

# 小波变换软阈值去噪在粗晶材料 超声检测中的应用<sup>\*</sup>

卢超 张维 邬冠华 于润桥

(南昌航空工业学院 南昌 330034)

2002年1月18日收到

**摘要** 本文研究多尺度小波分析方法在粗晶材料超声检测信号增强中的应用。在分析结构噪声、电噪声和缺陷信号的小波变换特性的基础上,提出一种用一个尺度间变化的门限阈值来抑制噪声的小波变换系数,并以各尺度缺陷信号的能量关系形成权值,加权重构信号来提高信噪比。实验结果表明,该方法具有很好的去噪效果,增强了粗晶材料缺陷的检出率。

**关键词** 粗晶材料, 超声检测, 小波变换, 变化的门限阈值, 信噪比

## De-noising in ultrasonic detection of coarse-grained materials by wavelet transform soft-thresholding

LU Chao ZHANG Wei WU Guanhua YU Runqiao

(Dept. of Measuring and Control Engineering,

Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034)

**Abstract** To suppress the adverse effects of the structure noise and the electrical noise, the application of multiscale wavelet transform to ultrasonic detection of coarse-grained materials is discussed. According to the characteristics of the wavelet transform on the different scale of the structure noise, the electrical noise and the defect signal, we present an algorithm such that wavelet transform coefficients of noise are filtered by a changing threshold on the different scale and the detection signal is reconstructed with appropriate weight in order to enhance the signal-to-noise ratio. Experimental results show that this new method is effective, and the defect is detected easily.

**Key words** Coarse-grained material, Ultrasonic detection, Wavelet transform, Threshold, Signal-to-noise ratio

## 1 引言

在粗晶材料的超声无损检测中, 结构噪声

往往使缺陷信号在传统超声探伤仪上难以识别。通过提高换能器激励脉冲电压和仪器接收电路的增益来增强缺陷信号, 却使结构噪声、

<sup>\*</sup> 江西省测试技术与控制工程中心基金资助项目

随机电噪声也成比例地放大, 缺陷信号仍淹没在强噪声背景中。如何提高信噪比, 增加缺陷的检出率一直被关注。

在粗晶材料超声检测信号处理中, 降低噪声, 增强缺陷信号有很多方法, 典型的是分裂谱 (SSP) 方法和自适应消噪方法<sup>[1-3]</sup>。分裂谱方法采用频率分隔和统计算法来处理信号, 对滤波参数调整敏感, 增强信噪比有限, 而且在很多情况下, 分裂谱方法对信号的分解不是最优的表示。自适应消噪在降低相关噪声方面很有效, 但滤波处理时要求有相关参考噪声信号, 且降噪效果严重依赖检测信号与参考噪声的相关性。

多尺度小波去噪方法是小波分析在信号处理中的重要应用, 其基本原理是利用小波变换的多分辨率将带噪信号分解到各个尺度上, 然后根据缺陷信号和噪声在不同尺度上的性质分别处理, 完成信噪分离。与上述两种方法相比, 采用小波变换, 即采用恒定的中心频率-带宽比的滤波器组进行信号分解比分裂谱方法更为恰当; 且小波分析方法对噪声和信号不需要太多的先验知识。因此, 小波分析方法在粗晶材料超声信号处理、闭合裂纹微弱信号检测等中得到广泛应用<sup>[4-8]</sup>。文献[4, 5]采用的是基于小波变换模极大值的算法, 由于要求搜寻各尺度上的局部模极大值且依据其尺度传播性分选出缺陷的模极大值, 处理过程复杂。文献[6-8]采用小波变换阈值处理方法去噪, 但对其中的关键即阈值的选取, 未给出具体方法也未给出具体实验数据, 而是凭经验确定, 这给实际应用带来很大不便。本文应用 Donoho 的基于阈值处理思想的小波域去噪理论<sup>[9]</sup>, 根据结构噪声, 电噪声和缺陷信号在多尺度小波变换下的特性给出一种随尺度变化的阈值确定方法, 并以各尺度的信号能量形成权值, 加权重构去噪信号。应用此方法对铸铁件的超声探伤信号进行了实验分析。实验结果表明, 该阈值去噪方法能大大降低噪声, 突出缺陷信号, 增加信噪比, 提高了缺陷的检出能力。

## 2 小波多分辨率分析

小波变换是把基本小波函数  $\psi(t)$  作位移  $b$ , 再在不同尺度  $a$  下与待分析的信号  $f(t)$  作内积:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \overline{\psi_{ab}(t)} dt \quad a > 0 \quad (1)$$

其中

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

变换结果  $W_f(a, b)$  反映了信号  $f(t)$  在尺度  $a$  (频率) 和位置  $b$  (时间) 的状态。若满足重构容许条件<sup>[10]</sup>, 则信号  $f(t)$  由可下式重构:

$$f(t) = \frac{1}{c_\psi} \int_0^{+\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a, b) \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) db \quad (3)$$

在实际应用中, 对尺度参数  $a$  和位置参数  $b$  进行离散化<sup>[6]</sup>, 得到信号  $f(t)$  的离散小波变换为

$$W_f(j, k) = \int_R f(t) \overline{\psi_{jk}(t)} dt \quad (4)$$

对于离散序列小波变换可以用多采样率滤波器形式表示, 以便于采用信号处理技术作多分辨率分析。图 1 是二进小波变换的 Mallat 快速算法流程图<sup>[11]</sup>, 其计算量远低于式(4)的数值积分。其中  $h_0, h_1$  分别是分解低通滤波器和分解高通滤波器。被处理信号  $f(t)$  的离散序列  $f(k)$  经过低通和高通分解及二抽取, 得到二进尺度下的一组离散小波系数  $d_{1,k1}, d_{2,k2}, d_{3,k3}, d_{4,k4}$  (细节信息) 和离散近似信息  $c_{4,k4}$  (图中只画出尺度  $j = 4$  的分解流程)。即小波变换能把信号分解到表示不同频带的各个尺度上。

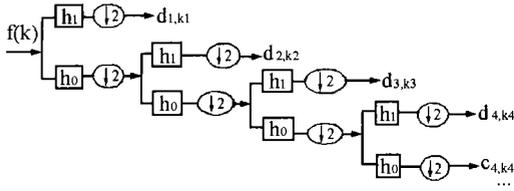


图 1 二进离散小波变换分解流程

### 3 去噪处理

#### 3.1 噪声和信号的小波变换特性

在进行粗晶材料超声检测时, 信号噪声主要包括结构噪声和仪器电噪声。电噪声是一种白噪声<sup>[12]</sup>, 白噪声过程的小波变换仍然是白噪声过程。对于白噪声, 其功率谱是平坦的, 它对各尺度小波系数都有影响。Mallat 利用小波变换能刻画信号的奇异性的特点证明<sup>[13]</sup>, 白噪声是负奇异性的, 即随着尺度的增大, 白噪声的小波变换模迅速减小。

结构噪声源于超声检测脉冲和材料晶粒对超声波的散射, 它与缺陷散射波来自同一个声源, 这使得它成为粗晶材料超声检测缺陷识别的严重障碍。超声波散射与晶粒的尺寸、各向异性的程度和超声波的频率等有关。通常, 晶粒越粗大, 各向异性越严重, 超声频率越高, 散射越强烈。散射系数、超声频率、各向异性的程度和晶粒平均直径间的关系如下<sup>[14]</sup>:

$$\alpha_s = c_2 F d^3 f^4 \quad d \ll \lambda \quad (5)$$

$$\alpha_s = c_3 F d f^2 \quad d \approx \lambda \quad (6)$$

$$\alpha_s = c_4 F d^{-1} \quad d \gg \lambda \quad (7)$$

式中,  $\alpha_s$ — 散射系数,  $c_2, c_3, c_4$ — 常数,  $F$ — 各向异性因数,  $f$ — 超声波频率,  $\lambda$ — 波长。超声探伤中常用的频率一般为 20 MHz 以下, 散射情况主要由 (5)、(6) 两式决定。显然, 散射系数决定了结构噪声的大小, 随着超声频率的降低, 散射系数迅速变小。

对结构噪声的物理本质研究表明<sup>[15]</sup>, 结构噪声在相当长一段时间后, 仍能保持与入射脉冲

基本相同的频谱, 但比起同一时间的反射信号, 结构噪声的频谱中的高频分量多得多。因此, 结构噪声小波变换后在低尺度 (高频率频带) 上小波变换系数相对居多。而对于缺陷反射信号, 其类似一冲击信号, 通常为一被探头中心频率调制的宽带信号, 其功率谱可被建模为一高斯函数, 具有一定的中心频率和带宽<sup>[16]</sup>; 另一方面, 缺陷信号的频谱随其位置而改变, 距离越远, 频谱成分越向低频端倾斜。因此, 缺陷信号小波变换后主要分布在较高的几个尺度上, 并在某些尺度下突出。而且与白噪声的负奇异性相反, 缺陷信号是一突变信号, 是正奇异性的, 即缺陷信号的小波变换模随尺度的增大而增加<sup>[13]</sup>。以上噪声和信号的小波变换特性是我们构造小波阈值去噪方法的出发点。

#### 3.2 去噪方法

如上所述, 小波变换能把信号分解到表示不同频带的各个尺度上, 根据缺陷信号和噪声的小波变换特性, 采用以下抑制噪声的方法<sup>[9]</sup>:

(1) 利用 Mallat 快速算法把带噪超声信号转换到时间—尺度平面;

(2) 通过一阈值  $t$  对各尺度细节小波系数作软阈值处理, 软限幅函数为

$$d_{j,kj}^s = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,kj}) \cdot (|d_{j,kj}| - t) & |d_{j,kj}| > t \\ 0 & |d_{j,kj}| \leq t \end{cases} \quad (8)$$

(3) 利用处理后的各尺度细节信息  $d_{j,kj}^s$  和近似信息  $c_{4,k4}$  加权重构去噪信号;

上述方法是比较简单明了的, 但在粗晶材料超声信号去噪实际处理中, 关键是确定一合适的阈值  $t$ 。Donoho 提出了一种基于阈值处理思想的小波域去噪理论<sup>[9]</sup>, 其阈值的选取主要是基于近似极大极小化思想, 对处理后信号与原信号以最大概率逼近为约束条件。其阈值为

$$T = \sigma \sqrt{2 \log(N)} \quad (9)$$

式中,  $\sigma$  为附加噪声的标准偏差,  $N$  为信号的长度。显然此阈值是固定的。用固定的阈值  $T$  对各尺度小波系数处理并不够合理。根据前

面对噪声和信号小波变换特性的分析,我们定出本文研究用的门限阈值为

$$t_j = \gamma(j)\sigma\sqrt{2\log(N)} \quad (10)$$

其中,  $\gamma(j)$  是反映噪声的小波变换模在不同尺度  $j$  上传播性质的传播因子,在两相邻尺度上有  $\frac{\gamma(j+1)}{\gamma(j)} = O\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$  的关系<sup>[13]</sup>。在实际处理中,我们取  $\gamma(j) = [1.0, 0.7, 0.05, 0.001]$  (本文最大分解尺度为 4)。

对于  $\sigma$  值,这是反映附加噪声强度的参数,在实际超声检测中,我们不能从带噪回波中单独分离出噪声,所以必须根据噪声的小波变换特性来估计。由结构噪声和电噪声的小波变换特性可知,噪声相对的主要分布在  $j = 1$  尺度上。根据 Donoho 阈值理论,确定  $\sigma$  的估计为  $\hat{\sigma} = MAD/0.6745$ , 其中,  $MAD$  表示带噪超声信号小波变换  $j = 1$  尺度上的小波系数  $|d_{1,k1}|$  模序列的中值<sup>[9]</sup>。

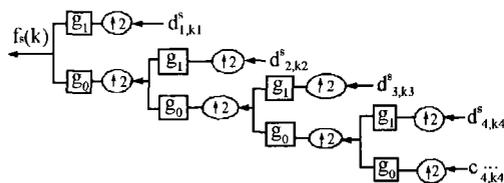


图 2 二进离散小波变换重构流程

在确定阈值  $t_j$  后,就可以用式 (8) 对各尺度小波细节信息作软阈值处理得到  $d_{j,kj}^s$ 。 $d_{j,kj}^s$  可认为主要是缺陷信号的小波细节信息。由  $d_{j,kj}^s$  和近似信息  $c_{4,k4}$  可以重构得到去噪后的超声信号。重构流程如图 2 所示,离散细节信息  $d_{2,k2}^s$  经过二插值与重构高通滤波器  $g_1$  卷积,又经二插值与重构低通滤波器  $g_0$  卷积得到重建信号  $f_2(k)$ 。依此类推,从离散细节  $d_{j,kj}^s$  可以分别得到重建信号  $f_j(k)$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ),由近似信息  $c_{4,k4}$  得到重建信号  $f_5(k)$ 。 $d_{j,kj}^s$  的数据点数各不相同,但重建信号  $f_j(k)$ ,  $f_5(k)$  的点数相同,且等于  $f(k)$  的长度。由此得到最后

$$\text{的重建信号 } f^s(k) = \sum_{j=1}^5 f_j(k)。$$

上式对去噪信号的重构是等权值的,实际对带噪超声信号处理时,我们采用的是适应噪声小波变换特性的门限阈值  $t_j$ ,而且缺陷信号在各尺度上不是均匀分布的,因此我们进行加权重构,按各尺度缺陷信号能量关系形成权值

$$\left\{ \begin{aligned} w_j &= \frac{\sum_{k_j} (d_{j,k_j}^s)^2}{\sum_j \sum_{k_j} (d_{j,k_j}^s)^2 + \sum_{k_4} (c_{4,k_4})^2} \\ w_5 &= \frac{\sum_{k_4} (c_{4,k_4})^2}{\sum_j \sum_{k_j} (d_{j,k_j}^s)^2 + \sum_{k_4} (c_{4,k_4})^2} \end{aligned} \right. \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (11)$$

于是得到加权重构去噪信号  $f^s(k) = \sum_{j=1}^5 w_j f_j(k)$ 。显然,对缺陷信号较强的尺度,其信号能量大,从而赋予大的权重,对噪声成分强的尺度被赋予小的权重,则重构信号的去噪效果更好。

经过阈值处理再加权重构去噪后的信号,信噪比将得到大的提高,而且作为一种时频分析工具,小波变换能保留信号的时间信息,这有利于通过回波在时间轴上的位置对缺陷的准确定位。

## 4 实验结果

实验试样采用粗大晶粒(平均晶粒直径约 0.3 mm)的铸铁件,试样 1 加工了  $\Phi 1$  的平底孔,试样 2 为含有自然缺陷(约 7 mm 长的收缩裂纹)的轴工件。探伤采用自发自收的 A 扫描方式,CTS-23 型金属超声探伤仪激发并接收中心频率为 5 MHz 的宽带窄脉冲超声信号,该信号经采样频率为 40 MHz 的高速 A/D 采集卡数字化后存于微机中,信号的处理、显示工作在微机中完成。

图 3(a) 为对试样 1 进行探伤时所采集的信号, 从所显示的超声回波上很难判断缺陷存在与否。将采样信号小波分解到  $j = 4$  尺度, 图 3(b) 为采用本文去噪方法获得的信号。根据去噪后的超声回波很容易判断缺陷的存在与位置, 而且超声回波去噪后得到的缺陷位置与试样 1 加工的平底孔位置完全符合, 这说明小波处理方法对缺陷的定位是准确的。

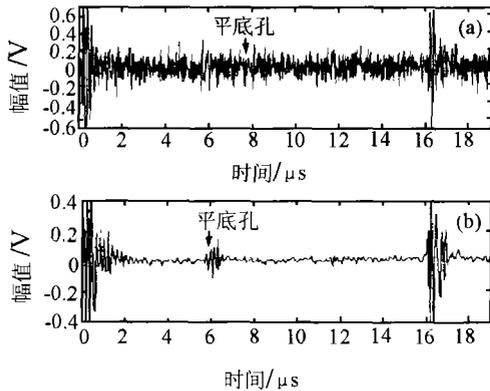


图 3 (a) 试样 1 的原始超声回波  
(b) 试样 1 去噪处理的结果

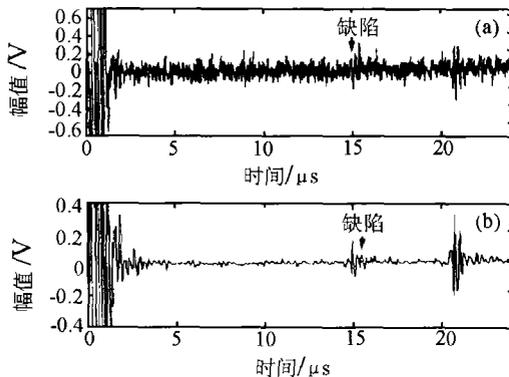


图 4 (a) 轴工件试样 2 的原始超声回波信号  
(b) 轴工件试样 2 的去噪处理结果

分析去噪效果, 定义波形中的信噪比 SNR 为  $SNR = 20 \log_{10} \left( \frac{S_{peak}}{n_{peak}} \right)$ 。其中,  $S_{peak}$ ,  $n_{peak}$  分别为缺陷回波最大幅度和噪声最

大幅度。处理前后缺陷信号的最大幅度变化不大, 而经过去噪处理后噪声的最大幅度比原始回波降低了 4.97 倍, 信噪比提高约 14 dB。

图 4(a) 为铸铁轴工件试样 2 的原始检测回波, 噪声很大。图 4(b) 为处理后的结果, 缺陷信号被提取出来, 该检测结果与我们对此轴件的解剖结果十分吻合。

## 5 结论

对粗晶材料超声探伤信号, 本文在分析结构噪声, 电噪声和缺陷信号小波变换特性的基础上, 提出了一种基于二进离散小波变换软阈值处理尺度加权重构的去噪方法, 并给出了具体选取阈值和权值的方法。与基于小波变换模极大值的去噪方法相比, 采用随尺度变化的门限阈值更为合理, 而且整个处理过程更为简单。利用此方法对粗晶铸铁件试样的超声检测信号分析表明, 结构噪声、仪器电噪声得到很好的抑制, 信噪比明显提高, 从去除噪声后的超声信号上能方便地识别缺陷的存在与否及准确定位, 能大大提高粗晶材料超声检测的缺陷检出率。本方法对其它噪声材料, 如钛、钛合金、奥氏体钢件、陶瓷等的超声检测也有借鉴作用。

## 参 考 文 献

- 1 Aassel J D. *Ultrasonics*, 1990, **28**(3): 229-239.
- 2 刘镇清, 李成林, 姚峻峰. 无损检测, 1995, **17**(5): 121-123.
- 3 Zhu Y, Weight P. *IEEE Trans. UFFC*, 1994, **41**(1): 26-30.
- 4 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995. 88-90.
- 5 陈岳军, 史耀武. 无损检测, 1997, **19**(2): 32-34.
- 6 简晓明, 李明轩. 声学学报, 2000, **25**(2): 97-102.
- 7 张广明, 马宏伟, 王裕文等. 中国机械工程, 1999, **10**(12): 1389-1391.
- 8 陈建忠, 史淑, 史耀武. 宇航材料与工艺, 1999, **16**(3): 27-33.

## 第五届全国声学标准化技术委员会在京成立

全国声学标准化技术委员会于 2002 年 11 月 28 日在北京中国科学院声学研究所召开了五届成立大会。有委员和代表共 51 人出席本次会议。

会议由主任委员马大猷院士主持，欢迎到会的各方代表，感谢委员对声学标准化工作的无私奉献。

国家标准化管理委员会王莉同志祝贺我会的换届，并宣布了第五届全国声学标准化技术委员会组成方案。

中科院综合计划局缪有贵同志对委员们多年来为国家声学标准化工作呕心沥血、默默奉献深表敬佩，对中科院声学所给予声标委工作的大力支持表示由衷的感谢。还简要介绍了中国科学院政策局已将标准化工作成果等纳入对各所知识创新工作业绩考评指标范围，为院标准化工作的长期发展提供了政策性保障。

中科院声学所所长田静研究员指出，标准化工作是社会公益性的、基础性的、无报酬的，再次强调了标

准化工作是对国家标准事业的一份贡献。在马大猷院士领导下，声标技委会的工作很有成效，每年都有新的标准出台。并要求我们的标准化工作尽快融入国际标准体系中，在国际声学标准制定中占有一席之地。

五届秘书长吕亚东研究员作了 2002 年度全国声标技委会工作报告。四届秘书长章汝威研究员作了第四届全国声标技委会工作总结。主任委员马大猷院士对卸任老委员颁发了感谢信和纪念品。

会议审查了 2002 年的国家标准送审稿，提出修改意见，并进行了投票表决。按有关规定，现已上报中国科学院和国家标准化管理委员会审批、发布。

会议讨论了 2003 年和 2004 年工作计划。经过全体委员和代表的共同努力，本次会议如期顺利完成了预定任务。

(声标委秘书处 徐欣)

## “2003 年水声综合技术交流会”将于 8 月在四川雅安市召开

与时俱进、三阳开泰，我们迎来了 2003 年。在新的一年里水声行业为我国海军水声装备现代化建设担负着光荣的历史使命，同时要承前启后，鼓励和培养青年水声科技工作者尽快成才，挑起水声科学赶上和超过世界先进水平的重任。为此，中国造船工程学会船舶仪器仪表学术委员会、中国仪器仪表学会船舶仪器仪表分会、中国造船工程学会电子学术委员会水中探测学组、中国国防网站联合会水声专业网等学术团体联合召开“2003 年水声综合技术交流会”，为我国水声科技工作者提供一个交流科研创新、科研攻关和科研新成果的学术舞台，热忱欢迎水声科技人员特别是

青年水声科技人员踊跃撰写论文参加学术交流，以期实现促进水声技术进步和水声人才成长的目的。会议拟于 8 月份在四川雅安市召开。

应征论文截止日期：2003 年 7 月 30 日。

有关会议征文等事项请与浙江省声学学会联系。

联系人 王竹湘 地址 浙江富阳七一五所

邮编 311400 电话 (0571)63332083

传真 (0571)63332333

E-Mail: SXDG@chinajournal.net.cn

(浙江省声学学会)

- 
- 9 David L Donoho. *IEEE Trans. on IT*, 1995, 41(3): 612-627.
  - 10 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995. 15-16.
  - 11 Mallat S G. *IEEE Trans on PAMI*, 1989, 34(11): 674-692.
  - 12 陈建忠, 史耀武. 焊接技术, 1999, 19(1): 4-5.
  - 13 Mallat S G, Hwang W L. *IEEE Trans IT*, 1992, 38(2): 617-643.
  - 14 蒋危平, 方京. 超声检测学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1991. 200-201.
  - 15 郭成彬. 应用声学, 1998, 17(4): 1-5.
  - 16 Karpur P, Shankar P M, Rose J L et al. *Ultrasonics*, 1988, 26(7): 204-208.