DOI:10.3969/j.issn.1671-024x.2025.05.010

基于聚合物薄膜的 CMUT 阵列的声场特性仿真分析

高铁成[1,2],闫梦圆[1,2],孙晓东[1,2]
(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院,天津 300387;2. 天津工业大学 天津市光电检测技术与系统重点实验室,天津 300387)

摘 要: 为满足超声检测技术对超声换能器聚焦特性的要求,设计了一种基于聚合物薄膜 SU-8 的 CMUT 阵列。根据阵列换能器的声场理论确定影响聚焦效果的参数,利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件进行建模仿真分析,探究了空气和水介质中一维 CMUT 线阵不同阵元数目和阵元间距时的声场聚焦性。结果表明:CMUT 阵列为 16 阵元、阵元间距为 0.5 时,阵列换能器的声场聚焦效果最好,声场聚焦区域声压最大值在空气介质中达到 7.23×10^{-5} Pa,水介质中达到 0.17 Pa。

关键词: 聚合物薄膜;CMUT 阵列;有限元仿真;声场聚焦
中图分类号: TB552 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2025)05-0066-06

Simulation analysis of acoustic field characteristics of CMUT array based on polymer film

GAO Tiecheng[1,2], YAN Mengyuan[1,2], SUN Xiaodong[1,2]
(1. School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: To meet the requirements of ultrasonic testing technology for the focusing characteristics of ultrasonic transducers, a CMUT array based on polymer film SU-8 was designed. Based on the acoustic field theory of the array transducer, the parameters affecting the focusing effect were determined. COMSOL Multiphysics simulation software was used for modeling and simulation analysis to explore the acoustic field focusability of one-dimensional CMUT linear array in air and water media with different number and spacing of elements. The results show that the acoustic field focusing effect of the array transducer is the best when the CMUT array has 16 elements and the array element spacing is 0.5. The maximum sound pressure in the focusing area of the sound field reaches 7.23×10^{-5} Pa in air medium and 0.17 Pa in water medium.

Key words: polymer film; CMUT array; finite element simulation; acoustic field focusing

超声检测技术在工业、医疗、食品、航空等领域得到广泛应用,作为超声检测技术中核心器件的超声换能器成为研究的热点。超声换能器按照转换原理进行区分,可分为电磁超声换能器、电容式超声换能器、磁致伸缩超声换能器、压电超声换能器[1]等。电磁超声换能器由于能量转换原理较复杂、性能参数繁多、转换效率低等缺点被淘汰;磁致伸缩超声换能器以磁-电-声的相互耦合为转换依据,实现超声检测功能,但其应用范围比较局限;压电超声换能器应用范围很广,但其阻抗匹配性低,因此需要额外添加匹配层或选用高性能材料来解决阻抗匹配问题。

近年来,随着超声技术和微机械系统加工技术的发展与普及,电容式超声换能器研究制造领域得到新的开拓。目前电容式超声换能器(capacitive micro-machined ultrasonic transducer, CMUT)以其机电转换效率高、灵敏度高、频带宽、阵元密度高、成本低、可以

收稿日期: 2023-03-01
基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61605144)
第一作者: 高铁成(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向为传感器与检测系统。E-mail:gaotiecheng_0@126.com
通信作者: 孙晓东(1984—),男,博士,副教授,主要研究方向为超快激光科学。E-mail:sunxd83@aliyun.com

由微电子机械微加工工艺制造完成等优点成为超声检测、资源开发、工业制造等领域的核心器件[2-4]，而且电容式微机械超声换能器具有可轻易阵列化、与人体组织阻抗匹配良好等压电换能器无法匹敌的优点使其成为超声领域的新秀[5-6]，为超声的应用提供了更广泛的应用前景。

目前国外在电容式超声换能器的研究中已取得了非常多的研究成果，如 2014 年 TOPETE 等[7]研制的工作频率为 1 MHz 的低频水声换能器和 2017 年 Nan 等[8]研制的工作频率为 9 MHz 的高频水声换能器，并将其应用于海洋资源探索领域。而 2021 年 Adelegan 等[9]研制的工作频率为 5 MHz 的超声换能器则可应用于医疗中的神经检测领域。我国的电容式超声换能器在超声成像领域也取得了突破性的发展。如北京大学何德常等[10]研制的宽频带电容式超声换能器大大提高了传统超声换能器的带宽；天津大学张慧等[11]研制的空气耦合电容式超声换能器具有低频特性，频率可低至 230 kHz；中北大学蒋丽俊等[12]研制了工作频率为 10 MHz 的高频超声换能器，为高频超声换能器的研制提供更多参考依据。

但上述电容式超声换能器多是基于半导体材料如硅、多晶硅、二氧化硅为薄膜材料设计分析的。本文设计一种采用 SU-8 光刻胶聚合物作为薄膜的 CMUT 阵列，其谐振频率为 1 MHz 左右。以 SU-8 光刻胶聚合物作为振膜层可以在工艺制备中采用简单的牺牲释放工艺[13]，使得 CMUT 的制备条件不再那么苛刻，并且可以降低实验成本。利用在 COMSOL 软件进行声固耦合仿真，分别观察 CMUT 阵列在空气和水介质中不同阵元数目和不同阵元间距的声场聚焦特性，得出聚焦性最强时的 CMUT 阵列参数，以期为后续以聚合物作为薄膜的 CMUT 阵列的工艺设计和制备提供基础。

1　相控阵超声换能器声场理论

波动方程是研究超声换能器的声场特性的基本理论，也是超声相控阵成像理论的基础。本文通过相控阵超声换能器其声波在密度和声速均匀介质中传播时的声波方程来求解换能器的辐射声场分布。

其理想流体介质波动方程：

$$\nabla^2\rho - \frac{1}{c_0^{\,2}}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

式中：c_0 为声速；ρ 为介质密度；t 为时间；p 为声压。

相控阵主要分为线阵、面阵、环形阵。由于单个振元无法实现声聚焦性，本文先将单个振元组成 4 × 75 振元的单个阵元，再由单个阵元实现相控阵排列。相控阵超声成像系统的基本原理是对聚焦点采用声束扫描，通过电路控制不同阵元的振动时间，得到发出和接收的相控波束扫描线[14]，其原理如图 1、图 2 所示。

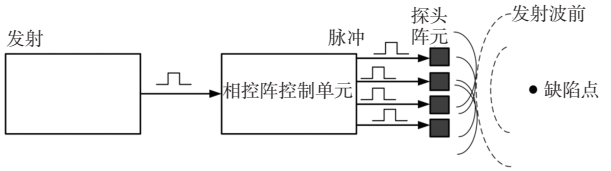


图 1　超声相控阵系统发射过程

Fig.1　Launch process of ultrasonic phased array system

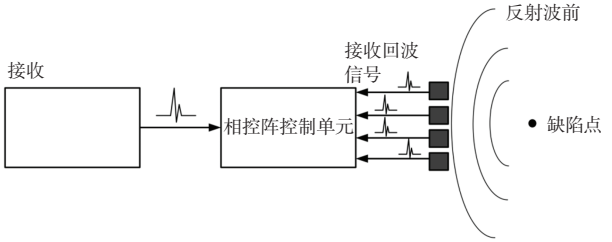


图 2　超声相控阵系统接收过程

Fig.2　Receiving process of ultrasonic phased array system

1.1　阵列换能器声场特性

根据惠更斯原理分析一个尺寸大小有限的阵列换能器的声场辐射特性。将阵列换能器的有效辐射面分解成无数个声源组合，在声场中某点的声压是阵列换能器辐射面上所有振动声源在该点产生的声压叠加和，故对阵列换能器的有效辐射面进行积分计算。反过来换能器接收的声压可由空间声场发射点在换能器接收面所有点产生的声压积分得到[15]。

单个声源换能器的辐射声场即单个换能器的辐射声场，设换能器的有效辐射面为面声源，若面声源为活塞式声源，其面上每个点的振动幅值和相位是相同的，即将面声源表面分为无限个小面元 dS。振动规律为 $u_a e^{\mathrm{j}(\omega t-\alpha)}$，则声场中任意一点 A 的声压为：

$$p(\bar{r},t) = \mathrm{j}\frac{k\rho_0 c_0}{2\pi}u_a e^{\mathrm{j}(\omega t-\alpha)}\iint_S \frac{e^{-\mathrm{j}kR}}{R}\mathrm{d}S \tag{2}$$

式中：r 为声场中 A 点到换能器中心位置；R 为声场中 A 点到面元的距离；ρ_0 为介质的密度；k 为波数，$k = 2\pi/\lambda$。

阵列超声换能器则是单个换能器（阵元）按一定的排列规律排成的阵列，若一个阵列的换能器由 $N_X \times N_Y$ 个活塞式阵元组成，则其阵列换能器的辐射声场为：

$$p(\bar{r},t) = \mathrm{j}\frac{\rho_0 c_0}{2\pi}\sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y} k_{ij}u_{ij}e^{\mathrm{j}(\omega_{ij}t-\alpha_{ij})}\iint_{S_{ij}}\frac{e^{-\mathrm{j}k_{ij}r_{ij}}}{r_{ij}}\mathrm{d}S \tag{3}$$

式中：u_{ij}、ω_{ij}、α_{ij}、k_{ij}、r_{ij}、s_{ij} 分别为阵列中第 ij 个振元表面

的振幅、角频率、振动初始相位、波数、面元到声场点的距离和振元面积。其中 $k_{ij}=2\pi/\lambda_{ij}=2\pi c_0/\omega_{ij}$。根据式(3)可求得任意形状阵列换能器的辐射声场[16]。

1.2　相控阵超声波束控制

相控阵的发射波形可通过控制对单个振元激励信号的相位延时,改变各个阵元声波到达某点的相位关系,实现声束的聚焦和方向的改变[17]。本文设计了一维相控阵,在对其进行激励时,若想实现声束聚焦,一般线阵最外两侧阵元最先给到激励,之后逐步激励靠近中心的阵元,阵元激励的时间差由聚焦点位置和各阵元到聚焦点的声程差 dL 求得,c_0 为工作介质的声速,dt 为相邻阵元的时间差。

$$\mathrm{d}t=\mathrm{d}L/c_0 \tag{4}$$

图 3 为一维线阵声束聚焦示意。图 3 中,P 为聚焦点;F 为焦距。

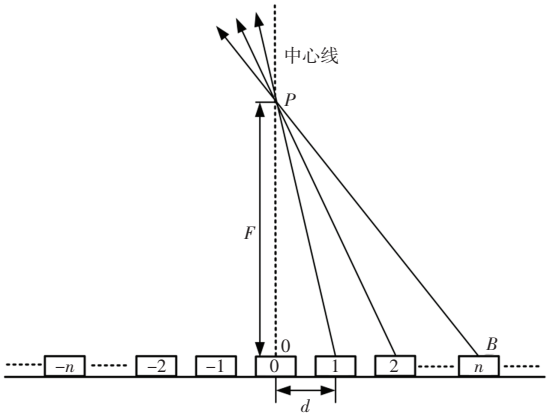


图 3　一维线阵声束聚焦示意图

Fig.3　Schematic of one-dimensional linear array acoustic beam focusing

由惠更斯原理可得,激励振元时间的早晚会形成凸型波面,每个阵元发射超声波与相邻阵元发射的声波叠加或抵消,该阵元自身的声波在介质中发生衰减。该声束在聚焦点 P 处能量达到最大值,从而实现声束聚焦。各振元延时函数[18]如式(5)所示:

$$\tau_{fi}=\frac{F}{c}\left\{1-\left[1+\left(\frac{B_i}{F}\right)^2\right]^{1/2}\right\}+t_0 \tag{5}$$

式中:t_0 为一个足够大的时间常数,避免 τ_{fi} 出现负数;第 i 个阵元到阵列中心距离 $B_i=|[i-(N+1)/2]d|$,$i=1,2,\cdots,N$。根据声学互易原则,也可以进行反向操作。

通常采用方向锐度角 θ_0、波束宽度 θ_{-3dB} 描述聚焦效果。方向锐度角 θ_0 是指主瓣两侧出现的第 1 个极小值之间的夹角。波束宽度 θ_{-3dB} 指主瓣指向性函数在主极大值两侧下降到主极大值的–3 dB 时的夹角[19]。对于均匀线列阵,如果不考虑偏转角度的影响,其方向锐度角 θ_0 可表示为式(6),波束宽度 θ_{-3dB} 可表示为式(7):

$$\theta_0=2\arcsin\left(\frac{\lambda}{Md}\right) \tag{6}$$

$$\theta_{-3dB}=2\arcsin\left(0.42\times\frac{\lambda}{Md}\right) \tag{7}$$

由式(6)、式(7)可以看出,波长 λ、阵元数目 M、阵元间距 d 都会影响聚焦效果。由于波长直接取决于 CMUT 的中心频率,波长对聚焦效果的影响实质上反映的是 CMUT 中心频率对聚焦效果的影响,在设计时这一数据就已确定,因此,不考虑波长对聚焦效果的影响。本文通过选择不同的阵元数目 M 和阵元间距 d,仿真分析 M 与 d 参数对声场聚焦效果的影响。

2　CMUT 阵列建模仿真分析

一维 CMUT 阵列由单个阵元线性排列组成,本文设计的单个阵元由 4 × 75 振元构成。首先对单个 CMUT 振元进行建模,其结构如图 4 所示[20]。CMUT 的振膜材料为 SU–8 聚合物,采用圆形振动薄板结构,其 CMUT 的设计参数如表 1 所示。

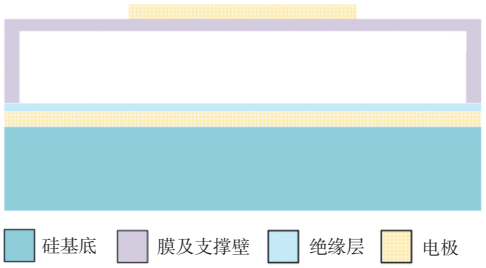


图 4　CMUT 单个振元结构

Fig.4　Structure of CMUT single vibration element

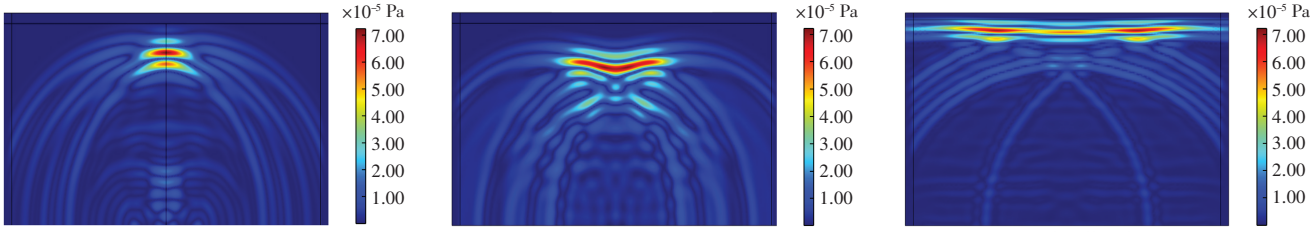
表 1　CMUT 单元结构参数

Tab.1　Structural parameters of CMUT unit

结构	材料	尺寸/μm
薄膜结构	SU–8	50.00
薄膜半径	SU–8	0.67
空腔	真空	0.10
绝缘层	Omnicoat	0.05
电极	铝	0.50

2.1　阵元数目分析

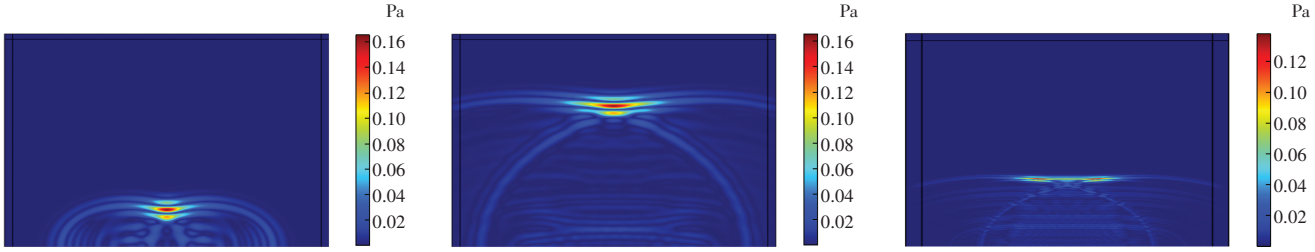
通过对阵列换能器的声场理论分析和相控阵超声波控制等理论计算,通过 CMOSOL 软件对设计的一维 CMUT 阵列进行瞬态分析。首先在固定阵列阵元其他参数确定不变的情况下,探究在空气和水介质中阵元数目 M 为 8、16 和 32 时 CMUT 阵列的声场聚焦性能,其仿真图形分别如图 5 和图 6 所示。



（a）阵元数目为 8　　（b）阵元数目为 16　　（c）阵元数目为 32

图 5　在空气介质中不同阵元数目 CMUT 阵列的声场聚焦效果

Fig.5　Acoustic field focusing effect of CMUT array with different numbers of array elements in air medium



（a）阵元数目为 8　　（b）阵元数目为 16　　（c）阵元数目为 32

图 6　在水介质中不同阵元数目 CMUT 阵列的声场聚焦效果

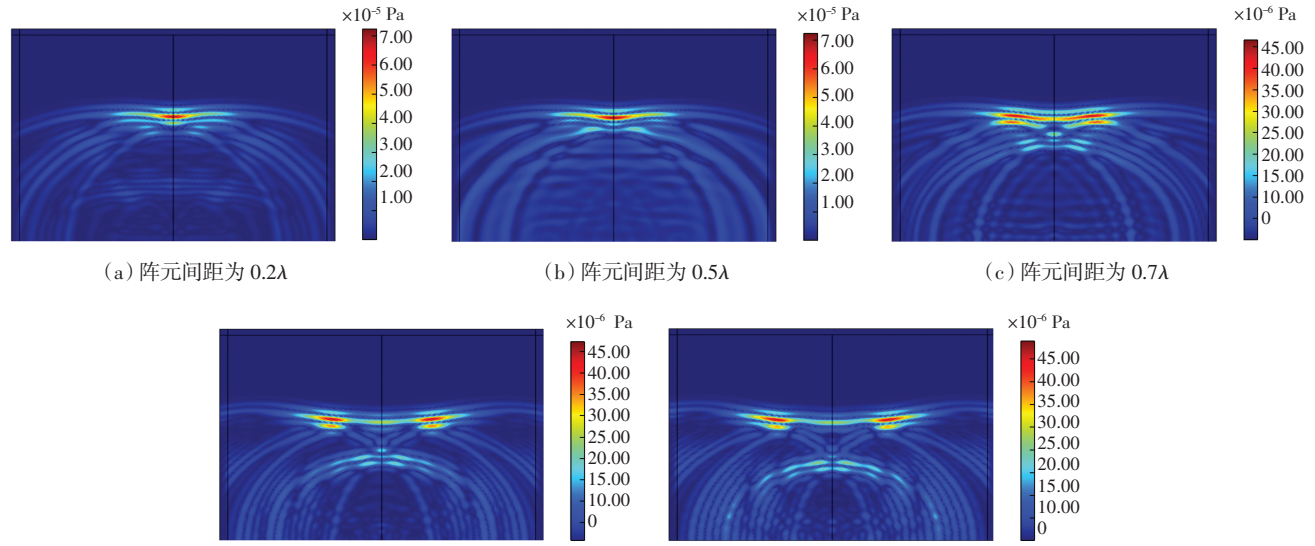
Fig.6　Acoustic field focusing effect of CMUT array with different numbers of array elements in water medium

由图 5 可以看出，CMUT 阵列在空气介质中其声压最大值差距较小，均为 7.50×10^{-5} Pa 左右；但阵元数目为 8 和 16 时阵列的声场聚焦效果较好，当阵元数目为 16 时声场聚焦区域较大，而阵元数目为 32 时其声场成发散特性，无法聚焦到同一区域。由图 6 可以看出，在水介质中 CMUT 阵元数为 8 和 16 时声压最大值为 0.15 Pa，比阵元数目为 32 时最大声压值 0.14 Pa 略高；但观察声场聚焦区域同样可以发现，阵元数目为 16 时其阵列聚焦效果最优。

2.2　阵元间距分析

通过仿真分析阵列阵元数目对声场聚焦特性的影响，可以确定阵列阵元数目 M 为 16 时声场聚焦性最强。进而分析 CMUT 阵列间距参数 d 对声场聚焦性的影响，图 7 和图 8 分别为在空气和水介质中当阵元间距为 0.2λ、0.5λ、0.7λ、0.9λ 和 1λ 时，一维 CMUT 阵列的声场聚焦效果仿真图。

由图 7 可以看出，在空气介质中，阵列阵元间距为 0.2λ 和 0.5λ 时其声场的聚焦效果明显，间距为

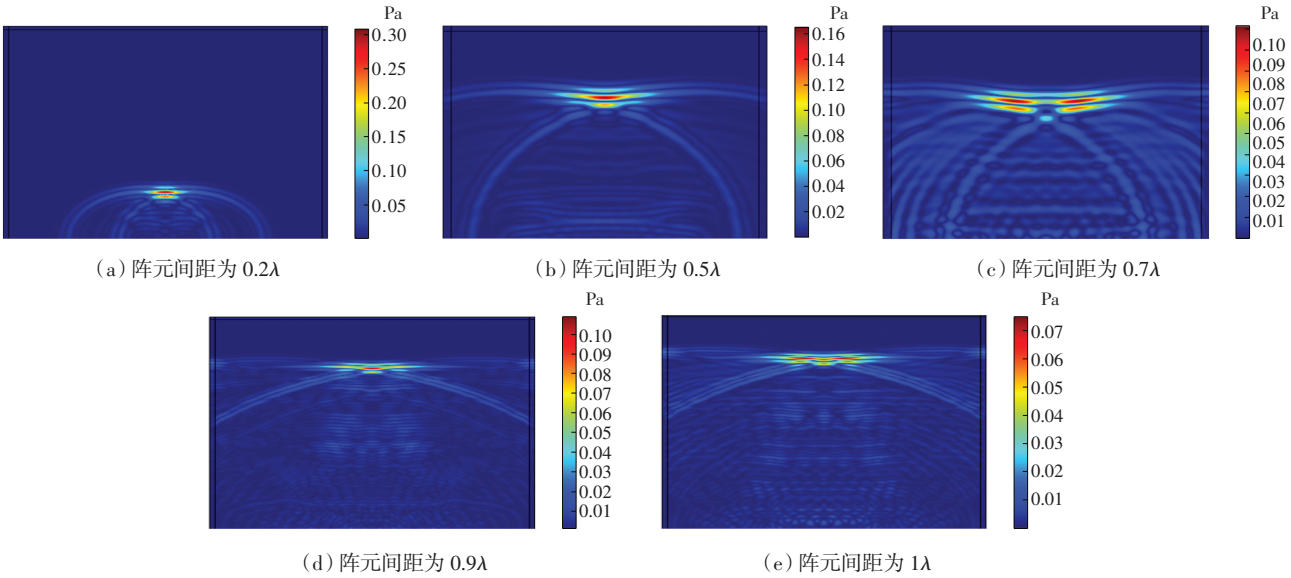


（a）阵元间距为 0.2λ　　（b）阵元间距为 0.5λ　　（c）阵元间距为 0.7λ

（d）阵元间距为 0.9λ　　（e）阵元间距为 1λ

图 7　在空气介质中不同阵元间距 CMUT 阵列的声场聚焦效果

Fig.7　Acoustic field focusing effect of CMUT array with different array element spacing in air medium



（a）阵元间距为 0.2λ　（b）阵元间距为 0.5λ　（c）阵元间距为 0.7λ

（d）阵元间距为 0.9λ　（e）阵元间距为 1λ

图 8　在水介质中不同阵元间距 CMUT 阵列的声场聚焦效果

Fig.8　Acoustic field focusing effect of CMUT array with different array element spacing in water medium

0.5λ 时较间距为 0.2λ 的聚焦区域明显增大；在 0.7λ 时中心轴的聚焦性开始变弱；在阵元间距为 0.9λ 和 1λ 时开始明显发散，所有阵元发射声波无法聚焦于统一区域。再观察声场聚焦区域声压值的变化可知，在阵元间距为 0.2λ 和 0.5λ 时声场声压最大值为 7.23×10^{-5} Pa，随着阵元间距的增加其中心轴声压值逐渐减小，在阵元间距为 1λ 时其聚焦区域声压最大值减小到 4.39×10^{-5} Pa。

由图 8 可以看出，在水介质中，阵元间距在 0.2λ 和 0.5λ 时其聚焦效果较好，0.7λ 时开始呈现发散特性，当阵元间距增加到 0.9λ 和 1λ 时阵元聚焦性有所增强。再观察声场聚焦区域声压值的变化可知，阵元间距为 0.2λ 时声场最大声压值达到 0.31 Pa，随着阵元间距的增加声压值逐渐降低，间距为 0.5λ 时最大声压值为 0.17 Pa，间距为 0.7λ 时最大声压为 0.1 Pa，间距为 0.9λ 时最大声压值为 0.11 Pa，间距为 1λ 时最大声压值为 0.07 Pa。

综上所述，阵元间距为 0.5λ 时其声场聚焦性强且聚焦区域达到最大。考虑到阵元间距过小易导致制备工艺难度增加等问题，本文确定设计一维 CMUT 线阵阵列的阵元数为 16、阵元间距为 0.5λ 时，其声场特性达到最优聚焦效果。

3　结　论

本文设计了一种基于聚合物薄膜 SU-8 的一维线性 CMUT 阵列。通过分析相控阵超声换能器的声场理论，确定影响相控阵列聚焦特性的阵元参数；经过理论计算和 COMSOL 软件建模仿真，探究了在空气和水介质中 CMUT 阵列的阵元参数对声场聚焦特性的影响，并通过观察仿真声场聚焦效果图和聚焦区域最大声压值的大小确定了阵列参数的最优值。结果表明：

（1）相控阵列的聚焦特性与阵元的波长、阵元数目和阵元间距有关；

（2）阵元数目为 16、阵元间距为 0.5λ 时，CMUT 阵列的声场聚焦性最强，在空气介质中其声场聚焦区域声压最大值达到 7.23×10^{-5} Pa，水介质中最大声压值达到 0.17 Pa。

参考文献：

[1] 刘杰，陈全芳. 电容式微机械超声传感器的工艺综述[J]. 仪器仪表学报，2018，39(8)：98-109.
LIU J，CHEN Q F. Overview of manufacturing technologies of capacitive micromachined ultrasonic transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2018，39(8)：98-109(in Chinese).

[2] TAWFIK H H，SINGH N，ELSAYED M Y，et al. Meniscus-mode：A novel operation mechanism for signal amplification in capacitive micromachined ultrasonic transducers[J]. Sensors and Actuators A：Physical，2021，319：112549.

[3] SAMARASEKERA C，SUN J G W，ZHENG Z，et al. Trapping，separating，and palpating microbead clusters in droplets and flows using capacitive micromachined ultrasonic transducers（CMUTs)[J]. Sensors and Actuators B：Chemical，2018，276：481-488.

[4] KHURI-YAKUB B T，ORALKAN Ö. Capacitive micromachi-

ned ultrasonic transducers for medical imaging and therapy[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2011, 21(5): 054004.

[5] 李志. 应用于空气耦合超声无损检测的电容式微超声换能器设计[D]. 天津: 天津大学, 2018.
LI Z. Design of capacitive micro-ultrasonic transducer for air-coupled ultrasonic nondestructive testing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018(in Chinese).

[6] 邸绍岩, 焦奕硕. MEMS 传感器技术产业与我国发展路径研究[J]. 信息通信技术与政策, 2021(3): 66-70.
DI S Y, JIAO Y S. Research on MEMS sensor technology industry and the roadmap of China[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021(3): 66-70(in Chinese).

[7] TOPETE J, ALVAREZ-ARENAS T E G. Annular multifrequency piezoelectric array for enhanced wideband ultrasonic response[C]//SENSORS, 2014 IEEE. Valencia, Spain: IEEE, 2014: 102-105.

[8] NAN W Y, WAN F, CHANG L, et al. An exploratory study of intensive neurofeedback training for schizophrenia[J]. Behavioural Neurology, 2017, 2017: 6914216.

[9] ADELEGAN O J, COUTANT Z A, WU X, et al. Design and fabrication of wideband air-coupled capacitive micromachined ultrasonic transducers with varying width annular-ring and spiral cell structures[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68(8): 2749-2759.

[10] 何常德, 张盛东, 张斌珍, 等. 面向水下应用的电容式微机械超声换能器[J]. 应用声学, 2022, 41(3): 405-411.
HE C D, ZHANG S D, ZHANG B Z, et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducer for underwater applications[J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41(3): 405-411(in Chinese).

[11] 张慧, 郑冠儒, 李志, 等. 空气耦合电容式微超声换能器线阵设计与测试[J]. 传感技术学报, 2018, 31(5): 803-808.
ZHANG H, ZHENG G R, LI Z, et al. Design and test of air-coupled capacitive micromachined ultrasonic transducer array[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(5): 803-808(in Chinese).

[12] 蔚丽俊, 王红亮, 刘涛. 10 MHz 电容式超声换能器设计及有限元分析[J]. 电子测量技术, 2020, 43(22): 155-159.
YU L J, WANG H L, LIU T. Design and finite element analysis of 10 MHz capacitive ultrasonic transducer[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(22): 155-159(in Chinese).

[13] GE C, CRETU E. Design and fabrication of SU-8 CMUT arrays through grayscale lithography[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 280: 368-375.

[14] 宋天民. 超声检测[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
SONG T M. Ultrasonic Testing[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2012(in Chinese).

[15] 陈鑫宏,吴国栋, 范成璋,等. 声场均匀的高频高功率超声波换能器排布方式及超声装置: 中国,114130752A[P]. 2022-03-05.
CHEN X H, WU G D, FAN C Z, et al. Arrangement mode and ultrasonic device of high-frequency high-power ultrasonic transducer with uniform sound field: CN, 114130752A[P]. 2022-03-05(in Chinese).

[16] 施克仁, 郭寓岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
SHI K R, GUO Y M. Phased Array Ultrasonic Imaging and Testing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010(in Chinese).

[17] 梁思成, 吴永强. 基于 COMSOL 的超声相控阵无损检测算法与仿真技术研究[J]. 内燃机与配件, 2018(13): 111-115.
LIANG S C, WU Y Q. Algorithm and simulation research of ultrasonic phased array nondestructive testing based on COMSOL[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(13): 111-115(in Chinese).

[18] 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.
WANG H L. Research on working mechanism and application basis of CMUT and its array[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016(in Chinese).

[19] 索文宇, 任勇峰, 吴敏, 等. 电容式微机械超声换能器线阵的设计及超声成像[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(7): 612-620.
SUO W Y, REN Y F, WU M, et al. Design and ultrasound imaging of capacitive micromechanical ultrasound transducer linear array[J]. Micronanoelectronic Technology, 2021, 58(7): 612-620(in Chinese).

[20] 高铁成, 远桂民, 王昊. 电容式微机械超声换能器的设计与仿真[J]. 天津工业大学学报, 2021, 40(4): 84-88.
GAO T C, YUAN G M, WANG H. Design and simulation of air-coupled CMUT[J]. Journal of Tiangong University, 2021, 40(4): 84-88(in Chinese).

本文引文格式:

高铁成,闫梦圆,孙晓东. 基于聚合物薄膜的 CMUT 阵列的声场特性仿真分析[J]. 天津工业大学学报,2025, 44(5): 66-71.
GAO T C, YAN M Y, SUN X D. Simulation analysis of acoustic field characteristics of CMUT array based on polymer film[J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(5): 66-71(in Chinese).

(责任编辑:程晓英)