DOI: 10.3901/JME.2015.20.061

空气耦合超声信号的小波阈值滤噪试验研究*

刘奎¹ 张冬梅¹ 于光¹ 刘卫平¹ 周正干² 马保全²

(1. 上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所 上海 200436;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

摘要: 穿透式空气耦合超声检测中, 由于较低声波透射率、激励接收系统噪声及声波在介质中的散射噪声导致接收信号信噪比较低, 小波阈值滤噪技术在解决上述问题时面临小波基、分解层数及阈值函数的选取难题。基于小波分析的基本原理, 以单因素分析方法开展小波阈值滤噪试验研究。选择不同小波族(Daubechies, Symlet 和 Coiflet)中的小波基、小波分解层数(4~8层)及阈值函数(软阈值及改进阈值函数)对实际含噪超声信号进行小波阈值滤噪处理, 并通过对比滤噪信号的信噪比及频谱特性得出不同参数对滤噪效果的影响。结果表明, 选择 Coiflet 小波族中的小波基能获得具有更高信噪比及透射信号幅值的滤噪信号; 分解层数越高, 滤噪信号的信噪比越高, 但增长趋势渐趋稳定; 阈值函数对滤噪性能的影响并不十分显著, 一般采用软阈值函数或改进阈值函数就能获得良好滤噪效果。

关键词: 空气耦合超声; 无损检测; 小波分析; 信号处理; 阈值函数; 信噪比

中图分类号: TB551

Wavelet Threshold Denoising Experiments of Air-coupled Ultrasonic Signal

LIU Kui¹ ZHANG Dongmei¹ YU Guang¹ LIU Weiping¹ ZHOU Zhenggan² MA Baoquan²

(1. Institute of Aeronautical Manufacturing Technology,

Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: In air-coupled ultrasonic testing, the received ultrasonic signal has poor signal to noise ratio(SNR) due to low transmission ratio, noises introduced by transmitting and receiving system, and scattering noises during the propagation of ultrasound in the media. The use of wavelet threshold denoising technique to deal with handicaps above is faced with problems of parameter selection including wavelet base, decomposition level, and threshold function. The wavelet threshold denoising experiments are carried out using the single factor analysis method based on the basic principles of wavelet theory. Different wavelet bases from different wavelet family(Daubechies, Symlet, and Coiflet), decomposition level(4-8 levels), and threshold function(soft threshold function or improved threshold function based on hard and soft threshold) are used to wavelet threshold denoising process for the realistic noisy ultrasonic signal. The impacts of different parameters on noise filtering are analyzed from the comparison of SNR and frequency spectrum of the denoised signal. From the results, denoised signal possesses higher SNR and signal amplitude using wavelet base from coiflet family. The higher the decomposition level, the higher the SNR of the denoised signal, but growth trend gradually stabilized. The impact of threshold function on the performance of denoising is not very significant, and acceptable filtering results can be acquired from soft threshold or improved threshold function.

Key words: air-coupled ultrasound; nondestructive examination; wavelet analysis; signal processing; threshold function; signal to noise ratio(SNR)

0 前言

空气耦合超声检测技术是近些年发展起来的

新兴的非接触声学检测方法, 该技术以空气作为耦合介质, 尤其针对检测中不宜使用耦合剂的新型复合材料的质量评价提供了一种很好的手段, 这些材料包括蜂窝夹芯复合材料、泡沫夹芯复合材料、多孔耐温陶瓷材料等^[1-2]。而空气耦合条件下, 由于空气同检测对象之间巨大的声阻抗差及空气对高频声波的高吸收率^[3], 造成超声接收信号微弱, 同时超

* 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(SAMC13-JS-15-022)和航天科技创新基金(CASC06)资助项目。20141128 收到初稿, 20150630 收到修改稿

声激励与接收系统噪声及超声在介质传播中的散射噪声的引入,使得接收信号信噪比低,大大影响了该技术在生产中的应用。因此,提高空气耦合条件下接收信号强度及信噪比是该技术发展及应用所面临的关键研究内容之一^[4]。

近年空气耦合超声换能器技术^[5-6]及超声激励与信号放大系统^[7]方面的巨大进步,使得空气耦合检测中接收信号幅值有了大幅提高,大大促进了该技术的发展及推广应用^[8-10]。然而,提高空气耦合超声检测中接收信号的质量,仅提高接收信号强度还远远不够,由于超声激励接收系统引入的系统噪声及声波在材料中传播时引入的散射噪声,大大影响了信号信噪比,因此研究空气耦合超声检测信号滤噪技术是提高信号质量的重要手段。目前已有多种数字信号处理技术应用于无损检测领域,比较典型的处理方法包括时域多次平均、频域高(低)通滤波、带通滤波、频域窗函数滤波等。由于采用单一的时域或频域信号处理技术,很难揭示超声信号频谱随时间变化的特征,也不能对信号进行局部分析,难以实现对有效信号与噪声信号的可靠区分。数字信号处理中得到快速发展的多种时频分析技术也开始逐步应用于超声无损检测领域,这类技术将信号的时域和频域进行有机的结合,实现了对信号局部特征的详细分析,这些技术包括二维快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)、Wigner-Ville 变换、短时傅里叶变换(Short time Fourier transform, STFT),小波变换(Wavelet transform, WT)等^[11],其中具有多分辨率特性的小波分析被认为是数字信号发展史上的里程碑,该技术是一种时间窗和频率窗都可变的时频局部化分析方法,特别适用于非平稳信号的检测,利用该技术能够从含噪超声信号中过滤无关信号分量,进而达到有效抑制噪声的目的^[12-13]。而采用小波阈值滤噪技术对空气耦合超声信号进行滤噪处理时,面临着小波基、分解层数、阈值函数的选取难题。小波系数是滤噪处理前的重要信息,由原始信号与不同尺度的小波基内积得到,代表原始信号在该小波基底上的分量,也表征了二者的相似程度^[14]。分解层数关系到小波变换对原始信号中突变部分平滑作用的大小,直接影响滤噪性能。因此确定恰当的小波基和分解层数是小波变换的关键^[15-16]。而不同的阈值函数会使滤噪后小波系数在阈值处的突变以及滤噪前后小波系数的偏差不同,决定着重构信号的平滑性和准确性^[17-19]。目前,针对上述问题的研究存在以下几个问题,首先,从数学上去研究有较大的困难,建立的模型较复杂并不符合工程人员的实际应用需求;其次,目前试验

研究中常采用模拟的含噪信号来代替实际超声检测信号,使理论计算结果与实际应用效果存在较大差异;最后,针对该技术的实际应用,还没有普遍适用且规范的选取准则。

本文以试验手段及单因素分析方法,对空气耦合超声检测中采集的实际超声信号进行小波阈值滤噪技术研究。研究中,分别选择不同的小波基、分解层数及阈值函数对接收的超声信号进行小波阈值滤噪获得滤噪后的信号,通过对比滤噪后信号的信噪比及频谱分布特性,明确小波基、分解层数及阈值函数对实际超声信号滤噪效果的影响。

1 理论背景

1.1 小波变换

在采用阈值滤噪处理信号噪声之前,首先要利用小波变换来得到原始信号的时频信息^[20]。经小波变换后获得的小波系数中,有用信号能量主要集中在少数数值较大的小波系数中,而噪声的能量几乎分散到全部小波系数上,数值较小。根据小波系数在幅值上的差异设置一个阈值,利用阈值方法对小波系数进行处理,最后对经过处理的小波系数进行小波逆变换,重构得到滤噪后的信号。对接收信号 $f(t)$ 进行连续小波变换可由式(1)表达,可得到小波系数 $W_f(a, b)$

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

式中, a 和 b 分别是尺度因子和平移因子, “*” 代表复共轭。通过因子 a 和 b 可实现对母小波的伸缩与平移,进而得到一系列小波基 $\psi_{a,b}(t)$, 如式(2)所示

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (2)$$

在实际应用中,信号采集卡获得的数据都以离散形式表达,并对其进行后处理,因此在实际应用中,一般将尺度因子和位移因子离散化,获得接收信号 $f(t)$ 的小波系数 $C_f(j, k)$, 即离散小波变换,如式(3)所示

$$C_f(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (3)$$

离散形式的小波基由式(4)获得

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (4)$$

式中, $a_0 > 0$, $b_0 > 0$; $j, k \in \mathbf{Z}$; 为保证后处理满足计算机的二进制运算机制,一般取 $a_0=2$, $b_0=1$, 称为

二进制小波变换。

1.2 小波基的特点及选取

小波基和信号的相关性越好, 小波变换对信号特征的提取量越多, 用小波基分析信号的特征会越准确。直观上小波基函数的形状更类似于超声波信号的形状, 则分解的小波系数能更准确和更高效地表达原始信号特征。理想小波基函数应具有紧支性、对称性、正则性、高阶消失矩等特性。紧支性指小波基只在有限区间不为零, 使母小波能够准确提取信号的突变部分。对称性或近似对称性使得小波函数或尺度函数的滤波器具有线性相位或广义线性相位, 能够避免或减少信号相位失真。正则性指数越大, 变换后信号光滑性越好。消失矩越高, 频域的局部化能力就越强, 越能够突出信号的各种奇异特性, 还能使信号更加光滑。前期研究表明, Daubechies, Symlet 和 coiflet 小波族具有理想小波基函数的多种特性, 且能提供良好的时频分辨率, 非常适于超声信号的分析^[21], 三种典型的小波基函数如图 1 所示。

图 1 典型的小波基函数

小波分解层数的选择对于降噪效果有非常大的影响。一般噪声分布在高频部分, 因此在对超声信号进行小波降噪处理时, 要对分解后的高频部分产生的系数即细节系数进行处理, 从而滤除噪声。当分解层数过少时, 信号分解不够彻底, 噪声部分无法得到有效去除, 当分解层数过多时, 计算量大且计算复杂程度高, 使得运算效率低, 甚至对信号有用部分的过量去除会导致结果不精确^[22]。试验中, 对超声检测试验信号进行 4~8 级分解, 通过比较滤波后信号的信噪比, 确定合理的分解层数。

1.3 阈值函数及阈值

对信号进行滤波处理, 当小波系数的数值超过某一阈值时, 阈值函数就采用保留或收缩的方式实现对小波系数的过滤, 不同阈值函数体现了对小波系数的不同处理策略, 主要分为硬阈值函数、软阈值函数及一系列基于软、硬阈值改进的阈值函数, 典型的阈值函数如图 2 所示。硬阈值法会去除大量有用信号产生的小波系数, 因此去噪效果较粗糙, 重构信号存在一些振荡。在实际应用中, 主要考虑软阈值函数及综合软、硬阈值函数特性的改进函数,

主要包括软硬阈值折中函数^[18]、指数型函数^[18, 23]及双曲型函数^[24]等。

图 2 典型的阈值函数

阈值 τ 也有多种计算方法, 一般采用经典的通用阈值法计算得到, 如式(5)所示

$$\tau = \sigma \sqrt{2 \ln n} \quad (5)$$

式中, σ 为噪声信号的标准差, n 为进行处理的信号在特定尺度上经小波分解得到的小波系数个数。

2 试验分析

2.1 空气耦合超声检测系统及参数设置

试验中采用的空气耦合超声检测方法为穿透法, 此法将激励与接收换能器分别置于被试样两侧, 根据透射声波能量变化判断试件内部质量, 检测系统的构成原理如图 3 所示。

图 3 检测系统的构成原理

两换能器中间的试样为蜂窝夹芯复合材料(蒙皮厚 1 mm, 铝蜂窝芯厚 12 mm), 置于如图 4 所示的检测系统上。试验中, 选用的空气耦合超声换能器为中心频率 400 kHz 窄带换能器。

(a) 检测系统总体构成

(b) 换能器工装

图 4 空气耦合超声检测系统及试样

2.2 原始超声信号的获得

采用峰峰电压 200 V 的 5 周期正弦单频信号激励换能器, 分别接收无试样时的信号(增益 11.0 dB)及有试样时的透射信号(增益 89.5 dB), 并求得相应信号频谱, 如图 5 所示。

图 5 原始含噪信号及其频谱

由图 5 可知, 有试样时获得的接收信号信噪比较差, 有效透射信号几乎被噪声淹没, 信号识别困难。频谱图中, 噪声信号均布于各个频段。

2.3 信噪比计算方法

信噪比是衡量降噪效果的重要指标, 为了对比阈值滤波处理前后信号的信噪比, 采用信噪比计算公式

$$SNR = 20 \lg \frac{\max(s(t))}{MSE} \quad (6)$$

式中, $\max(s(t))$ 为信号中有效信号最大幅值, MSE 为信号均方差, 通过式(6)计算求得原始含噪信号的信噪比为 13.5 dB。

2.4 不同小波基及分解层数的滤波性能对比

由于小波基选取、分解层数及阈值函数之间并不具有相关性, 因此采取单因素分析方法分别分析不同小波基、分解层数及阈值函数对滤波性能的影响。初步采用“db8”小波基、通用阈值及软阈值函数对原始信号在不同层分解、滤波并重构, 所得结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 小波滤波能明显分辨出有效透射信号, 信噪比增强显著。采用上述方法, 对 Daubechies 小波族中 db3~db10 小波基, Symlet 小波族中 sym3~sym8 小波基和 Coiflet 小波族中 coif1~coif5 小波基进行滤波处理, 并对比不同分解层数滤波后信号的信噪比, 结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 选择 coiflet 小波族中小波基处理的滤波信号可获得更高的信噪比。同时, 随着分解层数的增加, 滤波性能进一步增强, 但增加到 6 层以上时, 改善效果趋于稳定。

图 6 采用 db8 小波基及软阈值函数在不同层的滤波信号

图 7 不同小波基滤波后的信噪比对比

2.5 不同阈值函数滤波性能对比

根据图 7 所示的试验结果, 选择滤波效果较好的“db7”, “db8”, “sym5”, “sym7”, “coif1”, “coif3”小波基分别采用不同阈值函数研究阈值函数对滤波性能的影响, 所得结果如图 8 所示。

图 8 不同阈值函数的滤波性能对比

一般选择软阈值及软硬阈值折中函数, 能获得更好的滤波性能, 但信噪比的提高较小波基及分解层数对信噪比的影响而言, 不是很显著。采用通用阈值及软阈值, 及各小波族中能获得最高信噪比的小波基(“db7”, “sym5”和“coif1”)对原始信号进行滤波后的信号及频谱如图 9 所示。

图 9 相应小波基滤波后信号及其频谱

图 9 中, “coif1”小波基处理后的滤波信号具有最大的时域信号幅值, 而“db7”小波基滤波后信号频谱的中心频率幅值最高, 这种现象是由于不同小波基滤波后信号的平滑程度不同造成的。

3 结论

(1) 选择 coiflet 小波族中的小波基滤波时, 能获得更理想的滤波效果, 其中选用“coif1”小波基处理后的滤波信号具有更高信噪比和时域信号峰值。

(2) 分解层数越高, 对信号的滤波性能越好,

而当小波分解层数提高到 6 层以上时, 信噪比提高不显著, 为降低计算量, 提高运算效率, 选择 4~6 层进行小波分解较合理。

(3) 阈值函数对滤波效果的影响远没有小波基及分解层数的影响大。一般选择软阈值函数及改进的软硬阈值折中函数就能获得良好的滤波效果。

参 考 文 献

- [1] IMIELINISKA K, CASTAINGS M, WOJTYRA R, et al. Air-coupled ultrasonic C-scan technique in impact response testing of carbon fibre and hybrid: Glass, carbon and Kevlar/epoxy composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157-158(2004): 513-522.
- [2] MCINTYRE C S, HUTCHINS D A, BILLSON D R, et al. The use of air-coupled ultrasound to test paper[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2001, 48(3): 717-727.
- [3] 周正干, 魏东, 向上. 空气耦合超声检测中衰减因素的研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(19): 2350-2354.
ZHOU Zhenggan, WEI Dong, XIANG Shang. Research on attenuation factor of air-coupled ultrasonic testing[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(19): 2350-2354.
- [4] 周正干, 马保全, 孙志明, 等. 相位编码脉冲压缩方法在空气耦合超声检测信号处理中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 48-54.
ZHOU Zhenggan, MA Baoquan, SUN Zhiming, et al. Application of phase coded pulse compression method to air-coupled ultrasonic testing signal processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 48-54.
- [5] SCHINDEL D W, HUTCHINS D A, ZOU L, et al. The design and characterization of micromachined air-coupled capacitance transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 1995, 42(1): 42-50.
- [6] 孔涛, 徐春广, 张运涛. 空气耦合超声换能器声场计算与测量研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 19-24.
KONG Tao, XU Chunguang, ZHANG Yuntao, et al. Investigation of acoustic field calculation and measurement method for air-coupled ultrasonic transducer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 19-24.
- [7] LINAS S, ANDRIUS C, VYTAUTAS D. Efficient high voltage pulser for piezoelectric air coupled transducer[J]. Ultrasonics, 2013, 53(1): 225-231.
- [8] GREEN R E. Non-contact ultrasonic techniques[J]. Ultrasonics, 2004, 42(1-9): 9-16.
- [9] 周正干, 魏东. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 10-14.

- ZHOU Zhenggan, WEI Dong. Progress of air-coupled ultrasonic non-destructive testing technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 10-14.
- [10] 周正干, 魏东, 向上. 线性调频脉冲压缩方法在空气耦合超声检测中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 24-28.
- ZHOU Zhenggan, WEI Dong, XIANG Shang. Application of linear-frequency-modulation based pulse compression in air-coupled ultrasonic testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 24-28.
- [11] BERRIMAN J R, HUTCHINS D A, NEILD A, et al. The application of time-frequency analysis to the air-coupled ultrasonic testing of concrete[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2006, 53(4): 768-776.
- [12] ABBATE A, KOAY J, FRANKEL J, et al. Signal detection and noise suppression using a wavelet transform signal processor: Application to ultrasonic flaw detection[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 1997, 44(1): 14-26.
- [13] 任亚飞, 柯熙政. 多尺度小波分解融合在微机电陀螺数据处理中的应用[J]. 应用科学学报, 2010, 28(4): 394-398.
- REN Yafei, KE Xizheng. Fusion of multi-scale wavelet decomposition and application to MEMS gyroscope data processing[J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 28(4): 394-398.
- [14] SONG S P, QUE P W. Wavelet based noise suppression technique and its application to ultrasonic flaw detection[J]. Ultrasonics, 2006, 44(2): 188-193.
- [15] 袁英民, 崔海涛, 温卫东. 航空发动机叶片超声检测信号的小波分析方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2003, 16(02): 46-49.
- YUAN Yingmin, CUI Haitao, WEN Weidong. An analysis method for aero-engine blade ultrasonic test signal by wavelet transform[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2003, 16(02): 46-49.
- [16] 黄晶, 阙沛文. 小波分析在管道缺陷超声检测中的应用[J]. 传感技术学报, 2003(3): 263-266.
- HUANG Jing, QUE Peiwen. The application of wavelet analysis in ultrasonic testing of pipeline defect[J]. Journal of Translucation Technology, 2003(3): 263-266.
- [17] LAZARO J C, SAN J L, RAMOS A, et al. Influence of thresholding procedures in ultrasonic grain noise reduction using wavelets[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1-8): 263-267.
- [18] 陈益, 李书. 改进的小波阈值消噪法应用于超声信号处理[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(4): 466-470.
- CHEN Yi, LI Shu. Application of improved threshold denoising based on wavelet transform to ultrasonic signal processing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astmnautics, 2006, 32(4): 466-470.
- [19] 柯熙政, 汪丽, 倪广仁. 改进的小波阈值消噪法应用于脉冲星弱信号处理[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(1): 18-21.
- KE Xizheng, WANG Li, NI Guangren. Application of improved threshold denoising based on wavelet transform to pulsar signal processing[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(1): 18-21.
- [20] ZHANG G, DAVID M. Harvey. Contemporary ultrasonic signal processing approaches for nondestructive evaluation of multilayered structures[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2012, 27(1): 1-27.
- [21] KRAVCHENKO V F, SANCHEZ-RAMIREZ J, PONOMAREV V I. Properties of different wavelet filters used for ultrasound and mammography compression[J]. Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika), 2008, 67(10): 853-865.
- [22] 聂鹏, 王东磊, 王哲峰, 等. 刀具磨损声发射信号处理中小波基选取的研究[J]. 工具技术, 2009, 43(1): 94-97.
- NIE Peng, WANG Donglei, WANG Zhengfeng. Research on selecting wavelet basis in cutting tool wear acoustic emission signal processing[J]. Tool Engineering, 2009, 43(1): 94-97.
- [23] 叶裕雷, 戴文战. 一种基于新阈值函数的小波信号去噪方法[J]. 计算机应用, 2006, 26(7): 1617-1619.
- YE Yulei, DAI Wenzhan. Signal denoising in wavelet based on new threshold function[J]. Computer Applications, 2006, 26(7): 1617-1619.
- [24] 许山川. 基于小波变换的语音信号去噪研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
- XU Shanchuan. The research of speech de-noising based on wavelet transform[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006.

作者简介: 刘奎, 男, 1981 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为航空复合材料无损检测技术。

E-mail: liukui@comac.cc

周正干(通信作者), 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超声无损检测技术。曾获航天工业总公司科技进步二等奖, 发表论文 100 余篇。

E-mail: zzhenggan@buaa.edu.cn

马保全, 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为空气耦合超声检测技术。

E-mail: mabaoquan@me.buaa.edu.cn