

文章编号 1004-924X(2015)09-2635-10

金属材料小缺陷超声反射信号建模及识别

杨辰龙¹, 陈越超^{1*}, 叶 钱², 郑慧峰³

(1. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2. 浙江省建筑科学设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012;

3. 中国计量学院 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:为了能从含噪声金属材料超声检测信号中有效识别出微小缺陷回波,建立了金属材料超声反射信号模型并提出了基于相关系数的微小缺陷回波识别方法。对含微小缺陷金属材料超声脉冲反射信号的成分进行分析,建立了基于散射声场与高斯回波理论的优化超声回波模型。设计了超声缺陷回波位置识别方法。该方法对超声脉冲反射信号去噪后,取探头发射脉冲信号为参考信号;然后与去噪后的信号逐段求解相关系数;最后对该相关系数序列进行阈值化处理,获得缺陷回波在超声回波信号中的位置。将利用上述优化超声回波模型生成的超声反射信号及其频谱与实验获得的金属材料超声反射信号及其频谱进行了对比,结果表明:两者的时频域特征具有一致性。当将阈值设定为相关系数序列最大值的 60%时,能够有效从超声背散射信号中识别出金属材料微小缺陷回波。

关键词:金属材料;小缺陷;超声脉冲反射信号;回波模型;相关系数

中图分类号: TB31; TB553 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152309.2635

Ultrasonic echo signal modeling and identification for minor defects in metallic materials

YANG Chen-long¹, CHEN Yue-chao^{1*}, YE Qian², ZHENG Hui-feng³

(1. *State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;*

2. *Zhejiang Academy of Building Research & Design Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;*

3. *College of Metrology & Measurement Engineering,
China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)*

* *Corresponding author, E-mail: cyczju07@126.com*

Abstract: To identify the minor defect echo from ultrasonic testing signals containing the noise of metallic materials, an ultrasonic echo signal model was established and a minor defect echo identification method was put forward. The composition of ultrasonic pulse echo signals with minor defects obtained from metallic materials was analyzed, and then optimized ultrasonic echo model was established based on the Gaussian echo theory and a scattering sound field. The identification method for echo locations of ultrasonic minor defects was designed. By proposed method, the ultrasonic pulse

收稿日期: 2015-05-07; **修订日期:** 2015-07-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51075358); 浙江省自然科学基金资助项目(No. LY14E050013); 浙江省仪器科学与技术重中之重开放基金资助项目(No. JL130112)

echo signal was first denoised. Then the pulse signal from a probe was taken as the reference signal and the correlation coefficient between reference signal and denoised signal was piecewise calculated. Finally, the correlation coefficient sequence was processed by threshold method and the location of flaw echo in the ultrasonic echo signal was obtained. The simulation signal and frequency spectra generated by the optimized ultrasonic echo model were compared with those of experimental ultrasonic signal. The experiment results show that the time and frequency domain features of the two signals are in good agreements. When the threshold is set as 60 percent of the max value of the correlation coefficient sequence, the minor flaw echo can be accurately identified from the ultrasonic echo signals of metallic materials.

Key words: metallic material; minor defect; ultrasonic pulse echo signal; echo model; correlation coefficient

1 引言

新材料工艺的快速发展加大了对金属材料的质量要求。例如在航空关键件上使用的一些高温合金材料,若含有当量尺寸为 1 mm 左右的微小缺陷就会直接影响其疲劳强度等力学性能;有些关键件的当量缺陷甚至要小于 0.4 mm^[1-2]。因此,对生产加工与使用过程中金属材料内部出现的缺陷进行检测日益受到关注。超声无损检测作为最常用的无损检测手段之一,在金属材料内部缺陷检测中得到了广泛应用。然而在对金属材料进行超声波探伤时,尤其是对于粗晶材料的微小缺陷检测时,很多情况下会由于微小缺陷的回波信号幅值较小,以及粗晶粒对超声波较强的散射作用和其他噪声的影响,致使缺陷回波信号被噪声污染甚至完全湮没,想要直接从噪声中识别缺陷信号非常困难^[3]。因此国内外学者对金属材料微小缺陷超声检测的信号处理作了大量的研究。在超声检测信号建模方面:Demirli^[4]建立了基于高斯回波的信号参数估计模型;汪艳^[5]和刘镇清^[6]也分别建立了改进的多元高斯回波信号模型;Rose^[7]则对超声信号在金属内的传播及散射作了详细推导。在超声信号去噪理论方面:Pardo^[8]和 Wei Yong-qiao^[9]等分别采用改进的小波和小波包原理对超声信号进行去噪;罗玉昆^[10]等采用改进的经验模态分解对激光超声进行去噪;Li Ming-hui^[11]和崔园园^[12]等则对超声信号进行自适应滤波方面的研究。在基于智能算法的缺陷信号模式识别方面:刘继忠等^[13]采用数据融

合技术对棒材超声检测信号进行缺陷信号识别;唐国维等^[14]应用模糊神经网络方法识别焊缝超声检测信号中的缺陷信号。上述方法中,信号建模和去噪属于对超声信号的初步处理,而智能算法识别则需要大量数据进行训练,计算量大。

因此,本文先对超声脉冲回波信号的组成成分进行分析,建立了基于散射声场与高斯回波理论的优化超声回波模型。然后设计了基于相关系数的缺陷回波位置识别方法,并采用信号相似性原理识别缺陷信号。

2 基于散射声场与高斯回波理论的超声回波模型

2.1 超声检测回波信号组成分析

采用超声脉冲反射法对金属材料进行检测时,其超声回波主要由表面回波信号、底面回波信号以及两者之间的背散射信号组成。而背散射信号又包含了缺陷回波信号、结构散射信号以及非声学噪声信号等。其中金属结构散射回波主要以晶粒散射引起的杂草状回波为主。当被检测金属材料晶粒较粗时,较强的金属结构散射回波将可能湮没小缺陷引起的缺陷回波信号,从而影响超声检测结果。

2.2 超声检测回波信号组成建模

将超声换能器发射的脉冲信号模拟为高斯回波并表示如下:

$$s(\boldsymbol{\theta}, t) = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos[2\pi f_c(t-\tau) + \varphi], \quad (1)$$

其中: $s(\boldsymbol{\theta}, t)$ 为脉冲信号模型; $\boldsymbol{\theta}$ 为参数向量, $\boldsymbol{\theta} = [\alpha, \tau, \beta, f_c, \varphi]$; α 为带宽因子; β 为幅度系数; τ

为回波到达时间; f_c 为中心频率; φ 为相位。

由于表面回波信号和底面回波信号是发射的脉冲信号遇到材料表面反射后被超声探头接收的信号,这些信号可以直接用式(1)所示的高斯回波模型表示,其幅值由发射脉冲超声波强度以及被检测材料声阻抗决定。

而缺陷回波信号是由材料缺陷引起的回波信号,同样可以用高斯回波模型表示。设定材料中能导致产生回波的缺陷数量为 p ,则 p 重缺陷回波 W_f 可表示为:

$$W_f = \sum_{m=1}^p s(\theta_m, t). \quad (2)$$

对缺陷回波幅值进行求解。一些重要和常见的金属材料中的小缺陷,比如夹渣和裂纹都可以等效为圆柱状缺陷。下面对圆柱状缺陷的散射声场进行分析。设在金属材料介质中,存在一个半径为 r 的空心圆柱体缺陷,为其建立坐标轴,圆柱体的轴线与 x 轴重合,入射波沿着 z 轴方向入射,如图 1 所示。

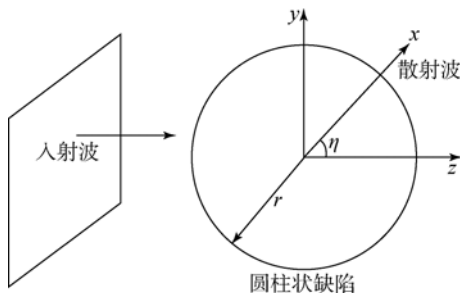


图 1 圆柱状缺陷散射声场示意图

Fig. 1 Diagram of scattering acoustic field with cylindrical flaw

当入射声波与该圆柱状缺陷相互作用时,将产生散射场。因为谐波场的存在,散射位移 u_s 可表示为缺陷半径 r 与散射角 η 的方程式:

$$u_s = U_s(r, \eta) e^{i\omega t}. \quad (3)$$

未知振幅 $U_s(r, \eta)$ 可用下面的形式求解:

$$U_s(r, \eta) = R(r) S(\eta). \quad (4)$$

采用分离变量法对 $R(r)$ 和 $S(\eta)$ 进行求解,得到 $R(r)$ 和 $S(\eta)$ 的表示方程:

$$S(\eta) = C \cos n\eta + D \sin n\eta, \quad (5)$$

$$R(r) = A H_n^{(2)}(kr) + B H_n^{(1)}(kr), \quad (6)$$

其中: C 、 D 、 A 和 B 为振幅系数, k 为波数, $H_n^{(1)}(x)$ 和 $H_n^{(2)}(x)$ 分别为第一类和第二类

Hankel 函数。

因 $S(\eta)$ 应关于 x 轴对称,有 $D=0$ 。当 $k \gg 1$ 时,有以下 Hankel 函数的渐进表达式:

$$H_n^{(1)}(kr) = \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} e^{[i(kr - \frac{\pi}{4} - \frac{\pi n}{2})]}, \quad (7)$$

$$H_n^{(2)}(kr) = \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} e^{[-i(kr - \frac{\pi}{4} - \frac{\pi n}{2})]}. \quad (8)$$

从声场辐射条件得出向外传播的波具有 $\exp[i(\omega t - kr)]$ 的形式,因此式中的 $B=0$,从而可以得出散射波的振幅为:

$$U_s(r, \eta) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n H_n^{(2)}(kr) \cos n\eta. \quad (9)$$

柱坐标下的入射波方程可表示为:

$$u_i = U_0 \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n (-1)^n J_n(kr) \cos n\eta, \quad (10)$$

其中: ϵ_n 为振幅变量 ($n > 0$ 时, $\epsilon_n = 2$; $n = 0$ 时, $\epsilon_n = 1$), $J_n(kr)$ 为 Bessel 函数。

在圆柱体表面上,能够满足以下两个条件:散射后的总位移场等于入射场与散射场的总和,位移边界条件为零。对于半径为 r 的圆柱体来说,可由边界条件得到方程:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left[U_0 \epsilon_n (-1)^n \frac{dJ_n(kr)}{dr} + A_n \frac{dH_n^{(2)}(kr)}{dr} \right] \cos n\eta = 0, \quad (11)$$

其中 U_0 为入射波的振幅。

利用 $\cos n\eta$ 的正交性质,得到式(9)的散射振幅系数 A_n 为:

$$A_n = \frac{\epsilon_n (-1)^{n+1} U_0 J_n(kr)}{H_n^{(2)}(kr)}. \quad (12)$$

对于金属结构散射回波,根据文献[15-16]可知,因金属晶粒造成的结构噪声反射信号 W_s 可表示为:

$$W_s = \sum_{n=1}^q \sigma_n \exp(-\alpha \tau_n) s(t - \tau_n), \quad (13)$$

其中: $s(t)$ 为入射超声脉冲信号; σ_k 为第 n 次的反射系数,其由金属晶粒粗细以及排布决定; τ_n 为第 n 次散射的延迟时间; q 为散射回波次数; α 为衰减系数。

对于非声学噪声信号 $v(t)$,其主体可以看作方差为 σ_v^2 的高斯白噪声(WGN),此外也包括一些随机信号如约翰奈奎斯特噪声、白噪声、粉噪声、短噪声等。

这样超声检测回波信号 $R_N(t)$ 就可以表示为:

$$R_N(t) = s(\boldsymbol{\theta}_{\text{init}}, t) + \sum_{m=1}^p s(\boldsymbol{\theta}_m, t) + \sum_{n=1}^q [\sigma_n \exp(-\alpha\tau_n) s(t - \tau_n)] + s(\boldsymbol{\theta}_{\text{back}}, t) + v(t), \quad (14)$$

其中: $\boldsymbol{\theta}_{\text{init}}$ 为表面回波参数向量, $\boldsymbol{\theta}_{\text{back}}$ 为底面回波参数向量。

2.3 基于回波模型的超声仿真信号及实验对比

采用 2.2 节中的超声回波模型构造金属材料超声脉冲反射回波信号。设置仿真信号中心频率为 7.5 MHz, 采样频率为 100 MHz, 采样点数为 5 000 点, 幅值为归一化幅值。在回波信号中构造了 3 处缺陷回波信号以及若干结构散射信号。3 处缺陷回波信号分别位于整个超声回波信号中的第 2 300 点、2 800 点以及 3 500 点左右。图 2 所示为不包含非声学噪声的仿真超声回波信号。

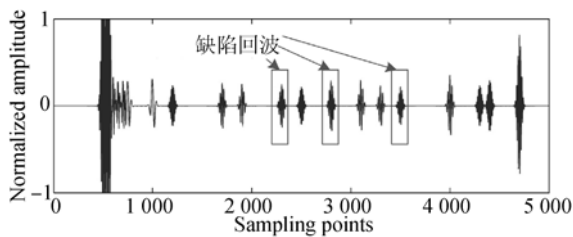


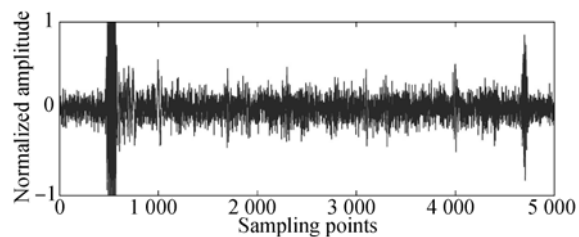
图 2 不含非声学噪声时的仿真超声回波信号

Fig. 2 Simulated ultrasonic echo signal without non-acoustic noise

在超声回波信号中构造基于混合模型的非声学噪声, 由于本文主要是对含小缺陷金属材料的超声背散射信号进行分析, 为从背散射信号中识别出小缺陷回波, 一般都会将增益调到比较大, 但这会使背散射信号中出现明显的非声学噪声。图 3(a) 为完整仿真超声脉冲回波信号, 图 3(b) 为该仿真超声回波信号频谱, 由图 3 可以看到, 该频谱主要成分的频率为 7.5 MHz 左右, 这些频率分量主要为表面回波信号和底面回波信号。此外, 缺陷回波信号的频率也在 7.5 MHz 左右, 只是通常在缺陷当量尺寸较小时, 缺陷回波信号幅值比表面回波信号和底面回波信号的小得多。将频谱中频率明显低于 7.5 MHz 的成分称为低频成分, 频率明显高于 7.5 MHz 的成分称为高频成分。除了中心频率为 7.5 MHz 左右的成分外, 在频谱中

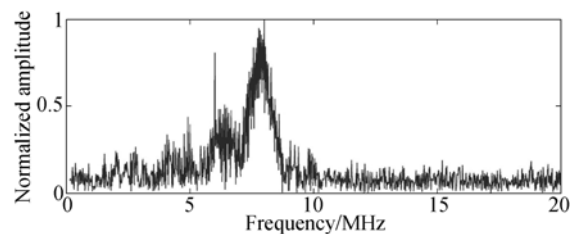
还存在一定量的低频及高频成分。低频成分主要为结构散射信号, 此外也包含一定量的低频非声学噪声; 而高频成分则主要为高频非声学噪声。

采集金属材料的实际超声脉冲反射信号进行对比。图 4(a) 为实验所用的水浸超声检测系统, 其主要由超声数据采集卡、运动控制卡、超声波探头以及工控机等组成。超声波探头采用 OLYMPUS 公司的 Harisonic Transducers 系列探头, 中心频率为 7.5 MHz。图 4(b) 所示为实验用的 20# 钢材料试块, 试块上钻有直径分别为 1.2 mm 和 2 mm 的小孔, 将两个区域分别标记为区域 A 和区域 B。采用水浸超声脉冲反射法采集区域 A 和区域 B 的超声实验信号, 设定实验信号采样频率为 100 MHz, 增益为 45 dB。图 5(a) 为从区域 A 采集的实验信号时域图, 图 5(b) 为该信号的频谱。



(a) 时域信号

(a) Time-domain signal



(b) 频谱

(b) Spectrum

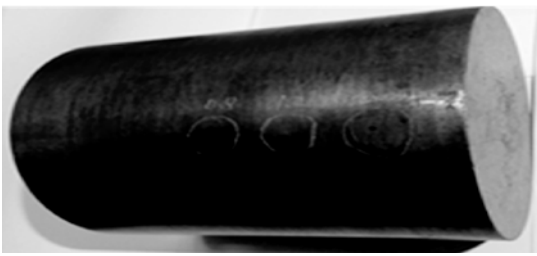
图 3 完整仿真超声信号及其频谱

Fig. 3 Completed simulated ultrasonic signal and its spectrum



(a) 超声检测系统

(a) Ultrasonic test system

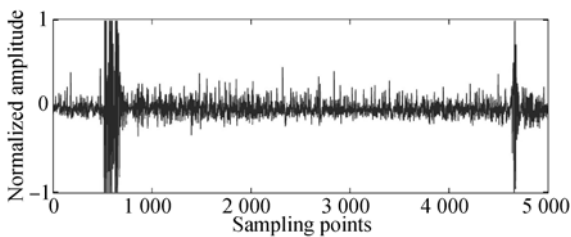


(b)金属试样

(b)Metal sample

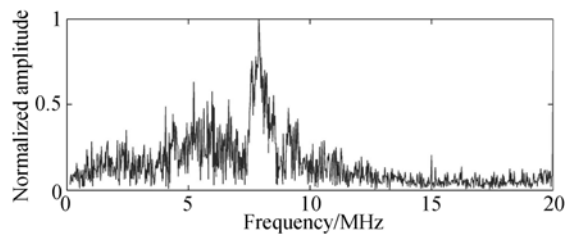
图4 超声检测系统及金属试样

Fig.4 Ultrasonic test system and metal sample



(a)时域信号

(a)Time-domain signal



(b)频谱

(b)Spectrum

图5 区域A实验信号及其频谱

Fig.5 Experimental signal of region A and its spectrum

从图5可以看出,由于实验时设置的信号增益较大,实验信号在时域上同样会出现明显的噪声。而频谱中除了主频为7.5 MHz左右的成分外,也出现了一定量的低频成分及少量高频成分。实验信号的这些特点与仿真信号相似,说明基于2.2节回波模型构建的超声回波信号可以有效表达出金属材料超声脉冲反射信号的特征。

3 基于相关系数法的金属材料微小缺陷识别方法

3.1 基于相关系数的超声回波位置识别方法

相关系数是数理统计中描述两个变量之间相

关关系密切程度的统计指标。对于两组离散信号 $X(i)=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 和 $Y(i)=[y_1, y_2, \dots, y_n]$, 其相关系数定义为:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (15)$$

其中: \bar{x} 为信号 $X(i)$ 的均值, \bar{y} 为信号 $Y(i)$ 的均值。

相关系数 ρ_{xy} 的值越大,表明信号 $X(i)$ 与 $Y(i)$ 的相似程度越高。

虽然超声背散射信号由缺陷回波信号、结构散射信号以及非声学噪声信号等混合而成,但缺陷回波信号是由探头发射的脉冲信号遇到缺陷反射所形成的,其与发射脉冲信号同样为高斯回波模型,因此缺陷回波信号与发射脉冲信号的相关系数值应大于发射脉冲信号与其它非相关信号的相关系数值,利用这个原理可以从背散射信号中识别出缺陷信号。缺陷信号识别过程如下:

(1)先基于小波原理对超声脉冲反射信号去噪,从而减少非声学噪声对缺陷回波信号识别的影响。采用基于熵理论的自适应小波去噪方法进行去噪。

熵是为了表征系统混乱程度而提出的。由于噪声的随机性和无序性,噪声的增加会使得信号的熵值增加。因此可以将每个尺度上的小波细节系数划分为若干段,求出每一段细节系数的熵,从而得到熵值最大的细节系数段,利用该段细节系数的特征值计算出对应尺度的细节系数阈值。具体阈值计算过程如下:

选定小波基及分解尺度,将待去噪信号进行小波分解得到各尺度上的小波细节系数。设 d_j 为尺度 j 下的小波细节系数, $d_{j,k}$ 为尺度 j 下的第 k 段的细节系数。求取该段细节系数的能量 $E(d_{j,k})$ 以及该尺度下细节系数的总能量 $E(d_j)$ 。令 $P_{j,k} = E(d_{j,k})/E(d_j)$, 则该段小波细节系数的熵 $W(k)$ 为:

$$W(k) = - \sum_k P_{j,k} \ln(P_{j,k}). \quad (16)$$

计算每个小波细节系数子带的熵,选择熵值最大的细节系数带用来计算该尺度下的阈值 λ 。

阈值计算方法如下:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln(N)}, \quad (17)$$

其中: N 为信号采样点数; σ 为噪声估算方差, 取 $\sigma = \text{median}(|d_{j,k}|)/0.6745$ 。 $\text{median}(|d_{j,k}|)$ 表示最大熵小波细节系数带取绝对值后的中值。

利用上述方法可以计算出每一尺度下的细节系数阈值, 从而可对信号进行自适应小波变换去噪。

(2) 取探头发射脉冲信号为参考信号(探头发射的脉冲信号可通过玻璃等镜面反射得到), 与测得的实际信号逐段求解相关系数, 求解时的信号长度和选取法如下所述: 设探头发射的信号为 X , 信号的长度为 n_x , 检测到的信号为 Y , 信号的长度为 n_y , 设定 n_c 为探头信号序列的中心位置。若 n_x 为奇数, 则 $n_c = (n_x + 1)/2$; 若 n_x 为偶数, 则 $n_c = n_x/2$ 。设第 i 个信号点处计算相关系数时用到的探头序列为 $D_{x,i}(j)$, 信号序列为 $D_{y,i}(j)$, 则可以求解信号长度。

若 $i \leq n_c$, $D_{x,i}(j)$ 和 $D_{y,i}(j)$ 选取为:

$$\begin{cases} D_{x,i}(j) = [x_{n_c-i+1}, x_{n_c-i+2}, \dots, x_{n_x}] \\ D_{y,i}(j) = [y_1, y_2, \dots, y_{n_c+i}] \end{cases} \quad (18)$$

若 $n_c < i \leq n_y - n_c$, 则有:

$$\begin{cases} D_{x,i}(j) = [x_1, x_2, \dots, x_{n_x}] \\ D_{y,i}(j) = [y_{i-n_c+1}, y_{i-n_c+2}, \dots, y_{i+n_c-1}] \end{cases} \quad (19)$$

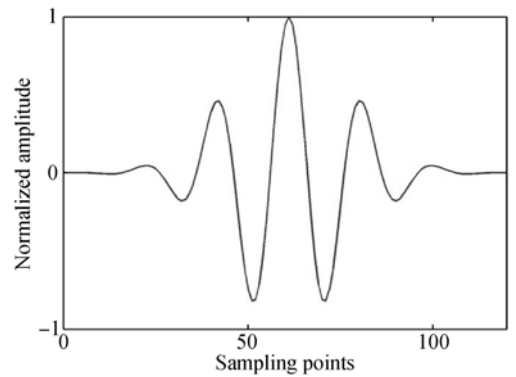
若 $i > n_y - n_c$, 则有:

$$\begin{cases} D_{x,i}(j) = [x_1, x_2, \dots, x_{n_c+n_y-i}] \\ D_{y,i}(j) = [y_{i-n_c+1}, y_{i-n_c+2}, \dots, y_{n_y}] \end{cases} \quad (20)$$

(3) 按上述处理方法计算信号每一个点处的相关系数 $\rho_i[D_{x,i}(j), D_{y,i}(j)]$, 从而得到信号相关系数序列 $P(i)$ 。再设定相关系数阈值 $\rho_{\text{threshold}}$, 将 $P(i)$ 中各点数值与 $\rho_{\text{threshold}}$ 进行比较, 如果 $|P(i)| < \rho_{\text{threshold}}$, 则有 $P(i) = 0$, 否则 $P(i)$ 即为计算得到的相关系数值。

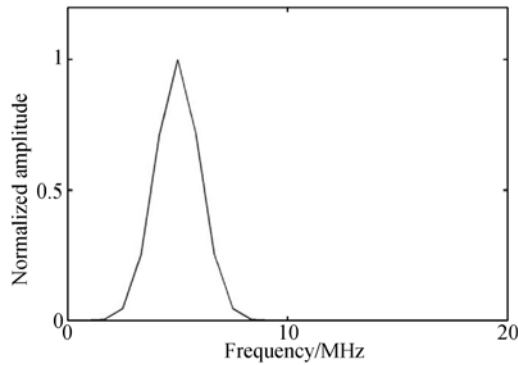
3.2 基于优化回波模型的超声仿真信号分析

计算图 3(a) 所示的仿真信号的相关系数, 探头发射脉冲信号如图 6(a) 所示, 其频谱如图 6(b) 所示, 中心频率为 7.5 MHz。



(a) 时域信号

(a) Time-domain signal



(b) 频谱

(b) Spectrum

图 6 探头发射脉冲信号及其频谱

Fig. 6 Transmission pulse signal of probe and its spectrum

图 7(a) 为去噪后的仿真信号, 可以看到, 和图 3(a) 中的信号相比, 经去噪的仿真信号中非声学噪声已经基本去除, 剩下的背散射信号主要由缺陷回波和结构散射回波组成。这说明基于熵理论的自适应小波去噪方法可以有效去除超声反射回波中的噪声。图 7(b) 为去噪后仿真信号的原始相关系数图。可以看到, 表面回波信号和底面回波信号处的相关系数最大, 幅值都接近于 1, 将这些信号的相关系数归为第一梯度。3 处构造缺陷处的信号的相关系数幅值也较大, 可以将缺陷回波信号对应的相关系数归为第二梯度。此外, 结构散射信号和剩下的非声学噪声的相关系数可以归为第三梯度。

由信号处理结果可知, 第一梯度相关系数的幅值为 0.97, 而 3 处缺陷代表的第二梯度相关系数为 0.74~0.80, 其余信号相关系数的最大值为 0.48。经计算可以得到, 第一梯度相关系数幅值比第二梯度相关系数的最小值大 31%, 而比第三

梯度相关系数的最大值大 102%。因此通过设定相关系数阈值,可以获取缺陷信号的相关系数位置。将相关系数阈值设定为第一梯度相关系数幅值的 60%,阈值设定界限如图 7(b)中的红色虚线所示(下面图中相关系数阈值的标示与此相同,彩图见期刊电子版)。图 7(c)所示为经阈值化处理后的仿真超声回波信号相关系数图。从图中可以看到,背散射信号相关系数只在采样点数为 2 300 点、2 800 点以及 3 500 点左右处不为零,而这 3 处位置恰好分别对应构造的 3 处缺陷回波信号位置。

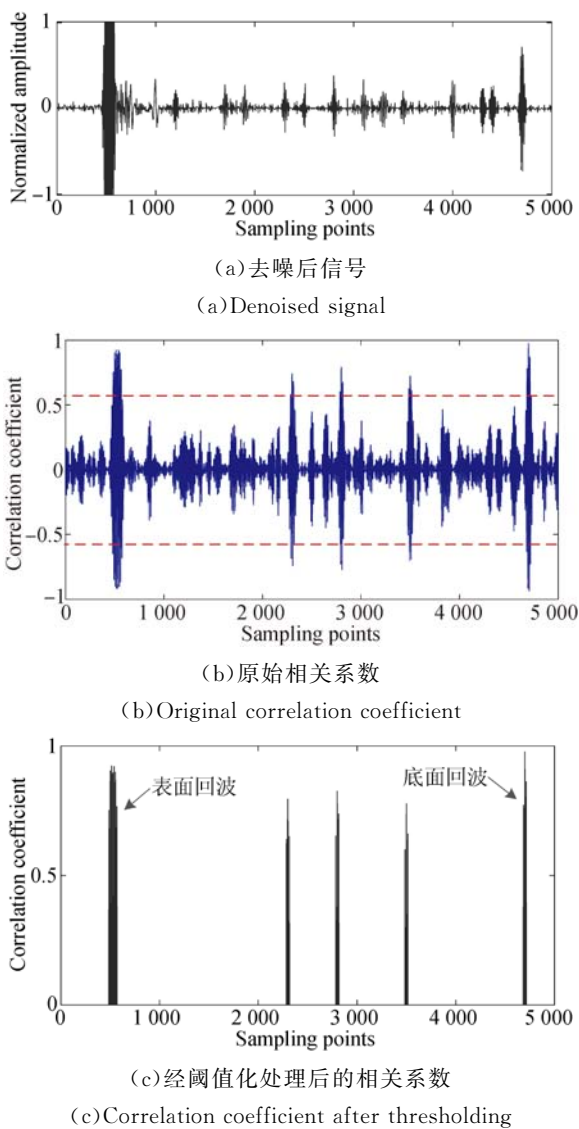


图 7 仿真超声信号处理图

Fig. 7 Processing images of simulated ultrasonic signal

3.3 实际信号分析

对图 5(a)所示的缺陷区域 A 的实验信号进

行相关系数分析。图 8 为区域 A 的实验信号处理图,其中图 8(a)为去噪后信号,通过与图 5(a)进行对比可以看到,此时噪声已经得到了有效去除。图 8(b)为原始相关系数图,从图 8(b)可以得到,第一梯度相关系数的幅值为 0.93,背散射信号相关系数最大值为 0.71,且只有这一处超过 0.6,其余相关系数序列的最大值为 0.48。这说明该处为缺陷位置。第一梯度相关系数幅值比第二梯度相关系数值大 31%,而比第三梯度相关系数最大值大 94%。阈值取第一梯度相关系数幅值的 60%,图 8(c)为经阈值处理后的相关系数图。从图 8(c)可以看到,在信号采样点数为 1 400 左右处有微小缺陷回波。

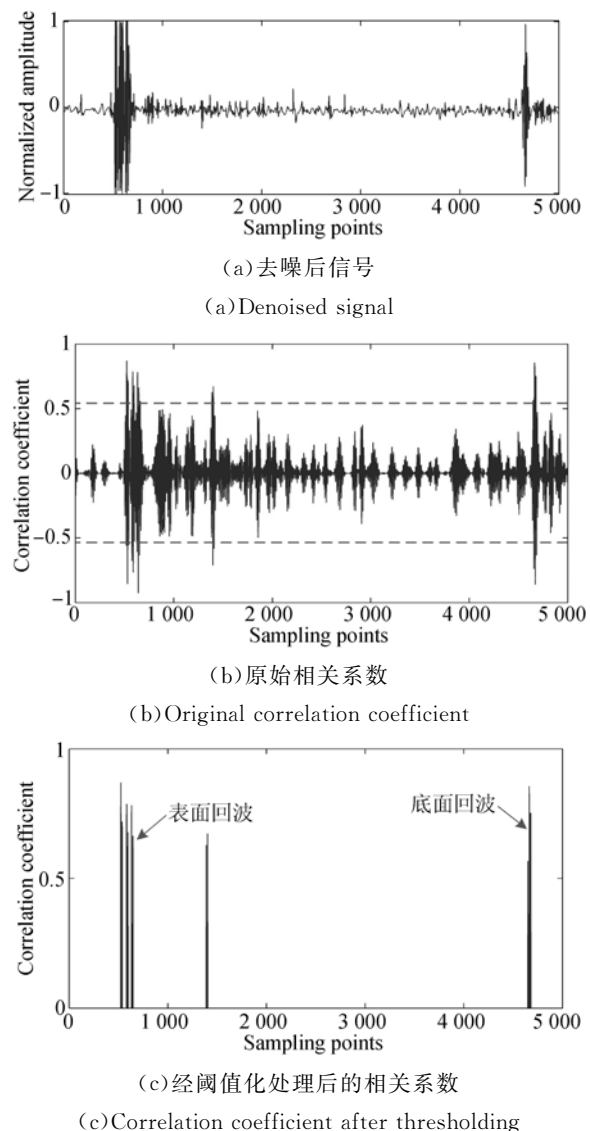
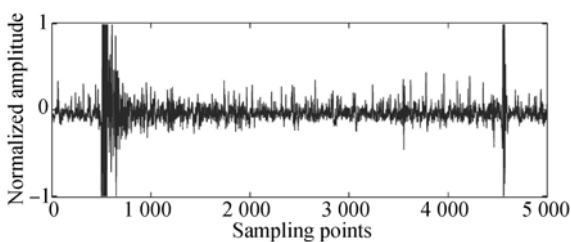


图 8 区域 A 实验信号处理图

Fig. 8 Experimental signal processing images of region A

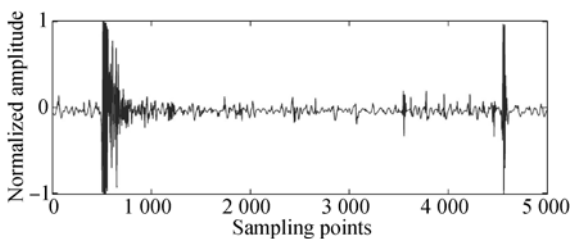
再对缺陷区域 B 实验信号进行计算分析,结果如图 9 所示。图 9(a)为区域 B 实验信号时域图,与图 5(a)中的缺陷区域 A 实验信号类似,缺陷区域 B 实验信号在时域上也存在大量噪声。图 9(b)为去噪后信号图,与图 9(a)中的原始信号相比,噪声已经少了很多。图 9(c)所示为原始相关系数图,从中可以得到,第一梯度相关系数幅值为 0.86,第二梯度相关系数数值为 0.70 且只有这一处,第三梯度相关系数最大值为 0.44。第一梯度相关系数幅值比第二梯度相关系数数值大 23%,而比第三梯度相关系数最大值大 95%。可以看到,这个差值和区域 A 实验信号的相关系数梯度差值相差不是很大。由于相关系数值只与超声探头发射信号与回波之间的相关关系密切程度有关,而和回波幅值大小并无直接关系,因此不同幅值的缺陷回波与探头发射信号之间的相关系数可能会比较接近。因此,区域 B 信号相关系数阈值也可以设置为第一梯度相关系数的 60%,图 9(d)为经阈值化处理后的相关系数图。从图 9(d)中可以看出,信号采样点数为 3 550 点左右时有缺陷回波出现。

通过上述对实际超声信号的分析可以看出,当将相关系数阈值设置为相关系数序列最大幅值的 60%时,可以有效地从超声背散射回波信号中识别出微小缺陷回波。



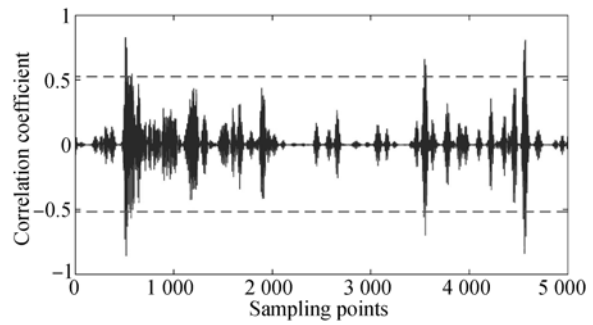
(a)原始信号

(a)Original signal



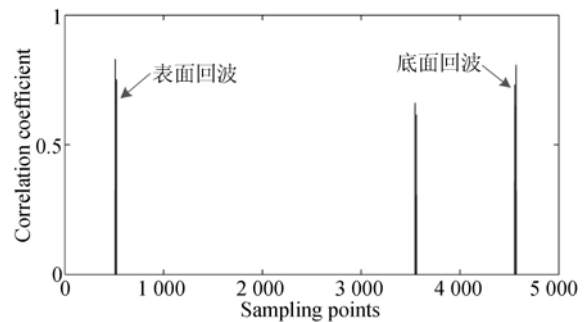
(b)去噪后信号

(b)Denoised signal



(c)原始相关系数

(c)Original correlation coefficient



(d)经阈值化处理后的相关系数

(d)Correlation coefficient after thresholding

图 9 区域 B 实验信号及其信号处理图

Fig. 9 Experimental signal of region B and its processed images

4 结 论

通过分析金属材料超声脉冲反射检测信号的组成成分可知,检测信号由始波、底波以及包含了缺陷回波信号、结构散射信号和非声学噪声信号的背散射信号组成。对上述组成信号分别建模可得到基于高斯回波理论的始波和底波、基于高斯回波理论与散射声场的缺陷回波信号和结构散射信号,以及以高斯白噪声为主的非声学噪声。将上述信号成分进行组合,可得到金属材料脉冲反射超声回波模型。将该超声回波模型生成的超声反射信号及频谱与实验获得的金属材料超声反射信号及频谱进行对比,结果显示,两者的特点具有一致性。

本文还提出了基于相关系数分析的超声缺陷回波位置识别方法,并运用上述相关系数法对金属材料仿真信号以及含不同大小缺陷的实验信号进行了分析。结果表明:始波底波的相关系数幅值比微小缺陷回波的大 30%左右,比其他背散射

信号相关系数幅值则大90%以上,缺陷回波相关系数比其他背散射信号要大得多。当将相关系数

阈值设定为序列中最大值的60%时,能够从超声反射信号中正确识别出金属材料微小缺陷回波。

参考文献:

- [1] 王少军,俞厚德,钱耀洲,等. 基于超声散射法的微小缺陷及近表面缺陷的检测[J]. 无损检测, 2014, 36(1):49-53.
WANG SH J, YU H D, QIAN Y ZH, *et al.*. The detection of tinny defect and near surface defect based on ultrasound scattering technique [J]. *Nondestructive Testing*, 2014, 36(1):49-53. (in Chinese)
- [2] 史亦伟,梁菁. 超声检测材料中微小缺陷的当量关系研究[C]. 中国机械工程学会无损检测分会第七届年会, 汕头, 1999:243-246.
SHI Y W, LIANG J. Research on the relationship between echo amplitude and the size of small defects by ultrasonic inspection [C]. *The Seven Conference of CHSNDT and International Symposium on NDT*, Shantou, 1999:243-246. (in Chinese)
- [3] 柯常波,陈铁群. 粗晶材料超声无损检测信号处理技术发展趋势[J]. 物理测试, 2006, 24(5):37-41.
KE CH B, CHEN T Q. New trends of signal processing of ultrasonic inspection in coarse grain materials [J]. *Physics Examination and Testing*, 2006, 24(5):37-41. (in Chinese)
- [4] DEMIRLI R. *Model based estimation of ultrasonic echoes; analysis, algorithms, and applications* [D]. Chicago: Illinois Institute of Technology, 2001.
- [5] 汪艳,张小凤,张光斌,等. 基于高斯模型的多重超声回波信号重数估计[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2015, 43(1):30-35.
WANG Y, ZHANG X F, ZHANG G B, *et al.*. Estimating the number of multiple echo signals based on the Gaussian ultrasonic echo model [J]. *Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2015, 43(1):30-35. (in Chinese)
- [6] 刘镇清. 粗晶材料超声检测信号模型及其通过窄带滤波器分析[J]. 电子学报, 2002, 30(4):598-600.
LIU ZH Q. An ultrasonic testing model for large grained materials and its output properties of narrowband filter [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(4):598-600. (in Chinese)
- [7] ROSE J L. *Ultrasonic Waves in Solid Media* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [8] PRAVEEN A, VIJAYAREKHA K, ABRAHAM S T. Signal quality enhancement using higher order wavelets for ultrasonic TOFD signals from austenitic stainless steel welds [J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(7):1288-1292.
- [9] WEI Y Q, TANG R, HOU L, *et al.*. Study on noise reduction using a wavelet packet for ultrasonic flaw detection signal of a small diameter steel pipe with a thick wall [J]. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 2014, 19(3):198-202.
- [10] 罗玉昆,罗诗途,罗飞路,等. 激光超声信号去噪的经验模态分解实现及改进[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2):479-487.
LUO Y K, LUO SH T, LUO F L, *et al.*. Realization and improvement of laser ultrasonic signal denoising based on empirical mode decomposition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):479-487. (in Chinese)
- [11] LI M H. A rapid approach to speckle noise reduction in ultrasonic non-destructive evaluation using matched filters [C]. 2014 *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, Chicago, USA, 2014, 45-48.
- [12] 崔园园,王伯雄,柳建楠,等. 数字超声波信号中有色噪声的自适应滤波[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12):3377-3383.
CUI Y Y, WANG B X, LIU J N, *et al.*. Adaptive filtering for colored noise in digital ultrasonic signals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12):3377-3383. (in Chinese)
- [13] 刘继忠,周晓军,蒋志峰. 数据融合技术在棒材缺陷超声识别中的应用[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1):160-162.
LIU J ZH, ZHOU X J, JIANG ZH F. Application of data fusion based flaw recognition in cylinder ingots [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(1):160-162. (in Chinese)
- [14] 唐国维,巩森,张方舟,等. 基于模糊神经网络的焊缝缺陷识别的研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(5):243-247.
TANG G W, GONG M, ZHANG F ZH, *et al.*. Research on weld defects distinguishing based on fuzzy neural networks [J]. *Computer Technology and Development*, 2014, 24(5):243-247. (in Chinese)
- [15] DONOHUE D K. Maximum likelihood estimation

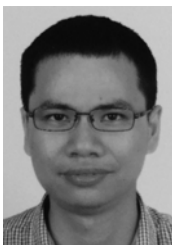
of A-Scan amplitudes for coherent targets in media of unresolvable scatterers [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, 39(3):422-431.

[16] SANIIE J, WANG T. Statistical evaluation of backscattered ultrasonic grain signals [J]. *Journal of The Acoustical Society of America*, 1988, 84(1):400-408.

作者简介:



杨辰龙(1974—),男,山西运城人,博士,副教授,1999年、2002年于太原科技大学分别获得学士、硕士学位,2005年于浙江大学获得博士学位,主要从事复合材料超声检测及成像方面的研究。E-mail: yclzju@163.com



陈越超(1988—),男,浙江绍兴人,博士研究生,2011年于浙江大学获得学士学位,主要从事超声无损检测及其自动化方面的研究。E-mail: cyczju07@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)