

文章编号 1004-924X(2018)12-3108-10

厚截面碳纤维复合材料远表面微缺陷超声检测

滕国阳¹, 周晓军^{1*}, 杨辰龙¹, 曾祥²

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

2. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为了识别厚截面碳纤维复合材料(CFRP)远表面的微缺陷, 使用递归分析方法对超声检测信号进行分析。首先在厚截面 CFRP 材料上打孔以模拟微缺陷, 采用水浸超声脉冲反射法对不同大小的模拟缺陷进行检测。然后选取缺陷位置附近信号段, 确定嵌入维数 m 、延迟时间 τ 、阈值 ϵ 等参数, 对各信号段进行递归分析, 得到递归图及递归定量分析结果。比较无缺陷信号和有缺陷信号的递归图, 从宏观上定性确定微缺陷对超声信号的影响; 比较无缺陷信号和有缺陷信号的递归定量分析结果, 根据每个递归定量参数的物理意义, 对缺陷产生的影响作出合理的解释。最后, 使用不同中心频率探头进行实验, 确定合适的探头参数。分析结果表明, 使用 7.5 MHz 高分辨率超声探头时检测效果最好; 当嵌入维数为 7、延迟时间为 2、阈值为 2 时, 递归图中出现异常白色区域、递归点增多且对角线结构变长, 同时所选取的递归定量参数随缺陷增大而上升, 表明厚截面 CFRP 远表面超声信号可能存在混沌结构, 而微缺陷的存在会改变原有信号结构。所研究内容为实际微缺陷的定量识别及分类打下基础。

关键词: 厚截面复合材料; 微缺陷; 脉冲反射法; 递归图; 递归定量分析

中图分类号: TB553; TH145.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182612.3108

Ultrasonic detection method of micro defects in thick-section CFRP

TENG Guo-yang¹, ZHOU Xiao-jun^{1*}, YANG Chen-long¹, ZENG Xiang²

(1. *The State Key Lab of Fluid Power and Mechatronic Systems,
College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;*

2. *CRRC Zhuzhou Institute Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China)*

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

Abstract: To detect micro defects in thick-section carbon fiber reinforced composite (CFRP), the recurrence analysis method was used to analyze ultrasonic signals of tested CFRP. First, small holes were made to simulate micro defects, and an ultrasonic pulse echo method was adopted to test these simulated defects of different sizes. Then, the signal segments around the defect position were selected, and recurrence analysis was performed after proper parameters like embedding dimension (m), time delay (τ), and threshold (ϵ) were chosen. The recurrence plots (RPs) of defect-free signals were compared with those of defective ones and, according to the physical meanings of recurrence quantification analysis (RQA) variables, the changes that appeared in RPs were explained. Finally, ultrasonic transducers with different frequencies were evaluated to determine which one has the best perform-

收稿日期: 2018-10-08; **修订日期:** 2018-10-30.

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)

ance. The results show that a 7.5 MHz resolution series transducer is the best choice in our experiment, and while $m=7$, $\tau=2$, and $\epsilon=2$, the defects may cause dark areas, white bands, and longer diagnosis structure in RPs and correspondingly larger RQA variables. More concretely, the ultrasonic signal of defect-free thick-section CFRP appears in a chaotic state, while defects may break this state and lead to another one. The results will lay a foundation for the quantitative identification and classification of real micro defects.

Key words: thick section CFRP; micro defects; pulse echo method; recurrence plot; recurrence quantification analysis

1 引 言

碳纤维复合材料广泛应用于航空航天领域,飞机的关键构件主要是由碳纤维层压板制造而成,具有厚度大、结构形式多样的特点。由于制备工艺的复杂性,厚截面碳纤维复合材料在制造过程中会形成各种宏观缺陷及微观缺陷^[1]。孔洞、分层、夹杂等宏观缺陷相对便于检测,但是最为常见的层状孔隙、富树脂、纤维褶皱等微缺陷很难检测识别。研究表明应力集中的复合材料关键件的疲劳寿命、拉伸强度、弯曲强度、疲劳极限等性能均受微缺陷大小及分布特征的影响^[2-3]。因此需要对厚截面碳纤维复合材料构件中的微缺陷进行检测,常用的检测方法有超声脉冲反射检测^[4]。

由于微缺陷尺寸在微米级别,经常采用高频超声探头以便于发现更加微小的缺陷。当缺陷存在于超声检测远表面时,由于厚截面复合材料层压板的多相性质及其高声衰减率,所测得的超声信号中缺陷反射信号的波形不易分辨、信噪比低,这给信号分析与缺陷提取、定量评价带来困难。而且由于材料层数较多,超声脉冲多次反射与散射,导致超声信号模型的建立十分困难。

基于 Eckmann 提出的递归图 RP 分析概念而来的递归定量分析 RQA 是一种数据驱动方法,针对原始时间采样信息结构进行分析,不需要具备所研究系统的任何先验知识^[5-7]。RP 分析方法基于 Takens 提出的延迟相空间重构,可以凸显系统在高维相空间中轨迹的递归效果^[8]。RQA 是将 RP 进行量化,通过不同的递归定量参数对系统进行评价。递归分析已经在气象分析、生物医学、经济分析、信号处理等众多领域有了成功的应用^[9-11],近几年来超声检测领域也出现了递归分析的研究:C. Brandt 对递归定量分析在多

孔复合材料超声无损检测中的应用方法进行了研究,基于递归量化分析建立了超声检测“等效底面回波”,用以分析无底面回波的复合材料 C 扫检测信号^[12]。大连理工大学林莉团队提出对超声背散射信号进行递归定量分析,以递归定量参数来表征 CFRP 孔隙尺寸和位置分布^[13]。浙江大学周晓军团队针对碳纤维复合材料中孔隙率、夹杂和富树脂的识别问题,使用递归图和递归定量分析方法进行了初步研究^[14-15]。上述文章中大多研究层数较少的复合材料,C. Brandt 研究了截面厚度较大的复合材料,但并未关注材料内部的微缺陷的尺寸对超声检测信号的影响。

本文针对厚截面复合材料远表面的微缺陷检测问题,在一块孔隙率近零的无缺陷超厚复合材料远表面打上若干大小不同的孔,用来模拟微缺陷。得到超声检测信号后,首先使用递归分析方法得到递归图,对比分析有缺陷及无缺陷递归图的结构,研究缺陷对于超声信号递归行为的影响;其次根据不同大小缺陷的递归定量分析结果,联系各参数的物理意义,对缺陷造成的影响做进一步解释;最后论证递归分析方法作为远表面微缺陷检测方法的可行性。本文使用 CRPToolBox 为递归分析工具。

2 递归分析方法

2.1 递归图 RP

递归图是对时间序列的 m 维相空间轨迹递归性的二维图示。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 。两个不同的状态向量 $x_i \in \mathbf{R}^m$ 和 $x_j \in \mathbf{R}^m$ 的递归性由式(1)进行计算:

$$R_{i,j} = \Theta(\epsilon - \|x_i - x_j\|), i, j = 1, 2, \dots, n - (m-1)\tau, \quad (1)$$

其中: m 为嵌入维数, τ 为延迟时间, 阈值 $\epsilon > 0$ 表示预先设定的临界距离, “ $\| \cdot \|$ ”表示两向量之间的距离, 常用距离为欧氏距离:

$$\| \mathbf{X} - \mathbf{Y} \| = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}, \quad (2)$$

算子 $\Theta(\cdot)$ 为 Heaviside 函数, 即:

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (3)$$

当值为 1 时认为在当前参数选择下两向量递归, 在递归图上显示为深色, 从而形成递归图如图 1 所示。当 $i = j$ 时, $R_{i,j}$ 恒等于 1, 故递归图上会出现一条深色长对角线, 称为主对角线。

递归图是高维轨迹的可视化, 其结构呈现出宏观及微观上的特征结构, 不同的特征代表系统特定的动力学行为。宏观的结构可以分为四种: 均布特征 (Homogeneous)、漂移特征 (Drift)、周期特征 (Periodic)、突变特征 (Disrupted), 如图 1 所示。图 1(a) 为具有均布特征的递归图, 表现为均布的单个递归点, 所代表的是典型的平稳系统, 比如随机时间序列; 图 1(b) 为具有周期特征的递归图, 表现为长对角线或棋盘式的结构, 代表周期振荡系统; 图 1(c) 为具有漂移结构的递归图, 图中远离主对角线的区域颜色较浅, 表明动态系统中存在缓慢的变化; 图 1(d) 为具有突变特征的递归图, 图中会出现白色区域, 表示动态系统存在剧烈的变化或突发的激励情况。

微观特征包括包含孤立点 (single dots), 对角线 (diagonal lines) 以及垂直/水平线 (vertical and horizontal lines)。孤立点的出现表明其对应的状态出现的几率不高, 没有持续下去, 或者是波动很大。对角线为若干相邻的递归点连成线, 大多数与主对角线平行, 代表系统轨迹在相同的时间方向上、一定时间内相似, 其长度代表决定度或者可预测性; 如果这些对角线是周期性的, 则可以观察到不稳定的周期轨道; 如果这些对角线出现在单个孤立点附近, 则该过程可能是混沌的。竖直或者水平的线表示状态不变或者变化十分缓慢的时间长度, 是层状态的典型行为, 可以揭示信号的不连续性。

通过递归图宏观结构可以直接观察结构的不同, 快速发现系统中的部分特性, 但是难免带入个人的主观判断, 因此需要进行以微观结构为基础的定量分析。

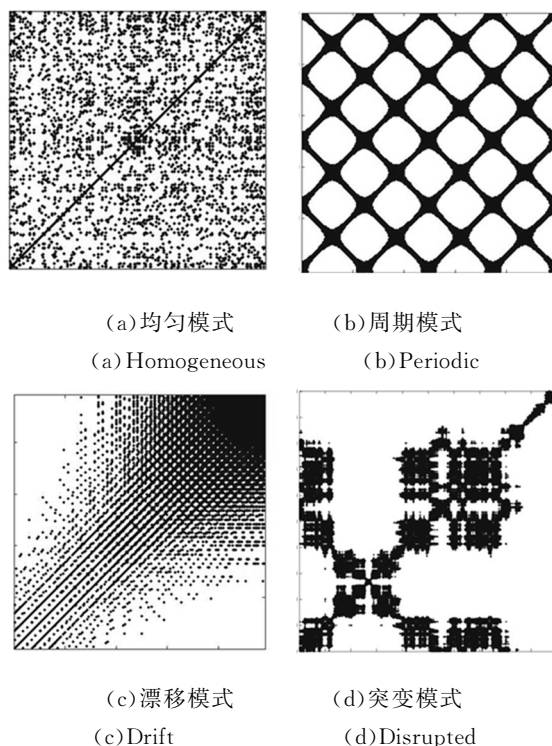


图 1 递归图宏观特性

Fig. 1 Macro characteristics of recurrence plots

2.2 递归定量分析 RQA

Zbilut 和 Webber 在传统的递归分析基础上, 基于递归图中的对角线结构, 提出了用于定量描述系统递归特性的量^[15]:

递归率 (RR)。递归图中除了主对角线之外的递归点与递归图总点数的比值, 表示递归点出现的概率。其计算公式如式 (4)

$$RR = \frac{1}{N^2 - N} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}. \quad (4)$$

确定率 (DET)。平行于对角线线段的递归点数与总递归点数量的比。对于周期性信号, 对角线很长; 对于混沌信号, 对角线很短; 对于随机信号, 对角线不存在, 除了偶尔形成非常短的线。其计算公式为:

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l H_D(l)}{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}}, \quad (5)$$

式中: l_{\min} 为递归图中对角线长度的最小阈值, 默认为 2; $H_D(l)$ 为递归图中对角线长度的直方图:

$$H_D(l) = \sum_{i,j=1}^N \left\{ (1 - R_{i-1,j-1})(1 - R_{i+l,j+l}) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k} \right\}. \quad (6)$$

最大对角线长度 (D_{\max}), 表示整个递归图内最长对角线的长度:

$$D_{\max} = \arg \max_l H_D(l). \quad (7)$$

由于对角线结构显示的轨迹段在不同时间与另一段轨迹接近, 因此这些线条揭示了轨迹段的发散情况。 D_{\max} 越小, 轨迹越分散。

平均对角线长度 (D), 它是两段轨迹彼此接近的平均时间。在这种情况下, D 可以被解释为平均预测时间:

$$D = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l H_D(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N H_D(l)}. \quad (8)$$

递归熵 (ENT), 以对角线的长度分布概率为基础计算得到的香农熵, 描述了系统中确定性结构的复杂性: 动态系统越复杂, 递归熵的数值也就越大; 反之对于不相关的噪声或振荡, ENT 的值相当小, 表明其复杂度低。其计算公式为:

$$ENT = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l), \quad (9)$$

其中 $p(l)$ 是对角线分布概率密度。

$$p(l) = \frac{H_D(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N H_D(l)}. \quad (10)$$

上面定义的 5 个 RQA 变量主要基于 RP 中对角线的长度, 数量和分布。也就是说, 他们对沿时间序列不同部分的平行轨迹很敏感。但 RP 不仅有对角线, 而且还有垂直和水平线段。从这些垂直线上, Marwan 等人提出了额外的递归量化变量^[8]。

层状度 (LAM), 定义类似于定义 DET 的定义, 即 LAM 表示垂直结构中递归点的百分比:

$$LAM = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l H_V(l)}{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}}, \quad (11)$$

类似地, $H_V(l)$ 为递归图中垂直线长度的直方图:

$$H_V(l) = \sum_{i,j=1}^N \left\{ (1 - R_{i,j-1}) (1 - R_{i,j+1}) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i,j+k} \right\}, \quad (12)$$

其中: l_{\min} 为递归图中垂直线长度的最小阈值, 默认为 2; LAM 量化了整个递归图上垂直结构的相对数量, 代表了系统层状结构出现的频率。

圈闭时间 (Trapping Time, TT), 定义为垂直结构的平均长度。TT 通过报告系统将在特定状态 (状态被困多久) 的平均时间来包含有关 RP 中垂直结构的数量和长度的信息。

$$TT = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l H_V(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N H_V(l)}. \quad (13)$$

还有一个 RQA 度量是测量 RP 中最长垂直线的垂直结构 V_{\max} 的最大长度, 并且类似于对角线测量 D_{\max} 。然而, V_{\max} 的动力学解释并没有被明确地描述, 但它可能与系统被困在 RP 中的矩形中的单一状态有关^[10]。

2.3 参数选择方法

嵌入维数 m 的选取, 最常用的方法为虚假邻点法 (False nearest neighbours, Fnn)。使用 CRP ToolBox 中 Fnn 函数得到嵌入维数与虚假邻点对应关系, 选取虚假邻点值为零或不再改变时的 m 值为最佳嵌入维数。

时间延迟的选取, 最常用的方法为互信息法 (Mutual information, Mi)。使用 CRP ToolBox 中 Mi 函数, 得到延迟时间与互信息值对应关系, 选取第一个局部最小值为最佳延迟时间。

对应阈值 ϵ 的选取是为了递归定量参数进行服务。如果选择太小, 可能几乎没有递归点, 就无法通过递归结构来了解所研究的系统; 另一方面, 如果选择 ϵ 太大, 几乎每个点都在临近点的邻域中, 则会在递归图中出现大量的虚假的递归结构; 同时会将很多孤立包含在邻域内, 导致更厚和更长的对角线结构。阈值的选取根据研究目的的不同, 其选取标准也有所区别。

3 厚截面复合材料超声检测实验

3.1 实验装置及实验材料

本文实验材料为 18 mm 的超厚碳纤维复合材料试块, 由纤维层和树脂层交替铺叠固化而成, 平均纤维层厚度为 0.125 mm, 树脂层厚度在 0.01 mm 左右, 孔隙率近似为零, 排除了由于孔隙造成的影响。为了模拟远表面微缺陷, 分别采用直径为 0.3 mm、0.5 mm、1 mm 的钻头在材料表面打孔, 深度 5 mm, 如图 2 所示。孔与孔之间距离足够大, 保证每次采集不会受到其他孔的影响。

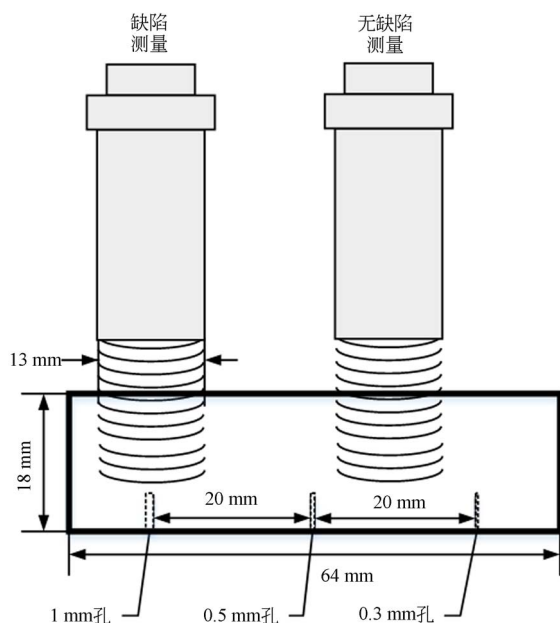


图 2 实验材料及缺陷模拟

Fig. 2 Defects simulated in experimental material

采用水浸超声脉冲反射法进行实验,具体操作流程为:将超声换能器安装于辅助耦合支架上,排尽空气,调节探头到工件表面的距离至合适位置,依次测量无缺陷区域、0.3 mm 直径、0.5 mm 直径以及 1 mm 直径模拟缺陷区域。实验选取的样品属于截面非常厚的碳纤维复合材料构件,底面回波信号衰减较大,为了保证测得足够的有效数据,所用超声探头为 OLYMPUS 沉浸式平面非聚焦探头,型号分别为 I3-0708-R(7.5 MHz, Resolution Series)、A311s(10 MHz, ACCUSCAN-S) 及 A319s(15 MHz, ACCUSCAN-S),晶片直径均为 13 mm,分别使用不同频率探头对所模拟的缺陷依次进行检测。采样频率设定值为 50 MHz,实验装置如图 3 所示。

3.2 测量信号

使用不同频率探头的实验流程相似,首先使用 7.5 MHz 探头进行实验及分析,10 MHz 及 15 MHz 测量实验内容见 4.4 节。

超声测量结果如图 4 所示,从上至下依次为无缺陷、0.3 mm 缺陷、0.5 mm 缺陷及 1 mm 缺陷区域超声检测信号,观察可知信号起始采样点 N_{start} 在 380 左右,底波反射信号采样 N_{stop} 在 1020 左右,信号采样长度 $N = N_{\text{stop}} - N_{\text{start}} = 640$,对于厚度相同的同一块材料,其超声信号具有极高的相似性。

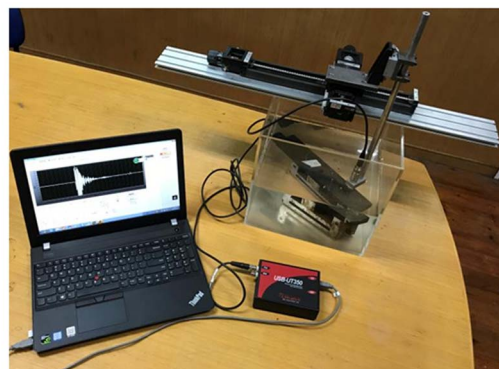


图 3 超声检测实验装置

Fig. 3 Ultrasonic testing device

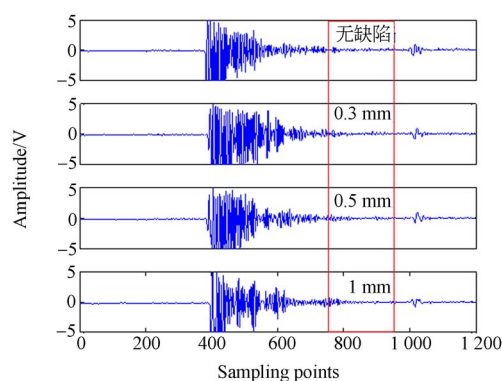


图 4 超声检测结果(7.5 MHz)

Fig. 4 Ultrasonic detection signals(7.5 MHz)

假设超声波在复合材料传播速度为平均声速,则:

$$c = \frac{2d}{N} f_s, \quad (14)$$

其中: d 为材料截面厚度, f_s 为采样频率,由此可得远表面缺陷所对应的采样点数为:

$$N_{\text{def}} = N_{\text{start}} + \frac{2(d-d')}{c} f_s = N_{\text{start}} + \frac{N(d-d')}{d}, \quad (15)$$

其中 d' 为缺陷深度,计算得到 $N_{\text{def}} \approx 840$ 。

截取背散射信号 750 : 950 区域,缺陷处于所截区域中部,如图 5 所示,背散射信号较为复杂,无法直接识别是否存在微缺陷。

4 超声信号递归分析

4.1 递归分析参数选择

使用虚假邻点法对各信号进行分析,结果如

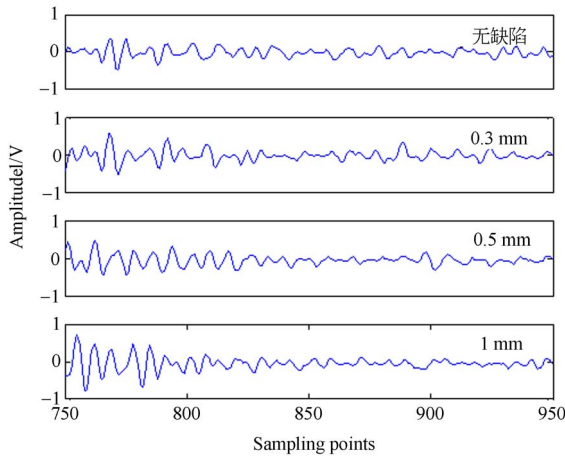


图 5 缺陷信号段(7.5 MHz)

Fig. 5 Defect signal segment(7.5 MHz)

表 1 所示。选取第一次到达零的嵌入维数,可以发现 3 个信号嵌入维数相同, $m=7$ 。

表 1 虚假邻点法计算结果(7.5 MHz)

Tab. 1 Results of Fnn(7.5 MHz)

m	无缺陷	0.3 mm	0.5 mm
1	1	1	1
2	0.444	0.367	0.364
3	0.179	0.152	0.149
4	0.020 4	0.035 7	0.056 4
5	0.005 15	0.010 4	0.010 3
6	0.005 21	0.005 21	0.005 15
7	0	0	0

使用互信息法对各信号进行分析,结果如图 6 所示。选取图中各曲线第一个局部最小值为延迟时间,可以发现 3 个信号延迟时间相同, $\tau=2$ 。

本文的主要目的是研究缺陷对于复合材料超声信号的影响,通过无缺陷信号与有缺陷信号的递归分析结果进行比较,因此在选择参数时确立原则:以无缺陷信号的标准对所有信号进行递归分析,保证无缺陷信号的递归图结构清晰。根据以往文献选取阈值时的经验,信号的递归率在 0.1 左右即可^[10]。

为了较快确定合适的阈值,可以采用无阈值的方法,直接计算得到各向量之间的距离并以等高线方式绘制,观察信号结构,初步确定阈值。图 7 为无缺陷信号无阈值递归图,观察可知,向量之间的距离沿着对角线不断下降,左下角处最高到达 11,右上角处最低到达 1,整个图中距离出现最

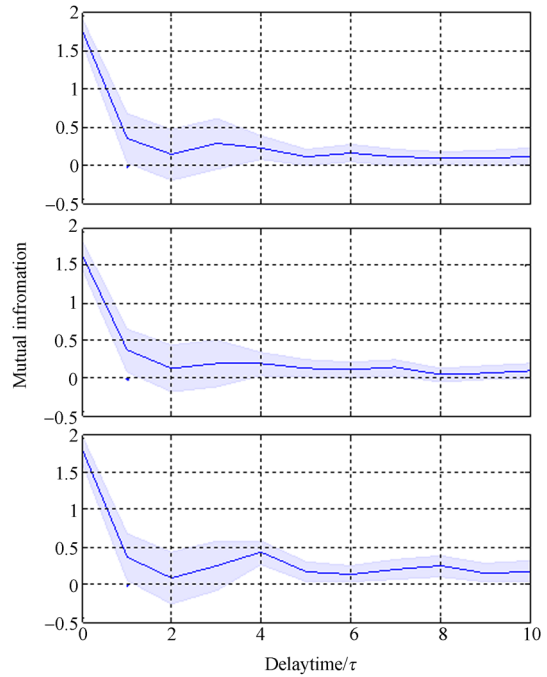


图 6 互信息法分析结果(7.5 MHz)

Fig. 6 Results of Mi(7.5 MHz)

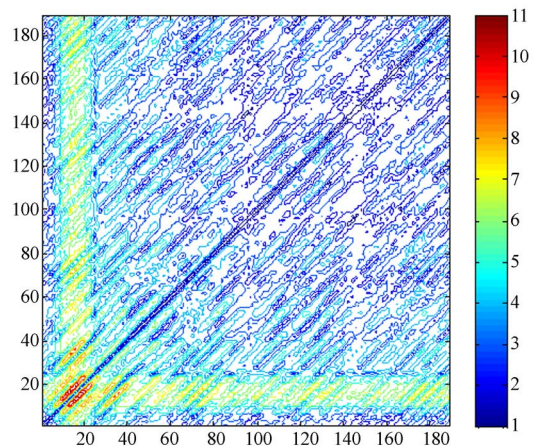


图 7 无缺陷信号无阈值递归图(7.5 MHz)

Fig. 7 Unthreshold recurrence plot of defect-free signal(7.5 MHz)

多的约在 2 左右。选择欧氏距离 2 为阈值。计算其递归定量参数,得到递归率为 0.088 1。

4.2 递归分析结果

使用参数 $m=7$, $\tau=2$, 距离选择欧氏距离,阈值为 2,得到递归图如图 8 所示,对应的递归定量分析变量值如表 2 所示。

分析无缺陷递归图,如图 8(a)所示,图中出现较多短对角线结构,根据表 2 可知其 $\langle D \rangle$ 为 6.107 8, D_{max} 为 46, 相较其他信号为最小,说明超

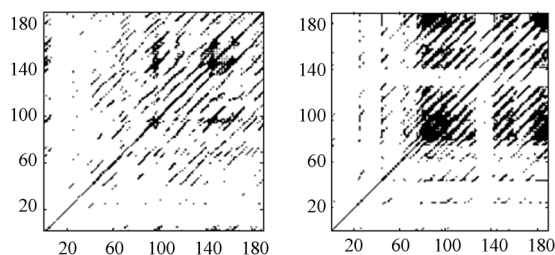


图 8 统一阈值递归图(7.5 MHz)

Fig. 8 RPs with the same threshold(7.5 MHz)

声信号在无缺陷的复合材料中传播时,其轨迹较为分散,可预测性较低;递归定量参数 DET 为 0.796 2,表明递归图中有近 20%的递归点不属于对角线结构,为孤立点。结合 2.1 对递归图微观特征的论述及 2.2 中 DET 的概念;对于混沌信号,对角线很短且这些对角线出现在单个孤立点附近,可以推测无缺陷复合材料远表面超声检测信号中可能存在混沌结构。

表 2 递归定量分析结果(7.5 MHz)

Tab. 2 Results of RQA(7.5 MHz)

递归参数	信号类型			
	无缺陷	0.3 mm	0.5 mm	1 mm
RR	0.088 1	0.155 2	0.225 7	0.433 3
DET	0.796 2	0.864 8	0.920 9	0.956 5
$\langle D \rangle$	6.107 8	8.310 1	12.473 0	21.848 7
D_{\max}	46.000 0	55.000 0	73.000 0	134.000 0
ENT	2.384 0	2.776 3	3.240 5	3.665 4
LAM	0.740 9	0.888 0	0.936 3	0.975 8
TT	2.838 4	4.357 7	6.579 3	10.455 1
V_{\max}	19.000 0	26.000 0	45.000 0	106.000 0

除了对角线结构之外,图 8(a)中可以发现水平或垂直的线段,根据表 2 可知其 LAM 为 0.740 9, V_{\max} 为 19, TT 为 2.838 4,根据对应物理意义可知,无缺陷复合材料远表面超声检测信号中部分区域的状态变化较为缓慢,其信号存在层状结构。

4.3 局部缺陷信号分析

白带结构并未出现在图 8(a)所示无缺陷递归图中,但在 0.3 mm 缺陷递归图(图 8(b))、0.5 mm 缺陷递归图(图 8(c))、1 mm 缺陷递归图(图 8(d))中均出现了较为明显的白带,且位置在截取信号的 140 采样点处,对应原采样信号中的 890 点处,比计算所得缺陷位置略大。

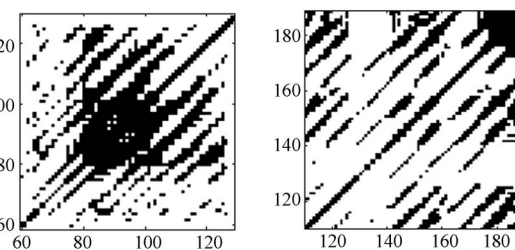
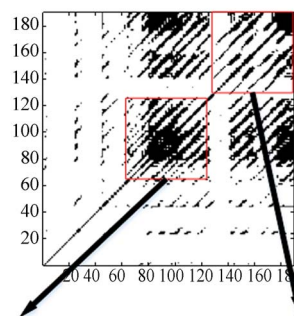


图 9 0.3 mm 缺陷前后局部递归图(7.5 MHz)

Fig. 9 Local parts of RP around the 0.3 mm defect (7.5 MHz)

图 8(b)、图 8(c)均形成了矩形块状结构,甚至在图 8(d)中形成了纯暗色的区域,根据表 2 可知有缺陷的递归定量参数值均比无缺陷递归定量参数大,且随缺陷尺寸的增大而增大;递归点数(RR)增多且大多参与形成对角线结构(DET),使得对角线变长($\langle D \rangle$, D_{\max}),系统的复杂度上升(ENT);同时水平垂直线结构也有类似的变化(LAM, TT, V_{\max})。以截取信号的 140 采样点为界,沿主对角线观察缺陷白带中心位置前后的递归图结构。以 0.3 mm 缺陷为例,放大图 8(b)中缺陷前后的递归图矩形区域,如图 9 所示。图 9(a)所示缺陷前递归图中对角线结构周期性较强,图中还出现了更小的矩形区域,其宽度仅有 20 个采样点,在当前距离阈值下无法看清其结构;图 9(b)所示缺陷后信号大多为对角线结构,呈周期分布。其他局部信号类似。

4.4 10 MHz 及 15 MHz 探头实验结果

分别使用 10 MHz 及 15 MHz 探头,重复上述实验流程,得到实验结果如下:

15 MHz 超声信号如图 10 所示,底波已经无法找到,根据 3.2 节所述公式,截取后半部分信号进行递归分析,得到递归图如图 10 所示。从图中可以观察到,15 MHz 下递归图基本为均布散点分布,与图 1 中均匀模式有较大相似性。对其进行递归定量分析,得到结果如表 3 所示。此时,递

归率 RR 仍为 0.1 左右,然而确定率 DET 却下降至 0.2~0.4,说明此时出现了较多孤立点。同时,对角线平均长度 $\langle D \rangle$ 降至 2~3、递归熵 ENT 降至 1 以下等变化都说明此时信号可预测性极差,可以认为是随机信号,这也与高频超声波在层状结构中迅速衰减的事实相符。故 15 MHz 的探头并不适用于本文所研究的厚截面试块。

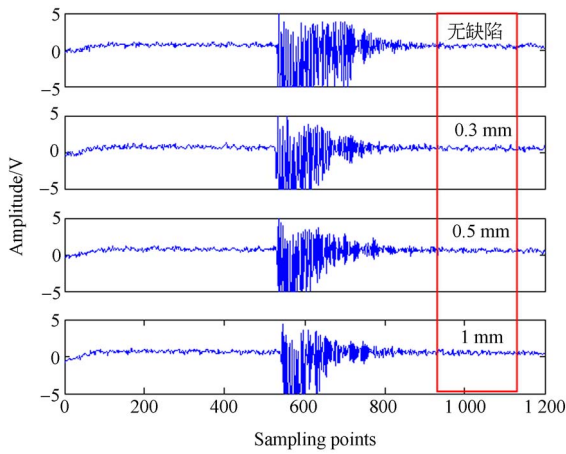


图 10 超声检测结果(15 MHz)
Fig. 10 Ultrasonic detection signals(15 MHz)

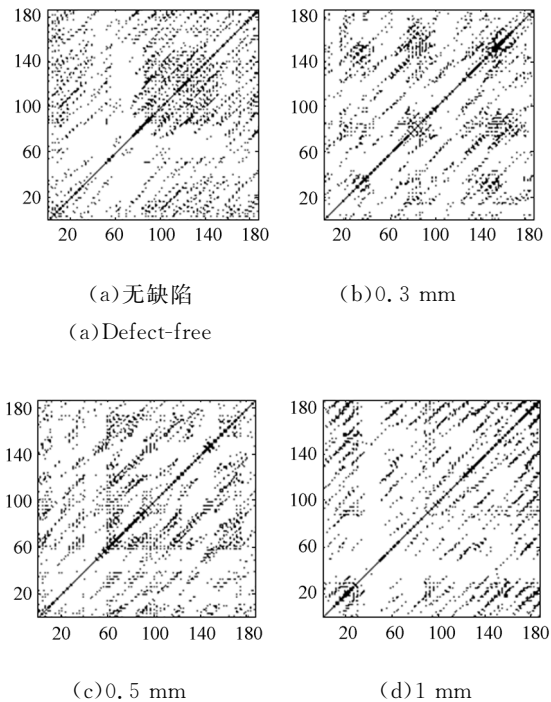


图 11 统一阈值递归图(15 MHz)
Fig. 11 RPs with the same threshold(15 MHz)

表 3 递归定量分析结果(15 MHz)

Tab. 3 Results of RQA(15 MHz)

递归参数	信号类型			
	无缺陷	0.3 mm	0.5 mm	1 mm
RR	0.088 2	0.081 1	0.086 2	0.077
DET	0.255 6	0.373 9	0.312 2	0.445 3
$\langle D \rangle$	2.751 8	2.597	2.586 6	3.025 6
D_{max}	18.000 0	17.000 0	33.000 0	20.000 0
ENT	0.752 5	0.775 5	0.665	1.007 2
LAM	0.464 8	0.516 1	0.485 8	0.5762
TT	2.395 6	2.523 6	2.532 5	2.570 7
V_{max}	6.000 0	13.000 0	8.000 0	8.000 0

10 MHz 超声信号如图 12 所示,此时底波仍然存在,截取后半部分信号进行递归分析,得到递归图如图 13 所示。此时,对照图 8 可以发现,在缺陷位置 140 采样点处隐约可见十字形缺陷特征,然而此特征与周围信号特征融为一体、不易分辨。这是因为 10 MHz 的探头发射出的超声脉冲在复合材料中的衰减相较 7.5 MHz 更大,而且 7.5 MHz 探头为高分辨率的 Resolution Series 系列,而 10 MHz 为普通 ACCUSCAN-S 系列探头,对于缺陷的识别前者更有效。采用 10 MHz 高分辨率探头进行实验可能会得到更好的效果,受试验条件限制本文没有进行相关工作。

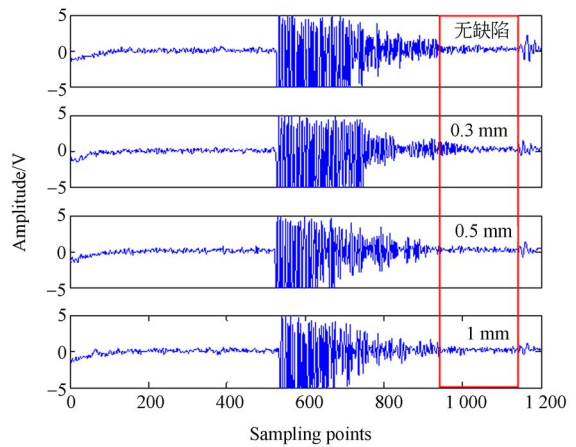


图 12 超声检测结果(10 MHz)
Fig. 12 Ultrasonic detection signals(10 MHz)

4.5 分析结果讨论

对前文观察所得结果进行分析讨论:

(1) 无缺陷递归图中出现了孤立点及极多的短对角线结构,而这些结构通常在混沌信号中出现。考虑每个超声时间序列都是一个超声脉冲发

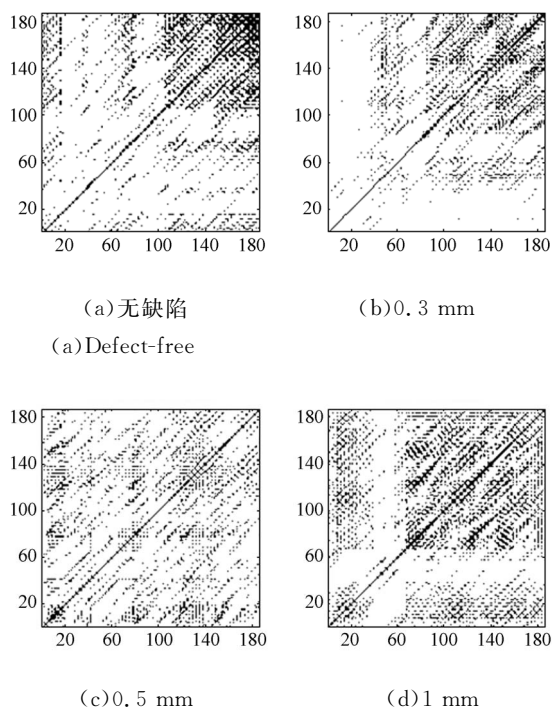


图 13 统一阈值递归图(10 MHz)

Fig. 13 RPs with the same threshold(10 MHz)

出然后采样一段时间得到的,脉冲在复合材料中经过不断的反射及折射,其运动轨迹是一个非线性动力学过程。随着超声脉冲信号传播距离的增加,超声脉冲信号可能会出现混沌行为。

(2) 无缺陷递归图中出现层状结构,而 CFRP 是由碳纤维及树脂交替铺层得到,超声脉冲在这样的层合板中传播,其检测信号应该带有较强的层状性。

(3) 缺陷形成的白带并未完全与理论计算结果一致。考虑到计算缺陷回波在信号中位置时假设超声波声速为平均声速,而实际上 CFRP 为各向异性材料,声速并不均匀,再考虑测量误差,可

以认为出现在 890 点处的白带是合理的。

(4) 缺陷前后递归图中出现矩形暗色区域。若无缺陷 CFRP 远表面的信号是混沌的,那么模拟缺陷的存在会破坏这种混沌状态,并且在缺陷前后形成一种近似周期的新状态。在这些矩形区域中,可能存在更小的结构,需要进一步分析。

(5) 对于厚截面复合材料试块来说,并非探头中心频率越高越好,7.5 MHz 探头可有效检测到缺陷存在,同时需要选用高分辨率系列探头进行缺陷检测。

5 结 论

本文使用水浸超声脉冲反射法对厚度为 18 mm 的超厚 CFRP 进行检测,在 CFRP 远表面打孔来模拟不同大小的缺陷,通过对信号进行递归分析,研究 CFRP 远表面微缺陷对于信号的影响。分析结果表明,递归图及递归定量分析均可有效识别缺陷的存在,递归定量参数与缺陷大小相关。

受实验条件限制,所研究内容出现部分未解决问题,需要进行以下几个方面的进一步研究:

(1) 递归图中出现了明显的层状结构,其宽度可能与脉冲信号的中心频率、材料的层数、厚度相关,需要选用合适中心频率的高分辨率探头并提高采样频率,针对不同厚度的材料进行实验;

(2) 所模拟的缺陷均为单个缺陷,密集的多缺陷更为常见,需要进行密集多缺陷模拟实验;

(3) 实验结果表明无缺陷 CFRP 信号递归图中出现的类似混沌的结构,但并没有相应的数学模型验证,需要对超声脉冲层状 CFRP 中的传播机理做进一步研究。

参考文献:

- [1] SMITH R A, NELSON L J, MIENCZAKOWSKI M J, et al. Automated analysis and advanced defect characterisation from ultrasonic scans of composites [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2009, 51(2): 82-87.
- [2] 郭治文,施晓春,沈洋,等. 固化炉成型复合材料孔隙率超声检测方法研究[J]. *航空制造技术*, 2017, 524(5): 49-53.
- GUO Z W, SHI X CH, SHEN Y, et al.. Ultra-

sonic testing study for autoclave cured composite material porosity [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 524(5): 49-53. (in Chinese)

- [3] 陈越超. 基于超声背散射信号处理的碳纤维复合材料孔隙检测研究[D]. 浙江:浙江大学,2016.

CHEN Y CH. *Research on Voids Testing for Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on Ultrasonic Backscattered Signal Processing* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)

- [4] 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)
- [5] ECKMANN J P, KAMPHORST S O, RUELLE D. Recurrence plots of dynamical systems[J]. *Europhys Lett*, 2007, 4(9):973-977.
- [6] ZBILUT J P, Jr C L W. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots[J]. *Physics Letters A*, 1992, 171(3-4):199-203.
- [7] ANGELA D. Characterization of Dynamic Phenomena Based on The Signal Analysis in Phase Diagram Representation Domain [D]. *Universite Grenoble Alpes*, 2017.
- [8] TAKENS F. Detecting strange attractors in turbulence[J]. *Lecture notes in mathematics*, 1981, 898(1): 366-381.
- [9] MARWAN N, WESSEL N, MEYERFELDT U. Recurrence plot based measures of complexity and their applications to heart rate variability data[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(7):70-76.
- [10] 杨栋,任新伟. 基于递归分析的振动信号非平稳性评价[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(12):39-43.
 YANG D, REN X W. Non-stationarity evaluating for vibration signals using recurrence plot [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(12): 39-43. (in Chinese)
- [11] Jr C L W, IOANA C, MARWAN N. *Recurrence Plots and Their Quantifications: Expanding Horizons*[M]. Springer International Publishing, 2016.
- [12] BRANDT C. Recurrence Quantification Analysis as an Approach for Ultrasonic Testing of Porous Carbon Fibre Reinforced Polymers[M]. *Recurrence Plots and Their Quantifications: Expanding Horizons. Springer International Publishing*, 2016.
- [13] 何晓晨,金士杰,林莉. 超声背散射信号递归定量分析无损表征 CFRP 孔隙分布仿真[J]. *复合材料学报*, 2018, 1-6.
 HE X CH, JIN SH J, LIN L. Simulation on non-destructive evaluation of CFRP void distribution with recurrence quantification analysis of ultrasonic back-scatter signals[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 1-6. (in Chinese)
- [14] 滕云浩. 碳纤维复合材料构件微缺陷超声评价系统研究[D]. 浙江大学, 2017.
 TENG Y H. *A Research on Ultrasonic Evaluation System of Material Defects in Carbon Fiber Reinforced Polymer* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [15] 胡勃. 基于递归分析的碳纤维复合材料微缺陷超声检测技术研究[D]. 浙江大学, 2018.
 HU B. *A Research on Ultrasonic Testing Technology based on Recurrence Analysis for Defects Detection in Carbon Fiber Reinforced Plastics*[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

作者简介:



滕国阳(1991—),男,甘肃靖远人,博士研究生,2013年于浙江大学获得学士学位,主要从事非线性动力学及超声检测领域研究。E-mail: t_gy189@163.com

通讯作者:



周晓军(1958—),男,浙江杭州人,博士,教授,1978年、1982年于江苏大学分别获得学士、硕士学位,1996年于浙江大学获得博士学位,主要从事超声检测及自动化方面的研究。E-mail: cmeesky@163.com