引用格式：王洵之，李伟东，罗曼，等. C 形纵剖面部分球冠换能器结构对声焦域的影响[J]. 声学技术，2021，**40**(5)：734-738. [WANG Xunzhi, LI Weidong, LUO Man, et al. Influence of the structure of partial spherical crown transducer with C-shaped vertical segments on acoustic focal region[J]. Technical Acoustics, 2021, **40**(5): 734-738.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.05.022

C 形纵剖面部分球冠换能器结构对声焦域的影响

王洵之[1]，李伟东[2]，罗 曼[2]，陈 沉[1]，曾德平[1,2]
(1. 超声医学工程国家重点实验室，重庆医科大学生物医学工程学院，重庆市生物医学工程学重点实验室，重庆 400016；
2. 超声医疗国家工程研究中心，重庆 401121)

摘要：在球带腔形聚焦超声换能器的基础上，设计一种 C 形纵剖面部分球冠聚焦超声换能器，研究其结构参数变化对声焦域形态的影响。通过建立的有限元仿真模型，分别讨论了换能器的球带高度和聚焦夹角与焦域形态的变化关系。结果表明，球带高度越高、聚焦夹角越大，其焦域尺寸越小，焦域长轴与短轴的比值越低，焦域趋近于圆形，尤其是当球带高度为 1.6F(F 为焦距)、聚焦夹角≥210°时，其焦域三轴尺寸均可达到亚波长尺度。为验证仿真结果的正确性，设计制作了一个可改变聚焦夹角的换能器并进行了测试，实验与仿真结果大致相符。设计的换能器相对于传统行波换能器，焦域形态得到了明显改善，能够压缩焦域长短轴之比，有效提高聚焦精度，为改善聚焦超声换能器焦域形态提供了一种设计方法。

关键词：球冠换能器；有限元仿真；焦域尺寸；焦域形态
中图分类号：TB552 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2021)-05-0734-05

Influence of the structure of partial spherical crown transducer with C-shaped vertical segment on acoustic focal region

WANG Xunzhi[1], LI Weidong[2], LUO Man[2], CHEN Chen[1], ZENG Deping[1,2]
(1. *State Key Laboratory of Ultrasound in Medical Engineering, College of Biomedical Engineering, Chongqing Medical University, Chongqing Key Laboratory of Biomedical Engineering, Chongqing*, 400016, *China*; 2. *National Engineering Research Center of Ultrasound Medicine, Chongqing* 401121, *China*)

Abstract: Based on the spherical zone cavity focused ultrasound transducer, a partial spherical crown focusing ultrasound transducer with C-shaped vertical segment is designed to study the influence of its structural parameters on the shape of acoustic focal region. Through the established finite element simulation model, the relationships of the spherical zone height and the focused angle of the transducer with the shape of focal region are discussed. The results show that the higher the spherical zone height and the larger the focused angle, the smaller the focal region size, the lower the ratio of long axis to short axis of the focal region, so that the focal region tends to be round; especially when the spherical zone height is 1.6 focal length and the focused angle ⩾ 210°, the triaxial dimension of the focal region can all reach the sub-wavelength scale. In order to verify the correctness of the simulation results, a transducer that can change the focused angle is designed and tested. The experimental results are in agreement with the simulation results. Compared with the traditional travelling wave transducer, the designed transducer can improve the shape of focal region obviously, compress the ratio of long axis to short axis of the focal region and improve the focused accuracy effectively, which provides a design method of improving the focal region shape of the focused ultrasound transducer.

Key words: partial spherical crown transducer; finite element simulation; focal region size; focal region shape

0 引 言

高强度聚焦超声换能器传统的聚焦方式有凹球面自聚焦[1-2]、声透镜聚焦[3]、多阵元聚焦[4]以及电子相控阵聚焦[5-6]等方式，这类聚焦称为行波聚焦，它们形成的–6 dB 声焦域形态为雪茄形，通常其短轴尺寸在 1～2 个波长(λ)之间，长轴尺寸在 5～10 个波长(λ)之间[7]，长轴与短轴之比大于 3，使得超声能量较为分散，聚焦精度较低。为提高聚焦精度及获得较好的焦域形态，研究人员提出了球形驻波场聚焦，可改善焦域形态，并设计出相应的超声换能器。2006 年，重庆融海超声医学工程研究中心有限公司发明了一种球形腔超声换能器，实现了对超声场的有效聚集和控制[8]。2013 年 Li 等进行了数值模拟和实验研究，结果均表明球形腔换能器形成的焦域被密集压缩到亚波长尺度，使聚焦超

收稿日期：2020-05-21；**修回日期：**2020-06-28
基金项目：重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jscx-msxm1422)
作者简介：王洵之(1994－)，男，重庆人，硕士研究生，研究方向为超声换能器及设备研发。
通信作者：曾德平，E-mail: zengdp@haifu.com.cn

声能量更为集中[9]。2014 年耿昊等的研究结果表明，球形腔换能器在球心处可产生比传统壳形换能器更高的聚焦增益和亚波长焦域[10]。2018 年岳帅等研究发现，球形腔换能器声路径上分布的声强较低，焦域能量集中且能量耗散较小[11]。

上述是基于球带腔形换能器的研究，这种结构的换能器最大的优点是可在球心处形成亚波长焦域，且焦域的长轴与短轴之比接近 1，即焦域形态接近球形，焦点的能量更为集中，有更高的声压。但是球形腔换能器周向是密封结构，在实际使用时需要将靶点放置在球心，在临床应用和其他一些场合使用时受到限制。若将球带腔形换能器在周向适当开放，变成 C 形纵剖面部分球冠换能器，它将保持球带腔形换能器焦域压缩的优点，方便使用。本文通过研究C形纵剖面部分球冠换能器的焦域与球带高度、聚焦夹角的关系，获得了焦域与换能器参数的变化规律，优化了 C 形纵剖面部分球冠换能器结构参数，为这种换能器的设计提供了参考。

1　有限元仿真

为了分析不同结构参数对换能器焦域形态的影响，本文采用 Comsol Mutiphysics 5.2a 软件提供的有限元方法，在线性条件下对换能器的声场进行了仿真模拟研究。主要研究换能器球带高度 H 和聚焦夹角 A 两个参数对焦域形态的影响。

1.1　不同高度的球带腔形换能器仿真

要获得C形纵剖面部分球冠换能器的最佳结构参数，首先需确定换能器的球带高度，本文以球带腔形换能器为基础研究球带高度对焦域形态的影响。图 1 为建立的球带腔形换能器(即聚焦夹角为360°的 C 形纵剖面部分球冠换能器)仿真模型，其中 S 是焦点(球心)，球带高度为 H，焦距为 F。换能器仿真参数如表 1 所示。

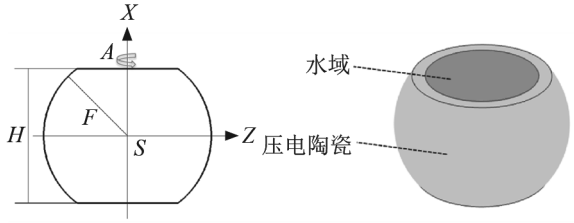


图 1　球带腔形换能器仿真模型示意图
Fig.1　Diagram of simulation model of spherical zone cavity transducer

通过对不同球带高度 H 的球带腔形换能器进行了声场仿真，得到如图 2 所示换能器焦点附近的 XZ 面二维声压分布图，图中 2(a)～2(g)球带高度依次为 $0.6F$～$1.8F$，图 2(h)为整球。对比图中 2(a)～2(g)可知，随着球带高度的增加，换能器的焦域形态由长椭圆形逐渐变短，长轴/短轴逐渐缩小，并趋近于圆形，而当换能器为一个球的时候即为圆形，其中水平方向为 Z 轴。说明球带高度的变化会改变换能器的焦域形态，影响聚焦的精度，球带高度越高，与球带高度同向的 X 轴焦域尺寸被压缩得越小。

表 1　球带腔形换能器仿真参数
Table 1　Simulation parameters of spherical zone cavity transducer

焦距 F/mm	80
球带高度 H/mm	$0.6F$, $0.8F$, ... , $1.8F$
驱动频率/MHz	1
压电陶瓷材料	PZT4
水中声速/(m·s^{-1})	1483

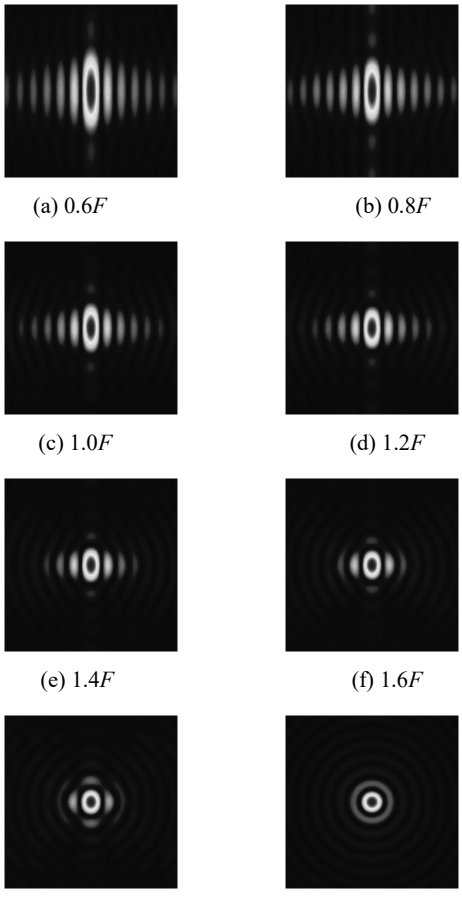
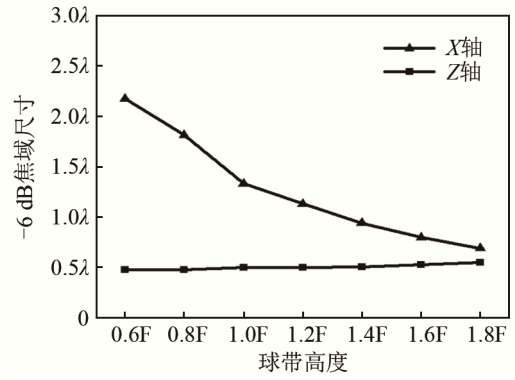


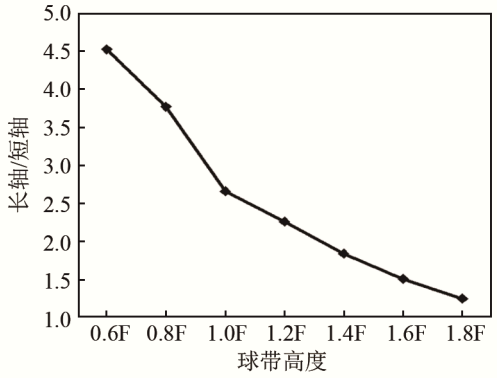
图 2　不同高度球带腔形换能器在 XZ 面的二维声压分布
Fig.2　Two dimensional acoustic pressure distribution in XZ plane of spherical zone cavity transducer with different spherical zone heights

图 3 为不同球带高度下焦域的变化趋势。由图 3(a)可知，随着球带高度的增加，Z 轴焦域尺寸有很明显的变小趋势，由 2.17λ 缩小到了 0.6λ；而 X 轴的焦域尺寸无明显变化，处于 0.5λ 左右。值得注意

的是，当球带高度≥1.4F 时，焦域尺寸达到亚波长尺度。由图 3(b)可知，随着球带高度的增加，换能器焦域长轴与短轴之比呈明显下降趋势，比值由 0.6F 时的 4.51 缩小到了 1.8F 时的 1.24。



(a) 球带腔形换能器–6 dB 焦域尺寸变化趋势



(b) 球带腔形换能器焦域长轴/短轴变化趋势

图 3 球带高度对球带腔形换能器焦域的影响

Fig.3 The influence of spherical zone heights on focal region of spherical zone cavity transducer

由此可知：改变球带高度可以显著地改变长轴(X 轴)方向的焦域尺寸，而对短轴(Z 轴)影响较小，这是因为 X 轴方向为球带高度的变化方向，使得 X 轴变化较大，而 Z 轴方向始终存在驻波，焦域已被极限压缩，变化不明显。考虑到球带腔形换能器的两端开口大小和焦域尺寸大小，当球带高度为 1.6F 时，焦域形态较好，长短轴比接近 1.5，是最佳球带高度。

1.2 不同聚焦夹角C形纵剖面部分球冠换能器仿真

利用球带腔形换能器焦域形态趋近圆形同时又可以达到亚波长尺度的优点，在球带腔形换能器的基础上设计了一种 C 形纵剖面部分球冠换能器，依据上述不同球带高度的仿真结果，选取 1.6F 作为 C 形纵剖面部分球冠换能器的球带高度。在此球带高度情况下，球带腔形换能器形成的焦域长轴为 0.80λ，短轴为 0.53λ，长轴与短轴之比为 1.51，有较好的聚焦精度。下面分析改变 C 形纵剖面部分球冠换能器聚焦夹角时，焦域形态的变化。

图 4 为 C 形纵剖面部分球冠换能器仿真模型，换能器的聚焦夹角 A 选择 90°、120°、150°、180°、210°、240°、270°，7 个角度，其他仿真参数如前所述相同。

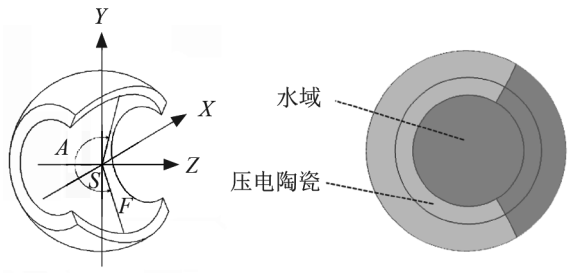
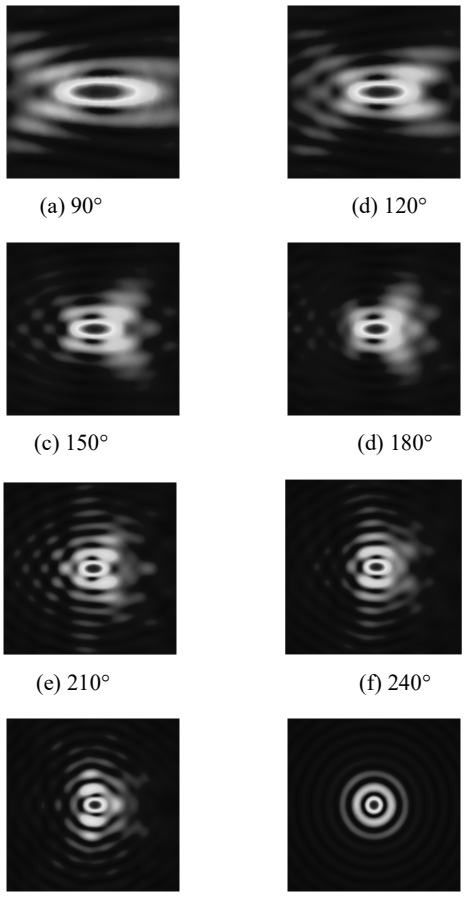


图 4 C 形纵剖面部分球冠换能器仿真模型示意图

Fig.4 Diagram of simulation model of partial spherical crown transducer with C-shaped vertical segment

图 5 为通过仿真得到的轴平面(YZ 平面)焦点附近的二维声压分布图。其中图 5(a)～5(g)依次对应聚焦夹角 90°～270°，图 5(h)对应换能器聚焦夹角 360°(即球带腔形换能器)，水平方向为 Z 轴。当聚



(a) 90° (d) 120°

(c) 150° (d) 180°

(e) 210° (f) 240°

(g) 270° (h) 360°

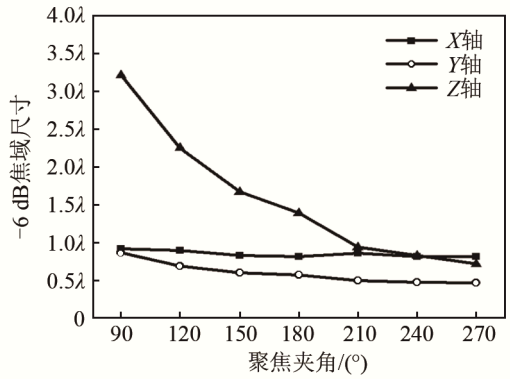
图 5 不同聚焦夹角 C 形纵剖面部分球冠换能器在 YZ 面的二维声压分布

Fig.5 Two dimensional acoustic pressure distribution in YZ plane of the partial spherical crown transducer with C-shaped vertical segment of different focused angles

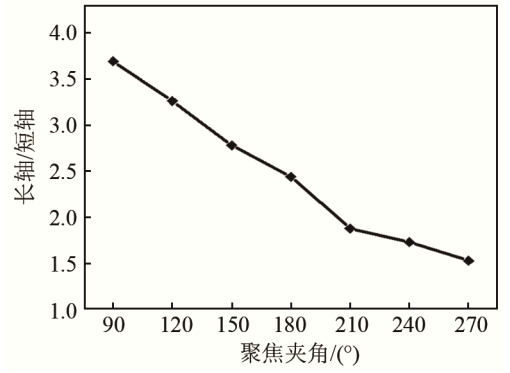
焦夹角从 90°～270°变化时，换能器聚焦方式是不同的，聚焦夹角在 90°～180°范围时，属于行波聚焦；聚焦夹角在 210°～270°范围时，将有驻波存在，是行波驻波共聚焦。从图 5 可以看到，随着聚焦夹角增大，在 *Y* 轴方向和 *Z* 轴方向的焦域尺寸变小，焦域形态从椭球形趋近于圆形。

图 6(a)为 *X*、*Y*、*Z* 轴的焦域尺寸随聚焦夹角变化的趋势。从图 6(a)中可知，在 *X* 轴方向，焦域尺寸保持在 0.85λ 左右，表明聚焦夹角对 *X* 轴焦域尺寸的影响较小。在 *Y* 轴方向，当聚焦夹角在 90°～180°范围时，焦域尺寸从 0.87λ 缩小到 0.57λ 。聚焦夹角在 210°～270°范围时，焦域尺寸保持在 0.5λ 左右，无明显变化。在 *Z* 轴方向，当聚焦夹角在 90°～180°范围时，焦域尺寸从 3.21λ 缩小为1.39λ ，变化明显。聚焦夹角在 210°～270°范围时，焦域尺寸从 0.94λ 缩小到 0.72λ ，变化较小。图 6(b)为不同聚焦夹角C形纵剖面部分球冠换能器轴平面焦域长轴(*Z* 轴)与短轴(*Y* 轴)之比，由图 6(b)可知随着聚焦夹角的增大，焦域长轴与短轴之比呈明显下降趋势，比值由 90°的 3.68 降低到了 270°的 1.5。

由此可见随着聚焦夹角的增加，主要影响的是 *Y* 轴和 *Z* 轴方向的焦域尺寸，焦域随之逐渐变小。



(a) C 形纵剖面部分球冠换能器–6 dB 焦域尺寸变化趋势



(b) C 形纵剖面部分球冠换能器轴平面长轴/短轴变化趋势

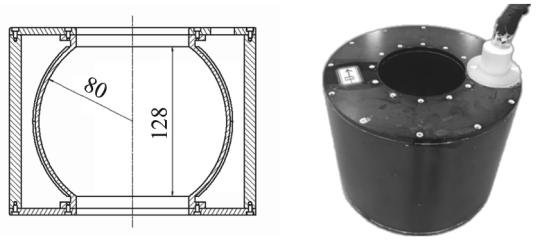
图 6　聚焦夹角对 C 形纵剖面部分球冠换能器焦域的影响

Fig.6　The influence of focused angle on focal region of the partial spherical crown transducer with C-shaped vertical segment

可以发现行波驻波共聚焦阶段的焦域形态较行波聚焦阶段时具有跳跃性变化，行波驻波共聚焦阶段的C形纵剖面部分球冠换能器焦域尺寸均小于一个波长，达到亚波长尺度。这是由于聚焦夹角大于 180°后，使得声场中 *Y* 轴方向和 *Z* 轴方向存在驻波，焦域尺寸相对于行波聚焦得到了进一步的压缩，聚焦精度较行波聚焦有明显的提高。

2　换能器实验测量

为验证仿真研究得到的结论，基于仿真时的换能器焦距尺寸和结构变化值，考虑到声场测试时水听器的可活动空间，设计制作了一个由 24 个阵元上下对称布置的组合换能器，该换能器可通过阵元的连接方式改变聚焦夹角，结构和实物如图 7 所示。换能器焦距 *F* 为 80 mm，球带高度为 128 mm (1.6*F*)，设计工作频率为 1 MHz。声场测量实验装置如图 8 所示，其中水听器为 ONDA 针状压电水听器(HNA-400)，敏感元件为 400 um。测试环境温度 20℃，相对湿度为 46%，介质水温度为 18℃，水溶氧量为 1.45 mg·L^{-1}。



(a) 设计图　　(b) 实物图

图 7　换能器结构设计及实物图

Fig.7　Structural design and physical drawing of transducer

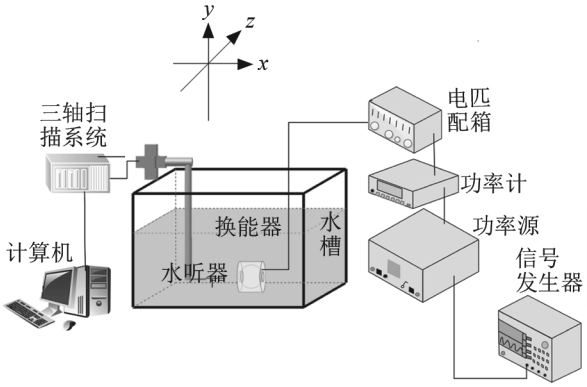


图 8　实验装置简图

Fig.8　Diagram of experimental equipment

由仿真可知，要获得较高精度的声焦域，C 形纵剖面部分球冠换能器的聚焦夹角应≥210°，因此实验测量换能器在聚焦夹角 210°、240°、270°下的

声场。由于不同聚焦夹角是由多个压电陶瓷阵元构成，各阵元谐振频率存在微小差异，无法达到理想相同谐振频率。使用安捷伦 4294A 阻抗分析仪，确定换能器聚焦夹角为 210°、240°、270°时的最佳驱动频率分别为 987.4、986.0、988.2 kHz，不同聚焦夹角采用各自最佳驱动频率连续波激励。声场测量时采用合适尺寸的吸声材料遮挡换能器的非聚焦夹角区域，表 2 为三种聚焦夹角下实验和仿真测得的 X 轴、Y 轴和 Z 轴–6 dB 焦域尺寸。

表 2 三种聚焦夹角下换能器的焦域尺寸

Table 2 Focal region dimensions of transducer at three focused angles

研究方式	210°焦域尺寸			240°焦域尺寸			270°焦域尺寸		
	X	*Y*	*Z*	*X*	*Y*	*Z*	*X*	*Y*	*Z*
有限元仿真	0.86λ	0.50λ	0.94λ	0.82λ	0.48λ	0.83λ	0.82λ	0.47λ	0.72λ
实验测量	0.99λ	0.70λ	0.93λ	0.87λ	0.60λ	0.97λ	0.73λ	0.53λ	0.93λ

通过表 2 可以发现，随着聚焦夹角增大，实验测量 X 轴和 Y 轴焦域尺寸较仿真焦域尺寸变化大，实验测量 Z 轴焦域尺寸较仿真焦域尺寸变化小。造成与仿真结果不一致的主要原因有：(1) 仿真是理想的连续整体式换能器，实验则是由 24 片压电陶瓷阵元组合而成的换能器，此外换能器的加工和装配工艺存在一定误差。(2) 针式压电水听器只对前方半空间的入射波有响应，对后方强烈的入射波响应较差，造成很大盲区，并非完全适合测量此种复杂声场，此外水听器的夹具与安装位置对声场有干扰。(3) 吸声材料不易严实遮挡非聚焦夹角区域。因此，实验测量得到的声场与仿真结果有差异是必然的。然而，随着聚焦夹角的增大，有限元仿真和实验测量得到的整体焦域尺寸存在变小的趋势，测量得到的轴平面(YZ 面)的长轴与短轴之比均小于 2，实测结果与仿真结果大致相符。无论是有限元仿真还是实验测量，在聚焦夹角≥210°时，其焦域尺寸都达到了亚波长尺度，说明聚焦夹角≥210°时，C 形纵剖面部分球冠换能器可以有效地将聚焦精度提升到亚波长尺度，且焦域形态相比于行波换能器得到了明显改善，更接近于圆形，改善了焦域形态。

3 结 论

本文以改变传统行波换能器焦域形态、提高聚焦精度为目的，研究 C 形纵剖面部分球冠换能器球带高度和聚焦夹角两个结构参数与焦域形态的变化关系。结果表明，C 形纵剖面部分球冠换能器的球带高度越高，与球带高度同向的焦域尺寸越小，长短轴之比越小，且最佳球带高度应在 1.6F 左右；高度为 1.6F 的 C 形纵剖面部分球冠换能器随着聚焦夹角的增大，形成的焦域尺寸变小，尤其当换能器聚焦夹角≥210°时，可使所形成焦域尺寸达到亚波长尺度，且轴平面焦域长轴与短轴之比降低到了 2 以下，焦域形态趋近于球形。本文所做的工作为改善聚焦超声换能器焦域形态提供了一种新的设计方法，对 C 形纵剖面部分球冠换能器的设计制作具有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] KARABÖCE B, KıLıÇ K, ERDOĞAN G. Investigation of ultrasonic fields produced by HIFU transducers used in cancer therapy[C]//2016 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA). Benevento, Italy. IEEE, 2016: 1-4.

[2] CHEN T, FAN T B, ZHANG W, et al. Acoustic characterization of high intensity focused ultrasound fields generated from a transmitter with a large aperture[J]. Journal of Applied Physics, 2014, **115**(11): 114902.

[3] THOMAS G P L, CHAPELON J Y, BERA J C, et al. Parametric shape optimization of lens-focused piezoelectric ultrasound transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, **65**(5): 844-850.

[4] CHOI E, ROH Y. Optimal design of a concave annular high intensity focused ultrasound transducer for medical treatment[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, **263**: 91-101.

[5] 周文征, 王意喆, 张千, 等. 64 阵元高强度聚焦超声相控换能器的仿真研究[J]. 压电与声光, 2014, **36**(3): 424-427.
ZHOU Wenzheng, WANG Yizhe, ZHANG Qian, et al. Simulation study on an 64-element phased array for high intensity focused ultrasound[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, **36**(3): 424-427.

[6] ROSNITSKIY P B, VYSOKANOV B A, GAVRILOV L R, et al. Method for designing multielement fully populated random phased arrays for ultrasound surgery applications[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, **65**(4): 630-637.

[7] LI F Q, SONG D, ZENG D P, et al. Frequency dependence of the acoustic field generated from a spherical cavity transducer with open ends[J]. AIP Advances, 2015, **5**(12): 127218.

[8] 重庆融海超声医学工程研究中心有限公司. 谐振式超声换能器: CN20061012864.4[P]. 2008-03-12.

[9] LI F Q, WANG H, ZENG D P, et al. Sub-wavelength ultrasonic therapy using a spherical cavity transducer with open ends[J]. Applied Physics Letters, 2013, **102**(20): 204102.

[10] 耿昊, 邱媛媛, 章东. 球形腔聚焦换能器的非线性声场建模[J]. 声学学报, 2014, **39**(3): 380-384.
GENG Hao, QIU Yuanyuan, ZHANG Dong. Modeling of the acoustic nonlinear field generated from a spherical cavity transducer[J]. Acta Acustica, 2014, **39**(3): 380-384.

[11] 岳帅, 郭毅军, 冉鹏, 等. 鼓形超声换能器的设计与仿真分析[J]. 电子世界, 2018(5): 8-9,12.