**文章编号:**1004-2474(2017)04-0624-05

# 电容式微机械超声换能器封装设计

王朝杰1,王红亮1,段培盛2,陈一波1,胡晓峰1

(1.中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西 太原 030051;2.山西古交西山义城煤业有限责任公司,山西 太原 030203) 摘 要:针对电容式微机械超声换能器(CMUT)封装材料阻抗匹配失衡,应力大及声波能量损失大等问题,设 计了一种在水下 10 m 透声性能好、弯曲形变小的聚氯乙烯封装结构。依据透声理论和材料属性,计算封装结构参 数。利用 COMSOL Multiphysics 5.0 建立封装结构三维有限元模型,通过模态分析和静态分析分别得到封装结构 的固有属性和水下机械性能。封装结构的一阶共振频率为 792.47 Hz,不会对 CMUT 400 kHz 的工作频段产生干 扰。利用压力平衡装置保护水下系统安全性,水下 10 m 最大形变为 1.12 mm,最大应力为 14.4 MPa,未超过聚氯 乙烯的弯曲强度。实际测试声压与理论值最大误差为 4.8%,物距测量误差为 1 mm,设计的 CMUT 封装结构满足 设计要求。

关键词:电容式微机械超声换能器(CMUT);透声系数;封装结构;有限元分析 中图分类号:TN385;TM53;TB565.1 **文献标识码:**A

## Design of Encapsulation on Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer

### WANG Chaojie<sup>1</sup>, WANG Hongliang<sup>1</sup>, DUAN Peisheng<sup>2</sup>, CHEN Yibo<sup>1</sup>, HU Xiaofeng<sup>1</sup>

(1. Key Lab. of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;
 2. Xishan Coal Electricity Group CO., LTD, Taiyuan 030203, China)

Abstract: Aiming at the problem of the imbalance of impedance matching, large stress and high acoustic energy loss in the current capacitive micromachined ultrasonic transducer(cMUT) encapsulation material, a polyvinyl chloride(PVC) material encapsulation structure with good acoustical transmission property underwater 10m, small bending deformation is designed in this paper. The package structure parameters are calculated based on the theory of sound penetration and material properties. The three-dimensional finite element model of the encapsulation structure is established by using COMSOL Multiphysics 5.0. The inherent properties of the package structure and the underwater mechanical performance are obtained by the modal analysis and static analysis respectively. It shows that the first-order resonance frequency of the encapsulation structure is 792. 47 kHz, which does not interfere with the working frequency of cMUT. The underwater system is protected by a pressure equalization device. The maximum deformation underwater 10 m is 1.12 mm and the maximum stress is 14. 4 MPa, which does not exceed the bending strength of PVC. The maximum error between the actual test sound pressure and the theoretical value is 4.8% and the distance measurement error is 1 mm. Therefore, the designed encapsulation structure of cMUT can meet the requirements.

Key words: capacitive micromachined ultrasonic transducer(CMUT); sound transmission coefficient; encapsulation structure; finite element analysis

0 引言

随着科学技术的发展和工程技术需求的日益增长,基于表面微加工工艺制作的电容式微机械超声换能器(CMUT)得到广大科研人员的关注<sup>[1-3]</sup>。

CMUT具有传统压电超声传感器所不具备的显著 优势,如结构简单,自身噪声低,高机电转换效率,高 分辨率,高灵敏度,较宽带宽,与介质阻抗匹配性 好<sup>[4-5]</sup>,在海底资源勘探、水下地形地貌探测、海底管

收稿日期:2016-08-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61127008)

作者简介:王朝杰(1991-),男,山西平遥人,硕士生,主要从事 MEMS 超声传感器结构设计、水下超声成像等研究。通信作者:王红亮 (1978-),男,河南林州人,副教授,博士,主要从事超声成像、动态测试技术、集成电路设计和微机电系统等研究。

道检查、蛙人探测、水中物体观测等水下三维成像方面有着广泛的应用,有望替代传统压电超声传感器 而成为市场的主流产品<sup>[6]</sup>。

封装结构是 MEMS 器件的重要组成单元,它的 固有机械特征及声学性能对 MEMS 芯片声学耦合 特性有较大的影响<sup>[7-8]</sup>。目前对 CMUT 封装常使用 的封装材料为丁晴橡胶(NBR),但 NBR 有较好的 导电性及深海抗压性能较差,导致 CMUT 在较深 水域的透射声压和接收灵敏度受到限制。本文设 计以聚氯乙烯为材料的封装结构,该结构阻抗匹 配性好,结构应力小及超声波能量损失小,利用 COMSOL Multiphysics 5.0 对该结构进行有限元 仿真分析,并经过实际测试验证了所设计结构的 可靠性。

1 工作原理

在 CMUT 超声成像系统中,最小基础单元是 CMUT 微元,其结构如图 1 所示,每个微元由基座、 绝缘层、真空腔、振动膜、上电极、边缘支撑等组 成<sup>[9-10]</sup>。换能器由多个 CMUT 微元按特定的方式 进行排列,从而形成 CMUT 线阵和面阵来改善发 射功率、成像分辨率、声束指向性等性能。



图 1 换能器结构示意图

本文设计的 CMUT 应用于水下目标识别及三 维成像,为使 CMUT 能够应对较深水域巨大水压 和复杂的水下环境,在封装腔体内注入厚 10 mm 的 硅油,使 CMUT 载板、硅油和封装结构组成简易压 力平衡装置,保证水下系统的安全性和稳定性。

2 CMUT 封装

CMUT芯片属于微米级精密器件,加工完成后 必须对其进行封装。CMUT 封装的主要目的是对 CMUT 核心部分提供支撑与保护,减少外界环境对 CMUT 的干扰,还要维持 CMUT 器件的基本性能 不变,从而达到保护 CMUT 正常运行的目的。因 此,选择透声性能好的透声材料及设计密封效果较 好的封装结构是设计的关键<sup>[11]</sup>。

#### 2.1 CMUT 芯片封装

CMUT 阵列的尺寸为 1.2 mm×10 mm,上电 极无法与焊盘进行焊接,且下电极在裸芯片背面,因 此需要设计一种封装结构来引出裸芯片的上、下电 极。根据设计的线阵结构,设计了如图 2(a)所示的 PCB板,芯片通过导电胶粘贴在 PCB 矩形覆金区 域,下电极通过与矩形区域连接的导线孔引出,PCB 板在裸芯片连接点对应的位置上设计了焊盘,通过金 丝键合连接,将裸芯片的上电极同样引出到 PCB 板 上,裸芯片进行 PCB 一次封装后的实物图如图 2(b) 所示。





#### 2.2 封装结构设计

由于 CMUT 阵列所激励的超声波在封装材料 中为平面波,建立封装透声模型如图 3 所示,其中用 反射 r 和透射 t 来表示声波传播类型。在 CMUT 发射阶段,发射波声压为 P<sub>0</sub>,当声波到达硅油-封 装界面上时,一部分作为反射声波,再次返回硅油, 声压为 P<sub>1r</sub>,另一部分则透入到封装中,声压为 P<sub>1t</sub>。 当声压为 P<sub>1t</sub>的声波穿越封装结构进入水中时,与 上述过程相似。根据透声理论,当脉冲宽度小于声 波在封装材料中的来回传播时间时,透声系数为

$$D =$$

$$\frac{4Z_1 \cdot Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2 \cos^2(kL) + \left(Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2}\right)^2 \sin(kL)}$$
(1)

式中: L 为封装材料的厚度;  $Z_1 = 1.4 \times 10^6$  Pa • s/m<sup>3</sup> 为硅油的声阻抗;  $Z_3 = 1.5 \times 10^6$  Pa • s/m<sup>3</sup> 为水的 声阻抗;  $Z_2$  为封装材料的声阻抗; k 为波数,其表达 式为

$$k = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{2}$$

式中:*c*为密封材料的声速;*f*为超声波频率;λ为 超声波波长。将式(2)代入式(1)可得 D 的表达 式为

$$D = \frac{4Z_1 \cdot Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2 \cos^2\left(\frac{2\pi \cdot fL}{c}\right) + \left(Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2}\right)^2 \sin\left(\frac{2\pi \cdot fL}{c}\right)}$$



图 3 封装透声模型

当  $kL = n\pi(n = 1, 2, 3, ...)$ ,即  $L = 0.5 n\lambda$ ,且  $Z_1$ 、 $Z_3$  近似相等,则由式(1)可得  $D \approx 1$ 。所以, $L = 0.5 n\lambda$ 时,声波几乎全部透射过封装材料。

当 
$$kL = \frac{(2n-1)\pi}{2}(n = 1, 2, 3...)$$
, 即  $L =$ 

0.25(2*n*-1) $\lambda$ ,且  $Z_2 \approx \sqrt{Z_1 \cdot Z_3}$ 时,由式(1)可得  $D \approx 1$ 。所以, $L = 0.25(2n-1)\lambda$ 时,声波几乎全部 透射过封装材料。

当  $kL \propto 1$ , 且  $Z_2 \approx \sqrt{Z_1 \cdot Z_3}$ , 则由式(1) 得  $D \approx 1$ , 声波几乎全部透射过封装材料。

由于 CMUT 换能器工作媒介为水,所选用的 封装材料即要承受较大的水压,又必须易于密封,根 据式(3),绘制钢、有机玻璃、聚氨酯和聚氯乙烯的透 声系数曲线,如图 4 所示。



图 4 透声系数曲线

由图 4 可知,金属材料钢厚度  $L_{\Re} = 0.5n\lambda$ ,有较强的透声能力,其他范围透射性能极差;有机玻璃和 聚氯乙烯透声性能相当,D 在 58%~100% 正弦振 荡;聚氨酯材料满足  $Z_2 \approx \sqrt{Z_1 \cdot Z_3}$ ,在  $L_{PU} =$ 0.25 $n\lambda$ ,透射性能极高,并且在其余范围,D 也均在 93%以上。

进行封装设计的 CMUT 由 16 阵列组成,封装 为半径 R = 50 mm 的圆形,CMUT 工作频率 f =400 kHz,波长  $\lambda = 3.85$  mm。根据图 4,选用聚氨酯 厚为 2.5 mm,有机玻璃厚为 3.15 mm,聚氯乙烯厚 为 3 mm, 正好处于封装结构透声曲线的波峰处, 透 声性能最佳, 封装结构示意图如图 5 所示。





3 有限元分析

模态分析是执行一个预应力来分析、确定系统的特征频率,通过分析可直观、准确地得到薄膜的模态振型及其固有频率。由于封装结构的固有频率对CMUT工作带宽有很大的影响,为了减少封装结构对CMUT接收性能的干扰和拓宽CMUT工作带宽,应使封装结构的固有频率大于或小于CMUT工作频率。

利用 COMSOL Multiphysics 软件对上述封装 结构进行有限元特征频率分析,前6阶固有频率如 表1所示。由表可知,有机玻璃、聚氯乙烯和聚氨酯 封装结构的前6阶固有频率与 CMUT 工作频率相 距甚远,对传感器干扰较小。

表1 特征频率分析

模态	频率/Hz			
	有机玻璃	聚氯乙烯	聚氨酯	传感器/10 <sup>6</sup>
一阶	1 044.7	792.47	159.78	1.655 0
二阶	2 154.7	1 636.6	32893	3.434 3
三阶	2 157.2	1 636.9	329.78	3.434 8
四阶	3 502.5	2 663.3	535.04	5.624 6
五阶	3 505.6	2 663.8	535.09	5.627 5
六阶	3 993.5	3 033.1	610.02	6.416 4

对封装结构进行静态分析,计算在水深 10 m 处封装结构的弯曲变形和应力分布,如表 2 所示。 由表可知,聚氨酯材料形变最大,易使聚氨酯材料碰 撞到 CMUT 阵列,对器件造成损伤,而有机玻璃和 聚氯乙烯形变和应力参数相近,但考虑到 CMUT 所处复杂的水下环境,有机玻璃易吸收醇类溶胀且 在许多氯代烃和芳烃中可溶解,产生应力开裂,所

(3)

以,选择聚氯乙烯作为密封材料,聚氯乙烯封装前4 阶模态振型如图6所示,过直径曲线位移和应力如 图7、8所示。

表 2 最大位移和应力(水深 10 m)



4 测试

CMUT 作为发射端,标准水听器作为接收端, 对 CMUT 声压进行测试,测试原理如图 9 所示。通 过将接收端接收到的电压(V<sub>0</sub>)和声压级(SPL),即  $SPL = 20\log_{10}(V_0) - S(其中 S 为标准水听器的灵$  $敏度)代入声压值 <math>P_1 = 10^{\frac{SPL}{20}} \cdot P_0$ (其中  $P_0 = 1 \mu Pa$ ) 来计算声场中的  $P_1$ <sup>[12]</sup>,通过对比声压理论值  $P_2 =$ 978.3 · e<sup>-0.0192x</sup>(其中 x 为测试距离)和实验值  $P_1$ 来验证封装结构的性能,测试结果如表 3 所示。



距离/cm	电压/mV	$P_1/\mathrm{Pa}$	$P_2/\mathrm{Pa}$
10	80.0	781.8	807.4
20	69.2	674.3	666.4
40	46.5	454.4	453.9
60	30.6	299.1	309.1
80	20.5	200.4	210.6
100	14.1	137.6	143.4

由表 3 可知,标准水听器测试值在理论值上下 摆动,最大差距为 4.8%。

将 CMUT 放入水下 0.5 m,在封装外壳前方 x=4 cm 处放置铝块,如图 10 所示,通过控制 CMUT 阵列中各阵元的高精度相位延时,使发射的 超声波叠加,实现超声波束的偏转和聚焦。将 CMUT 接收到的信号滤波放大,得到测试信号如图 11 所示。



由图 11 可知, CMUT 在发射超声波  $t=70 \ \mu s$ 

时接收到物块返回的回波信号,水中声速 c=1 540 m/s,由  $x = c \cdot t/2$  可计算物块与换能器的间距(x) 为 5.4 cm,这与硅油厚度(1 cm)、聚氯乙烯厚度 (3 mm)和 x 三者之和一致。对物块扇形扫描,得到 物块的成像图如图 12 所示。



5 结束语

本文根据透声理论和机械振动基础,选用透声 系数较好、抗弯能力较强的聚氯乙烯作为封装材料, 解决了 CMUT 封装结构应力大、声波能量损失大 的问题,优化了封装结构参数,并利用 COMSOL Multiphysics 5.0 进行静态和模态仿真。搭建测试 系统验证表明,封装后的 CMUT 阵列声压测试值 与理论值相匹配,验证了所设计的 CMUT 封装结 构的合理性。

## 参考文献:

- [1] 王朝杰,王红亮,段培盛,等.电容式微机械超声传感器 设计与仿真[J].压电与声光,2017,39(2):174-178.
  WANG Chaojie, WANG Hongliang, DUAN Peisheng, et al. Design and simulation of capacitive micromachined ultrasonic transducer [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2017,39(2): 174-178.
- [2] 李玉平,何常德,张娟婷,等.基于 C-SOI 工艺的一维 MEMS电容式超声传感器阵列[J].传感器与微系统, 2015,34(3):94-96.

LI Yuping, HE Changde, ZHANG Juanting, et al. One-dlimensional MEMS capacitive ultrasonic transducer arrays based on C-SOI technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(3):94-96.

- [3] LI Zhikang, ZHAO Libo, JIANG Zhuangde, et al. Fabrication of CMUTs with a low temperature wafer bonding technology [C]//Busan, South Korea: 2015 IEEE, 2015.
- [4] WEI You. Analytical modeling of CMUTs in coupled electro-mechano-acoustic domains using plat vibration

theory[J]. IEEE Sensors Jouranl, 2011, 11(9): 2159-2167.

- [5] ORALKAN O, ERGUN A, JOHNSON J, et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducers: Next generation arrays for acoustic imaging? [J]. IEEE Trans Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2002,49(11):1596-1610.
- [6] 张志禹,于文革. 一种新型 FBG 微力传感器[J]. 传感器与微系统,2014(3):71-75.
  ZHANG Zhiyu, YU Wenge. A novel FBG micro-force sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014(3): 71-75.
- [7] 刘梦然,简泽明,张国军,等.基于丁腈橡胶帽封装的 MEMS 仿生水听器的设计[J].传感技术学报,2014, 27(1):21-25.

LIU Mengran, JIAN Zeming, ZHANG Guojun, et al. Design of MEMS bionic vector hydrophone based on nbr encapsulation[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(1):21-25.

[8] 许姣,张国军,石归雄,等.纤毛式矢量水听器新型 封装结构的研究[J].传感技术学报,2011,24(4): 519-520.

XU Jiao, ZhANG Guojun, SHI Guixiong, et al. Advancements in encapsulation of hair vector hydrophone [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(4):519-520.

- [9] WANG Hongliang, WANG Xiangjun, HE Changde. Design and performance analysis of capacitive micromachined ultrasonic transducer linear array[J]. Micromachines, 2014, 5: 420-431.
- [10] 苗静,何常德,廉德钦,等.基于硅晶圆键合工艺的 MEMS电容式超声传感器设计[J]. 传感技术学报, 2012,25(12):1653-1658.
  MIAO Jing, HE Changde, LIAN Deqing, et al. Design of MEMS capacitive ultrasonic transducer based on wafer bonding technology[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(12):1653-1658.
- [11] 许肖梅. 声学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [12] SONG Jinlong, XUE Chenyang, HE Changde, et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducers (CMUTs) for underwater imaging applications [J]. Sensors, 2015, 15, 23205-23217.