

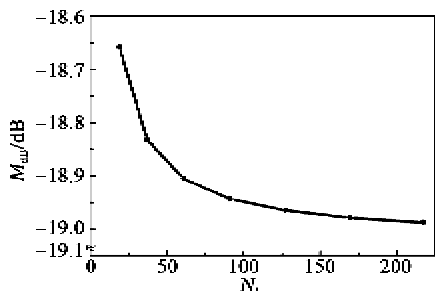


图8 N_i 对旁瓣级的影响

表2 不同定向面的旁瓣级

定向面	M_{dB}
$\alpha=0, \pm\pi/3$	-16.47
$\alpha=\pm\pi/6, \pi/2$	-18.96
$\alpha=0, \pm\pi/6, \pm\pi/3, \pi/2$	-18.31

3 结束语

本文以方形活塞换能器的辐射声场为基础,研究了六边形 p-MUT 阵远场声压的分布规律。通过数值仿真对声压分布进行了模拟,声压的中心峰位于与晶片表面垂直的六边形对称轴上;远场区声压幅值与距离成反比;阵列在低频工作时声压分布仍有较尖锐的指向性。通过对波束宽度、方向锐度角和旁瓣级的分析发现,换能器尺寸、阵元间距和数目等结构参数对阵列指向性有直接影响,不同定向面上声压分布规律略有差异。总体而言,增大阵元间

距和数目均能减小主瓣宽度,然而间距增加会导致旁瓣级升高,故制备高密度多阵元阵列有利于获得最佳声场。仿真几何结构参量间的制约关系对阵列优化设计和声场及指向性分析提供了理论支持。

参考文献:

- [1] 栾桂冬. 压电 MEMS 超声换能器研究进展[J]. 应用声学, 2012, 31(3): 161-170.
LUAN Guidong. Progress in piezoelectric MEMS ultrasonic transducers[J]. Applied Acoustics, 2012, 31(3): 161-170.
- [2] 李学生, 徐利梅, 陈敏, 等. 微型声频定向换能器阵列指向性研究[J]. 压电与声光, 2012, 34(4): 553-556.
LI Xuesheng, XU Limei, CHEN Min, et al. Research on the directivity of micro audio directional transducer array[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2012, 34(4): 553-556.
- [3] 张富东, 徐利梅, 陈敏, 等. 相控参量阵波束合成设计[J]. 压电与声光, 2013, 35(2): 282-286.
ZHANG Fudong, XU Limei, CHEN Min. Design of beam-forming of broadband steerable-parametric array[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(2): 282-286.
- [4] 曾一平, 李剑, 刘瑜, 等. 夹心式低频超声换能器设计[J]. 四川兵工学报, 2012(7): 120-123.
ZENG Yiping, LI Jian, LIU Yu, et al. Design of sandwich type of low frequency ultrasonic transducer[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2012(7): 120-123.
- [5] WANG Z H, ZHU W Y, MIAO J M, et al. Micromachined thick film piezoelectric ultrasonic transducer array[C]// Seoul, Korea; The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005: 883-886.
- [6] WANG Z H, ZHU W Y, MIAO J M, et al. Micromachined thick film piezoelectric ultrasonic transducer array[J]. Sensors and Actuators A, 2006(130/131): 485-490.
- [7] 李婷婷, 王炳和, 林志远. 一种新型的参量阵扬声器阵列设计与优化[J]. 压电与声光, 2010, 32(1): 78-81.
LI Tingting, WANG Binghe, LIN Zhiyuan. Design and optimization of a new parametric array loudspeaker[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010, 32(1): 78-81.
- [8] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 修订版. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [9] 黄晶, 周社育, 阙沛文. 线形超声相控换能器阵列的参数优化[J]. 压电与声光, 2010, 32(1): 51-54.
HUANG Jing, ZHOU Sheyu, QUE Peiwen. Optimization of parameters for linear phased array transducer[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010, 32(1): 51-54.