

基于超声相控阵的角焊缝缺陷信号 重构方法研究

梁国安¹, 姚叶子², 郑凯¹, 许倩², 王海龙³, 王海涛²

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院, 南京 210036;

2. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016;

3. 江苏长城计算机系统有限公司, 江苏南通 226000)

摘要: 在对接管角焊缝进行超声检测的过程中, 由于检测的工件结构复杂并且仪器设备本身会受到电信号干扰, 所以检测得到的 A 扫信号存在噪声, 在检测图像中会出现“伪像”, 从而造成检测困难; 如果想要提高检测图像的质量, 对于 A 扫信号的降噪尤为重要, 所以提出小波去噪和经验模态分解相结合的角焊缝缺陷信号重构方法; 首先分析接管角焊缝结构特点, 进行相控阵检测试验, 得到缺陷检测数据; 然后着重分析了裂纹与未熔合缺陷信号, 完成对其的经验模态分解与重构; 最后通过对原始信号进行小波去噪及经验模态分解与重构, 从而达到了比传统的算法更高的信噪比与更低的均方误差, 说明本算法有更好的去噪效果, 更有利于超声回波信号的分析。

关键词: 超声相控阵; 角焊缝; 小波分析; 经验模态分解; 去噪

Research on Reconstruction Method of Fillet Weld Defect Signal Based on Ultrasonic Phased Array

LIANG Guoan¹, YAO Yezi², ZHENG Kai¹, XU Qian², WANG Hailong³, WANG Haitao²

(1. Jiangsu Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute, Nanjing 210036, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Jiangsu Great Wall Computer System Co., Ltd., Nantong 226000, China)

Abstract: In the process of ultrasonic detection of nozzle fillet welds, due to the complex structure of the detected workpiece and the instrument interference itself by electrical signals, so the detected A-scan signal has noise, and there will be “artifacts” in the detection image, thus the detection difficulties are caused. If we want to improve the quality of detection images, denoising of A-scan signals is particularly important. Therefore, a fillet weld defect signal reconstruction method combining wavelet denoising and empirical mode decomposition is proposed. Firstly, the structural characteristics of fillet weld are analyzed, and the phased array test is carried out to obtain the defect detection data. Secondly, the empirical mode decomposition and reconstruction of cracks and unfused defects are analyzed. Finally, the wavelet denoising and empirical mode decomposition and reconstruction of the original signal are carried out to achieve higher signal-to-noise ratio and lower mean square error than the traditional algorithm, the result shows that this algorithm has better denoising effect and more beneficial to the analysis of ultrasonic echo signal.

Keywords: ultrasonic phased array; fillet weld; wavelet analysis; EMD; de-noise

0 引言

当今社会, 由于工程需要, 在大量的工程设计领域应用到了接管角焊缝。例如, 在制作和安装电站锅炉的过程中, 为了方便现场施工作业, 在汽包与接管的连接处就是采用了角焊缝的连接形式^[1]。在电站锅炉的运行过程中, 由于该部分的结构是不连续的, 所以此区域存在应力过于集中的情况, 并且由于温度场的不同, 在此部分还会产生

很大的温度差^[2]。在锅炉长期运行中接管角焊缝一直是常见的失效单元, 所以在锅炉定期检查中, 此部分需要重点检验^[3]。

目前在检测角焊缝内部缺陷的时候主要采用超声脉冲发射回波检测法^[4], 它主要通过分析回波信号来判断缺陷的相关信息。作为一种典型的非线性、非平稳信号, 超声回波信号中含有大量的有用信号, 但是它在不同的介质中

收稿日期:2021-09-10; 修回日期:2021-10-19。

基金项目:国家市场监督管理总局(2019MK027);江苏省市场监督管理局(KJ196041)。

作者简介:梁国安(1983-),男,江苏扬州人,大学本科,副院长,高工,主要从事锅炉压力容器安全检验方向的研究。

通讯作者:王海涛(1968-),男,江苏溧阳人,教授,博士研究生导师,主要从事无损检测技术、计算机测量与控制技术、图像处理与模式识别技术方向的研究。

引用格式:梁国安,姚叶子,郑凯. 基于超声相控阵的角焊缝缺陷信号重构方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 222-228.

传播会产生一定的衰减效应, 从而使得信号变得较为微弱^[5]。除此之外, 在使用超声进行检测的过程中, 环境中不可避免的噪声会污染微弱的回波信号, 这会一定程度地影响检测的精度^[6]。因此, 在进行回波信号分析之前需要采用有效的信号处理方法去抑制其携带的各种噪声, 常用的降噪方法有小波去噪、经验模态分解 (EMD, empirical mode decomposition) 去噪等^[7]。小波变换具有多分解尺度、去相关性等优势, 对随机噪声的过滤效果较好, 但是它也有阈值函数选取较为困难、分解层数多等缺点; 经验模态分解对于非平稳信号的处理具有较强优势, 但分解过程较不稳定, 去噪能力较差^[8-10]。

为此, 本文在进行角焊缝超声相控阵检测试验之后, 首先提取裂纹与未熔合缺陷的 A 扫信号数据, 然后通过 EMD 将提取到的原始 A 扫信号分解为多层本征模式函数 (IMF, intrinsic mode function), 利用互相关准则提取 IMF 分量进行重构。最后提出小波去噪和 EMD 相结合的角焊缝缺陷信号重构方法, 比起单纯使用 EMD 分解, 使用小波去噪对原始信号数据进行处理后, 重构信号的信噪比较高, 均方差较小, 为进一步缺陷成像, 缺陷回波信号特征提取模式识别打下良好的基础。

1 小波分析与 EMD 分解的理论分析

对于超声检测装置采集到的回波信号进行处理, 这是相控阵检测角焊缝的关键一步, 通过时域与频域的充分分析, 能够较好地分析出非平稳信号的各种尺度信号特征^[11-12]。本文主要基于小波分析和 EMD 分解方法对得到的缺陷信号进行分析。

1.1 小波分析

小波分析起源于 20 世纪 50 年代初的纯数学领域, 在之后的近三十年间并没有引起人们的注意, 近年来通过许多数学家与工程技术人员的努力探索, 小波分析发展迅速, 现已逐步成为热点研究方向之一, 其在非平稳信号去噪处理等方面有着一定独特的优势, 所以如今被广泛应用于信号处理、图像处理等工程领域, 在科技信息产业领域取得了令人瞩目的成就。小波分析是通过将信号进行多尺度地细化分析, 其可以分析到信号的任意细节, 从而在时域和频域变换中提取有效的信息^[13-15], 其具有对信号在不同范围、不同的时间区域内进行分析, 对噪声不敏感, 能够分析到信号的任意细节等优点, 被誉为数学显微镜。使用小波变换对信号处理时, 首先需要选择合适的小波函数, 本文选择正则性好的 Daubechies 小波, 该小波由世界著名的小波分析学家 Ingrid Daubechies 所构造, 当其作为稀疏基时有较小的光滑误差, 进而优化信号重构, 使处理结果相对光滑。Daubechies 小波可以用 dbN 表示, N 是小波阶数, 在小波函数 ψ 在小波和尺度函数 $\varphi(t)$ 中, 支持区域和消失矩分别是 $2N-1$ 和 $N^{[16-18]}$ 。当采用更大的序列 N 的值, 即选用更大的 dbN 小波阶次之后, 消失矩阶数也会随之提高, 有效增强其光滑性, 从而优化频域局部化能力, 进而呈现

出更佳的频带划分效果。

在对信号去噪的过程中, 首先是使用小波对原始信号进行分解, 将处于较高频率的噪声分解出来然后再进行处理。在小波分解时, 小波系数可以通过阈值和其他的手段来处理^[19], 将小波分解后得到的各层小波空间的细节系数使用阈值对其进行截断作用, 进而使得信号被小波变换或者其他方法进行去噪处理。以下是 3 种常用的去噪方法:

1) 默认阈值去噪处理。该方法首先通过 `ddencmp` 函数生成信号的默认阈值, 这个默认阈值是该方法的关键部分, 后续的去噪过程由函数 `wdencomp` 来实现。

2) 给定阈值去噪。该方法首先通过经验公式产生一个较好的阈值, 这个阈值在实际的去噪过程中有着较高的可靠性。其重要步骤是阈值量化, 函数 `wthresh` 可以用于实现阈值量化这一过程。

3) 强制消噪处理。该方法主要通过将信号的所有高频系数置零, 即对信号所有的高频部分进行滤波处理, 然后在此基础上再重构信号。此方法具有简单直接的优势, 能够达到使信号变得较为平滑的效果, 但是由于强制去除了高频信号, 这会使得信号的有用部分也可能因此而丢失。

1.2 EMD 分解

在一般的情况下, 大多数时间序列的分解方法均遵循一个原则, 即在某个基本函数的系统上扩展序列, 然后通过分析每个分量的展开系数和属性来分析该信号, 但是超声相控阵的 A 扫信号为非平稳信号^[20]。1998 年, 美国华裔院士 Norden E. Huang 等人对此提出了一种新的理论方法, 即经验模态分解法, 其对于分析非线性、非平稳信号序列有较好的优势。EMD 分解是一种自适应的时频分解方法, 其按照信号局部时间特征尺度自适应地将信号从高频到低频按序分解成一组尺度不同的固有模式函数, 具体操作步骤为首先对一给定的信号获取其存在的极值点, 然后通过插值的方法得到信号的包络, 在得到均值之后与均值做差, 从而获得分解的一层信号。通过上面的迭代过程, 获得信号的分解结果为:

$$f(t) = \sum_{i=1}^l imf_i(t) + r \quad (1)$$

即 l 个 IMF 和一个残差 r ^[8]。IMF 定义是由 Huang 等人提出的, 其需要符合以下的两个条件: (1) 在一段数据中, 极值点的个数等于过零点的个数, 或者二者相差最多不超过一个; (2) 任意一点由局部极大值点与局部极小值点形成的包络的平均值为零, 即信号的波形局部对称^[21]。第一个条件类似于传统的平稳化高斯过程中对于基带信号的要求, 第二个条件将全局的限定变为了局部的限定, 其有效防止了由于波形的不对称所形成的瞬时频率不必要的波动。

EMD 分解将原本复杂的信号分解得到各个 IMF 分量之后, 可以通过分析 IMF 分量进而分析原信号不同尺度的局部特征信号, 并且将之前的非平稳数据加以处理使其平稳

化。由于是基于信号序列时间尺度的局部特性进行信号分解处理，因此是随信号本身的变化而变化的，故而具有自适应性。并且由于分解过程中所使用的基全部来自于原信号，所以通过 EMD 分解的到的分解结果更加的有效，它的自适应性与时频聚焦性，适合运用于分析超声缺陷信号。

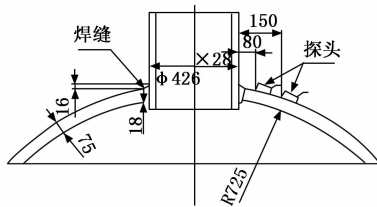
2 角焊缝相控阵检测试验

2.1 检测设备

本次实验采用的是仪器型号为 TOPAZ 32 的便携式超声相控阵设备，它是一款由 ZETEC 开发的全集成 32 通道超声相控阵检测仪，可同时激发 32 孔径进行自发自收或一发一收检测。本仪器最大数据传输速度为 10 MB/s，数字化频率为 100 MHz，增益范围为 0~70 dB，支持 512 个聚焦法则。探头采用了有利于工业现场应用的 AXL-2.25 MHz 型号小尺寸探头，其阵元数为 32 个，阵元间距为 1 mm，中心频率为 2.25 MHz。楔块型号为 AXL-55SW，角度为 55°。

2.2 被检工件

由于接管角焊缝结构复杂，使得声场路径相对复杂，增加了超声检测的难度。本文以锅炉装置中接管处角焊缝为对象，制作了一块角焊缝试样，母管外径为 1 600 mm、壁厚为 75 mm，支管外径为 426 mm、壁厚为 28 mm，对此进行检测工艺研究。如图 1 (a) 所示为试样被检工件的几何尺寸及坡口尺寸，图 1 (b) 所示为被检工件的实物图。



(a) 被检工件侧视图



(b) 被检工件实物图

图 1 被检工件

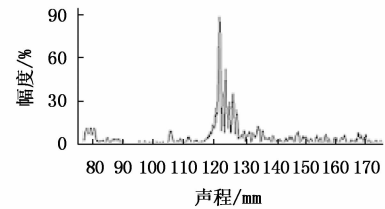
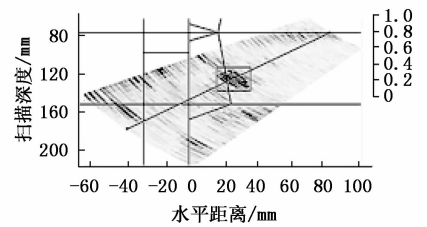
2.3 检测结果

本次试验在检测接管角焊缝时将探头放置于距离接管 150 mm 处，具体检测参数如表 1 所示。利用二次波可以在试件中检测到多处缺陷，以危害性较为严重的裂纹与未熔合为例，检测得到两处缺陷，检测结果如图 2 所示，缺陷分别标为 1 号与 2 号。1 号缺陷的检测结果如图 2 (a) 所

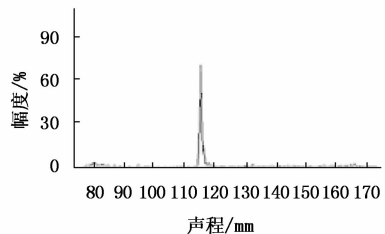
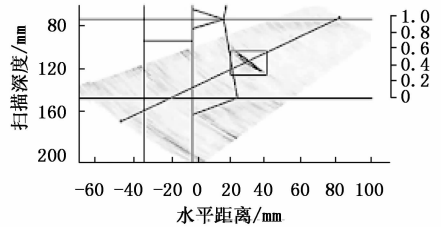
示，其为焊缝裂纹，裂纹缺陷在进行相控阵扫查的过程中声波没有固定的反射面，在图像上显得比较松散，并且由于马鞍形结构造成的波形散射，所以对其加 12 dB 补偿增益，得到的缺陷如图 2 中方框所示，最高幅值为 88.5%。2 号缺陷为焊缝未熔合，其检测结果如图 2 (b) 所示，未熔合缺陷图像较为细长，仅为一层，从 A 扫信号也可以发现缺陷信号较为集中，最高幅值为 69.0%。

表 1 扫查参数

波形	探头频率	晶片数量	扫查角度	扫查方式	探头位置
二次波	2.25 MHz	32	40~60	扇扫	150 mm



(a) 1号裂纹缺陷



(b) 2号未熔合缺陷

图 2 超声相控阵检测结果

3 经验模态分解特征成像

本文主要针对 1 号裂纹缺陷与 2 号未熔合缺陷处的信号进行分析，得到裂纹缺陷的原始信号与频谱见图 3 (a)，得到未熔合缺陷的原始信号与频谱见图 3 (b)。接着按照本征模态函数分解的方法，分别对它们进行 EMD 分解，得到了 8 阶 IMF 分量，如图 4~5 所示，这 8 个 IMF 分量分别反映出原始信号在不同时间尺度上的信息，代表着一组特

征尺度的数据序列,并且将其与残差累加后能得到原始信号。

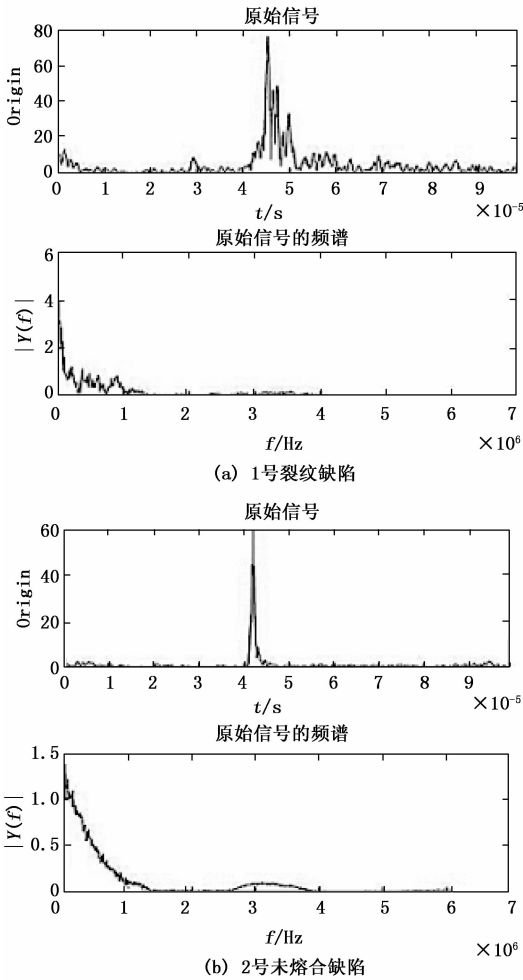


图3 原始信号与频谱

信号通过 EMD 分解之后所获得的各个 IMF 分量中通常情况下会含有一些伪 IMF 分量,这些伪 IMF 分量不能够反映原始信号的特征,且与原始信号无关。所以,对于上述原始信号分解所得的 IMF 分量,需选择互相关准则消除伪 IMF 分量,即通过计算各 IMF 分量与原始信号的互相关系数,将互相关系数较小的 IMF 分量予以去除。对于 1 号裂纹缺陷与 2 号未熔合缺陷的互相关系数计算结果如表 2 所示,由于微弱相关要求相关系数的值在 0~0.3 之间,低度相关要求相关系数的值在 0.3~0.5 之间,显著相关要求相关系数的值在 0.5~0.8 之间,高度相关要求相关系数的值在 0.8~1 之间,所以对于裂纹缺陷信号而言,应去除第 4 阶与第 7 阶的本征模态函数;对于未熔合缺陷信号,应去除第 2 阶、第 7 阶与第 8 阶的本征模态函数,然后再通过剩余的 IMF 分量对缺陷信号进行重构,从而得到去噪后的超声回波信号。

在通过信号重构后,可以得出重构后的裂纹信号与原始裂纹信号的相关系数为 0.82,重构后的未熔合信号与原

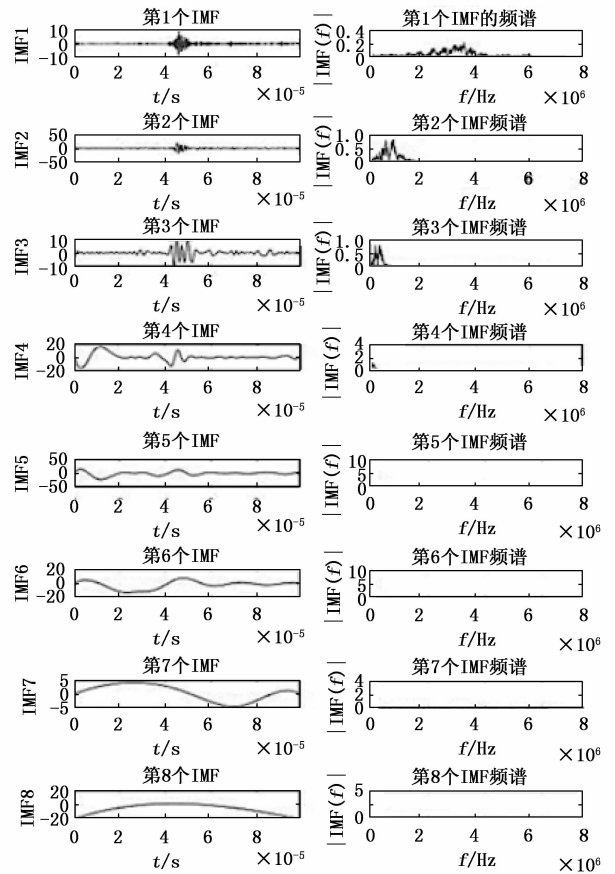


图4 EMD 分解 1号裂纹信号的 IMF 分量

表2 各 IMF 分量的相关系数

	1号裂纹缺陷	2号未熔合缺陷
IMF1	0.3	0.3
IMF2	0.4	0.1
IMF3	0.3	0.5
IMF4	0.0	0.4
IMF5	0.4	0.3
IMF6	0.4	0.3
IMF7	0.0	0.2
IMF8	0.3	0.0

始未熔合信号的相关系数为 0.89,该数据说明它们高度相关,因此可选择重构后的信号代替原始信号。计算得到缺陷信号重构结果如图 6 所示,根据信噪比(SNR, signal noise ratio)以及均方差(MSE)性能的评价方法,分析重构结果见表 3,从表中数据可以看出该方法对于 2 号未熔合缺陷有着较高的信噪比与较低的均方差,对于 1 号裂纹缺陷信号这种较为复杂的信号重构效果不佳。

表3 缺陷信号重构结果

	SNR	MSE
1号裂纹缺陷	4.660 4	30.975 3
2号未熔合缺陷	7.165 1	3.975 3

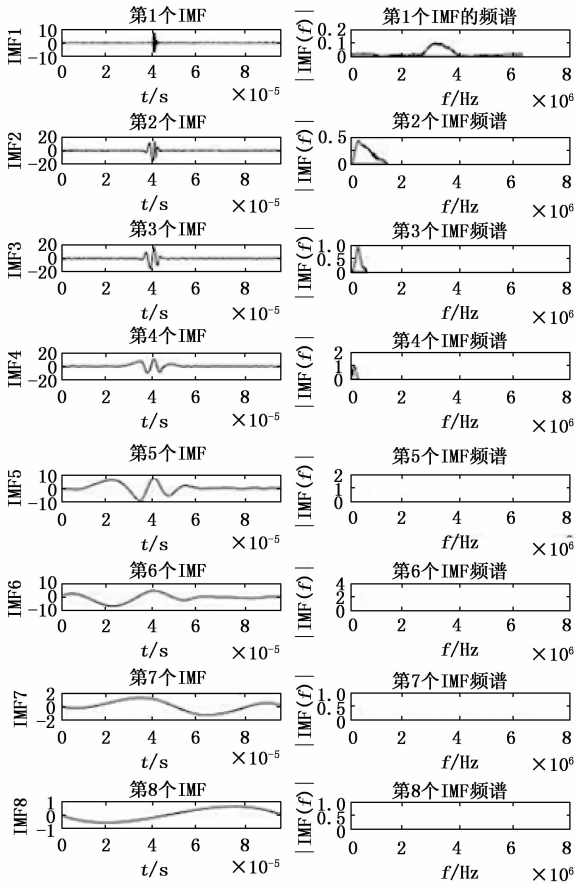
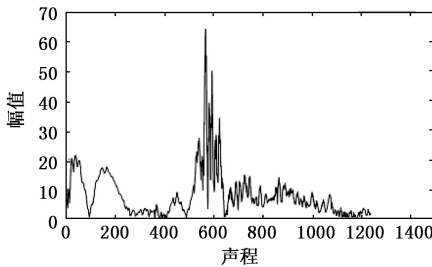
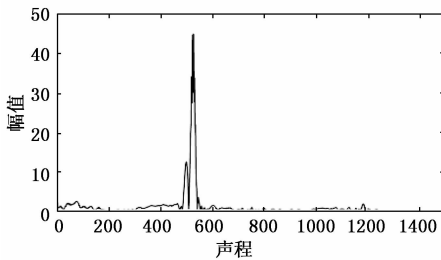


图 5 EMD 分解 2 号未熔合信号的 IMF 分量



(a) 1号裂纹缺陷



(b) 2号未熔合缺陷

图 6 缺陷信号重构结果

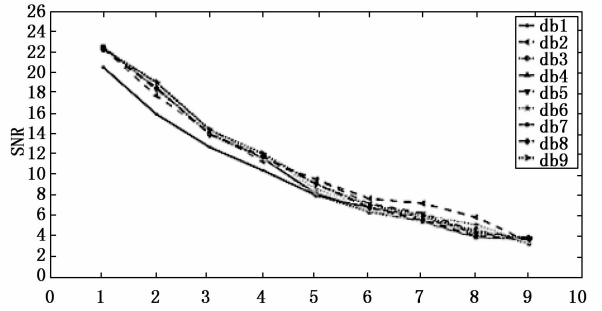
4 基于小波去噪的 EMD 算法

EMD 方法相比于传统的时频分析方法具有许多独特的优点，但是由于其自身发展的不成熟，所以在实际应用的过程中存在着各种不同的问题。基于此，本文将该方法与

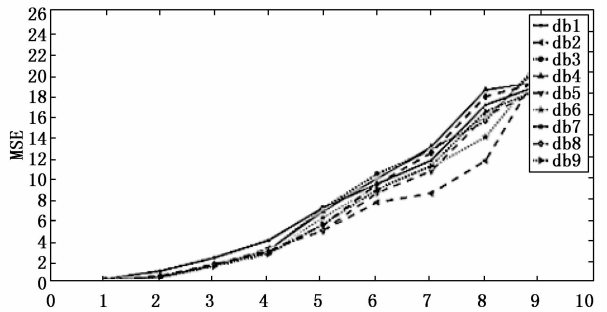
小波分析相结合，旨在通过理论与应用都较为成熟的小波分析来改善 EMD 方法的应用效果，所以提出了基于小波去噪的 EMD 算法。

4.1 基于小波分析的信号消噪

由于超声 A 扫的数据量不大，所以本文采用 db 小波对信号进行分解重构，采用的评价方法与上文所述 EMD 分解的方法保持一致，即采用信噪比与均方差来评价信号重构结果。首先分别对 1 号裂纹缺陷处的 A 扫信号按不同阶数和分层近似系数进行重建，得到如图 7 的 SNR 和 MSE 比较图，从而选择去噪效果好的 db 小波阶数。



(a) SNR 值



(b) MSE 值

图 7 db1~db9 重构图像

从图 7 中可以看出，对原始 1 号裂纹缺陷的 A 扫信号进行 db8 小波的 3 层近似系数进行重构，能够得到的 SNR 值及 MSE 值较为合理，其中 MSE 的值 1.836 1、SNR 的值为 13.999 8。所以本文对 1 号裂纹缺陷与 2 号未熔合缺陷的 A 扫信号按 db8 进行分解，并且基于第 3 层近似系数重构，得到结果如图 8 所示。

然后本文在主要使用 db 小波三层分解 A 扫信号的情况下，再通过信号处理对 A 扫信号进行去噪使得曲线变得更加光滑。去噪方法主要包括强制去噪、默认阈值去噪和给定软阈值去噪这 3 种方法，本文由 db1~db9 小波分别选择这 3 种方法来重构原始 1 号裂纹缺陷的信号，得到 SNR 与 MSE 的对比图如图 9 所示，从图中可看出对于该信号，3 种消噪方法中默认阈值消噪有较高的信噪比、较低的均方差，强制消噪受小波函数基的影响比较大，默认阈值消噪与给定阈值消噪这两种方法与小波函数基关系不大。

在此基础上，为了与小波重构比较效果，按 db8 小波

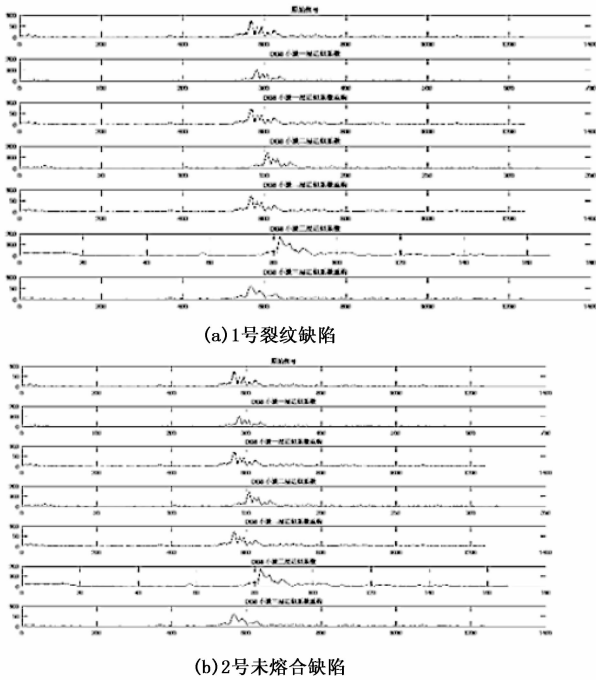


图 8 信号 db8 分层小波重构

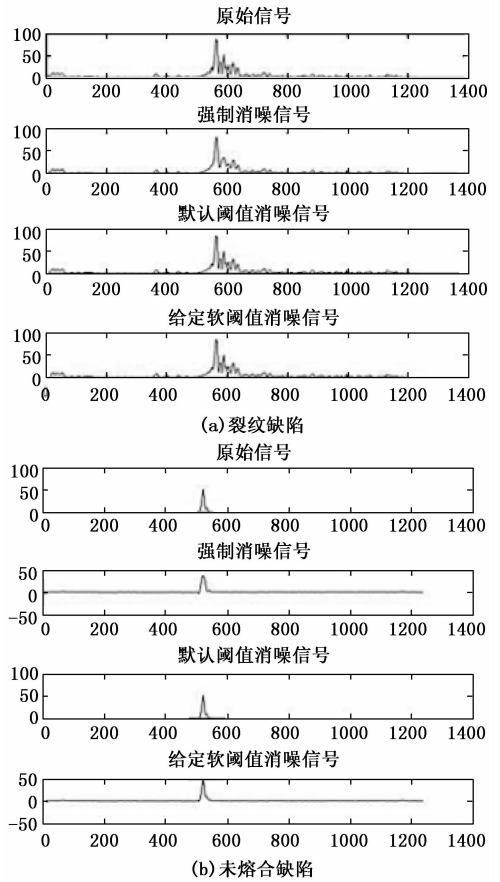


图 10 3 种消噪方法比较

结果相比, 分量明显减少, 1 号裂纹信号仅分解 6 个分量, 2 号未熔合信号仅分解 7 个分量。然后与上文所述相同, 通过互相关准则计算各个 IMF 分量的相关系数, 从而避免了 IMF 分量选择的盲目性, 得到结果如表 4 所示。

表 4 各 IMF 分量的相关系数

	1 号裂纹缺陷	2 号未熔合缺陷
IMF1	0.3	0.4
IMF2	0.2	0.3
IMF3	0.3	0.3
IMF4	0.5	0.3
IMF5	0.5	0.3
IMF6	0.2	0.2
IMF7	0	0.1

1 号裂纹缺陷信号选择 IMF1、IMF3、IMF4 及 IMF5 分量对信号进行重构, 2 号未熔合缺陷信号选择 IMF1~IMF5 分量对信号进行重构, 得到重构结果如图 11 所示。通过对比上文所述的 EMD 分解重构结果, 见表 5, 可以发现基于小波去噪的 EMD 分解重构有较高的信噪比与较低的均方差, 重构效果更好。

5 结束语

本文首先针对接管角焊缝的结构特点, 制作相应试样,

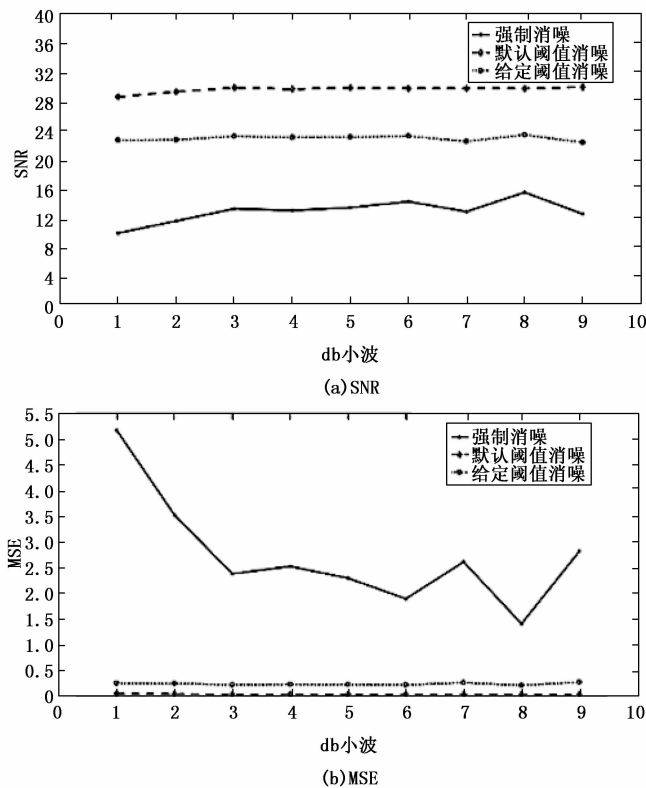


图 9 db1~db9 按 3 层分解的比较图

画出 1 号裂纹缺陷信号与 2 号未熔合缺陷信号的采取 3 种不同的去噪算法从而得到的结果如图 10 所示。

4.2 去噪信号的 EMD 分解

在通过小波分析对于缺陷信号进行初步的去噪之后, 对于去噪后的信号再进行 EMD 分解, 与含噪声信号的分解

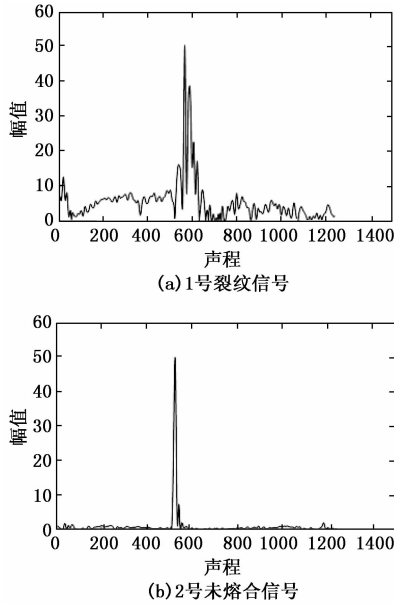


图 11 缺陷信号重构结果

表 5 缺陷信号的 SNR 与 MSE

	2 号未熔合缺陷		1 号裂纹缺陷	
	SNR	MSE	SNR	MSE
EMD 分解	4.660 4	30.975 3	7.165 1	3.975 3
基于小波去噪的 EMD 分解	5.223 8	27.206 9	13.650 3	0.893 0

完成超声相控阵检测试验，得到试样的检测结果，主要分析 1 号裂纹缺陷与 2 号未熔合缺陷这两个缺陷的检测结果。在此基础上通过 EMD 算法完成分别对这两个缺陷信号进行分解与重构，得到相应的重构结果，通过均方差与信噪比来评价其重构结果。最后提出小波降噪和 EMD 分解相结合的降噪方法，该方法将小波去噪后的信号再进行 EMD 分解与重构，其降噪能力相比传统算法效果显著提高，降噪后重构的信号信噪比和均方误差得到优化，缺陷回波信号测量的效果更好，有利于缺陷的 B 扫成像效果，从而提高缺陷的检出率。

参考文献:

[1] 邓江敏. 电站锅炉 T 型接管角接头相控阵检测技术研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.

[2] 刘志浩. 对接焊缝的超声相控阵检测及三维成像分析 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.

[3] 刘晓睿, 强天鹏, 邬冠华, 等. 国外的工业相控阵检测标准 [J], 2012 (3): 53-58.

[4] LIN C Y, OU X B, YANG X, et al. Transformer vibration characteristics under short circuit impact and short-circuit fault detection between turns [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44 (11): 3569-3576.

[5] ZHANG N. MEMS gyro signal denoising method based on

CEEMD threshold and correlation coefficient principle [J]. Journal of Sensing Technology, 2018, 31 (9): 1383-1388, 1392.

[6] 刘芳, 曹欧, 李毕祥. 基于小波变换的非对称数字水印算法研究 [J]. 计算机安全, 2011 (5): 18-21.

[7] 吴雪莲, 山拜·达拉拜. 基于小波变换的双模噪声中信号消噪分析 [J]. 计算机工程, 2011, 37 (s1): 211-213.

[8] XIAO Z, LIU J, MA H B, WANG S, GAO Y F, LI J H. Ultrasonic Scattered Field Distribution of One and Two Cylindrical Solids with Phased Array Technique [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32 (1): 1-12

[9] ZHENG G F, WANG D, WU X M, YAN Y C. A study of dense-medium cyclone inner-wall abrasion based on ultrasonic phased array technology [J]. Measurement, 2018, 126: 58-64.

[10] 武兴, 缪建成, 郑凯, 等. 焊缝典型缺陷的超声相控阵检测与评析 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (2): 238-245.

[11] COCHRAN S. Ultrasonic Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays [J]. Insight, 2006, 48 (4): 211-217.

[12] ORALKAN O, JOHNSON J A, Lee T H. Volumetric ultrasound imaging 2-DCMUT arrays [C] // IEEE UFFC 2003, 50 (11): 1581-1594.

[13] 任晓虎, 陈明, 谢道原, 等. 660 MW 高压加热器接管角焊缝开裂原因分析 [J]. 理化检验 (物理分册), 2017, 53 (7): 519-523.

[14] BAI Z L, CHEN S L, XIAO Q Y, et al. Compressive sensing of phased array ultrasonic signal in defect detection: Simulation study and experimental verification [J]. Structural Health Monitoring, 2018, 17 (3): 434-449.

[15] DEUTSCH W A K, CHENG A, Achenbach J D. Self-Focusing of rayleigh waves and lamb waves with a linear phased array [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1997, 9 (2): 81-85.

[16] 李衍. 弯管焊缝曲表面超声相控阵成像检测 [J]. 无损检测, 2018, 42 (4): 1-4, 9.

[17] RICHARD HOUGHTON J, PEITAO SHEN. Ultrasonic reflector classification with autoregressive models [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1990, 1 (4).

[18] ROBER A KRUGER, WILLIAM L Kiser, Gabe A Kruger. Thermoacoustic computed tomography using a conventional linear transducer array [J]. Med. Phys., 2003, 30 (5): 856-860.

[19] 单宝华, 喻言, 欧进萍. 超声相控阵检测技术及其应用 [J]. 无损检测, 2004, 26 (5): 235-238.

[20] 吴家喜, 张子健, 张小龙, 等. 承压设备插入式接管角焊缝超声相控阵检测工艺 [J]. 无损检测, 2020, 42 (3): 43-49.

[21] 牟彦春, 金南辉, 葛翔. 电站锅炉接管座角焊缝超声相控阵检测技术 [J]. 无损检测, 2011, 33 (1): 75-76.