

基于小波变换的低碳钢连铸坯超声探伤

吴楠¹, 张海澜¹, 林伟军¹, 张国星²

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100080; 2. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘要: 利用离散小波变换对粗晶钢材超声检测信号进行处理, 比较了使用不同的小波基, 并对不同尺度中突出体现的信息分别进行处理后重构信号的去噪效果。结果表明, 对不同尺度系数作不同的阈值处理有利于缺陷的识别, 这种方法对粗晶钢材料的检测有积极的意义。

关键词: 粗晶材料; 超声检测; 小波变换

中图分类号: TB55

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2006)-04-0299-05

Ultrasonic detection of coarse-grained mild steel using wavelets

WU Nan¹, ZHANG Hai-lan¹, LIN Wei-jun¹, ZHANG Guo-xing²

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;

2. Baoshan Iron & Steel Company Limited, Shanghai 201900, China)

Abstract: This paper deals with ultrasonic detection of signals from coarse-grained mild steel with defects, and processing of the signals with discrete wavelet transform. Differences in the noise reduction in the reconstructed signals by using different mother wavelets and scales are studied. The results show that the discussed method is effective, and the defects are easier to detect with a changing threshold for different scales.

Key words: coarse-grained material; ultrasonic detection; wavelet transform

1 引言

钢材中所夹杂物对其性能有很大的影响, 因此对这种杂物的检测非常重要, 超声检测是检测钢材内所夹杂物的一种重要无损检测方法。不同钢材的晶体结构互不相同, 其检测的效果也不尽相同, 粗晶钢材的超声无损检测比较困难^[1], 研究如何有效地提取和利用反映所夹杂物的信号特征, 对于工业应用有重要的意义。

超声检测中由晶粒产生的噪声属于结构噪声, 对此研究表明^[2], 结构噪声在相当长时间里能保持与入射脉冲基本相同的频谱; 其高频分量比同一时

间的反射信号多得多。因此, 在粗晶材料超声检测信号处理中, 采用时频域分析的方法比较有效, 主要有分离谱处理技术和小波变换方法。分离谱的恢复算法实质上是一种排序统计滤波, 严格分析分离谱技术的性能比较困难, 这种方法对滤波参数的调整很敏感, 信噪比的增强有限^[3-4]。

随着小波变换理论和应用研究的日益完善, 很多研究者尝试用小波变换的方法处理粗晶材料的超声检测信号^[4-9]。文献[4]采用小波变换软阈值去噪的方法, 对平均晶粒直径约 0.3mm 的铸铁件的超声检测信号进行了处理。文献[9]采用小波变换和基于采样信号幅值混乱度的自适应滤波方法, 对平均晶粒直径约为 0.5mm 的粗晶材料的超声检测信号进行了处理。

本文利用离散序列的小波变换多尺度分析上海宝山钢铁公司提供的低碳钢连铸坯材料, 材料的晶

粒直径约为 $2000\mu\text{m}$, 对有缺陷的粗晶钢材料检测信号进行了处理, 使用了不同的小波基, 并对不同尺度中突出体现的信息分别进行处理后重构信号。

2 离散序列的小波变换多尺度分析

小波变换在工程中能得到广泛应用的一个重要原因是它能由粗及精地对信号进行逐级分析, 即多分辨率分析。它的特点是当尺度较大时, 视野宽而频率分辨率低, 可以作概貌的观察; 当尺度较小时, 视野窄而频率分辨率高, 可以分析信号的细节, 并在不同的尺度值下保持不变的品质因数^[10-12]。因此, 利用小波变换能在某一尺度下突出一定特性的信号特征。再通过小波重构信号, 就可以得到特征更明显、更有利于识别利用的信号, 这就是小波变换的特征识别和提取技术。

从理想滤波器组可以更直观地理解多分辨率分析。当信号的采样率满足 Nyquist 要求时, 可用低通与高通滤波器将它分解成低频和低频部分, 分别反映信号的概貌和细节, 分解结果被称为近似系数和细节系数。经此处理后两路输出信号正交, 带宽均减半, 因此采样率可以减半而不致引起信息的丢失, 即可进行“二抽取”。对每次分解后的低频部分再重复类似的过程, 并不断进行下去。每一级分解把这一级的输入信号分解成一个低频的近似和一个高频的细节部分。而且每级输出采样率都可以再减半。这样就将原始信号进行了多分辨率分解。

由于滤波器设计是根据归一频率进行的, 而且小波变换中各级滤波器间归一频率相同。所以各级低通滤波器的单位样值响应 $h_0(k)$ 是一样的, 各级高通滤波器的单位样值响应 $h_1(k)$ 是一样的。这种逐级分解比直接作多通道分解需要设计的滤波器少、计算量小, 更重要的是, 逐级分解适应“由粗及精”的多分辨率分析过程。离散序列小波变换的具体步骤如下:

(1) 信号的原始采样序列 $x(k)$ 输入第 0 级。

(2) 第 j 级低通输出 $x_k^{(j)}$ 是 $x(k)$ 在第 j 级分辨率下的近似信号。

(3) 第 j 级高通输出 $d_k^{(j)}$ 是 $x(k)$ 在第 j 级分辨率下的细节信号, 它也就是离散序列在第 j 级的小波变换。

(4) $h_0(k)$ 是低通滤波器组的单位样值响应, 相

当于连续小波变换的尺度函数; $h_1(k)$ 是高通滤波器组的单位样值响应, 相当于连续小波变换中的小波函数。

3 超声检测系统

本文的超声检测系统如图 1 所示, 试验采用脉冲反射回波法。用美国物理声学公司 (PAC) 的高频液浸聚焦超声探头发射和接收超声波, 中心频率为 20MHz 。探头和粗晶材料试样用水层耦合, 接收信号经过高通 12.5MHz 、低通 25MHz 的硬件滤波, 由 PAC 公司的 100MHz 采样卡 (AD-IPR-1210) 得到数字信号, 送入计算机进行分析和处理。在 $17.72\mu\text{s} \sim 21\mu\text{s}$ 间窗中检测缺陷信号的特征最明显, 因此选用这个时间窗的信号作小波变换处理。

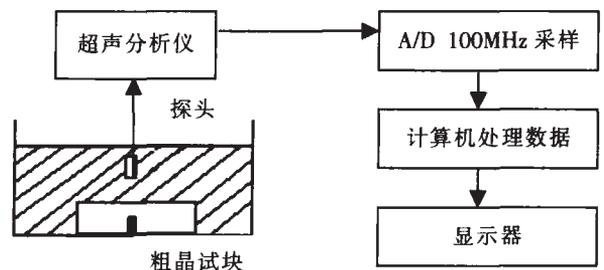


图 1 超声检测系统示意图

Fig.1 Schematic layout of Ultrasonic Detection System

4 结果与分析

用小波变换的方法进行信号处理时, 可以选用各种不同的小波基。不同的小波基有各自不同的性质, 表现在对称性、消失矩、正则性、支集长度等方面。选用不同的小波基, 对信号进行处理时会得到不同的结果。本文采用多种小波基对信号进行分解, 并从中选出一些能有效体现信号特征的小波基进行进一步的分解重构。

4.1 利用 coif3 小波基

Coiflet 小波族是 Daubechies 提出的一个小波系。coif3 小波基支集长度比较长, 为 17, 消失矩比较大, 为 6, 对称性比较好。从图 2 中可以看到其在支集长度和对称性上的特点。用其作 5 层分解, 缺陷信号在第三层细节系数中体现明显。

图 3 是分解的结果, 图中最上边一行的 2 个波

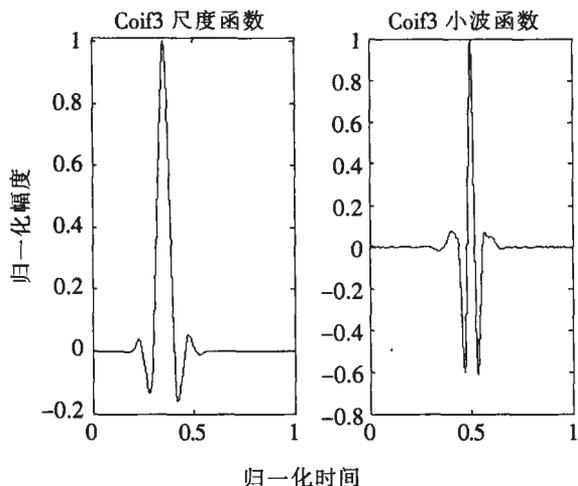


图 2 coif3 小波的尺度函数、小波函数

Fig.2 The scaling and wavelet functions of coif3

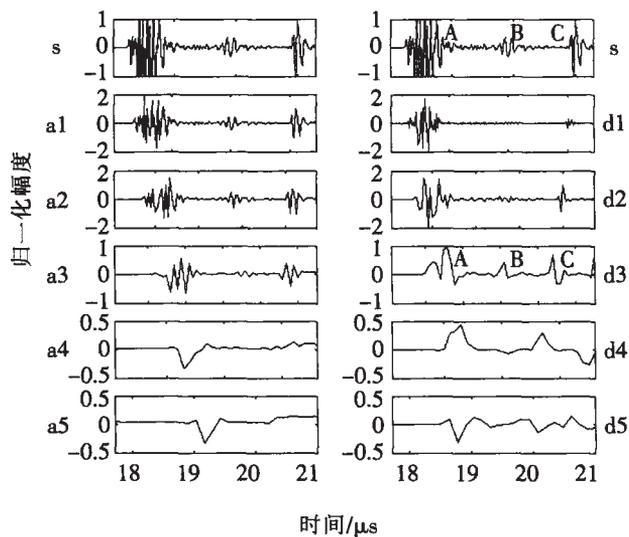


图 3 原始信号和用 coif3 小波基作 5 层分解所得结果

Fig.3 Original signal and the result of wavelet transform using coif3 mother wavelet

形是原始信号(s), 下面 5 行波形自上而下分别是第一层至第五层的小波分解结果, 左边是各层分解所得的近似系数(a1~a5), 右边是各层分解所得的细节系数(d1~d5)。原始信号中, 前后两个脉冲 A 和 C 分别是上、下表面的回波, 它们非常明显, 中间的 B 是缺陷回波, 则不很明显, 和由粗晶材料产生的结构噪声相比, 幅度差别不是很大。通过用 coif3 小波基作 5 层分解后, 在第三层细节系数(d3)中, 可以非常明显的看到钢材料上、下表面的反射波 A、C 和缺陷回波 B。

各层近似、细节系数的特点决定了信号重构的方法: 将第三层细节系数幅值加倍, 和第三层近似系

数重构信号。第一、二层细节系数由于主要反映了钢材料粗晶结构和上、下表面的回波信号, 因此在信号重构中没有采用。

原始信号和重构信号如图 4 所示。其中(1)为原始信号, (2)为用第三层近似系数和加倍后的第三层细节系数重构信号, (3)为只用加倍后的第三层细节系数重构信号。图中可以看到, 经过重构信号的改善非常明显, 缺陷回波幅度得到很大的增强, 可以从粗晶材料的结构噪声中区别出来。而(2)(3)的差别很小, 可以进一步说明第三层细节系数对缺陷的突出表现。这将给下一步的检测提供很大的方便。

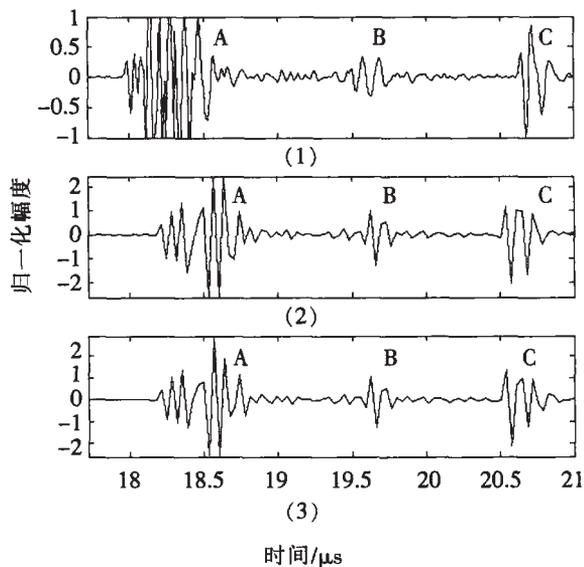


图 4 原始信号和用 coif3 小波基重构信号

Fig.4 Original Signal and the results of reconstructing using coif3 mother wavelet

4.2 利用 Haar 小波基

Haar 小波由一组互相正交归一的 Haar 函数集衍生而成。Haar 小波基支集长度为 1, 滤波器长度为 2, 用其对原始信号作 5 层分解, 缺陷回波在第三层细节系数中有较明显的体现, 钢材料上、下表面回波在第五层细节系数中体现明显。

图 5 是用 Haar 小波基分解的结果, 图中最上边一行的 2 个波形是原始信号(s), 下面 5 行波形自上而下分别是第一层至第五层的分解结果, 左边是各层分解所得的近似系数(a1~a5), 右边是各层分解所得的细节系数(d1~d5)。用 Haar 小波基作 5 层分解后, 在第三层细节系数中可以较明显的看到钢材料上、下的表面回波 A、C 和缺陷回波 B。同时在第五层细节系数中可以清晰的看到钢材料上、下表面的

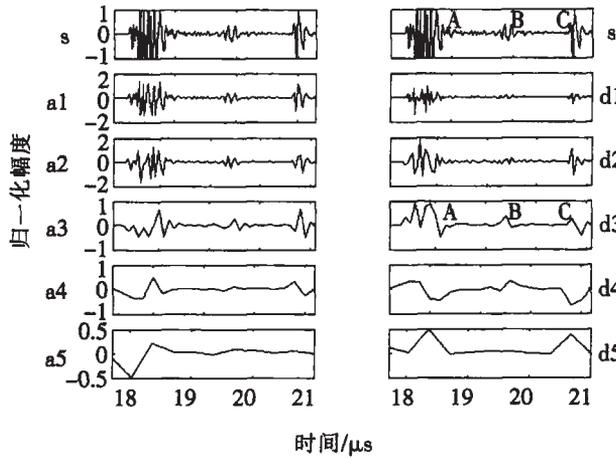


图5 原始信号和用 Haar 小波基分解结果

Fig.5 Original signal and the result of wavelet transform using haar mother wavelet

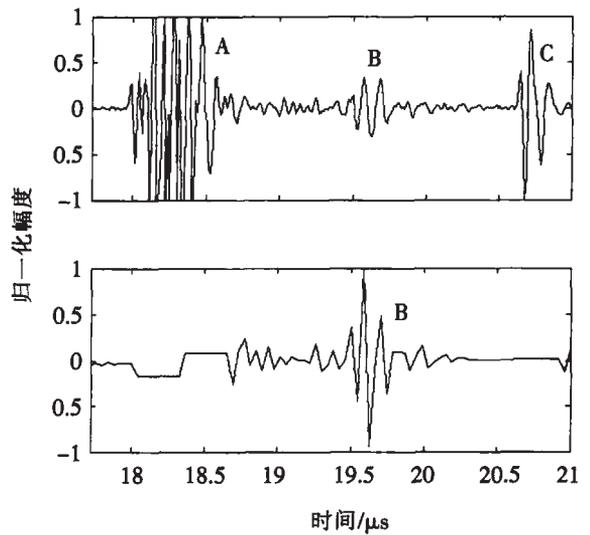


图7 原始信号和用 Haar 小波基重构信号(2)

Fig.7 Original Signal and the results of reconstructing using haar mother wavelet(2)

回波 A、C。这样有利于在多尺度同时对信号进行分析处理。相对于缺陷波来说,不仅粗晶材料的反射波是一种噪声,材料上、下表面的回波也可以认为是一种噪声。因此,能在两个不同的尺度分别得到缺陷波和界面回波,对进一步的分析处理工作非常有利。

去,缺陷回波 B 被明显突出,但其附近还有很多对其形成干扰的结构噪声。因此下面在利用第五层细节系数的基础上,进一步利用第三层细节系数,对粗晶原始信号进行处理。

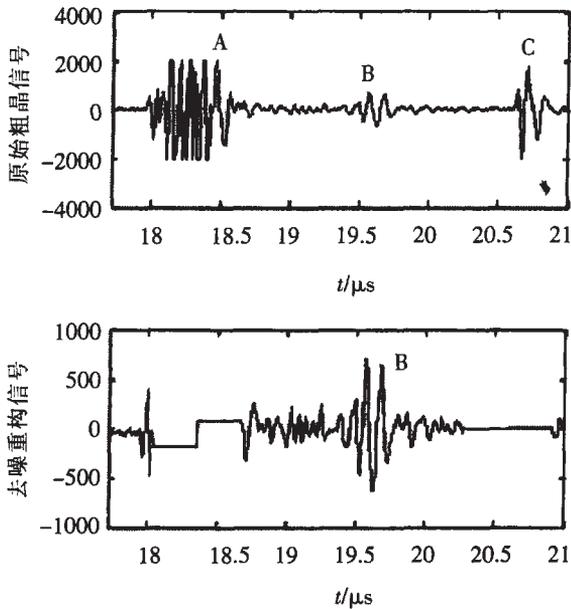


图6 原始信号和用 Haar 小波基重构信号(1)

Fig.6 Original Signal and the results of reconstructing using haar mother wavelet(1)

图6中所示的第一个波形为原始信号,前后两个脉冲 A 和 C 分别是上、下表面的回波,中间的 B 是缺陷回波。第二个波形为根据第五层细节系数,把各层细节系数的时域对应位置作置零处理后重构所得信号。钢材料上、下界面的反射波已经基本滤

如图7所示,第一个波形为原始信号,前后两个脉冲 A 和 C 分别是上、下表面的回波,中间的 B 是缺陷回波。第二个波形为根据第五层细节系数,把各层细节系数的时域对应位置置零处理,并将第三层细节系数幅值加倍,且去除第一、二层细节系数后的重构信号。

在重构中首先通过第五层细节信号所表征的钢材料上、下表面回波信号,用硬阈值处理的方法处理了各层细节信号。同时,由于第五层细节信号仅表现了钢材料上、下表面的回波信号,因此在利用其处理过其它层细节信号后,将其全部作置零处理。然后由于在第三层细节系数中,除去钢材料上、下表面的反射波以外,还可以最明显的体现缺陷波,因此将其幅值加倍,和已被重构的第三层近似系数重构信号。同时由于第一、二层细节系数在除去钢材料上、下表面的反射波以外,主要反映了钢材料粗晶结构,因此在信号重构中没有利用它们。

可以看到,经过 Haar 小波五层分解后的信号,由于不同的信号特征在不同的分解层次上有各自的表征,因此在有针对性的对各层信号作处理并进行重构后,缺陷回波得到非常明显的突出,对粗晶钢材料的探伤非常有益。

5 结 论

本文利用小波变换技术对粗晶钢材料超声检测回波信号进行了处理, 特别是利用了离散序列的小波变换多尺度分析的方法。从试验结果可以看出, 由于材料上、下表面回波、粗晶晶粒回波、缺陷回波分别在不同尺度上有不同的表现, 因此可以通过对不同尺度上系数作不同阈值处理的方法, 进一步重构出特征容易识别的信号。这充分体现了小波变换良好的时频域局部性能。本文所提方法对粗晶钢材料的检测具有积极的意义。

参 考 文 献

- [1] 陈建忠, 史耀武, 史淑. 粗晶材料超声检测信号处理[J]. 核动力工程, 2000, 21(2): 184-187.
CHEN Jianzhong, SHI Yaowu, SHI Shu. Signal Processing in Ultrasonic Testing of Coarse Grain Materials [J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(2): 184-187.
- [2] 郭成彬. 超声检测中的结构噪声[J]. 应用声学, 1998, 17(4): 1-5.
GUO Chengbin. The structure noise in the ultrasonic testing[J]. Applied Acoustics, 1998, 17(4): 1-5.
- [3] 刘镇清, 景永刚. 增强超声探伤信号的分离谱处理方法[J]. 无损检测, 2001, 30(4): 598-600.
LIU Zhenqing, JING Yonggang. Split spectrum processing for the improvement of ultrasonic signals [J]. NDT, 2001, 30(4): 598-600.
- [4] 卢超, 张维, 邬冠华, 等. 小波变换软阈值去噪在粗晶材料超声检测中的应用[J]. 应用声学. 2003, 22(3): 1-6.
LU Chao, ZHANG Wei, WU Guanhua, et al. Denoising in ultrasonic detection of coarse-grained materials by wavelet transform soft-thresholding[J]. Applied Acoustics, 2003, 22(3): 1-6.
- [5] Abbate A, Koay J. Application of wavelet transform signal processing to ultrasound[J]. Ultrasonics Symposium, 1994: 1147-1152.
- [6] Abbate A, Frankel J. Signal detection and noise suppression using a wavelet transform signal processor: Application to ultrasonic flaw detection[J]. IEEE transaction on UFFC, 1997, 44(1): 14-25.
- [7] Kaya K, Bilgatay N M, Murthy R. Flaw detection in stainless steel samples using wavelet decomposition[J]. Ultrasonics Symposium, 1994: 1271-1274.
- [8] 张建生, 李明轩. 脱粘界面超声检测信号的小波多分辨率分析与重构[J]. 声学学报. 2001, 26(3): 231-238.
ZHANG Jiansheng, LI Mingxuan. Multi-resolution analysis and reconstruction of ultrasonic testing signal in adhesive multilayered structure by wavelet transform[J]. ACTA ACUSTICA. 2001, 26(3): 231-238.
- [9] 顾向华, 郑详明, 雷永平, 等. 改进的自适应滤波方法及其在粗晶材料超声检测中的应用[J]. 无损检测. 2003, 25(10): 504-506.
GU Xianghua, ZHENG Xiangming, LEI Yongping, et al. An improved algorithm of adaptive filtering and its application to ultrasonic testing of coarse-grained materials [J]. NDT. 2003, 25(10): 504-506.
- [10] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693.
- [11] Mallat S G. Multiresolution approximation and wavelet orthonormal bases of L_2 [J]. Trans Amer Math Soc, 1989, 315, 69-87.
- [12] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 42-68.
YANG Fusheng. Wavelet transform in engineering analysis and application[M]. Beijing: Science Press, 1999. 42-68.