

文章编号 1004-924X(2019)04-0932-12

基于超声背散射信号递归分析的 金属材料微缺陷识别

杨辰龙^{1*}, 冯 玮¹, 边成亮¹, 周晓军¹, 柴景云²

(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. 重庆西南计算机有限责任公司, 重庆 400060)

摘要:为了能有效识别金属材料超声检测信号中的微小缺陷回波,使用递归分析方法对检测信号进行分析。通过对超声波背散射信号进行建模,说明其组成要素。在超声检测信号中,缺陷回波信号会对系统的递归特性产生影响。使用递归分析对含 0.8 mm 平底孔人工模拟缺陷的直径为 120 mm 低碳钢棒材试块实验采集的背散射信号和无缺陷背散射信号进行了研究。截取试块检测信号中的背散射信号部分,通过合理的参数选择对其进行递归分析并绘制递归图。通过与实验采集的无缺陷信号的递归图进行对比,发现缺陷信号会在递归图中产生明显的白色交叉条纹带。使用递归定量分析进一步研究了含缺陷背散射信号的递归特征量,结果表明捕获时间(TT)、确定率(DET)与递归熵(ENTR)这三项特征量对缺陷信号比较敏感,在缺陷位置处均会出现明显的峰值。

关键词:金属材料;背散射信号;递归分析;递归图;递归定量分析

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192704.0932

Micro defects detection in metallic materials based on recurrence analysis of ultrasonic backscattering signal

YANG Chen-long^{1*}, FENG Wei¹, BIAN Cheng-liang¹, ZHOU Xiao-jun¹, CHAI Jing-yun²

(1. State Key Lab of Fluid Power and Mechatronic Systems,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Chongqing Southwest Computer Limited Company, Chongqing 400060, China)

* Corresponding author, E-mail: yclzju@163.com

Abstract: To recognize minor defect echoes from metallic material ultrasonic testing signals, the recurrence analysis method was used to analyze ultrasonic detecting signals. By modeling the backscattering signal, we describe its components. In the ultrasonic detection signal, the defect echo signal will affect the recurrence characteristics of the system. In this study, we employ the recurrence analysis method to study the backscattering defect and defect-free signals of a low carbon steel testing specimen with a diameter of 120 mm. This specimen was artificially simulated with a 0.8-mm flat bottom hole. Through reasonable parameter selection, we performed recurrence analyses of the

收稿日期: 2018-10-08; **修订日期:** 2018-11-16.

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(No. LY18E050002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2018QNA4001)

backscattering signals intercepted from the detection signals and produced recurrence plots. A comparison with the recurrence plot of non-defective signals showed that the defect signal will produce an obvious white cross stripe in its recurrence plot. We further studied the recurrence characteristic quantities of the backscattering signals with defects by conducting a recurrence quantification analysis. The results show that the three characteristic quantities, including trapping time, determinism, and entropy, are more sensitive to the defect signals, and all exhibit obvious peaks at the defect location.

Key words: metallic material; backscattered signal; recurrence analysis; recurrence plot; recurrence quantification analysis

1 引言

在金属材料缺陷的超声检测中,国内外学者做了大量的研究,目前对于缺陷信号定性和定量识别,应用范围较广的是基于短时傅立叶变换、Wigner-Ville 分布、小波变换、经验模态分解以及相关系数等技术的时频图分析方法^[1-5]。

在金属材料的超声波检测中,由于粗晶粒、颗粒等散射体的存在,超声波散射信号非常复杂。超声波在散射及传递过程中的能量衰减呈现出非线性特征。假设我们将超声波在金属材料中传播并最终形成背散射信号这一过程视为一个系统,则该系统具有明显的不确定性和非线性特征。

递归分析是一种针对非线性系统的研究方法。递归分析可以分析信号的内部信息,对时间序列的内在平稳性和相似性进行评估。

本文通过对递归分析的研究,使用存在人工缺陷的棒材对递归分析在金属材料超声检测中的应用进行验证,为金属材料缺陷信号的识别提供了一种新的思路。

2 背散射信号建模

含缺陷金属材料背散射信号主要由缺陷回波、散射信号及非声学噪声组成。

2.1 缺陷回波模型

超声检测缺陷回波 $s(\theta, t)$ 通常可以用非对称高斯线调频模型^[6]表示:

$$\begin{aligned} s(\theta, t) &= a(t-\tau) \cos[\varphi(t-\tau)], \\ a(t) &= e^{-\frac{1}{2}[\tan(n\theta)]^2 t^2}, \\ \varphi(t) &= 2\pi f_c t + \phi t^2 + \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $\theta = [\alpha, r, m, \tau, f_c, \psi, \varphi]$ 为参数向量, α 为带宽因子(MHz^2), r 为不对称因子($-1 < r < 1$), m 为双曲正切函数阶次(MHz), τ 为回波到达时间(μs), f_c 为中心频率(MHz), ψ 为线调频因子($\text{rad}/(\mu\text{s})^2$), φ 为初相位(rad)。非对称高斯线调频模型为描述具有非对称包络的超声回波提供了便利。

2.2 散射信号模型

金属材料中由于粗晶粒、颗粒等散射体的存在,散射信号非常复杂。为简化散射信号的计算,认为散射体为刚性球体,不发生多次散射;且各散射体的散射相互独立。由此,总的散射响应可以由单个散射体的散射响应叠加得到。

如图1所示,某散射体(介质2)半径为 R , 基体(介质1)中的纵波波速和横波波速分别为 c_{1L} , c_{1S} , 则纵波波数 k_1 和横波波数 κ_1 分别为:

$$k_1 = 2\pi f / c_{1L}, \kappa_1 = 2\pi f / c_{1S}. \quad (2)$$

进一步引入如下假设:(1)散射体尺寸极其微小,满足 $k_1 R \ll 1, \kappa_1 R \ll 1$; (2)只考虑散射产生的 π 方向的纵波。

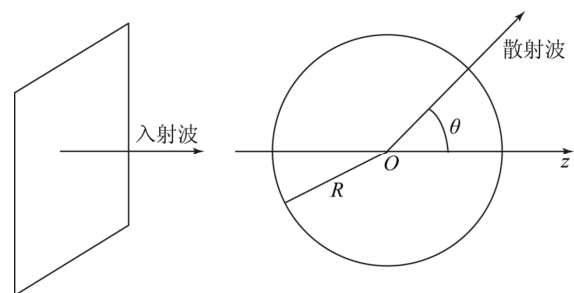


图1 散射模型

Fig. 1 Scattering model

单位声压的入射波 $e^{ik_1 z} = e^{ik_1 r \cos \theta}$, 经散射体向外传播的纵波散射场为:

$$\psi_s = \sum_{m=0}^{\infty} A_m h_m^{(2)}(k_1 r) P_m(\cos \theta), \quad (3)$$

其中: r 为距离, $h_m^{(2)}(z)$ 为第 2 类 Hankel 函数, $P_m(z)$ 为 m 阶勒让德多项式。由式(3)有 $\theta = \pi$, 即 $P_m(\cos \theta) = (-1)^m$ 。

文献[7]给出了系数 A_m 的表达式, 实际只需取第 1 项 A_0 即可较好地对散射信号建模:

$$A_0 = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{k_1} (k_1 R)^3. \quad (4)$$

由于 ψ_s 是频率的函数, 因此材料的散射频率响应函数 $U(f)$ 可以写为:

$$U(f) = \sum_{k=1}^{K_s} \|\psi_s\| \varphi(f), \varphi(f) = e^{i2\pi f \frac{2r}{c}}, \quad (5)$$

其中 K_s 是散射体的个数。

2.3 非声学噪声模型

非声学噪声由测量仪器和环境引起, 可以简化为方差为 D_n 的高斯白噪声。

2.4 背散射信号模型

设探头频谱为 $H_1(f)$, 散射信号、非声学噪声分别为 $u(t)$ 、 $n(t)$, 则近似地有:

$$u(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H_1^2(f) U(f) e^{i2\pi ft} df. \quad (6)$$

将 $u(t)$ 按式(7)进行(最大值)归一化处理:

$$z = z / \max(|z|), \quad (7)$$

其中 z 不为零矩阵。

为描述简洁, 后文在未特别说明的情况下, “归一化”均按式(7)进行。

综上, 金属材料的超声背散射信号 $x(t)$ 可以近似描述为:

$$x(t) = n(t) + A_u u(t) + s(t), s(t) = A_s s(\theta, t), \quad (8)$$

其中: $s(t)$ 为缺陷回波信号, A_u, A_s 为幅值系数。

2.5 数值仿真与实验

金属材料背散射信号产生原理以及基于脉冲反射法的超声 A 扫示意图分别如图 2、图 3 所示。仿真中采用的探头中心频率为 7.5 MHz, 其归一化发射脉冲波形 $h_1(t)$ 及归一化频谱 $H_1(f)$ 如图 4 所示, 采样频率为 $f_s = 100$ MHz。

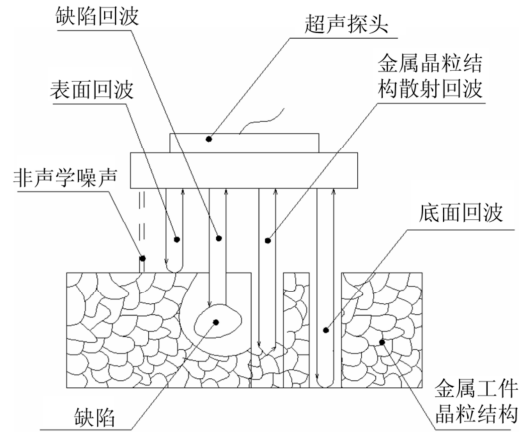


图 2 金属材料背散射信号产生原理图

Fig. 2 Schematic diagram of backscattering signal generation of metallic material

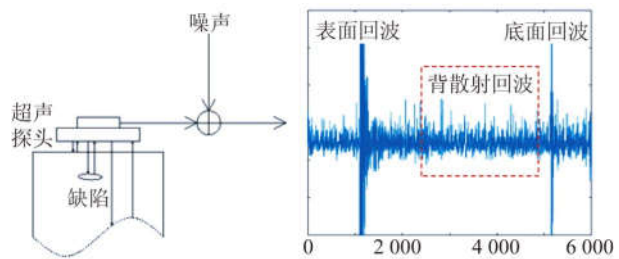


图 3 基于脉冲反射法的超声 A 扫示意图

Fig. 3 Schematic diagram of A-scan signal based on pulse-echo method

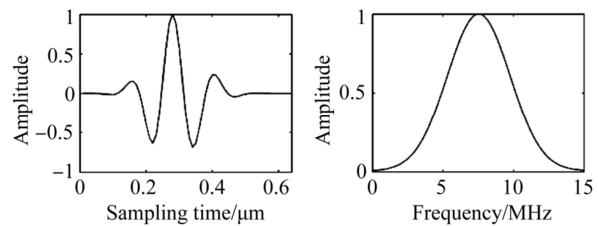


图 4 探头发射的脉冲信号及其频谱

Fig. 4 Transmission pulse signal of a probe and its spectrum

散射信号的仿真参数如表 1 所示; 其中 $[d_1, d_2]$ 为散射体的分布区间, 假设散射体服从该区间内的均匀分布。考虑到边界 $r = d_1$ 处散射体分布发生突变(从无到有)引起散射信号跃升, 且一般散射信号幅值波动较小, 因此截取相对稳定的信号中间段并进行归一化处理, 作为散射信号 $u(t)$ 。这里截取长度取为 1 000 个数据点。

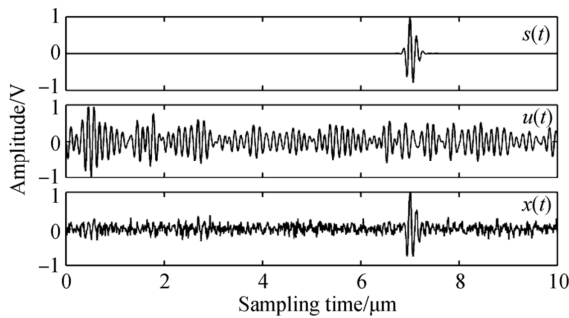
表 1 散射信号仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of scattering signal

$c_{L}/(m \cdot s^{-1})$	$c_{S}/(m \cdot s^{-1})$	$R/\mu m$	d_1/cm	d_2/cm	K_s
4 000	2 500	10.0	1.0	4.0	5 000

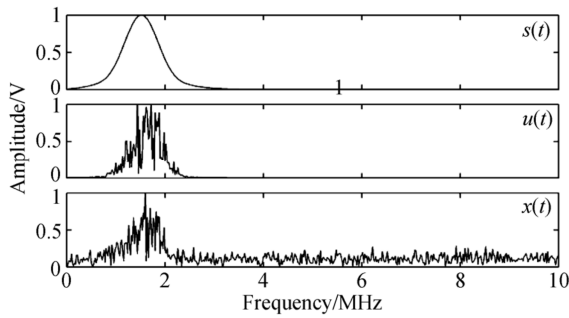
缺陷回波 $s(t)$ 与探头中心频率接近,这里取 $\theta=[80,0.5,16,7.0,7.5,0,0]$,得到 $s(\theta, t)$ 。再取 $D_n=0.09, A_u=0.2, A_s=1$,计算 $x(t)$ 并归一化。

$s(t), u(t), x(t)$ 的波形和归一化频谱分别如图 5(a)和图 5(b)所示。



(a)时域信号

(a)Time-domain signal



(b)频谱

(b)Spectrum

图 5 仿真超声信号及其频谱

Fig.5 Simulated ultrasonic signals and their spectrums

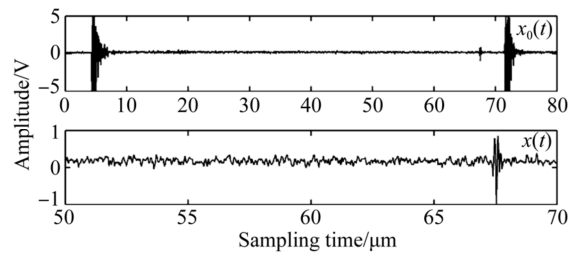
采集金属材料的实际超声脉冲反射信号进行对比,实验中使用的超声探头中心频率为 7.5 MHz,采样频率设定为 100 MHz。图 6 为实验所用的金属材料试件,图 7 为采集的实验信号及其频谱。由图 7 可见,背散射信号中产生了由非声学噪声组成的高频成分;此外还有大量的接近或低于探头中心频率的频率成分,主要由散射噪声和缺陷回波引起。比较图 5 和图 7 可见,仿

真信号和实测信号的频谱具有一定的一致性,说明文中的背散射信号模型在描述真实背散射信号方面是有效的。



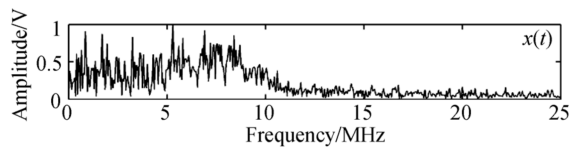
图 6 实验试件

Fig.6 Testing specimen



(a)时域信号

(a)Time-domain signal



(b)频谱

(b)Spectrum

图 7 实验信号及其频谱

Fig.7 Experimental signal and its spectrum

3 递归分析

递归状态是指系统的某种状态在特定的时间具有相似的特性。在自然界中就有许多这样的现象,例如潮汐现象、地质变化。人们在研究非线性系统时,常常会研究其递归特性。由上文可知,在金属材料超声检测的背散射信号中主要由散射信号、非声学噪声与缺陷回波型号组成,前两者在时间序列上具有一定的相似性,而缺陷回波信号会破坏这一特性,从非线性动力系统的角度来说,系统的递归特性呈下降趋势。超声波在材料中的传

播可以看作一个动力系统,这个系统建立在声波传播特性的基础上,并且可以用波动方程来建模^[8],即粒子位置对时间的导数和粒子位置对空间的导数。这个系统中有许许多多可以描述它的变量,所有的这些变量支撑起了系统的相空间和状态空间。从理论上讲,递归分析技术是可以运用到金属材料缺陷信号的识别中。

3.1 相空间重构理论

状态空间重构是指通过已知的一维时间序列,在低维空间重构原来的高维非线性动力系统,并使得重构的系统与原来的系统在拓扑意义上等价。如果把一个时间序列看作一个确定的非线性动力系统,即可由该时间序列反推得到原先复杂的非线性动力系统。

3.1.1 相空间重构和时间延迟理论

由于在实际测量中,不可能采样到系统的全部信息,得到的时间序列只能描述系统的部分信息。Takens^[9]等人指出,在分析一维的时间序列时,在满足特定条件的情况下,丢失的系统信息可以通过对已知的有效信号进行时间延迟的方法来恢复,也就是时间延迟嵌入理论。

假设 $\{x(t_j), j=1, 2, \dots, n\}$ 是对一个动力系统测得的一维时间序列,那么给定延迟时间 τ 和嵌入维数 m ,即可构建 m 维向量 $\mathbf{x}(t_j) = (x(t_j), x(t_{j+\tau}), \dots, x(t_{j+(m-1)\tau}))$, 而原一维时间序列 $\{x(t_j), j=1, 2, \dots, n\}$ 可以延拓成 $m \times [n - (m-1)\tau]$ 维矩阵空间:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(t_1) \\ \vdots \\ \mathbf{x}(t_j) \\ \vdots \\ \mathbf{x}(t_{n-(m-1)\tau}) \end{bmatrix}^T \Rightarrow \begin{bmatrix} x(t_1) & \cdots & x(t_j) & \cdots & x(t_{n-(m-1)\tau}) \\ x(t_{1+\tau}) & \cdots & x(t_{j+\tau}) & \cdots & x(t_{n-(m-2)\tau}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(t_{1+(m-1)\tau}) & \cdots & x(t_{j+(m-1)\tau}) & \cdots & x(t_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

矩阵的每一列构成重构相空间中的一个相点, m 维相空间由所有的 $N = n - (m-1)\tau$ 个相点组成。相点在时间维度上按照先后顺序的连线构成了系统在 m 维相空间的演化轨迹,从而使得原时间序列获得动力学的含义。

重构的相空间能否有效表征原动力系统取决

于时间延迟 τ 和嵌入维数 m 的选取是否恰当。相空间重构作为递归分析的基础,其有效性决定了分析结果是否是原系统的有效反映。因此合理地选取 m 和 τ 具有十分重要的意义^[10-11]。

3.1.2 最佳嵌入维数 m 的选取

从理论上讲, Takens 的研究证明在存在噪声的情况下,嵌入维数 m 大于原始动力系统吸引子维数的 2 倍,是相空间重构需要满足的条件^[12]。但是在实际应用过程中,过大的嵌入维数会导致计算复杂化和计算量的激增^[13]。因此最佳嵌入维数应该是使对应的某些几何不变量如 Lyapunov 指数^[14-15] 和关联维数^[16] 不随 m 增大而变化的最小值。目前,主要的选取方法有虚假邻点法和预测误差最小法。本文采用的是虚假邻点法。

在虚假邻点法中,假设将一时间序列重构获得 m 维相空间,记相点 X_n 的最近邻点为 $X_{\eta(n)}$, 相点之间的距离表示为:

$$\|X_{\eta(n)} - X_n\|_2^{(m)} \quad (10)$$

当相空间维数增加到 $m+1$ 后,相点之间的距离表示如式(11)或式(12):

$$\|X_{\eta(n)} - X_n\|_2^{(m+1)} = \sqrt{(\|X_{\eta(n)} - X_n\|_2^{(m)})^2 + \|X_{\eta(n)+m\tau} - X_{n+m\tau}\|^2} \quad (11)$$

$$\|X_{\eta(n)} - X_n\|_\infty^{(m+1)} = \max(\|X_{\eta(n)} - X_n\|_\infty^{(m)}, \|X_{\eta(n)+m\tau} - X_{n+m\tau}\|) \quad (12)$$

若存在邻点 $X_{\eta(n)}$ 满足式(13)或式(14):

$$\sqrt{(\|X_{\eta(n)} - X_n\|_2^{(m+1)})^2 - (\|X_{\eta(n)} - X_n\|_2^{(m)})^2} / \|X_{\eta(n)} - X_n\|_2^{(m)} = \|X_{\eta(n)+m\tau} - X_{n+m\tau}\| / \|X_{\eta(n)} - X_n\|_2^{(m)} > R_T, \quad (13)$$

$$\frac{\|X_{\eta(n)} - X_n\|_\infty^{(m+1)} - \|X_{\eta(n)} - X_n\|_\infty^{(m)}}{\|X_{\eta(n)} - X_n\|_\infty^{(m)}} > R_T, \quad (14)$$

则称 $X_{\eta(n)}$ 为虚假邻点。一般情况阈值 R_T 取 10~50 之间。

理论上来说,当虚假邻点数目减小到 0 时,可以认为此时的嵌入维数能够将集合结构完全打开,满足这一条件的最小 m 即为所寻找的最小嵌套维数。

在实际应用中,通过不断增加嵌入维数 m 的值,并计算每个嵌入维数所对应的虚假邻点个数,直到其所占的比例小于 5% (并非至 0) 或者数目保

持不变,此时的 m 值即为满足条件的最小嵌入维数。

3.1.3 最佳延迟时间 τ 的选取

时间延迟 τ 的选取决定了重构获得的相空间能否正确有效的表征原动力系统,取值过小会造成各相点之间过度相关,有效信息过少。取值过大则会造成相点过度分散,同样无法揭示系统的实际特性。

本文采用平均互信息法来选取延迟时间 τ 。

定义平均互信息为:

$$I(\tau) = \sum_{n=1}^N P(x_n, x_{n+\tau}) \lg \left[\frac{P(x_n, x_{n+\tau})}{P(x_n)P(x_{n+\tau})} \right]. \quad (15)$$

平均互信息 $I(\tau)$ 提供了一种非线性系统从冗余到不相关转换的衡量工具。 $I(\tau)$ 的第一个局部最小值对应的 τ 即为最佳时间延迟 τ , 此时对应的冗余最小、独立性最大。

3.2 递归图与递归定量分析技术

3.2.1 递归图的定义

20 世纪 80 年代 Eckmann^[17] 等人提出了递归图,为研究系统的递归特效提供了有效的途径。

递归图是对时间序列的相空间轨迹递归性的二维图示。根据前文,对一维时间序列 $\{x(t_j), j=1, 2, \dots, n\}$ 进行相空间重构,可得 $m \times [n - (m-1)\tau]$ 维矩阵空间 \mathbf{R}^m 。系统的递归图的表示方法如式:

$$R_{i,j} = \Theta(\epsilon - \|x_i - x_j\|), \quad (16)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n - (m-1)\tau,$$

其中:状态向量 $x_i \in \mathbf{R}^m, x_j \in \mathbf{R}^m, m$ 为嵌入维数, τ 为延迟时间,阈值 ϵ 表示预先设定的临界距离,“ $\|\cdot\|$ ”表示两向量之间的距离。通常应用的距离为欧氏距离和切比雪夫距离。近年来,角度距离也开始得以应用。定义不同的距离可以得到不同的距离矩阵。算子 $\Theta(\cdot)$ 为 Heaviside 函数,即:

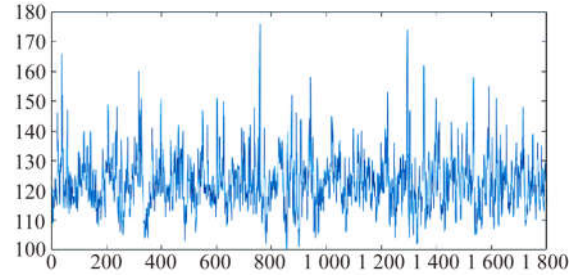
$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}. \quad (17)$$

递归图矩阵是一个二值矩阵,其可以用黑白二值法显示。在递归图中,白色点表示值 0,黑色点表示值 1。若 $i=j$,则 $R_{i,j}=1$,递归图中出现黑色的像素;若两个状态不相似,则递归图上出现黑色的长对角线,即为主对角线。

3.2.2 递归图特性

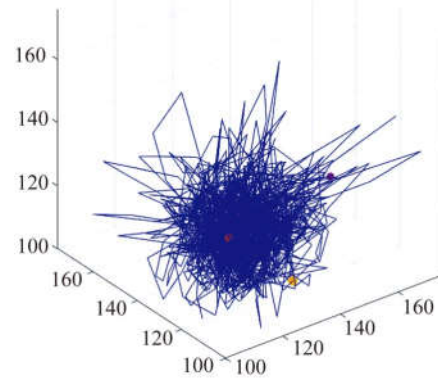
递归图为非线性动力系统的研究提供了可视

化、直观化的分析手段。递归图的结构特征和图形变化规律由其所表征的系统或者信号的特性决定。典型的递归图分析如图 8 所示,通过对递归图的观察分析,可以获得原动力系统的信息。



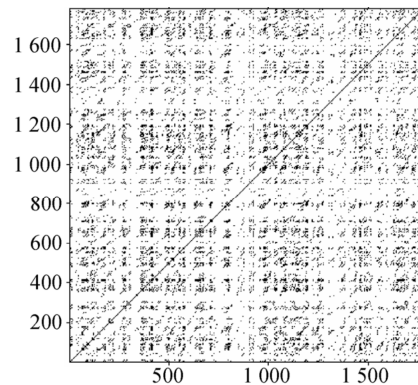
(a) 时域信号

(a) Time-domain signal



(b) 相空间轨迹

(b) Phase space locus



(c) 递归图

(c) Recurrence plot

图 8 采样信号递归图分析

Fig. 8 Sampling signal recurrence plot analysis

递归图的特性包括宏观特性和微观特性。从宏观角度看,递归图可以分为 4 种模式:均匀模式 (Homogeneous), 周期模式 (Periodic), 漂移模式 (Drift) 以及突变模式 (Disrupted), 如图 9 所示。

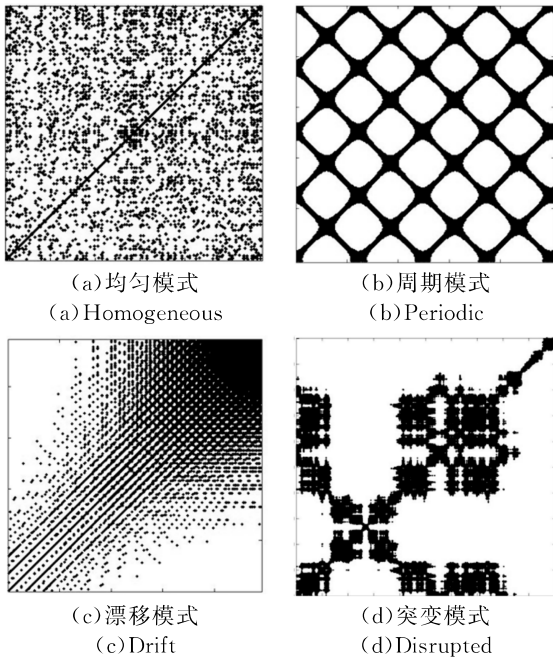


图 9 递归图宏观特性

Fig. 9 Macro characteristics of recurrence plot

本文所利用的递归图特性就是其突变模式。在突变模式中,递归图会出现大面积的白色区域或白色带状条纹如图 10 所示。

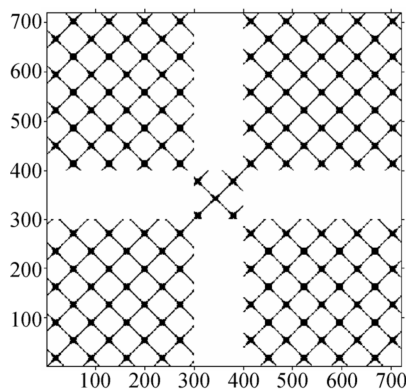


图 10 突变模式

Fig. 10 Disrupted mode of recurrence plot

若递归图呈现出突变模式,说明该区域的相点与其他区域相点距离较大,信号相似性成分较少,可能发生突变。

在超声检测信号中,缺陷信号就具有与其它信号成分相似度低的特点,可以尝试通过对信号的递归图分析来判别缺陷位置。

递归图的微观特性主要是其中点和线的特征。若递归图中出现了垂直或水平的线段,则说明这些相点之间的距离小,该时间段内信号的变化小,相似度高。

3.2.3 递归定量分析

相较于递归图对系统整体特征进行定性分析,递归定量分析能够提取递归图中的微观信息,通过数值计算对系统的特征进行定量描述。常用的递归定量分析的特征量有以下几个:

(1)递归率(RR)是指递归图中递归点与递归图中总点数的比值,其计算公式如式(18):

$$RR = \frac{1}{N^2 - N} \sum_{i \neq j=1}^N R_{i,j}. \quad (18)$$

(2)确定率(DET),定义为平行于对角线线段的递归点数与总递归点数量的比,其计算公式为:

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l P_D(l)}{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}}, \quad (19)$$

式中: l_{\min} 为递归图中对角线长度的最小阈值; $P_D(l)$ 为递归图中以对角线长度为依据的分布概率。

(3)递归熵(ENTR),定义为以对角线的长度分布概率为基础计算得到的香农熵。其计算公式为:

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^N P_D(l) \ln P_D(l). \quad (20)$$

(4)平均对角线长度(L),递归图中对角线方向线段的平均长度:

$$L = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l P_D(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P_D(l)}. \quad (21)$$

(5)层状度(LAM),指构成竖直或水平线段结构的递归点的百分比,其计算公式为:

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P_v(v)}{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}}, \quad (22)$$

其中: v_{\min} 为最小分析长度,一般取 2, $P_v(v)$ 为长度为 v 的竖直线段分布概率。

(6)捕获时间(Trapping Time, TT),指递归图中垂直结构长度的均值。其计算公式为:

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P_v(v)}{\sum_{v=v_{\min}}^N P_v(v)}. \quad (23)$$

这些特征量从不同方面描述了系统或是信号的内部特征,可以作为识别缺陷信号的依据。

4 典型超声检测背散射信号递归分析方法验证实验

4.1 人工模拟缺陷背散射信号的获取

前文阐述了将递归分析技术应用于金属材料超声检测缺陷信号识别的理论依据。本节中将通过人工模拟缺陷试块的超声检测背散射信号的递归分析处理,来验证使用递归分析识别缺陷信号的可行性。

实验采用直径为 120 mm 的低碳钢棒材作为实验对象。棒材中人工模拟平底孔缺陷,直径为 0.8 mm,埋深为 90 mm,对该试块进行超声检测,在不同部位分别获得含缺陷和无缺陷超声检测信号,实验试块如图 11 所示,平底孔缺陷的位置示意图如图 12 所示。



图 11 人工缺陷棒材试块
Fig. 11 Artificial defect testing specimen

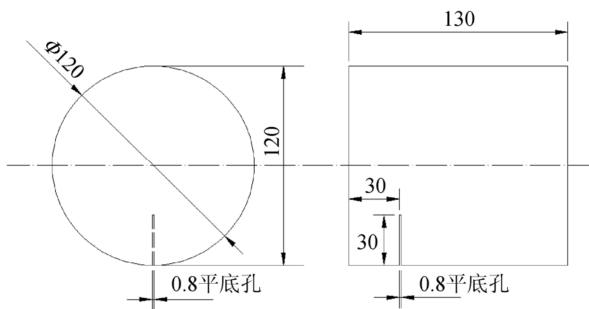


图 12 人工缺陷位置示意图
Fig. 12 Artificial defect location diagram

实验采用水浸脉冲反射法,通过图 13 与图 14 所示的超声检测设备,对试块含缺陷区域进行超声检测,获得完整 A 扫描检测信号。获得的试块信号如图 15(a) 所示,截取其中一段含有缺陷回波

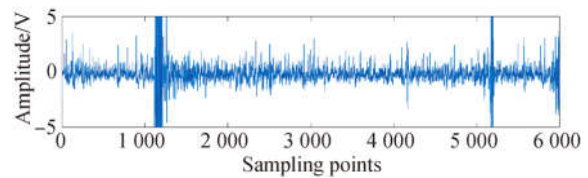
的超声探头中心频率为 7.5 MHz,采样频率设定为 100 MHz。



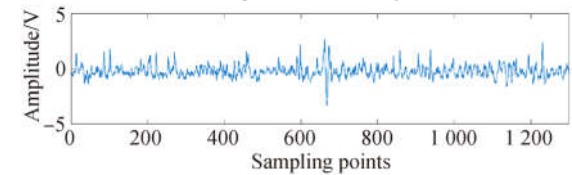
图 13 水浸超声探头
Fig. 13 Immersion ultrasonic probe



图 14 超声检测设备
Fig. 14 Ultrasonic testing equipment



(a)完整 A 扫信号
(a) Complete A-scan signal



(b)截取背散射缺陷信号
(b) Intercepted backscattering defect signal

图 15 含缺陷的超声检测信号
Fig. 15 Ultrasonic detection signal of artificial defects testing specimen

4.2 递归参数的选取以及递归图的生成

由上文可知,嵌入维数 m 和延迟时间 τ 以及临界距离 ϵ 的选取对递归分析是否能真实反映系统特性有重要影响。本文分别采用虚假邻点法和平均互信息法计算嵌入维数 m 和延迟时间 τ ,由于嵌入维数 m 的计算中有涉及延迟时间的变量,

所以首先计算延迟时间 τ 。

使用平均互信息法计算最小延迟时间 τ 。在得到的平均互信息曲线中,第一个极小值点对应的 t 即为所求的时间延迟 τ ,如图 16 所示,观察图 17 可得最小延迟时间 $\tau=4$ 。

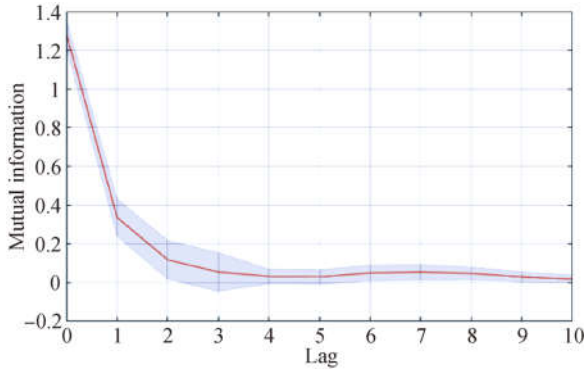


图 16 平均互信息曲线
Fig. 16 Mutual information plot

图 17 给出了超声检测背散射信号最小嵌入维数 m 邻接误差曲线,横轴表示嵌入维数 m ,纵轴表示邻接误点所占百分比,观察图可知,邻接误点随着嵌入维数 m 的增大而减小,通过重复计算所有空间点,选取使得邻接误点满足要求的最小 m 作为嵌入维数。本文 m 取 6 即可。

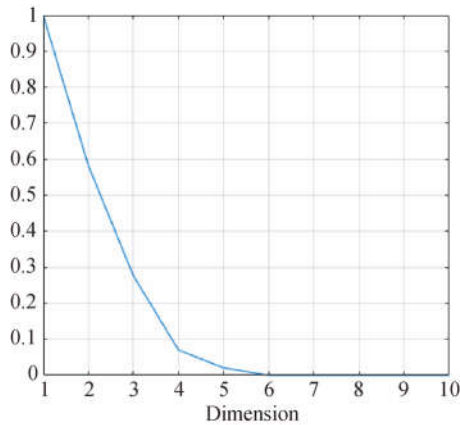
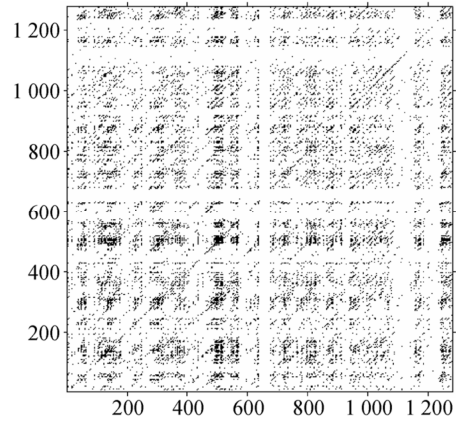


图 17 最小嵌入维数 m 邻接误差曲线
Fig. 17 Adjacency error curve of minimum embedding dimension m

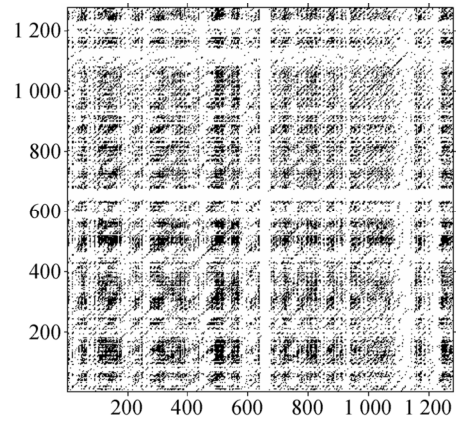
临界距离 ϵ 的选取也会影响递归分析的结果,目前 ϵ 的选取主要依赖于被分析信号的标准差 σ ,即 $\epsilon=k\sigma$ 。当临界距离 ϵ 选取过小,递归图中递归点数量稀少,图中体现的信息较少,很难观察到缺陷对递归特性的影响。当临界距离 ϵ 选取过大,虽然缺陷所造成的对系统递归特性影响明显,

但是非缺陷位置的信号也产生了递归点,过多的递归点可能掩盖缺陷导致的递归特性变化。

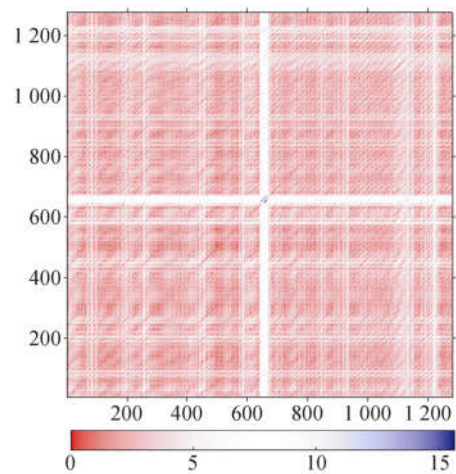
以嵌入维数 $m=6$ 和时间延迟 $\tau=4$ 计算绘制递归率 (RR) 为 10%、20% 以及无阈值下的人工缺陷棒材试块超声检测背散射信号的递归图,如图 18 所示。



(a) RR=10%



(b) RR=20%



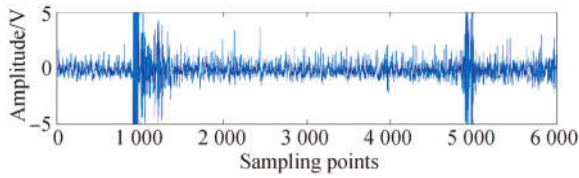
(c) 无阈值

(c) No threshold

图 18 信号递归图

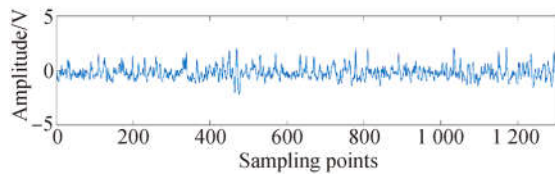
Fig. 18 Recurrence plot of test signal

为了进行对照实验,将试块无缺陷部位的超声检测信号同样进行递归分析,完整 A 扫描信号及截取的背散射信号如图 19 所示。



(a)完整 A 扫信号

(a)Complete A-scan signal



(b)截取背散射信号

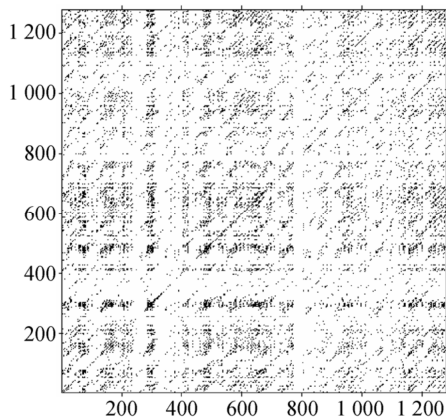
(b)Intercepted backscattering signal

图 19 无缺陷信号

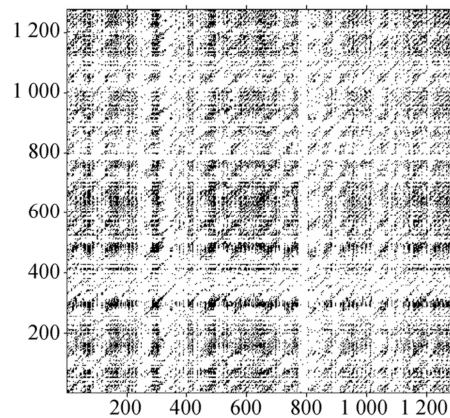
Fig. 19 No defect signal

所选取的嵌入维数 $m=6$, 时间延迟 $\tau=4$ 。同样生成三张递归图,如图 20 所示。

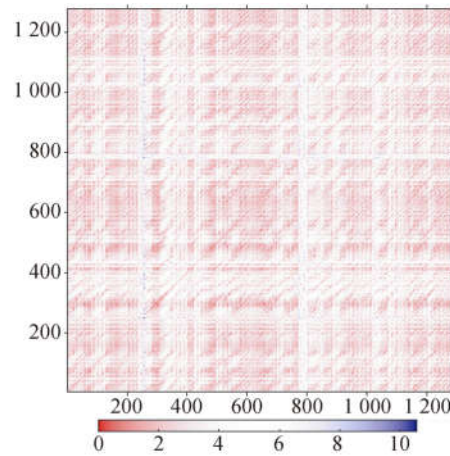
从图 18 中可以看到,当整体 $RR=10\%$ 时,图 18(a)中递归点较少,无法分辨缺陷;当 $RR=20\%$ 时,在图 18(b)中,可以看到一个明显的交叉白色条纹带;在图 18(c)中则更加明显。这说明该区域的信号与其他信号的相似度低,产生了突变,该位置可能存在缺陷。



(a)RR=10%



(b)RR=20%



(c)无阈值

(c)No threshold

图 20 无缺陷信号递归图

Fig. 20 Recurrence plot of no defect signal

而在图 20 无缺陷信号的递归图中,递归点无规则分布在整个递归图中,并且递归点大多孤立存在,很少形成线段,无明显的白色交叉条纹带。将图 20 中疑似缺陷信号的位置与实际位置相对比,其正是人工缺陷所在的位置。

4.3 递归定量分析研究

为了研究缺陷信号对系统递归特性的影响,对图 15(b)和图 19(b)所示的背散射信号进行递归定量分析。得到的递归定量分析特征量分别如图 21 和图 22 所示。

从图 24 中可以看出,在确定率(DET)、递归熵(ENTR)、捕获时间(TT)等特征量中,缺陷信号与无缺陷信号有较明显的区别。比较分析其余采集的有缺陷信号,发现也具有相似的特征。

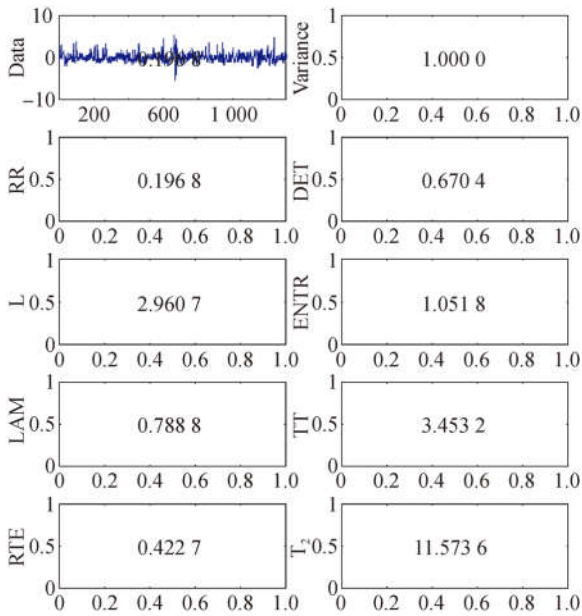


图 21 人工缺陷信号递归定量分析

Fig. 21 RQA of defect signal

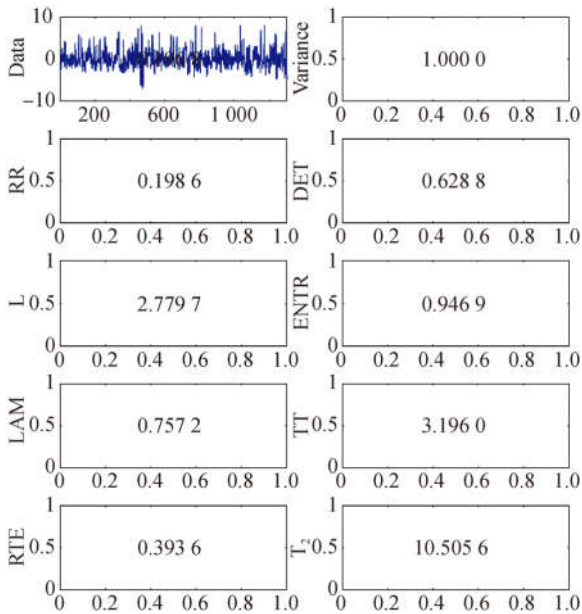


图 22 无缺陷信号递归定量分析

Fig. 22 RQA of no defect signal

为了研究缺陷回波对递归特性的影响,使用时间依赖的递归定量分析对缺陷信号进行了进一步处理。时间依赖的递归定量分析原理如图 23 所示,选取一定的窗口大小的时间窗,按一定的步长分别计算每个窗口中信号的递归特征量。最后将计算得到的一系列特征量以图表曲线的形式体现。

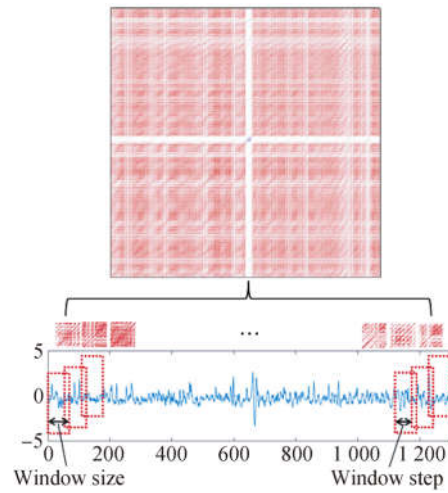


图 23 时间依赖的递归定量分析

Fig. 23 Time-dependent RQA

4.4 时间依赖的递归定量分析研究

为了进一步研究缺陷信号与递归定量参数之间的关系,采用时间依赖的递归定量分析方法对含缺陷和无缺陷背散射信号进行研究。

图 15 中含 0.8 mm 平底孔缺陷的超声信号的背散射部分总长度为 1 300 个数据点,窗口大小取 50 个数据点,步长为 1 个数据点,计算得到的定量分析结果如图 24 所示。

从图中可以看出,部分递归特征量对缺陷信号比较敏感。例如捕获时间(TT),在缺陷位置出现了一个峰值,且远大于其余的峰值。在确定率(DET)与递归熵(ENTR)中,其缺陷位置同样出现峰值,但其幅值相较其余尖峰位置区别不是很大。而剩余的如递归率(RR)、平均对角线长度(L)等对缺陷信号不敏感。

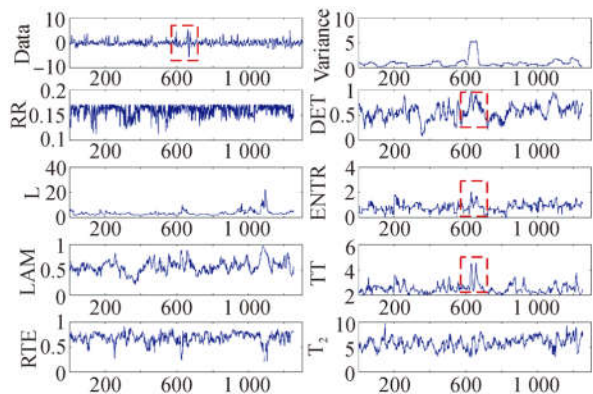


图 24 递归定量分析结果

Fig. 24 Results of recurrence quantification analysis

5 结 论

金属材料超声检测的背散射信号主要由散射噪声、非声学噪声与缺陷回波组成。由于缺陷回波的存在,会使得其在局部对系统的递归特性造成较大影响。可以使用递归分析技术来处理超声检测信号。

通过实验,验证了递归分析用于超声检测信号处理的可行性。通过对检测信号的背散射信号部分进行递归分析,选取合理参数之后生成递归

图,发现在有缺陷信号的递归图中出现明显的白色交叉条纹带。而在无缺陷信号的递归图中递归点大多成离散状。同时对背散射信号进行递归定量分析,发现捕获时间(TT)、确定率(DET)与递归熵(ENTR)三种特征量对缺陷信号比较敏感。其中TT与递归图中的垂直线段有关,DET和ENTR与对角线有关。

但是,对于缺陷信号为何会对递归特征量产生影响,这3种特征量是否具有普遍性,在强噪声环境中递归分析技术还是否能够适应等问题还需要进一步地研究。

参考文献:

- [1] LEGENDRE S, GOYETTE J, MASSICOTTE D. Ultrasonic NDE of composite material structures using wavelet coefficients [J]. *NDT E Int.*, 2001, 34(1): 31-37.
- [2] NAM K W, LEE K C, OH J H. Application of joint-time frequency analysis methods for nondestructive evaluation [J]. *Am Sic Mech Eng Appl Mech Div AMD*, 1999, 234: 67-74.
- [3] DEMIRLI R, SANIIE J. Asymmetric gaussian chirplet model and parameter estimation for generalized echo representation [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, 351(2): 907-921.
- [4] 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)
- [5] 杨辰龙,陈越超,叶钱,等. 金属材料小缺陷超声反射信号建模及识别 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2635-2644.
YANG CH L, CHEN Y CH, YE Q, *et al.*. Ultrasonic echo signal modeling and identification for minor defects in metallic materials [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2635-2644. (in Chinese)
- [6] CASTELLANOS L, RAMOS A. Time-frequency analysis based on the scalogram technique of 0-order ultrasonic X-waves assessing their viability as a detection tool in medical diagnosis [J]. *Pan Am. Health Care Exch.*, PAHCE, 2010: 144-148.
- [7] YING C F, TRUELL R. Scattering of a plane longitudinal wave by a spherical obstacle in an isotropically elastic solid [J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27(9): 1086-1097.
- [8] BRANDT C. A state space approach for the non-destructive evaluation of CFRP with ultrasonic testing [C]. *International Symposium on Ndt in Aerospace*, 2015.
- [9] TAKENS F. Detecting strange attractors in turbulence [J]. *Lecture Notes Math*, 1982(898): 366-381.
- [10] 闫润强. 语音信号动力学特性递归分析[D]. 上海:上海交通大学,2006.
YAN R Q. *Recurrence Analysis of Dynamical Characteristics for Speech Signals* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006. (in Chinese)
- [11] 闫润强,朱贻盛. 基于定量递归分析的清浊音判决 [J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(7): 1703-1706.
YAN R Q, ZHU Y SH. Voiced/unvoiced decision based on recurrence quantification analysis [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(7): 1703-1706. (in Chinese)
- [12] 马军海. 复杂非线性系统的重构技术[M]. 天津:天津大学出版社,2005.
MA J H. *Reconstruction of Complex Nonlinear Systems* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005. (in Chinese)
- [13] 朱志宇,姜长生,张冰,等. 基于混沌理论的微弱信号检测方法 [J]. *传感器技术*, 2005, 24(5): 65-68.
ZHU ZH Y, JIANG CH SH, ZHANG B, *et al.*. Weak signal detection based on chaotic theory [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, 24(5): 65-68. (in Chinese)
- [14] 吕金虎,张锁春. Lyapunov指数的数值计算方法 [J]. *非线性动力学报*, 2001, 8(1): 84-92.

- LÜ J H, ZHANG S CH. The numerical calculating method of lyapunov exponent [C]. *Journal Nonlinear Dynamics in Science and Technology*, 2001, 8(1): 84-92. (in Chinese)
- [15] 梁庆真. 基于相空间去噪的心音信号递归定量分析及识别[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- LIANG Q ZH. *Recurrence Quantification Analysis and Identification of Heart Sounds Based on Phase Space Denoising* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [16] 姚勇. 熵、分维、李雅普诺夫指数与混沌 [J]. 自然杂志,1987,10(5):359-365.
- YAO Y. Entropy, fractal dimension, lyapunov index and chaos [J]. *Chinese Journal of Nature*, 1987, 10(5): 359-365. (in Chinese)
- [17] ECKMANN J P, KAMPHORST S O, RUELLE D. Recurrence plots of dynamical systems [J]. *Europhysics Letters*, 1987, 4(9): 973-977.

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



冯 玮(1987—),男,江苏宿迁人,博士研究生,2010年于浙江大学获得学士学位,主要从事超声无损检测及自动化方面的研究。E-mail: fengweizju@126.com