

# 电容式微机械超声传感器设计与仿真

王朝杰<sup>1</sup>,王红亮<sup>1</sup>,段培盛<sup>2</sup>,陈一波<sup>1</sup>,胡晓峰<sup>1</sup>

(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:**建立电容式微机械超声传感器(CMUT)微元三维有限元模型,经过分析 CMUT 微元不同结构对 CMUT 性能的影响,得到 CMUT 结构参数。设定工作频率范围 1~2 MHz,工作电压  $V_{dc} < 100$  V,首先,利用有限元模型进行模态分析研究薄膜参数与一阶频率的关系,以此确定薄膜参数;然后,在阐述相关理论和静态分析的基础上,仿真、分析空腔对 CMUT 性能的影响,进而确定空腔高度;最后,通过静电-机械耦合分析和计算机电耦合系数优化电极参数。对所设计的 CMUT 结构进行仿真验证,工作频率为 1.65 MHz,塌陷电压为 68 V,满足应用要求。

**关键词:**电容式微机械超声传感器(CMUT);COMSOL Multiphysics;塌陷电压;机电耦合系数

**中图分类号:**TM534;TN55;TP212 **文献标识码:**A

## Design and Simulation of 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:** The three-dimensional model of CMUT unit was established to study the effects of different structures of CMUT unit on the performance of CMUT and the CMUT structure parameters was obtained. The operating frequency range of 1~2 MHz and working voltage of  $V_{dc} < 100$  V were set. First, the membrane parameters were determined by using the finite element model for the modal analysis to study the relationship between the membrane parameters and first order frequency. Then, the effect of the gap on the performance of CMUT was simulated and analyzed based on the explanation theories and static analysis and the gap thickness was determined. Finally, the electrode parameters were optimized through the electrostatic - mechanical coupling analysis and the calculation of the electromechanical coupling coefficient. The simulation verification of the proposed CMUT structure was carried out through COMSOL Multiphysics. The result showed that the working frequency was 1.65 MHz and collapse voltage was 68 V, which met the requirements of design.

**Key words:** capacitive micromachined ultrasonic transducer(CMUT); COMSOL Multiphysics; collapse voltage; electromechanical coupling coefficient

### 0 引言

在超声传感器领域,微机械超声传感器(MUT)具有体积小,质量轻,成本低,功耗低,可靠性高,频率控制灵活,频带宽,灵敏度高及易与电路集成和实现智能化等特点<sup>[1-2]</sup>,得到研究员青睐。目前,超声传感器主要分为压电式和电容式两种<sup>[3]</sup>,而压电式超声传感器(PMUT)以其稳定的性能,成熟的技术和低廉的价格处于主导地位,但随着超声波应用领

域的扩大,PMUT的问题也逐渐暴露出来<sup>[4]</sup>。近年来,基于表面微加工工艺的电容式微机械超声传感器(CMUT)逐渐成为研究热点<sup>[5]</sup>。与传统的PMUT相比,CMUT具有机械阻抗低,带宽宽,介质阻抗匹配好及易集成等优点<sup>[6-8]</sup>。

由于目前CMUT器件制作周期长且成本高,所以在设计传感器时要尽量对影响其性能的一些主要参数进行合理优化,以提高传感器设计与制作效

收稿日期:2016-03-18

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。王红亮(1978-),副教授,硕士生导师,主要从事测试计量技术及仪器、水下超声成像的研究。

率和正确性<sup>[9]</sup>。

### 1 工作原理

CMUT 微元一般由金属上电极、振动膜、边缘支撑、空腔、绝缘层、下电极和基座等部分组成,CMUT 微元的三维空间有限元模型如图 1 所示。

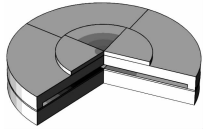


图 1 CMUT 微元三维空间模型

CMUT 工作方式有发射模式和接收模式两种。CMUT 处于发射模式时,在上、下电极间加载直流偏置电压( $V_{dc}$ ),静电力会使振动薄膜向下弯曲变形,再在上、下电极间施加频率与薄膜振动频率一致的交流电压( $V_{ac}$ ),激励薄膜往复运动,从而产生超声波,如图 2(a)所示;CMUT 处于接收状态时,声波作用激励薄膜振动,从而改变薄膜和绝缘层的间距,引起电容量变化,再经过放大、调理电路的处理,实现超声波的接收,如图 2(b)所示。

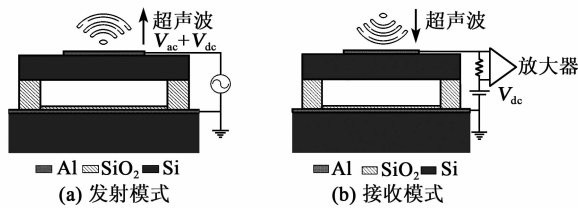


图 2 CMUT 工作原理示意图

### 2 薄膜对 CMUT 固有频率的影响

固有频率是电容式微机械超声传感器在设计时首要考虑的重要性能指标,当外界激励信号频率与传感器固有频率一致时,将会引起薄膜共振,使薄膜振动位移增大,这既可满足 CMUT 在发射模式时有较大的发射能量,又可方便 CMUT 在接收模式时对微电容的检测。

一般情况下,无法用一个精确的数学表达式来表示 CMUT 薄膜振动的固有频率,对于边缘固支的圆形薄板,其在空气或真空中的固有频率可表示为类似形式<sup>[10]</sup>:

$$f_n = \frac{0.47t_m}{r_m^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad (1)$$

式中: $t_m$ 为薄膜厚度; $r_m$ 为薄膜半径; $E$ 为薄膜材料弹性模量; $\sigma$ 为材料泊松比; $\rho$ 为材料密度。

模态分析是执行一个预应力模态分析来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,利用 COMSOL Multiphysics 软件对 CMUT 进行有限元模态分析,前四阶模态振型如图 3 所示。由图可知,只有一阶振型上、下往复运动,中心挠度最大,向边缘扩散挠度呈递减趋势,适合声波的收发,而其他振型则均存在反向区,不利于声波收发。为此,选择薄膜的一阶模态频率为其工作频率。此外,一阶频率(1.65 MHz)与二阶频率(3.43 MHz)相差较大,表明传感器的带宽较宽,抗干扰性较强。

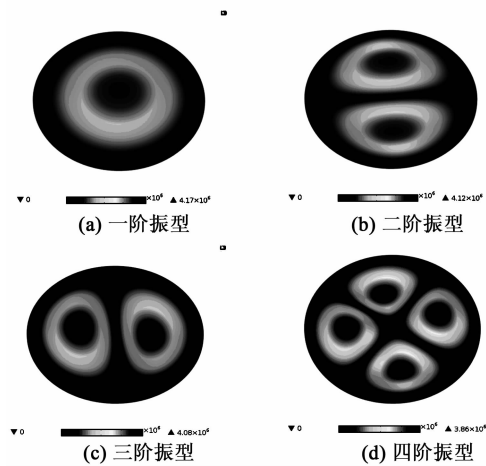


图 3 薄膜的四阶振型

CMUT 可应用于医疗成像、无损检测和水下成像领域,根据 CMUT 探测距离、成像品质、检测电路难度和制备技术等因素,将传感器的固有频率设定为 1~2 MHz。通过模态分析,可分别获得传感器固有频率随  $r_m$ 、 $t_m$  的变化曲线,如图 4 所示。

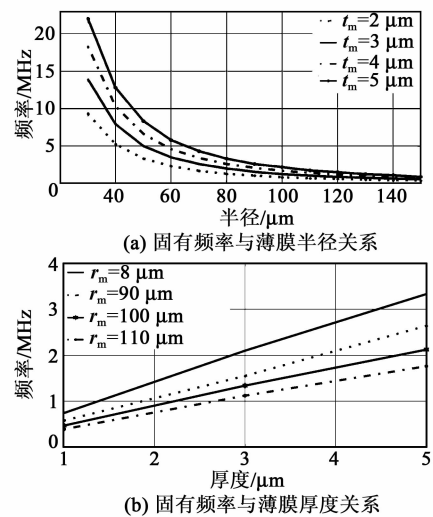


图 4 固有频率与薄膜关系

由图 4(a)可知,当  $t_m$  一定时,随着  $r_m$  的增大,传感器的固有频率呈递减趋势,但  $r_m < 90 \mu\text{m}$  时固

有频率的变化幅度较大,对固有频率的影响较明显;当  $r_m > 90 \mu\text{m}$  时固有频率变化幅度趋于平缓;由图 4(b)可知,  $r_m$  一定时,随着  $t_m$  的增大,传感器的固有频率呈线性递增。综上所述,选择  $r_m = 80 \sim 100 \mu\text{m}$ ,  $t_m = 2 \sim 4 \mu\text{m}$ , 经实验测试,当  $t_m = 2 \mu\text{m}$  时,薄膜易出现疲劳现象导致传感器失效甚至破损,所以选择  $t_m = 3 \mu\text{m}$ 。

### 3 空腔对 CMUT 性能的影响

空腔为薄膜提供了振动空间,空腔高度将影响传感器的发射声压、接收灵敏度及塌陷电压等性能。

1) 接收模式。灵敏度是 CMUT 设计时着重考虑的性能指标,它用来表示声电转换效率,其计算式为

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta P} = \frac{\epsilon_0 A V_{dc}}{P(g_0 - x)^2} \dot{x} \quad (2)$$

式中:  $S$  为接收灵敏度;  $\Delta I$  和  $\Delta P$  分别为电流变化量和声压变化量;  $P$  为声压;  $\epsilon_0$  为介电常数;  $A$  为电容的等效面积;  $g_0$  为空腔高度;  $x$  为对薄膜变化位移求微分。由式 (2) 可知,应减小空腔高度,有利于提高 CMUT 灵敏度,便于对微小电容的检测。

2) 发射模式。薄膜需要产生较大的位移来发射较强能量的超声波,最大发射声压是检测传感器性能的又一重要指标,其粗略估计式为

$$P_{\max} = 2\pi f D_{\max} Z f_a \quad (3)$$

式中:  $P_{\max}$  为最大发射声压,  $f$  为工作频率;  $Z$  为介质声阻抗;  $D_{\max}$  为薄膜振动最大位移;  $f_a$  为传感器薄膜平均位移与中心最大位移的比值。由式 (3) 可知,为了使传感器有较大的发射声压,则需要薄膜有较大的振动位移,这就要求有较高的腔高来保证薄膜有足够的振动空间。

3) CMUT 空腔为真空,当处于工作状态时要承受大气压,根据板壳理论,得到在固定均匀载荷  $p$  的作用下,圆形薄膜的弹性曲面微分方程的极坐标为

$$D \left( \frac{d}{dr_m^2} + \frac{1}{r_m} \frac{d}{dr_m} \right) \left( \frac{d^2 x}{dr_m^2} + \frac{1}{r_m} \frac{dx}{dr_m} \right) = p \quad (4)$$

其中

$$D = \frac{E t_m^3}{12(1-\sigma^2)} \quad (5)$$

式中  $D$  为抗弯刚度。

对式 (4) 积分、加载边界条件可得在均匀载荷下,薄膜最大形变位移为

$$x_{\max} = p r_m^4 / (64D) \quad (6)$$

利用 COMSOL Multiphysics 分别对半径为  $80 \sim 110 \mu\text{m}$  的 CMUT 微元静态分析,计算在标准大气压下薄膜位移云图(见图 5(a))及任一直径上薄膜位移变化曲线(见图 5(b))。

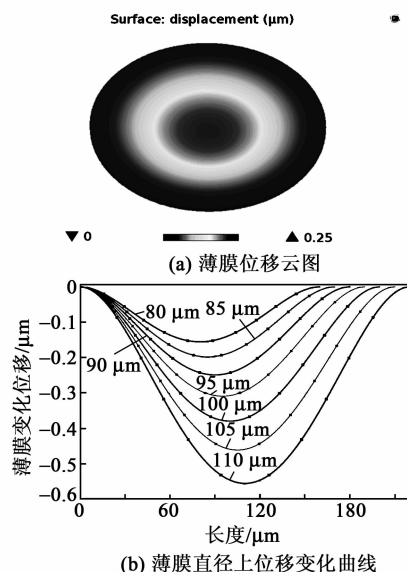


图 5 薄膜位移曲线

由图 5(a)可知,薄膜在标准大气压作用下,薄膜向下弯曲,图 5(b)中,在直径线上,中心点的位移变化最大,向两边呈递减趋势,并且随着薄膜半径的增大,薄膜变化位移也在逐渐增大。

4) 在静电-机械耦合分析中,上、下电极施加的  $V_{dc}$  要小于塌陷电压,并且为了获得更高的频率、机电转换效率、带宽、灵敏度,CMUT 所加偏置要尽可能接近塌陷电压,塌陷电压<sup>[11]</sup>为

$$V_{\text{collapse}} = \sqrt{\frac{8k g_0^3}{27A\epsilon_0}} \quad (7)$$

式中  $k$  为 CMUT 等效模型中弹簧弹性系数。由式 (7) 可知,随着  $g_0$  的增大,塌陷电压随之增大。

综上分析,结合实际工程要求及现阶段工艺制作水平,选择  $r_m = 90 \mu\text{m}$ ,  $g_0 = 0.8 \mu\text{m}$ 。

### 4 电极对 CMUT 塌陷电压的影响

对于非塌陷模式,上、下电极间的  $V_{dc}$  不能超过  $V_{\text{collapse}}$ ,否则,薄膜所受静电力将超过其机械回复力,并将薄膜拉向衬底与下电极吸合,所以,选取  $V_{\text{collapse}}$  的 80% 作为工作电压。分别设定电极的半径  $r_e$  和厚度  $t_e$  为变量,对所建模型分别进行仿真,仿真结果如图 6、7 所示。由图可看出  $r_e$ 、 $t_e$  对  $V_{\text{collapse}}$  的影响,且可求得所加电压为临界塌陷电压时薄膜变化位移的平均值,

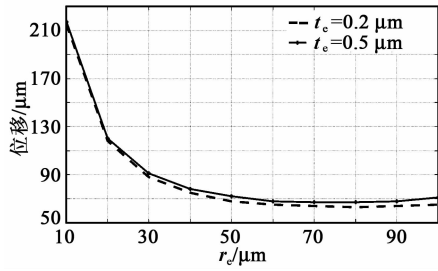


图 6 塌陷电压与电极半径关系

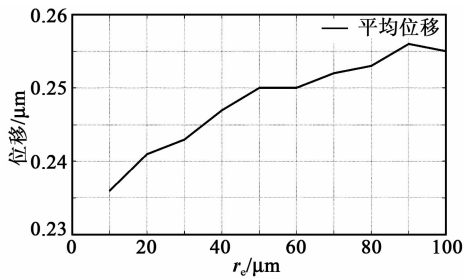


图 7 平均位移与电极半径关系

由图 6 可知,随着  $r_e$  的增大,薄膜的  $V_{collapse}$  整体呈递减趋势。 $t_m = 0.2 \mu\text{m}$  时,  $r_e = 0 \sim 50 \mu\text{m}$ ,  $V_{collapse}$  从 215 V 减小到 68 V,变化幅度较大; $r_e = 50 \sim 100 \mu\text{m}$ ,  $V_{collapse}$  从 68 V 减小到 65 V,变化幅度趋于平缓。由图 7 可知,当薄膜处于临界塌陷位置时,随着  $r_e$  的增大,薄膜平均位移在递增,但变化范围不超过 0.03。

CMUT 主要实现电能和机械能之间的转换,机电耦合系数  $k_t^2$  是衡量能量转换的物理量。当  $V_{dc}$  为塌陷电压的 80% 时,通过改变不同  $r_e$  所得  $k_t^2$  变化,如表 1 所示,由表可知,当  $r_e = 45 \mu\text{m}$ 、 $90 \mu\text{m}$  时,  $k_t^2$  的值最大,而在其他值时,  $k_t^2$  值相对较小。

表 1  $r_e$  与  $k_t^2$  的关系

$r_e/\mu\text{m}$	20	40	45	50	70	90
$k_t^2$	0.35	0.4	0.93	0.73	0.79	1

由表 1 可知,  $r_e$  为  $45 \mu\text{m}$  或  $90 \mu\text{m}$  时,  $k_t^2$  较好,本文选用  $r_e = 45 \mu\text{m}$ 。

### 5 验证与总结

综上所述,最终设置 CMUT 微元的尺寸参数如表 2 所示。表中  $t_s$  为绝缘层厚度。

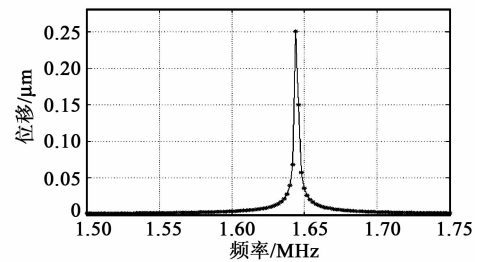
表 2 电容式微机械超声传感器参数

$r_m/\mu\text{m}$	$r_e/\mu\text{m}$	$g_0/\mu\text{m}$	$t_m/\mu\text{m}$	$t_e/\mu\text{m}$	$t_s/\mu\text{m}$
90	45	0.8	3	0.2	0.15

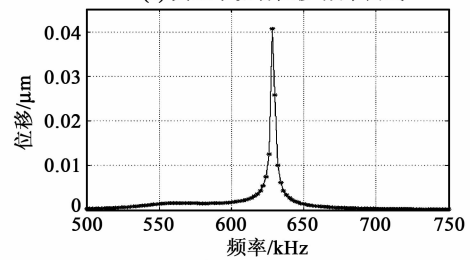
依据表 2 参数,建立 CMUT 微元三维有限元模型,经模态分析,真空中一阶模态频率为 1.65 MHz;静态分析最大位移为  $0.249 \mu\text{m}$ ;静电分析可得

$V_{collapse} = 68 \text{ V}$ ,满足设计要求。

为了验证 CMUT 的工作频率,在 CMUT 微元的振动薄膜上施加随时间按正弦规律变化的载荷。经过分析可得 CMUT 薄膜在不同频率下振动位移曲线如图 8 所示。由图可知,CMUT 薄膜在再真空中的共振频率为 1.648 MHz,与一阶模态分析结果吻合,在水中的共振频率为 628 kHz。



(a) 真空中振动位移-频率曲线



(b) 水中振动位移-频率曲线

图 8 振动位移-频率曲线

### 6 结束语

本文介绍了 CMUT 的工作原理、组成结构和各个组成部分的功能。通过有限元分析法建立了三维 CMUT 模型,通过模态分析,分析了传感器的工作频率和薄膜结构参数对固有频率的影响;通过静态分析得到薄膜在固定载荷下的形变;通过静电力分析得到传感器塌陷电压随电极参数的变化曲线,最终验证了所涉及模型的正确性。

### 参考文献:

- [1] WANG Hongliang, WANG Xiangjun, HE Changde, et al. Design and performance analysis of capacitive micromachined ultrasonic transducer linear array[J]. Micromachines, 2014,5(3):420-431.
- [2] NIKOOZADEH A, CHOE J W, KOTHAPALLI S R, et al. Photoacoustic imaging using a 9F microLinear CMUT ICE catheter [J]. Ultrasonics Symposium. IEEE, 2012:24-27.
- [3] 于佳琪,何常德,张永平,等. MEMS 电容式超声传感器设计[J]. 压电与声光,2013,35(5):706-710. YU Jiaqi, HE Changde, ZHNAG Yongping, et al. Design of MEMS capacitive ultrasonic transducer based

- on anodic bonding technology[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2013, 35(5): 706-710.
- [4] 于佳琪. 基于 Si-SOI 键合的微电容超声波换能器设计[D]. 太原:中北大学, 2014.
- [5] 张慧, 宋光德, 靳世久, 等. 电容式微超声传感器的电极参数优化设计[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(7): 935-938.
- ZHANG Hui, SONG Guangde, JIN Shijiu, et al. Optimization design of the electrode parameters in capacitive micromachined ultrasonic transducer [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(7): 935-938.
- [6] APTE N, PARK K K, NIKOOZADEH A, et al. Bandwidth and sensitivity optimization in CMUTs for airborne applications[J]. *2014 IEEE International ultrasonics Symposium Proceedings*, 2014:166-169.
- [7] 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.
- [8] WEI You. Analytical Modeling of CMUTs in Coupled Electro-Mechano-Acoustic Domains Using Plat Vibration Theory[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(9): 2159-2167.
- [9] 张慧, 宋光德, 官志坚, 等. 电容式微加工超声传感器结构参数对性能的影响分析[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(6): 951-953.
- ZHANG Hui, SONG Guangde, GUAN Zhijian, et al. Influences of the structural parameters on of capacitive micromachined ultrasonic the performance transducer [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(6): 951-953.
- [10] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芳. *声学基础*[M]. 3 版. 南京: 南京大学出版社, 2012.
- [11] ERGUN A S, YARALIOGLU G G., KHURI-YAKUB B T. Capacitive micromachined ultrasonic transducers: theory and technology [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2003, 16(2): 76-84.
- 
- (上接第 283 页)
- ZHU Pingyu, LIN Yuchi, LIAO Chuanjun. Development of dynamic strain measurement with fiber Bragg grating[J]. *Engineering Science*, 2007, 9(1): 89-94.
- [7] 陈苏, 陈国兴, 徐洪钟, 等. 光纤 Bragg 光栅应变测试技术在大型振动台模型试验中应用[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(10): 113-118.
- CHEN Su, CHEN Guoxing, XU Hongzhong, et al. Application of optical fiber Bragg grating strain measuring technique in large scale shaking table model tests [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(10): 113-118.
- [8] 孙丽. 光纤光栅传感应用问题解析[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [9] 王源, 章征林, 孙阳阳, 等. 不同表面粘贴方式对光纤光栅应变传递的影响[J]. *压电与声光*, 2016, 38(1): 106-110.
- WANG Yuan, ZHANG Zhenglin, SUN Yangyang, et al. The influence of different surface paste on FBG strain transfer [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2016, 38(1): 106-110.
- [10] 赵鹏冲, 段建立, 孙阳阳, 等. 光栅粘贴长度对应变传递影响的实验研究[J]. *压电与声光*, 2016, 38(2): 250-252.
- ZHAO Pengchong, DUAN Jianli, SUN Yangyang, et al. The experimental study on the influence of bonding length on FBG strain transfer [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2016, 38(2): 250-252.