

圆环形聚焦声场的构建与调控

郑莉 郭建中

A controllable circular ring acoustic focused field

Zheng Li Guo Jian-Zhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 044305 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.044305

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044305>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Helmholtz 水声换能器弹性壁液腔谐振频率研究

Study on elastic-wall fluid cavity resonant frequency of Helmholtz underwater acoustic transducer

物理学报.2016, 65(2): 024301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024301>

超声相控阵在多层媒质中的声场模式优化

Optimization of phased array ultrasonic field in multi-medium

物理学报.2012, 61(14): 144301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.144301>

界面条件下线型超声相控阵声场特性研究

Acoustic field characteristics of ultrasonic linear phased array for an interface condition

物理学报.2011, 60(9): 094301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.094301>

圆环形聚焦声场的构建与调控*

郑莉 郭建中†

(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 应用声学研究所, 西安 710062)

(2015年9月1日收到; 2015年10月20日收到修改稿)

提出了一种由径向振动模式的圆环形压电换能器晶片组成的圆柱形阵列换能器结构, 依据阵元激励信号的相位调控机理, 推导了圆环形聚焦声场的调控公式, 在三维空间中构建了圆环形聚焦声场, 实现了对其聚焦区域大小、聚焦圆环半径以及轴向位置移动的调控. 理论分析和仿真研究表明, 所提出的圆柱形阵列换能器实现了对圆环形聚焦声场的调控. 为检测超声、功率超声、医学超声等应用领域提供了一种可实现的新型圆环形可调控聚焦声场.

关键词: 圆环形聚焦声场, 相控阵, 调控

PACS: 43.38.+n, 02.70.Dh

DOI: 10.7498/aps.65.044305

1 引言

随着超声技术在现代科技、工农业生产、无损检测以及医学超声等领域中应用内涵的不断扩展、应用水平的不断提高, 人们对于三维空间中可调控声场的需求不断增加. 目前检测超声及功率超声的应用领域中, 利用对直线或者平面相控阵激励信号的相位调控, 可以构建点或者线形声场聚焦区域, 并获得整个空间的声场扫描, 这种方式非常利于球形、扇形或立方体空间的扫描^[1-3], 但对于类似管道^[4]等圆柱形空间的声场扫描应用的需求, 声场聚焦区域的扫描调控极不方便. 因此, 需要一种可调控的圆环形聚焦声场以实现整个圆柱形空间区域的声场扫描, 拓展流体管道等圆柱形特殊空间的检测超声、功率超声的空间声场扫描应用.

超声波束的形成及聚焦方法有多种, 近年来, 许多学者利用各种声学材料具有的特殊声学特性对声束进行调控, 形成超声聚焦区域. 例如: 2012年, Lin等^[5]根据调整二维声子晶体的折射率, 提出了一种可以有效改变声束孔径大小的方法; 2014

年, Celli和Gonella^[6]提出了一种通过声子晶体控制声场波束的形成与聚焦的方法, 实现了在极低频情况下声子晶体中的聚焦; 2015年, Park和Lee^[7]直接利用超材料特性形成声透镜, 这些聚焦结构其聚焦区域和位置均固定, 在需要声场扫描的实际应用中受到一定限制; 2015年, Alagoz等^[8]研究了部分带隙可以使声子晶体三角晶格内产生横向传播的散射波, 导致声子晶体负折射率的增强, 可以使波阵面发生偏移以及波阵面的凸凹反转, 实现了声束的聚焦; 2015年, Yu等^[9]利用“超颖表面”(metasurface)的二维人造材料, 通过反射波的相位差, 实现宽频带内反射波的声束聚焦, 对通信、检测、测量和成像有非常重要的应用价值. 对于聚焦区域需要声场扫描的应用, 比较成熟的方法是相控阵聚焦系统, 通过对组成超声相控阵系统各阵元的激励信号进行相位控制, 可以实现声束的调控, 产生特定的聚焦声场或偏转声场^[10-12], 并对声束角度、焦点或聚焦线的位置等在一定范围内进行动态调控, 实现声束的空间扫描, 在医学诊疗^[13]、工业检测等^[14]领域的声束扫描控制中应用极为广泛.

对各类不同形状振元或者相控阵的聚焦声场

* 国家自然科学基金(批准号: 11274217, 11574192)和陕西师范大学中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: Gk20131009)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guojz@snnu.edu.cn

区域的调控及性能优化研究一直是本领域的研究热点. 1999年, Woo和Shi^[15-17]通过数值计算仿真研究了线性相控阵声束聚焦特征, 根据仿真结果分析了压电片阵元数目、阵元间距、阵元尺寸、偏转角度对远场声压的影响. 2008年, 张碧星和王文龙^[12]开展了凹面线性相控阵列辐射声场在固-液界面的反射和折射特性研究, 发现凹面线阵声场在圆柱界面下比平界面具有更好的聚焦效果. 2010年, Zhang等^[18]根据井壁内的具体形状提出了一种新型圆柱形相控阵换能器结构, 根据相控阵原理产生聚焦声束, 提供了一种井壁内声场检测的方法, 具体分析了固定焦点的位置, 表明激励阵元数目越多声场中声束的聚焦情况越理想. 2010年, 徐丰等^[19]对256阵元超声相控阵系统误差与多焦点模式精确控制进行了研究, 认为上百阵元组成的相控阵在声场合成能力方面有很强的鲁棒性, 误差主要影响声场聚焦区域能量的分布, 可以通过提高相控阵发射总声功率等途径减小误差. 2011年, 孙芳等^[20]进行了界面条件下线性超声相控阵声场特性的研究, 结果表明利用聚焦可以提高检测的灵敏度和分辨率, 而聚焦区域以外声束的性能更差. 2011年, Yu等^[21]通过理论分析凹圆柱线性相控阵换能器的声场特性, 在一定范围内实现声束的聚焦, 相比一般的线性相控阵阵列换能器, 减少了机械复杂性, 并且可以迅速实现声束聚焦. 2012年, Yu等^[22]提出了在凹球面相控阵换能器采用球形方程的源边界条件, 通过数值计算与仿真实验, 证明了轴向动态聚焦的可行性, 但是焦点的范围有一定局限性. 2013年, Smith等^[23]利用低成本、现成的音频放大器和高音扬声器设计并建立了一种简易的相控阵结构, 实现聚焦或偏转聚焦. 2014年, He^[24]提出了利用近场响应向量来计算加权矢量使得换能器阵列在聚焦成像中减少旁瓣的产生, 使声波能量更加集中并且适应于各种形状的换能器结构.

目前对于相控阵声束控制的研究, 多集中在线阵列、平面阵列以及球形或类球形聚焦阵列的研究, 其声束在空间形成的聚焦或偏转聚焦是一条直线或聚焦点区域^[25,26], 因此, 对于圆柱形三维空间的声场扫描应用具有一定的局限性. 我们设想: 针对平面线阵列超声相控阵换能器, 将线形阵元改进为圆环形阵元, 利用相控阵原理, 设计由径向振动的圆环形阵元组成的换能器阵列, 研究其在特定延时

激励下的径向振动的叠加效果, 尝试在三维空间内构建声束聚焦圆环声场区域; 并通过控制各压电圆环激励信号的相位延时, 实现对圆环形声场的聚焦区域大小、聚焦圆环半径以及轴向位置移动的调控, 在圆环形三维空间中进行声场扫描调控.

2 圆环形超声聚焦区域的产生与调控

2.1 圆环形径向振动阵元组成的超声相控阵换能器结构

将圆环形径向振动压电晶片(图1(a))作为阵元, 沿 z 轴竖直同心排列放置, 形成如图1(b)所示的圆柱形阵列换能器的结构.

如果激励信号的正负极分别加在压电阵元的上下表面, 极化方向与激励方向平行, 且圆环形压电晶片的厚度应远小于其横向尺寸(一个数量级左右), 这样压电圆环就可以近似成纯径向振动^[27,28].

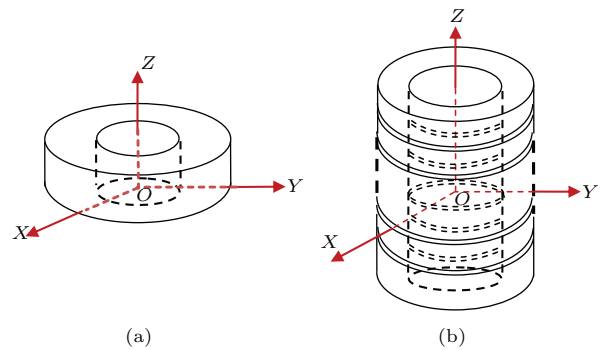


图1 圆环形阵列换能器结构示意图 (a) 圆环形压电晶片; (b) 圆柱形阵列换能器结构

Fig. 1. Schematic diagram of cylindrical acoustic transducer array: (a) Circular ring shape piezoelectric ceramic transducer element; (b) structure of cylindrical acoustic transducer array.

2.2 圆环形聚焦声场的产生

根据惠更斯原理, 将各种换能器的有效辐射面近似为无数点源的组合, 对有限尺寸的换能器阵列的辐射声场进行分析. 在满足远场的条件下, 辐射场中某一点的声压是辐射面上所有点源在该点产生的声压叠加的结果, 通过对整个辐射面的积分来计算. 由于圆环形阵列换能器由多个薄压电晶片以线阵列的方式堆叠而成, 每个压电晶片的长度远大于厚度, 通过单个圆环形线元的声场和单个阵元的声场可以获得其声场分布.

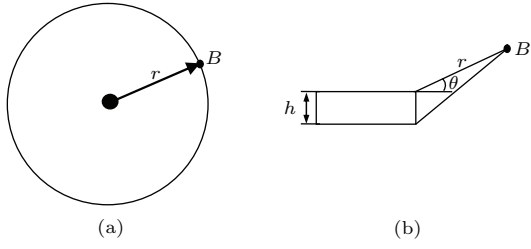


图2 圆环压电晶片声场激励示意图 (a) 单个圆环线元; (b) 单个阵元
Fig. 2. Schematic diagram of circular ring piezoelectric transducer elements in acoustic excitation: (a) A single ring line source; (b) a single element.

假设单个圆环线元径向振动产生的波为柱面波, 如图2(a)所示, 将单个圆环线元看作一个质点振动源, 利用波动方程可以求得距离质点振动源 r 处 B 点的声压. 用柱坐标表示其波动方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (1)$$

声压的一般形式如下式:

$$p(r, t) = \left(\frac{P_0}{r} \right)^{1/2} \exp[j(\omega t - kr)]. \quad (2)$$

假设单个阵元的几何厚度为 h , 利用线元声压公式对阵元厚度积分, 如图2(b)所示, 其中, r 为简单线元到声场中任意点 B 的距离, θ 为 r 与压电晶片径向方向所成的角, P_0 为线元在单位距离上产生的声压, k 为角波数, d 为阵元间距, Δt_n 为第 n 个阵元激励延迟时间. 这样, 阵元在 B 点处产生的声压表达式为

$$\begin{aligned} p(r, \theta, t) &= \int_0^h dp \\ &= \left(\frac{P_0}{r} \right)^{1/2} \frac{\sin(kh \sin \theta / 2)}{k \sin \theta / 2} \exp\left(-\frac{jk h \sin \theta}{2}\right) \\ &\quad \times \exp[j(\omega t - kr)]. \end{aligned} \quad (3)$$

圆环形阵列换能器可视为由阵元数为 N 的单个阵元按线阵列堆叠, 根据(3)式可推导出距离换能器中心为 r 处的声压表达式为

$$\begin{aligned} p(r, \theta, t) &= \sum_{n=1}^N p_n(r, \theta, t) \\ &= \left(\frac{p_0}{r} \right)^{1/2} \frac{\sin(kh \sin \theta / 2)}{k \sin \theta / 2} \\ &\quad \times \frac{\sin[(\omega \Delta t_n - kd \sin \theta) / 2] N}{\sin((\omega \Delta t_n - kd \sin \theta) / 2)} \\ &\quad \times \exp\left[-j\left(\frac{kh \sin \theta}{2}\right)\right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \exp\left[-j\left(\frac{\omega \Delta t_n - kd \sin \theta}{2}\right)(N-1)\right] \\ &\times \exp[j(\omega t - kr)]. \end{aligned} \quad (4)$$

根据(4)式, 按照相位延时控制相控阵聚焦法则^[29]进行激励, 可以得到相控阵线阵列的声场分布. 在距离相控阵线阵列 r 处声压叠加使声压级达到最大值. 以最大值为中心, 取其声压级为 -3 dB 区域, 可在圆环形阵列换能器周围形成一个圆环形聚焦声场.

2.3 圆环形聚焦声场的调控原理

基于惠更斯原理, 各阵元产生的声波叠加产生新的波阵面. 阵元的激励时间按照一定法则, 可以形成不同的声场波阵面. 如果先激励阵列两端阵元, 逐渐向中间阵元加大延时, 从而使合成的波阵面指向一个曲率中心, 实现阵列换能器的相位控制.

2.3.1 圆环形聚焦声场的半径调控

图3为圆环形聚焦声场的半径调控示意图, 图3(b)是图3(a)的剖面图(YOZ). 在距离中心压电晶片外径垂直距离为 $F_{Z\perp}$ 处产生聚焦声场, 焦点距离中心压电晶片外径直线距离为 F , 聚焦声场向上移动距离为 F_Z , 且 $F_{Z\perp}$ 和 F 相等, F_Z 等于0. 组成圆环形柱状阵列换能器的径向振动圆环形阵元数为 N , 对于任意的第 n 个阵元, 在几何三角形 $\triangle APB$ 中有

$$AB = n \times d. \quad (5)$$

根据余弦定理:

$$PB^2 = F^2 + (nd)^2. \quad (6)$$

第 n 个阵元与线阵中心的声程差为

$$\Delta S = F - PB. \quad (7)$$

假设声速为 c , 由此可以得出当组成圆环形柱状相控阵换能器的径向振动圆环形阵元数 N 为奇数时, 第 n 阵元相对于中心阵元的激励延时值 Δt_n 为

$$\Delta t_n = \frac{F}{c} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{nd}{F} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}. \quad (8)$$

当组成圆环形柱状相控阵换能器的径向振动圆环形阵元数 N 为偶数时, 第 n 阵元相对于中心阵元的激励延时值 Δt_n 为

$$\Delta t_n = \frac{F}{c} \left(1 - \left\{ 1 + \left[\frac{(n+0.5)d}{F} \right]^2 \right\}^{1/2} \right). \quad (9)$$

这样, 如果聚焦声场焦点位置 F 为不同数值时, 按 (8) 和 (9) 式得到对各个圆环形阵元进行激励的不同延时参数, 分别延时激励各个圆环形压电晶片, 可实现圆环形聚焦声场的半径调控.

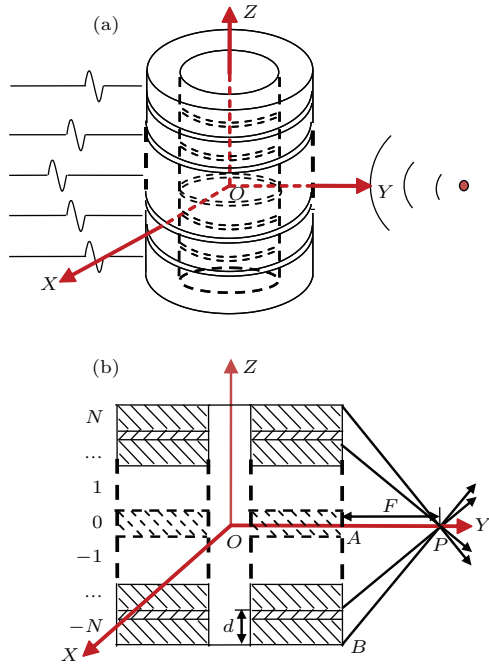


图3 圆环形聚焦声场的半径调控示意图 (a) 聚焦示意图; (b) 聚焦几何关系图
Fig. 3. Schematic diagram of controlling the radius of circular ring acoustic focused field: (a) Schematic diagram of focusing; (b) geometrical relationship of focusing.

2.3.2 圆环形聚焦声场的轴向位置调控

如图 4 所示, 在距离中心压电晶片外径垂直距离为 $F_{Z\perp}$ 且沿 $F_{Z\perp}$ 偏转角度 γ 处产生聚焦声场, 焦点距离中心压电晶片外径直线距离为 F , 聚焦声场向上移动距离为 F_Z , 当组成圆环形柱状相控阵换能器的径向振动圆环形阵元数 N 为奇数时, 第 n 个阵元相对于中心阵元的激励延时值 Δt_n 为

$$\Delta t_n = \frac{F}{c} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{nd}{F} \right)^2 - 2 \frac{nd}{F} \sin \gamma \right]^{1/2} \right\}. \quad (10)$$

当组成圆环形柱状相控阵换能器的径向振动圆环形阵元数 N 为偶数时, 第 n 个阵元相对于中心阵元的激励延时值 Δt_n 为

$$\Delta t_n = \frac{F}{c} \left(1 - \left\{ 1 + \left[\frac{(n+0.5)d}{F} \right]^2 - 2 \frac{(n+0.5)d}{F} \sin \gamma \right\}^{1/2} \right). \quad (11)$$

(5)–(11) 式中 $n = 0, \pm 1, \dots, \pm N/2$; F 为聚焦声场焦点距离中心压电晶片外径的直线距离; PB 为第 n 个阵元到焦点 F 的距离.

这样, 如果聚焦声场焦点位置 F 为定值且偏转一定角度 γ 时, 按 (10) 和 (11) 式可以得到对各个圆环形阵元进行激励的不同延时参数, 分别延时激励各个圆环形压电晶片, 可实现圆环形聚焦声场的轴向位置的调控.

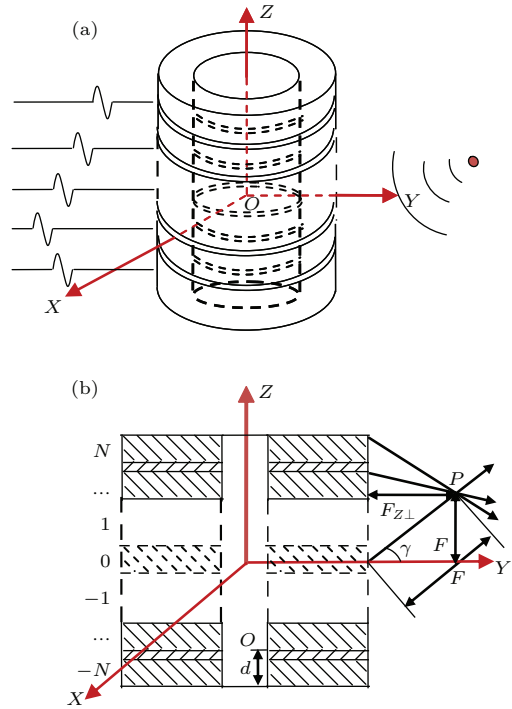


图4 圆环形聚焦声场的轴向位置调控示意图 (a) 偏转聚焦示意图; (b) 偏转聚焦几何关系图
Fig. 4. Schematic diagram of controlling the axial location of circular ring acoustic focused field: (a) Schematic diagram of focusing with deflection; (b) geometrical relationship of focusing with deflection.

3 圆环形聚焦声场仿真研究

我们利用有限元仿真方法对圆环形聚焦声场的调控方式进行了仿真研究. 为不失一般性, 仿真参数为常见的圆环形阵列换能器. 假设圆环形阵列换能器是由 32 片薄压电圆环 (PZT-5H) 堆叠而成, 声场介质为水, 各晶片的内径为 5 mm, 外径为 15 mm, 厚度为 1 mm, 相邻两晶片间距为 0.1 mm. 通过对上述尺寸的压电晶片进行模态分析, 得出其沿径向振动所对应的频率为 360485 Hz, 本文用此频率值作为各压电晶片的激励信号频率, 根据特定的延时法则, 实现声波的聚集和聚焦区域的偏转, 分析研究圆环形聚焦声场的调控方法.

3.1 圆环形聚焦声场大小的调控

对于圆环形聚焦声场大小的调控, 是通过激励不同阵元数目对聚焦区域大小的影响进行研究. 假定聚焦区域焦点的位置是固定的, 分别激励不同数目的圆环形压电晶片, 分析声场中相同时间段内的等效声压级.

设定圆环形阵列换能器聚焦焦点 F 的位置为 30 mm, 由 (9) 式可以得到固定焦点情况下的激励延时 Δt , 利用有限元方法进行仿真研究, 分别延时激励不同数目的圆环形阵元数 N , 图 5 (a)—(d) 是激励阵元数 N 分别为 4, 8, 16, 32 时, 等效声压级分布的声场剖面图 ($-135^\circ \sim 225^\circ$), 幅度为等效声压级.

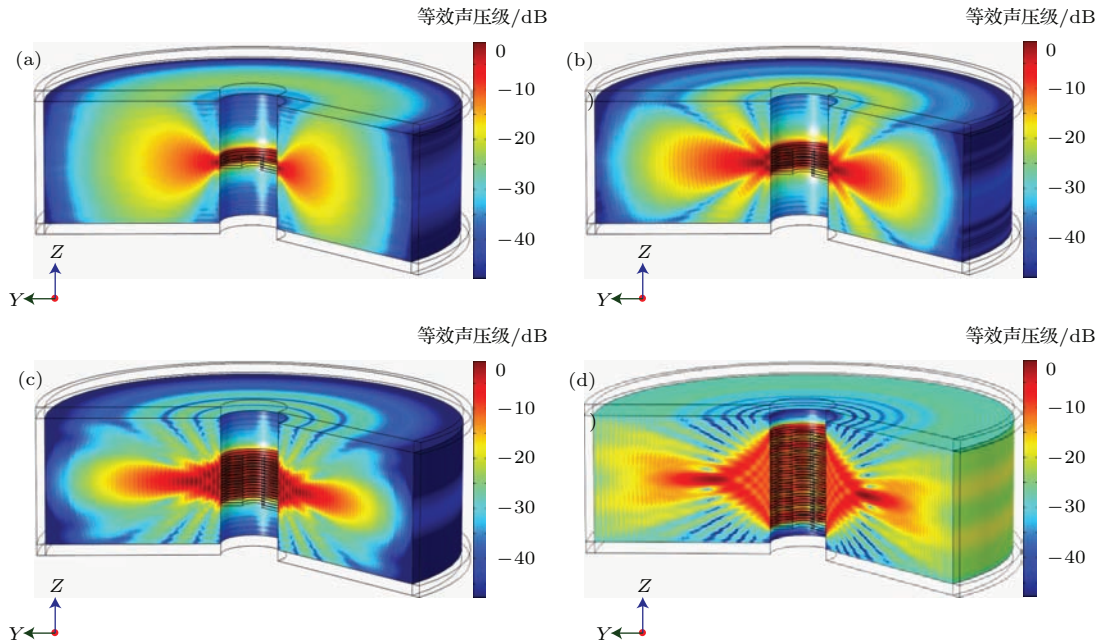


图5 (网刊彩色) 聚焦声场大小调控 (a), (b), (c), (d) 分别为阵元数 $N = 4, 8, 16, 32$ 的等效声压级

Fig. 5. (color online) Control the size of the focusing acoustic field: equivalent sound pressure level for array element (a) $N = 4$, (b) $N = 8$, (c) $N = 16$, (d) $N = 32$.

3.2 圆环形聚焦声场的半径调控

对于圆环形聚焦声场的半径调控, 是通过聚焦焦点 F 的位置对声场聚焦圆环半径的影响来研究. 由 (8) 和 (9) 式可以看出, 经过对聚焦焦点 F 位置的调整, 各个圆环形阵元激励信号的延时时间不同, 形成不同的聚焦法则, 可以改变聚焦声场的半径大小.

设定聚焦焦点 F 的位置分别为 30, 50 mm, 由 (9) 式可以得到不同焦点情况下的激励延时 Δt . 分别对 32 片圆环形压电晶片进行激励, 分析声波在二维声场中 (YOZ 平面) 的传播. 图 6 (a) 和图 6 (b) 分别是焦点 F 的位置为 30 和 50 mm (偏转角为 0°) 的聚焦声波传播图, 幅度为归一化的声压; 图 6 (c)—(h) 是焦点 F 的位置为 30 mm (左

图) 和 50 mm (右图), 偏转角为 0° 的圆环形阵列换能器声场剖面图 ($-135^\circ \sim 225^\circ$), 其中, 图 6 (c) 和图 6 (d) 为等效声压级图, 图 6 (e) 和图 6 (f) 为 -3 dB 等效声压级的声场聚焦圆环图, 图 6 (g) 和图 6 (h) 为 -3 dB 等效声压级的声场聚焦圆环 XOY 截面图 ($Z = 0$).

3.3 圆环形聚焦声场的轴向位置调控

圆环形聚焦声场的轴向位置调控是通过聚焦焦点 F 的位置相同时不同的偏转角度对圆环形声场轴向位置的影响来研究. 由 (10) 和 (11) 式可以看出, 经过焦点位置以及偏转角度的调整, 各个圆环形阵元激励信号的延时时间不同, 形成不同的偏转聚焦法则, 可以对聚焦声场的轴向位置进行调控.

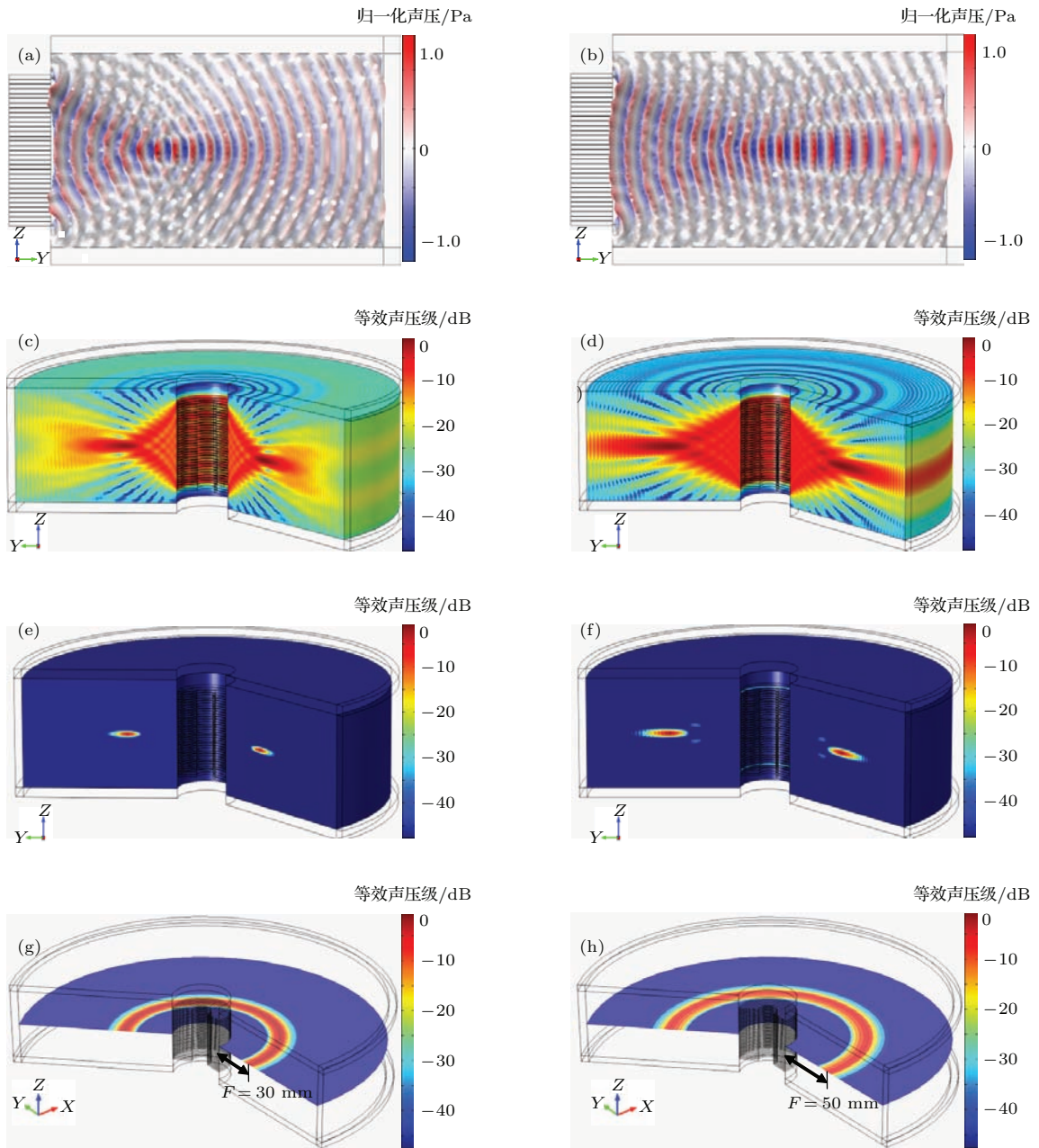


图6 (网刊彩色) 聚焦声场半径调控 ($F = 30\text{ mm}$ (左图) 和 50 mm (右图); $\gamma = 0^\circ$) (a), (b) 聚焦声波传播; (c), (d) 等效声压级; (e), (f) -3 dB 等效声压级的声场聚焦圆环; (g), (h) 声场聚焦圆环 XOY 截面图 ($F_Z = 0$)
 Fig. 6. (color online) Control the radius of the focusing acoustic field ($F = 30\text{ mm}$ (left figures), 50 mm (right figures); $\gamma = 0^\circ$): (a), (b) focused beam spreading; (c), (d) equivalent sound pressure level; (e), (f) focusing ring of -3 dB equivalent sound pressure level; (g), (h) XOY sectional view of focusing ring ($F_Z = 0$).

设定聚焦焦点 F 的位置为 $30, 50\text{ mm}$, 偏转角度为 10° , 利用 (11) 式可以得到焦点位置不同、偏转一定角度情况下的激励延时 Δt , 仿真研究方法 与聚焦声场半径调控方法相同. 仿真研究结果如图 7 所示, 其中图 7(a) 和图 7(b) 分别是焦点 F 的位置为 30 和 50 mm , 偏转角度为 10° 的聚焦声波传播图, 幅度为归一化的声压; 图 7(c)–(h)

是焦点 F 的位置为 30 mm (左图) 和 50 mm (右图), 偏转角度为 10° 的圆环形阵列换能器声场剖面图 ($-135^\circ\text{--}225^\circ$), 其中图 7(c) 和图 7(d) 为等效声压级图, 图 7(e) 和图 7(f) 为 -3 dB 等效声压级的声场聚焦圆环图, 图 7(g) 和图 7(h) 为 -3 dB 等效声压级的声场聚焦圆环 XOY 截面图 ($F_Z = F/\sin\gamma$).

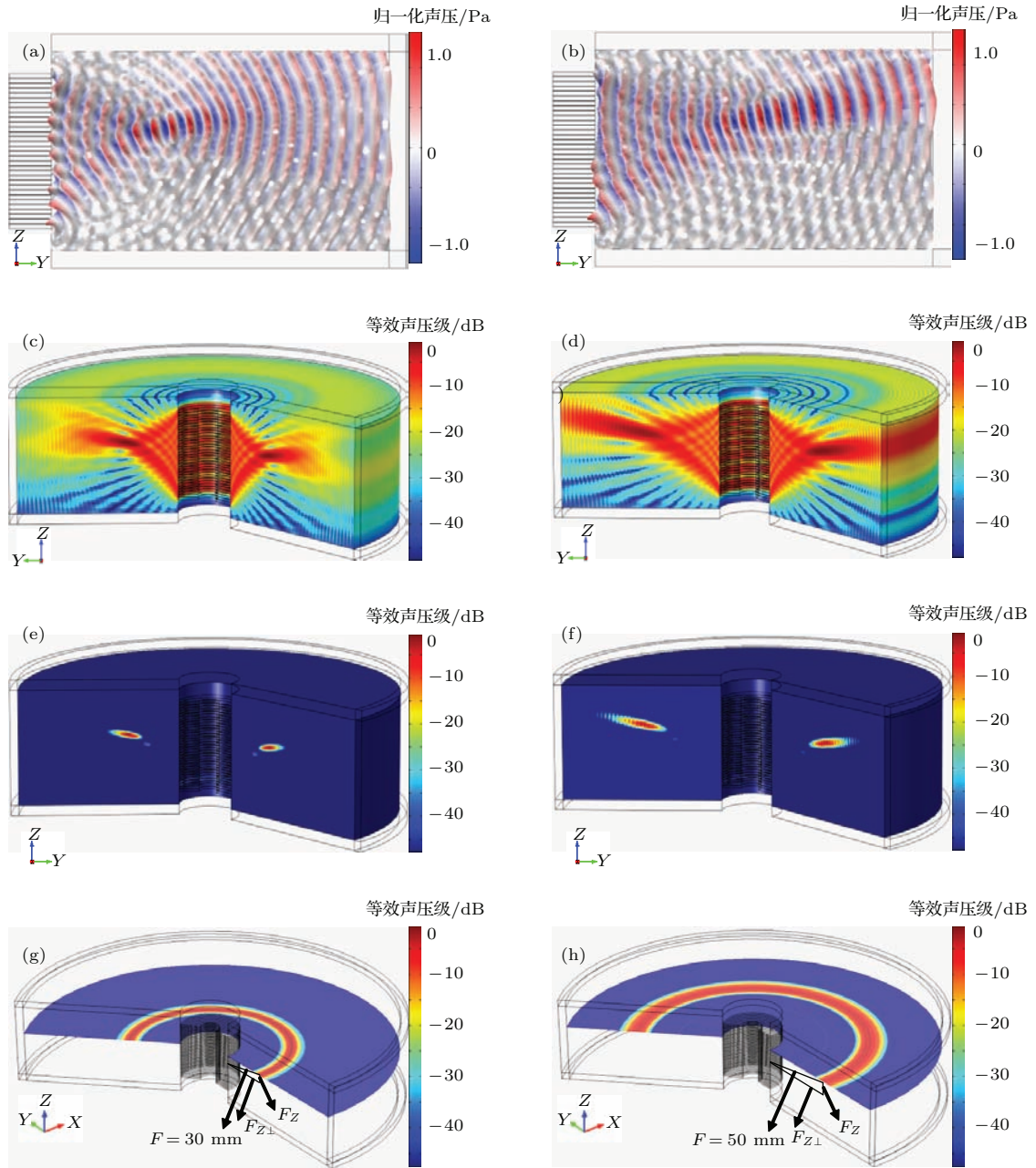


图7 (网刊彩色) 聚焦声场轴向调控 ($F = 30$ mm (左图)和 50 mm (右图); $\gamma = 10^\circ$) (a), (b) 聚焦声波传播; (c), (d) 等效声压级; (e), (f) -3 dB 等效声压级的声场聚焦圆环; (g), (h) 声场聚焦圆环 XOY 截面图 ($F_z = F / \sin \gamma$)

Fig. 7. (color online) Control the axial location of the focusing acoustic field ($F = 30$ mm (left figures), 50 mm (right figures); $\gamma = 10^\circ$): (a), (b) Focused beam spreading; (c), (d) equivalent sound pressure level; (e), (f) focusing ring of -3 dB equivalent sound pressure level; (g), (h) XOY sectional view of focusing ring ($F_z = F / \sin \gamma$).

4 仿真结果分析

4.1 通过对激励阵元的数量控制, 可以进行聚焦圆环区域的大小调控

当聚焦焦点位置一定, 由(9)式可以得到固定焦点情况下的延时, 分别激励不同数目的圆环形压

电阵元数, 可以得到焦点位置相同、聚焦区域大小不同的等效声压级图. 由图5可以看出, 激励阵元数越多, 圆环形聚焦声场越小, 聚焦声波越集中, 声波轴向宽度减小得越明显, 轴向分辨率越高, 即可以获得良好的轴向分辨率, 并且还可以降低旁瓣级, 即声场聚焦区域越小. 但是增加阵元数目, 相应的信号通道增加, 提高了设备的复杂性并降低了

实时性,且通过仿真研究,当阵元数 $N > 32$ 时阵元数的增加对聚焦区域大小和旁瓣级影响都不大,所以本文仿真研究阵元数取 32.

4.2 通过对阵元激励的聚焦焦点位置的控制,可以对聚焦圆环半径进行调控

当圆环形阵元数一定 ($N = 32$), 偏转角度为 0° 时, 分别改变聚焦焦点的位置, 利用 (9) 式可以得到不同焦点对应的延时 (同时激励 32 个圆环形压电阵元). 图 6(a) 和图 6(b) 所示, 声波在各自焦点处声压幅值达到最大, 即声波振幅达到最大, 离开焦点声波又逐渐扩散开. 如图 6(c) 和图 6(d) 所示, 各压电晶片产生的能量逐渐向焦点处集中, 在焦点处等效声压级达到最大, 焦点后声波的等效声压级又逐渐减弱, 当焦点位置距离中心压电晶片较近时, 声场聚焦深度较短, 垂直轴向的侧向分辨率较高, 聚焦区域以外的声波比未聚焦时发散得更快; 相反焦点位置较远时, 声场聚焦深度较长, 侧向分辨率有所下降, 但是聚焦能量没有明显的下降, 聚焦区域以外的声波发散较为缓慢. 如图 6(e) 和图 6(f) 所示, 随着聚焦焦点与压电晶片中心距离变大, 聚焦圆环会有明显增大的趋势, 且聚焦焦点的位置影响聚焦圆环半径的大小, 焦点位置即聚焦圆环形声场半径大小, 从而实现聚焦圆环的半径调控.

4.3 通过对阵元激励的偏转加聚焦的控制方式, 可以进行聚焦圆环沿着轴向移动的调控

当圆环形阵元数一定 ($N = 32$), 且偏转角度为 10° 时, 分别改变聚焦焦点的位置, 利用 (11) 式可以得到焦点位置不同、偏转一定角度情况下对应的延时. 同样激励 32 个圆环形压电阵元, 通过图 7 可以看出声波在各自焦点处声压和等效声压级到达最大, 是各压电晶片振动能量集中点. 通过对比图 6 和图 7, 可以看出等效声压级、 -3 dB 等效声压级的声场聚焦圆环以及 -3 dB 等效声压级的声场聚焦圆环 XOY 截面图都沿轴向发生了 10° 的偏转, 圆环形聚焦声场沿轴向位置由偏转角度决定, 随着偏转角度的不同, 发生沿轴向的移动, 本仿真实验中, 聚焦圆环沿 z 轴向上移动的距离 $F_z = F / \sin \gamma$. 且该圆环形线阵列相控阵换能器结构产生的圆环

形聚焦声场可以实现 0° 到 $\pm 90^\circ$ 整个平面的上下移动, 实现聚焦圆环轴向调控.

研究过程中, 我们发现随着聚焦圆环半径的增大或者聚焦圆环轴向移动时, 圆环聚焦声场的能量有所减小, 旁瓣会增大, 这样的调控可以进一步通过激励加权的方法提高聚焦圆环在扫描过程中的强度、大小等参数的稳定性, 可以通过对激励信号的相位调控加权、对被控声压进行幅值的补偿等声压加权优化方法, 获得实时调控圆环形聚焦声场时其聚焦能量、聚焦区域等参数的稳定.

5 结 论

针对本文提出的圆环形柱状相控阵换能器结构, 通过调控使圆环形压电晶片产生纯径向振动的激励信号, 从而产生特定的延时法则, 可以在三维空间产生圆环形聚焦声场, 通过改变激励阵元数目可以控制聚焦区域的大小, 通过改变聚焦焦点位置可以控制聚焦声场的半径, 通过改变偏转角度可以控制轴向方向的移动. 这种圆环形柱状相控阵换能器的结构可以在三维空间内产生圆环形聚焦声场并可以对其聚焦声场进行实时调控, 为圆环形三维空间内检测、扫描等提供一种更加有效的方法. 并且分析了该阵列换能器结构的优化途径.

参考文献

- [1] Zhao X Y, Gang T 2009 *Ultrasonics* **49** 126
- [2] Shih J L, Wu K T, Jen C K, Chiu C H, Tzeng J C, Liaw J W 2013 *Sensors* **13** 975
- [3] Humeida Y, Wilcox P D, Todd M D, Drinkwater B W 2014 *NDT & E. Int.* **68** 43
- [4] Ennaceur C, Mudge P, Bridge B, Kayous M, Gan T H 2007 *Insight* **49** 217
- [5] Lin S C S, Tittmann B R, Huang T J 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 123510
- [6] Celli P, Gonella S 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 103502
- [7] Park C M, Lee S H 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 034904
- [8] Alagoz S, Alagoz B B, Sahin A, Nur S 2015 *Chin. Phys. B* **24** 046201
- [9] Yu J B, Ma H, Wang J F, Li Y F, Feng M D, Qu S B 2015 *Chin. Phys. B* **24** 098102
- [10] Azar L, Shi Y, Wooh S C 2000 *NDT & E Int.* **33** 189
- [11] Sun F, Zeng Z M, Jin S J, Chen S L 2013 *J. Syst. Simul.* **25** 1108 (in Chinese) [孙芳, 曾周末, 靳世久, 陈世利 2013 系统仿真学报 **25** 1108]
- [12] Zhang B X, Wang W L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3613 (in Chinese) [张碧星, 王文龙 2008 物理学报 **57** 3613]

- [13] Ellens N, Hynynen K 2014 *Med. Phys.* **41** 072902
- [14] Hu D, Wang Q, Xiao K, Ma Y H 2012 *Procedia Eng.* **43** 459
- [15] Wooh S C, Shi Y J 1999 *Wave Mot.* **29** 245
- [16] Wooh S C, Shi Y J 1999 *J. Nondestr. Eval.* **18** 39
- [17] Wooh S C, Shi Y J 1998 *J. Ultrasonics* **36** 737
- [18] Zhang B X, Shi F F, Wu X M, Gong J J, Zhang C G 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 094301
- [19] Xu F, Lu M Z, Wan M X, Fang F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1349 (in Chinese) [徐丰, 陆明珠, 万明习, 方飞 2010 物理学报 **59** 1349]
- [20] Sun F, Zeng Z M, Wang X Y, Jin S J, Zhan X L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094301 (in Chinese) [孙芳, 曾周末, 王晓媛, 靳世久, 詹湘琳 2011 物理学报 **60** 094301]
- [21] Yu L L, Shou W D, Hui C 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 104302
- [22] Yu L L, Shou W D, Hui C 2012 *Commun. Theor. Phys.* **57** 285
- [23] Smith M L, Roddewig M R, Strovink K M, Scales J A 2013 *Acoust. Today* **9** 22
- [24] He Z Y 2014 *Bio.-Med. Mater. Eng.* **24** 1201
- [25] Satyanarayan L, Sridhar C, Krishnamurthy C V, Balasubramaniam K 2007 *Int. J. Press Vessels Piping* **84** 716
- [26] Tayel M, Ismail N, Talaat A 2006 *National Radio Science Conference, Proceedings of the 23rd National Conference Menoufiya, Egypt, March 14–16, 2006* p1
- [27] Lin S Y, Sang Y J, Tian H 2007 *Acta Acust.* **32** 310 (in Chinese) [林书玉, 桑永杰, 田华 2007 声学学报 **32** 310]
- [28] Liu S Q, Lin S Y 2009 *Sensor Actuat. A: Phys.* **155** 175
- [29] Neild A, Hutchins D A, Robertson T J, Davis L A J, Billson D R 2005 *Ultrasonics* **43** 183

A controllable circular ring acoustic focused field*

Zheng Li Guo Jian-Zhong[†]*(Institute of Applied Acoustics, School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)*

(Received 1 September 2015; revised manuscript received 20 October 2015)

Abstract

Based on Huygens principle about the aspect of phased array, this paper presents a structure of cylindrical acoustic transducer consisting of circular ring piezoelectric transducer elements in radial vibration mode, which can be used to achieve the ultrasonic nondestructive test for the cylindrical scanning acoustic field in three-dimensional space. By analyzing the acoustic field of a single ring line source and a single element, the sound field distribution of the phased array is obtained for constructing circular ring acoustic focused field. By means of the phased array incentive mode, the phase difference of driving signals is generated and forms a regular time delay; with the accomplishment of sound field scanning in cylindrical three-dimensional space, the circular ring acoustic focused field can be controlled in real time.

Theoretical analysis and finite element simulation results demonstrate that the size of the circular ring acoustic focused field can be controlled by the numbers of the excited array elements, which are 4, 8, 16 and 32 respectively in our work. We find that with more array element numbers, the circular ring acoustic field has better focused features. The radius size of the circular ring acoustic focused field can be controlled by the different locations of the focus positions which are 30 and 50 mm respectively in our work. And we find that as the distance between the focus positions and the center of piezoelectric wafer becomes longer, the radius of the circular ring acoustic focused field becomes bigger, and the position of the focus is equivalent to the radius of the circular ring acoustic focused field. The movement along the axial direction of circular ring acoustic focused field can be controlled by the angle of deflection, which are set as 0° , 10° respectively in our work. And we find that the circular ring acoustic focused field is deflected in a corresponding deflection angle along the Z -axis, and the moving distance is $F_z = F/\sin\gamma$. With the theoretical analysis and the experimental simulation, it can be shown that the structure of cylindrical acoustic transducer array presented in this paper could create an adjustable circular ring acoustic focused field and can potentially provide an acoustic field scan method in detection ultrasound, medical ultrasound and other areas of a cylindrical space.

Keywords: circular ring acoustic focused field, phased array, construction**PACS:** 43.38.+n, 02.70.Dh**DOI:** 10.7498/aps.65.044305

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274217, 11574192) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China, Shaanxi Normal University (Grant No. GK20131009).

[†] Corresponding author. E-mail: guojz@snnu.edu.cn