

环形相控阵换能器辐射和反射声场*

赖溥祥 张碧星 汪承灏

(中国科学院声学研究所 100080 北京)

2006 年 4 月 15 日收到

2006 年 6 月 19 日定稿

摘要 研究了超声环形相控阵辐射声场和反射声场的基本特性。理论上详细分析了环形相控阵的阵元数目、环形阵半径、阵元间距、中心频率、焦点位置等因素对辐射声场的影响。实验上设计并制作了具有 8 个环的等面积环形相控阵列并进行了实验测量。通过理论和实验分析,研究了环形相控阵的辐射声场及在液固界面上的反射声场特性,取得了理论和实验相吻合的结果。

PACS 数: 43.20, 43.60, 43.35

Radiation and reflection acoustical fields of an annular phased array

LAI Puxiang ZHANG Bixing WANG Chenghao

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100080)

Received Apr. 15, 2006

Revised Jun. 19, 2006

Abstract The characteristic of the radiation and reflection acoustical fields of an annular phased array is investigated. The effect of the array number, array radius, interelement spacing, centre frequency, focus position, and other parameters on the radiation acoustical field of the annular phased array is theoretically studied. In experiment, an annular transducer with 8 equal-area elements is designed and fabricated, and a series of experiment measurements are conducted. The radiation acoustical field and its reflection on a liquid-solid interface are theoretically and experimentally studied. The experimental result is in good agreement with the theoretical one.

引言

超声相控检测方法利用超声探头上的多个晶片进行聚焦发射和聚焦接收,通过控制各个晶片上发射信号的时延和幅度进行扫描成像,能够灵活、快捷、有效地控制声束的形状和方向,其声束角度和焦点位置等在一定范围内连续动态可调,实现动态聚焦和动态接收,具有检测速度快和高信噪比等优势。相控阵技术不需要移动探头位置就可以对工件的各个部位进行快速扫描成像,因而数据量非常大,近年来计算机技术的飞速发展使得相控阵检测技术在很多应用行业都取得了重要的应用成果。

人们对于一维线阵^[1,2]和二维面阵^[3,4]的相控阵换能器的研究比较多,而关于环形相控阵列的研究和应用,无论是在医学还是工业等其它领域,都少

得多,其中一个主要原因就是环形阵列声场完全轴对称,只能在中心轴线上聚焦,如果要扫描成像,必须机械移动环形换能器,效率低下且不方便。然而也正是因为其优越的轴向聚焦能力,环形相控阵列可以在阵元数远小于线阵和面阵换能器阵元数的情况下形成高分辨率的聚焦声场,这就可以大大降低由于通道数量过多带来的制作成本。环形相控阵的一个重要应用就是超声井下电视(Borehole Televiwer, BHTV)^[5]。普通的超声井下电视探头为圆形活塞或凹形结构^[6-8],这种探头的焦距是固定的,只能适用于井眼半径变化不大的井段,而且对于不同半径的井眼需要更换不同的探头,而环形相控阵探头不仅具有很高的图像分辨率,而且能实现动态聚焦,焦点能够随实际情况进行自动调节,因而这种换能器在实际中是很受欢迎的。然而,对于环形相控阵列,无

* 国家自然科学基金资助项目(10374098)

论是理论研究还是实际制作方面都存在许多问题需要开展深入的研究,正是这种缘故,环形相控阵还没有真正应用到井下电视仪器中去。

在理论研究上,对于凹形换能器^[9]、圆弧式换能器^[10]、球面相控阵^[11]、环形换能器^[12-13]、环形相控阵^[14,15]时间反转阵^[16-19]等的辐射声场,人们已开展了研究,但对于环形相控阵在界面上反射声场的研究报道相当少见。本文针对这种情况,对环形相控阵的辐射声场和反射声场进行了深入的理论和实验研究,为环形相控阵技术应用于超声井下电视提供了理论和实验基础。

1 理论分析

1.1 环形相控阵辐射声场

考虑 N 个同心压电圆环,第 $j(j = 1, 2, \dots, N)$ 个圆环的内半径为 a_{2j-1} ,外半径为 a_{2j} ,这些圆环在电激励下产生机械振动,并对外辐射声场。以圆环中心为原点,以圆环轴线为 z 轴建立球坐标系 (R, θ, ψ) ,根据瑞利积分,第 j 个圆环在整个空间的辐射声压在频率域可表示为^[20]:

$$p_j = \frac{i\omega\rho}{2\pi} \iint_{s_j} \frac{u_0}{h} e^{ikh} dS, \quad (1)$$

其中 k, ω 和 ρ 分别为介质中的波数、角频率和密度, dS 积分对第 j 个圆环表面 s_j 进行, h 为积分面元到空间场点的距离, u_0 为圆环表面的振动速度,在本文中,我们假定圆环为等幅振动,即假定圆环表面每一点的振动速度都相同。

轴上的声场可以严格给出^[21]:

$$p_j = 2\rho c u_0 \sin\left(k \frac{R_{2j} - R_{2j-1}}{2}\right) e^{i\left(k \frac{R_{2j} + R_{2j-1}}{2} + \frac{\pi}{2}\right)}, \quad (2)$$

其中 $c = \omega/k$ 为声速, $R_{2j-1} = \sqrt{a_{2j-1}^2 + z^2}$, $R_{2j} = \sqrt{a_{2j}^2 + z^2}$, z 为轴上的场点 F 到圆环中心的距离。当场点偏离轴线时难以给出解析结果,但在远场近似下可以得到近似表达式^[14]:

$$p_j = \frac{i\omega\rho u_0}{R} \left[\frac{a_{2j}^2}{ka_{2j} \sin\theta} \frac{J_1(ka_{2j} \sin\theta)}{ka_{2j} \sin\theta} - \frac{a_{2j-1}^2}{ka_{2j-1} \sin\theta} \frac{J_1(ka_{2j-1} \sin\theta)}{ka_{2j-1} \sin\theta} \right] e^{ikR}. \quad (3)$$

如果 N 个圆环以不同的初始相位进行激励,则它们在空间形成的总辐射场为:

$$p = \sum_{j=1}^N p_j e^{-i\phi_j}, \quad (4)$$

其中 ϕ_j 为第 j 个圆环激励的初始相位。对于不同的相位关系,在空间就会形成不同的聚焦声场。我们选择各圆环的相位使它们的辐射声场在轴上 F 点同相相加,由(2)式可知,如果相位满足:

$$\phi_j = k \frac{R_{2j} + R_{2j-1}}{2}. \quad (5)$$

这时各圆环的辐射声波在 F 点即为同相相加,声场聚焦于 F 点。当声场聚焦在 F 点以后,我们可以根据(4)式计算出空间远场中任一点的声场。

1.2 反射声场

我们考虑环形相控阵声场在液固界面上的反射,如图1所示,一个平面环形相控阵换能器位于液固界面附近的液体介质中,建立柱坐标系 (r, φ, z) ,其中 z 轴穿过环形阵列的中心并垂直于交界面,即交界面为 $z = 0$ 的平面,用 I 和 II 分别表示液体和固体介质。环形阵列上任意一个小面元 $S_i(r_0, \theta_0, z_0)$ 将向流体介质中辐射出球面波,该球面波可以展开成 Bessel 积分形式:

$$\frac{e^{ikh}}{h} = ik \int_0^{(\pi/2-i\infty)} J_0(kr_1 \sin\theta) e^{ik|z-z_0|\cos\theta} \sin\theta d\theta, \quad (6)$$

其中 $r_1 = \sqrt{r_0^2 + r^2 - 2r_0r \cos(\theta_0 - \varphi)}$, 为点 $S_i(r_0, \theta_0, z_0)$ 和场点 $P(r, \varphi, z)$ 在 xOy 平面上的投影之间的距离,因此环形相控阵向液固界面辐射时入射声场的位移势可写为:

$$\varphi_d = -\frac{p}{\rho\omega^2} = \frac{u_0}{2\pi c} \sum_{j=1}^N e^{-i\phi_j} \iint_{s_j} ds \int_0^{(\pi/2-i\infty)} J_0(kr_1 \sin\theta) e^{ik|z_0-z|\cos\theta} \sin\theta d\theta. \quad (7)$$

根据这个入射波的形式,我们可将液体中的反射波、固体介质中的折射纵波和横波的位移势分别写为下述形式:

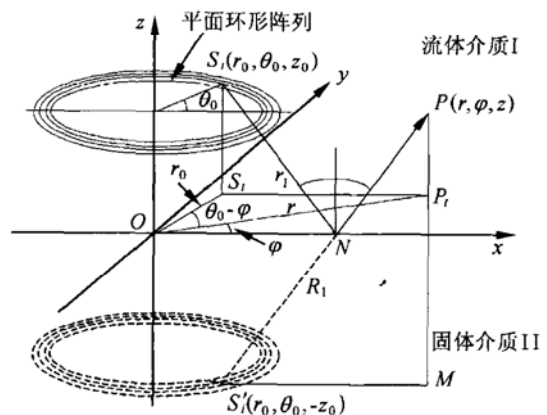


图1 环形相控阵辐射声场在液-固界面的反射示意图

$$\begin{cases} \varphi_r = \frac{u_0}{2\pi c} \sum_{j=1}^N e^{-i\phi_j} \iint_{s_j} ds \int_0^{\pi/2-i\infty} e^{ikz_0 \cos \theta} J_0(kr_1 \sin \theta) e^{ikz \cos \theta} V_{pp} \sin \theta d\theta, \\ \varphi_p = \frac{u_0}{2\pi c} \sum_{j=1}^N e^{-i\phi_j} \iint_{s_j} ds \int_0^{\pi/2-i\infty} e^{ikz_0 \cos \theta} J_0(kr_1 \sin \theta) e^{-ik_{2p} z \cos \theta_p} W_{pp} \sin \theta d\theta, \\ \psi_s = \frac{u_0}{2\pi c} \sum_{j=1}^N e^{-i\phi_j} \iint_{s_j} ds \int_0^{\pi/2-i\infty} e^{ikz_0 \cos \theta} J_0(kr_1 \sin \theta) e^{-ik_{2s} z \cos \theta_s} W_{ps} \sin \theta d\theta, \end{cases} \quad (8)$$

其中 $k \sin \theta = k_{2p} \sin \theta_p = k_{2s} \sin \theta_s$, k_{2p} 和 k_{2s} 分别表示固体介质中的纵波和横波波数, V_{pp} 、 W_{pp} 和 W_{ps} 为待定系数。

在液固交界面上具有下述边界条件:

$$\begin{cases} u_z^{(I)} = u_z^{(II)}, \\ \tau_{zz}^{(I)} = \tau_{zz}^{(II)}, \\ \tau_{rz}^{(II)} = 0, \end{cases} \quad (9)$$

利用入射波、反射波和折射波解 (7,8) 及边界条件 (9), 可以求出所有的待定系数。

$$\begin{cases} V_{pp} = \frac{z_{2p} \cos^2 2\theta_p + z_{2s} \sin^2 2\theta_p - z_{1p}}{z_{2p} \cos^2 2\theta_p + z_{2s} \sin^2 2\theta_p + z_{1p}}, \\ W_{pp} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{2z_{2p} \cos 2\theta_p}{z_{2p} \cos^2 2\theta_p + z_{2s} \sin^2 2\theta_p + z_{1p}}, \\ W_{ps} = -\frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{2z_{2s} \sin 2\theta_p}{z_{2p} \cos^2 2\theta_p + z_{2s} \sin^2 2\theta_p + z_{1p}}, \end{cases} \quad (10)$$

其中 $z_{1p} = \frac{\rho c}{\cos \theta}$, $z_{2p} = \frac{\rho_2 c_{2p}}{\cos \theta_p}$, $z_{2s} = \frac{\rho_2 c_{2s}}{\cos \theta_s}$ 。 ρ_2 , c_{2p} 和 c_{2s} 分别为固体介质的密度、纵波速度和横波速度。

利用 (8) 中第一式可以计算出液体中相控的反射声场, 这个计算比较复杂, 我们采用最陡下降法来计算对 θ 的积分, 最陡下降法在一级近似下有:

$$\varphi_r = -\frac{i u_0}{2\pi \omega} \sum_{j=1}^N e^{-i\phi_j} \iint_{s_j} \frac{e^{ikR_1}}{R_1} \left(1 + \frac{1}{8ikR_1 \sin^2 \theta_1^2} \right) V_{pp} ds, \quad (11)$$

其中 R_1 表示从点 S'_i (面元 S_i 关于液固界面的镜像点) 到场点 P 的距离, θ_1 表示从面元 S_i 发出的球面波经过界面反射后到达场点时在界面上的入射角。在 kR_1 比较大的情况下, 可略去 (11) 式中分母含有 kR_1 的项, 因此环形阵列的反射声场可进一步表示为:

$$\varphi_r = -\frac{i u_0}{2\pi \omega} \sum_{j=1}^N e^{-i\phi_j} \iint_{s_j} \frac{e^{ikR_1}}{R_1} V_{pp} ds, \quad (12)$$

这里的 V_{pp} 等于平面波在液固界面上入射角为 θ_1 时的反射系数。由此, 我们就可以很方便地计算出环形相控阵列辐射声场在液-固界面上的反射声场。

2 环形相控阵各参数的影响

我们取 u_0 为 1.0 m/s, 声波频率 f 为 0.5 MHz, 水的声速 c 为 1500 m/s, 阵元间距 $d = 1$ mm, 预定焦距 F 为 100 mm。首先假定各个圆环的面积相等, 并且阵元之间的间距也相等, 这时我们计算出了各个环的内半径和外半径, 见表 1。

表 1 环形阵列等面积条件下的参数 (mm)

各环序号	1	2	3	4	5	6	7	8
内半径	5	14.23	19.77	24.26	28.18	31.73	35.01	38.09
外半径	13.23	18.77	23.26	27.18	30.73	34.01	37.09	40.01

图 2 是在表 1 参数下环形阵列声场的数值计算

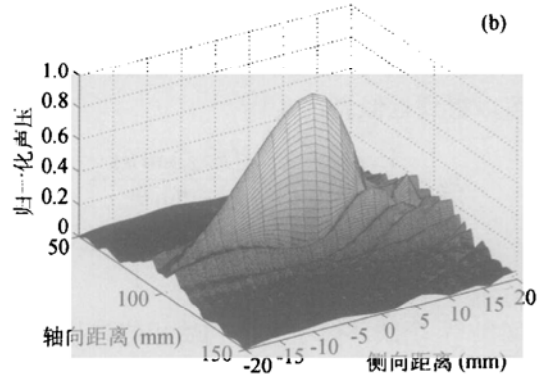
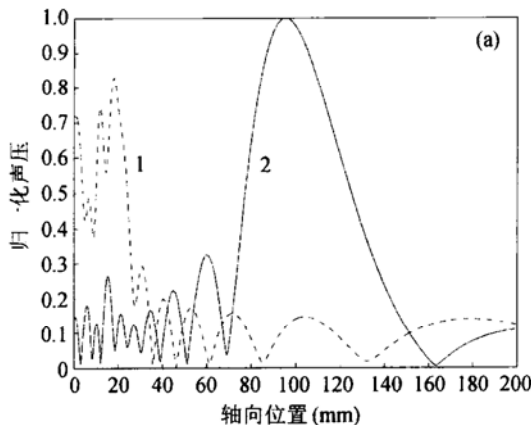


图 2 (a) 环形阵列声场轴向分布, 曲线 1(虚线) 表示没有相位调控的声场, 曲线 2(实线) 表示环形相控阵声场, (b) 相控阵辐射声场全空间分布。

结果, 其中实线表示经过相位控制的相控声场分布, 而虚线是没有相位控制 (即各环以相同的初始相位发射信号) 的声场。我们可以看到, 与没有相位控制的声场相比, 相控阵轴向声场在近场区域的起伏现象得到了很好的抑制, 而且在 $z = 100 \text{ mm}$ (焦点) 附近形成了最大值。下面, 我们就阵元选择方案、阵元数 N 、阵元间距 d 、声波频率 f 、焦点位置等参数对环形相控阵声场的影响进行详细的分析和讨论。

2.1 阵元选择方案

在图 2 中, 每个圆环的表面积是相等的, 由里到外圆环的宽度越来越窄。在有些场合, 环阵的阵元也可设计成不等面积, 比如各阵元等宽度。在设计换能器时, 是应该采用各阵元等面积还是不等面积呢? 在总的辐射面积相同的前提下, 我们来比较一下这两种方案下的辐射声场, 等面积方案的参数依然按照表 1, 而不等面积方案, 我们选用最常见的各阵元等宽度、阵元数目也为 8 的情况, 阵列尺寸参数如表 2 所示, 其余参数如中心间距、工作频率等皆不变。

图 3 给出了环形相控阵列在总的辐射面积相等

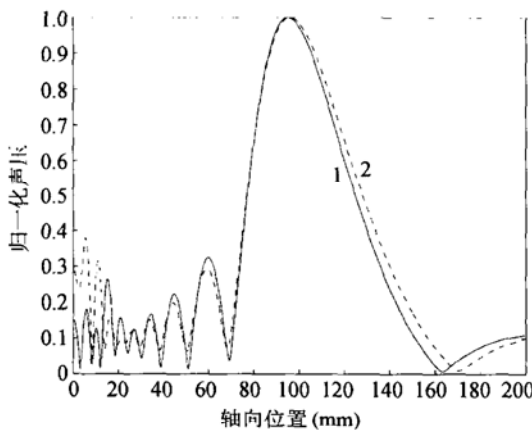
情况下, 等面积和等宽度两种方案下的辐射声场, 可以发现两种方案的声场分布相差不大。然而采取等面积方案, 各阵元可以得到比较接近的电阻抗, 与发射、接收电路容易匹配, 各阵元的灵敏度也比较相近。因此我们以下分析中采用等面积的环形相控阵列。

表 2 环形阵列等宽度条件下的参数 (mm)

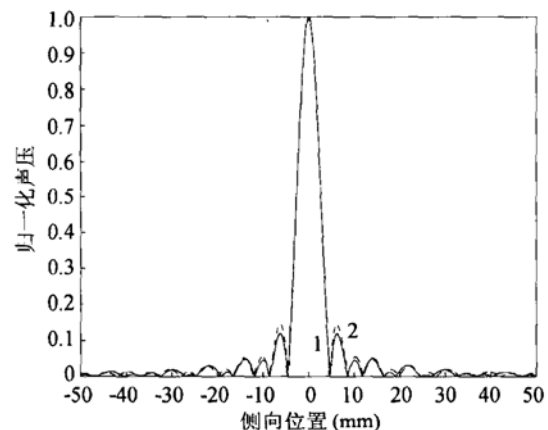
阵元序号	1	2	3	4	5	6	7	8
内半径	5	9.4	13.8	18.2	22.6	27.0	31.4	35.8
外半径	8.4	12.8	17.2	21.6	26.0	30.4	34.8	39.2

2.2 阵元数目和单环面积的影响

在换能器总的辐射面积一定的前提下, 我们选择等面积的方案, 阵元数目的改变, 直接影响到每个阵元的面积, 阵元数目越多, 单个阵元的面积就越小。为了研究阵元数目 N 及单个阵元面积 S_i 的影响, 我们比较 $N = 4, 8, 10, 12$ 时的声场分布。 $N = 8$ 时的阵元参数见表 1, 其余情况下的阵元参数见表 3。



(a) 声场轴向分布



(b) 声场在 $z = 100 \text{ mm}$ 处的侧向分布

图 3 等面积和等宽度环形相控阵声场, 曲线 1(实线) 和曲线 2(虚线) 分别表示等面积和等宽度方案。

表 3 环形阵列参数表 (mm)

(1) $N = 4$

阵元序号	1	2	3	4
内半径	14.93	23.87	30.49	36.07
外半径	22.87	29.49	35.07	40.01

(2) $N = 10$

阵元序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
内半径	1.0	12.0	17.25	21.43	25.07	28.36	31.40	34.26	36.97	39.55
外半径	11.0	16.25	20.43	24.07	27.36	30.40	33.26	35.97	38.55	41.04

(3) $N = 12$

阵元序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
内半径	1.0	11.05	16.24	20.07	23.42	26.47	29.30	31.96	34.48	36.90	39.23	41.49
外半径	10.05	15.24	19.07	22.42	25.47	28.30	30.96	33.48	35.90	38.23	40.49	42.68

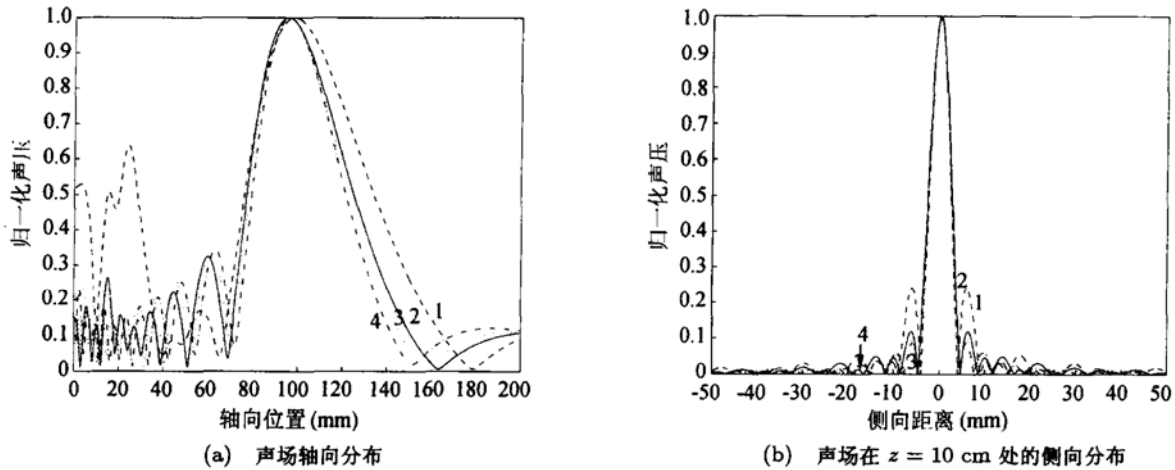


图 4 不同阵元数的环形相控阵列声场, (1) 虚线为 $N = 4$, (2) 实线为 $N = 8$, (3) 点线为 $N = 10$, (4) 虚点线为 $N = 12$.

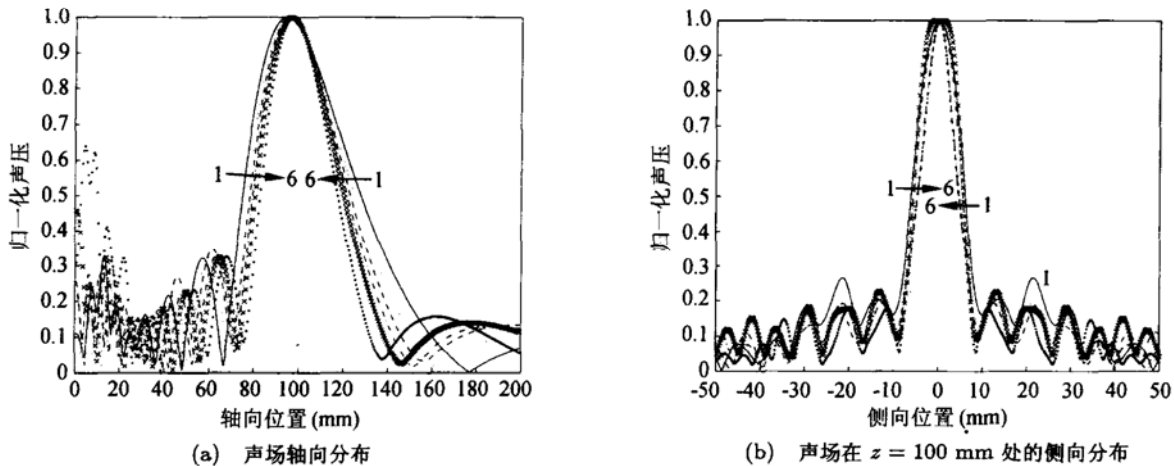


图 5 不同阵元间距的环形相控阵列声场

(1) $d = 0.2\lambda_0$, (2) $d = 0.33\lambda_0$, (3) $d = 0.4\lambda_0$, (4) $d = 0.5\lambda_0$, (5) $d = 0.6\lambda_0$, (6) $d = 0.8\lambda_0$.

图 4 给出了不同阵元数目时的环形相控阵列声场, 可以看到, 当 $N = 4$ 时, 虽然单个阵元面积大, 在实际中可能不容易受阵元间相互干扰的影响, 但无论是在轴向还是在焦平面上的侧向声场分布上, 旁瓣的幅度都较大。相反, 如果我们适当增加阵元数目, 减小单个阵元面积, 则可以有效降低侧向声场的旁瓣, 而且阵元数目越多, 系统通道数就越多, 有利于抑制旁瓣, 提高对比度和分辨率。但阵元数的增多, 将大大增加控制电路的复杂性和不稳定性, 在以下的理论分析及实验制作中, 我们都以 $N = 8$ 进行分析和讨论。

2.3 阵元间距的影响

在设计线阵和面阵相控阵列的时候, 如果阵元间距小于声波波长的一半, 声束在检测半平面就不会出现栅瓣, 旁瓣也能得到很好的抑制, 而当阵元间距大于波长时, 即使偏转角度为零, 也会出现栅瓣。那么, 对于环形相控阵列, 有没有类似的规律可以遵循呢?

水中波长在频率 0.5 MHz 时为 $\lambda_0 = 3 \text{ mm}$, 除

了前面一直采用的阵元中心间距 $d = 1 \text{ mm} = 0.33\lambda_0$ 外, 我们再取阵元中心间距不同的五组环形阵列 (表 4) 对声场进行分析。

表 4 不同阵元间距的环形阵列参数 (mm)

间距		阵元序号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$0.2\lambda_0$	内半径	5.0	13.83	19.07	23.27	26.89	30.15	33.14	35.93
	外半径	13.23	18.47	22.67	26.29	29.55	32.54	35.33	37.96
$0.4\lambda_0$	内半径	5.0	14.43	20.13	24.76	28.82	32.52	35.95	39.18
	外半径	13.23	18.93	23.56	27.62	31.32	34.75	37.98	41.04
$0.5\lambda_0$	内半径	5.0	14.73	20.66	25.51	29.80	33.72	37.38	40.83
	外半径	13.23	19.16	24.01	28.30	32.22	35.88	39.33	42.63
$0.6\lambda_0$	内半径	5.0	15.03	21.19	26.27	30.79	34.93	38.82	42.51
	外半径	13.23	19.39	24.47	28.99	33.13	37.02	40.71	44.23
$0.8\lambda_0$	内半径	5.0	15.63	22.26	27.80	32.78	37.40	41.75	45.91
	外半径	13.23	19.86	25.40	30.38	35.00	39.35	43.51	47.51

图 5 给出了不同阵元间距下的环形相控阵列声场, 可以看到, 随着换能器阵元中心间距的逐步增大, 无论是轴向的远场区声场还是焦平面上的侧向

声场，主声束宽度都得到了一定的改善，而且在侧向声场，旁瓣也得到了很好的抑制，增大阵元间距可以在某种程度上改善系统的横向分辨率。但是，当 $d > 0.5\lambda_0$ 时，我们看到相控阵列的近场区声场起伏加剧，且当 $d = 0.8\lambda_0$ 时，旁瓣峰值甚至超过了焦点峰值的 0.6 倍。可以看到，阵元间距过大，会导致换能器尺寸不必要地增大，阵元间距过小，焦平面上侧向声场旁瓣级数增大，阵元间相互干扰增加，而且给换能器的加工制作带来不便。综合几个方面，阵元间距在略小于半个波长时比较合适。

2.4 声波频率的影响

声波的频率在很大程度上决定了声波对缺陷、裂缝或者组织畸变的探测能力，直接关系到检测成像的分辨率和波束的衰减速度，因此，选择合适的工作频率，是设计相控阵列换能器首先要考虑的问题之一。一般说来，频率的选择主要由聚焦区域深度和面积、被检对象大小、材料、媒质的反射、衰减等特性以及抑制旁瓣等综合因素来决定。

图 6 给出了不同声波频率下的环形相控阵列声场分布。可以看到，如果声波频率偏低，如 0.5 MHz，轴向声场的主声束较宽。随着频率的增加，无论是轴向还是侧向声场，主声束都变得较窄，声场指向性更加尖锐，侧向声场旁瓣得到很好的抑制，换能器分辨率确实得到提高。但是，随着声波频率的提高，波长减小，在近场同样一段区域中相位变化得更激烈，导致声场起伏程度加剧。在其它参数不变的情况下，频率的提高等效于阵元间距以及阵元宽度的增加。

此外，从图 6 我们可以看到，在频率比较低的情况下，计算出来的轴向声场上声压最大值的位置与预设的焦点位置并非完全一致，计算出来的实际焦点要比预设的焦点更靠近换能器一些，但随着频率的增

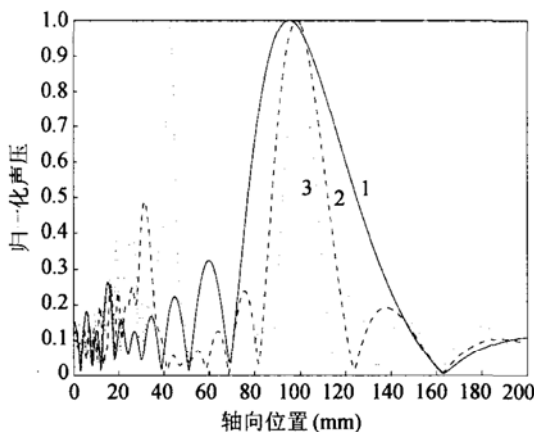
加，这个差值会慢慢减小，当预设焦点为 100 mm 时，我们在频率为 0.5 MHz, 1 MHz 和 1.5 MHz 时计算出来的焦点位置分别为 95.5 mm, 99 mm 和 100 mm。这种情况可以这样来解释：环形相控阵声场不仅取决于各阵元的相位，而且还取决于各阵元到场点的距离，在预设焦点处，虽然来自各阵元的声波同相到达实现相干叠加，但由于不同阵元之间距离的差异，预设焦点处的声场并不是整个声场中的最大值，在预设焦点靠近换能器不远处，距离对声场的贡献要大于相位对声场的贡献，因此实际焦距略小于预设焦距，这种现象在线性相控阵中也会出现^[16]。

2.5 预设焦距的影响

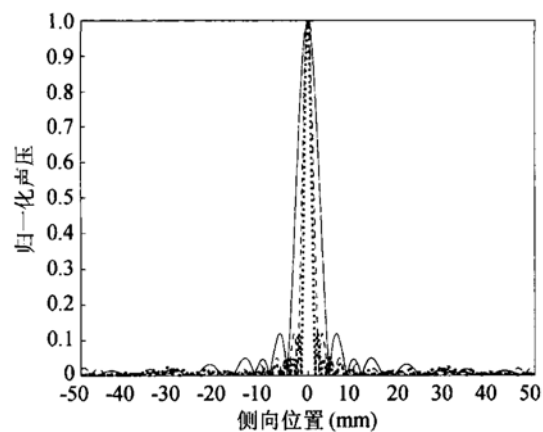
我们在频率为 0.5 MHz，焦距 F 分别为 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm, 120 mm, 140 mm 和 160 mm 的情况下分析了相控阵声场的变化，发现当预设焦距变化时，声场侧向分布受到的影响很小，特别是侧向分布的主瓣宽度几乎不受影响，而声场的轴向分布受预设焦距的影响比较大，随着预设焦距的增大，轴向声场的主声束 (-3 dB) 宽度逐渐加宽，近场起伏加剧，旁瓣增大得很快。当焦距为 160 mm 时，旁瓣最大峰值上升到主峰峰值的一半以上。并且无论焦距怎么变化，预设焦点和实际焦点位置并不重合，随着焦距的增加，预设焦点和实际焦点之间的距离就越大，具体情况见表 5。

表 5 不同焦距时轴向声场主声束 -3 dB 宽度以及两种焦点间的差异 ($f = 0.5 \text{ MHz}$)

预设焦点 (mm)	40	60	80	100	120	140	160
实际焦点 (mm)	39.5	59	77.5	95.5	113	129.5	145
两种焦点的差异 (mm)	0.5	1	2.5	4.5	7	10.5	15
-3 dB 宽度 (mm)	9.1	15.3	23.7	34	46	59.3	73.6



(a) 声场轴向分布



(b) 声场在 $z = 100 \text{ mm}$ 处的侧向分布

图 6 不同声波频率下的环形相控阵列声场, (1) 0.5 MHz, (2) 1 MHz, (3) 1.5 Hz.

3 实验研究

我们设计并制作了由 8 个等面积的同心平面圆环组成的环形相控阵 (PZT 压电陶瓷), 每个圆环的上表面是一组电极, 背面是另一组电极, 每个圆环的具体参数见表 6, 由于加工过程中的热胀冷缩现象, 各环面积是近似相等的。图 7 是极化后同心圆环阵列的实物照片, 经测试, 每个圆环的共振频率在 300kHz 附近, 我们在环形阵列的中心位置再加入一个直径小于 1 mm 的微型压电换能器用于接收反射回波。本文实验中发射信号为具有 30 个周期的频率为 300 kHz 的正弦脉冲。

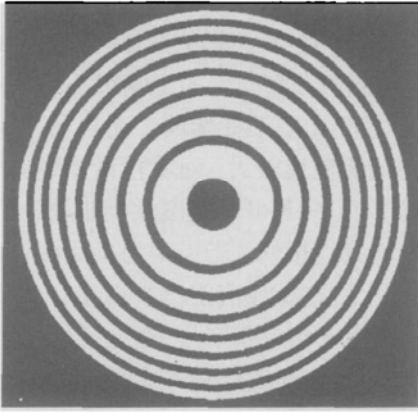


图 7 极化后的同心圆环相控阵列

表 6 环形相控阵换能器参数

阵元序号	1	2	3	4	5	6	7	8
内半径 (mm)	5	14.40	20.05	24.65	28.72	32.45	35.95	39.28
外半径 (mm)	13.07	18.75	23.25	27.45	31.18	34.65	37.95	41.23

3.1 辐射声场

我们首先利用水听器实验测量了环形相控阵列的辐射声场, 图 8(a) 和 8(b) 分别给出了预设焦距为 80 mm 时的轴向和侧向声场分布, 作为对比, 图中还给出了相应情况下的理论计算结果。可以看到, 实验测得的焦平面侧向声场与理论计算的结果吻合较好, 尤其是主瓣部分, 两者基本重合。对于轴向声场, 无论预设焦距如何变化, 实验测得的数据和理论计算的声场在分布形状和变化趋势都比较相似, 主瓣宽度和 -3 dB 宽度也较符合, 但理论曲线相对实验曲线向换能器方向有一个小的偏移, 其原因除了实验误差外, 可能还需要深入的分析 and 考虑。

焦距的变化对侧向声场的影响不大。在过焦点的侧向声场分布中, 主声束宽度受焦距变化的影响很小, 旁瓣的最大值随焦距的增大有微弱的上升趋势

势。然而, 焦距对声场的轴向分布有较大的影响。图 8(c) 给出了预设焦距分别为 80 mm, 85 mm, 90 mm, 95 mm, 100 mm, 105 mm, 110 mm, 115 mm 和 120 mm 时测得的轴向声场分布, 可见, 随着焦距的增加, 场点到换能器的距离增加, 从而, 轴向声场在形状基本不变的情况下总体上有变小的趋势。

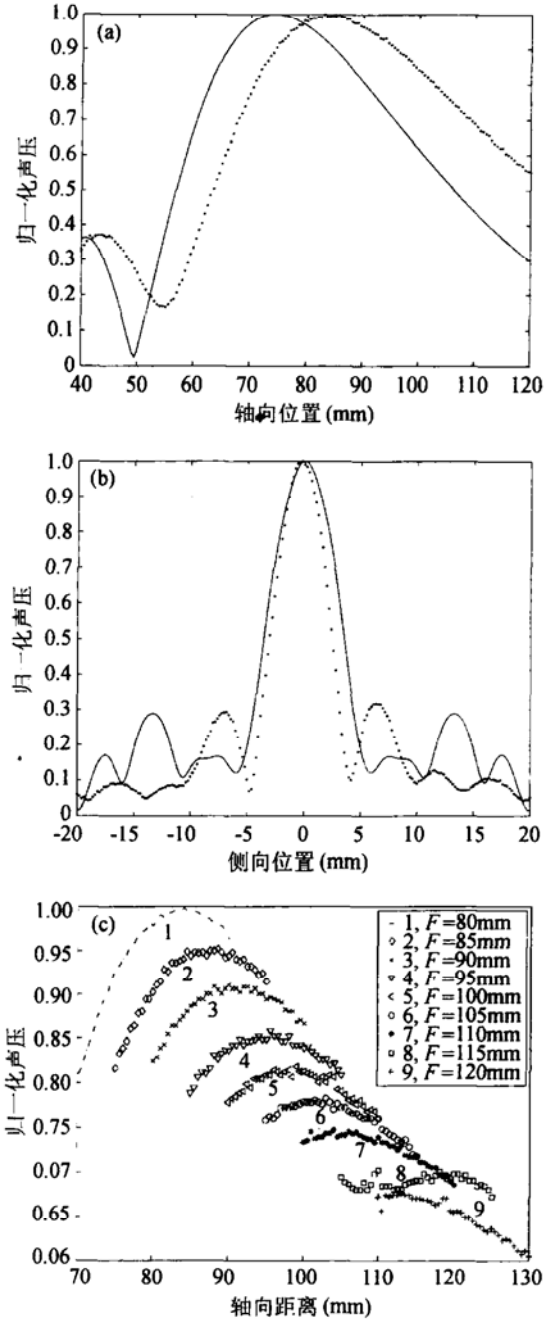


图 8 环形相控阵声场分布, 实线和点线分别表示理论和实验结果, (a) 轴向声场分布, (b) 焦平面处的侧向声场分布, (a) 和 (b) 中预设焦距为 80 mm, (c) 为焦距变化时轴向声场的测量结果。

3.2 反射声场

在测量反射声场时我们利用环形相控阵的中心阵元作为接收换能器, 首先, 控制各阵元的时延使声

场实际焦点处在 $F_0 = 100\text{ mm}$ 处，当换能器与反射面之间的距离 D 从 40 mm 变化到 150 mm 的整个过程中，我们计算了换能器中心阵元接收到的反射声场，见图 9(a)。图中横坐标表示换能器到反射面的距离 D ，纵轴表示反射声压，实线和虚线分别代表反射界面为铝和有机玻璃时的反射声场。我们看到，当 $D = 50\text{ mm}$ 时，换能器刚好处在换能器关于界面的镜像换能器的预设焦点位置上，反射声场恰好聚焦于换能器位置处，所以此时换能器接收到的反射声场最强，而 $D \approx 82\text{ mm}$ 时，来自虚源（换能器关于界面的镜像）的各个圆环的声场在此形成“准反相”叠加，形成了图 9(a) 中的极小值。由于实验上的限制，我们只测量了换能器和反射界面之间的距离从 80 mm 变化到 120 mm 这个范围内的换能器接收到的反射声场，见图 9(b)。无论反射界面是铝还是有机玻璃，实验测量和理论结果是吻合的。而且当换能器与反射界面的距离为 100 mm ，即换能器辐射声场的焦点正好落在反射界面的时候，反射界面上的声场最大，从而此时换能器接收到的反射回波形成局部最大值。当反射面在声场焦点附近移动时，如发射换能器与反射面的距离在 $95\sim 110\text{ mm}$ 之间变化时（焦距保持不变），换能器中心阵元接收到的反射回波的幅值并没有多大的变化。从图中还可以看到，当反射面为有机玻璃时，换能器接收到的声场要比反射界面为铝时弱得多，因此我们可以根据反射声场的强弱变化来大致判断反射界面的一些特性。

在实际情况中，反射界面常常存在起伏，使得换能器中心轴线并非总是垂直于反射界面，因此，考察换能器平面和反射界面之间的夹角 θ 对反射声场的影响是很有实际意义的。图 9(c) 给出了反射声场与 θ 的关系图，图中，换能器和反射面之间的距离保持 100 mm 不变，并使声场始终聚焦在反射界面上且焦距为 100 mm 。从图中可以看到，反射声场受夹角 θ 的影响是比较大的，回波峰值起伏较明显，但无论是理论计算还是实验测量结果，回波峰值并不总是随着夹角的增大而单调减小，而是有些起伏，在 5° 和 7.3° 左右形成极值，仔细分析可以发现 5° 和 7.3° 这两个角度恰好对应于换能器侧向声场中两个最大旁峰的位置。

3.3 动态聚焦

当反射界面与换能器的距离 D 不断变化时，我们如果改变各个圆环的时延，使得焦距 F 总是等于 D ，辐射声场总是聚焦在反射界面上，即实现动态聚焦。这时，当换能器和反射界面之间的距离 D 从 80 mm 变化到 120 mm 时，我们测量了换能器接收

到的反射声场，如图 10 所示。从图中可以看到，如果动态调节换能器预设焦距，使声场总是聚焦在反射界面上，这时换能器与反射界面的距离越近，换能器所能接收到的反射回波就越强，这正是我们所期待的。

在实际应用中常常需要实现动态聚焦，使声场总能聚焦在反射界面上，从而能获得较大的反射声场，实际情况中往往是根据上一点反射回波到达的时间来确定声场需要聚焦的位置，当反射界面变化时声场总能聚焦在反射界面上。

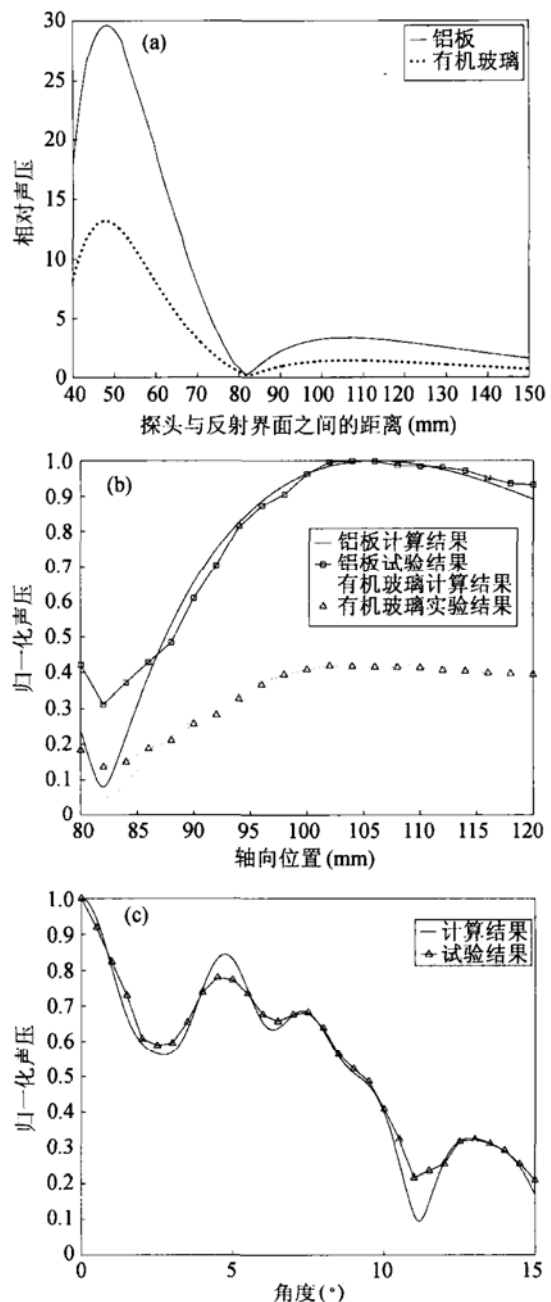


图 9 焦距为 100 mm 时换能器在液固界面上的反射声场 (a) 理论计算结果, (b) 实验结果, (a) 和 (b) 为换能器到界面距离 D 变化时的结果, (c) 为换能器与反射界面夹角变化时的反射声场。

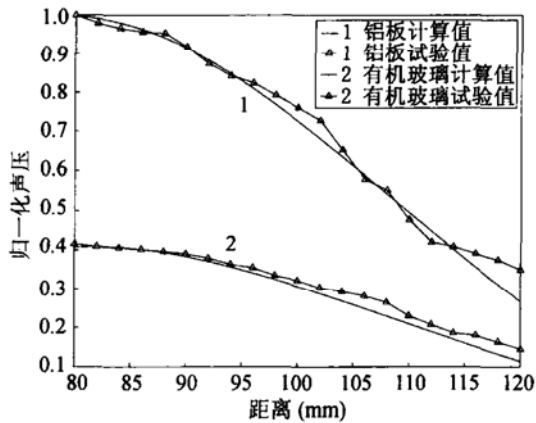


图 10 动态聚焦时换能器接收到的反射声场, 实线表示理论结果, 三角连线表示实验测量结果。

4 结论

本文通过理论和实验研究了环形相控阵换能器辐射声场及在液固界面上反射声场的聚焦特性。对于辐射声场, 我们得到了轴向声场的严格解析表达式, 并导出了空间声场的渐近解析表达式, 研究了阵元数目、阵元间距、工作频率以及焦点位置等因素对聚焦声场的影响。对于环形相控阵聚焦声场在液固界面上的反射, 理论上导出了反射声场的严格表达式及渐近表达式, 实验上测量了反射界面变化时的反射声场, 得到了理论和实验相符的结果。

环形相控阵列能实现动态聚焦与检测, 可以在阵元数目较少的情况下形成高分辨率的聚焦声场, 相对于凹面换能器而言具有优越的声波辐射特性。

参 考 文 献

- Lawrence Azar. Experimental characterization of ultrasonic phased arrays for nondestructive evaluation of concrete structures. *Materials Evaluation*, 1999; **57**(2): 134—135
- 车小花, 乔文孝, 阎相祯. 相控线阵声波辐射技术在反射声波测井中的应用探讨. *测井技术*, 2004; **28**(2): 108—111
- Tezuka S, Hashimoto S, Togasaki T et al. A two-dimensional array probe that has a huge number of active channels. *IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2003: 960—963
- 霍 健, 施克仁. 高强度聚焦超声二维相控阵列的声场控制模型研究. *声学学报*, 2005; **30**(3): 207—214
- Voldi Maki et al. Dynamically focused transducer applied to the CAST imaging tool. SPWLA 32 Annual Logging Symposium, 1991, paper HH
- Rambow F H K. Transducer for Use with Borehole Televiewer Logging Tool. U.K. Patent Application, GB2168569A, 1986
- 黄载祿等. 数字超声电视测井系统的几个参数分析. *华中理工大学学报*, 1991; **19**(增刊): 9—16
- 薛 梅, 楚泽涵. 声波测井仪器发展评述. *石油仪器*, 2000; **14**(5): 6—10
- 柯昌松, 陶 果等. CBIL 换能器声场的理论分析. *测井技术*, 2001; **25**(1): 16—20
- 霍彦明, 陈亚珠. 几类旋转圆弧式自聚焦换能器的声场特性分析. *声学学报*, 2001; **26**(1): 13—18
- 李国伟, 陈亚珠. 不等间距排列的球面高强度聚焦超声相控阵列. *声学学报*, 2001; **26**(2): 117—120
- 钱盛友. 热疗用环形平面换能器声场特性的研究. *应用声学*, 2003; **22**(3): 11—16
- 李 锦等. 环状活塞换能器辐射声场研究. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2003; **31**(4): 28—31
- Florence Dupenloup, Jean Yves Chapelon et al. Reduction of the grating lobes of annular arrays used in focused ultrasound surgery. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq., Contr.*, 1996; **43**(6): 991—998
- 刘 晨. 超声数字式相控阵换能器动态聚焦系统及其实现声束的聚焦扫描. 中国科学院声学研究所硕士论文, 1999
- 张碧星, 陆铭慧, 汪承灏. 用时间反转法在水下波导介质中实现自适应聚焦的研究. *声学学报*, 2002; **27**(6): 541—548
- ZHANG Bixing, LU Minghui, WANG Chenghao. Study of self-focusing in underwater waveguide by time reversal method. *Chinese Journal of Acoustics*, 2003; **22**(1): 22—32
- 吴 昊, 张碧星, 汪承灏. 声波在固体板中的多径传播及时间反转声场. *声学学报*, 2005; **30**(3): 215—221
- WU Hao, ZAHNG Bixing, WANG Chenghao. Multi-path propagation of acoustical wave and time reversal field in a solid plate. *Chinese Journal of Acoustics*, 2005; **24**(1): 21—32
- 李太宝著. 计算声学. 北京: 科学出版社, 2005
- 赖溥祥. 环形相控阵换能器辐射和反射声场研究. 中国科学院声学研究所硕士论文, 2005