**文章编号:**1004-2474(2018)06-0855-05

## 厚壁管道周向压电 Lamb 波缺陷图像增强研究

王 立1,陈 果1,石文泽1,卢 超1,陈 尧1,2

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;

2. 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:为解决厚壁管道周向压电Lamb 波缺陷检测中非平稳信号引起的低信噪比和分辨率问题,利用相位 相干成像算法(PCI)从Lamb 波信号中提取相位信息构建相位相干因子,通过动态加权处理放大相位分布对超声 图像像素幅值的贡献。一方面,该方法保留相位分布一致的缺陷回波幅值,增强缺陷信噪比。另一方面,该方法能 通过增强孔径波束指向性,提高后处理图像的虚拟聚焦效果及横向分辨力。通过对外径Ø269 mm,壁厚 32 mm 的 带有 20 mm 横向裂纹缺陷的厚壁管道进行了探伤检测,对得到的信号进行图像重建。结果表明,PCI的信噪比为 25.2 dB,较原始 B 扫描图像提高了 15.6 dB,半波高水平宽度由 47.3 mm 缩小到 22.4 mm,提升了横向分辨率,提 高了对缺陷的识别度。

关键词:厚壁管道;周向压电 Lamb 导波;相位相干成像;信噪比;横向分辨率 中图分类号:TN 911.72;TG 115.28 文献标识码:A DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.06.012

## Research on Defect Image Enhancement of Circumferential Piezoelectric Lamb Wave in Thick-Walled Pipelines

## WANG Li<sup>1</sup>, CHEN Guo<sup>1</sup>, SHI Wenze<sup>1</sup>, LU Chao<sup>1</sup>, CHEN Yao<sup>1,2</sup>

Key Laboratory of Non-destructive Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract**: To solve the problem of low signal-to-noise ratio and resolution caused by the non-stationary signals in the defect detection of thick-walled pipelines with the circumferential piezoelectric Lamb waves, the phase coherence imaging algorithm (PCI) is used to extract the phase information from the Lamb wave signals to construct the phase coherence factor, and the dynamic weighting process is used to amplify the contribution of the phase distribution to the pixel amplitude of the ultrasound images. On the one hand, the method preserves the defect echo amplitude with the same phase distribution and enhances the signal to noise ratio. On the other hand, this method can improve the virtual focusing effect and lateral resolution of the post-processed image by enhancing the directivity of the aperture beam. The flaw detection of a thick-walled pipeline with an outer diameter of  $\emptyset$  269 mm and wall thickness of 32 mm with a transverse crack of 20 mm has been carried out, and the obtained signals have been reconstructed. The results show that the signal to noise ratio of PCI is 25, 2 dB, which is 15, 6 dB higher than that of the original B scan images, and the half-wave high horizontal width is reduced from 47, 3 mm to 22, 4 mm, which improves the horizon-tal resolution and improves the recognition degree of defects.

Key words: thick-walled pipeline; circumferential piezoelectric Lamb guided waves; phase coherent imaging; signal-to-noise ratio; horizontal resolution

0 引言

厚壁管道在石化、核电领域中已得到广泛应用。 由于长期在高温高压及恶劣环境的情况下使用,管 道将出现疲劳裂纹及腐蚀性缺陷,从而造成管道泄漏及炸裂等重大事故<sup>[1]</sup>。轴向类型的腐蚀缺陷是最 常见的缺陷形式,因此,对于厚壁管道中缺陷的检测

收稿日期:2018-01-16

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51705232,51705231,51265044);江西省研究生创新专项基金项目资助(省级项目)(YC2016-S337);声场声信息国家重点实验室开放课题研究基金资助项目(SKLA201806)

作者简介:王立(1991-),男,江西高安人,硕士生,主要从事超声检测及评价的研究。E-mail:anwangli@126.com。通信作者:陈尧,博士, 主要从事材料超声无损检测与评价的研究。E-mail:chenyao1984@foxmail.com。

及判断很重要。

用于厚壁管道质量监测的无损检测超声导波 方法主要有水平剪切(SH)导波、Lamb导波、垂直 剪切(SV)导波<sup>[2-3]</sup>等。其中,沿着管道周向传播的 导波称为周向导波,对于检测定周长的管道有着 不俗的表现,具有缺陷定位精度高、定位准确等 优点。

单一厚壁管道中的超声 Lamb 波在传播过程中 会发生声场变化,超声导波与缺陷孔、槽等人工反射 体的相互作用[4]。这些情况在有弯道曲率的厚壁管 道会更复杂(发生波形转换,结构散射噪声,反射波 形等),再加上压电探头内部自身的噪声及与固体界 面接触传播时产生的复杂变化<sup>[5]</sup>和非连续性<sup>[6]</sup>,这 会导致测得的信号存在大量非平稳信号[7],严重削 弱了成像检测中信号的曲线特征,从而影响成像质 量,因此,在对厚壁管道的成像检测中,必须选择合 适的角度、导波类型、成像原理及算法。目前,合成 孔径聚焦技术已运用到超声探伤成像中,李小娟 等<sup>[8]</sup>将合成孔径聚焦(SAFT)技术运用于超声轮对 探伤成像中,提高了图像的信噪比和分辨率,提高了 检出率。该方法源于合成孔径雷达成像技术[9-10]。 但由于 SAFT 法形成的波速较宽<sup>[11]</sup>,不能完全抑制 噪声的干扰,为了进一步提高厚壁管道检测中的信 噪比,本文提出一种利用相位信息参与成像的方法。 其基本原理是在 SAFT 图像重建的基础上,利用相 位相干的特性构建权重因子,通过加权放大相位对 SAFT 重建图像后各个像素点的作用,从而达到在 成像区域形成更窄的波束,进一步提高成像的分 辨率。

本文采用轴向扫描方式得到缺陷检测回波信号,分别通过B扫描、SAFT成像和相位相干成像算法(PCI),对包含缺陷回波与周向回波的检测信号进行图像重构,实现轴向缺陷的定量显示。

1 成像方法原理

SAFT 是一种基于时移和幅值叠加运算的超声 图像重建算法<sup>[12]</sup>,该算法的数学表达式为

$$I(x,z) = \sum_{i=1}^{N} X(i,t_i)$$
(1)

式中: $X(i, t_i)$ 为探头在第i个位置时的接收信号,i( $i=1,2,\dots,N$ )为探头的步进序号;I(x, z)为重建 图像中的像素点G的叠加幅值,x和z分别为像素 点G的横、纵坐标,如图1所示。



图 1 自发自收模式 SAFT 图像重建示意图

进行合成孔径成像处理前需计算接收回波信号 到达各个像素点的时间。假设实验使用的一发一收 探头为 T,探头从左到右以步进长度  $\Delta s$  移动,从 T<sub>1</sub> 位置扫查到 T<sub>N</sub> 位置。当探头的位置为 *i* 时,根据 图 1 中探头与像素点 G(x, z)之间的几何关系,可 推导出探头在 T<sub>i</sub> 位置发射声波经像素点 G(x, z)再重新传播到 T<sub>i</sub> 的声程,故对应的传播时间点可

$$t_{i} = \frac{2\sqrt{(i\Delta s - x)^{2} + z^{2}}}{c_{i}}$$
(2)

式中ci为超声波的纵波声速。

在图像重建过程中,传统的 SAFT 成像法单个 探头的 A 扫描信号中仅有幅值参与了成像运算,并 未利用到隐藏在信号之间的相位信息,然而由于噪 声的相位分布散乱,不利于成像质量的提升。如果 利用相位信息间的相干性构建能表征相位分布的相 干因子,可降低重建图像中散乱的相位分布及噪声 幅值,得到更好的信噪比。根据欧拉公式,对式(1) 中的信号 X(*i*, *t<sub>i</sub>*)进行 Hilbert 变换,则其相位信息 可写为

$$h(X(i,t_i)) = |h| e^{j\varphi} = |h| (\cos \varphi + j\sin \varphi)$$
(3)

式中:|*h*|为信号模; *φ*为信号相位角。其中正弦和 余弦函数分别表示得到信号实部和虚部的相位,利 用这些相位信息构建循环因子(CCF),其表达式为

 $C_{\rm CCF}(x,z) = 1 - \operatorname{sqrt}(\operatorname{var}(\cos\varphi) + \operatorname{var}(\sin\varphi))$ (4)

式中: $sqrt(var(cos \varphi) + var(sin \varphi))$ 为重建图像中 各像素点的信号相位标准差; $var(cos \varphi)$ 和  $var(sin \varphi)$ 为像素点坐标 x, z的函数,其表达式为

$$\operatorname{var}(\cos \varphi(x, z)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\cos \varphi)^{2} - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \cos \varphi\right)^{2}$$
(5)

$$\operatorname{var}(\sin \varphi(x,z)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\sin \varphi)^{2} - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \sin \varphi\right)^{2}$$
(6)

利用  $C_{CCF}(x, z)$  对图像进行加权处理后,新图像的幅值  $I_c$  为

 $I_{c}(x,z) = |C_{cCF}(x,z)I(x,z)|$  (7) 由式(4)可知, $C_{CCF}(x,z)$ 为信号相位分布的函 数,其取值范围为[0,1],信号的相位分布越杂乱,  $C_{CCF}(x,z)$ 值越小。当相位均匀分布时, $C_{CCF}(x,z)$ 值接近于 0,反之接近于 1。此时,运用加权处理后 其他的杂波信号幅值降低,成像的分辨率提高。

2 实验验证

图 2 为试验装置,由信号控制采集软件、NI 数据采集器(PXT-1033)、高功率超声信号发射接收器 (JPR-600C)、角束导波探头及厚壁管道试样组成。 其中,斜探头的中心频率为 500 kHz,采用的楔形块 角度为 55°,试验研究采用斜探头激励方向垂直于 厚壁管道轴向方向,沿厚壁管道周向激励周向类 Lamb 波。



图 2 试验系统示意图

厚壁管道外直径为Ø269 mm,壁厚为32 mm, 外壁轴向缺陷周向宽为2 mm,轴向长为20 mm,径 向深为2 mm,斜探头置于距轴向缺陷周向200 mm 位置处。楔形块材料为有机玻璃,斜探头晶片有效 激励部分尺寸长为26 mm,宽为20 mm。斜探头晶 片移动方式如图3 所示。



 材料
 泊松比
 密度/(kg・m<sup>-3</sup>)
 杨氏模量/GPa

 钢材
 0.3
 7 932
 217

利用 Disperse 软件对该厚壁管道中周向类 Lamb 波的传播特性进行分析,绘制出周向导波群 速度频散曲线如图 4 所示。由图可看出,该厚壁管 中包含多种导波模态,图中标出了 0~5 阶的周向类 Lamb 波(CL0~CL5),如 CL0 表示 0 阶周向类 Lamb 波,以此类推。



图 4 厚壁管道周向类 Lamb 波群速度频散曲线

实验研究中,首先将斜探头置于厚壁管道左端 120 mm(由于角束导波斜探头有一定的声速扩散 角,120 mm处接收不到任何回波),垂直缺陷方向 距离 200 mm处,按图 3 中箭头所示方向从左至右 以步长为 2 mm 扫描检测。从完全没覆盖缺陷到覆 盖直至完全覆盖,即覆盖缺陷长度 L=20 mm;继续 平移斜探头,使覆盖尺寸逐渐减少,最后平移至缺陷 右端完全接收不到缺陷回波为止。

由于斜探头在平移对齐时会产生测量误差,为 了尽量减小误差,采用同一斜探头激励和接收周向 导波,激励信号为经 Hanning 窗调制的 5 周期的单 频正弦脉冲,最终形成 51 个超声导波扫描信号。 提取其中的一个缺陷回波信号如图 5 所示。由图 可看出明显的缺陷回波,但回波形式复杂,影响成 像的效果。因此,本文的目的是成像时削弱这些 信号的影响。



由图 5 可看出,缺陷回波中不是单一模式的导

波,同时还夹杂模式转换波及结构噪声等非平稳信号。为了区分这些信号的类别,截取缺陷回波信号 50~350 μs内时域波形进行小波变换,结果如图 6 所示。为了区分这些信号,采用一发一收方式在周 向无缺陷的厚壁管道上固定 2 个 55°角束导波探头, 激励频率为 0.5 MHz,两探头间距为 20~1 000 mm 可调,取不同距离下的 50 个检测信号进行时频分 析。通过对各个信号进行小波变化,然后取峰值进 行数据拟合,所得结果如图 7 所示。



由图 7 可知,直线的倒数是导波的声速,通过求 解拟合直线斜率可知,拟合直线 1、2 的声速分别为 2 951.3 m/s 和 3 123.7 m/s,将计算值和图 4 中频 散曲线的群速度进行比较,其中 CL2 模态和 CL3 模 态在 0.5 MHz 时的理论群速度分别为 3 100 m/s 和2 984 m/s,计算值和理论值的相对误差为 1. 08%和 0.74%,由此可判断这 2 个模态分别是 CL2 和 CL3。图 6 中,A 和 B 分别为 CL2 和 CL3,CL3 为主要模态,C 和 D 为非平稳信号。因此,对所得 信号组进行 B 扫描、SAFT 和 SAFT-CCF 3 种方法 的图像重建。

3 结果分析

图 8 为 B 扫描、SAFT 和 SAFT-CCF 3 种方法 下获得的管道周向 Lamb 波缺陷图像。图像幅值为

$$dB(x,z) = 20\log_{10} \frac{I \mid (x,z) \mid}{\max(\mid I \mid)}$$
(8)

式中:x,z分别表示成像区域的横坐标和纵坐标;I

为成像区域内各像素点的幅值。



图 8 不同方法下的缺陷超声图像

如图 8(a)所示,Lamb 波传播过程中产生的频 散和电噪声导致超声图像中形成噪声回波。此外, B 扫描图像的分辨率极差,难以有效区分 CL2 和 CL3 模态的缺陷回波。经统计,B 扫描图像中 CL3 模态 信 噪 比 为 9.6 dB,半 波 高 水 平 宽 度 为 47.3 mm。

与B扫描成像相比,SAFT 算法可以通过延时 和幅值叠加处理对B扫描图像进行重建,达到虚拟 聚焦的效果,进而实现图像噪声的抑制和横向分辨 率的提高。由图8(b)可知,SAFT 重建后的图像得 到了增强,信噪比和分辨率均较B扫描图像有所提 高。经统计,SAFT 图像中CL3模态信噪比为 12.4 dB,半波高水平宽度为36.5 mm。但是,受合 成孔径宽度的限制,SAFT算法的图像增强能力具 有上限。因此,图像中仍能观察到频散和仪器设备 引起的噪声,声速相近的CL2和CL3模态缺陷回波 也难以有效区分。

PCI算法可从接收信号中提取相位信息来确定 孔径数据的相干因子 CCF,通过动态加权处理放大 相位分布对图像像素幅值的贡献,抑制相位随机分 布的结构噪声幅值,保留相位分布一致的缺陷回波 幅值,实现噪声的抑制和信噪比的增强。PCI算法 还能通过增强孔径波束指向性,提高后处理图像的 虚拟聚焦效果和缺陷横向分辨率。如图 8(c)所示, CCF 加权处理后的图像在 - 30 dB ~ 0 内几乎无噪 声,且能通过图像有效辨识 CL2 和 CL3 模态缺陷回 波。经统计,SAFT 图像中 CL3 模态信噪比提升为 25.2 dB,半波高水平宽度缩小为 22.8 mm,与实际 切槽宽度相近。

4 结束语

本文针对厚壁管道周向压电 Lamb 波缺陷检测 中的低信噪比和分辨率问题,利用相位相干成像算 法可从检测信号中提取相位信息构建相位相干因 子,通过动态加权处理放大相位分布对超声图像像 素幅值的贡献,同时改善信噪比和横向分辨力。结 果表明,相位相干成像算法能通过相位相干加权抑 制相位随机分布的非平稳信号的幅值,保留相位分 布一致的缺陷回波幅值,实现缺陷信噪比的显著增 强。此外,相位相干成像算法能通过增强孔径波束 指向性,提高后处理图像的虚拟聚焦效果,使横向分 辨力显著提高,更有利于通过图像精确测定缺陷的 位置。

## 参考文献:

- [1] 侯锡瑞.电站锅炉压力容器压力管道安全技术[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [2] NISHINO H, YOKOYAMA R, KONDO H, et al. Generation of circumferential guided waves using a bulk shear wave sensor and their mode identification [J]. Jpn J Appl Phys, 2007, 46(7):4568-4576.
- [3] NISHINO H, YOKOYAMA R, OGURA K, et al. Tone-burst generation of circumferential guided waves by a bulk shear wave sensor and their wide-range timefrequency analyses [J]. Jpn J Appl Phys, 2008, 47 (5):3885-3893.
- [4] PREDOI M V, CASTAINGS M, HOSTEN B, et al. Wave propagation along transversely periodic structures[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 121(4):1935.
- [5] 孙继华,赵扬,马健,等.超声波脉冲在固-固界面传播的数值模拟分析[J]. 压电与声光,2017,39(1): 140-143.

SUN Jihua, ZHAO Yang, MA Jian, et al. Numeirical simulation of ultrasonic pulse wave propagation at solid-solid interface[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(1):140-143.

[6] 李战慧,吴运新,隆志力.超声波在换能器接触界面 传播的特性研究[J]. 压电与声光,2010,32(2): 271-273.

LI Zhanhui, WU Yunxin, LONG Zhili. Study of ultrasonic propagation characters at contact interface in ultrasonic transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2010, 32(2):271-273.

- [7] DELSANTO P P, HIRSEKORN S. A unified treatment of nonclassical nonlinear effects in the propagation of ultrasound in heterogeneous media[J]. Ultrasonics, 2004, 42(1/9):1005.
- [8] 李小娟,杨昕,王黎,等. 基于合成孔径技术的轮对探 伤成像算法研究[J]. 压电与声光,2012,34(4): 644-648.

LI Xiaojuan, YA Xin, WANG Li, et al. Ultrasonic detection of wheels image algorithm based on synthetic aperture focusing technique [J]. Piezoelectrics &. Acoustooptics, 2012, 34(4):644-648.

- [9] 孙宝申,沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(二)[J]. 应 用声学,1993(5):39-44.
  SUN Baoshen, SUN Jianzhong. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (2) [J]. Applied Acoustics, 1993(5):39-44.
- [10] 谭衢霖,刘正军,胡吉平.一种完全数据驱动的高精 度机载 L-SAR 成像处理方法[J].应用基础与工程科 学学报,2008,16(6):846-853.
  TAN Qulin, LIU Zhengjun, HU Jiping. A fully datadriven method for high precison airboene L-SAR imaging[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008,16(6):846-853.
- [11] LI M L, GUAN W J, LI P C. Improved synthetic aperture focusing technique with applications in high-frequency ultrasound imaging[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2004, 51(1):63-70.
- [12] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation [J]. Ndt & E International, 2005, 38(8):701-711.