DOI: 10.3901/JME.2020.12.026

自聚焦线阵声场特征和检测应用

赵新玉 闫浩明 张佳莹

(大连交通大学材料科学与工程学院 大连 116028)

摘要: 相控阵超声技术近些年发展迅速, 并被广泛应用于工业无损检测领域, 但采用线阵换能器检测时, 存在阵元长轴方向检测分辨率较差的问题。针对传统线阵换能器无法在阵元长轴方向聚焦的问题, 提出采用自聚焦线阵换能器检测, 可同时在阵元长轴和短轴方向获得较好检测分辨率。针对自聚焦线阵换能器声场计算方法和分布特征开展研究, 发展了非近轴近似高斯声束叠加方法来计算自聚焦线阵辐射声场, 为验证该方法的有效性, 与瑞利积分数值方法进行精度和效率比较。进一步, 利用上述理论方法来对比分析传统线阵和自聚焦线阵焦点强度、焦点尺寸和焦柱长度等参数随偏转角度变化的分布特征。对圆柱形工件进行检测, 结果表明自聚焦线阵换能器可以检测出普通线阵换能器难以检测出轴向缺陷。理论和试验结果表明所提出的非近轴近似高斯声束叠加方法可以较准确地计算自聚焦线阵辐射声场, 同时自聚焦线阵换能器对轴向和环向缺陷的检测灵敏度均较高。

关键词: 超声无损检测; 自聚焦线阵; 声场计算; 高斯声束叠加

中图分类号: TB553

Self-focusing Linear Array Sound Field Characteristics and Testing

ZHAO Xinyu YAN Haoming ZHANG Jiaying

(School of Material Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028)

Abstract: Phased array ultrasonic technology has been developed rapidly in recent years and is widely used in industrial non-destructive testing. However, resolution on the long axis of the element is poor when linear array is employed. The traditional linear array cannot be focused on the long axis of the element, in order to overcome such problem the self-focusing linear array is developed recently. Self-focusing linear array is used to focused on both short and long axis of the element to acquire high resolution. To calculate the sound field of the self-focusing line array, the non-paraxial approximation Gaussian sound beam superposition method is developed. Compared with Rayleigh integral numerical method, the effectiveness of the method is verified. Furthermore, those parameters (focus intensity, focal size, focal length, etc.) of both traditional and self-focusing linear array with the variational steering angle is investigated using the proposed calculation method. The cylindrical workpiece is detected with self-focusing linear array transducer and the linear array transducer. The results show that the self-focusing linear array transducer can detect that the linear array transducer is difficult to detect axial defects. It is seen from theoretical and experimental results that the sound field of the self-focusing line array is calculated precisely with the proposed non-paraxial approximation Gaussian sound beam superposition method. The sensitivity is high on both short and long axis of the element of self-focusing line array.

Key words: ultrasonic nondestructive testing; self-focusing linear array; acoustic field calculation; Gaussian sound beam superposition

0 前言

相控阵超声技术可以灵活地实现声束的偏转、聚焦以及电子扫描, 逐步被应用到工业无损检测领域^[1-4]。线阵换能器是相控阵超声换能器中最为常用

的一种, 线阵换能器每个阵元加工成小矩形, 沿矩形的短轴方向布置阵列, 这样在阵元排列方向平面内可以实现电子聚焦, 但是在阵元长轴方向无法实现聚焦, 因此长轴方向检测分辨率较差。为了克服上述问题, 有研究人员提出了自聚焦线阵换能器设计思路, 通过改变长轴方向阵元曲率或者在阵元前面增加声透镜来实现长轴方向的自聚焦, 利用这种方法, 在长轴方向可以实现固定深度的自聚焦, 同时短轴方向可以实现相控阵电子聚焦, 可以同时获

* 国家重点研发计划(2016YFF0203000)和国家自然科学基金项目(51905070, 51575134, 51705484, 51175113)资助项目。20190704收到初稿, 20200209收到修改稿

得较好的纵向(阵元长轴方向)和横向(阵元短轴方向)分辨力。在医学上,这种高能量自聚焦线阵换能器已被应用于肿瘤及癌症等治疗领域,并向其他临床领域发展^[5-6];在工业上,自聚焦线阵换能器已被应用在车轴检测等方面。

为了模拟相控阵超声换能器的实际工作情况,需要对其辐射声场进行模拟仿真研究^[7-10]。高斯声束叠加方法是较为通用的声场计算的方法,在计算精度和效率上都具有较大的优势,得到了国内外学者的深入研究。WEN 等^[11]最早提出了高斯声束叠加的方法来近似表示圆盘源的辐射声场,并取得了较好的近似结果;随后 DING 等^[12]采用两个圆盘源相乘的方式,表示矩形源表面质点速度分布。SCHMERR^[13]较为系统的描述了多高斯声束叠加的方法,较为准确地模拟了活塞式探头的辐射声场,并阐述了具有物理焦距的换能器声场计算方法。笔者团队曾提出非近轴近似高斯声束叠加方法,来计算相控阵换能器辐射声场。近期也将高斯声束叠加方法扩展到表面波换能器辐射声场计算中^[14-15]。

自聚焦线阵换能器已获得实际应用,但是对其声场计算方法和声场特征的研究还鲜有报道。本文首先采用非近轴近似高斯声束叠加方法,来发展适用于自聚焦线阵换能器的声场计算方法,并与瑞利积分的计算结果进行进一步比较分析,在验证该声场计算方法有效性的基础上,分析了自聚焦线阵焦点强度、焦点尺寸和焦柱长度等参数随偏转角度的变化特征。

1 理论模型

自聚焦线阵换能器如图 1 所示,其中 X 为阵元宽度与阵元排列方向, Y 为阵元长度方向。 X - Z 平面内,可以通过延时法则来实现电子聚焦,各阵元在 Y 方向上具有固定曲率半径,可在 Y - Z 平面内实现

图 1 自聚焦线阵换能器简图

物理聚焦。这种设计使自聚焦线阵换能器的声束能量更加集中,在阵元长轴方向也可以获得较好的分辨力。

1.1 瑞利积分

瑞利积分法是一种较为常用的计算相控阵换能器辐射声场的方法,这种方法主要采用球面波叠加的方式来计算换能器的辐射声场,所以可以得到较高的计算精度。但是数值方法所需要的计算时间较长,通常以瑞利积分法的计算结果作为参照,来说明其他声场计算方法的精度。

瑞利积分法在许多文献及教科书中都有着较为详细的介绍,其需要对换能器表面做数值积分,表达式为

$$p(r, \omega) = \frac{-i\omega\rho}{2\pi} \int_{S_0} \frac{\exp(ikr)}{r} dS_0 \quad (1)$$

式中, r 为换能器表面的任意一点到介质中计算位置的距离, ρ 为介质密度, k 为波数, S_0 代表换能器表面积。

1.2 自聚焦线阵非近轴近似多高斯声束模型

DING 等^[12]利用两个圆盘源的乘积来表示矩形源表面质点法向速度分布,长和宽分别为 $2a_1$ 、 $2a_2$ 的矩形源,其表面质点归一化法向速度可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{v_z(x_0, y_0, z_0=0, \omega)}{v_0(\omega)} = \\ \text{circ}(x_0^2/a_1^2) \text{circ}(y_0^2/a_2^2) = \\ \sum_{n=1}^{10} \sum_{l=1}^{10} A_n A_l \exp(-B_n x_0^2/a_1^2 - \\ B_l y_0^2/a_2^2) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, A 、 B 为采用优化方法获得的系数。

自聚焦线阵换能器阵元在阵元长轴方向具有固定物理焦距,表面速度分布如下

$$\begin{aligned} \frac{v_z(x_0, y_0, z_0=0, \omega)}{v_0(\omega)} = \text{circ}(x_0^2/a_1^2) \\ \exp(-ik\rho^2/2F) \times \text{circ}(y_0^2/a_2^2) = \\ \sum_{n=1}^{10} \sum_{l=1}^{10} A_n A_l \exp(-B_n x_0^2/a_1^2 - \\ ikx_0^2/2F - B_l y_0^2/a_2^2) \end{aligned} \quad (3)$$

比较两式可知,具有几何焦距的聚焦探头需要对复数系数 B 进行修正,如下

$$B \rightarrow B + \frac{ika^2}{2F} \quad (4)$$

式中, F 为自聚焦半径。

采用非近轴近似的方法来计算相控阵换能器的辐射声场,表达式为^[14]

$$p(r, \omega) = \rho c \sum_{n=1}^{10} \sum_{l=1}^{10} \frac{A_n A_l \exp(ikR)}{\sqrt{1 + \frac{iB_n R}{D_1}} \sqrt{1 + \frac{iB_l R}{D_2}}} \times \exp\left(\frac{-ik}{2} \frac{x^2/R}{1 + \frac{iB_n R}{D_1}}\right) \exp\left(\frac{-ik}{2} \frac{y^2/R}{1 + \frac{iB_l R}{D_2}}\right) \quad (5)$$

式中, D_1 、 D_2 为瑞利距离。

结合式(4)、(5), 可以得到基于非近轴近似的自聚焦矩形换能器单个阵元辐射声场表达式为

$$p(r, \omega) = \rho c \sum_{n=1}^{10} \sum_{l=1}^{10} \frac{A_n A_l \exp(ikR)}{\sqrt{1 + \frac{iB_n R}{D_1} - \frac{R}{F}} \sqrt{1 + \frac{iB_l R}{D_2}}} \times \exp\left(\frac{-ik}{2} \frac{x^2/R}{1 + \frac{iB_n R}{D_1} - \frac{R}{F}}\right) \exp\left(\frac{-ik}{2} \frac{y^2/R}{1 + \frac{iB_l R}{D_2}}\right) \quad (6)$$

自聚焦线阵换能器辐射声场可以表示为各个阵元叠加的结果, 需要各阵元相位项叠加相应时间延迟, 合成后的辐射声场表达式为

$$\tilde{p}(r, \omega) = \sum_{n=1}^N p(r, \omega) \exp(i\omega t_n) \quad (7)$$

式中, N 为实际计算时所采用的阵元数目, t_n 为各个阵元发射的时间延迟。

2 自聚焦线阵声场计算

本节主要通过非近轴近似多高斯声束法(non-paraxial multi Gaussian, 以下简称 NMG)来计算自聚焦线阵换能器的辐射声场, 首先以瑞利积分法(Rayleigh-Sommerfeld Integral, 以下简称 RSI)计算结果作为参考, 来比较本文所采用计算方法的精度。然后结合普通线阵换能器的声场分布, 来分析自聚焦线阵换能器辐射声场的特性。

在计算过程中, 主要计算自聚焦线阵换能器在钢材料中的辐射声场, 在钢材料中纵波声速取 5.9 km/s, 密度取 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。计算时, 选取坐标轴情况如图 1 所示, 选取线阵中心为坐标原点, 阵元短轴也是排列方向为 X 轴, 阵元长轴方向为 Y 轴, 工件深度方向为 Z 轴, 自聚焦线阵换能器的具体计算参数详见表 1。

表 1 自聚焦线阵换能器参数

中心频率/MHz	阵元数目/个	阵元 X 轴方向尺寸/mm
5.5	32	0.5
阵元 Y 轴方向尺寸/mm	阵元间隔/mm	自聚焦半径/mm
10	0.1	35

图 2 为当偏转角度为分别为 15° 和 30° 时, 钢

图 2 X - Z 平面内质点速度幅值分布图

材料中 X - Z 平面内质点振动幅度分布图, 从二维图像中可以看出, NMG 和 RSI 两种计算方法得到的偏转聚焦声场分布特征具有较好的一致性。

为了更直观地比较偏转角度变化时两种方法计算精度的差异, 下面给出轴向和离轴方向的一维质点速度幅值分布。其中轴向是指偏转轴线方向, 离

轴是指某固定 Z 轴距离时($Z=35$ mm 时)沿 X 轴方向的速度幅值分布, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 当偏转角度变化时, NMG 法仍具有较好的计算精度, 计算结果与 RSI 计算结果较为一致。其他偏转角度和离轴距离的声场分布也具有很好一致性, 这里不再赘述。

图 3 自聚焦线阵换能器聚焦声场轴向和离轴 X 方向分布

综上所述, 本文采用的 NMG 法可以较好地计算自聚焦线阵换能器辐射声场。在计算速度上, 以 X - Z 平面内为例, 在笔记本电脑上, RSI 法所需时间约为 260 s, 而 NMG 法仅需 50 s 左右, 在计算自聚焦线阵换能器的声场时, NMG 法在计算精度较好的同时, 计算效率上具有较大的优势。

3 自聚焦线阵声场特征分析

通过第 2 节讨论, 了解了 NMG 法在计算自聚

焦线阵换能器辐射声场时具有较好计算精度和效率。本节利用该方法比较自聚焦线阵换能器和普通线阵换能器辐射声场的差异。

为了直观显示阵元长轴方向上声束聚焦特征, 图 4 给出了自聚焦线阵换能器和普通线阵换能器 Y - Z 平面(自聚焦平面)内的声场分布。从中可以看出, 右侧普通线阵换能器声束能量比较发散, 而左侧采用自聚焦技术以后, 声束能量出现明显汇聚现象, 在自聚焦曲率半径 35 mm 偏前位置出现能量最大值。

(a) 偏转 15° 时自聚焦线阵换能器质点速度分布

(b) 偏转 15° 时普通线阵换能器质点速度分布

图 4 两种线阵换能器 Y - Z 平面内质点速度幅值分布

X - Y 平面内声场分布也可以反应出声束能量汇聚特征, 从图 5 中可以较为直观地看出。自聚焦线阵换能器的焦点尺寸要小于普通线阵换能器, 在电子聚焦方向(X 轴方向), 声束的聚焦主要是由聚焦法则控制, 所以在电子聚焦方向, 自聚焦线阵换能器与普通线阵换能器焦点尺寸基本相同。在 Y 轴方法, 自聚焦线阵换能器能量更加集中, 焦斑更接近圆形, 因而其 Y 轴方向可以获得更好的检测分辨力。

为了量化比较自聚焦线阵换能器的聚焦特性, 比较了自聚焦线阵换能器和普通线阵换能器一维质点振动幅度分布。图 6 为垂直聚焦(焦距 35 mm)离轴质点振动幅度分布, 6a、6b 和 6c 分别对应轴线 25 mm, 30 mm, 35 mm 处的 Y 轴质点振幅。可以看出, 自聚焦线阵换能器声束能量均高于普通线阵换能器, 幅值最高点应出现在电子焦点(焦距 35 mm)偏前的位置, 在 $Z=30$ mm 时能量最高。

图 5 两种线阵换能器 X - Y 平面质点速度幅值分布 图 6 离轴 Y 方向质点振动幅度分布

为了更具体地说明自聚焦线阵换能器的声场特性, 分别计算了自聚焦线阵换能器焦点强度、焦柱长度和焦点尺寸等参数随偏转角度的变化特征, 并与普通线阵作比较。

图 7 为两种换能器轴向声压最大值与偏转角之

间的关系, 从图中可以看出, 两种线阵换能器的轴向声压的最大值均随着偏转角度的增加而降低, 自聚焦线阵换能器的轴向声压最大幅值始终高于普通线阵换能器, 提高 30%~35%。

图 8 为自聚焦线阵换能器与普通线阵换能器在

不同偏转角度下焦柱尺寸。选取与最高点幅值之比为 -3 dB 处作为焦柱边界。图中标记位置为幅值最高处(中心正方形或圆形处)及焦柱尺寸边界(上下端点)。从图 8 中可以看出, 两种线阵换能器的幅值最高点位置均提前于电子聚焦位置, 普通线阵换能器幅值最高点出现位置约为 32 mm, 自聚焦线阵换能器出现位置约为 29 mm, 它们随偏转角度变化较小。在焦柱长度方面, 两种线阵换能器焦柱长度均随着偏转角度的增加而增加, 但自聚焦线阵换能器焦柱长度的增加速度要小于普通线阵换能器, 自聚焦线阵换能器焦柱长度比普通线阵换能器的焦柱长度小 $10\% \sim 15\%$ 。

图7 不同偏转角度时两种换能器轴向声压最大值

图8 两种线阵换能器在不同偏转角度下焦柱长度

图9为偏转角度不同时, 自聚焦线阵换能器与普通线阵换能器在电子聚焦方向上的焦点尺寸分布情况。选取与最高点幅值之比为 -3 dB 处作为焦点尺寸边界。从图9中可以看出, 两种线阵换能器在电子聚焦方向上的焦点尺寸均随着偏转角的增加而增大, 两种线阵换能器在电子聚焦方向上的焦点尺寸基本一致, 垂直聚焦时的焦点尺寸约为 40° 偏转聚焦时的 60% 。

图10为不同偏转角度下, 自聚焦线阵换能器与普通线阵换能器在自聚焦方向上的焦点尺寸分布情

况。从图中可以看出, 自聚焦线阵换能器的焦点尺寸为普通线阵换能器的 75% 左右, 可以较为有效地提高检测分辨力。两种换能器在自聚焦面内的焦点尺寸主要由几何聚焦方式决定, 所以随偏转角度变化较小。采用 -6 dB 计算焦柱长度和焦点尺寸也具有相同结果, 不再赘述。

图9 两种线阵换能器离轴X方向上焦点尺寸

图10 两种线阵换能器离轴Y方向上焦点尺寸

4 检测试验

针对圆柱形工件开展了自聚焦线阵检测试验, 工件外径 160 mm, 壁厚 15 mm 在工件内表面加工两个平底孔缺陷, 深孔距外表面 3 mm, 浅孔距内表面 3 mm, 轴向和环向缺陷, 槽形缺陷宽 0.5 mm、深 1 mm、长 10 mm。采用传统线阵和自聚焦线阵沿母线布置换能器, 图11为工件示意图和实际检测图。闸门检测工件底波, 获得的C扫描图像如图12所示。从检测结果中可以看出, 普通线阵换能器由于纵向分辨力较差, 无法发现轴向缺陷, 而自聚焦线阵换能器由于阵元长轴方向发生汇聚聚焦, 焦点处能量较强, 可以同时发现环向和轴向缺陷, 缺陷图像也更加清晰, 有效提高了检测灵敏度。

图11 圆柱形工件检测示意图

图12 两种线阵换能器实际检测 C 扫描图像

5 结论

(1) 针对自聚焦线阵换能器声场计算问题, 提出非近轴近似高斯声束叠加方法, 通过与瑞利积分方法的对比, 表明非近轴近似高斯声束叠方法在具有较好计算精度的同时, 具有较高计算效率。

(2) 自聚焦线阵换能器几何焦点处振幅随着偏转角度增大而减小, 普遍比普通线阵换能器提高 30%~35%。

(3) 自聚焦线阵换能器的焦点位置与普通线阵换能器相比提前约 2 mm, 焦距随着偏转角度变化较小。自聚焦线阵换能器的焦柱长度均随着偏转角度的增加而变长, 比普通线阵换能器焦柱长度短 10%~15%。

(4) 在自聚焦平面, 自聚焦线阵换能器的焦点尺寸比普通线阵换能器小 25%左右, 而且在自聚焦平面内的焦点尺寸几乎不随偏转角度增加而发生变化; 在电子聚焦平面, 两种线阵换能器的焦点尺寸较为接近。

(5) 自聚焦线阵换能器可以同时检测出圆柱形工件的环向和轴向缺陷, 且缺陷成像效果比普通线阵换能器更清晰。

参 考 文 献

- [1] SONG S J, KIM H J, KANG S C, et al. Model-based optimization of phased array ultrasonic testing[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2010, 29(3): 209-219.
- [2] 段晓敏, 赵新玉, 孙华飞. 矩形表面波探头声场的高斯声束叠加法[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 216-221.
DUAN Xiaomin, ZHAO Xinyu, SUN Huafei. Multi-Gaussian beam model for ultrasonic surface waves with angle beam rectangular transducers[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 216-221.
- [3] 张碧星, 王文龙. 凹面相控阵聚焦声场在液固界面上的反射和折射[J]. 物理学报, 2008, 57(6): 3613-3619.
ZHANG Bixing, WANG Wenlong. Reflection and refraction on the fluid-solid interface of acoustic field excited by a concave phased array[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(6): 3613-3619.
- [4] 林莉, 杨平华, 张东辉, 等. 厚壁铸造奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术概述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 12-20.
LIN Li, YANG Pinghua, ZHANG Donghui, et al. Review of phased array ultrasonic testing for thick wall cast

- austenitic stainless steel pipeline welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 12-20.
- [5] CHEN G S, LIN C Y, JEONG J S, et al. Design and characterization of dual-curvature 1.5-dimensional high-intensity focused ultrasound phased-array transducer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2012, 59(1): 150.
- [6] 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[J]. 声学学报, 2001, 26(20): 117-120.
LI Guowei, CHEN Yazhu. A spherical high intensity focused ultrasound phased array with unequal space between elements[J]. Acta Acustica, 2001, 26(20): 117-120.
- [7] WANG Julin, WANG Xiaodong, XIAO Ling. The focus steering for high intensity focused ultrasound phased array based on real-time phase shift calculation[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2012, 31(1): 29-38.
- [8] 孙芳, 曾周末, 王晓媛, 等. 界面条件下线型超声相控阵声场特性研究[J]. 物理学报, 2011, 60(9): 435-440.
SUN Fang, ZENG Zhoumo, WANG Xiaoyuan. Acoustic field characteristics of ultrasonic linear phased array for an interface condition[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(9): 435-440.
- [9] SPIES M. Modeling of transducer fields in inhomogeneous anisotropic materials using Gaussian beam superposition[J]. NDT&E International, 2000, 33(3): 155-162.
- [10] HUANG R, SCHMERR L W, SEDOV A. Multi-Gaussian Beam Modeling for Multilayered Anisotropic Media, I: Modeling Foundations[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2007, 18(4): 193-220.
- [11] WEN J J, BREAZEALE M A. A diffraction beam field expressed as the superposition of gaussian beams[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1988, 83(5): 1752-1756.
- [12] DING D, ZHANG Y, LIU J. Some extensions of the Gaussian beam expansion: Radiation fields of the rectangular and the elliptical transducer[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 113(6): 3043.
- [13] SCHMERR L W. Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems Models and Measurements[M]. New York: Springer, 2007.
- [14] 赵新玉, 刚铁, 张碧星. 非近轴近似多高斯声束模型的相控阵换能器声场计算[J]. 声学学报, 2008, 33(5): 475-480.
ZHAO Xinyu, GANG Tei, ZHANG Bixing. Prediction of radiation beam fields from an array transducer with nonparaxial multi-Gaussian beam model[J]. Acta Acustica, 2008, 33(5): 475-480.
- [15] ZHAO Xinyu, SCHMERR L W, SEDOV A, et al. Ultrasonic beam models for angle beam surface wave transducers[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2016, 27(3): 175-191.
-
- 作者简介: 赵新玉, 男, 1979 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为焊接和检测技术与装备, 以主要完成人身份发表学术论文 30 余篇, 其中 SCI 源刊 10 篇, EI 源刊 15 篇。
E-mail: xyz@djtu.edu.cn
- 闫浩明, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为先进无损检测技术。
E-mail: 1083299589@qq.com
- 张佳莹, 女, 1988 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为焊接结构的无损检测与评价。
E-mail: zjy@djtu.edu.cn