

粗晶材料超声检测信号模型及其通过窄带滤波器分析

刘镇清

(同济大学声学研究所,上海 200092)

摘要: 分离谱处理技术已被用于增强粗晶材料超声检测的缺陷回波信号.在分离谱技术中,宽带超声脉冲回波通过一组窄带滤波器阵列分别进行滤波处理,由于人们尚不清楚该技术是如何有效利用这些滤波器的输出特性进行工作的,使得该技术的各种算法都有性能不够稳健的问题.本文通过构造一粗晶材料超声检测信号模型,进而获得超声信号通过窄带滤波器阵列的输出特性.文中还给出了计算机模拟的结果.

关键词: 超声检测; 粗晶材料; 信号模型; 窄带滤波器输出特性

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 04-0598-03

An Ultrasonic Testing Model for Large Grained Materials and Its Output Properties of Narrowband Filter

LIU Zhen-qing

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Split spectrum processing has been proposed for enhancement of flaw echo in ultrasonic testing of materials with large grains. The split spectrum technique is a method where one wideband ultrasonic pulse echo is filtered through a narrowband filter bank. However, the split spectrum processing algorithms are not robust since it is not clear how the technique use the filter outputs available. In this paper, a signal model of ultrasonic testing for large grained materials is developed. Using this model, the outcoming ultrasonic signal of a narrowband filter bank is obtained. Finally, some simulation results are illustrated.

Key words: ultrasonic testing; large grained material; signal model; output properties of narrowband filter

1 引言

粗晶奥氏体不锈钢一类的粗晶材料对超声传播而言是一种强散射介质,它的超声传播过程复杂,超声无损探伤信号受到晶粒散射的影响较大,需要采取特殊措施增强超声探伤信号.二十世纪八十年代初,美国科学家 V L Newhouse 及其合作者提出了一种增强超声探伤信噪比的分离谱数字信号处理方法^[1].分离谱的原理及常见的实现过程可参见图 1,在图 1 中,将接收到的数字化超声信号作 FFT 运算,得到信号的频谱,并在一定的幅度能量频带内设置若干不同中心频率的窄带带通滤波器(滤波器组),再以不同中心频率的窄带输出信号为变量进行平均、中值或极小值等各种恢复运算即得到新的时域波形.

以前发表的文章中,对分离谱处理方法的研究基本上只进行了若干实验与统计分析,都没有涉及粗晶材料超声检测信号通过多组窄带滤波器后的具体性质及相互关系,使得采用的信号恢复算法存在性能不够稳健的缺陷^[2-6],较难在超声无损检测实际工作中应用.本文对粗晶材料超声检测信号的模型进行了分析研究,并讨论了该模型信号通过窄带滤波器后的性质,为发展新的粗晶材料超声检测信号的分离谱处理技术提供依据.

2 超声检测信号模型

粗晶材料由于其晶粒粗大,超声检测时每个晶粒都对超声波产生散射作用,散射方向与超声入射方向相反而传到超声换能器的超声波称之为背散射回波.对粗晶材料中

法^[1].分离谱的原理及常见的实现过程可参见图 1,在图 1 中,将接收到的数字化超声信号作 FFT 运算,得到信号的频谱,并在一定的幅度能量频带内设置若干不同中心频率的窄带带通滤波器(滤波器组),再以不同中心频率的窄带输出信号为变量进行平均、中值或极小值等各种恢复运算即得到新的时域波形.

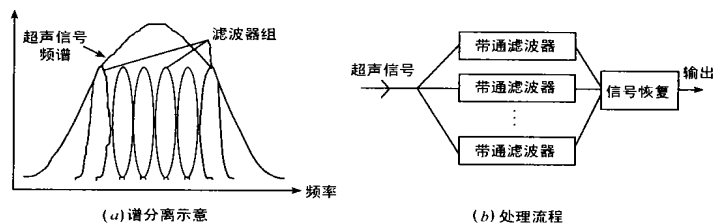


图1 分离谱处理示意

某一散射晶粒来说,当采用宽带窄脉冲的反射式超声波探伤手段,且不考虑散射受入射超声频率的影响时,可以假定超声检测系统接收到的单个晶粒超声背散射回波为一高斯状函数:

收稿日期:2000-06-14;修回日期:2001-09-19

基金项目:国家自然科学基金(No. 10074050);国家教委跨世纪优秀人才培养计划基金

$$r_m(t) = \exp(-bt^2) \exp[j\omega_0(t-k)] \quad (1)$$

式中 b 是大于零的常数, 它的数值越大 $r_m(t)$ 在时间上持续越短; k 为单个晶粒反射回波能量出现最大值的时刻; ω_0 是入射超声波的中心频率。

不考虑粗晶材料中各晶粒间的超声波多次散射, 超声系统接收到的总的粗晶材料背散射波可由如下单个晶粒超声散射回波的叠加形式给出:

$$r(t) = \sum_{k=1}^M \exp(-at) \exp\left[-\frac{b(\omega_0 + \omega_k)(t-k)^2}{\omega_0}\right] \exp[j(\omega_0 + \omega_k)(t-k)] \quad (2)$$

式中, M 为整个超声探测声束覆盖区域的晶粒数; a 是声衰减常数(按理它与频率有关, 为了简化模型设定它为常数); ω_k 是整个观测时间区域均匀分布的随机数, 它表示晶粒在材料中的分布宏观上是均匀的; k 与 ω_k 也是随机数, ω_k 代表晶粒散射信号频率相对对入射超声信号频率的漂移, k 代表晶粒散射回波幅度(能量)的大小。

由于实际粗晶材料中晶粒的大小并不恒定, 分布在一定的尺寸范围内, 且其形状也有差异, 对尺寸较小的晶粒, 它的反射回波的频率较高些, 但回波能量较小些; 对尺寸较大的晶粒, 它的反射回波的频率较低些, 但回波能量较大些, 因此式(2)中设置了一个频率偏移量 ω_k , 它服从均值为零、方差为 σ^2 的正态分布 $(N(0, \sigma^2))$, 这里 $\sigma \ll \omega_0$; 而 k 是与 ω_k 有一定相关的量, 由于 ω_k 是一个相对较小的量, 这里取 k 与 ω_k 成线性的反比关系, 即: 取 $\omega_k = 0$ 时 $k = 1$, $\omega_k = -\sigma$ 时 $k = 0.8$, $\omega_k = \sigma$ 时 $k = 1.2$; 式(2)中的 $\exp\left[-\frac{b(\omega_0 + \omega_k)(t-k)^2}{\omega_0}\right]$ 中附加了 $\frac{\omega_0 + \omega_k}{\omega_0}$ 项是为了使不同的单个晶粒散射点回波的周期数一致。

以上建立的是粗晶材料超声背散射模型。如果超声检测信号在 T 时刻有一缺陷回波, 可令它也是一高斯包络的脉冲:

$$e(t) = A \exp[-c(t-T)^2] \exp[j(\omega_0 - \omega_e)(t-T)] \quad (3)$$

式中 A 为幅度; ω_e 也是一频率偏移量, 表示反射的缺陷回波与发射的超声脉冲之间有一定的频率漂移; c 是一正的常数, 它决定高斯包络的宽窄。如果粗晶材料超声检测信号中包含有一缺陷回波时(不考虑材料底波的影响), 超声检测信号的总形式为:

$$r(t) = \sum_{k=1}^M \exp(-at) \exp\left[-\frac{b(\omega_0 + \omega_k)(t-k)^2}{\omega_0}\right] \exp[j(\omega_0 + \omega_k)(t-k)] + A \exp[-c(t-T)^2] \exp[j(\omega_0 - \omega_e)(t-T)] \quad (4)$$

式(4)的模型中仅包含一个缺陷回波, 必要时可增加缺陷回波数(实际工作中可能有多个缺陷同时出现)。

3 超声检测信号通过窄带滤波器分析

本文采用高斯形带通滤波器分析粗晶材料超声检测信号通过后的特点。对一个二阶高斯带通滤波器来说, 它的时域冲激响应 $h(t)$ 可写为:

$$h(t) = \exp(-t^2) \exp(j\omega_0 t) \quad (5)$$

式中, ω_0 为一大于零的正数, ω_0 越小则滤波器的通带越窄; b 是滤波器的中心频率。

根据线性信号理论, 超声检测信号通过带通滤波器的输出可表示为超声检测信号与带通滤波器的冲激响应的卷积。先考虑式(1)所示的单个超声回波脉冲通过式(5)所示的带通滤波器, 当 $\omega_0 \ll b$, 即: 超声回波脉冲的频率带宽远大于带通滤波器的带宽、带通滤波器呈窄带形式时, 经推导可得滤波器的输出为:

$$y_i(t) = \sqrt{\frac{A}{b}} \exp\left[-\frac{t^2}{4b}\right] \exp[-j(\omega_0 - \omega_i)(t-T)] \exp[j(\omega_0 + \omega_i)(t-T)] \quad (6)$$

式中 ω_i 为窄带带通滤波器中心频率与超声发射脉冲波中心频率 ω_0 的偏移量, 即: 窄带带通滤波器中心频率为 $(\omega_0 + \omega_i)$ 。根据式(4)与式(6)可给出不同中心频率 $(\omega_0 + \omega_i)$ 带通滤波器的超声检测信号输出为:

$$y_i(t) = y_{bi}(t) + y_{ei}(t) \quad (7)$$

$$y_{bi}(t) = \exp(-at) \sum_{k=1}^M \exp\left[-\frac{b(\omega_0 + \omega_k)(t-k)^2}{\omega_0}\right] \exp\left[-\frac{\omega_0(\omega_0 - \omega_i - \omega_k)^2}{4b(\omega_0 + \omega_k)}\right] \exp[-j(\omega_0 - \omega_i)(t-k)] \exp[j(\omega_0 + \omega_i)(t-k)]$$

$$y_{ei}(t) = \sqrt{\frac{A}{c}} \exp\left[-\frac{(t-T)^2}{4c}\right] \exp[-j(\omega_0 - \omega_i)(t-T)] \exp[j(\omega_0 + \omega_i)(t-T)]$$

式中, $y_{bi}(t)$ 为粗晶材料中晶粒的超声背散射输出, $y_{ei}(t)$ 为缺陷的超声回波输出。可见, 粗晶材料超声检测信号通过窄带滤波器后, 其输出结果将十分复杂。但大致可以看出两点性质。(1) $y_i(t)$ 是一以窄带滤波器中心频率 $(\omega_0 + \omega_i)$ 交变的“准正弦”信号; (2) $t = T$ 时, 不同的窄带滤波器中心频率都可使 $y_{ei}(t)$ 有极大值。由于 ω_k 的随机性, 且 $\omega_k \ll A$ (单个晶粒的超声背散射幅度远小于缺陷的超声反射幅度), 可以认为: 不同中心频率窄带滤波器的输出 $y_i(t)$ 在 $t = T$ 时刻都有趋近极大值的倾向, 而其它时刻则无这种一致性。

4 计算机模拟

根据式(2)模拟的粗晶材料超声检测背散射波形见图 2, 其中 $\omega_0 = 2\text{MHz}$, $\sigma = 0.2\text{MHz}$, $M = 10^5$, k 在 0 到 $20\mu\text{s}$ 中均匀随机分布, 取 $a = 1 \cdot 10^{-11}(\text{s}^{-1})$, $b = 1 \cdot 10^{-9}(\text{s}^{-1})$ 。从这一模拟的背散射信号波形来看, 它与真正的粗晶材料超声检测信号十分相似, 这也从一个侧面表明该模型的正确性。

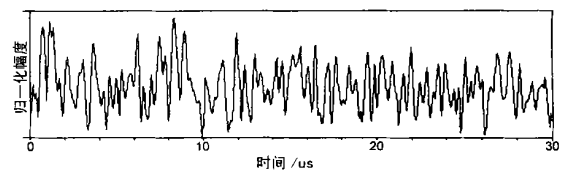


图 2 模拟超声背散射信号

再用计算机模拟带缺陷的粗晶材料超声检测信号, 模拟信号的模型由式(2)给出。首先产生中心频率为 2MHz 的晶粒背散射信号, 选择的参数与图 2 一致。根据这一背散射信号首先计算其方差 σ^2 , 然后设定缺陷回波的幅度 A , 使信噪比 A/σ^2

$=2.5$, 缺陷回波模型由式(3)给出, 其中取其中心频率为 1.5MHz , 缺陷回波的周期数与散射回波的周期数一致, 脉宽与单个晶粒超声反射回波脉宽相等, 取缺陷回波出现的时刻 $T = 10.8\mu\text{s}$. 这样得到的粗晶材料超声检测信号如图 3(a) 所示, 它的幅度谱见图 4. 根据图 4 幅度谱在高频及低频的 $1/3$ 幅度所处的频率位置 f_h 及 f_l , 确定如图 1 所示带通滤波器组的中心频率范围在 $f_l \sim f_h$ 之间, 并根据式(5)等间隔设置 12 个高斯状带通滤波器, 滤波器中取 $\omega = 2.6 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$. 设中心频率低的带通滤波器为滤波器 1、中心频率高的带通滤波器为滤波器 12, 则滤波器 2 与滤波器 6 输出分别为图 3(b) 与图 3(c).

从滤波器组各滤波器输出可了解到, 尽管缺陷回波信号经过不同频率带通滤波的输出信号在缺陷回波出现处可能会有较小的幅值, 但信号幅值大致在极大值附近摆动, 而其它时刻的输出信号则可能是极大值与极小值间的任一数值. 这意味着, 滤波器组各滤波器输出在缺陷回波出现处的相位变化较小, 其它时刻输出信号的相位变化则较零乱, 这一现象也符合式(7)的表达形式. 改变滤波器组的频率覆盖范围、滤波器的个数或滤波器的系数, 这种滤波器输出的幅值与相位值规律都不会变化. 以前人们提出的分离谱信号恢复算法均建立在滤波器组输出幅值的统计分析基础上^[3-6], 不可避免存在性能不够稳健的问题^[6]. 根据本文导出的滤波器组各滤波器输出的相位变化规律, 作者提出了一种基于相位变化的相位标准差分离谱信号恢复算法^[7], 并用于核工业现场粗晶奥氏体不锈钢的超声无损探伤, 推动了该技术在理论与应用上的发展.

5 结论

分离谱处理技术在粗晶材料超声检测信号增强方面有其

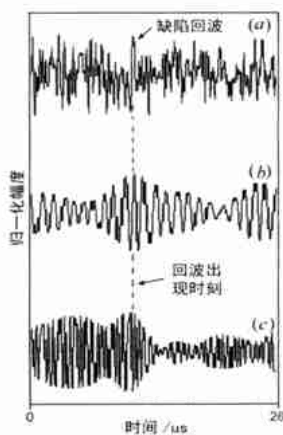


图 3 超声检测信号及其滤波器输出波形 (a) 超声检测信号, (b) 滤波器 2 输出, (c) 滤波器 6 输出

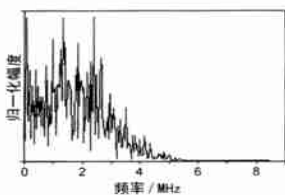


图 4 超声检测信号幅度谱

独特性, 针对该处理方法机理不清楚的问题, 本文对脉冲型超声检测回波信号模型及其通过窄带通滤波器组后的输出形式进行了理论与试验研究. 结果证实, 当超声检测缺陷回波出现时刻, 不同中心频率窄带通滤波器的输出值均在一极大值附近摆动, 相位值变化相对其它时刻小得多. 本项研究为分析各种分离谱处理技术性能提供了一良好手段, 为发展性能稳健的分离谱处理信号恢复算法奠定了基础, 有助于该技术的发展与应用.

致谢 本项工作还得到核工业无损检测中心的帮助, 特致感谢.

参考文献:

- [1] V L Newhouse, N M Bilgutay, et al. Flaw-to-grain echo enhancement by split-spectrum processing [J]. Ultrasonics, 1982, 20(2): 59 - 68.
- [2] 刘镇清等. 用于增强粗晶材料超声检测信号的分离谱方法 [J]. 无损检测, 1995, 17(5): 211 - 214.
- [3] Li Xing, N M Bilgutay, et al. Spectral histogram using the minimization algorithm: theory and applications to flaw detection [J]. IEEE trans UFFC, 1992, 39(2): 279 - 284.
- [4] M G Gustafsson, T Stepinski. Split spectrum algorithms rely on instantaneous phase information—a geometrical approach [J]. IEEE Trans UFFC, 1993, 40(6): 659 - 665.
- [5] Q Tian, N M Bilgutay. Statistical analysis of split spectrum processing for multiple target detection [J]. IEEE trans UFFC, 1998, 45(1): 251 - 256.
- [6] 刘镇清. 用于增强超声检测信号的分离谱处理性能分析 [J]. 声学技术, 1997, 16(1): 32 - 35.
- [7] Z Q Liu, et al. A Phase Deviation Based Split-spectrum Processing Algorithm for Ultrasonic Testing in Coarse Grained Materials [C]. Roma: WCNDT, 2000.

作者简介:



刘镇清 男, 1962 年生于江西省樟树市, 博士、教授、博士生导师, 同济大学声学研究所所长, 兼《无损检测》杂志副主编; 近 10 余年来主要从事超声检测与声信号处理的教学与研究, 发表了近百篇学术论文, 获 5 项国家与省部级科技进步奖, 获 4 项国家发明专利及多项全国与地方性学术奖励; 入选 1997 年度(原) 国家教委跨世纪优秀人才培养计划. E-mail: lzqhh@mail.tongji.edu.cn