

平凹柱面换能器线阵声场研究

王 勇, 林书玉, 张小丽, 付志强

(陕西师范大学 应用声学研究所, 陕西 西安 710062)

摘 要:提出了一种用平凹柱面换能器作为阵元的新型一维超声线阵。将平凹柱面换能器线形排列构成线阵,建立阵元及线阵的声场分布的数值模型,对其声场分布受线阵参数的影响和对线阵声束的控制进行了研究,并对其声场进行了数值模拟。研究表明,可用平凹柱面换能器作为阵元构成线阵,线阵的指向性在阵元的长度方向上受阵元长度影响,在宽度方向上可通过调节线阵的参数实现,线阵声场在对阵元不加相控的情况下表现出聚焦特性,且其声束辐射方向及其焦点位置可通过阵元激励相位进行控制。在对检测深度变化较小的情况下,这种线阵可用来进行无损检测。

关键词:平凹柱面换能器;一维线阵;数值模拟;无损检测

中图分类号:O426.9;TB559

文献标识码:A

Study on the Sound Field of Plano-concave Cylinder Transducer Array

WANG Yong, LIN Shuyu, ZHANG Xiaoli, FU Zhiqiang

(Institute of Applied Acoustic, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: This article proposed a new kind of one-dimensional linear array taking array element with the plano-concave cylinder transducer. The plano-concave cylinder transducer was linear arranged to be a linear array. Numerical model of sound field of element and array were established. Study on the effect of array parameter to its sound field distribution and the sound beam control was finished. The numerical analysis and the simulation of the sound field were carried on. It's found that the directivity in the array element length direction was influenced by the element length, which could be done through the adjustment of array parameter in the width direction. Sound field of the array showed a focusing character on the condition of with no control of array element, and the radiation direction of the beam and the focus zone could be controlled through the stress phase of the element. This kind of array could be used to non-destructive test with less change of the detection depth.

Key words: plano-concave cylinder transducer; linear array; numerical simulation; non-destructive examination

0 引言

超声相控阵因其能通过对阵元激励相位的控制而实现对阵列声场分布的调节和声束控制,30多年来,在医学超声检测和工业超声无损检测方面愈来愈受人们的重视。人们对超声相控阵的研究也早已从传统的一维线阵发展到二、三维甚至是分数维,相对应的算法及信号处理方法也在不断完善和发展,其在医学上的应用也有从无损检测方面转向功率超声治疗方面的扩展^[1-7]。

传统的一维超声相控阵是以矩形纵振动换能器作为阵元,各阵元近似产生柱面声波,通过对阵元激励相位进行控制从而实现了对声束的控制,包括声束

偏转方向及其焦点位置。对于单个阵元,其声压幅值随距离减小,这一点不利于声场能量的利用。考虑到平凹柱面换能器的结构及其声场的分布特性,本文提出用平凹柱面换能器作为阵元构造一维线阵的设计,以提高一维线阵的声场能量的利用。

1 平凹柱面换能器声场

1.1 理论基础

理论上,任意形状辐射面的辐射声场可由克希荷夫(Kirchhoff)积分式计算得到(设时间因子为 $e^{j\omega t}$):

$$\Phi(\mathbf{R}) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \frac{e^{jkr}}{r} - \Phi \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \left(\frac{e^{jkr}}{r} \right) \right) ds \quad (1)$$

收稿日期:2011-09-08

基金项目:研究生培养创新基金资助项目(2012CXB014)

作者简介:王勇(1979-),男,陕西渭南人,博士生,主要研究方向为超声工程。E-mail:wdori@qq.com。通信作者:林书玉(1962-),男,山东莱州人,博士生导师。Email:sylin@snnu.edu.cn。

式中: S 为辐射面的积分曲面; R 为从观察点 M 到 S 表面上 ds 面元的距离; Φ 为 S 所限区域中存在的声场势函数; $k=2\pi/\lambda$ 为波数; r 为声场中观察点到面元的距离; \mathbf{n} 为沿声场辐射方向的单位矢量。计算振动面辐射的声场时,当表面只给出 Φ 和 $\frac{\partial\Phi}{\partial\mathbf{n}}$ 两者之一时,则可用克希荷夫积分导出此种情况下具有精确解的公式。考虑到理想情况下的点声源,放置于一个绝对硬 ($\frac{\partial\Phi}{\partial\mathbf{n}}|_s=0$) 的平面上,则式(1)可写为

$$\Phi(\mathbf{R}) = \frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{\partial\Phi}{\partial\mathbf{n}} \frac{e^{jkr}}{r} ds \quad (2)$$

式(2)即为惠更斯(Huygens)第一积分公式,是计算平面发射和接收器声场的基本公式,在形式上是精确的。其与克希荷夫公式相比,其主要优越性是计算半空间里的声场只需一个已知量 $\frac{\partial\Phi}{\partial\mathbf{n}}=u_n$,也即只须知道平面的振动速度,即可求得 Φ ^[8]。考虑到声场声压 $p=-j\omega\rho\Phi$,式(2)可写为

$$p(\mathbf{R}) = \frac{-j\omega\rho}{2\pi} \iint_S u_n \frac{e^{jkr}}{r} ds \quad (3)$$

图 1 为凹柱面换能器的结构。图中, a 为换能器的长度, A 为换能器凹面的曲率半径, l 为换能器宽度。将其放在三维坐标中,并给出了在研究过程中用到的参数。

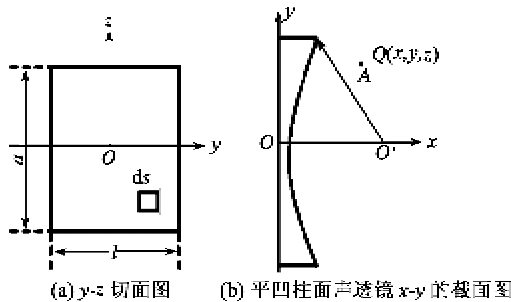


图 1 坐标系中的相关参数

假设面元 $ds(x_0, y_0, z_0)$ 的振动速度幅值 u_a 在阵元平面均匀分布,其经过声程 r_1 后到达凹面,再经 r_2 到达声场中 $Q(x, y, z)$ 点。由于设计的换能器特别薄,故声压经 r_1 到凹面过程中可忽略其幅值的变化,认为其只有相位的变化。如果将柱面表面分为 M 个小的闭区域,则根据式(3)可近似地得到相对声压

$$|p| \propto \left| \sum_{i=1}^M \frac{1}{r_{2i}} e^{-j(k_1 r_{1i} + k_2 r_{2i})} \right| \quad (4)$$

式中: k_1, k_2 分别为材料 1、2 中的波数,且 $k_1=2\pi f/c_1, k_2=2\pi f/c_2, f$ 为声压频率, c_1, c_2 为声压分别在材料 1、2 中的声速; r_1, r_2 为声压分别在材料 1 和 2

中的声程, $r_1=A(1-\cos\theta), r_2=[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2]^{1/2}, x_0=A(1-\cos\theta), y_0=A\sin\theta$, 其中 θ 为面元 $ds(x_0, y_0, z_0)$ 到 O' 的连线与 x 方向的夹角。

在实际运算过程中, M 不可能取得无限大,因此,在运用式(4)求解曲面相关参数时,会存在一些其他问题^[9],所以本工作用式(4)近似研究柱面换能器声场的分布。在此,利用式(4)研究在焦平面上声场指向性受阵元几何参数的影响。在模拟过程中,选取参数 $A=0.02\text{ m}, a=0.01\text{ m}, l=0.0002\text{ m}, f=3\text{ MHz}, c_1=6320\text{ m/s}, c_2=1500\text{ m/s}$ 。

1.2 阵元宽度对声场的影响

控制 a 和 A 的值不变,研究 l 对阵元辐射声场的影响,如图 2 所示。图中 κ 为焦平面上声压最大值下降 3 dB 对应的 x 轴距离(称其为 -6 dB 区间宽度)与 l 的比值,此值的大小可反映换能器 y 方向上的对声束方向的聚焦能力, κ 值越小,表示换能器对声束方向的聚焦作用越明显。 p_m 为在焦平面上的相对声压最大值。由图可得出,随 l 的减小,对声束方向聚焦作用下降,同时声压最大值也减小,说明换能器在宽度方向的聚焦能力下降。在宽度减小时,声压幅值 -6 dB 区间宽度会增加,这使得利用平凹柱面换能器作为阵元制作一维线阵成为可能。

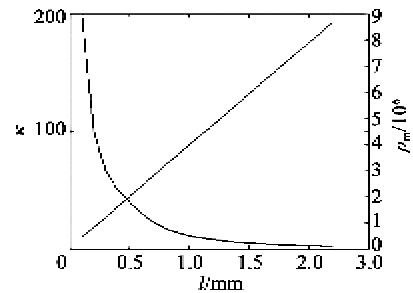


图 2 l 对阵元声场的影响

1.3 阵元长度对声场的影响

图 3 为 a 对声场的影响。图中 β 为 xOy 平面上声束传播方向与 x 轴的夹角, p 为焦平面上的相对声压。由图可知,当 l 一定时,在 $\beta=0$ 时,即在 x 方向上声压存在一尖锐的主瓣(主极大值),同时在 x 轴两侧对称位置也出现 2 个声压幅值较大的旁瓣(次极大值)。考虑 a 的变化发现,在长度增加时,主瓣极值下降,旁瓣极值相对增加,同时旁瓣位置逐渐向 x 轴靠近。当 $a=0.01\text{ m}$ 时,在 $\beta=0$ 位置会出现一尖锐的主瓣,而其旁瓣可认为相对消失,说明此时阵元在长度方向的聚焦作用最好。在后面的研究中,我们选取 $a=0.01\text{ m}$ 。

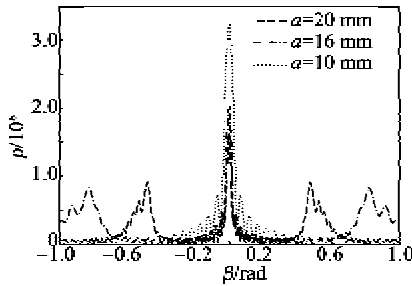


图3 a对阵元声场的影响

在模拟过程中发现,阵元长度对宽度方向指向性的影响,以及阵元宽度对长度方向指向性的影响均不明显。因此,在考虑用平凹柱面换能器作为阵元构造的一维线阵在阵元长度方向的指向性时,只需考虑阵元的长度。同时,如果阵元长度决定,其在长度方向的指向性也已确定,且较稳定。

2 平凹柱面换能器线阵声场

利用平凹柱面换能器作为阵元,将其线形排列,构成一维线阵如图4所示,其N为阵元个数,d为阵元间距。线阵的声场可看成是单个阵元在空间辐射声场的叠加,所以,线阵在空间某点O'(x,y,z)的辐射声场的相对声压为

$$|p| \propto \left| \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \frac{1}{r_{2ji}} e^{-j(k_1 r_{1ji} + k_2 r_{2ji})} \right| \quad (5)$$

式中: $r_{1ji} = A(1 - \cos \theta)$; $r_{2ji} = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0 + z_j)^2]^{1/2}$, $z_j = j \times (d + l)$ 为第j个阵元中心在z轴的坐标。在模拟过程中,选取阵元个数为奇数,且中间阵元编号为0,往两侧依次为 $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 。

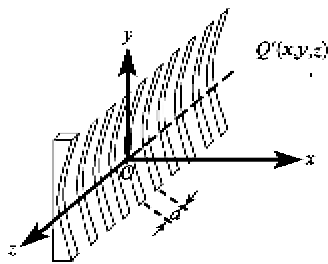


图4 平凹柱面换能器线阵结构

2.1 阵元间距

固定N=19,模拟声场分布在z方向上的指向性与d的关系,如图5所示,图中alpha为xOz平面上声速与x方向的夹角。当d=0.05 mm时,alpha=0处,即在x轴方向上,声场声压极值相对较大,有明显的主瓣,但相对较宽,旁瓣在x轴两侧对称分布,极值相对较小。当d=0.10时,主瓣变窄,极值变小,-6 dB宽度增加,两侧旁瓣逐渐变大变宽。当

d=0.30时,原来的主瓣分化为2个关于x轴对称的等大的次极大值,主极大值消失。由图5可知,阵元间距的增加,在一定程度上可使声压主瓣变窄,使声场指向性增强,但同时会引起声压旁瓣的出现。这一变化规律与传统一维线阵阵元间距对声场的影响相似^[10]。

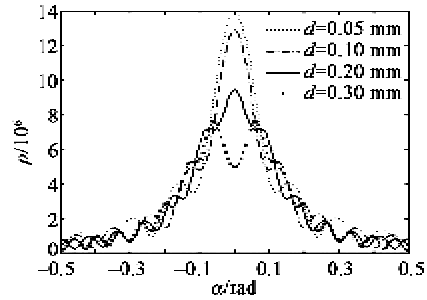


图5 d对线阵声场分布的影响

2.2 阵元个数

在阵元参数不变的情况下,控制d=0.1 mm,模拟在z方向上的指向性与N的关系,如图6所示。由图可知,当N较小时,声场沿z方向的指向性存在一尖锐的主瓣,但其峰值相对较小,随着N的增加,主瓣变窄,峰值相对变大,-6 dB宽度变小。但当N继续增加时,图形主极大值消失,主瓣开始分裂为对称的2个甚至多个不等的极大值,辐射声场出现旁瓣,声压极值变化不明显,说明此时线阵在z方向的聚焦作用减弱或消失。分析原因认为,能否出现单一主极大值的N,与单个阵元的-6 dB宽度有关,如果-6 dB宽度较大,则对应的阵元个数较多。所以若线阵阵元的个数设计恰当,在阵元激励不加任何影响的情况下可得到良好的指向性。就本文给出参数,设定N=9较恰当,此种情况下,声场的-6 dB宽度最窄,指向性最好。

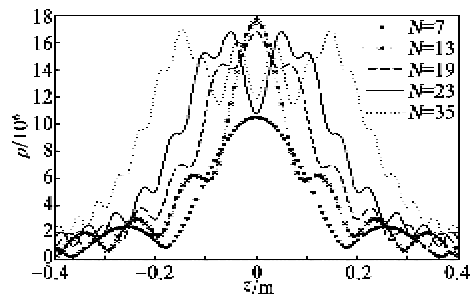


图6 N对线阵声场分布的影响

2.3 声束控制

在对线阵阵元激励不加任何影响的情况下,该种线阵声场可实现一个明显的聚焦区域,得到良好

的指向性及声压峰值。如果对线阵的阵元激励施加相位控制,同样可实现对线阵声束进行相位控制,实现相控阵的优势。研究过程中发现,与传统相控阵相比,由于阵元的特殊结构,决定阵元本身具有聚焦特性,进而决定由此种阵元构成的线阵声场的焦距较稳定,通过相位改变焦距较难,所以该种线阵的深度检测范围较小,仅限于焦距附近,这一特征与传统的一维线阵区别较大^[11],决定了该种线阵较适合对固定深度范围的检测。

图 7 为相位控制及幅度加权对声束的影响。由图 7(a)可知,通过对阵元激励相位控制可对声束偏转方向实现一定的控制,同时声压幅值的极值变化不明显。如果对阵元激励进行幅度加权控制,则可改变声压极值,但对其指向性的影响不明显,这一特点与传统的一维线阵相似^[12-13],图 7(c)中其加权系数 w 分别为 0, 0.1, 0.5。在系数增大的情况下,声压幅值的极值增大,旁瓣幅值相对减小,但声压幅值的指向性变化不明显。

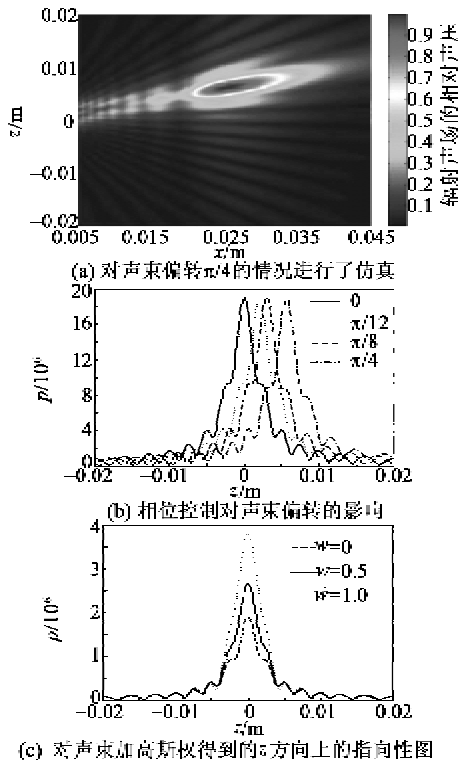


图 7 相位控制及幅度加权对声束的影响

3 结论

通过对提出的用平凹柱面聚焦换能器构成的一维线阵声场的分布及其阵元与阵列参数对线阵声场分布影响的分析,发现:

1) 该种线阵在阵元长度方向上的指向性受阵元的长度影响较大,且较稳定。

2) 线阵在阵元宽度方向的指向性可通过调节阵元个数和阵元间距实现。阵元个数和间距对线阵声场的影响与传统一维线阵相似。

3) 线阵声场在声束传播方向存在焦点,其焦距声压及位置在激励频率一定情况下受阵元曲率半径,阵元个数及阵元间距影响较大。

4) 阵列声束可通过阵元的激励相位进行控制,但通过控制焦距大小的效果不明显。

如果对阵元及阵元个数和间距的参数设计适当的话,该种线阵结构可实现良好的声场指向性并同时兼顾对声压的聚焦作用。在对检测深度变化要求不大的情况下,这种线阵可用来进行检测。

参考文献:

[1] HUANG Ruiju, SCHMERR J R L W. Characterization of the system functions of ultrasonic linear phased array inspection systems[J]. Ultrasonics, 2009, 49(2): 219-225.

[2] AZS L, SHI Y, WOOH S C. Beam focusing behavior of linear phased arrays [J]. NDT&E International, 2000, 33 (3), 189-198.

[3] BUIOCHI F, MARTINEZ O, ULLATE L G, et al. 3D computational method to study the focal laws of transducer arrays for NDE applications[J]. Ultrasonics, 2004, 42(1/5): 871-876.

[4] GELLY J F, BUREAU J M. Two-dimensional (2D) transducer arrays for medical ultrasonic imaging [J]. RBM-Revue Europeenne De Technologie Biomedicale, 1998, 20 :243-246.

[5] SAKHAEI S M, MAHLOOJIFAR A, GHASSEMIAN H. A transformation based method to design ultrasound array [J]. Ultrasonics, 2009, 49(2): 179-184.

[6] MONDAL S C, WILCOX P D, DRINKWATER B W. Design and evaluation of two dimensional phased array ultrasonic transducers [J]. AIP Conference Proceedings, 2005, 24: 899-905.

[7] 陆明珠, 万明习, 施雨, 等. 多阵元高强度聚焦超声多目标控制方法研究[J]. 物理学报, 2002, 51(4): 928-934.

LU Mingzhu, WAN Mingxi, SHI Yu, et al. Multi-objective control for multi-elements HIFU surgery [J]. ACTA Physica Sinica, 2002, 51(4): 928-934.

(下转第 675 页)