

信号处理在超声检测中的应用

毛 捷 简晓明 李明轩 黄振俨

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

1999 年 2 月 26 日收到

摘要 文章综合报道了信号处理在超声检测的抑噪、缺陷的定性定量分析及优化驱动信号的几方面应用。

关键词 超声检测, 信号处理

Applications of signal processing in ultrasonic testing

Mao Jie Jian Xiaoming Li Mingxuan Huang Zhenyan

(Institute of Acoustics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Signal processing methods used in ultrasonic testing are reviewed, which cover noise suppressing, QNDE and optimization of driving signal.

Key words Ultrasonic testing, Signal processing

1 引言

随着数字信息时代的到来, 数字信号处理技术正越来越广泛地被应用到超声检测技术中去, 并为检测超声技术发展和应用开辟了更广阔的天地。观察一、二十年来信号处理技术在超声检测中的应用, 主要可分为以下三个方面: 大背景噪声下有效信号的提取, 缺陷的定性定量分析和如何优化检测超声信号。

2 噪声抑制

由于在一些材料中存在一些散射中心, 如颗粒的边界及其他介质微粒, 这些散射中心会产生一些在时域上看似随机分布的回波, 这些回波对于需要检测的缺陷信号构成了背景噪

声, 为检测小的缺陷带来困难。利用信号处理的方法来提取缺陷回波, 并不是一个新的概念。多次平均法、匹配滤波器、相关法、频谱分析等手段常常被用来降低噪声。但是, 对于这种非随机的相关噪声, 这些处理方法往往达不到满意的结果。随着 70 年末, 时频变换、人工神经网络、小波分析等新的概念的提出和推广, 人们开始在超声检测的噪声抑制方面进行新的尝试。

1982 年, V.L.NEWHOUSE 等人利用频谱分离 (SSP) 的最小算法进行粗晶材料中的伤波提取^[1]。鉴于近距离无法分辨的散射体的回波主要受互相干涉的影响, 随频率有较强的变化, 而较大的易于分辨的散射体的回波幅度受频率变化的影响较小, 采取频谱分离技术, 将回波信号进行傅立叶变换, 通过一系列的带

通滤波器滤波, 每组输出信号再进行傅立叶逆变换, 并归一化, 利用最小算法来提取有效信号。SSP 算法已被证实为一种有效的抑制粗晶材料散射噪声的方法。信号的提取除了最小算法, 还有平均平方法, 极性阈值法^[2], 分位点系数法, 中值间隔法^[3], 空间最小—频率最小法及空间最小—频率阈值法^[4]等, 但这些算法都依赖于一系列窄带信号频率范围的选择, 如果有一个选择的频带内没有相关信号, 而主要是噪声, 或者和频率相关的噪声能量高到一定程度, 那么重建的信号中都有可能丢失了目标^[3]。针对这些缺点, 有人提出了 CSP(切谱处理) 算法^[3]、频谱直方图法^[5]、组延时移动信息法^[6]。在切谱处理中, 使用了带阻滤波器来代替分离谱中的带通滤波器, 这样做的好处是只要频率范围的选择包括所有超声信号的频谱, 就不会丢失目标信号; 而 Xing Li 等人提出在频谱分离最小算法的基础上, 做出频谱直方图, 确定最高 SNR 频段, 在此范围内再次利用频谱分离最小算法或 Wiener 滤波器来提取信号^[5]; 组延时移动信息法加入了信号的相位信息, 来帮助确定高 SNR 的频率范围, 然后再次利用频谱分离最小算法来提取信号^[6], 这种方法也被应用到了大背景噪声下多个目的信号的提取上^[7]。

1994 年, Y. Zhu^[8] 用自适应噪声抵消来抑制超声检测信号的噪声, 增强信噪比。自适应滤波理论目前已被广泛地应用于系统模拟, 通信信道的自适应均衡, 自适应噪声抵消和自适应控制等方面。自适应滤波的特点是具有实时性, 滤波器权重矢量可以随输入信号而自动改变, 在一定误差准则下, 使滤波输出逼近参考信号, 其噪声抵消效果取决于待处理信号与参考信号的相关性。简晓明等人利用自适应对消成功地提取了钢板下轻介质二界面信号^[9]。

小波变换技术是近几年发展起来的应用数学分支, 在瞬态信号检测、语音图象处理、数据压缩、人工视觉和分形研究等方面有较多发展。Agostino Abbate 将这项技术应用到了粗

晶材料超声检测信号的噪声抑制上^[10], 在已知输入信号的前提下, 利用输入信号或一些理论波形, 如 Morlet, Gaussian, Mexican Hat, 做母波。Agostino 比较了三种不同的滤波方法: 删除法、阈值法以及先删除后软阈值。

国内目前也有人提出了不少的方法, 如同济大学的刘镇清等人尝试在做分离谱处理之前先相关加权检测信号^[11], 或利用时延神经网络^[12], 以波形及其相位差为双变量输入, 加以训练, 从而达到抑制晶粒结构噪声的目的。

3 缺陷的定性定量分析

缺陷的定性定量分析是当前检测声学在国际上的研究热点和难点, 属于模式识别的应用范畴, 通常由设计和实现两个过程组成。设计是指用一定数量的样本进行分类器的设计; 实现是指用所设计的分类器对待识别的样本进行分类决策, 主要由数据获取、预处理、特征提取和选择及分类决策四个部分组成。为了进行有效的识别, 重要的是如何对原始数据进行变换, 得到最能反映分类本质的特征。在超声检测中, 缺陷的回波幅度、幅谱往往无法直接用来区分缺陷的类型, 往往需要加上缺陷回波的上升时间、下降时间、振动周期、峰度系数^[13]、空间幅度谱^[14]、倒谱等特征量, 或从时频空间来获取更多的特征^[15]。但是, 缺陷的回波信号除了与缺陷的形状、大小有关外, 还和换能器特性、换能器的相对位置、换能器与介质的耦合条件, 激励信号等多种因素有关, 因此在直接从回波信号难以提取特征的情况下, 可以采用各种解卷积的方法来获得缺陷的脉冲响应系统^[16], 以获得更加明显的特征。

基于传统的统计模式识别系统, 在提取了有效的特征后, 可采用 k-近邻分类器、Fisher 线性判决规则等各种决策方法进行分类。如 1986 年, S.F. Burch^[17] 等人利用超声检测装置对 40 个有光滑裂纹、粗糙裂纹、多孔和夹

渣 4 种不同缺陷的焊缝进行探测, 记录了探头在 0° 、 10° 、 20° 不同入射角时, x 、 y 方向每 2mm 间隔步进所得的回波信号幅度, 求得它们的幅度比率 (所有 20° 入射时不同 x 、 y 位置伤波的反射幅度和与所有 0° 入射时不同 x 、 y 位置伤波的反射幅度和之比)、曲线峰态值及圆球度三个互不相关特征值, 选取其中 20 个缺陷作为训练样品, 计算出不同特征值的平均值和方差, 另外 20 个缺陷作为待测样品, 采用最小加权距离算法来归类, 实验证实, 缺陷样品的归类成功率达 100%。Dr. A MacNab^[18] 采用 4 个入射角分别为 0° 、 15° 、 30° 和 45° 的 10M 探头沿四个垂直方向移动, 记录伤波的幅度、时间及探头位置, 计算最佳拟合点、直线和平面, 通过伤到最佳拟合点、直线和平面的幅度加权距离, 来判别点状、线状、面状和孔状缺陷类型、大小及线状和面状缺陷的倾斜角。对 10 种不同类型的人工伤进行判别, 分类 100% 成功, 倾斜角的计算相当准确, 大小估计有稍微的偏差。

由于通常的模式分布是非常不规则的, 这就要求所用的模式分类方法在模式空间里形成各种非线性分割曲面; 另外在实际应用中, 还常常存在着或多或少未知的背景噪声, 这都给传统的模式识别带来一定的困难。相比之下, 神经网络具有自适应能力, 可在模式空间内形成各种复杂的判决表面; 神经网络分类器一般对输入模式信息的不完备或特征的缺损不太敏感, 只要待识别的模式在所表示域具有一定的差异, 网络就可以通过自适应的学习, 找到不同模式的特征信息进行分类^[19]。目前神经网络已被广泛应用在超声检测的定性定量分析方面。如 A.R. Baker^[20] 将 S.F. Burch 等人提出的特征值 (除了上面提到的三点, 还有伤波的平均脉冲宽度、幅度的均方根及加权垂直平面散度) 编码后作为 Hopfield 网络的输入来进行分类; A.MecNab 利用前面提到的实验数据, 计算每三个点组成的三角形的内角, 以不同内角出现的次数经幅度加权后作为特征量输入网络。简

晓明等人^[21] 在实验室利用人工神经网络, 选用 1.2MHz 复合带宽探头对有机玻璃试块, 成功地实现了从 $\phi 1\text{mm}$ 到 $\phi 10\text{mm}$ 平底孔和横穿孔的分类及 2mm 到 10mm 的定量测量。实验证明将神经网络用于超声检测的定性及定量分析中的结果是令人满意的。

4 优化驱动信号

根据已知换能器的响应和希望获得的检测超声信号响应, 可得到所需激励信号的响应。随着电子技术的发展, 利用可编程信号源可产生任意波形的电激励信号, 为实现所需检测超声信号可控可调提供了可能。这种信号合成技术可以用来获得最大幅值的回波信号以提高检测灵敏度, 可以产生与目标匹配的特定形状的信号以进行目标识别, 或产生一定幅值的最短波形来提高脉冲回波系统的轴向分辨率。激励信号 $X(f)$ 可通过特定的输出信号 $Y(f)$ 和系统响应 $H(f)$ 获得, 它们之间在频域的关系可表示为 $X(f)=Y(f)/H(f)$ 。系统响应 $H(f)$ 通常通过实验的方法获得, 或采用模型法, 由理论计算获得。前者不要求知道探头的结构参数、介质的材料特性及电子负载特性, 而后者则不受当时的测量条件及位置的限定^[22], 二者各有千秋。

利用信号处理的手段可以优化超声检测的驱动信号, 产生选用信号处理手段所需的特定波形, 抑制背景噪声, 提取有用信息, 定性定量地分析有关缺陷; 但同时也应看到, 信号处理技术虽然进一步发挥了超声检测在工业、国防应用中的巨大作用, 但是信号处理的方法还要依赖于缺陷散射理论的指导, 部分方法也有待于从实验室中走出来应用到实际中去。

参 考 文 献

- 1 Newhouse V L. *Ultrasonics*, 1982. **20**(March): 59-68.
- 2 Rose. *Mater Eval*, 46(1988): 114-122.

(下转第 27 页)

5 讨论

- (1) 文献 [6] 给出气幕插入损失的测量结果, 其范围 26-50dB。而理论计算和海上实验结果都表明: 当接受位置位于气幕后方 3-5 倍幕宽后, 由气幕所导致的传播损失差就已经减小到 15dB 以下, 见图 3, 由此可见: 此时气幕后 $\psi_{衍}$ 远大于 $\psi_{透}$ 。因此, 在研究潜艇如何利用气幕屏蔽作用机动时, 可不考虑 $\psi_{透}$ 的影响。
- (2) 文中所建模型假定海水中的声速为均匀分布。因此, 该模型只适用于均匀海水。在非均匀海水中, 方向因子的表式和振幅与距离的反比关系都将发生变化, 模型的建立还有待于进一步工作。
- (3) 该模型有利于气幕弹使用方法优化, 不仅

适用于连续气幕, 也适用于离散的不连续气幕。

- (4) 该模型以虚源方法为基础, 不能反映频率变化的影响, 在其使用上有一定的局限性。

参 考 文 献

1 汪德昭, 尚尔昌. 水声学. 北京: 科学出版社, 1981. 445-462.

2 Brekhovskikh L M 著, 杨训仁译. 海洋声学. 第二版. 北京: 科学出版社, 1983. 125-127.

3 赵凯华, 钟锡华. 光学 (上册). 北京: 北京大学出版社, 1984. 186-190.

4 母国光, 战元龄. 光学. 北京: 人民教育出版社, 1978. 267-309.

5 Brekhovskikh L M 著, 杨训仁译. 分层介质中的波. 第二版. 北京: 科学出版社, 1985. 195-198.

6 钱祖文. 气幕插入损失的测量. 大连: 水声对抗会议交流论文. 1990.

~~~~~

(上接第 47 页)

3 Ericsson L. *NDT International*, 1992. **25**(2): 59-64.

4 李月. 粗晶超声检测中两种提高信噪比的方法. 硕士学位论文, 1985.

5 Li X. *IEEE Trans. UFFC*, 1992. **39**(2): 279-284.

6 Li X. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1993. **41**(6): 2067-2074.

7 Tian Q. *IEEE Trans. UFFC*, 1998. **45**(1): 251-256.

8 Zhu Y. *IEEE Trans. UFFC*, 1994. **41**(1): 26.

9 简晓明. 超声检测中信号处理研究. 博士学位论文, 1999.

10 Abbate A. *IEEE Trans. UFFC*, 1997. **44**(1): 14-25.

11 刘镇清. 声学学报, 1996. **21**(4 增刊): 714-725.

12 刘镇清. 声学学报. 1997. **22**(4): 297-302.

13 刚铁. 无损检测, 1995. **17**(9): 248-251.

14 Lorenz M. *NDT International*, 1993. **26**(3): 127-133.

15 Fukuda Y. Classification of ultrasonic flaw signal by means of time-frequency analysis, 14th WCNDT, Dec. 8-13, 1996: 2113-2116.

16 简晓明等. 声学学报, 1999. **24**(6): 637-644.

17 Burch S F. *NDT International*, 1986. **19**(3): 145-153.

18 MacNab A. *British Journal of NDT*, 1991. **33**(1): 11-18.

19 黄德双. 神经网络模式识别系统系统理论. 北京: 电子工业出版社, 1996.

20 Baker A R. *NDT international*, 1989. **22**(2): 97-105.

21 简晓明. 声学学报. 2000. **25**(1): 71-77.

22 Hayward G. *IEEE Trans. UFFC*, 1989. **36**(3): 356-363.