

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

超声多波聚焦及声偏振方向控制方法*

阎守国[†] 张碧星

(中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要 在超声多波聚焦思想的基础上,通过数值模拟计算,分析了时间反转法的多波聚焦特性以及对声场偏振方向进行控制的可行性。结果表明,在待测目标的不同位置处,时间反转法都能够实现多波聚焦的效果,使具有不同传播速度、不同偏振特性的多种声波自适应聚焦。但是,在介质的近表面处,由于受到表面波的影响,多波聚焦声场仍然具有椭圆偏振特性,无法实现声场偏振方向精确控制的目的;而位于介质内部的多波聚焦点受到表面波影响很小,数值计算结果表明此时多波聚焦声场具有线偏振特性,通过改变声源前后两个脉冲的激发幅度和相位,可以控制声场的偏振方向,达到偏振方向扫描的目的。该文的研究为精确检测裂纹方向或界面性质提供一种可能的途径。

关键词 多波聚焦,时间反转,偏振方向控制

中图分类号: TN64

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)01-0063-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.009

Ultrasonic multi-wave focusing and acoustical polarization direction control method

YAN Shouguo ZHANG Bixing

(State Key Laboratory of Acoustic, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract On the basis of the idea of multi-wave focusing, the multi-wave focusing characteristic of time reversal method and the feasibility of controlling the polarization direction of the wave field are analyzed by numerical simulation. The results show that the time reversal method can realize the effect of multi-wave focusing at different positions of the target, which makes the different waveforms focused. However, at the near surface of the medium, the multi-wave focused field still has the elliptical polarization characteristic due to the influence of the surface wave, and can not achieve the precise control of the polarization direction of the wave field. The multi-wave focusing point inside the medium is rarely influenced by the surface wave, the numerical results show that the multi-wave focused field has the linear polarization characteristic. Through changing the excitation amplitude and phase of the front and rear pulses of the source, the polarization direction of the wave field can be controlled, and the purpose of polarization direction scanning is achieved. The study of this paper provides a probably new method to precisely detect crack direction and interface characteristic.

Key words Multi-wave focus, Time reversal, Polarization direction control

2017-10-26 收稿; 2017-11-28 定稿.

*国家自然科学基金项目 (11574343, 11774377)

作者简介: 阎守国 (1981-), 男, 辽宁大连人, 博士, 助理研究员, 研究方向: 超声传播与成像。

[†] 通讯作者 E-mail: yanshouguo@mail.ioa.ac.cn

1 引言

在实际超声检测中,为了尽量提高检测的信噪比和分辨率,检测到更小更细微的组织结构,人们开展了大量关于超声聚焦与成像检测的理论、方法和技术研究。实现超声聚焦的方法有多种,早期的聚焦方法是通过控制超声换能器探头的形状和类型来实现声束聚焦,如声透镜^[1]、物理透镜^[2-3],或将换能器制成曲面或阶梯等外形^[4]。这些方法的最大缺点就是焦距固定且聚焦声束方向不能偏转,如果不移动换能器探头,就难以实现扫描与成像检测。

在此背景下,超声相控阵成像检测技术被提出,并在工业无损检测行业中取得了快速发展^[5]。国外许多研究机构和公司相继推出了越来越成熟的商业仪器和设备^[6-7]。对于外形复杂、具有不规则曲面的被检对象,传统的超声检测非常困难。而超声相控阵技术能很方便地控制聚焦声束的形状和方向,因此,在气轮机叶片和涡轮圆盘的检测^[8]、石油天然气管道焊缝的检测^[9]、火车轮轴检测^[10]、核电站设备检测和航空材料的检测^[11]等领域,超声相控阵技术都取得了较为理想的应用效果并研制出许多超声相控阵检测的专用设备。但是现有的超声相控阵技术,只是将某一种类型的声波(比如纵波)聚焦在预定目标上,而不是将所有类型的声波都同时聚焦在目标上。如果这种波的能量相对较小,在整个波列中占据的分量很小的话,那么利用这种单一声波类型(以下简称波型)实现相控阵聚焦就难以取得好的效果,有时甚至会失效。

众所周知,声波在固体介质中传播时,存在纵波、横波以及导波等多种不同类型的波,每一种声波都具有不同的传播特性,携带了介质以及缺陷的不同特征。如果能同时利用介质中不同性质的声波进行多波聚焦,不仅能得到更加丰富的介质和缺陷信息,而且,多种声波聚焦能够使焦点处的声波能量增强,可以有效提高检测信噪比,提高超声定量检测能力。另一方面,沿相同方向传播的纵波和横波具有不同的声偏振方向,如果纵波和横波同时到达焦点形成多波聚焦,焦点处质点的实际声偏振方向是纵、横波偏振合成后的结果。在多波聚焦的基础上,通过改变纵、横波的激发强度,可以在一定角度范围内,任意控制焦点处的质点声偏振方向,形成多个偏振方向的扫描,实现对缺陷形状和方向的多角度

扫描和检测。

声波时间反转(Time reversal)法是一种多波聚焦方法,可以实现多波聚焦。它是一种自适应的多波聚焦方法,能使多种波型同时在原声源位置处实现聚焦^[12-14],既能使来自不同路径的波^[15-16],又能使不同类型的波^[17]实现同时聚焦。目前在超声检测领域,时间反转法的研究工作主要集中在超声波聚焦特性研究上^[18-19]。最近,我们利用时间反转法自适应聚焦的特点研究了多波聚焦与扫描的方法和手段,并分析了这种方法的有效性^[20],但并没有研究采用时间反转法实现聚焦后焦点处质点的声偏振方向及其特性。本文通过数值模拟,在我们超声多波聚焦的研究基础上,进一步研究采用时间反转法实现超声多波聚焦及控制焦点处声偏振方向的方法与可行性,分析控制质点声偏振方向所需的条件,为超声多波聚焦及声偏振方向控制的实际应用奠定了基础。

2 基本原理

利用声波时间反转法可以方便地使纵波、横波以及导波等多种波型同时聚焦到预定目标上,这种方法具有自适应聚焦的特性,针对复杂介质,时间反转多波聚焦方法具有更加明显的技术优势。利用时间反转法进行多波聚焦的基本原理和具体步骤为

(1) 在图1所示的模型中,假定需要将多波聚焦在目标A点上,A点可以是待检测区域中的任意一点。首先,假设A点处存在一个虚拟点声源,激发脉冲信号 $U_0(t)$,通过数值计算得到该声源在O点处产生的弹性振动,并将垂直表面的位移振动信号记为 $U_N(t)$ 。显然 $U_N(t)$ 中可能包括纵波、横波以及导波等多种波动形式产生的波包信号,这些波包通常混叠在一起很难区分,但在某些特定条件或通过数据处理的手段,这些波包可以被区分出来,以便分别利用;

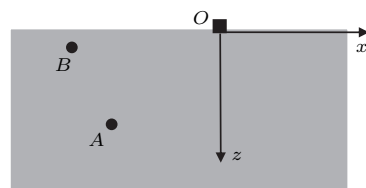


图1 模型示意图

Fig. 1 Model configuration

(2) 将信号 $U_N(t)$ 进行时间反转处理, 得到 $U_N(T - t)$, 其中 T 表示在时间反转处理过程中开窗所取的时间宽度。然后将这个时间反转信号 $U_N(T - t)$ 加载到 O 点的换能器阵元上进行激励。这时 $U_N(T - t)$ 中的每一个波包都将激励出纵波、横波以及导波等多种声场, 虽然介质中的总声场非常复杂, 但在焦点 A 处会形成一个多波聚焦声场, 时间反转聚焦具有时间和空间上的双重聚焦特性, 可以有效提高聚焦声束的分辨率和信噪比;

(3) 由于多波焦点处同时存在纵波、横波及导波等多种波动形式, 声场总偏振方向由不同波型的偏振经过矢量叠加后确定, 因此, 如果能够改变 $U_N(T - t)$ 中各分波波包的激发幅度, 理论上可以

改变多波焦点处质点的声偏振方向, 不断调整各波型的激发幅度比, 可以对某一固定检测点进行多个声偏振方向的检测, 达到声偏振方向扫描的目的。

3 数值模拟及分析

采用 Comsol 进行有限元数值仿真计算, 验证不同位置处时间反转法的多波聚焦及质点偏振方向控制的效果。假设换能器所在 O 点为坐标原点, 多波聚焦点 A 位于介质内部 $(-30 \text{ mm}, 30 \text{ mm})$ 位置, 多波聚焦点 B 位于近表面 $(-42 \text{ mm}, 5 \text{ mm})$ 位置处, 数值计算所采用的介质参数及模型参数如表 1 所示。

表 1 数值计算模型参数

Table 1 The parameters of the simulation model

介质参数			模型参数		
密度	纵波速度	横波速度	中心频率	空间网格	时间间隔
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$c_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	f_0/kHz	$\Delta h/\text{mm}$	$\Delta t/\text{s}$
7870	5770	3140	500	0.533	4.737×10^{-8}

根据声学互易原理, A 点 (B 点) i 方向激发在 O 点接收到 j 方向的声波信号和 O 点 j 方向激发在 A 点 (B 点) i 方向接收到的声波信号是等价的。因此, 我们在时间反转法第 (1) 步和第 (2) 步中都将 O 点作为声源, 将 A 点 (B 点) 作为接收点, 将 i 和 j 都假定为竖直方向: 即先假设换能器所在 O 点处存在一个竖直方向的力源, 激发脉冲信号 $U_0(t)$, 通过数值计算得到该声源在 A 点处竖直方向的弹性振动波形, 记为 $U_N(t)$, 然后对 $U_N(t)$ 进行时间反转, 并加

载在 O 点再次激励。理论和数值计算结果都表明这种处理不会对本文的分析产生影响。

首先考虑不进行时间反转处理的情况。图 2 为当 O 点加载虚拟声源后 (声源形式为 500 kHz 主频的余弦包络脉冲, 带宽 1 MHz, 本文所用声源的幅值均经过归一化处理, 以便对比目标点处的质点振动幅度) 通过数值计算得到的在 A 点处产生的质点位移振动波形以及偏振方向, 在图 2(b) 的极坐标图中, 角度代表声波的偏振方向, 半径为质点总位移的

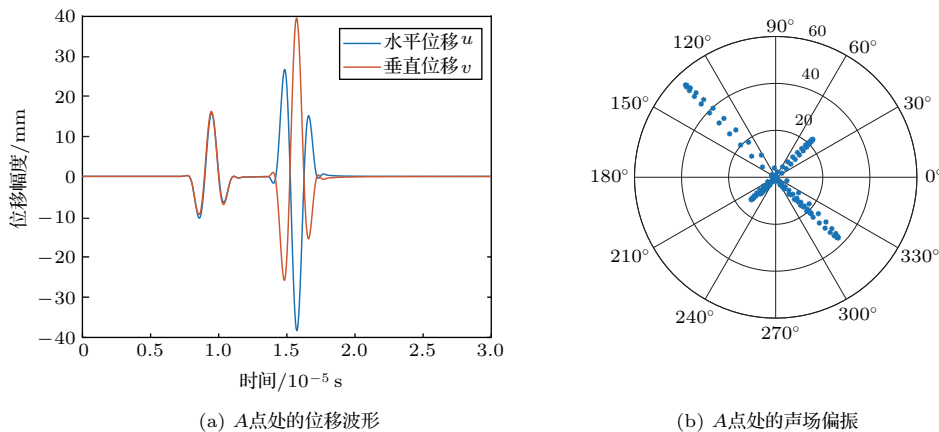


图 2 虚拟声源激发时聚焦点 A 处的位移波形及声场偏振状态

Fig. 2 The displacement waveforms and polarization direction excited by the virtual source at A point

绝对值,即偏振幅度,图中画出了所有时刻焦点处质点的振动轨迹,体现了声场的偏振状态。从图2中可以看到在A点处主要存在纵波(P波)和横波(S波)两种形式的振动,声偏振状态为线偏振,沿着声波传播方向($45^\circ \sim 225^\circ$ 方向)的为纵波偏振,垂直声波传播方向($135^\circ \sim 315^\circ$ 方向)的为横波产生的偏振,由于在介质内部表面波的影响很弱,在横波偏振方向上有微弱的椭圆偏振,但可以忽略。

图3为相同情况下,位于近表面的聚焦点B处产生的质点位移振动波形以及声场偏振方向,从图3(b)的声场偏振状态图可以看到,此时在B点处主要是表面波起到主导作用,质点偏振呈现出椭圆偏振特性。

然后考虑时间反转多波聚焦效果。图4是将图2(a)中A点处的垂直位移经过时间反转处理后再加载到O点进行激励,通过数值计算得到的聚焦点A处产生的质点位移振动波形以及偏振方向

图,从图4(a)中可以看到此时A点存在三个振动波包,从前到后分别是 P_1 波(声源第一个波包激发出的纵波场)、M波(声源第一个波包激发出的横波和第二个波包激发出的纵波线性叠加形成的多波声场)、以及 S_2 波(声源第二个波包激发出的横波场),对比图4(a)和图2(a)中的质点振动幅值可以看到,在声源具有相同幅值的情况下(都经过归一化处理),图4(a)中的多波声场引起的质点垂直位移强于图2(a)中的质点垂直位移,信噪比提高2 dB,体现了多波聚焦能够提高信噪比的特点。在图4(b)中我们根据图4(a)中多波聚焦声场出现的时间,将多波声场产生的质点偏振用橙红色点线表示,可以看到,在聚焦点A处,多波聚焦声场仍然具有显著的线偏振特性,其实际偏振方向由 S_1 波(第一个波包激发的横波)和 P_2 波(第二个波包激发的纵波)引起的质点偏振合成得到。

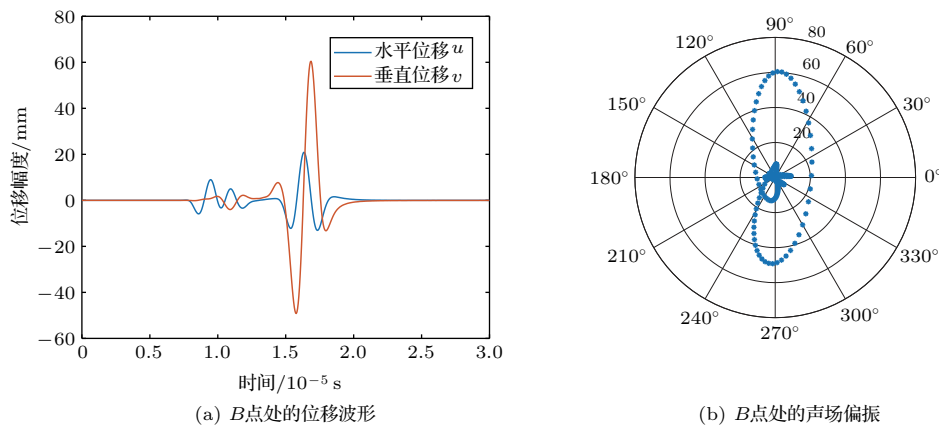


图3 虚拟声源激发时聚焦点B处的位移波形及声场偏振状态

Fig. 3 The displacement waveforms and polarization direction excited by the virtual source at B point

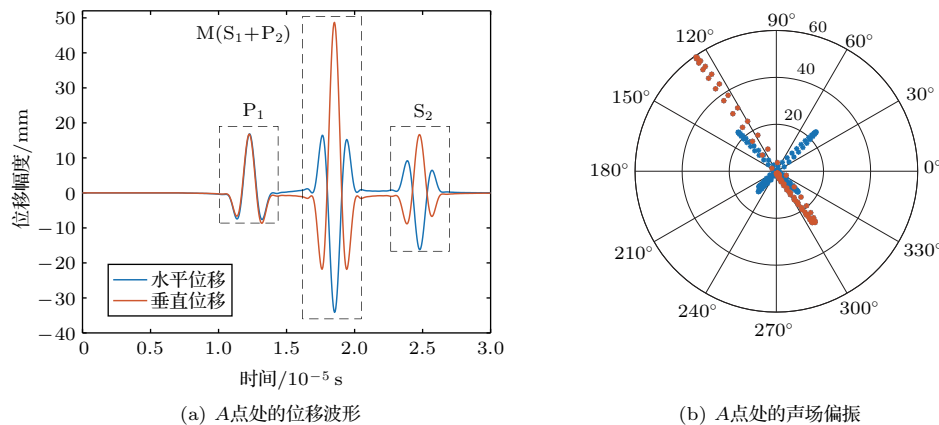


图4 时间反转信号激发时聚焦点A处的位移波形及声场偏振状态

Fig. 4 The displacement waveforms and polarization direction excited by the time reversal source at the A point

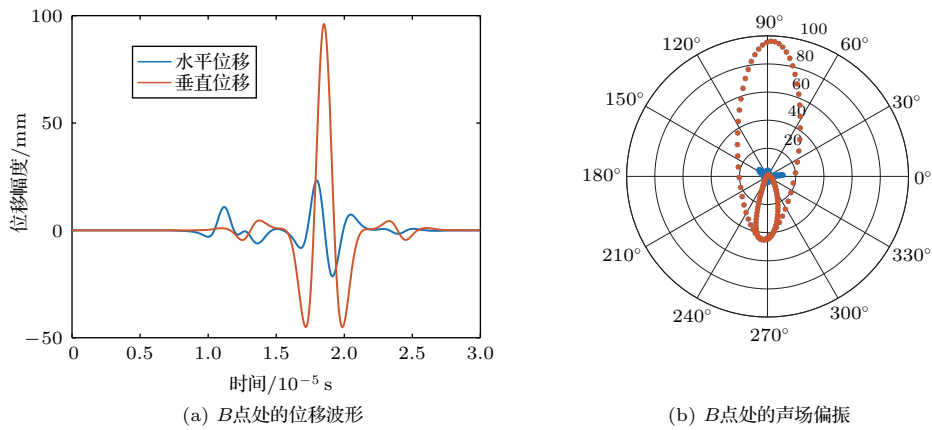


图5 时间反转信号激发时聚焦点B处的位移波形及声场偏振状态

Fig. 5 The displacement waveforms and polarization direction excited by the time reversal source at the B point

与图4类似，图5是将图3(a)中B点处的垂直位移经过时间反转处理后再加载到O点进行激励，通过数值计算得到的B点处的质点位移振动波形以及偏振方向图。同样，从图5(a)中可以看到此时B点存在多波聚焦的效果，聚焦后质点垂直方向的位移相比图3(a)明显增大，可提高4 dB的信噪比。图5(b)中橙红色点线依然表示多波聚焦时的质点偏振状态，可以看到，此时焦点处的声场仍然呈现椭圆偏振特性，其振动主方向为垂直方向。

综合图4、图5，在A、B两点处采用时间反转法均可得到具有多波聚焦效应的声场，一定程度上提高了检测信号的信噪比。在文献[20]中已经对多波聚焦特性，尤其是相控阵多波聚焦声场的特性进行了较为详细的研究，本文不再进行相关讨论。以下主要考察多波聚焦后焦点处声场偏振的特点，以及偏振方向控制的可能性。对于声场偏振方向的控制，由于A点处的多波聚焦声场仍具有线偏振特性更容易实现，而位于表面处的B点受到表面波的强烈影响，具有椭圆偏振特性，不易于利用多波实现声偏振方向的精确控制。经过对多个位置的声场进行计算分析，我们认为，在本文所讨论的介质条件下，当聚焦点位置距离表面达到3个表面波波长以上时，受到表面波的影响较小，多波焦点主要呈现线偏振特性，可以对质点的偏振方向进行控制。下文仍以A点为例进行讨论。

由于A点位于介质内部，主要受到体波的影响，因此时间反转法所形成的多波聚焦信号具有比较简单的形式，可以明显区分为前后两个波包，如图6所示。根据时间反转声源信号的特点，第一个波包

激励产生的横波和第二个波包激励产生的纵波将同时到达A点，形成多波聚焦声场，由于横波和纵波的偏振方向相互垂直，通过改变多波聚焦点处横波和纵波声场的幅度理论上可以形成沿任意方向偏振的声场。因此，控制图6中前后两个声源脉冲的激发幅度，可以形成声场偏振方向控制的效果。

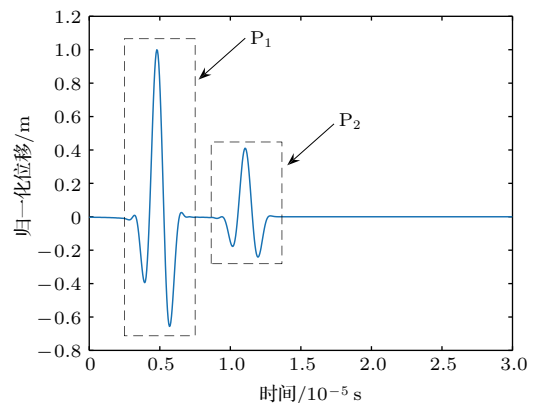


图6 时间反转多波聚焦声源原始信号

Fig. 6 The original source signal of the multi-wave focusing by the time reversal method

图4(b)显示了将图6的信号直接加载于O点时得到的A点处的声场偏振方向，图7为改变图6中第二个波包的激励幅度后的质点偏振方向图，图7(a)–图7(d)分别为将第二个波包放大2倍、3倍、6倍以及10倍后的结果(所有声源都做了归一化处理)，橙红色线依然表示多波聚焦形成的质点偏振方向，可以看到通过改变激发脉冲的幅度可以有效改变多波焦点处的质点偏振方向，达到偏振方向扫描的目的。

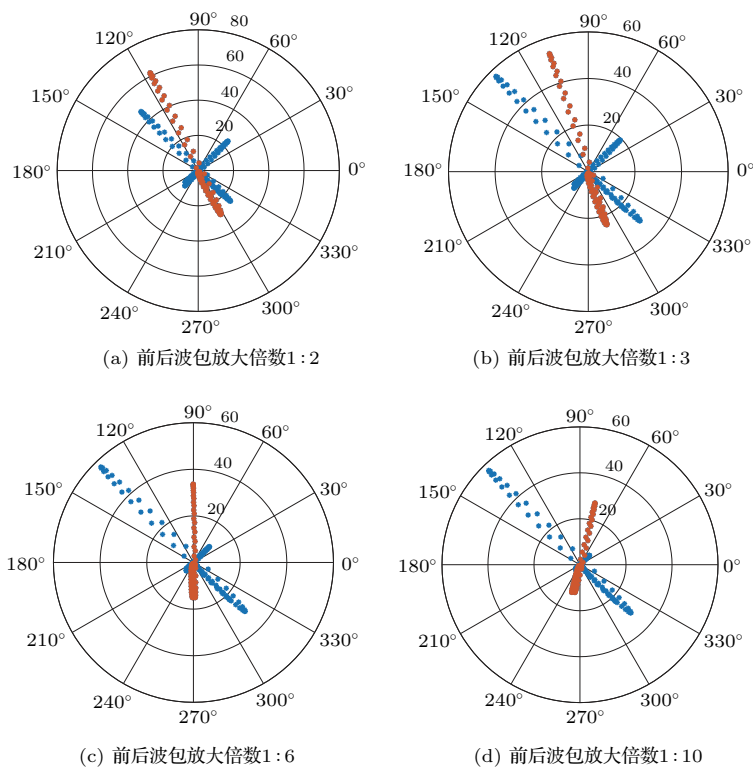


图7 改变声源信号前后波包激发幅度时焦点处声场的偏振方向

Fig. 7 The polarization direction varies with the different amplitude of the front and rear pulses of the source signal

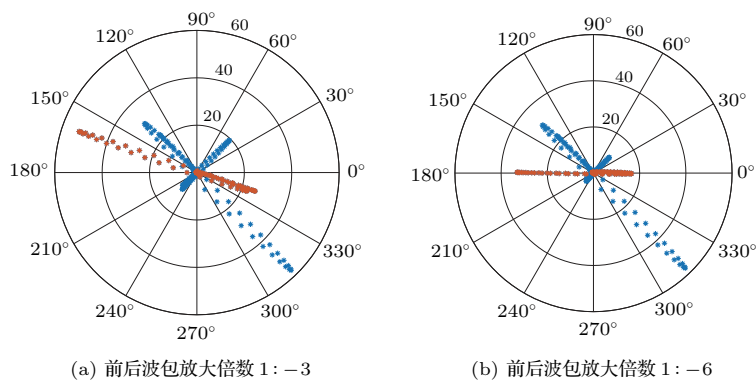


图8 改变声源信号前后波包激发幅度及相位时焦点处声场的偏振方向

Fig. 8 The polarization direction varies with the different amplitude and phase of the front and rear pulses of the source signal

由于图7中的前后两个波包是同相位激励的,因此合成后的质点偏振方向存在一定的角度区间,即只能存在于 $[45^\circ, 135^\circ]$ 和 $[225^\circ, 315^\circ]$ 的区间范围,图8为将其中一个波包反向后的质点偏振方向图,可以看到此时多波焦点处的声偏振方向与图7相比发生了 90° 的偏转。

通过以上分析可以看到,在本文所讨论的模型条件下,通过改变多波聚焦声源前后两个波包的激

发幅度比及其相位,可以实现焦点处的声场偏振方向在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 范围内旋转。

4 结论与讨论

本文在单层介质模型下,针对位于近表面及介质内部的两个聚焦点,通过数值计算讨论了时间反转多波聚焦声源设计方法的多波聚焦及焦点处声场偏振方向控制的实际效果。结果表明,在不同的

聚焦位置, 时间反转多波聚焦声源都能够形成多波聚焦效应, 提高检测信噪比。但是在声场偏振方向的控制方面, 近表面的聚焦点由于受到表面波的影响而无法实现, 此时多波聚焦后焦点处的声场呈现椭圆偏振状态, 仍体现表面波的性质; 而对于介质内部的聚焦点, 在多波聚焦后的声场可形成一个新的线偏振方向, 并且通过控制发射信号的幅度和相位能够改变声场的偏振方向。本文在多波聚焦研究的基础上, 提出了一种进行声偏振方向扫描检测的可能途径, 对提高介质内部缺陷的定量检测能力具有理论意义。

参 考 文 献

- [1] Kino G S. Acoustic waves: device, imaging, and analog signal processing[M]. US: Prentice Hall, 1987.
- [2] 姜永亮. 超声聚焦的菲涅耳阵换能器和菲涅耳透镜研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2000.
- [3] 田勇. PVDF 环状菲涅耳阵列换能器实现声束聚焦和扫描[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 1998.
- [4] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999: 301-307, 778-780, 1028-1030.
- [5] Stepinski T. Ultrasonic inspection of copper canisters using phased arrays[J/OL]. The Journal of Nondestructive Testing, <http://www.ndt.net>, 1998.
- [6] Moles M D C. Pipe WIZARD PA mechanized inspection of girth welds using ultrasonic phased array[C]. International Conference on Advances in Welding Technology, Texas: Galveston, 1999.
- [7] Olympus. 产品手册—相控阵仪[EB/OL]. [2017-10-15]. <https://www.olympus-ims.com.cn/zh/phasedarray>.
- [8] Poguet J, Petru C. Special linear phased array probes used for ultrasonic examination of complex turbine components[J/OL]. The Journal of Nondestructive Testing, <http://www.ndt.net>, 2002.
- [9] 詹湘琳, 李健, 张宇, 等. 用于管道环焊缝缺陷检测的超声相控阵系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S2): 1427-1428. Zhan Xianglin, Li Jian, Zhang Yu, et al. Ultrasonic phased array system applied in flaw detection of pipe girth welds[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(S2): 1427-1428.
- [10] Erhard A, Bertus N, Montag H J, et al. Ultrasonic phased array system for railroad axle examination[J/OL]. The Journal of Nondestructive Testing, <http://www.ndt.net>, 2003.
- [11] Blanquet P. Application of array transducers to health monitoring of aeronautic structures[C]. Proc. of 14th WC-NDT, New Delhi, 1996: 2057-2060.
- [12] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1992, 39(5): 555-566.
- [13] Wang C H, Rose J T, Chang F K. A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring[J]. Smart Mater. Struct., 2004, 13(2): 415-423.
- [14] Norville P D, Scott W R. Time-reversal focusing of elastic surface waves with an asymmetric surface layer[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2007, 122(4): EL95-EL100.
- [15] 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[J]. 声学学报, 2002, 27(6): 541-548. Zhang Bixing, Lu Minghui, Wang Chenghao. Study of self-focusing in under water wave guide by time reversal method[J]. Acta Acustica, 2002, 27(6): 541-548.
- [16] Zhang B X, Lu M H, Wang C H. Time reversal self-adaptive focusing in anisotropic elastic solid medium[J]. Acoustical Physics, 2003, 49(6): 688-694.
- [17] Ing R K, Fink M. Time-reversed Lamb waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1998, 45(4): 1032-1043.
- [18] Draeger C, Cassereau D, Fink M. Theory of the time-reversal process in solids[J]. J. Acoust., Soc. Am., 1997, 102(3): 1289-1295.
- [19] 吴昊, 张碧星, 汪承灏. 声波在固体板中的多径传播及其时间反转声场[J]. 声学学报, 2005, 30(3): 215-221. Wu Hao, Zhang Bixing, Wang Chenghao. Multi-path propagation of acoustical wave and time reversal acoustical field in solid plate[J]. Acta Acustica, 2005, 30(3): 215-221.
- [20] Zhang B X, Liu D D, Shi F F, et al. Ultrasonic focusing and scanning with multiple waves[J]. Chin. Phys. B, 2013, 22(1): 014302.