

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105797

电容式超声换能器小信号等效电路建模与仿真<sup>\*</sup>

王红亮 蔚丽俊 刘涛 吕云飞

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室 太原 030051)

**摘要:** 为了进一步分析优化电容式超声换能器(CMUT)的性能,建立了CMUT微元和CMUT阵元的等效电路模型,并进行了等效电路仿真。首先推导了CMUT微元小信号等效电路模型,然后在射频电路仿真软件ADS中建立CMUT微元的等效电路进行仿真,分析了施加不同幅值、周期的交流电压对CMUT微元发射特性的影响。分析发现,交流电压幅值越大、持续周期越长,CMUT微元的振动位移和输出声压越大,发射性能越好。此外,结合互辐射阻抗,推导了CMUT阵元等效电路模型,通过ADS仿真分析了不同微元大小、间距、数目CMUT阵元的频率特性。结果表明,微元大小、间距、数目均会对CMUT阵元的频率产生影响,以上分析结果为CMUT的设计和测试提供了理论参考。

**关键词:** 电容式超声换能器;小信号等效电路;阵元等效电路;辐射阻抗;发射特性分析;频率响应分析

**中图分类号:** TB552 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3099

Modeling and simulation of capacitive ultrasonic transducer  
small equivalent circuit

Wang Hongliang Yu Lijun Liu Tao Lyu Yunfei

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to further analyze and optimize the performance of capacitive ultrasonic transducer (CMUT), the equivalent circuit models of CMUT cell and CMUT array were established, and the equivalent circuit simulation was carried out. First, CMUT small signal equivalent circuit model was deduced, and then the circuit simulation software ADS was used to establish CMUT cell equivalent circuit for the calculation. The influence of different amplitudes and periods of AC voltage on the emission characteristics of CMUT cell was analyzed. The results show that the larger the amplitude and duration of AC voltage, the larger the vibration displacement and output sound pressure of the CMUT cell, and the better the emission performance. In addition, the equivalent circuit model of CMUT array was derived based on the mutual radiation impedance, and the frequency characteristics of CMUT array with different cell sizes, spacing and numbers were analyzed by ADS simulation. The results show that the size, spacing and number of cells all affect the frequency of CMUT array. The above analysis results provide theoretical reference for the design and testing of CMUT.

**Keywords:** capacitive ultrasonic transducer; small signal equivalent circuit; array equivalent circuit; radiation impedance; emission characteristic analysis; frequency response analysis

## 0 引言

超声波具有频率高、能量集中、穿透力强和方向性良好等特点<sup>[1]</sup>,广泛应用于超声成像、医学诊断、无损检测、液体流量测量、故障定位、生化气体探测等领域<sup>[2-3]</sup>。常用的超声换能器主要分为两类:电容式超声换能器(CMUT)和压

电式超声换能器(PMUT)。其中CMUT具有宽带宽、高灵敏度、不需要阻抗匹配等优势<sup>[4]</sup>。此外,制作工艺简单、制造成本低使得CMUT具有更高的吸引力<sup>[5]</sup>。目前,随着微机电技术的发展,CMUT的设计优化成为国内外超声换能器研究的热点,具有良好的前景。最近,斯坦福大学Khuri-Yakub教授的团队已经证实了从二维CMUT阵列中可以

收稿日期:2021-02-05

<sup>\*</sup> 基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFF01010500)、国家重大科研仪器研制项目(61927807)、山西省“1331工程”重点学科建设计划经费(1331KSC)资助

获得图像<sup>[6-7]</sup>。对 CMUT 技术和应用日益增长的兴趣加速了这些设备的建模工作。CMUT 的建模仿真工作主要包括两种:有限元仿真和等效电路仿真。其中有限元分析微元以及微小阵列时能够准确地预测性能,但是在计算大型换能器阵列时建模比较复杂,所需要的时间长,因而不适合应用在仿真大规模阵列<sup>[8]</sup>。相比有限元分析,建立等效电路模型仿真能够简化换能器建模,计算时间短,有效地弥补了有限元仿真的缺点,而且等效电路在分析 CMUT 非线性行为方面有独特的优势<sup>[9-10]</sup>。比尔肯大学 Koymen 教授在梅森模型的基础上进行了改进,建立了线性与非线性等效电路模型,仿真分析了单个 CMUT 的性能,但并没有分析振膜辐射阻抗以及其对频率响应的影响<sup>[11-12]</sup>。本文首先建立了微元小信号等效电路模型,然后在这个模型的基础上结合互辐射阻抗,建立了 CMUT 阵元等效电路,并分析了考虑互辐射情况下 CMUT 微元间距和数目对 CMUT 频率响应的影响。

### 1 CMUT 微元小信号等效电路模型

CMUT 微元的等效电路可视为一个二端口网络,其一端表示电学端口(电压与电流),另一端表示机械端口(力与速度)。对于 CMUT 这类机电换能器,工作时涉及到电学、力学和声学多方面的知识,其等效电路模型的建立通常是基于梅森力电等效理论,通过电-力-声类比将力、声部分的参数转化为电学元器件,根据力平衡方程构成回路<sup>[13]</sup>。

CMUT 微元等效电路机械端口的驱动力可以表示为:

$$f_R(t) = \frac{\partial E(t)}{\partial x_R} = \sqrt{5} \frac{V^2(t)}{2} \frac{\partial C(t)}{\partial x_P} = \sqrt{5} \frac{C_0 V^2(t)}{2t_{ge}} g' \left( \frac{x_P(t)}{t_{ge}} \right) \quad (1)$$

研究小信号等效电路时,施加在 CMUT 终端的交流电压很小,可以假设  $V_{AC} \ll V_{DC}$ , 则:

$$V^2(t) = [V_{DC} + V_{AC}(t)]^2 \approx V_{DC}^2 + 2V_{DC}V_{AC}(t) \quad (2)$$

对应的薄膜位移可表示为:

$$x_R(t) = X_R + x_r(t), |x_r(t)| \ll X_R \quad (3)$$

将式(1)中的  $f_R(t)$  在  $x = X_R$  处展开得:

$$f_R(t) = F_R + f_r(t) = f_R \Big|_{x_R=X_R} + \frac{df_R}{dx_R} \Big|_{x_R=X_R} \cdot x_r(t) \quad (4)$$

CMUT 微元的线性方程为:

$$f_r(t) = n_R V_{AC} + \frac{x_r(t)}{C_{RS}} \quad (5)$$

其中机电转换比和弹簧软化系数分别如下:

$$n_R = \frac{2F_R}{V_{DC}} \quad (6)$$

$$C_{RS} = \frac{2t_{ge}^2}{5C_0 V_{DC}^2 g''(X_P/t_{ge})} \quad (7)$$

在小信号等效电路模型的电气端口中,元件只有薄膜形变后的电容为:

$$C_{0d} = C_0 g \left( \frac{X_P}{t_{ge}} \right) \quad (8)$$

基于上述对各个参量的推导,建立如图 1 所示的 CMUT 微元小信号等效电路模型。图中  $Z_{RR}$  为辐射阻抗,  $C_{0d}$  为等效静态电容,  $C_{RS}$  为弹簧软化电容,  $C_{RM}$  为薄膜力顺,  $L_{RM}$  为薄膜质量。

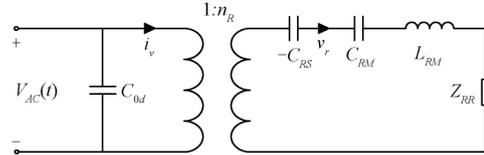


图 1 CMUT 微元小信号等效电路模型

根据图 1 所示的等效电路模型,在 ADS(advanced design system)中建立微元小信号等效电路。用一个二端口网络来表征换能器的电学端口和机械端口,变压器的转换比等效为 CMUT 微元的机电转换比。用  $Z$  参数元件表示为复数负载的声学端辐射阻抗。

### 2 CMUT 微元发射特性分析

#### 2.1 等效电路建模

进行仿真分析时,通过创建符号来表示一个模块电路,可以使电路看起来更简单,因此创建了小信号等效电路和辐射阻抗的符号如图 2 和 3 所示,用所建立的小信号等效电路和辐射阻抗符号来代替一个完整的模块电路。在振动薄膜上下电极施加直流偏置电压和小的交流电压,使 CMUT 微元处于发射超声波的状态。

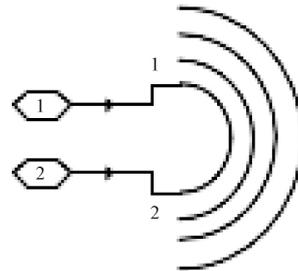


图 2 辐射阻抗符号

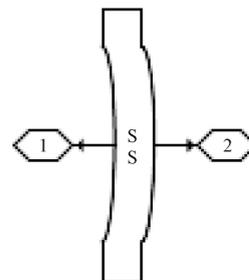


图 3 等效电路符号

建立等效电路对 CMUT 微元进行瞬态仿真。对施加在电极间的交流电压幅值、周期个数进行改变,观察不同输入信号对输出的影响。

## 2.2 不同交流电压幅值发射特性仿真

首先确定直流偏置电压为  $0.7 V_{PI}$  的定值,然后施加持续5个周期,频率为600 kHz的交流信号。通过改变交流信号幅值为  $0.01, 0.04, 0.07, 0.09 V_{PI}$  来观察不同交流输入信号对输出的影响。通过等效电路仿真得到CMUT薄膜的振动位移与输出声压如图4所示。由图4可以看出,当CMUT微元施加的直流偏置电压一定时,薄膜的振动位移和输出声压随着交流信号幅值的增大而增大,横向分析图像可知幅值的不同不会影响振动薄膜的共振频率。

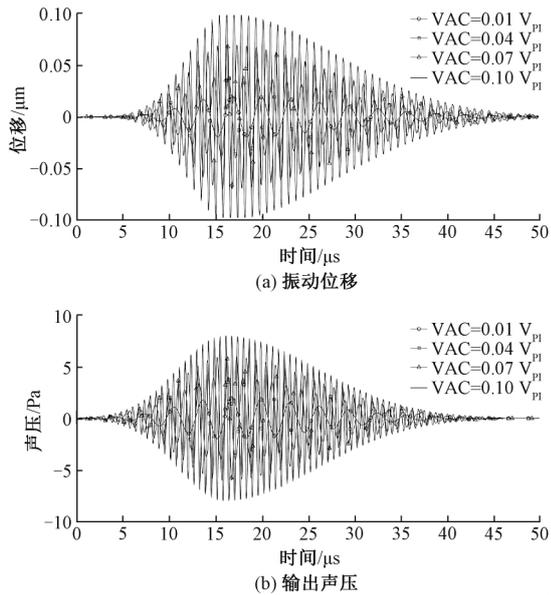


图4 不同幅值交流电压的发射特性

## 2.3 不同交流电压周期发射特性仿真

选择  $0.7 V_{PI}$  作为直流偏置电压,取频率为600 kHz的2 V正弦信号作为交流激励,改变施加交流信号周期分别为1,5,10和20周期。由ADS瞬态电路仿真得到薄膜振动位移和输出声压如图5所示。分析图5可知,对CMUT电极施加交流激励的周期不同会造成薄膜振动的持续时间和衰减速度不同。其中施加周期越多,振动位移和输出声压持续时间越长,衰减变得更加缓慢,而且振动位移和输出电压的幅值也会有所增加。

根据以上等效电路仿真可以发现,当CMUT电极两端的直流偏置电压一定时,要使交流信号的频率尽量接近直流偏置电压的输出声压中心频率,同时提高交流信号的幅值和周期从而提高发射声压幅值。在实际应用中应该根据具体情况合理的选择交流信号的幅值和周期。

## 3 CMUT阵元频率性能分析

### 3.1 CMUT阵元等效电路模型

在实际中,CMUT通常由很多微元组成阵元以实现强

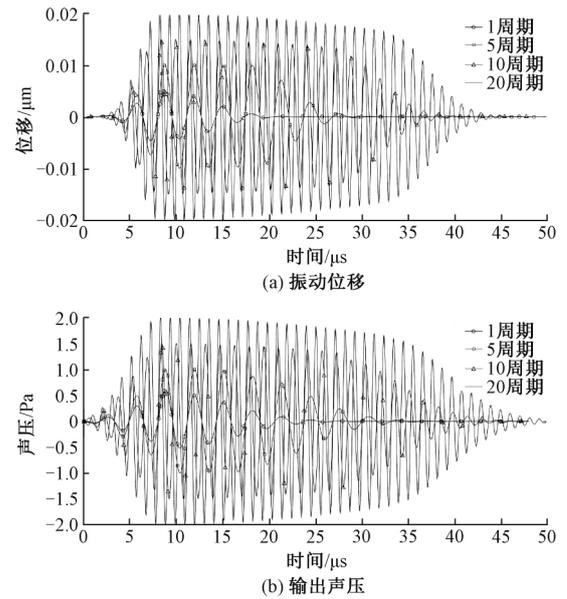


图5 不同周期交流电压的发射特性

指向性、高灵敏度、以及高发射功率等的需求<sup>[14]</sup>,因此研究CMUT阵元的性能更加可以反映CMUT的性能。CMUT各个微元发射声场相互作用、相互影响,形成较强的互辐射阻抗<sup>[15]</sup>。为了更精确地研究CMUT的性能,在仿真CMUT时,不单单要考虑微元本身产生的自辐射,还要分析微元之间的互辐射阻抗。本文在CMUT微元模型的基础上建立了CMUT阵元等效电路模型,分析各个微元之间产生的声场干扰。

假设定义第  $i$  个微元受到的总辐射阻抗为:

$$Z_i = Z_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{v_j}{v_i} Z_{ij} \quad (9)$$

式中:  $Z_{ii}$  为第  $i$  个微元的自辐射阻抗;  $Z_{ij}$  为CMUT阵元中第  $j$  个微元与第  $i$  个微元之间的互辐射阻抗;  $N$  为CMUT阵元中的微元总数。

对于大矩阵的CMUT,各个微元产生的相互作用力由式(10)所示的矩阵表示。

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

当CMUT按规则排列,因为处于对称位置的振膜会有相同的辐射阻抗和振动速度,以上矩阵则可以根据对称关系简化矩阵从而统一计算。根据这个原则得到式(11)所示的振膜受力矩阵。

$$\begin{bmatrix} F'_1 \\ F'_2 \\ F'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} & Z'_{13} \\ Z'_{21} & Z'_{22} & Z'_{23} \\ Z'_{31} & Z'_{32} & Z'_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v'_1 \\ v'_2 \\ v'_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(10)和(11)中的阻抗矩阵各元素之间的转换关系为:

$$\begin{cases} Z'_{11} = Z_{11} + 2Z_{14} + Z_{1,16} \\ Z'_{12} = 2Z_{12} + 2Z_{13} + 2Z_{18} + 2Z_{1,12} \\ Z'_{13} = Z_{16} + 2Z_{17} + Z_{1,11} \\ Z'_{21} = Z_{21} + Z_{24} + Z_{2,13} + Z_{2,16} \\ Z'_{22} = Z_{22} + Z_{23} + Z_{25} + 2Z_{28} + Z_{2,12} + Z_{2,14} + Z_{2,15} \\ Z'_{23} = Z_{26} + Z_{27} + Z_{2,10} + Z_{2,11} \\ Z'_{31} = Z_{61} + 2Z_{64} + Z_{6,16} \\ Z'_{32} = 2Z_{62} + 2Z_{63} + 2Z_{68} + 2Z_{6,12} \\ Z'_{33} = Z_{66} + 2Z_{67} + Z_{6,11} \end{cases} \quad (12)$$

CMUT 阵元等效电路的建立需要将前文提到的微元等效电路通过辐射阻抗矩阵连接起来,如图 6 所示。当组成 CMUT 阵元的微元数目较少时,可以通过直接连线的方式进行连接;但当微元数目较多时,需要通过 ADS 软件中的 Playback Macro 模块编写宏文件来简化阵元等效电路的建立。

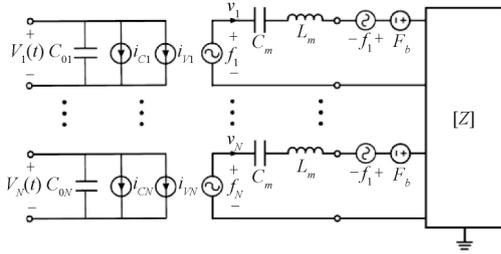


图 6 CMUT 阵元等效电路模型

### 3.2 CMUT 阵元参数对频率特性影响

本文基于所建立的 CMUT 阵元等效电路,设计了包含 4 个微元和 7 个微元的 CMUT 阵元,并使用 ADS 建立了仿真电路,分析了不同阵元参数对 CMUT 阵元的频率影响。其中阵元参数包括微元大小、间距和数目。

首先,采用包含 4 个微元的 CMUT 阵元研究了微元大小对阵元频率响应的影响。设定 CMUT 阵元的工作环境为水中,在 ADS 中建立了四微元的等效电路。确定微元的间距  $d$  为  $180 \mu\text{m}$ ,然后分别选择微元半径  $a$  为  $90, 100, 110 \mu\text{m}$  进行仿真,得到如图 7 所示的频率响应图。

从图 7 中可以看出,当 CMUT 微元半径分别取  $90, 100$  和  $110 \mu\text{m}$  时,相对应的 CMUT 阵元在水中的共振频

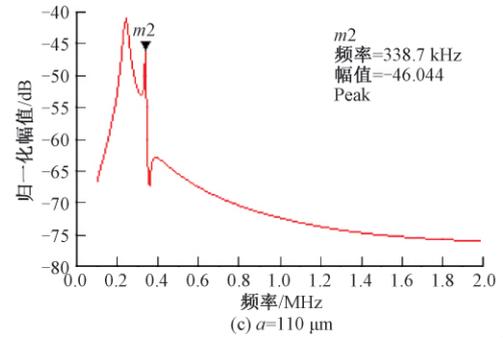
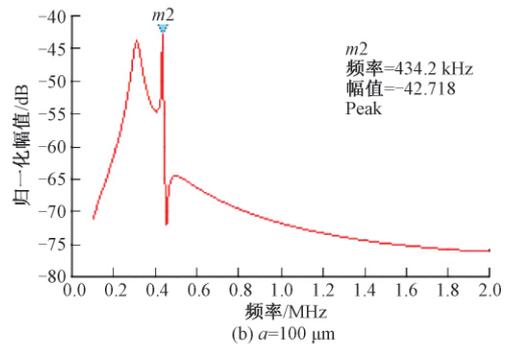
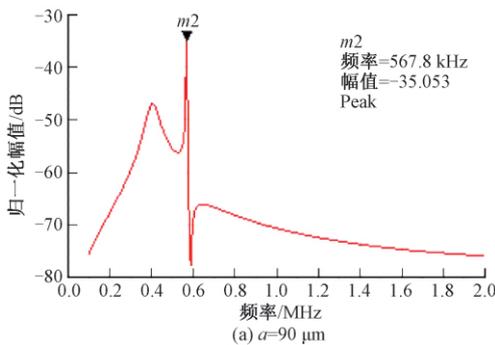
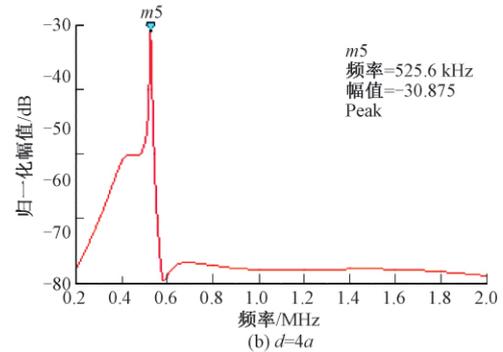
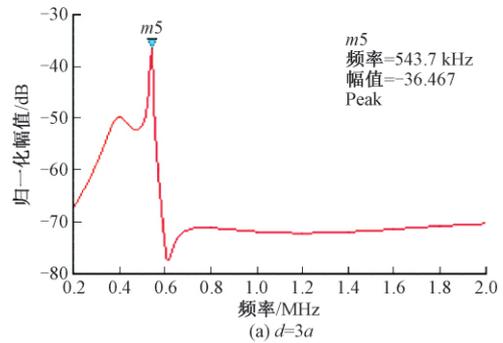


图 7 不同 CMUT 微元大小频响曲线

率为  $567.8, 434.2$  和  $338.7 \text{ kHz}$ 。由此可以看出,随着微元半径的增大,CMUT 阵元的共振频率逐渐减小。

然后,采用包含 7 个微元的 CMUT 阵元研究了微元间距对阵元频率响应的影响。同样设定 CMUT 阵元在水中,微元的半径  $a$  为  $90 \mu\text{m}$ ,建立 ADS 等效电路。分别取微元间的圆心距  $d$  为  $3a, 4a, 5a$ ,得到如图 8 所示的频率响应曲线。



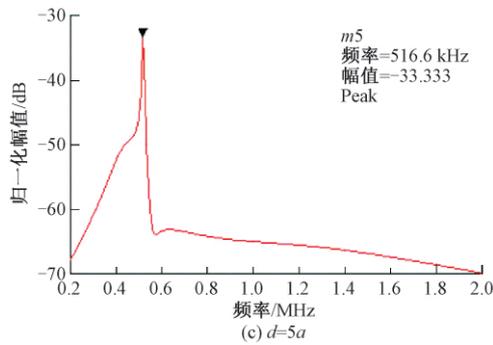


图8 不同CMUT微元间距频响曲线

通过各个曲线可以看出,当间距为  $3a$  时,阵元在水中的共振频率为 543.7 kHz;当间距为  $4a$  时,阵元的共振频率为 525.6 kHz;当间距为  $5a$  时,阵元的共振频率为 516.6 kHz。由此可得,当 CMUT 微元中心间距变大时,阵元在水中的频率会变小,且阵元的频率均小于单个微元的共振频率。

最后,对比包含 4 个微元和包含 7 个微元的 CMUT 阵元相同位置处微元的频率响应,分析了微元间距对阵元频率响应的影响。经过仿真得到四微元和七微元的 CMUT 阵元的频率响应曲线,如图 9 所示。

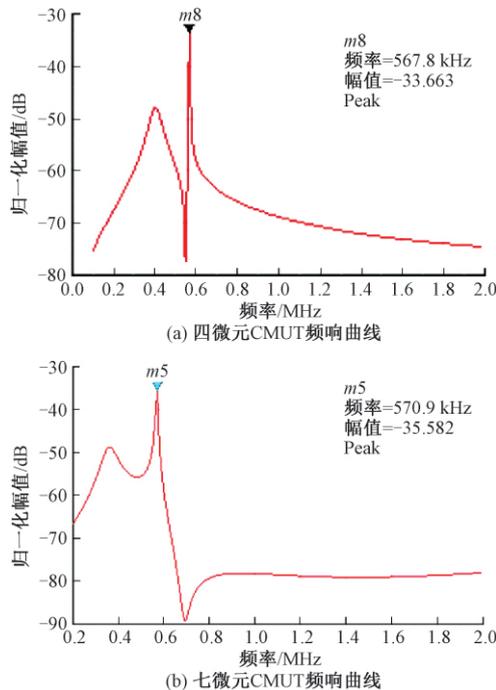


图9 不同数目CMUT微元的频响曲线

由仿真曲线可知,四微元 CMUT 阵元的共振频率为 567.8 kHz;七微元 CMUT 阵元的共振频率为 570.9 kHz。

由此得出,微元数目不同会对 CMUT 阵元的频率响应产生影响,且数目增加会使阵元的共振频率增加。但相比与微元的大小和间距,其数目对共振频率的影响较小。

## 4 结 论

本文推导了 CMUT 微元小信号等效电路模型和 CMUT 阵元等效电路模型,并通过 ADS 仿真分析了不同交流信号幅值和周期对 CMUT 微元发射特性的影响,此外,详细分析了不同微元大小、间距和数目对 CMUT 阵元频率特性的影响,为实际应用和测试提供了重要的理论依据。等效电路仿真 CMUT 阵元能够简化计算,有效地减少分析时间,接下来还可以利用等效电路仿真 CMUT 功率谱图等其他辐射特性和接收特性。

## 参考文献

- [1] 王红亮. CMUT 及其阵列工作机理与应用基础研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- [2] 王杰,陈友兴,李海洋,等. 基于激光超声的金属表面裂纹定位研究[J]. 国外电子测量技术,2019,38(11):1-4.
- [3] 李坤鹏,徐雅,谢代梁,等. 大口径超声波流量计内部流-声耦合特性仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(7):8-14.
- [4] 穆林枫,张文栋,何常德,等. 微电容超声传感器的设计与测试[J]. 仪表技术与传感器,2015(8):1-3,6.
- [5] BRENNER K, ERGUN A S, FIROUZI K, et al. Advances in capacitive micromachined ultrasonic transducers [J]. Micromachines, 2019, 10 (2): 2185-2198.
- [6] YAMANER F Y, ZHANG X, ORALKAN Ö. A three-mask process for fabricating vacuum-sealed capacitive micromachined ultrasonic transducers using anodic bonding[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferro-electrics & Frequency Control, 2015, 62 (5): 972-982.
- [7] WYGANT I O, KUPNIK M K, KJURI-YAKUB B T. An analytical model for capacitive pressure transducers with circular geometry[J]. Journal of Microelectromechanical Systems,2018,27(3): 448-456.
- [8] 吕云飞. 电容式微机械超声换能器建模与仿真技术研究[D]. 太原:中北大学,2018.
- [9] 张慧,石建超,张雯,等. 电容式微超声换能器等效电路模型与阵元优化[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(11):1209-1215.
- [10] 石建超. 电容式微超声换能器等效电路模型与优化设计[D]. 天津:天津大学,2016.
- [11] KOYMEN H, SENLIK M, ATALAR A, et al. Parametric linear modeling of circular CMUT membranes in vacuum [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferro-electrics& Frequency Control,2017, 54(6):1229-1239.
- [12] OGUZ H K, OLCUM S, SENLIK M, et al. Nonlinear modeling of an immersed transmitting capacitive

- micro-machined ultrasonic transducer for harmonic balance analysis[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferro-electrics & Frequency Control, 2010, 57(2): 438-447.
- [13] 郑冠儒,张慧,李志,等. 基于叠加法消除 CMUT 测量拖尾的研究[J]. 振动与冲击,2019,38(2):219-225.
- [14] OGUZ H K. Circuit theory based modeling and analysis of CMUT arrays [D]. Turkey: Bilkent University, 2013.
- [15] MAADI M, ZEMP R J. Self and mutual radiation impedances for modeling of multi-frequency CMUT arrays[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferro-electrics & Frequency Control, 2016,63(9):1441-1454.

#### 作者简介

王红亮,教授,博士生导师,主要研究方向为 MEMS 与超声换能器、测试系统集成。

E-mail:wanghongliang@nuc.cn

蔚丽俊,硕士研究生,主要研究方向为超声传感器设计与研究。

E-mail: 1907668150@qq.com