

控制与决策

Control and Decision

基于超声导波SC-DTW的金属板微损检测方法

刘小峰, 王邦昕, 柏林

引用本文:

刘小峰,王邦昕,柏林. 基于超声导波SC-DTW的金属板微损检测方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(10): 2619–2626.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0480>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[具有输入量化和全状态约束的非严格反馈随机非线性系统的有限时间动态面控制](#)

Finite-time dynamic surface control for nonstrict-feedback stochastic nonlinear systems with input quantization and full-state constraints

控制与决策. 2022, 37(10): 2575–2584 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0012>

[基于特征共享双头Cascade R-CNN的混凝土细观损伤特征检测](#)

Feature detection of concrete mesoscopic damage based on feature sharing double-head Cascade R-CNN

控制与决策. 2022, 37(7): 1745–1751 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0124>

[基于后悔理论的概率犹豫模糊双边匹配决策方法](#)

Two-sided matching decision making method with probabilistic hesitant fuzzy information based on regret theory

控制与决策. 2022, 37(9): 2380–2388 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1093>

[区分交通流模式的混合服务路口信号控制策略](#)

Signal control strategies of mixed service intersections to discriminate traffic flow patterns

控制与决策. 2021, 36(6): 1509–1515 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1520>

[随机变批次长度的反馈辅助PD型量化迭代学习控制](#)

Feedback-assisted PD-type quantized iterative learning control with randomly iteration varying lengths

控制与决策. 2021, 36(10): 2569–2576 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0273>

基于超声导波 SC-DTW 的金属板微损检测方法

刘小峰[†], 王邦昕, 柏林

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对金属板材的质量控制与服役性能评估问题, 在对金属板材微损伤进行超声导波检测的基础上, 结合形状上下文(shape context, SC)与动态时间规整方法对其损伤劣化程度进行量化评估. 该方法以无损 Lamb 波信号为基准, 采用动态时间规整(dynamic time warping, DWT)算法对损伤信号进行相似匹配分析对比, 确定基准信号与损伤信号的最佳匹配路径. 引入 SC 的轮廓识别方法对 Lamb 波的局部波形信息进行统计分析, 以波形形状距离代替传统欧氏距离匹配方法, 解决 DTW 相似匹配中的病态对齐问题. 最后, 将无损 Lamb 波与损伤 Lamb 波信号间 SC-DTW 匹配距离作为损伤程度的量化指标, 采用随机闭合裂纹的有限元仿真模型和铝板弯折实验对所提出方法进行验证, 结果表明, 基于 Lamb 波 SC-DTW 的损伤量化指数对铝板早期裂纹具有较高的敏感性和较好的量化表征能力. 该方法无需对波包进行识别, 也不必进行复杂的特征提取, 具有简单高效和抗噪声能力强等优点, 在金属板服役性能评估与质量控制中有较好的实用性和推广价值.

关键词: 质量控制; 微损伤; 超声导波检测; 动态时间规整; 形状上下文; 损伤量化

中图分类号: TH17; TB534.3

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0480

引用格式: 刘小峰, 王邦昕, 柏林, 等. 基于超声导波 SC-DTW 的金属板微损检测方法[J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2619-2626.

Detection of micro-damage in metal plates based on SC-DTW of guided waves

LIU Xiao-feng[†], WANG Bang-xin, BO Lin

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming to the quality control and service performance evaluation of metal plates, a dynamic time warping of guided waves method based on shape context is proposed to quantify the micro-damage in aluminum plates. Using the Lamb wave signal of the intact metal plate as the baseline, the dynamic time warping (DWT) algorithm is applied to match the damage signal to the baseline so as to determine the optimal warping path. The shape context (SC) contour recognition method is introduced to statistically analyze the local waveform information of Lamb waves. The shape distance of waveform is used to replace the traditional Euclidean distance, and the ill alignment problem in the DTW similarity matching is solved. Finally, the SC-DTW matching distance between damaged signal and baseline is used as a quantitative index to describe the damage degree. The finite element simulation model of random closed cracks and bending test of aluminum plates are used to verify the proposed method. The results show that the damage quantification index based on the Lamb wave SC-DTW has high sensitivity and good quantitative characterization ability for the early crack of the aluminum plate. This method does not need to identify the wave packet, and does not need to deal with the feature extraction, which has the advantages of simplicity, high efficiency and strong anti-noise ability, and has good practicability and popularization value in the quality control and service performance evaluation of metal plates.

Keywords: quality control; micro-damage; guided waves detection; dynamic time warping; shape context; damage to quantify

0 引言

金属板材是工业装备的主要用材, 其质量控制水平直接决定了装备产品的整体质量水平. 服役性能

测试与损伤检测是质量控制的主要技术手段, 检测金属板材的早期微损伤并测定其劣化程度, 对保证金属板材结构的服役安全性、避免事故发生具有重要的

收稿日期: 2021-03-22; 录用日期: 2021-07-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975067, 51675064); 国家重点研发计划项目(2018YFB2001400).

[†]通讯作者. E-mail: liuxfeng0080@126.com.

意义. 超声导波技术因其单端激励、传播时衰减慢、传播距离远、完全横截面检测等特点, 在长距离大范围结构无损检测和健康监测中显示出良好的应用前景^[1-3]. 但是, 受制于理论与仪器技术, 目前大部分超声导波应用仅局限在缺陷筛查方面, 超声导波的定量化检测技术尚未得到广泛研究和应用.

目前, 基于超声导波的结构损伤量化分析方法, 主要采用接受信号波形变化参数对结构损伤程度进行表征, 包括导波投射系数(透过损伤后的波形幅值与无损情况幅值的比值)^[4-5]、损伤反射系数^[6]、时间差值法^[7]及时频分析法^[8]等. Li^[9]通过轴向传感器阵列获得的多组数据, 运用二维盲卷积方法估计轴向缺陷的大小. 郑国军等^[10]采用基于 Gabor 字典的匹配追踪算法分解出缺陷前后端信号, 并通过该信息计算轴向缺陷的大小. Tse 等^[11]根据缺陷回波的特点, 将两个相互重叠的 Gabor 原子构造成新的匹配原子, 通过优化两个 Gabor 之间的距离估计缺陷的轴向大小. 这些方法需要对损伤波包进行识别, 但早期的结构损伤受检测环境影响缺陷信号十分微弱, 且信噪比较大, 增大了缺陷波包的识别难度, 同时导波的频散与多模态性也使得实际的导波检测信号往往非常复杂, 很难对信号波形进行正确解读, 提取出有用的损伤程度.

采用时间反转聚焦方法^[12]、相控聚焦方法^[13]、虚拟反转聚焦法^[14]可以有效提高信噪比、增强缺陷信号, 但这些技术实际操作步骤复杂, 且在聚焦过程中容易出现其他杂波, 影响检测结果. 为了能够自动获取 Lamb 波检测信号中的结构损伤程度信息, 文献^[15]结合遗传算法与 Lamb 波散射模型识别结构中损伤的位置和程度. Qian 等^[16]使用神经网络模型得到了幅值损伤指数和相损伤指数以评价增强聚合物复合材料的损伤效果. 这类基于神经网络的方法需要以大量检测数据为支撑, 但在工程实践中, 结构监测的正常数据较多而损伤数据较少, 从而限制了该技术的实际应用.

针对以上问题, 本文提出一种基于形状上下文-动态时间规划(shape context-dynamic time warping, SC-DTW)的铝板损伤量化分析方法. 该方法无需缺陷波包的提取识别、复杂信号增强处理及大量损伤数据支持, 具有较好的噪声鲁棒性和损伤演化敏感性, 在金属板材质量控制领域具有较好的应用前景.

1 Lamb波在金属板中传播模型

导波检测的窄带激励信号 $g(t)$, 在无损板中正向传播至距离 x 后到达信号接收点, 产生的时间

延迟为 x/c_p (c_p 为相速度). Lamb 波的频散特性使 c_p 随着激发频率的变化呈函数关系变化, 即 $c_p = k(\omega)x/w$, $k(\omega)$ 为波数函数. $h(t)$ 在板中传播时其频谱 $G(\omega)$ 产生的相移为 $e^{-jk(\omega)x}$, 接收到的 Lamb 波包的频域表达式^[17]为

$$s_x(\omega) = \frac{A_x}{\sqrt{k(\omega)x}} G(\omega) e^{-jk(\omega)x}. \quad (1)$$

假设金属板中存在点源损伤, 激发点到损伤点的距离为 x_1 , 损伤点到接收点的距离为 x_2 , 不考虑导波模态转化效应, 则接收点测得的信号可表示为

$$s_x(\omega) = \frac{A_{x_1} B_{x_2}}{\sqrt{k(\omega)x_1 x_2}} G(\omega) e^{-jk(\omega)x_1 x_2}. \quad (2)$$

其中: A_{x_1} 为激励源到缺陷散射源间的幅值响应, B_{x_2} 为缺陷点源到接收点间的幅值响应. 比较式(1)和(2)可知, Lamb 波与缺陷交互作用过程中会出现波包伸缩变形、幅值变化、频谱相移, 使信号的信噪比和时域分辨率变差, 并且随传播距离的增加而加剧. 因此, Lamb 波损伤信号相对无损信号波形变化和幅值变化可作为实现缺陷定位和尺寸度量的基础.

2 SC-DTW 损伤量化检测方法

2.1 基于形状上下文的 Lamb 波信号相似匹配

形状上下文是一种良好的局部形状描述因子, 能够对多个维度的波形畸变进行描述, 可用于提取损伤与材料因素引起的 Lamb 波幅值、相位、频率等维度的变化特征. 形状上下文描述子^[18]的核心思想是: 选取目标形状轮廓中一定数量的点, 通过计算该点到其周围点的角度和距离构建空域关系上的上下文特征矩阵, 然后根据不同目标形状之间的矩阵匹配度判断两幅图像是否属于一类或者相互匹配. 对于一个 Lamb 波信号上的一组离散采样点集合 $X = \{x_i = 1, 2, \dots, m\}$, 以其中任意一点 x_i 为圆心、定值 R 为半径的范围内按对数距离建立 p 个同心圆, 然后以水平向右为正方向逆时针按角度等分为 q 个部分, 共形成 $p \times q$ 个区域(bin), 统计除参考点 x_i 外, 其他点落入各个 bin 内的个数, 获得统计直方图, 则 X 上点 x_i 的形状直方图为

$$h_i(k) = \#\{x_j \neq x_i \ \& \ x_j \in \text{bin}\{l\}\}, \\ i \neq j, 1 \leq l \leq pq. \quad (3)$$

其中 $\#$ 代表集合的势. 为了获得 X 上所有形状直方图信息, 将 X 上的所有离散点分别作为参考点, 依次计算该参考点与剩下 $m-1$ 个离散点的直方图, 最终得到 X 上的 m 个直方图, 可以用 $m(m-1)$ 大小的矩阵表示 X 上的形状上下文信息.

同理, 对于 Lamb 波信号 $Y = \{y_j | j = 1, 2, \dots, n\}$,

可以用 $n(n - 1)$ 大小的矩阵表示 Y 上点 y_j 的形状上下文信息. 设 Y 上点 y_j 的形状直方图为 $h_j(k)$, 点 x_i 与点 y_j 的形状距离可记为

$$C_{ij} = C(x_i, y_j) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{pq} \frac{[h_i[k] - h_j(k)]^2}{h_i(k) + h_j(k)}. \quad (4)$$

C_{ij} 越小, 表示离散点 x_i 与 y_j 附近的波形相似匹配度越大; C_{ij} 越大, 表示离散点 x_i 与 y_j 附近的波形相似匹配度越小.

2.2 基于DTW的最优路径匹配

DTW 是一种基于动态规划的模板匹配算法, 具有高效和抗噪能力强的优点^[19]. 对于 X 与 Y 两个信号时间序列, DTW 算法的核心是计算 X 与 Y 中各采样点之间的对应关系, 确定规整路径.

如图1所示, 将 X 与 Y 两个信号序列按照时间位置排列, 构造 $m \times n$ 矩阵 $A_{(m \times n)}$. 在传统的 DTW 中, 矩阵 $A_{(m \times n)}$ 中每个元素定义为 $a_{ij} = d(x_i, y_j) = |x_i - y_j|$, 表示点 x_i 与点 y_j 之间的距离. 在 $A_{m \times n}$ 中, X 与 Y 相对应的的时间变化可以由下列时间规整函数表示:

$$f = w(1), w(2), \dots, w(k), \dots, w(K). \quad (5)$$

其中: $\max a(n, m) \leq K \leq m + n - 1$; $w(k) = a_{ij}(k)$ 为 k 次匹配时, X 中采样点 x_i 与 Y 中采样点 y_j 的比较; $w(k)$ 为 $i-j$ 平面上的一个点, 随参数 k 在 $i-j$ 平面上移动形成一条曲线, 称为 X 与 Y 的“匹配路径”. X 与 Y 进行匹配的过程中, f 应满足如下约束条件^[20]:

- 1) 单调性, $i_k \geq i_{k-1}, j_k \geq j_{k-1}$;
- 2) 连续性, $i_k - i_{k-1} \leq 1, j_k - j_{k-1} \leq 1$;
- 3) 边界条件, $i_1 = j_1 = 1, i_K = m, j_K = n$.

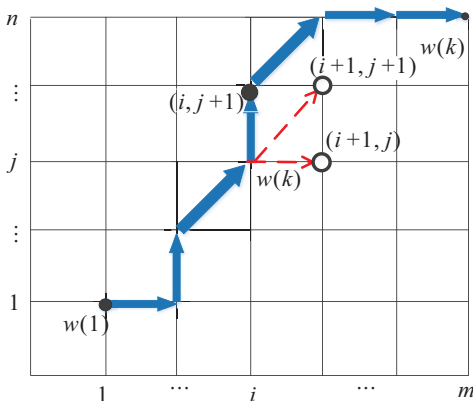


图1 路径规整原理

为了找到最优的规整路径, 每次选择路径只能有3个限定的相邻方向, 则 $w(k + 1)$ 经过的路径点必须是 $(i + 1, j)$ 、 $(i, j + 1)$ 和 $(i + 1, j + 1)$ 中的一个, 如图1所示. 根据动态规划思想找到一条累积距离最小

的路径作为 X 与 Y 的最佳规划路径, 即

$$\begin{cases} D\{1, 1\} = a_{11}, \\ D\{i, j\} = a_{ij} + \min\{D\{i + 1, j + 1\}, D\{i, j + 1\}, \\ D\{i + 1, j\}\}. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $i = 2, 3, \dots, m; j = 2, 3, \dots, n$; $A_{m \times n}$ 中最佳规划路径的累加值为 $D(m, n)$, 即为两个序列的 DTW 匹配距离.

2.3 SC-DTW 算法

DTW 中规整路径的计算精度取决于两个序列相似度的测算, 传统 DTW 算法测算的是两个序列任意样点之间的相似度, 局部波形信息往往被忽略, 因此, 根据相似度计算的可信度必然降低. SC-DTW 算法用形状上下文取代标准 DTW 算法中的欧氏距离, 从而实现波形特征的正确匹配.

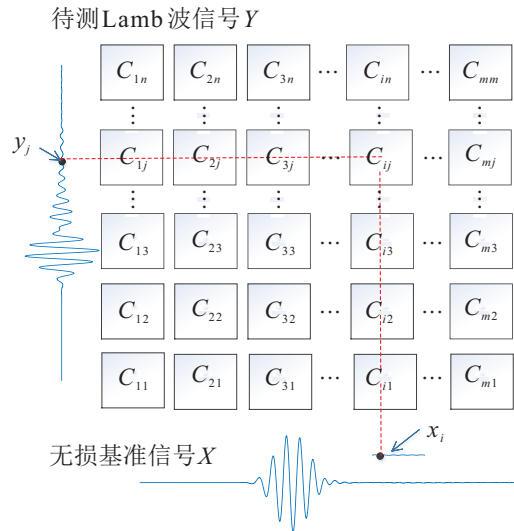


图2 代价矩阵的建立

采用式(2)中的 C_{ij} 代替传统 DTW 中 $A_{m \times n}$ 的元素 a_{ij} , 由此建立如图2所示的 X 与 Y 间的上下文代价矩阵 C . 采用 DTW 最优路径搜索方法, 在代价矩阵 C 中搜索出待测试的 Lamb 波信号 Y 与以无损状态下的 Lamb 波信号 X 作为模板矢量间的最优规整路径, 路径的起始点为 $w(1) = C_{11} = C(x_1, y_1)$, 终止点为 $w(K) = C(x_m, y_n)$. 由式(6)确定最优规整路径, 计算 X 与 Y 的累积代价函数, 将 X 与 Y 累积代价函数最小的值确定为 X 与 Y 间的 SC-DTW 距离, 有

$$D_{sc}(X, Y) = C_{11} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \min\{C(x_{i+1}, y_j), C(x_i, y_{j+1}), C(x_{i+1}, y_{j+1})\}. \quad (7)$$

对累积距离 $D_{sc}(X, Y)$ 进行归一化处理, 得到 Y 相对无损基准 X 的损伤指数, 即

$$D_{sc}(Y) = \frac{D_{sc}(X, Y) - \min\{DTW_{sc}\{X, Y\}\}}{\max\{DTW_{sc}\{X, Y\}\} - \min\{DTW_{sc}\{X, Y\}\}} \quad (8)$$

$D_{sc}(Y)$ 是衡量 Lamb 波信号 Y 与无损板 Lamb 波信号 X 间的差异性指标, 两个信号间的差异性越大, $D_{sc}(Y)$ 越大, 表征了 $D_{sc}(Y)$ 所对应的测试板的损伤程度, 反之亦然.

3 仿真模型验证

3.1 仿真模型描述

采用弹性材料建立 ABAQUS 有限元二维铝板仿真模型, 铝板材料参数为: $\rho = 2704 \text{ kg/m}^3$, $E = 6.86 \times 10^{10}$, $\nu = 0.33$, 铝板尺寸为 $400 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$, 如图 3 所示.

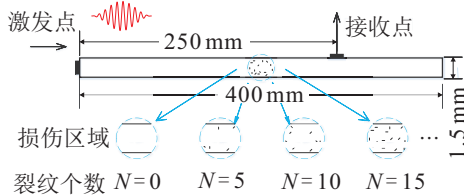


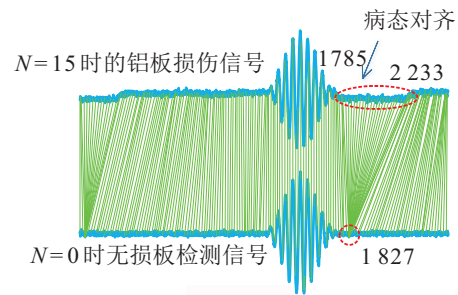
图3 铝板裂纹损伤仿真

铝板中间 $2 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的矩形区域内均匀分布 N 条角度与位置随机变化的接触式微裂纹, 裂纹面可以张开, 但不能相互穿透, 以模拟金属板早期裂纹损伤. 每个裂纹长度均为 $2a$, 定义裂纹密度 $c = Na^2/L$. 影响裂纹随机分布的变量为裂纹中心位置和裂纹角度, 均采用均匀随机概率密度函数. 如图 1 所示, 在铝板端面激发 S0 模态 Lamb 波, 距离激发点 250 mm 处接受检测信号. 激发的信号为汉宁窗调幅的正弦信号, 周期数为 10, 中心频率为 500 kHz . 信号激发与接受环境不变, 取裂纹数 N 分别为 0、5、10、20、30、40、50、100、150 与 200 共 10 组接收信号作为铝板不同损伤程度时的检测信号进行分析. 分析信号长度均为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}$, 采样频率为 25000 kHz .

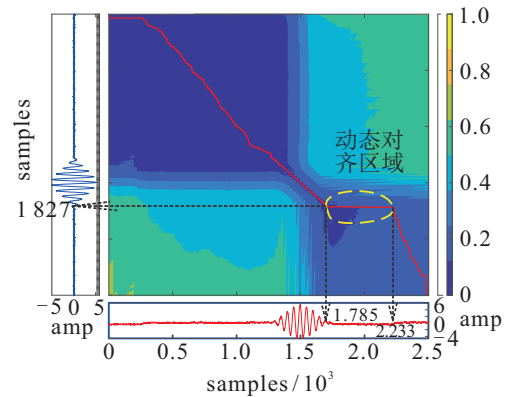
3.2 基于 SC-DTW 的 Lamb 信号匹配

取裂纹个数 $N = 0$ 时铝板仿真模型产生的无损 Lamb 波信号为基准信号, 分析其与 $N = 10$ 时对应的损伤信号 DTW 匹配距离, 结果如图 4 所示. 可见, DTW 算法自动地将两个信号中的次生复杂散射波进行了对齐匹配, 但由于损伤信号的第 1785 点至 2233 点与损伤信号的 1055 个点间的幅值欧氏距离相近, 图 4(a) 虚线圈内出现多点与单点间的病态对齐现象. 图 4(b) 给出了 DTW 距离矩阵色谱图, 颜色深浅表征两个离散点间的欧氏距离或幅值相近程度的大小. 在病态对齐情况下, 路径匹配寻优时往往仅选择某一个方向, 表现出如图 4(b) 中较长的水平或竖直的

路径, 进而影响匹配路径的寻优效果, 使得基于 SC-DTW 的损伤指数失真.



(a) DTW对齐



(b) 距离矩阵色谱图

图4 Lamb信号传统DTW匹配

传统的 DTW 是基于幅值点欧氏距离最短原则进行匹配的, 忽略了采样点附近的波形形状信息, 而波形形状往往是损伤信息的重要表征. 针对该问题, 本文引入形状上下文方法对 Lamb 波信号中任意一个离散点周围的局部形状信息进行提取, 并由式 (1) 计算其形状直方图, 如图 5 所示. 在图 5(a) 中, 以给定的 Lamb 信号上的任意采样点 a_i 为圆心、10 为外圆半径建立 5 个等距同心圆, 5 个同心圆按角度各分为 12 等份, 记录除 x_i 外其他采样点在 12×5 个空间栅格的分布情况作为 x_i 的特有属性, 称为采样点 x_i 的形状上下文. 依次计算每个区域内的采样点个数, 将统计得到的采样点数量分布信息存入与采样区域一一对应的 5×12 轮廓分布矩阵中, 得到如图 5(b) 所示的形状直方图. 图 5(b) 中颜色越深的部分表示该区域分布的采样点越多, 在 $r_4 \sim r_5, 300^\circ \sim 330^\circ$ 的栅格 (图 5(a) 中阴影部分区域) 内黑色离散点转换成图 5(b) 中的采样分区内的灰度方块, 以表示 x_i 附近波形形状分布情况.

在每个离散点形状直方图的基础上, 由式 (4) ~ (6) 确定的最优匹配路径得到的损伤信号与无损信号匹配结果如图 6 所示. 可见, 病态对齐的现象已经得到了抑制, 以形状上下文的相似性代替传统的幅值欧氏距离能够更准确地实现信号的波形特征匹配.

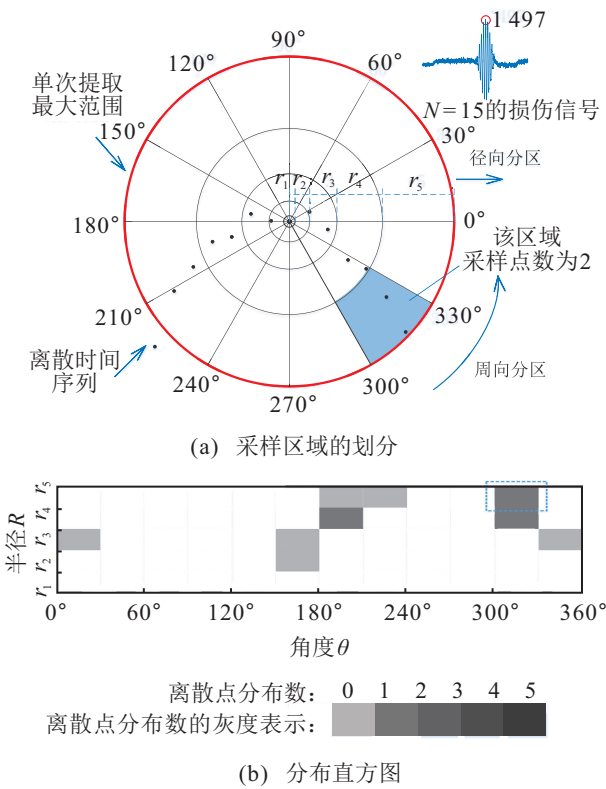
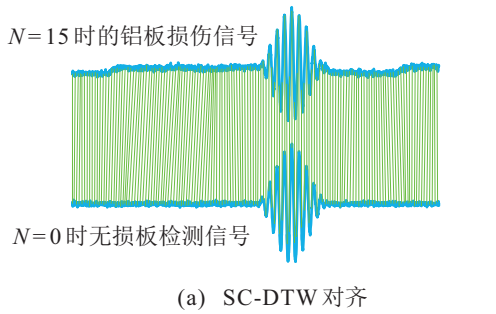
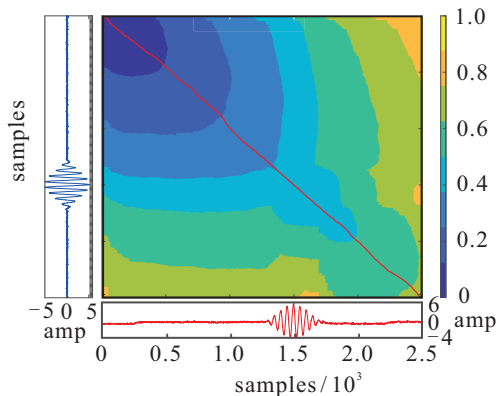


图5 形状上下文信息提取



(a) SC-DTW 对齐



(b) SC-DTW 匹配路径

图6 Lamb信号SC-DTW匹配

3.3 基于SC-DTW方法的损伤量化

在图6所示SC-DTW信号匹配的基础上,由式(7)得到的损伤信号与无损信号的SC-DTW距离为13263.85,损伤信号对应的损伤指数 D_{sc} 为0.2583.同理,以无损信号作为基准,分别计算不同裂纹个数时损伤信号的损伤指数,得到不同裂纹密度 c 对应

的Lamb波信号损伤指数 D_{sc} 如图7所示. D_{sc} 随着 c 的增加基本呈线性递增的趋势,铝板的早期裂纹损伤一般可采用Lamb波非线性参数^[21]来表征,即

$$\beta = A_2/A_1, \tag{9}$$

其中 A_1 、 A_2 分别接受Lamb波信号中基波与二次谐波幅值.图7也给出了 β 随裂纹密度的变化关系,可以看出,所提出的损伤指数和 β 都与裂纹密度有较好的线性相关性,相较于 β , D_{sc} 在线性拟合直线周围的分布更加均匀,对早期裂纹更加敏感.

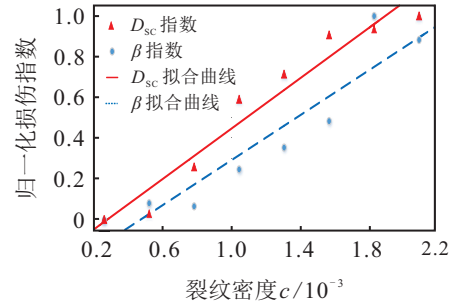
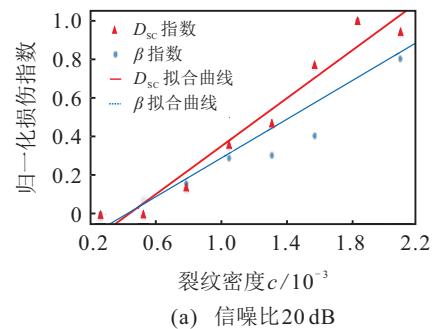
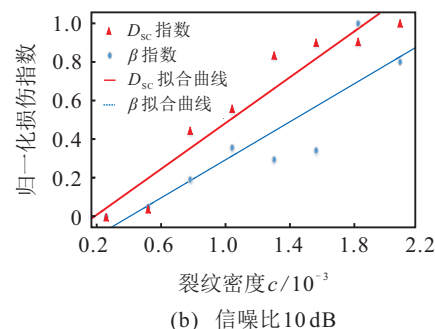


图7 仿真模型损伤评估结果

为了进一步验证所提出方法对噪声干扰的鲁棒性,对10个仿真模型产生的Lamb波信号中加入统一信噪比的白噪声,得到20 dB与10 dB两组噪声干扰后的Lamb波信号,采用 D_{sc} 与噪声干扰情况下不同裂纹密度的铝板损伤程度进行量化表征,结果如图8所示.可以看出,二次谐波幅值由于受噪声影响严重,指数噪声干扰情况下波动幅值加大,噪声干扰越严重信噪比越低,对损伤状态的追踪能力越弱.由图8(b)可见,在强噪声干扰下,噪声幅值几乎完全掩盖了二次谐波幅值,造成对裂纹损伤程度的表征失效.但是,在



(a) 信噪比20 dB



(b) 信噪比10 dB

图8 噪声干扰下的仿真模型损伤评估结果

不同强度的噪声干扰情况下, D_{sc} 曲线仍然具有较好的单调性和趋势性, 验证了该指数对于铝板早期裂纹损伤表征的噪声鲁棒性.

采用下述式(10) R-square 指数^[22] 和式(11) 皮尔逊相关系数^[23] 对图7、图8中的损伤指数与 c 的线性相关性进行评估, 结果如表1所示. 可见, 无论是在无噪情况下还是在噪声干扰情况下, D_{sc} 都具有更好的线性度和相关度, 表明 D_{sc} 有更稳定的损伤表征能力.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}, \quad (10)$$

$$P = \frac{\text{Cov}(y, \hat{y})}{\sqrt{\text{Var}[y]\text{Var}[\hat{y}]}}. \quad (11)$$

其中: y 为计算得到的损伤指数, \hat{y} 为线性拟合值.

表1 仿真模型损伤指数与裂纹密度的线性相关性

方法	信噪比	R^2	P
D_{sc}	未加噪	0.9445	0.9719
	20 dB	0.9523	0.9759
	10 dB	0.913	0.9555
β	未加噪	0.8783	0.9372
	20 dB	0.8052	0.9127
	10 dB	0.8015	0.8952

4 实验应用

取材料为 Al-6061, 尺寸为 2400 mm × 20 mm × 2 mm 的铝板进行弯折损伤测试实验. 对铝板进行循环弯折加载, 弯折点在试件中轴位置. 将铝板加载使其逆时针弯曲 90° 保持 5 s, 然后反转加载使其顺时针弯曲 180° 保持 5 s, 此为一次循环加载. 重复加载方式 10 次, 工件每次弯折加载后进行一次 Lamb 检测, 检测装置的配置如图9所示. 激发信号通过信号发生器 AFG3102 生成正弦激发信号, Lamb 波激发中心频率为 200 kHz, 由于循环的周期数较小有可能越过微小的裂纹, 需选择距加窗截断后 60 个周期的正弦信号, 激发点和接收点位于中点两侧 50 mm 处. 信号生成后经过 AG 系列功率放大器放大信号, 再由激光头 PSV-500 获取 Lamb 波检测信号, 保存至 PC 机中.

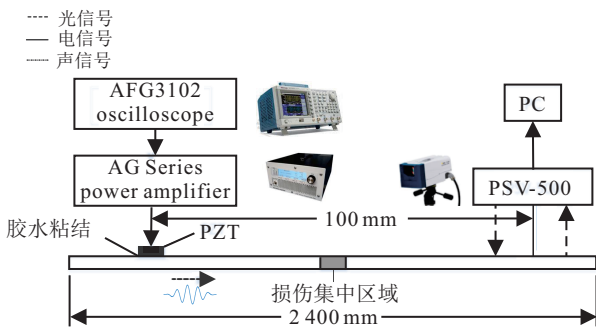
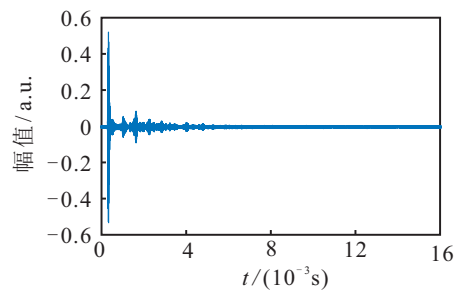
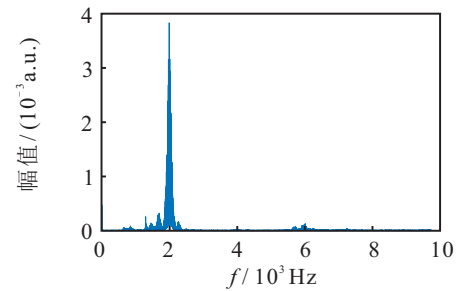


图9 实验装置

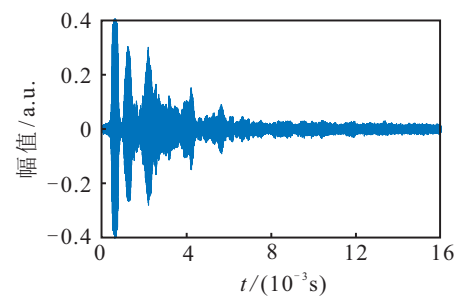
实验激发信号的中心频率为 200 kHz, 采样频率为 7800 kHz, 每个检测信号长度为 30 ms. 图10给出了弯折前无损信号与弯折加载4次后损伤信号时域波形与频谱图. 可见, 无损信号的波形与损伤信号的波形存在明显差异, 损伤前后信号的频谱成分较复杂, 在噪声干扰情况下二次谐波并不明显. 以无损信号为基准, 采用 SC-DWT 方法计算弯折不同次数得到的检测信号与基准间的 SC-DTW 距离为 15017.87, 归一化后对应的损伤指数为 0.595 546. 实验中工件弯折9次后, 铝板基本已近疲劳失效, 以铝板未弯折前的无损信号作为基准, 对9组不同弯折次数得到的 Lamb 信号进行 SC-DTW 匹配距离计算, 结果如图11(a)所示. 时间规整距离随弯折次数的增加呈明显



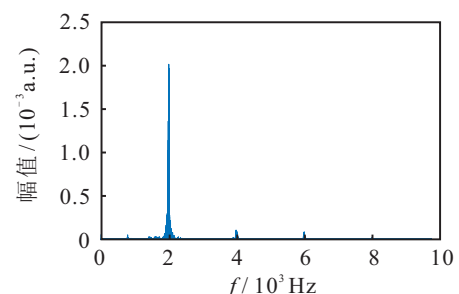
(a) 无损信号时域波形



(b) 无损信号频谱



(c) 弯折4次后时域波形

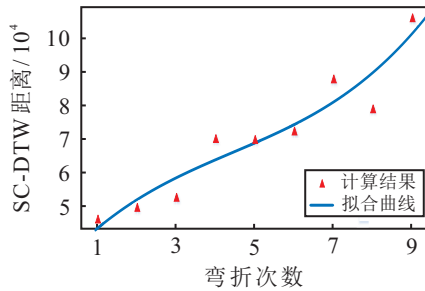


(d) 弯折4次后频谱

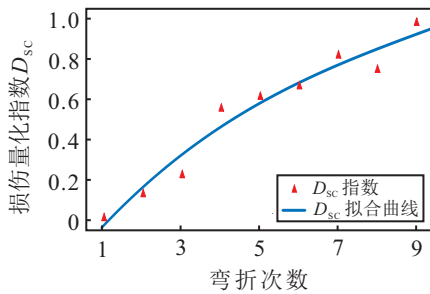
图10 实验信号

增加趋势,表明 SC-DTW 方法能够提取有效量化铝板弯折疲劳损伤程度。

由于人为或设备的噪声干扰,采集的 Lamb 波信号可能出现少量异常数据,同时采集信号数据点数过多,会影响 SC-DTW 算法的时效性,这里对各个采集信号进行降采样,将 12 500 个数据点压缩至 1 250 个数据点,继而计算降采样后信号的 D_{sc} ,结果如图 11(b) 所示. 采样点数量变化会使降采样后距离矩阵的维数随之减小,SC-DTW 距离随之减小,但 D_{sc} 的变化趋势保持不变,表明 D_{sc} 对 Lamb 波采样条件具有一定的鲁棒性,在实际应用工程中能降低 Lamb 波采集的硬件要求。



(a) 原始信号 SC-DTW 距离



(b) 降采样后的损伤指数

图 11 铝板损伤量化结果

为了进一步验证所提出 SC-DTW 方法的优越性,采用文献 [24] 的加权动态时间规整 (weighted dynamic time warping, WDTW) 方法代替所提出的 SC-DTW 方法,得到对应的损伤指数 D_w 如图 12 所示. 同时,图 12 也给出了不同弯折次数下的非线性参数 β 及其拟合曲线. 表 2 给出了各个损伤曲线的 R^2 指数与皮尔逊相关系数. 可见, D_w 对比其他两个损伤指数具有更好的单调性和趋势性,与弯折次数间具

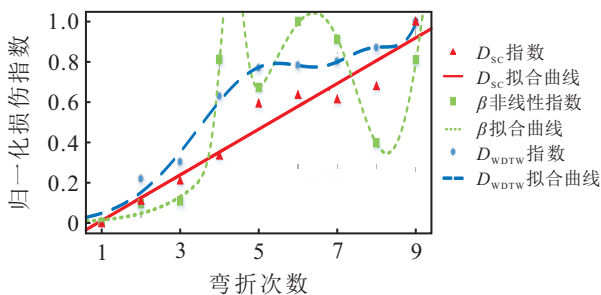


图 12 采用不同方法得到的损伤量化指数

有更好的线性相关性. β 受噪声影响严重,仅适合于早期损伤状态的量化,基于 SC-DTW 的 D_{sc} 比基于 WDTW 的 D_w 具有更大的 R^2 指数和皮尔逊系数,表明所提出的 D_{sc} 更能准确量化铝板的疲劳损伤程度。

表 2 实验铝板损伤指数与裂纹密度的线性相关性

方法	信噪比	R^2	P
D_{sc}	未加噪	0.944 5	0.971 9
	20 dB	0.952 3	0.975 9
	10 dB	0.913	0.955 5
D_w	未加噪	0.878 3	0.937 2
	20 dB	0.805 2	0.912 7
	10 dB	0.801 5	0.895 2

5 结论

本文引入了形状上下文的轮廓识别方法对 DTW 算法进行改进,实现了以波形相似度测量为基础的 Lamb 波信号匹配,消除了 DTW 方法在 Lamb 波信号匹配中的病态对齐现象. 在 SC-DTW 算法对 Lamb 波损伤信号与无损基准信号进行相似匹配的基础上,提出了铝板疲劳损伤的量化指数,该指数与铝板疲劳损伤程度具有较好的线性相关性,有效实现了铝板疲劳损伤的量化表征. 基于 SC-DTW 的损伤指数对早期裂纹损伤检测具有较高敏感性和良好抗噪性能,该技术无需对 Lamb 波检测进行损伤波包的识别与复杂的特征提取,计算简单高效,在金属材料在线质量控制和服役性能评估方面具有较好的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 何存富, 李子明, 刘增华, 等. 基于空间-频率-波数法的梁中分层缺陷定量检测[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 74-82. (He C F, Li Z M, Liu Z H, et al. Quantitative detection of lamination defect in beams based on space-frequency-wavenumber method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 74-82.)
- [2] 刘素贞, 权泽, 张闯, 等. 疲劳裂纹的电磁超声混频非线性检测[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1694-1703. (Liu S Z, Quan Z, Zhang C, et al. Nonlinear detection of fatigue cracks by electromagnetic ultrasonic mixing[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1694-1703.)
- [3] 黄平捷, 彭谢丹, 赵树浩, 等. 平板导电结构缺陷脉冲涡流和超声复合检测方法[J]. 控制与决策, 2019, 34(4): 743-750. (Huang P J, Peng X D, Zhao S H, et al. Pulsed eddy current and ultrasonic complex testing method for defect detection of planar conductive structures[J]. Control and Decision, 2019, 34(4): 743-750.)
- [4] Lowe M J S, Diligent O. Low-frequency reflection characteristics of the s0 lamb wave from a rectangular

- notch in a plate[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(1): 64-74.
- [5] 孙凯, 孟光, 叶林, 等. 基于超声导波的钢梁结构损伤大小识别研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(9): 227-231. (Sun K, Meng G, Ye L, et al. Damage size identification of thick steel beam based on ultrasonic guided wave[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9): 227-231.)
- [6] Lu Y, Ye L, Su Z Q, et al. Quantitative assessment of through-thickness crack size based on Lamb wave scattering in aluminium plates[J]. NDT & E International, 2008, 41(1): 59-68.
- [7] Hayashi T, Kawashima K. Single mode extraction from multiple modes of lamb wave and its application to defect detection[J]. JSME International Journal Series A, 2003, 46(4): 620-626.
- [8] 孟庆愿. 基于希尔伯特黄变换的板状结构健康检测的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013. (Meng Q Y. Research base on the Hilbert-Huang transform for health detection in plate structure[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.)
- [9] Li J. On circumferential disposition of pipe defects by long-range ultrasonic guided waves[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(4): 530-537.
- [10] 郑国军, 唐志峰, 王友钊, 等. 基于匹配追踪算法的超声导波管道轴向缺陷大小定量分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(4): 1-5. (Zheng G J, Tang Z F, Wang Y Z, et al. Evaluation of pipe axial defeat through the use of ultrasonic guided wave and matching pursuit[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(4): 1-5.)
- [11] Tse P W, Wang X J. Characterization of pipeline defect in guided-waves based inspection through matching pursuit with the optimized dictionary[J]. NDT & E International, 2013, 54: 171-182.
- [12] 邓菲, 吴斌, 何存富. 基于时间反转的管道导波缺陷参数辨识方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 18-24. (Deng F, Wu B, He C F. Time reversal guided wave defect identification method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8): 18-24.)
- [13] Davies J, Cawley P. The application of synthetically focused imaging techniques for high resolution guided wave pipe inspection[J]. AIP Conference Proceedings, 2007, 894(1): 681-688.
- [14] 符浩, 吴斌, 何存富. 基于虚拟时间反转聚焦的管道超声导波检测新方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 17-23. (Fu H, Wu B, He C F. Ultrasonic guided wave pipe inspection based on synthetic time-reverse method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(12): 17-23.)
- [15] 严刚, 周丽. 应用遗传算法和散射Lamb波的板结构损伤识别[J]. 振动工程学报, 2007, 20(3): 291-296. (Yan G, Zhou L. Damage identification for plate-like structure using genetic algorithms and scattered Lamb waves[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(3): 291-296.)
- [16] Qian C, Ran Y M, He J J, et al. Application of artificial neural networks for quantitative damage detection in unidirectional composite structures based on lamb waves[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(3): 168781402091473.
- [17] 鲁光涛. 基于兰姆波的薄壁结构损伤识别[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2017. (Lu G T. Damage identification of thin-plate-like structures based on lamb waves[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2017.)
- [18] Belongie S, Malik J, Puzicha J. Shape matching and object recognition using shape contexts[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(4): 509-522.
- [19] 刘小峰, 冯伟, 柏林. 考虑退化轨迹差异性与相似性的轴承RUL预测[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2833-2840. (Liu X F, Feng W, Bo L. Prediction of bearing remaining useful life involving difference and similarity of degradation trajectories[J]. Control and Decision, 2021, 36(11): 2833-2840.)
- [20] Li H H, Liu J X, Yang Z L, et al. Adaptively constrained dynamic time warping for time series classification and clustering[J]. Information Sciences, 2020, 534: 97-116.
- [21] Liu X F, Pu K Q, Bo L, et al. Quantitative estimation of nonlinearity parameter of noised lamb waves using a chaotic oscillator[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 438: 476-489.
- [22] Liu X F, Bo L, Liu Y L, et al. Detection of micro-cracks using nonlinear lamb waves based on the Duffing-Holmes system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 405: 175-186.
- [23] Pan H, You X M, Liu S, et al. Pearson correlation coefficient-based pheromone refactoring mechanism for multi-colony ant colony optimization[J]. Applied Intelligence, 2021, 51(2): 752-774.
- [24] Jeong Y S, Jeong M K, Omitaomu O A. Weighted dynamic time warping for time series classification[J]. Pattern Recognition, 2011, 44(9): 2231-2240.

作者简介

刘小峰(1980—), 女, 教授, 博士生导师, 从事工程信号处理、设备监测与故障诊断、智能测试与仪器等研究, E-mail: liuxfeng0080@126.com;

王邦昕(1997—), 男, 硕士生, 从事机械设备故障诊断、超声波检测及其信号处理的研究, E-mail: 302999517@qq.com;

柏林(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 从事信息挖掘与工程信号处理等研究, E-mail: bolin0001@aliyun.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)