

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209991

基于环形统计矢量的超声相干复合发散波成像*

陈尧¹, 李昊原¹, 康达², 卢超¹, 李秋锋¹

(1. 南昌航空大学 南昌 330063; 2. 北京动力机械研究所 北京 100074)

摘要:为提高大壁厚构件的缺陷检出能力,提出了全孔径相干复合发散波成像(CDWI)与环形统计矢量(CSV)相结合的复合检测方法。基于虚拟源技术,该方法通过发射延时实现全孔径阵元的大范围的偏转波前发射,以增加深度和宽度传播方向上波前的声能。为有效提高孔径有效覆盖区域以外的检出能力,相干复合过程中结合CSV进一步增加缺陷回波影像的质量指标。结果表明,在检测铝制构件中横向分布超出探头孔径覆盖范围20 mm和纵向埋深在2~3倍探头孔径之间这两种情况下的 $\Phi 2$ 边钻孔缺陷时,本文所提复合方法的缺陷回波幅值较平面波成像分别高出17.5~18.5 dB和10.6~14.8 dB。

关键词:大壁厚构件;虚拟源;相干复合发散波成像;环形统计矢量

中图分类号: TG115.28 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Ultrasonic compounding diverging wave imaging based on circular statistics vector

Chen Yao¹, Li Haoyuan¹, Kang Da², Lu Chao¹, Li Qiufeng¹

(1. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: To improve the defect detection ability of heavy thick wall components, a method that combines the compounding diverging wave imaging (CDWI) and circular statistics vector (CSV) is proposed in this article. Based on the virtual source technology, the method realizes a wide range of deflection wavefront emission of full aperture array elements by transmitting delay to increase the acoustic energy of wavefront in depth and width propagation direction. To effectively improve the detection ability outside the effective coverage area of aperture, the quality index of defect echo image is further increased by combining CSV in coherent combination process. For the $\Phi 2$ side drill holes with the lateral distribution which exceeds the coverage range of the probe aperture by 20 mm, and the longitudinal depth that is between 2~3 times size of the probe aperture in the aluminum block, the amplitudes of the SDH echoes of the proposed method are about 17.5~18.5 dB and 10.6~14.8 dB higher than them of the plane wave imaging, respectively.

Keywords: heavy thick wall components; virtual sources; compounding diverging wave imaging; circular statistics vector

0 引言

作为超声检测技术的重要一部分,超声后处理成像技术具有成像质量高、方法灵活等优势,已在工业无损检测(non-destructive testing, NDT)领域发挥出了极大的作用^[1-3]。随着科技的不断发展和改进,超声无损检测已经发展出了诸如合成孔径技术^[4](synthetic aperture focusing technique, SAFT)、全聚焦^[5](total focusing method, TFM)等后处理技术,这些技术为满足各行各业对产品质量的

严苛要求提供了新的解决思路。

基于一发全收所得到的全矩阵数据采集(full matrix capture, FMC)矩阵的TFM算法,对超声图像质量的提高有着良好的效果^[6-7],但是FMC在数据的采集、传输、存储和处理需要消耗较长时间,限制了成像的帧频,导致TFM无法获得较高的成像效率。为了提高帧率,相干复合平面波成像(compounding plane wave imaging, CPWI)最早被Montaldo等^[8]提出,之后也有其他学者对此技术进行了进一步的研究^[9-11]。CPWI使用整个阵列发射多个不同角度的平面波,使单个平面波成像技术所产生的

收稿日期:2022-06-20 Received Date: 2022-06-20

* 基金项目:国家自然科学基金(62161028, 12064001, 51705232)项目资助

成像分辨率低的问题得到了有效的解决^[12],进一步让成像质量得到改善。

发散波成像技术^[13-14](diverging wave imaging, DWI)将虚拟源(virtual sources, VS)设置于换能器阵列后方,全孔径发射发散的波束,其一次能覆盖的区域比平面波成像更大,可以提供更大的角度检测范围^[15]来对探头孔径范围之外的缺陷进行检测并且同样具有高帧频的优点^[16]。然而,在发散波成像中,未被聚焦声束的能量会扩散到更宽的区域上,如果不进行额外的处理,就会导致重建图像的质量下降。对此,2014年Papadacci等^[17]使用了相干复合发散波成像技术(compounding diverging wave imaging, CDWI),以900 FPS的帧率获得了在大视场内的人类心脏超声图像并展示了该技术在采集过程中获得较高的组织速度估计的可行性。2016年,Porée等^[14]利用了发散波的相干复合技术,并且在相干复合的过程中加入运动补偿,也获得了高对比度的超声心动图图像。在工业上,Sutcliffe等^[15]和Yang等^[18]使用了发散波成像技术对低碳钢和铝块进行检测并给出了两种发散波的发射方式,通过和全聚焦技术进行对比,证明了发散波有望做到高质量的快速成像,是一种适用于工业构件的超声成像无损检测方法。不过,Sutcliffe等^[15]所做工作仅分析了探头孔径有效覆盖范围内检测的缺陷成像质量,未对孔径范围外的缺陷进行进一步深入研究。

由于具有庞大的体积,大壁厚构件内部缺陷的分布范围更广^[19-20],对成像检测技术的检测深度、宽度具有更高的检测要求。目前,TFM、CPWI等技术受限于探头孔径的覆盖范围,对分布在探头孔径覆盖范围以外的缺陷检出能力较差^[17],一定程度上难以满足大壁厚构件的检出要求。对此,本文提出了一种适用于无损检测的全孔径相干复合发散波成像技术。

在此基础上,为进一步提升探头孔径覆盖范围外的缺陷检测能力,本文利用接收回波上的相位信息,将环形统计矢量(circular statistics vector, CSV)加权算法应用到相干复合发散波成像技术中,以提高发散波图像的分辨率及缺陷幅值,并进一步通过实验,与平面波成像技术进行比较,验证了本文提出的算法的有效性。

1 理论分析

1.1 发散波相干复合技术

发散波发射方式因其发散的波形,可以在近场处获得1个较大的横向视野。在二维空间中,每个发射的发散波都由位于探头后面的1个虚拟源的位置来定义,其发射延时的计算示意图如图1所示。

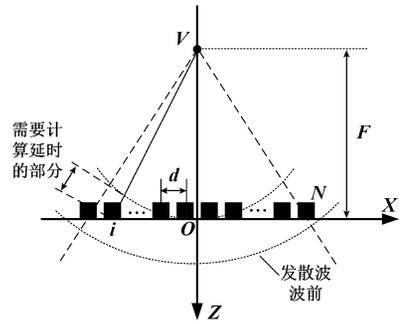


图1 发散波发射延时计算

Fig. 1 Calculation of emission delay of diverging wave

图1中以阵列的中心点O为原点建立x-z坐标轴,其中N为阵列中阵元总数,用d来表示每两个相邻阵元中心之间的距离,虚拟源V到阵列的中心点O的距离用F来表示,由于本文目的是生成一个类似于球形的波前,所以可以确定该虚拟源的最佳垂直位置是全孔径宽度的1/2^[15],即 $F=(N-1) \times d/2$,这样可以尽可能的扩大可检测的范围。所以阵列中任意阵元i的坐标 (x_i, z_i) 可以表示为:

$$\begin{aligned} x_i &= (i-1)d - \frac{(N-1)d}{2} \\ z_i &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

所以虚拟源V到阵列中各个阵元的距离可以求出,设声速为c,则阵列发射发散波时需要任意阵元i添加的延时 τ_i 为:

$$\tau_i = \frac{\sqrt{F^2 + x_i^2} - F}{c} \quad (2)$$

为了提高成像质量,本文将多个偏转角度的发散波进行相干复合,将虚拟源的位置放在一个以全孔径宽度1/2为半径,阵列中点O为圆心的圆弧上,偏转角为 $-\alpha \sim \alpha$,每次发射间隔的角度为 θ 。为使 2α 能够被 θ 整除,共计需要 $L=2\alpha/\theta+1$ 次发射。

如图2所示,以阵列中心为原点O建立x-z坐标轴,阵列中任意阵元i的坐标以在式(1)中给出,若要计算第l次发射发散波的发射延时,则需要知道该次发射发散波的虚拟源 V_l 的坐标 (x_{vl}, z_{vl}) ,对于任意某次发射发散波的虚拟源点,因为虚拟源点在圆弧上,所以得到虚拟源 V_l 的纵横坐标 (x_{vl}, z_{vl}) 分别为:

$$\begin{aligned} x_{vl} &= -F \sin[\alpha - (l-1)\theta] \\ z_{vl} &= F \cos[\alpha - (l-1)\theta] \end{aligned} \quad (3)$$

由于虚拟源位置发生了偏转,所以在计算发射延时,可以将阵列以O为中心旋转一定的角度来等效图1所示的发散波发射示意图,等效阵列在图2中用 l_l 来表示第l次发射时实际阵列所等效的虚拟阵列,相应的等效阵列

中任意阵元 i_l 的坐标 (x_{il}, z_{il}) 可以表示为:

$$\begin{aligned} x_{il} &= \left(i - \frac{N+1}{2}\right) d \cos[\alpha - (l-1)\theta] \\ z_{il} &= \left(i - \frac{N+1}{2}\right) d \sin[\alpha - (l-1)\theta] \end{aligned} \quad (4)$$

所以可以像式(2)一样计算得到第 l 个虚拟源 V_l 发射发散波的发射延时 τ_{il} 。

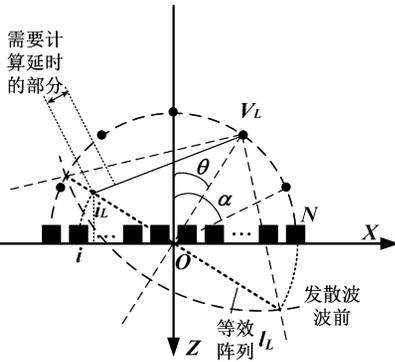


图 2 相干复合发散波发射延时计算

Fig. 2 Calculation of emission delay of compounding diverging wave

图 3 所示的是发散波相干复合成像的图像重建的延时法则计算示意图, 在获得了任意虚拟源点 V_l 的坐标后, 根据聚焦点 P 的坐标 (x, z) 即可求出声束从虚拟源传播到聚焦点 P 需要的传播时间 t_n , 即发射延时。又因为在计算时是以虚拟源为起点计算的, 但是实际上声波是由阵列探头发出, 所以在计算发射延时时需要将声波在聚焦深度 F 到探头的距离经历的这段时间减去, 计算 τ_n 具体公式如下:

$$\tau_{T_l} = \frac{\sqrt{(x - x_{il})^2 + (z - z_{il})^2} - F \cos(\alpha - (l-1)\theta)}{c} \quad (5)$$

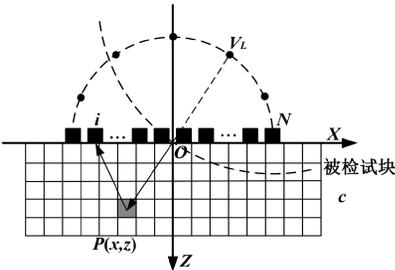


图 3 相干复合发散波图像重建延时计算

Fig. 3 Time delay calculation of compounding diverging wave image reconstruction

同理在计算接收延时只需要计算从聚焦点 P 到实际阵列中各个阵元 i 所需要的时间即可, 接收延时 τ_{Ri} 可

以表示为:

$$\tau_{R_i} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (z - z_i)^2} / c \quad (6)$$

所以图像重建的总延时 τ_{TLRL} 可以表示为:

$$\tau_{T_{R_i}} = \tau_{T_l} + \tau_{R_i} \quad (7)$$

将得到的信号幅值矩阵进行延时叠加后即可得到 P 点处的回波幅值 I , 最终得到聚焦图像:

$$I = \sum_l \sum_i^{2\alpha/\theta+1} S_{T_{R_i}}(t_{T_{R_i}}) \quad (8)$$

式中: $S_{T_{R_i}}$ 为第 l 次发散波经过聚焦点 P 后被阵元 i 接收的回波信号。

1.2 基于环形统计矢量的相干复合发散波成像算法

环形统计学分析的对象为数据的复数形式, 在处理信号统计问题时也能使用。将信号的幅值 $|h|$ 作为单位长度, 相位的实部为 $\cos\varphi$, 虚部为 $\sin\varphi$ 。此时, 可以将信号的相角值 φ 当成随机变量并分布在单位圆上, 根据欧拉公式信号的复数表达式可写为:

$$S = |h| e^{i\varphi} = |h| (\cos\varphi + i \sin\varphi) \quad (9)$$

因此复数信号可以视为单位圆上从圆心指向圆弧的矢量, 指针方向用 $(\cos\varphi, \sin\varphi)$ 表示。每个指针方向被抽象为矢量后进行合矢量计算, 获得反映相角一致程度的评价指标^[21-22], 在复平面上的环形统计矢量的平均合矢量的长度可以表示为:

$$\bar{R} = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

其中, a 和 b 可以写为:

$$A = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \cos\varphi_n(\tau_n), \quad B = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sin\varphi_n(\tau_n) \quad (11)$$

\bar{R} 的取值范围为 $[0, 1]$, 又因为相干因子严格遵循信号的相干能量与非相干能量的比值的值域在 $[0, 1]$ 之间的 Van Cittert-Zernike 聚焦准则, 所以环形统计矢量也可以作为适用于波束形成的加权因子, 可以表示为:

$$\bar{R}_{CSV} = (A^2 + B^2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

所以经过 CSV 加权处理后的 CDWI 图像中任意像素点的强度可以表示为:

$$I_{CSV} = I(x, z) \times \bar{R}_{CSV} \quad (13)$$

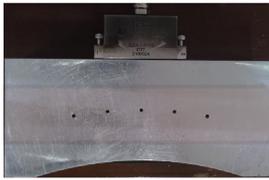
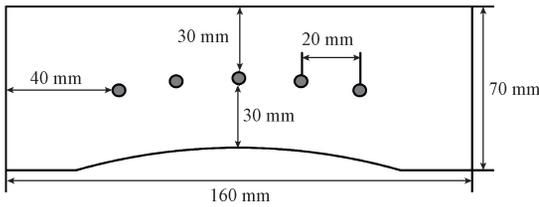
其中, $I(x, z)$ 表示 CDWI 图像中聚焦点 (x, z) 处的强度。

2 实验信号采集

本文采用的被检试块为矩形铝制试块和一个有凹面的铝制试块, 其中凹面铝制试块用来研究发散波在面对缺陷位置分布在试块中的横向范围大于孔径大小时, 对缺陷的检测能力; 矩形铝制试块用来验证 CDWI 在面对缺陷分布的纵向深度大于孔径大小时, 对缺陷的检测能

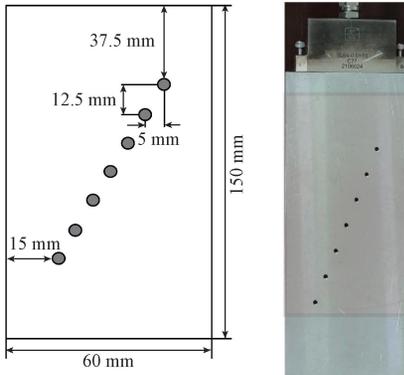
力。作为对比,本文使用与 CDWI 相同发射次数和偏转的角度的 CPWI 所生成的图像,与 CDWI 生成的图像进行比较。其中凹面铝制试块的凹面的曲率半径为 200 mm,弦长为 125 mm。

如图 4(a)所示,凹面铝制试块一面有 5 个 $\Phi 2$ 边钻孔,从左到右分别命名为 1~5 号缺陷;矩形铝制试块的一面有沿着一条斜线分布的 7 个 $\Phi 2$ 边钻孔从上到下分别命名为 1~7 号缺陷,如图 4(b)所示。



(a) 凹面铝制试块示意图

(a) Schematic diagram of aluminum block with concave surface



(b) 矩形铝制试块示意图

(b) Schematic diagram of rectangular aluminum block

图 4 实验试块示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental block

如图 5 所示,数据采集的平台为美国 Verasonics 公司的 Vantage32LE 采集系统,通过驱动 1 个 64 阵元的相控



图 5 实验及数据采集平台

Fig. 5 Experiment and data acquisition platform

阵探头收发采集。将超声探头和超声信号采集系统连接并将探头放在试块上,然后通过超声采集系统面板上的软件来更改发射声波的类型及发射角度,从而发射多角度的发散波和平面波来进行数据采集。

探头的孔径大小为 38.6 mm,具体参数如表 1 所示。

表 1 探头的主要参数

Table 1 Main parameters of probe

参数	阵元宽度/ mm	阵元长度/ mm	阵元间距/ mm	中心频率/ MHz	阵元数
值	0.55	10	0.05	5	64

3 评价指标及成像

3.1 评价指标

阵列性能参数指标 (array performance indicator, API) 是指,以所选成像区域中缺陷的最大幅值为基准,当幅值降低 1/2 时,缺陷所占的面积与检测声波波长的平方之比。由于以缺陷覆盖面积进行定义,API 指标可综合考虑轴向和横向分辨率,其表达式为:

$$API = \frac{A_{-6\text{dB}}}{\lambda^2} \quad (14)$$

式中: $A_{-6\text{dB}}$ 表示缺陷最大幅值的一半所占的面积, λ 表示超声波波长,可见 API 的值与成像分辨率成反比。

超声图像的缺陷幅值的单位为分贝:

$$\text{dB}(x, z) = 20 \lg \frac{I(x, z)}{\max(I)} \quad (15)$$

式中: x 为聚焦区域中焦点的横坐标, z 为其纵坐标,聚焦区域内各个焦点的幅值为式中的 I 。

3.2 凹面铝制试块的缺陷成像结果

将探头按如图 4(a)所示的方式放置在凹面铝制试块上,设置采样频率为 62.5 MHz,发散波和平面波的扫描范围为 $-40^\circ \sim 40^\circ$,每次发射间隔角度为 5° 从而发射多个不同角度的超声波,分别采集发散波和平面波数据,然后对原始数据进行处理,得到横向范围为 $-50 \sim 50$ mm,纵向范围为 $20 \sim 50$ mm 的成像结果。

从图 6 中可以看出,在 $-30 \text{ dB} \sim 0$ 的动态显示范围内,使用发散波进行检测时,1~5 号的所有缺陷都可以清楚的显示出来,但是使用平面波检测时,在超出探头覆盖区边缘 20 mm 的 1 和 5 号缺陷聚焦效果较差,若对平面波图像进行加权处理,则 1 和 5 号缺陷在图中消失,如图 6(d)。可以看出在相同的扫描角度内,发散波检测探头覆盖区边缘外 20 mm 的缺陷的相位分布一致性高于平面波。

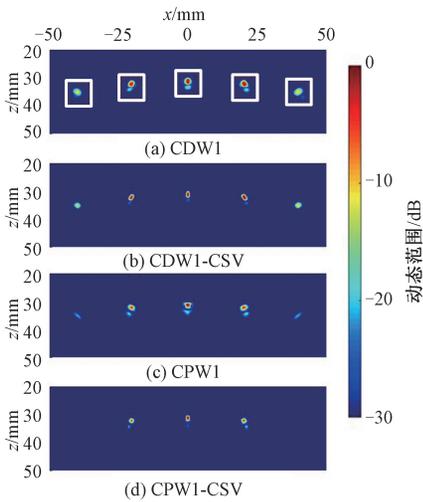


图 6 凹面铝制试块超声图像

Fig. 6 Ultrasound image of aluminum block with concave surface

为了进一步比较发散波和平面波在检测横向位置位于探头覆盖区域边缘外缺陷时的差异, 比较了 CDWI、CDWI-CSV 和 CPWI、CPWI-CSV 中缺陷处的 *API* 和幅值并绘制相应的幅值曲线, 被统计的位置在图 6(a) 中已经使用方框框出, 其他图像的统计区域均与其相同, 其结果如表 2 所示。

表 2 不同算法下凹面铝制试块缺陷的 *API* 和幅值

Table 2 *API* and amplitude values of defects of aluminum block with concave surface in different algorithms

<i>API</i> 及幅值	算法	缺陷编号				
		1号	2号	3号	4号	5号
<i>API</i>	CDWI	2.0	1.2	1.0	1.3	2.1
	CPWI	2.0	0.9	0.7	0.9	2.0
	CDWI-CSV	1.3	0.8	0.7	0.8	1.3
	CPWI-CSV	1.2	0.6	0.5	0.5	0.8
幅值/dB	CDWI	-11.2	-2.4	0	-0.6	-9.7
	CPWI	-21.0	-4.5	0	-3.8	-20.4
	CDWI-CSV	-11.8	-1.9	0	-0.1	-10.0
	CPWI-CSV	-29.3	-4.9	0	-3.473	-28.5

从表 2 中可以看出, 对于在埋深为 30~35 mm, 缺陷横向位置超出探头覆盖区边缘 20 mm 的 1 和 5 号缺陷, 发散波的幅值比平面波高出 9.8~10.7 dB。虽然平面波中探头覆盖区域内的缺陷的 *API* 低于发散波, 但是在探头覆盖区域外的 1 和 5 号缺陷的 *API* 与发散波相当。并且在 CSV 加权处理后, 平面波和发散波图像中缺陷的 *API* 都得到了改善, 但是使用发散波检测的 1 和 5 号缺陷

幅值比使用平面波检测高出了 17.5~18.5 dB。可以看出在相同的扫查角度内, 发散波检测埋深为 30~35 mm, 探头覆盖区边缘外 20 mm 的缺陷的相位分布一致性高于平面波。

从图 7 所示的横向幅值曲线也可以看出, 加入 CSV 处理后图像各处的背景噪声均降低了 20 dB 左右, 但是使用平面波检测的 1 和 5 号缺陷的幅值却下降了 8 dB 左右, 而使用发散波检测只降低了不到 1 dB。所以, 在检测对埋深 30~35 mm, 横向距离超出探头孔径覆盖范围 20 mm 的 $\Phi 2$ 边钻孔缺陷时, CDWI-CSV 是一种可行的方法。

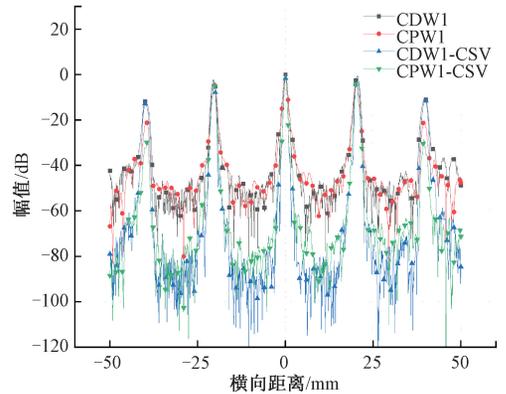


图 7 凹面铝制试块缺陷的横向幅值曲线

Fig. 7 Lateral amplitude curve of aluminum block with concave surface

3.3 矩形铝制试块的缺陷成像结果

将探头按如图 4(b) 所示的方式放置在矩形铝制试块上, 设置发散波和平面波的扫查参数与 3.2 节中一样, 得到横向范围为 -30~30 mm, 纵向范围为 20~140 mm 成像结果, 如图 8 所示。其中 1 号缺陷的埋深在 1 倍的探头孔径以内位置, 2~4 号缺陷埋深大于 1 倍探头孔径, 小于 2 倍探头孔径, 5~7 号缺陷埋深大于 2 倍的探头孔径, 小于 3 倍的探头孔径, 所有缺陷在横向分布上都在探头覆盖范围之内。

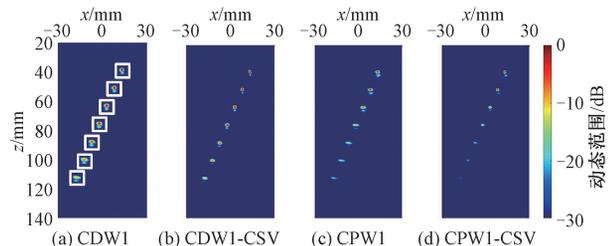


图 8 矩形铝制试块超声图像

Fig. 8 Ultrasound image of rectangular aluminum block

由图可知, 随着缺陷埋深的增加, 当缺陷埋深大于 2 倍探头孔径时, 使用平面波检测的 5~7 号缺陷的聚焦

效果开始明显降低,在经过 CSV 加权处理后,6 和 7 号缺陷已经很难观测到,但是在发散波图像则可以很清楚的确定相应的缺陷位置。可以看出,当检测埋深在 2~3 倍探头孔径之间的缺陷时,发散波对 $\Phi 2$ 边钻孔缺陷的检

出能力大于平面波。

进一步的本文统计了 7 个缺陷的 API 以及幅值,需要统计的位置已在图 8(a) 中用方框框出,具体数据如表 3 所示。

表 3 不同算法矩形铝制试块缺陷的 API 和幅值

Table 3 API and amplitude values of defects of rectangle aluminum block in different algorithms

API 及 幅值	算法	缺陷编号						
		1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号
API	CDWI	1.3	1.6	1.8	2.2	2.6	3.1	3.4
	CPWI	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	1.9	2.1
	CDWI-CSV	0.9	1.1	1.2	1.4	1.6	1.9	2.1
	CPWI-CSV	0.6	0.7	0.9	0.8	1.0	1.0	1.3
幅值/dB	CDWI	0	-0.6	-1.3	-2.8	-5.1	-6.8	-9.1
	CPWI	0	-1.8	-4.2	-7.7	-11.5	-14.1	-17.8
	CDWI-CSV	0	-0.4	-0.8	-2.2	-5.3	-6.8	-9.7
	CPWI-CSV	0	-3.3	-6.4	-10.7	-15.9	-19.8	-24.5

可以看出,4 种算法图像中的缺陷幅值均随着缺陷埋深的增加而降低,平面波图像中 API 的值小于发散波图像。但是发散波图像中缺陷幅值随埋深的增加而降低的幅度明显小于平面波图像,其中埋深在 1~2 倍探头孔径内的缺陷幅值平面波比发散波低了 1.2~4.9 dB;埋深在 2~3 倍孔径之间的缺陷幅值平面波比发散波检测低了 6.4~8.7 dB。CSV 加权算法后,发散波图像中缺陷的分辨率都得到了显著的提高,2~4 号缺陷的幅值略有提高,5~7 号缺陷的幅值略有下降,但是平面波图像中所有缺陷的幅值均出现下降,其中埋深在 1~2 倍探头孔径内的缺陷幅值下降了 1.5~3 dB,比发散波低了 2.9~8.5 dB;埋深在 2~3 倍孔径之间的缺陷幅值下降了 4.4~6.7 dB,比发散波检测低了 10.6~14.8 dB。可知平面波在检测埋深在 1~3 倍孔径大小的缺陷时,获得的缺陷信号的相位分布一致性均低于发散波,在缺陷埋深为 2~3 倍孔径大小时更为明显。

结合图 9 所示的幅值曲线也可以看出,在对发散波进行加权处理之后,在位于 2~3 倍孔径范围之间的缺陷不仅有着高于平面波的幅值,而且背景噪声降低了 10 dB 以上。所以在检测埋深为 2~3 倍探头孔径大小的 $\Phi 2$ 边钻孔时,使用 CDWI-CSV 算法对数据进行处理是一种可行的选择。

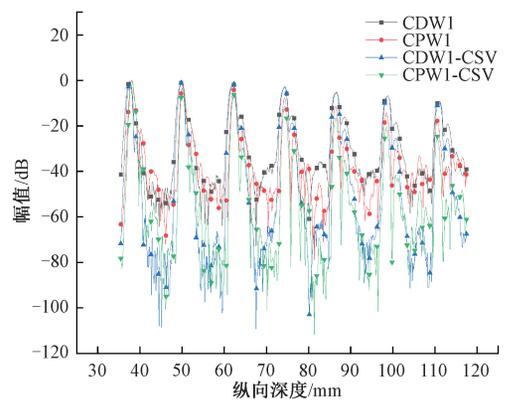


图 9 矩形铝制试块缺陷的纵向幅值曲线

Fig. 9 Vertical amplitude curve of defects of rectangular aluminum block

4 结 论

为提高大壁厚构件的缺陷检测能力,本文提出了一种适用于无损检测的全孔径相干复合发散波成像技术,并通过与平面波图像对比缺陷回波信号的相控阵绩效指数和幅值,得到如下结论:

1) 在检测埋深为 30~35 mm,横向分布超出探头孔径覆盖范围 20 mm 的 $\Phi 2$ 边钻孔时,发散波图像中的缺陷分辨率与平面波图像中的相当;缺陷处幅值比平面波高 9.8~10.7 dB。

2) 在检测横向分布均在探头有效孔径内, 纵向深度为 2~3 倍探头孔径大小的 $\Phi 2$ 边钻孔缺陷时, 发散波获得的超声图像中缺陷幅值比平面波检测要高出 6.4~8.7 dB。

3) 在 CSV 加权处理后, 在上述两种情况下, 发散波图像中缺陷的分辨率均有提高, 并且缺陷处幅值分别较平面波高出 17.5~18.5 dB 和 10.6~14.8 dB。

参考文献

[1] 许国琛, 邓江勇, 陈振华, 等. 钛合金疲劳裂纹的线性和非线性超声综合定量检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 196-202.

XU G CH, DENG J Y, CHEN ZH H, et al. The combination detection technology of the linear and the nonlinear ultrasound for fatigue cracks in titanium alloys[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 196-202.

[2] 邓勇, 曹敏, 赖治屹, 等. 基于深度学习的天然气管道气体压力超声检测模式识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 176-183.

DENG Y, CAO M, LAI ZH Y, et al. Ultrasonic detection pattern recognition method for natural gas pipeline gas pressure based on deep learning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 176-183.

[3] 龙盛蓉, 陈尧, 孔庆茹, 等. 基于符号相干因子加权的双层介质频域相干复合平面波成像[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 32-39.

LONG SH R, CHEN Y, KONG Q R, et al. Fourier-domain coherent plane wave compounding imaging for two-layered medium based on sign coherence factor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 32-39.

[4] KANG S, LEE J, CHANG J H. Effectiveness of synthetic aperture focusing and coherence factor weighting for intravascular ultrasound imaging [J]. Ultrasonics, 2021, 113:106364.

[5] 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.

[6] 金士杰, 刘晨飞, 史思琪, 等. 基于全模式全聚焦方法的裂纹超声成像定量检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 183-190.

JIN SH J, LIU CH F, SHI S Q, et al. Quantitative crack detection by ultrasonic imaging with the full-mode total focusing method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 183-190.

[7] CRUZA J F, CAMACHO J. Total focusing method with virtual sources in the presence of unknown geometry interfaces [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, 2016, 63(10): 1581-1592.

[8] MONTALDO G, TANTER M, BERCOFF J, et al. Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, 2009, 56(3): 489-506.

[9] LUO L, TAN Y, LI J. Wedge two-layer medium ultrasonic plane wave compounding imaging based on sign multiply coherence factor combined with delay multiply and sum beamforming [J]. NDT & E International, 2022, 127: 102601.

[10] YANG C, JIAO Y, JIANG T, et al. A united sign coherence factor beamformer for coherent plane-wave compounding with improved contrast [J]. Applied Sciences, 2020, 10(7): 2250-2265.

[11] RACHEV R K, WILCOX P, VELICHKO A, et al. Plane wave imaging techniques for immersion testing of components with non-planar surfaces [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics Frequency Control, 2020, 67(7): 1303-1316.

[12] LU J, MILLIOZ F, GARCIA D, et al. Reconstruction for diverging-wave imaging using deep convolutional neural networks [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(12): 2481-2492.

[13] HASEGAWA H, KANAI H. High-frame-rate echocardiography using diverging transmit beams and parallel receive beamforming [J]. Journal of Medical Ultrasonics, 2011, 38(3): 129-140.

[14] PORÉE J, POSADA D, HODZIC A, et al. High-frame-rate echocardiography using coherent compounding with Doppler-based motion-compensation [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2016, 35(7): 1647-1657.

[15] SUTCLIFFE M, CHARLTON P, WESTON M. Multiple

- virtual source aperture imaging for non-destructive testing[J]. *Insight-Non-Destructive Testing Condition Monitoring*, 2014, 56(2): 75-81.
- [16] ORLOWSKA M, RAMALLI A, BEZY S, et al. In vivo comparison of multiline transmission and diverging wave imaging for high-frame-rate speckle-tracking echocardiography[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 68(5): 1511-1520.
- [17] PAPADACCI C, PERNOT M, COUADE M, et al. High-contrast ultrafast imaging of the heart[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2014, 61(2): 288-301.
- [18] YANG J, LUO L, YANG K, et al. Ultrasonic phased array sparse tfm imaging based on virtual source and phase coherent weighting[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 185609-185618.
- [19] ZHANG X, PAN G. Collapse of thick-walled subsea pipelines with imperfections subjected to external pressure[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 213: 107705.
- [20] ZANGANEH R, JABBARI E, TIJSSELING A, et al. Fluid-structure interaction in transient-based extended defect detection of pipe walls[J]. *J. Hydraul. Eng*, 2020, 146(4): 04020015.
- [21] 陈尧, 孔庆茹, 卢超, 等. 超声相干平面波复合成像的环形统计矢量加权[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(10): 264-273.
- CHEN Y, KONG Q R, LU CH, et al. Circular statistics vector weighting for ultrasound coherent plane wave compounding [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(10): 264-273.
- [22] 冒秋琴, 陈尧, 张柏源, 等. 相位环形统计矢量对提高全聚焦成像质量的影响[J]. *声学学报*, 2020, 45(6): 913-921.

MAO Q Q, CHEN Y, ZHANG B Y, et al. Enhancing effect of phase circular statistics vector for improvement imaging quality of ultrasonic total focusing method[J]. *Acta Acustica*, 2020, 45(6): 913-921.

作者简介



陈尧, 分别于 2008 年和 2011 年于辽宁工业大学获得学士学位和硕士学位, 2016 年于大连理工大学获得博士学位, 现为南昌航空大学副教授, 主要研究方向为超声成像检测及超声信号处理。

E-mail: chenyaoyao1984@foxmail.com

Chen Yao received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Liaoning University of Technology in 2008 and 2011, and received his Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2016. He is currently an associate professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic imaging detection and ultrasonic signal processing.



李昊原, 2019 年于南京工程学院获得学士学位, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为超声成像检测及超声后处理成像。

E-mail: lihaoyuan1110@foxmail.com

Li Haoyuan received his B. Sc. degree from Nanjing Institute of Technology in 2019. He is currently a master student at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic imaging detection and ultrasonic post-processing imaging.



李秋锋(通信作者), 2008 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现在为南昌航空大学教授, 主要研究方向为声学检测及信号处理。

E-mail: qiufengli@nuaa.edu.cn

Li Qiufeng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2008. He is currently a professor and a master advisor at Nanchang Hangkong University. His main research direction is acoustic detection and signal processing.