

# 基于DCF建模的混凝土超声阵列全聚焦成像\*

王冠<sup>1</sup>, 高鸿波<sup>1</sup>, 王志刚<sup>2</sup>, 王海涛<sup>3</sup>, 石文泽<sup>1</sup>, 李秋锋<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌, 330063)

(2. 南昌市建筑科学研究所 南昌, 330029)

(3. 中建一局集团第二建筑有限公司 北京, 102600)

**摘要** 为了进一步提高混凝土检测信噪比及成像分辨率,提出一种基于数字补偿滤波的超声阵列全聚焦成像技术。首先,针对低频超声探头频率响应所造成的检测信号出现的振铃影响,采用数字补偿滤波的方法对检测信号进行补偿校正,提高信噪比;其次,用补偿滤波后的检测信号建立全数据矩阵,并采用全聚焦算法进行结构成像;最后,根据信号特征校正缺陷与底面位置,获得高质量结构成像图。与未经过数字补偿滤波的成像结果相比,检测信号经过数字补偿滤波后,成像图中的伪像数量与面积大幅减少,缺陷和底面更加突出,缺陷处信噪比提高了9.6 dB,缺陷的定位更准确,能够满足工程检测要求。

**关键词** 混凝土结构;超声阵列;数字补偿滤波;信噪比

**中图分类号** TB5;TU317

## 引言

混凝土材料是现代主要建筑材料之一,其应用非常广泛<sup>[1-2]</sup>。混凝土的大量使用,使得其质量安全十分重要,业界也在积极探索混凝土结构高精度快速检测方法。

超声检测具有安全性好、灵敏度高、适用性广等优势,是混凝土无损检测应用较多的一种方法<sup>[3-4]</sup>。20世纪90年代,参照国外较成熟的检测规范,我国先后制定了多个混凝土超声检测技术规程,极大促进了我国混凝土超声检测的发展<sup>[5]</sup>。

混凝土结构中通常含有大颗粒砂石骨料,对超声传播产生了极大衰减,而且多种声学界面造成超声波的多次折射、反射与波形转换,产生大量杂波,对超声高分辨成像造成极大影响,也是混凝土超声检测的难点。为了提高超声波在混凝土中的穿透能力,检测频率一般在20~200 kHz的范围内,可以降低超声能量衰减<sup>[6-7]</sup>。当检测频率较低时,会产生以下问题:①低频超声波长较长,会绕过小尺寸缺陷而造成漏检;②由于低频压电探头结构设计问题,当电信号激励结束后,晶片不会立刻停止振动,造成低频探头的“振铃现象”,即余振。这些余振往往会延长激励信号宽度,增加检测盲区,造成缺陷信号的淹

没,影响对缺陷的识别。

低频探头余振问题可以采用数字补偿滤波(digital compensation filtering,简称DCF)算法进行补偿,该算法是一种线性移不变系统补偿方法,对于抑制探头频响造成的信号失真、还原畸变信号有着较好的效果。李秋锋等<sup>[8]</sup>研究指出,DCF算法对低频探头振铃补偿效果明显,对于混凝土超声回波信号有着较大改善。孙颖<sup>[9]</sup>将DCF应用到20 MHz水浸高频探头频响补偿中,针对检测信号的畸变进行了补偿滤波,能够更好地采用匹配追踪技术进行涂层反射信号的识别。

对于超声波的绕射问题,可以采用延时叠加方法(delay and sum,简称DAS)来解决。超声合成孔径成像技术是DAS的代表算法<sup>[10-11]</sup>。混凝土超声合成孔径成像技术的缺点是由于超声混凝土检测所需的检测频率较低,探头尺寸较大,因此探头阵列孔径数较少,一般由6~12个探头组成,检测数据量相对较少。Shao等<sup>[12]</sup>在混凝土中开展合成孔径超声检测,仅用12探头阵列,获得了12个孔径数据,聚焦缺陷与平均噪声的能力较差,导致成像效果一般。

阵列全聚焦算法是一种先进的延时叠加算法。近年来,在复合材料与金属材料的无损检测中,阵列

\* 国家自然科学基金资助项目(11764030,12364056);江西省主要学科和技术带头人计划资助项目(20204BCJL22039);江西省自然科学基金重点资助项目(20212ACB204014)

收稿日期:2022-03-18;修回日期:2022-07-05

全聚焦算法取得了较好的应用效果。文献[13-14]将相位相干算法引入到阵列全聚焦算法中,通过动态加权来抑制结构噪声。Weston等<sup>[15]</sup>通过补偿校准角度与深度,进行阵列全聚焦成像,成像质量得到明显提高。

目前,合成孔径算法在混凝土检测中研究较多,但全聚焦算法对于混凝土成像研究较少。阵列全聚焦算法可使用相同孔径的探头阵列获得更多数据,以提高成像质量<sup>[16]</sup>。由于获得了更多的超声孔径信号,可在缺陷处叠加更多回波信号,对于混凝土中的超声反射与散射有着更佳的处理效果。

## 1 阵列全聚焦算法原理

DAS算法按照孔径信号的获得方法可分为合成孔径聚焦技术(synthetic aperture focusing technique,简称SAFT)与全聚焦算法(total focusing method,简称TFM),其中SAFT最早应用于阵列雷达中,随后引入到医学成像与工业检测中,成为超声检测的常用工具<sup>[17-18]</sup>。SAFT的原理是使用单个超声探头在检测区域发射并接收超声信号,沿着一个方向移动一段固定距离,再进行发射与接收信号,在进行 $n$ 次操作后,可得到 $n$ 个超声回波信号<sup>[19-20]</sup>。TFM是基于SAFT方法发展而来的一种算法,采用一发多收模式代替SAFT单探头收发模式。在检测环境相同的情况下,TFM可以获得更多的超声回波数据,从而提高成像的分辨率。

全聚焦成像原理示意图如图1所示,其成像思路为多个超声探头组成探头阵列,依次在检测区域等距排开<sup>[21]</sup>。当某个探头发射超声波,经与检测对象中的声学界面作用后散射超声波,包括发射探头内的所有探头接收回波信号并储存。然后,下一个探头发射超声波,所有探头接收信号,依次进行,直到最后一个探头激励信号,所有探头接收。这样在 $n$ 探头阵列中,1个探头激励信号便可得到 $n$ 个回波,一共可得到 $n^2$ 个回波信号,这组回波信号称为全矩阵(full matrix capture,简称FMC)信号<sup>[22]</sup>。

设检测区声速为 $c$ ,第 $i$ 个探头为发射探头,坐

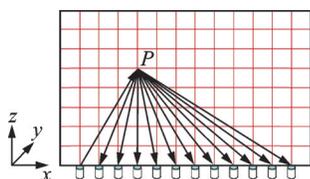


图1 全聚焦成像原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of TFM

标为 $(x_i, 0)$ ,第 $j$ 个探头为接收探头,坐标为 $(x_j, 0)$ ,反射点 $p$ 的坐标为 $(x_p, y_p)$ ,由探头 $i$ 激励的声波与反射点作用后反射回探头 $j$ 经历的时间 $t_{(i,j)}$ 为

$$t_{(i,j)} = \frac{\sqrt{(x_p - x_i)^2 + y_p^2} + \sqrt{(x_p - x_j)^2 + y_p^2}}{c} \quad (1)$$

反射点 $p$ 的幅值 $S(x_p, y_p)$ 为

$$S(x_p, y_p) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_{(i,j)}(t_{(i,j)}) \quad (2)$$

其中: $H_{(i,j)}$ 为第 $i$ 个探头激励信号和第 $j$ 个探头接收的孔径信号。

按照上述算法,对混凝土结构中每个反射点依次进行聚焦,最后实现结构剖面成像。

超声探头扩散角大小决定声波的集中程度,也决定DAS算法中某个探头发射后,接收探头收到的回波是否为成像点的反射回波。超声扩散角 $\theta$ 近似计算公式为

$$\theta = \arcsin 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (3)$$

其中: $\lambda$ 为声波波长; $D$ 为超声探头直径。

由式(3)可知,低检测频率的扩散角较大。在DAS算法中,较大的扩散角有利于接收探头收到更多的有效回波信号,而低频信号也有利于在混凝土中的传播。

## 2 DCF算法原理

### 2.1 DCF原理

在混凝土超声检测中通常使用20~200 kHz的频率,较低频率可提高超声波绕射能力,从而减少超声散射造成的能量损耗;但频率较低的探头会产生较长的余振,可能会淹没缺陷信号。以50 kHz低频压电探头为例,其余振往往可达到5个周期以上,即100  $\mu$ s,导致接收探头所接收到的波形中,直达波及余振完全与底波相连而不能区分。

为了直观表明上述过程,设计了混凝土底波接收实验,其示意图如图2所示。实验中的无缺陷混

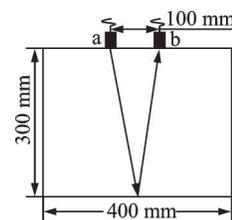


图2 混凝土底波接收实验设计示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental design for concrete bottom wave reception

混凝土试块高为 300 mm、宽为 400 mm,平均声速约为 4 050 m/s。其中:a 为发射探头;b 为接收探头;两探头相距 100 mm。使用 a 探头激励超声波后,记录 b 探头接收到的回波。接收信号波形图如图 3 所示。

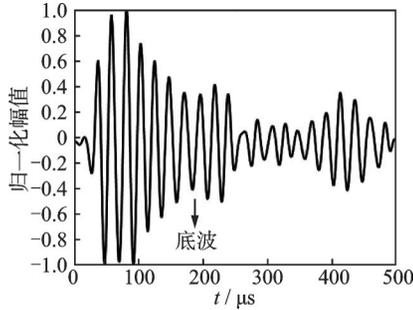


图 3 接收信号波形图

Fig.3 The received signal waveform

经声时历程计算,在图 3 中 b 探头接收的信号上标记出实际底波位置,可以看出底波与探头余振信号基本混叠在一起,如果有缺陷回波,也将被余振淹没,在成像中将造成错检、漏检等情况。

为了优化上述问题,引入 DCF 方式对探头频响进行补偿滤波,其目的是补偿一个非理想的频率响应系统,以抑制余振对检测信号的影响。DCF 流程如图 4 所示。假设输入信号  $x(n)$  为激励信号,输出信号  $y(n)$  为接收信号,传递函数为  $H(z)$ ,对于  $y(n)$  的补偿相当于求解逆传递函数  $h(z)$ ,实现对  $y(n)$  的补偿滤波,DCF 后的输出结果  $x'(n)$  就是接近输入信号  $x(n)$  的结果,即可抑制余振影响。

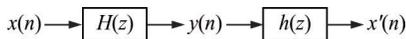


图 4 DCF 流程图

Fig.4 DCF flowchart

超声探头可以看作一个响应系统,激励探头的电信号为输入,超声探头发出的超声信号为输出,该系统为一个线性移不变(linear and time invariance, 简称 LTI)系统。对于一个由输入  $x(n)$  和输出  $y(n)$  构成的 LTI 系统的动态特征可用常系数差分方程<sup>[23]</sup>来描述,即

$$y(n) + \sum_{i=1}^N a(i)y(n-i) = \sum_{j=0}^M b(j)x(n-j) \quad (4)$$

其中: $a(i)$ , $b(j)$ 为决定系统性质的常系数,可以使用 Matlab 系统辨识函数工具箱来进行求解。

对式(4)两边同时进行 Z 变换,可得

$$Y(z) \left[ 1 + \sum_{i=1}^N a(k)e^{-i} \right] = X(z) \left[ b(0) + \sum_{j=1}^M b(j)z^{-j} \right] \quad (5)$$

系统传递函数  $H(z)$  可表示为

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{j=0}^M b(j)z^{-j}}{1 + \sum_{i=1}^N a(i)z^{-i}} \quad (6)$$

系统的逆函数  $h(z)$  可表示为  $1/H(z)$ ,只需要将  $h(z)$  级联到处理系统中, $x(n)$  通过  $H(z)$  后的输出为  $y(n)$ ,再通过  $h(z)$  后的输出为  $x'(n)$ 。由于两个系统互逆,可得  $x'(n) = x(n)$ ,即信号经过  $H(z)$  滤波后再通过  $h(z)$ ,相当于中和了  $H(z)$  的滤波效果,信号得以补偿而校正回来。

## 2.2 DCF 模型的建立

实验中使用的探头为康科瑞公司生产的 50 kHz 探头,对探头进行补偿滤波需要建立探头逆函数模型。首先采集激励信号经过探头系统后接收的超声信号,但超声在传播过程中还需经过传播介质,为了更准确地得到系统真实的传递函数,需尽可能排除传播介质造成的信号失真,故选择水作为超声传播介质。水作为一种各向同性的液体介质,在信号传播过程中对信号只有幅值衰减的作用,而不会改变信号的相位与频率等特征。在 TFM 算法中,每个信号进行相等比例的幅值衰减,不会对成像效果造成影响,因此检测信号中的余振可以认为都来自于探头。

选择 2 个探头分别作为发射探头与接收探头。在探头逆函数模型建立实验中,使用 1 个深为 200 mm 的树脂容器并注满纯净水,将发射探头与接收探头固定在水面,分别采集激励信号与接收信号。在接收信号中,采用第 1 个底面反射波包信号作为被补偿信号。水浸检测信号提取示意图见图 5。

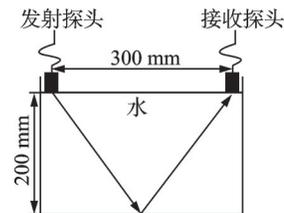


图 5 水浸检测信号提取示意图

Fig.5 Schematic diagram of signal extraction method with water immersion detection

水浸信号激励与接收波形图如图 6 所示。按照 2.1 节方法,截取出接收信号的第 1 个底波反射信号,分析其传递函数系统,进行补偿滤波。在 Matlab 系统辨识工具箱中,辨识系统需要关注阶数的选择,即式(6)中  $a(i)$  与  $b(j)$  的选择,阶数偏大与偏小

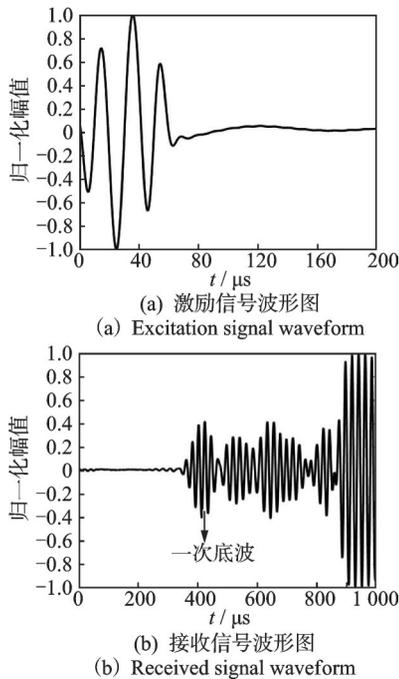


图6 水浸信号激励与接收波形图

Fig.6 The excitation and reception signal waveforms with water immersion

都会对补偿效果造成很大影响。经过比较后,选用9阶估计补偿效果最佳,得到该组2个探头的补偿系统 $h(z)$ 的 $a(i)$ 与 $b(j)$ 系数。得到补偿系统 $h(z)$ 后,对接收信号的第1个波包进行DCF。信号DCF前后效果对比如图7所示。可以看出,DCF后的信号中余振基本被去除,与激励信号在主体上已大致相同,虽然在尾部还残留少量误差,但已基本满足抑制余振的目的。采用该方法对实验信号进行DCF,可以避免缺陷反射被余振淹没,从而突显缺陷位置。

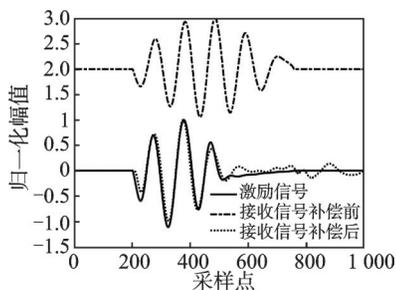


图7 信号DCF前后效果对比

Fig.7 Comparison of effects before and after signal DCF

超声传播过程中的反射、散射等声学现象以及电信号传导过程都会造成信号形变,这些形变因素多数是LTI系统。在本次实验中,信号形变则主要来源于低频探头振铃。由于DCF是针对LTI引起的信号形变,因而补偿过程也适用其他LTI系统引起的信号形变。

### 3 实验信号采集与补偿

#### 3.1 完整DCF模型的建立

在进行实验信号采集前,需要建立完整的DCF模型。虽然本次使用的探头为同一批次探头,但每个探头的性质略有不同,重复性一般,所以需要为每个探头建立DCF模型。虽然信号经发射探头与接收探头都会受到影响,但LTI系统具有叠加性,因此可将发射探头与接收探头看为一个系统,通过补偿系统可一次性对信号进行补偿。

#### 3.2 实验信号采集

实验中所用的混凝土试块长、高、宽分别为400,300和200 mm,中部有一个直径为50 mm的穿孔。经多次声速测量,取平均值为4 050 m/s。混凝土试块如图8所示。

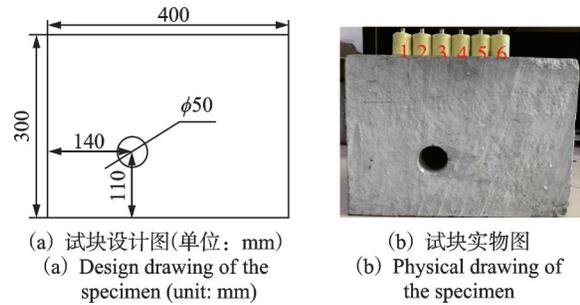


图8 混凝土试块

Fig.8 The concrete specimen

实验平台由工程主机、信号发射接收器、多通道信号转换器以及若干个探头组成,采用1发6收模式,探头编号如图8(b)所示。每个探头直径为40 mm,探头盲区平均约为30 mm。为了保证发射和接收效果,在探头与试块间涂了一层耦合剂。在混凝土试块上,每两个探头之间紧贴排放。激励信号中心频率为50 kHz,采样率设置为5 MHz。由计算机控制发出激励信号,经由多通道信号转换器,发射探头在试块上发射超声波,所有接收探头接收到回波后,将接收信号传输至计算机中。然后,再激励下一个探头发射信号并接收信号,直到所有探头依次完成激励并采集完成接收信号。整个过程共收集到6组信号,每组包含6个信号,共36个孔径数据。实验检测系统如图9所示。

#### 3.3 信号的DCF

信号采集时间为500  $\mu$ s,采样率为5 MHz,获得的采样点共2 499个。为了对比实验效果,以3号探

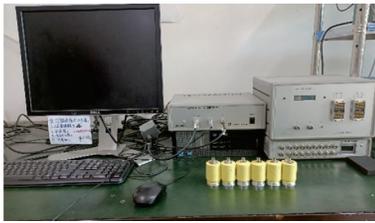


图 9 实验检测系统

Fig.9 The experimental detection system

头发射、5号探头接收到的信号为例,实验信号 DCF 前后波形成如图 10 所示。由图可以看出:在波形 DCF 前,整个波形中只有一个大的波包,无法分辨波形成分;在进行 DCF 后,波形中可以明显区分为 3 个波包,有利于分析声波在试块中的传播情况。根据接收探头和发射探头的位置、缺陷深度及试块高度,通过波时历程推算,可以确定 DCF 后波形中的 3 个波包分别为直达波、缺陷波与底波,有效抑制了探头余振的影响,还原出了检测信号中的各个回波信号。

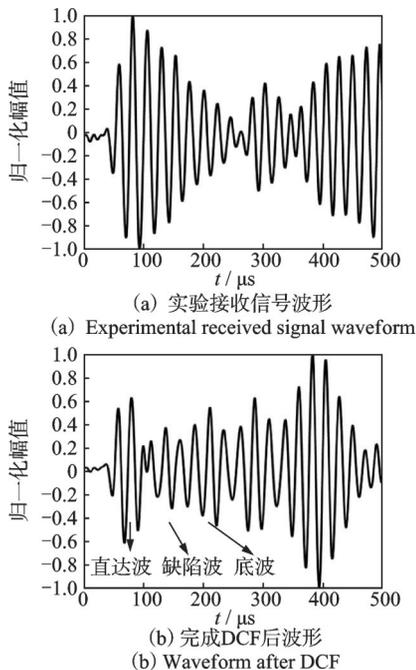


图 10 实验信号 DCF 前后波形对比

Fig.10 Comparison of experimental signal waveforms before and after DCF

## 4 信号成像

### 4.1 成像效果对比

为了观察 DCF 效果,采用 Matlab 分别对原信号与 DCF 后的信号进行 TFM 算法成像。DCF 前后成像结果对比如图 11 所示。其中:圆形虚线表示缺陷位置;底部虚线表示底波位置。

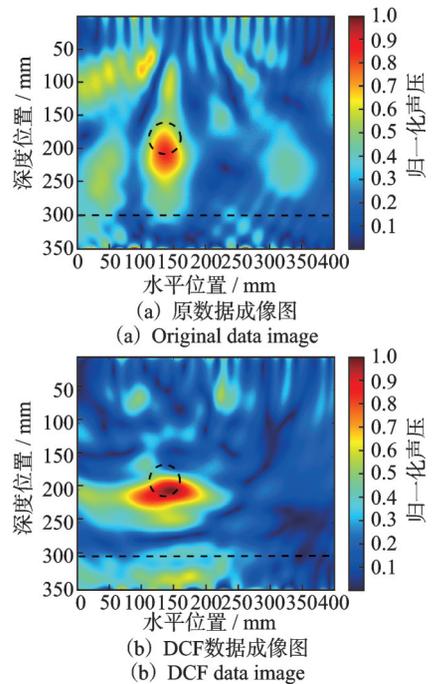


图 11 DCF 前后成像结果对比

Fig.11 Comparison of imaging results before and after DCF

对比成像结果可以发现:在信号 DCF 前,由于探头余振影响,缺陷反射信号被淹没,虽然经过 TFM 处理能够消除一些余振影响,缺陷位置基本能够识别出来,但也形成了许多伪像,且图像中没有明显底波,在图像上部及下部存在波浪形纹理,图像信噪比很低,对缺陷判别产生很大影响;在 DCF 后,缺陷聚焦更加明显,产生的伪像数量和幅值都大幅下降,更利于对缺陷的判别,且在进行 DCF 后,试块底波明显且较完整,缺陷与底面成像质量均得到了提升。

### 4.2 成像缺陷位置校正

声波在传递过程中,遇到声学界面会发生反射,故在成像图中,像素高的位置表示缺陷上表面与底波,而不是直接表示缺陷位置。观察成像图可发现,图中缺陷上表面与底波水平位置正常,而缺陷深度位置均偏下。这是因为:经补偿滤波后,试块缺陷声学界面与底面声学界面反射声波的波包长度大约为  $50 \mu\text{s}$  左右,而波包峰值约在  $25 \mu\text{s}$  处,所以声学界面反射波包刚到达接收探头时的幅值并不是最高;又由于成像图中各点幅值是由 FMC 孔径信号幅值决定的,孔径数据某一处幅值较高,对应声时历程处的图像幅值就高。缺陷波峰值位置示意图见图 12。

由图 12 可以看出,波包开始位置与峰值相差约为  $25 \mu\text{s}$ ,造成成像时声学界面成像位置偏下。由于  $25 \mu\text{s}$  的延时是发射与接收声程,根据爆炸反射原理<sup>[24]</sup>,可认为是声学界面处发射声波,该模型下声

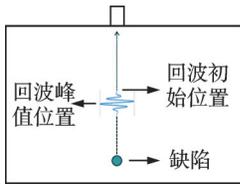


图12 缺陷波峰值位置示意图

Fig.12 Schematic diagram of the peak position in flaw echo

速为原声速的一半,即 2 025 m/s,所以声学界面位置偏下的幅度约为 50 mm。为了还原声学界面原本位置,需要重新建立深度位置零点,新的零点位置应为原图像 50 mm 处。位置校正后 DCF 成像图如图 13 所示。可以看出,图中的高幅值区域在缺陷上方,即空气与混凝土界面处,图像校正效果合理。

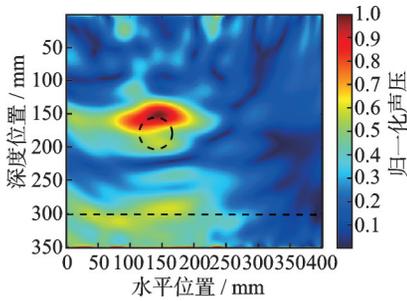


图13 位置校正后 DCF 成像图

Fig.13 DCF imaging result after position correction

采用 SAFT 检测时,以探头半径 20 mm 为步进测量了 15 个孔径数据,然后进行补偿滤波和位置校正。位置校正后进行 DCF 的 SAFT 成像图如图 14 所示。与图 13 比较,成像结果很差,主要原因如下:  
①由于探头自发自收时其余振会叠加 2 次,信号畸变极其严重,在进行 DCF 后也难以分辨信号成分;  
②由于孔径数据有限,无法对直达波干扰和结构噪声进行有效抑制,所以 SAFT 成像图中出现了许多伪像,虽然缺陷位置也显示出来,但是并不突出,而且底波基本不可见。

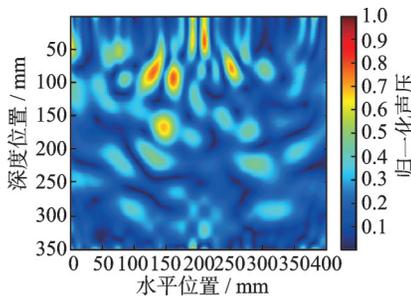


图14 位置校正后进行 DCF 的 SAFT 成像图

Fig.14 DCF imaging result with SAFT after position correction

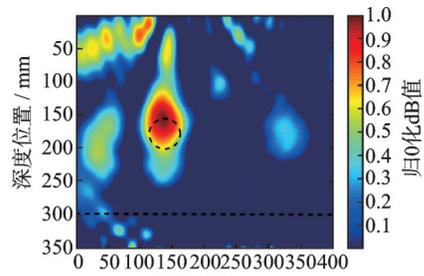
### 4.3 实验结果量化对比

为量化图像信噪比提升效果,将图像幅值以分贝 (dB) 为单位呈现<sup>[14,25]</sup>,量化效果计算如下

$$I_m(x, z) = 20 \lg \left( \frac{|I(x, z)|}{\max(I)} \right) \quad (7)$$

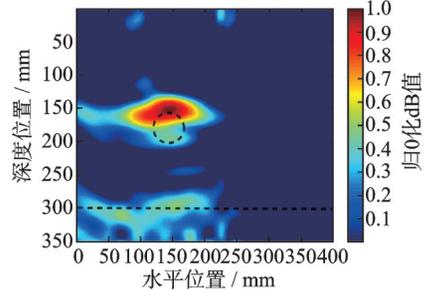
其中:  $x, z$  分别为成像图横、纵坐标;  $I_m$  为检测区域内成像点幅值;  $\max$  表示取最大值的函数。

成像图中每个点都是以图中最大幅值为基准的相对差值,再以 -20 dB 为阈值,将  $I_m$  中小于 -20 dB 的点全部取值为 -20 dB (相当于将小于最大幅值 10% 的信号都滤除),最后进行成像。分贝幅值成像结果对比如图 15 所示。这样处理可以把检测信号中的随机干扰噪声从成像图中直接滤除,从而提高图像的清晰度,更有利于进行缺陷判别。



(a) 原数据幅值分贝成像图

(a) Original data amplitude dB image



(b) DCF 数据幅值分贝成像图

(b) DCF data amplitude dB image

图15 分贝幅值成像结果对比

Fig.15 Comparison of dB amplitude imaging results

然后,按照 Brenner 算法计算声学界面附近区域每组相邻像素灰度差值,计算缺陷处信噪比<sup>[25]</sup>。信噪比计算网格如图 16 所示。缺陷与缺陷周围分贝幅值的差值越大,说明信噪比越高。

图 16 中,假设  $a$  为缺陷位置,  $a_1 \sim a_8$  为与缺陷相邻的 8 个区域,由于已知缺陷位置与大小,则可以在幅值分贝成像图中得到缺陷区域与相邻 8 个区域的幅值,在对缺陷周围网格划分完成后,令  $a$  区域平均 dB 幅值为  $A_0$ ,  $a_1 \sim a_8$  区域平均幅值为  $A_1 \sim A_8$ ,则缺陷处信噪比 SNR 为

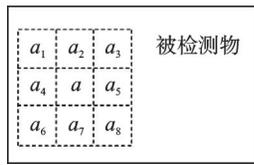


图16 信噪比计算网格

Fig.16 SNR calculation grid

$$\text{SNR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (A_0 - A_i)^2}{8}} \quad (8)$$

其中: $i$ 为缺陷相邻区域编号。

实验中缺陷直径为50 mm,在以声学界面处为中心、以150 mm为边长划定Brenner计算区域,计算信噪比。在-20 dB阈值下,未经过信号DCF成像图信噪比为5.7 dB;经过信号DCF,成像图信噪比为15.3 dB,信噪比提高了9.6 dB。

此外,还对缺陷圆孔上方的顶点位置进行了定位精度计算。因为每组接收信号中都会有该点反射信号,经过TFM计算后是图中最大幅值点。根据图8中缺陷尺寸和位置,以图15的坐标零点为基准,缺陷圆孔的上顶点坐标为(140,165)。图15(a)中最大幅值处坐标为(133,175),绝对误差计算结果为12.2 mm;图15(b)中最大幅值处坐标为(140,159),绝对误差为6 mm,且在水平方向没有误差。根据比较结果可以看出,经过DCF后,对损伤的定位更加准确。

## 5 结束语

笔者提出了一种基于DCF的方法并应用于混凝土全聚焦成像中,通过建立阵列探头组的DCF模型,对混凝土超声检测信号进行补偿滤波,有效抑制了余振的影响,突显出缺陷反射信号。对DCF前后的全聚焦成像结果比较可以发现,使用DCF后的信号进行成像可以有效减少伪像,且DCF后信号底波更加明显,缺陷处的信噪比较DCF前成像结果平均提高了9.6 dB,进一步提高了全聚焦成像质量。对成像图中的缺陷位置偏差原因进行了分析,找出造成偏差的原因并进行了位置校正,提高了缺陷定位的准确性,其中经过DCF后的定位精度更高。

## 参 考 文 献

[1] 郑守仁,孙志禹,朱红兵. 三峡工程大体积混凝土施工技术[J]. 中国科学(技术科学), 2017, 47(8): 796-804.  
ZHENG Shouren, SUN Zhiyu, ZHU Hongbing. Mass

concrete construction technology of the three gorges project [J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, 47(8): 796-804.(in Chinese)

- [2] 张乐,党发宁,丁卫华,等. 基于改进差分盒维数法的混凝土细观损伤定量研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(4): 973-985.  
ZHANG Le, DANG Faning, DING Weihua, et al. Quantitative study of concrete mesoscopic damage based on the improved differential box counting method [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(4): 973-985.(in Chinese)
- [3] 何浩祥,郑家成,廖李灿,等. 基于裂缝分形特征的钢混梁疲劳损伤精细评估[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(3): 503-510.  
HE Haoxiang, ZHENG Jiacheng, LIAO Lican, et al. Refined fatigue damage assessment of reinforced concrete bridge based on fractal characteristics of cracks[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(3): 503-510.(in Chinese)
- [4] 许颖,张何勇,王青原. 基于非线性超声技术的热损伤混凝土微裂纹检测实验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 126-135.  
XU Ying, ZHANG Heyong, WANG Qingyuan. Micro-crack detection tests of thermal damage concrete based on nonlinear ultrasonic technology [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 126-135.(in Chinese)
- [5] LI Q, WANG Y, LIU R, et al. Research on ultrasonic computerized tomography imaging method of concrete materials based on simulated annealing genetic algorithm [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 32(3): 341-347.
- [6] 朱先祥,许军才,倪福海,等. 基于CEEMD的冲击回波分析方法研究[J]. 失效分析与预防, 2020, 15(6): 358-364.  
ZHU Xianxiang, XU Juncai, NI Fuhai, et al. Research on analysis method of impact echo based on CEEMD [J]. Failure Analysis and Prevention, 2020, 15(6): 358-364.(in Chinese)
- [7] 王冠,黄丽霞,王志刚,等. 基于全聚焦算法的混凝土超声阵列探测成像方法[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 482-489.  
WANG Guan, HUANG Lixia, WANG Zhigang, et al. A TFM based ultrasonic array detection and imaging method for concretes [J]. Technical Acoustics, 2021, 40(4): 482-489.(in Chinese)
- [8] 李秋锋,石立华,梁大开,等. 混凝土检测中基于数字滤波的传感器补偿方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(1): 55-59.  
LI Qiufeng, SHI Lihua, LIANG Dakai, et al. Compen-

- sating method for transducers based on digital filtering in concrete test [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(1): 55-59. (in Chinese)
- [9] 孙颖. 涡轮叶片热障涂层结构状态超声检测方法研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
- [10] 邵志学, 石立华, 张琦. 混凝土超声检测技术的研究与实现 [J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(3): 397-401. SHAO Zhixue, SHI Lihua, ZHANG Qi. Structural damage alarming based on empirical mode decomposition [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(3): 397-401. (in Chinese)
- [11] 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像 (一) [J]. 应用声学, 1993(3): 43-48. SUN Baoshen, SHEN Jianzhong. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (1) [J]. Applied Acoustics, 1993(3): 43-48. (in Chinese)
- [12] SHAO Z X, SHI L H, SHAO Z, et al. Design and application of a small size SAFT imaging system for concrete structure [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(7): 073708.
- [13] CHEN Y, LUO Z B, ZHOU Q, et al. Modeling of ultrasonic propagation in heavy-walled centrifugally cast austenitic stainless steel based on EBSD analysis [J]. Ultrasonics, 2015, 59: 31-39.
- [14] 陈尧, 冒秋琴, 陈果, 等. 基于Omega-K算法的快速全聚焦超声成像研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 128-134. CHEN Yao, MAO Qiuqin, CHEN Guo, et al. Research on high-speed total focusing ultrasonic imaging method based on Omega-K algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 128-134. (in Chinese)
- [15] WESTON M, NAGESWARAN C, SUTCLIFFE M, et al. Calibration of ultrasonic techniques using full matrix capture data for industrial inspection [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, 54(11): 602-611.
- [16] 李秋锋, 石立华, 梁大开. 基于合成孔径聚焦技术的混凝土断面二维成像方法研究 [J]. 声学学报, 2008, 33(4): 370-377. LI Qiufeng, SHI Lihua, LIANG Dakai. Study on 2D imaging technique for concrete cross section based on SAFT [J]. Acta Acustica, 2008, 33(4): 370-377. (in Chinese)
- [17] 翟京生, 邹博, 徐剑, 等. 一种高精度水下成像声呐性能实验研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 223-227. ZHAI Jingsheng, ZOU Bo, XU Jian, et al. Tests for performances of a high-resolution underwater imaging sonar [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 223-227. (in Chinese)
- [18] 孙宝申. 合成孔径成像的应用及发展 [J]. 应用声学, 2018, 37(5): 787-793. SUN Baoshen. Applications and development of synthetic aperture imaging [J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(5): 787-793. (in Chinese)
- [19] 李力, 魏伟, 夏旺. 基于合成孔径聚焦技术的煤岩超声成像检测研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 727-734. LI Li, WEI Wei, XIA Wang. Coal-rock ultrasonic imaging and testing research based on synthetic aperture focusing technology [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 727-734. (in Chinese)
- [20] 李衍. 超声相控阵全聚焦法成像检测 [J]. 无损检测, 2017, 39(5): 57-64. LI Yan. Ultrasonic phased array imaging testing by total focusing method [J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(5): 57-64. (in Chinese)
- [21] 周正干, 彭地, 李洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 1-7. ZHOU Zhenggan, PENG De, LI Yang, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 1-7. (in Chinese)
- [22] 葛璐璐, 陈尧, 王志刚, 等. 基于全聚焦的钢筋混凝土超声高分辨成像方法 [J]. 传感技术学报, 2022, 35(3): 361-366. GE Lulu, CHEN Yao, WANG Zhigang, et al. High resolution ultrasonic imaging method for the reinforced concrete based on total focusing [J]. Chinese Journal of Sensors And Actuators, 2022, 35(3): 361-366. (in Chinese)



**第一作者简介:**王冠,男,1996年6月生,博士生。主要研究方向为超声无损检测技术。曾发表《Ultrasonic computerized tomography imaging method with combinatorial optimization algorithm for concrete pile foundation》(《IEEE ACCESS》2019, No.7)等论文。

E-mail: 852031629@qq.com

**通信作者简介:**李秋锋,男,1976年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为无损检测技术与仪器、检测信号分析与处理及材料评价等。

E-mail: qiufenglee@163.com