

基于 Morlet-P 小波的多层金属结构的超声检测研究

周海林, 孙 鑫, 王建斌, 徐章遂

(军械工程学院 电子信息技术教研室, 石家庄 050003)

摘 要: 鉴于多层金属结构的超声检测信号夹杂了大量的噪声, 湮没了有用的裂纹缺陷信息, 在对信号作多尺度分析的基础上, 构造了 Morlet-P 小波并以此对信号进行了各种分析。当取多个尺度参数时, 基于 Morlet-P 小波变换得到的小波系数都包含了缺陷信号的频率成分, 解决了多分辨率分析时多尺度小波系数在分析窄频带缺陷信号时的不足。

关键词: 超声检测; 多层金属结构; 时频分析; 多分辨率分析; 信号处理

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2007)06-0319-03

Ultrasonic Signal Research of Multi-Layered Metal Structure Based on Morlet-P Wavelet

ZHOU Hai-lin, SUN Xin, WANG Jian-bin, XU Zhang-sui

(College of Ordnance Engineering, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The ultrasonic testing signal of multi-layered metal structure includes a mass of noise, and the noise submerges completely the useful flaw signal. Morlet-P wavelet was constructed during the multi-scale analysis. When more than one scale parameter was applied to the continuous wavelet transform based on the Morlet-P wavelet, the wavelet transform coefficient still included the flaw characters. So the shortcoming of multi-resolution analysis on the narrowband signal was overcome.

Keywords: Ultrasonic testing; Multi-layered metal structure; Time-frequency analysis; Multi-resolution; Signal processing

在多层金属结构(如铜和钢的连接件)的超声检测中, 因各个部件制作成型方法的不同, 以及超声波在钢和铜中传播速度的差异, 导致超声波能量在连接件的接触界面衰减很大, 绝大部分的超声波没能穿透底层的介质而被直接反射回来^[1]。因为裂纹缺陷一般都在底层介质里, 所以回波信号中绝大部分都是与缺陷信号无关的噪声。图 1 为含裂纹缺陷的原始超声信号图。

目前, 国内外的超声检测仪对这类超声回波的识别多采用硬件鉴幅或鉴相的方式实现^[1,2]。当噪声幅值完全湮没有用信号时, 此类仪器工作的可靠

性大大降低甚至无法工作。要解决此类信噪比极低的超声信号处理问题, 目前一般采取傅里叶频谱分析和成分分析的方法, 但该方法只在频域内分析而没有考虑时域因素。小波变换在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力^[3]。笔者利用 Morlet-P 小波对多层金属结构超声检测信号进行多分辨率分析, 成功检测出湮没在噪声中的缺陷信号, 为产品质检提供了可靠依据。

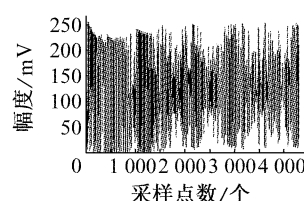


图 1 原始信号

1 小波分析的多分辨率分析

不同尺度下的小波变换具有不同的时宽和频宽, 即时频窗口的大小是可变的, 当 $1/|a|$ 增大时,

收稿日期: 2006-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(大型复杂设备中金属基复合材料结构缺陷检测与诊断原理研究)

作者简介: 周海林(1978—), 硕士, 讲师, 主要从事装备无损检测研究工作。

窗的中心向高频方向移动,同时时宽变小而频宽变大,因此,小波提供的局部化格式是变化的,在低频部分具有较宽的时窗和较窄的频窗,而在高频部分则具有较窄的时窗和较宽的频窗,即具有“变焦”特性^[4]。通常对尺度参数 a 按倍频程的方式进行离散化,即取 $a=2^j, b=k \cdot 2^j$ 。

由 Mallat 算法可知,小波变换可在放大的不同频带内分析信号,使不易察觉的信号特征在不同分辨率的若干子空间中显露出来,具有数字显微镜的功能。因此在多层金属结构超声检测中,将小波变换用于超声回波的特征提取来检测缺陷具有可靠的理论依据^[5]。

2 基于 Morlet 小波的多分辨率分析

超声检测时接收到的回波信号波形的固定频率即为探头的中心频率。检测得到的超声回波信号是一种脉冲信号,在时域上变化比较剧烈^[6]。傅里叶变换选用的是连续的三角函数作为基底,对这种实时、突变的信号处理效果并不是很明显;而连续小波在时域上是紧支的,最适宜处理这种突变信号。考虑检测超声信号的波峰,选择 Morlet 小波为母小波。Morlet 小波是高斯包络下的单频率复余弦函数,其时域和频域表达式为:

$$\psi(t) = e^{-\frac{1}{2}t^2} e^{j\omega_0 t} \quad (1)$$

$$\psi(\omega) = \sqrt{2\pi} e^{-(\omega-\omega_0)^2/2} \quad (2)$$

图 2 给出小波分析所用 Morlet 小波波形,它与超声回波信号具有较好的相似性,因而对超声回波信号的特征反应敏感^[6]。

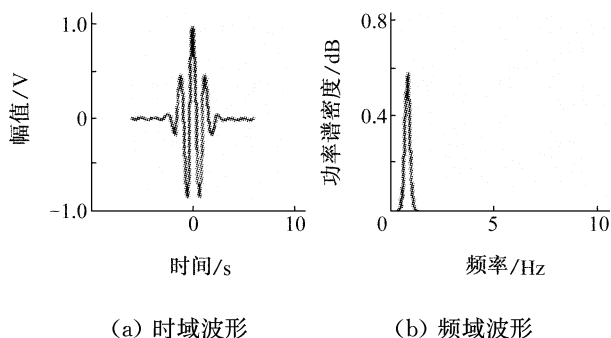


图 2 $a=1$ 时的 Morlet 小波

多分辨率分析中最重要的就是针对所要分析的信号选择恰当的尺度参数 a 。实验验证,只有当 $a=1$ 时(此时中心频率 $f_a=0.25$ kHz,频带宽度为 0.11254 Hz),能最好地屏掉其他成分,从而突出反映缺陷特征。为了得到详细的缺陷信息,选取 $a=$

1, 2, 3, ...。

当 $a=0$ 时,子小波即为母小波。

当 $a=1$ 时,子小波为:

$$h(t) = 2^{-\frac{1}{2}} e^{\frac{t^2}{8}} \cos\left(\frac{1}{2}\omega_0 t\right) \quad (3)$$

当 $a=2$ 时,子小波为:

$$h(t) = 2^{-\frac{1}{4}} e^{\frac{t^2}{32}} \cos\left(\frac{1}{4}\omega_0 t\right) \quad (4)$$

依此类推可以得到 $a=3$ 和 $a>3$ 时的子波表达式。其中, $\omega_0=500\pi$ Hz。得到的小波变换系数图如图 3。

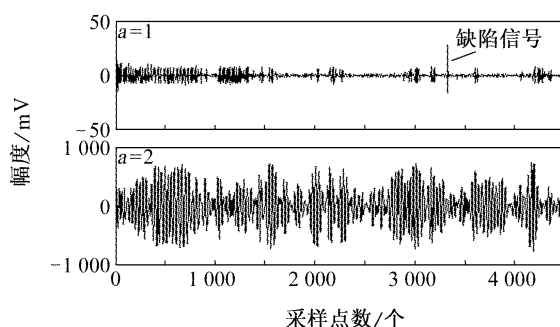


图 3 Morlet 小波分解系数图

图 3 可见,尺度 $a \geq 2$ 时,分解系数已不带有用信号,多分辨率分析的意义不大。只有 $a=1$ 是可以保留的, $a>1$ 都无保留价值。这样,所选尺度范围内不能满足需求,需要对上述方法进行改进。

3 基于 Morlet-P 小波的多分辨率分析

从以上分析结果可见,被分析的信号主要集中在 f_c 附近(一般是向下偏移)的窄频带中,而当 $a=1$ 时,分解的频带为 $0 \sim f_c$;当 $a=2$ 时,分解的频带在 $0 \sim f_c/2$,基本已无信号所在的频带了,所以导致了以上问题。由此设想,在构造子小波的时候,是否能移动小波的中心频率以使子小波的频带仍然包含需要保留信号的频带 f_c ,而且以此频带的中心频率为子小波频带的中心频率。

为便于比较,选取 Morlet 小波为母小波,移频构造 Morlet-P 子小波如下:

$$a=0 \text{ 时} \quad h(t) = e^{\frac{t^2}{2}} \cos(\omega_0 t) \quad (5)$$

$$a=1 \text{ 时} \quad h(t) = 2^{-\frac{1}{2}} e^{\frac{t^2}{8}} \cos(\omega_0 t) \quad (6)$$

$$a=2 \text{ 时} \quad h(t) = 0.5 e^{\frac{t^2}{32}} \cos(\omega_0 t) \quad (7)$$

$$a=3 \text{ 时} \quad h(t) = 2^{-\frac{3}{2}} e^{\frac{t^2}{128}} \cos(\omega_0 t) \quad (8)$$

$$a=4 \text{ 时} \quad h(t) = 2^{-2} e^{\frac{t^2}{512}} \cos(\omega_0 t) \quad (9)$$

$$a = 5 \text{ 时} \quad h(t) = 2^{-\frac{5}{2}} e^{\frac{t^2}{0.48}} \cos(\omega_0 t) \quad (10)$$

式中 $\omega_0 = 500\pi \text{ Hz}$ 。

这样, Morlet-P 子小波的中心频率 f_c 保持不变, 当尺度参数取以上值时, 基于 Morlet-P 小波的连续小波变换所覆盖的频带范围仍然包含需要保留信号的频带 f_c 。

采用以上构造的 Morlet-P 小波对图 1 所示信号(有缺陷信号)分解所得小波系数见图 4。从图中看出, $a=2$ 时, 最能屏蔽其他正常超声信号而突出显示缺陷特征。

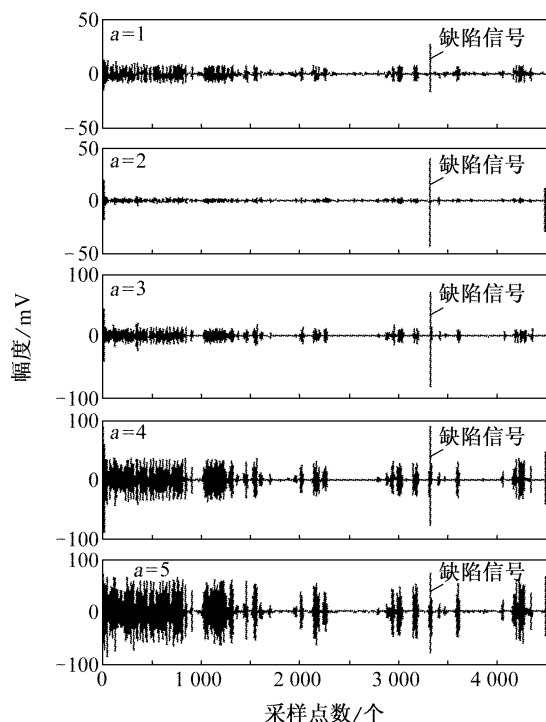


图 4 Morlet-P 小波分析缺陷信号系数图

对比图 3 和图 4 可见, 应用 Morlet-P 小波分析可以很好地提取出含缺陷的超声检测信号, 即使在 $a=5$ 时, 也可以分辨出缺陷信号; 而 Morlet 小波分析时, 在 $a=2$ 时已经分辨不出有用的缺陷信号。

4 结论

构造了 Morlet-P 小波对采集到的超声信号进行多分辨率分析。该分析聚焦于恒定的中心频率, 因此可以很清晰的看到缺陷信号的特征。

参考文献:

[1] JIAN Xiaoming, SONG Weiai, YANG Lu. Ultrasonic detection of interface in multi-layers theory and adaptive noise canceling[C]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 1999.

- [2] 美国无损检测学会编, 美国无损检测手册译审委员会译. 美国无损检测手册·超声卷[M]. 上海: 世界图书出版公司, 1996.
- [3] SHI Yaowei, CHEN Jianzhong, SHI Shu. Wavelet analysis of ultrasonic A-scan signal of solid-state welded joints[D]. Beijing: Beijing Polytechnic University, 2000.
- [4] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [5] Timothy C Hanshaw, Gupta A, Burdekin F M. Identification of layered material properties using wavelet transform of ultrasonic data[D]. Pullman: Washington State University, 2000.
- [6] 冯 若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1991.

2007 远东无损检测新技术论坛 在江苏无锡召开

5 月 15—16 日, 2007 远东无损检测新技术论坛在江苏省无锡市隆重召开。来自政府部门、无损检测行业、大专院校领导、知名专家以及专业技术人员近五百人参加了论坛。

本届论坛立足中国, 辐射海外, 以掌握先进技术, 在竞争和发展中取得主动为宗旨, 以加强国际国内交流合作, 促进中国无损检测技术发展, 改善和提高企业竞争力为目的, 选择国际最新无损检测科研成果、先进技术和装备为宣讲内容。为行业协作, 新技术、新产品应用与推广和仪器材料的销售提供了一个发展的平台。

论坛吸引了国内外无损检测行业的著名研究机构、设备制造企业和使用单位近 40 家。宣讲专题有超声导波检测技术、超声 TOFD/相控阵检测技术、射线数字成像技术、涡流检测技术以及其他无损检测新技术的研究与应用等, 来自中外 30 多位专家作了 30 场专题报告。专家们的精彩讲演得到与会代表的交口称赞。会展厅展出了当今国际上最新的无损检测仪器设备, 令参观者流连忘返, 收益颇丰。

远东无损检测新技术论坛的成功召开, 将大大缩小我国无损检测技术与国际先进水平的差距, 对我国无损检测事业的发展起到积极的推动作用。

(江苏省特种设备安全监督检验研究院 许建芹)