第 42 卷 第 4 期
2021 年 4 月

仪 器 仪 表 学 报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 42 No. 4
Apr. 2021

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007289

基于加权时域弯折的 Lamb 波自适应温度补偿方法*

汪 懿[1],蔡 建[1],付尚琛[2],吴俊鹏[1],周智权[1]

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016;
2. 中国人民解放军陆军工程大学 电磁环境效应与光电工程国家级重点实验室 南京 210007)

摘 要:针对航空结构 Lamb 波损伤监测中急需解决的环境温度影响问题,本文提出了加权时域弯折(WTDW)的温度补偿方法,该方法无需先验参数或模型便可自适应补偿 Lamb 波信号中的温度影响,而且克服了传统动态时间弯折(DTW)容易抑制被补偿信号损伤信息的温度过补偿问题,从而更便于在 Lamb 波损伤监测中的实际应用。首先在 DTW 基本理论分析的基础上,研究了 WTDW 自适应温度补偿原理,然后结合线性频散信号构建频散补偿的损伤成像算法,提出了环境温度变化下基于 WTDW 的 Lamb 波高可靠性和高分辨损伤成像。最后的铝板(800 mm×650 mm×2 mm)实验结果表明,WTDW 能自适应补偿环境温度从室温(23℃)分别变为-20℃~50℃的影响,且基于 WTDW 的 Lamb 波高可靠性成像的损伤定位误差≤2.8 mm。

关键词: Lamb 波;温度补偿;时域弯折;损伤成像;高可靠性;高分辨率

中图分类号: TH878 TB55 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

An adaptive temperature compensation method of Lamb waves based on the weighted time domain warping

Wang Yi[1], Cai Jian[1], Fu Shangchen[2], Wu Junpeng[1], Zhou Zhiquan[1]

(*1. The State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environmental Effects and Electro-Optical Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China*)

Abstract: In Lamb wave damage detection of aircraft structure, it needs to address the problem of the environmental temperature influence. In this study, a weighted time domain warping (WTDW) temperature compensation method is proposed. Without any prior parameters or models, the temperature influence on Lamb wave signal can be adaptively compensated by WTDW. Furthermore, the temperature over-compensation problem of traditional dynamic time warping (DTW) that can easily suppress the defect information in the compensated signals is addressed. Therefore, WTDW is conveniently applied to the practical Lamb wave damage detection. Firstly, based on the fundamental theoretical analysis of DTW, the adaptive temperature compensation theory of WTDW is studied. Then, associated with the linearly-dispersive signal construction (LDSC) dispersion compensation damage imaging algorithm, the WTDW-based high reliability and high resolution damage imaging method under environmental temperature variances is proposed. Experimental results on an aluminum plate (800 mm×650 mm×2 mm) show that the proposed WTDW method can adaptively compensate the influences that the environmental temperature changes from the room temperature (23℃) to -20℃~50℃. And the damage location error of the WTDW-based Lamb wave high reliability imaging is less than 2.8 mm.

Keywords: Lamb waves; temperature compensation; time-domain warping; damage imaging; high reliability; high resolution

收稿日期:2020-12-24 Received Date: 2020-12-24

*基金项目:国家自然科学基金(51605223,52005509)、江苏省自然科学基金(BK20200586)、江苏高校优势学科建设工程项目资助

0　引　　言

Lamb 波损伤监测方法已成为最有效的航空结构健康监测方法之一[1-4],并已逐步开始工程应用。然而在实际应用中,航空结构服役环境的温度变化会影响传感器、胶层和被测结构的性质,使 Lamb 波监测信号发生损伤无关的额外改变[5]。这种环境温度影响会扰乱甚至淹没监测信号中的真实损伤信息,并最终降低损伤监测结果的可靠性。

针对 Lamb 波损伤监测中的环境温度影响问题,已提出多种补偿方法,具体可分为基准信号重构、信号规范化和信号数据库 3 类。其中,基准信号重构方法对已有 Lamb 波参考信号进行拉伸或尺度变换,以重新构建当前环境温度下的新基准信号来消除温度的影响[6-7]。而包括独立成分分析[8]和奇异值分解[9]在内的信号规范化方法则将环境温度和结构损伤同时视为 Lamb 波监测数据的影响源,并假设两者变化的趋势不同,从监测数据中分离出温度变化影响。信号数据库方法又分为两种:一种为从信号数据库中挑选出与当前环境温度最相配的参考信号来实现温度补偿的最佳参考信号选择方法[10];另一种则是利用信号数据库训练出考虑环境温度变化的损伤诊断模型以避免温度的影响[11-13]。上述方法取得了较好的研究成果,但大多数需要预先确定温度补偿的校准参数或模型,这一要求制约了实际应用。

动态时间弯折(dynamic time warping, DTW)是一种面向时域信号序列的自适应柔性规整方法[14]。该方法无需先验参数或模型,可直接根据当前诊断信号因环境因素引起的波形变化,对信号实施时域弯折的自适应环境补偿处理。目前在机电传动系统故障诊断中,DTW 已广泛用于消除旋转电机转速和载荷等工作环境变化对振动诊断波形的影响[14-15]。而在 Lamb 波损伤监测领域,目前仅有 Harly 等学者进行了初步研究[16],且在研究中未深入考虑传统 DTW 未合理限制信号时域弯折范围而导致的温度过补偿问题,该问题容易抑制甚至消除被补偿信号中的损伤信息,从而不利于该方法在 Lamb 波损伤监测中的应用。

为此,本文提出了能克服传统 DTW 温度过补偿问题的加权时域弯折(weighted time domain warping, WTDW)自适应温度补偿方法,并用于 Lamb 波线性频散信号构建(linearly-dispersive signal construction, LDSC)频散补偿的高分辨率损伤成像方法[17]中,以实现环境温度大范围变化情况下的高可靠性和高分辨率损伤成像。最后在铝板中进行了实验验证,结果证明了本文所提方法的有效性。

1　Lamb 波 WTDW 自适应温度补偿方法

1.1　DTW 温度补偿的基本原理

对于某一 Lamb 波参考信号序列 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_i,\cdots,x_N$ (其中 $1\leqslant i\leqslant N$)及其当前不同环境温度下采集的监测信号序列 $Y=\{y_1,y_2,\cdots,y_j,\cdots,y_M\}$(其中 $1\leqslant j\leqslant M$),环境温度变化的主要影响是改变了 Y 中各数据点的时域分布,这实际上就扰乱了 X 和 Y 在同一温度条件下各数据点之间的匹配映射关系,使 Y 的波形相比于 X 发生了局部时移甚至扭转变形。DTW 可根据 X 和 Y 之间因温度变化引起的波形差异确定最优时间弯折路径 P_{best}[16],然后按照 P_{best} 对 Y 各数据点重新进行时域规整,以恢复原本在相同温度下 X 和 Y 各数据点之间的匹配映射关系,从而消除温度对 Y 波形的时域影响,实现温度补偿。而且,DTW 无需像其他大多数温度补偿方法那样需要先验的校准参数或补偿模型,因此具备更有实际应用意义的自适应温度补偿能力。

DTW 自适应温度补偿的关键是求取最优弯折路径 P_{best},而时域弯折路径 P 实为一系列表征 X 和 Y 数据点之间配对映射关系的有序数对组成的序列,即:

$$P=\{p_1,p_2,\cdots,p_k,\cdots,p_K\} \tag{1}$$

其中,$1\leqslant k\leqslant K,\max\{N,M\}\leqslant K\leqslant N+M+1$,有序数对 $p_k=(i_k,j_k)$ 表示将 X 中第 i_k 个元素 x_{i_k} 与 Y 中第 j_k 个元素 y_{j_k} 相配对,$1\leqslant i_k\leqslant N,1\leqslant j_k\leqslant M$。有效的弯折路径 P 应该满足单调性和连续性的要求[14-16],即对于 $p_k=(i_k,j_k)$ 和 $p_{k+1}=(i_{k+1},j_{k+1})$,有 $i_{k+1}\geqslant i_k,j_{k+1}\geqslant j_k$,且 $i_{k+1}\leqslant i_k+1,j_{k+1}\leqslant j_k+1$,以防 DTW 改变 Y 各数据点的先后次序和连续性,确保 Y 的基本数据结构及其物理特性未变。同时,为了保证运算收敛,一般把 X 和 Y 的第一个点和最后一个点在 DTW 前后均分别保持配对关系,所以将 P 的边界性要求设定为 $p_1=(1,1),p_K=(N,M)$。

如果定义一个表征 X 和 Y 各数据点之间的距离矩阵 $\boldsymbol{D}_{N\times M}$,其矩阵元素为:

$$D(i,j)=\|x_i-y_j\|_2 \tag{2}$$

式中:$D(i,j)$ 表示 x_i 和 y_j 之间的欧氏距离,那么每个弯折路径 P 下对应有如下的全局累积距离:

$$R[P]=\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}D[p_k] \tag{3}$$

全局累积距离 $R[P]$ 越小,DTW 处理后的 Y 时域波形越逼近 X,故可基于 $R[P]$ 最小化这一标准寻找唯一的最优弯折路径 P_{best},即:

$$P_{best}=\arg\min_P\{R[P]\} \tag{4}$$

X 和 Y 之间存在众多有效的 P,且数目随着 X 和 Y 数据点数的增多急剧上升,所以常采用动态规划技术[14-16]

代替穷举法来求解式(4)。考虑上述P的单调性、连续性和边界性这3个约束条件,可将式(4)中$\min\{R[P]\}$的求取转变为如下的动态规划问题:

$$A(i,j)=D(i,j)+\min[A(i-1,j),A(i-1,j-1),A(i,j-1)] \tag{5}$$

其中,$A(i,j)$为P中$(1,1)\sim(i,j)$这部分路径的局部累积距离,且$A(1,1)=D(1,1)$,$\min[\,]$表示最小值选择运算。

由式(5)可从$A(1,1)$开始前向构建出累积距离矩阵$\boldsymbol{A}_{N\times M}$,其求得的最后元素$A(N,M)$即为最小全局累积距离$\min\{R[P]\}$。求得$\boldsymbol{A}_{N\times M}$后便可采用回溯法,在$\boldsymbol{A}_{N\times M}$中以$p'_{k-k}=(N,M)$为起点、$p'_{k=1}=(1,1)$为终点,并按如下迭代搜索方式反向确定出$P_{best}=\{p'_1,p'_2,\cdots,p'_k,\cdots,p'_K\}$。

$$\begin{cases}p'_k=(i'_k,j'_k)\\ p'_{k-1}=\underset{(i'_k-a,j'_k-b)}{\operatorname{argmin}}[A(i'_k-a,j'_k-b)]\end{cases} \tag{6}$$

其中,$(a,b)\in[(0,1),(1,0),(1,1)]$,$i'_k-a\geqslant 1$,$j'_k-b\geqslant 1$,$1\leqslant i'_k\leqslant N$,$1\leqslant j'_k\leqslant M$。

最后依次按照P_{best}中各有序数对$p'[k]=(i'_k,j'_k)$,将原始当前监测信号序列Y中第j'_k个元素$y_{j'_k}$指派为新信号序列中第i'_k个元素,得到:

$$Y_{\mathrm{DTW}}=\{y_{j'_1},y_{j'_2},\cdots,y_{j'_k},\cdots,y_{j'_K}\} \tag{7}$$

其中,Y_{DTW}为Y的DTW结果。在Y_{DTW}构建中如果发生Y中多个元素指派为Y_{DTW}中同一次序元素的情况,则应将Y_{DTW}中该次序的元素值设定为Y中被指派元素的平均值,从而使Y_{DTW}的元素数目与X相同。

值得注意的是,从P_{best}以及最终Y_{DTW}的求取过程可知,DTW未利用先验校准数据,而是直接根据当前监测信号序列Y及其参考信号序列X之间自身的波形变化情况来消除温度变化影响,故能实现自适应环境温度补偿。

1.2 WTDW方法

上述DTW实际是将环境温度变化视为Y和X之间波形差异的唯一因素,以两者波形的完全匹配作为自适应温度补偿最优目标的,其处理过程并未考虑对Y的时域弯折程度,即P_{best}的弯曲范围进行必要限制。而在Lamb波监测中,结构损伤也能影响Y和X之间的波形匹配性,且在两者之间产生额外的损伤散射波包,这种对应于散射波包从无到有的非线性波形差异易使P_{best}发生明显的局部弯曲。此时,如果直接根据P_{best}实施DTW,在温度补偿的同时也将抑制损伤散射波包,从而很可能削弱甚至消除监测信号中的损伤信息,导致损伤监测失败。针对这种温度过补偿问题,本文进一步提出了WTDW温度补偿方法。

WTDW方法的基本思想是通过加权约束P_{best}的弯曲范围来避免DTW的温度过补偿问题[18]。考察求取P_{best}时的动态规划式(5)可知,对于最小值选择算子$\min[A(i-1,j),A(i-1,j-1),A(i,j-1)]$中3个待选的局部累积距离:如选择$A(i-1,j)$或$A(i,j-1)$,则意味着$P_{best}$在$(i,j)$处将相对于$\boldsymbol{A}_{N\times M}$的对角线方向发生了弯曲;如选择$A(i-1,j-1)$,$P_{best}$将不会发生弯曲[18]。为了约束$P_{best}$的弯曲范围,可在这3个局部累积距离前添加权值以控制其选择的可能性,式(5)变为:

$$A(i,j)=D(i,j)+\min[w\cdot A(i-1,j),A(i-1,j-1),w\cdot A(i,j-1)] \tag{8}$$

式中:$w\geqslant 1$为调节P_{best}弯曲程度的权值系数。

式(8)中的最小值选择算子表明,w越大,选择$A(i-1,j)$和$A(i,j-1)$的可能性越低,P_{best}的弯曲范围越小。WTDW通过引入合适的权值系数w将P_{best}控制在合理的弯曲范围,这样对Y进行时域弯折自适应温度补偿的同时也保存了损伤信息,所以能克服DTW的温度过补偿问题。需要说明的是,应根据实际情况选择合适的w。w如果取值过小,则无法完全解决温度过补偿问题;反之,w如果取值过大,则对P_{best}的弯曲范围限制过多,将会降低WTDW的温度补偿效果,引发温度欠补偿问题。实际应用中通常根据经验或实际处理结果确定w的具体数值[19-20]。

2 基于WTDW的高可靠性损伤成像方法

本文把WTDW用于Lamb波LDSC频散补偿的高分辨率延迟叠加损伤成像方法[17]中,以消除环境温度变化的影响,增强高分辨率损伤成像结果的可靠性。对于由Q个压电片组成的稀疏阵列,假设$v1_{cd}(\mathrm{Ta}_1,t)$为当前环境温度Ta_1下,任两个压电片P_c和P_d($c\neq d$,$1\leqslant c,d\leqslant Q$)组成的压电片对$\mathrm{P}_{c-d}$中的Lamb波监测信号,其参考信号为另一环境温度$\mathrm{Ta}_0$下获取的监测信号$v0_{cd}(\mathrm{Ta}_0,t)$。考虑WTDW自适应温度补偿,将损伤散射信号求取为:

$$s_{cd}^{\mathrm{WTDW}}(\mathrm{Ta}_1,t)=v1_{cd}^{\mathrm{WTDW}}(\mathrm{Ta}_1,t)-v0_{cd}(\mathrm{Ta}_0,t) \tag{9}$$

其中,$v1_{cd}^{\mathrm{WTDW}}(\mathrm{Ta}_1,t)$为以$v0_{cd}(\mathrm{Ta}_0,t)$作为参考、对$v1_{cd}(\mathrm{Ta}_1,t)$进行WTDW自适应温度补偿处理的结果;$s_{cd}^{\mathrm{WTDW}}(\mathrm{Ta}_1,t)$为WTDW处理后的损伤散射信号。

为了消除Lamb波频散效应对$s_{cd}^{\mathrm{WTDW}}(\mathrm{Ta}_1,t)$分辨率的影响,通过理论计算或现场测量获取环境温度$\mathrm{Ta}_0$下铝板中所选Lamb波模式的波数曲线$K_0(\omega)$后[17],对$s_{cd}^{\mathrm{WTDW}}(\mathrm{Ta}_1,t)$进行基于$K_0(\omega)$的Lamb波LDSC频散补偿处理得到$s'^{\mathrm{WTDW}}_{cd}(\mathrm{Ta}_1,t)$。根据延迟叠加算法可把结构中任一点$O(x,y)$的能量值计算为:

$$E(x,y)=\left\{\frac{2}{Q(Q-1)}\sum_{c=1}^{Q}\sum_{d=c+1}^{Q}s'^{\mathrm{WTDW}}_{cd}[\mathrm{Ta}_1,t_{cd}(x,y)]\right\}^2 \tag{10}$$

其中,

$$t_{cd}(x,y)=[\sqrt{(x_c-x)^2+(y_c-y)^2}+\sqrt{(x_d-x)^2+(y_d-y)^2}]/c_{g0} \tag{11}$$

式中:$t_{cd}(x,y)$ 为监测信号从 P_c 经点 O 传播至 P_d 这一过程的传播时间;c_{g0} 为监测信号所选模式在环境温度 Ta_0 下传播时的群速度。

计算得到监测区域内所有点的能量值并作为图像的像素值,得到损伤成像结果,结果中能量较大的聚焦点对应为损伤点。由于成像前依次进行了 WTDW 自适应温度补偿和 LDSC 频散补偿,分别消除了环境温度变化和 Lamb 波频散效应对成像结果可靠性和分辨率的影响,故能在环境温度变化情况下高可靠地实现高分辨率损伤成像。

3　实验研究

3.1　实验说明

整个实验系统如图 1 所示,主要包括三综合环境试验系统、Lamb 波监测系统和被测的航空 2024 铝板。其中,Lamb 波监测系统中的波形发生与采集系统集成有波形发生卡、信号放大卡和数据采集卡[16],可分别实现 Lamb 波激励波形的产生以及传感信号的放大和采集功能,同时控制矩阵开关,使其根据事先确定的扫查策略控制所有激励和传感通道的通断。功率放大器增强激励信号以扩大 Lamb 波的监测范围。铝板尺寸为 800 mm×650 mm×2 mm,密度为 2 780 kg/m^3,泊松比为 0.33,弹性模量为 73.1 GPa。在铝板上表面布置有 8 个压电片(P_1~P_8)组成矩形稀疏阵列,如图 1 左下角的铝板放大图所示,并通过在表面粘接直径为 8 mm 的六边形螺母来模拟结构中的损伤 D。以压电阵列中心为坐标原点建立直角坐标系,则压电片和损伤的坐标如表 1 所示。铝板中心和右下角放置有两个热电偶温度计 T_1 和 T_2 以监测铝板实际温度。

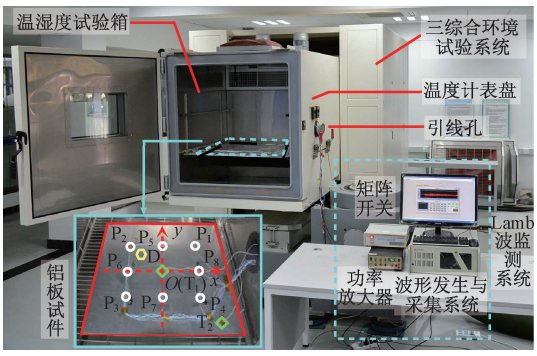


图 1　实验系统

Fig. 1　Experimental system

表 1　铝板中压电片和损伤的坐标

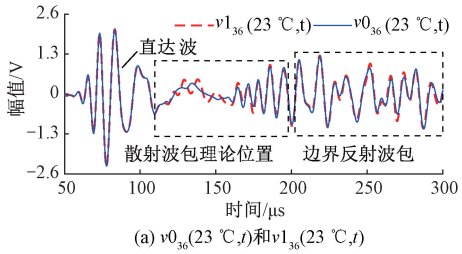
Table 1　The coordinates of PZTs and the damage

压电片	坐标/(mm, mm)	压电片/损伤	坐标/(mm, mm)
P_1	(200, 150)	P_6	(-200, 0)
P_2	(-200, 150)	P_7	(0, -150)
P_3	(-200,150)	P_8	(200, 0)
P_4	(200, -150)	D	(-150, 60)
P_5	(0, 150)		

为了模拟环境温度变化情况,将健康状态下的铝板放入三综合环境试验系统的温湿度试验箱中,并将箱内温度 Ta_1 设置为以 5℃的步长在-20℃~50℃范围内逐级变化。依次采集各温度 Ta_1 下铝板压电阵列的 Lamb 波健康信号 $v0_{cd}(Ta_1,t)$(其中 $c\neq d$,$1\leqslant c,d\leqslant 8$)后,再在室温 $Ta_0=23$℃下分别采集铝板的健康信号 $v0_{cd}(23℃,t)$ 和损伤信号 $v1_{cd}(23℃,t)$。Lamb 波激励信号为 1.5 波峰正弦调制信号,中心频率选为 75 kHz,使结构中产生的监测信号以 A_0 模式为主。信号采样率为 10 MHz,采集点数为 20 000 个。

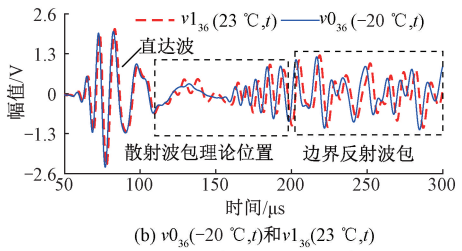
3.2　WTDW 的自适应温度补偿效果

考虑数据处理的便利性,统一以室温 $Ta_0=23$℃下的损伤信号 $v1_{cd}(23℃,t)$ 作为温度补偿时的参考信号、以温湿度试验箱中不同温度 Ta_1 下的健康信号 $v0_{cd}(Ta_1,t)$ 作为当前监测信号,对 $v0_{cd}(Ta_1,t)$ 进行 WTDW 自适应温度补偿处理,处理中根据实际情况将权值系数设为 $w=1.015$。以-20℃下 P_{3-6} 中的健康信号 $v0_{36}(-20℃,t)$ 为例,其温度补偿情况如图 2 所示,图中为了便于对比,也随同给出参考信号 $v1_{36}(23℃,t)$。



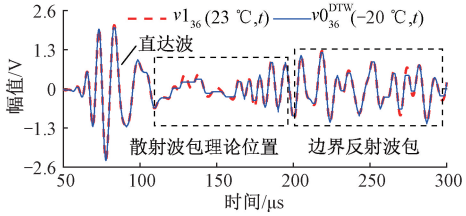
(a) $v0_{36}(23℃,t)$和$v1_{36}(23℃,t)$

(a) $v0_{36}(23℃,t)$ and $v1_{36}(23℃,t)$



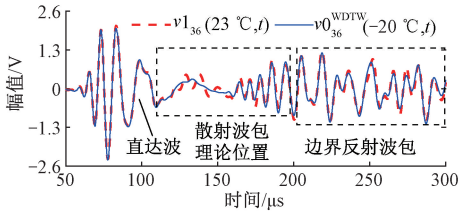
(b) $v0_{36}(-20℃,t)$和$v1_{36}(23℃,t)$

(b) $v0_{36}(-20℃,t)$ and $v1_{36}(23℃,t)$



(c) $v0_{36}^{DTW}(-20\ ℃,t)$和$v1_{36}(23\ ℃,t)$

(c) $v0_{36}^{DTW}(-20\ ℃,t)$ and $v1_{36}(23\ ℃,t)$



(d) $v0_{36}^{WTDW}(-20\ ℃,t)$和$v1_{36}(23\ ℃,t)$

(d) $v0_{36}^{WTDW}(-20\ ℃,t)$ and $v1_{36}(23\ ℃,t)$

图 2 −20℃下 P_{3-6} 中 Lamb 波健康信号 $v0_{36}(-20℃,t)$ 的自适应温度补偿情况

Fig. 2 Adaptive temperature compensation results of Lamb wave health signal $v0_{36}(-20℃,t)$ measured by P_{3-6}

图 2(a)为 23℃室温下采集的 $v0_{36}(23℃,t)$ 和 $v1_{36}(23℃,t)$，相同的环境温度使两者波形一致，只是在损伤散射波包理论位置所在的时域区间(约 120 ~ 190 μs)出现了损伤引起的波形差异。当环境温度降至−20℃时，跨度 43℃的大范围温度变化严重影响了 $v0_{36}(-20℃,t)$ 各数据点的时域分布，使其波形明显偏离 $v1_{36}(23℃,t)$，如图 2(b)所示。$v0_{36}(-20℃,t)$ 的 DTW 温度补偿结果 $v0_{36}^{DTW}(-20℃,t)$ 如图 2(c)所示，其波形与 $v1_{36}(23℃,t)$ 基本吻合，这说明 $v0_{36}^{DTW}(-20℃,t)$ 中的温度变化影响得到消除。但在损伤散射波包理论位置处，$v0_{36}^{DTW}(-20℃,t)$ 出现了波形被强行拉直的“奇异”现象，如图 2(c)中 150 μs 附近的 $v0_{36}^{DTW}(-20℃,t)$ 所示，这主要是因为 DTW 的 P_{best} 在这些时域位置处存在不合理的局部过大弯曲(图 3)，从而过度弯折 $v0_{36}^{DTW}(-20℃,t)$ 以逼近原本温度未变情况下波形就不一致的 $v1_{36}(23℃,t)$，这种温度过补偿问题会减小 $v0_{36}^{DTW}(-20℃,t)$ 和 $v1_{36}(23℃,t)$ 之间损伤引起的波形差异，削弱损伤信息。而 WTDW 基于权值系数 $w = 1.015$，合理限定了 P_{best} 的弯曲范围，从而避免了 P_{best} 在上述时域位置处的局部过大弯曲，如图 3 所示。由图 2(d)所示的 WTDW 自适应温度补偿结果 $v0_{36}^{WTDW}(-20℃,t)$ 可看到，WTDW 不仅补偿了 $v0_{36}^{WTDW}(-20℃,t)$ 在整个时域范围内因温度变化造成的波形变化，而且保留了损伤引起的波形差异。这说明 WTDW 有效解决了 DTW 过补偿问题，使 $v0_{36}^{WTDW}(-20℃,t)$ 和 $v1_{36}(23℃,t)$ 波形基本恢复为图 2(a)中相同温度下监测信号波形的理想匹配情况。

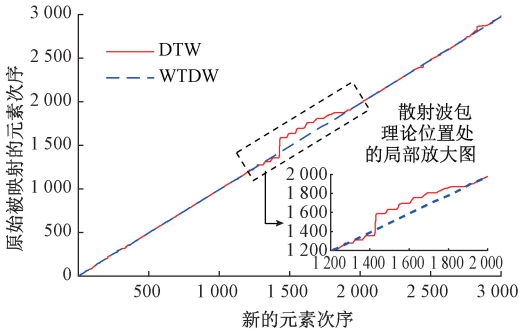
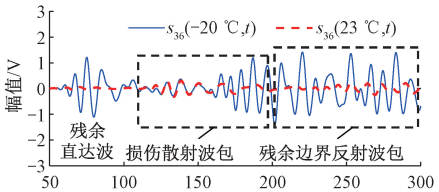


图 3 对 $s_{36}(-20℃,t)$ 进行 DTW 和 WTDW 处理时的最优弯折路径

Fig. 3 Optimal warping paths of DTW and WTDW performed for $s_{36}(-20℃,t)$

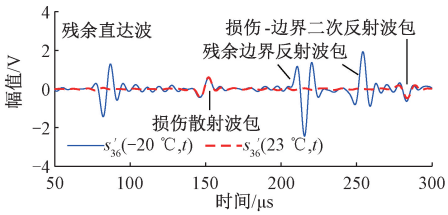
对图 2 中的损伤信号 $v1_{36}(23℃,t)$ 和各健康信号 $v0_{36}(23℃,t)$、$v0_{36}(-20℃,t)$、$v0_{36}^{DTW}(-20℃,t)$ 或 $v0_{36}^{WTDW}(-20℃,t)$ 分别进行信号差运算，可以依次得到监测温度保持为室温 $Ta_0 = 23℃$ 时的理想损伤散射信号 $s_{36}(23℃,t)$，当前监测温度 Ta_1 变为−20℃时的原始损伤散射信号 $s_{36}(-20℃,t)$ 及其 DTW 和 WTDW 自适应温度补偿结果 $s_{36}^{DTW}(-20℃,t)$ 和 $s_{36}^{WTDW}(-20℃,t)$。再利用 Ta_0 下铝板中 A_0 模式的理论波数曲线对这些散射信号进行 LDSC 频散补偿处理，分别得到 $s'_{36}(23℃,t)$、$s'_{36}(-20℃,t)$、$s'^{DTW}_{36}(-20℃,t)$ 和 $s'^{WTDW}_{36}(-20℃,t)$。由于未进行温度补偿处理，$v0_{36}(-20℃,t)$ 和 $v1_{36}(23℃,t)$ 共有的 A_0 模式直达波和边界反射波包存在明显的波形差异(如图 2(b)所示)，经信号差运算后仍大量残余在 $s_{36}(-20℃,t)$ 中，并与损伤散射波包相混叠，如图 4(a)所示。尽管经 LDSC 频散补偿增强信号分辨率后，$s'_{36}(-20℃,t)$ 中原先频散扩展的残余信号波包和损伤散射波包均得到了再压缩和分离，如图 4(b)所示，但幅值很大的残余信号波包仍会干扰甚至淹没幅值较小的损伤散射波包，并严重影响后续损伤成像的准确性。

在 DTW 自适应温度补偿后的 $s_{36}^{DTW}(-20℃,t)$ 中，上述残余的 A_0 模式直达波和边界反射波包几乎完全被消除，但对温度的过补偿明显降低了损伤散射波包幅值，如图 4(c)所示。该温度过补偿问题可通过对比 LDSC 频散补偿处理结果 $s'^{DTW}_{36}(-20℃,t)$ 和 $s'_{36}(23℃,t)$ 的损伤散射波包幅值更清楚地观察到，如图 4(d)所示。而对于 WTDW 自适应温度补偿后的 $s_{36}^{WTDW}(-20℃,t)$ 及其 LDSC 处理结果 $s'^{WTDW}_{36}(-20℃,t)$，除了存在少量的残余信号，两者波形分别与温度未变情况下得到的理想损伤散射信号 $s_{36}(23℃,t)$ 及其 LDSC 处理结果 $s'^{WTDW}_{36}(-20℃,t)$ 基本一致，如图 4(e) ~ (f)所示，这说明温度变化影响得



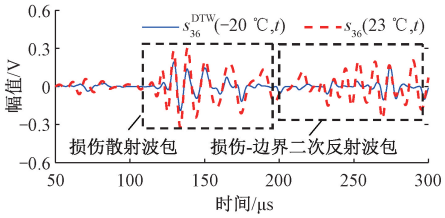
(a) 未经LDSC处理的$s_{36}(-20\ ℃,t)$和$s_{36}(23\ ℃,t)$

(a) $s_{36}(-20\ ℃,t)$ and $s_{36}(23\ ℃,t)$ without LDSC processing



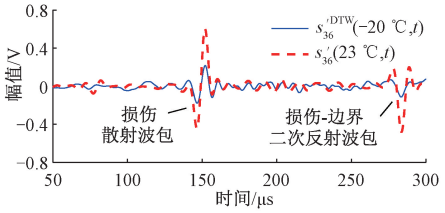
(b) 未经LDSC处理的$s'_{36}(-20\ ℃,t)$和$s'_{36}(23\ ℃,t)$

(b) LDSC-processed $s'_{36}(-20\ ℃,t)$ and $s'_{36}(23\ ℃,t)$



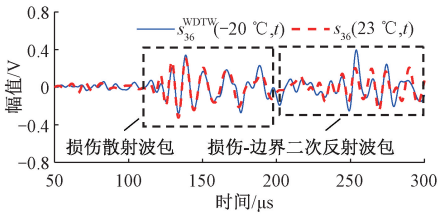
(c) 未经LDSC处理的$s_{36}^{DTW}(-20\ ℃,t)$和$s_{36}(23\ ℃,t)$

(c) $s_{36}^{DTW}(-20\ ℃,t)$ and $s_{36}(23\ ℃,t)$ without LDSC processing



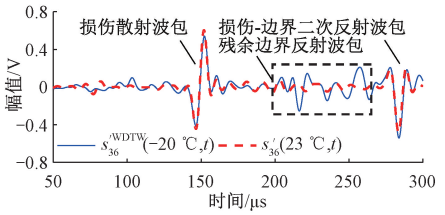
(d) 未经LDSC处理的$s_{36}'^{DTW}(-20\ ℃,t)$和$s'_{36}(23\ ℃,t)$

(d) LDSC-processed $s_{36}'^{DTW}(-20\ ℃,t)$ and $s'_{36}(23\ ℃,t)$



(e) 未经LDSC处理的$s_{36}^{WDTW}(-20\ ℃,t)$和$s_{36}(23\ ℃,t)$

(e) $s_{36}^{WDTW}(-20\ ℃,t)$ and $s_{36}(23\ ℃,t)$ without LDSC processing



(f) 未经LDSC处理的$s_{36}'^{WDTW}(-20\ ℃,t)$和$s'_{36}(23\ ℃,t)$

(f) LDSC-processed $s_{36}'^{WDTW}(-20\ ℃,t)$ and $s'_{36}(23\ ℃,t)$

图 4　P_{3-6} 中经不同温度补偿处理得到的损伤散射信号及其 LDSC 结果

Fig. 4　Damage scattered signals processed by different temperature compensation methods in P_{3-6} and their LDSC results

到了有效消除。需要说明的是,借助于频散补偿的信号分辨率增强处理,$s'^{WTDW}_{36}(-20℃,t)$ 中幅值较小的残余信号实际较难混入损伤散射波包,如图 4(f)所示,所以对后续损伤成像的影响可忽略。

3.3　损伤成像结果

利用各监测温度 Ta_1 下经不同温度补偿处理得到的损伤散射信号 LDSC 频散补偿结果(如图 4(b)、(d)和(f)所示)进行损伤成像,典型的结果如图 5~7 所示,图中"×"和"○"分别表示损伤和压电片的实际位置。图 5 为环境温度 Ta_1 保持为 $Ta_0=23℃$时的理想高分辨率损伤成像结果。图 6~7 分别为 $Ta_1=-20℃$ 和 $Ta_1=50℃$情况下的损伤成像结果。其中图 6(a)和图 7(a)为未经温度补偿的成像结果,仅能在各压电片位置附近看到多个伪像点,温度变化影响(如图 4(b)所示)导致损伤成像失败。$Ta_1=-20℃$下基于 DTW 自适应温度补偿处理的成像结果中,如图 6(b)所示,由于 DTW 温度过补偿抑制了损伤信息(如图 4(d)所示),让损伤点处的像素值被大幅削减,其最大像素值仅为 3,严重降低了成像结果的信噪比。这种 DTW 温度过补偿问题在 $Ta_1=50℃$下的成像中变得更严重,最终使损伤点被噪声淹没,如图 7(b)所示。相比之下,图 6(c)和 7(c)均表现出较高的分辨率和准确度,在实际损伤位置可明显看到损伤点,且损伤点的最大像素值分别达到了 76 和 66,接近理想成像结果中的 100(如图 5 所示)。这就证明了 WTDW 能自适应补偿环境温度分别从 $Ta_0=23℃$大范围变为 $Ta_1=-20℃$和 $Ta_1=50℃$的影响,有效提高了 LDSC 高分辨率损伤成像的可靠性。

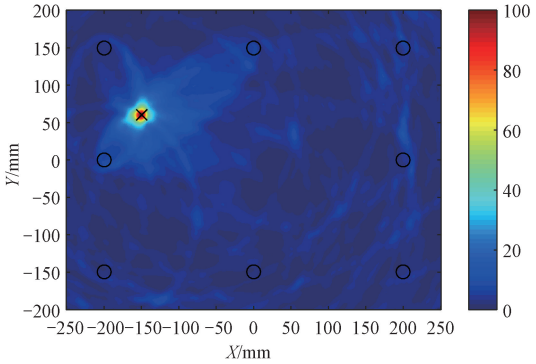
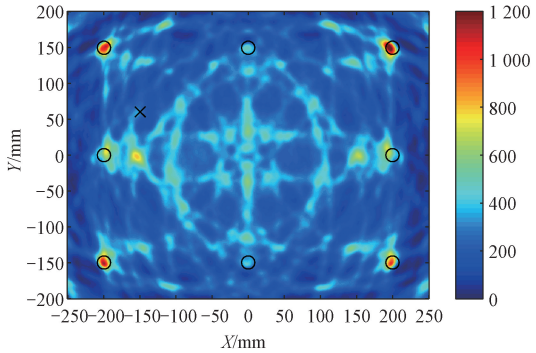


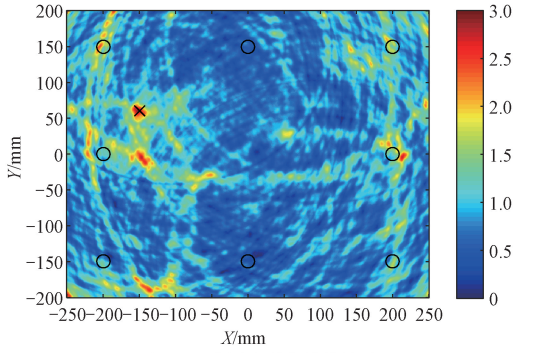
图 5　温度未变情况下的理想损伤成像结果

Fig. 5　Ideal damage imaging result without temperature variance

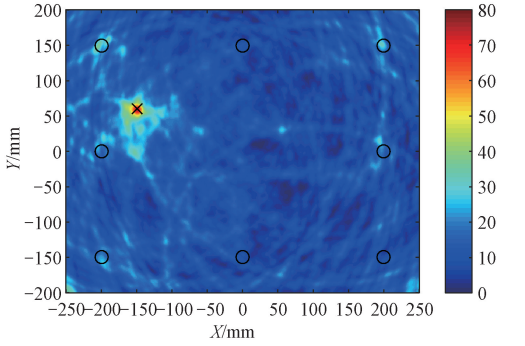
为了定量化评估基于 WTDW 的损伤成像结果的准确性,将成像结果中最大像素值所对应的像素点坐标作为损伤定位结果,以实现损伤信息的定量化提取。表 2 所示从不同当前监测温度 Ta_1 下 WTDW 损伤成像结果中定量化提取出的损伤信息,其中损伤定位误差计算



(a) 未经温度补偿处理
(a) Without temperature compensation



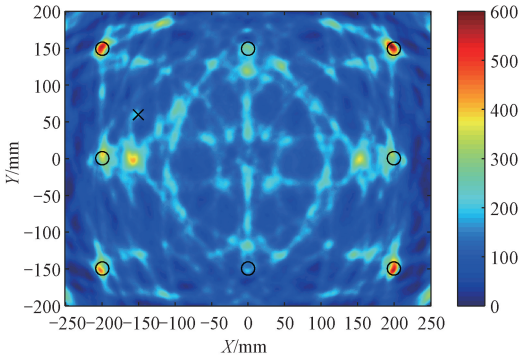
(b) 经DTW自适应温度补偿处理
(b) DTW adaptive temperature compensation



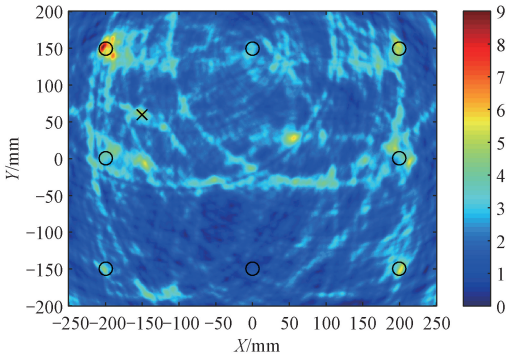
(c) 经WTDW自适应温度补偿处理
(c) WTDW adaptive temperature compensation

图 6 当前监测温度变为-20℃情况下的损伤成像结果

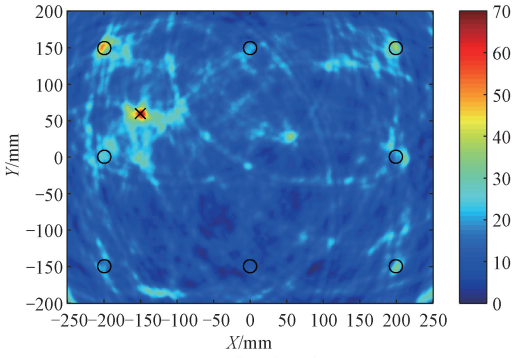
Fig. 6 Damage imaging results with the current monitoring temperature changing to -20℃



(a) 未经温度补偿处理
(a) Without temperature compensation



(b) 经DTW自适应温度补偿处理
(b) DTW adaptive temperature compensation



(c) 经WTDW自适应温度补偿处理
(c) WTDW adaptive temperature compensation

图 7 当前监测温度变为 50℃情况下的损伤成像结果

Fig. 7 Damage imaging results with the current monitoring temperature changing to 50℃

为根据损伤成像结果确定的损伤坐标点与实际损伤坐标点(-150, 60)之间的直线距离。从表 2 可知,所有 Ta_1 下的损伤定位误差≤2.8 mm,该误差相对于 800 mm×650 mm 的铝板面积较小,这进一步说明了大范围温度变化下 WTDW 损伤成像的高可靠性。

需要说明的是:1)由于 LDSC 频散补偿处理所需的波数曲线 $K_0(\omega)$ 以及损伤成像中的群速度 c_{g0} 均与参考信号温度相关,为了避免不同参考信号温度下对 $K_0(\omega)$ 和 c_{g0} 的频繁计算或测量,上述 WTDW 温度补偿处理中统一将室温下的损伤信号 $v1_{cd}(23℃,t)$ 选为参考信号,并以不同温度下的健康信号 $v0_{cd}(Ta_1,t)$ 作为当前监测信号。实际上,WTDW 温度补偿中将参考信号和当前监测信号相互对调并不影响最终的处理结果。而且,相比于参考信号和当前信号之间的温度差,参考信号温度对 WTDW 处理结果的影响相对较小;2)受限于文章篇幅,上述实验研究仅针对损伤 D 讨论了 WTDW 温度补偿及其损伤成像结果,实际上本文也实验考察了铝板其它位置损伤的处理情况,均取得了类似的实验研究结果。

表 2　从不同当前监测温度 Ta_1 下 WTDW 成像结果中定量化提取出的损伤信息

Table 2　Damage information quantitatively extracted from the WTDW-based imaging results under different current monitoring temperatures Ta_1

Ta_1 /℃	Ta_0 /℃	损伤信息提取结果			Ta_1 /℃	Ta_0 /℃	损伤信息提取结果		
		最大像素值	损伤位置/(mm, mm)	损伤定位误差/mm			最大像素值	损伤位置/(mm, mm)	损伤定位误差/mm
-20	23	75.9	(-149,58)	2.2	20	23	63.1	(-149,59)	1.4
-15	23	73.5	(-148,58)	2.8	25	23	62.1	(-148,59)	2.2
-10	23	68.1	(-148,58)	2.8	30	23	60.2	(-149,59)	1.4
-5	23	67.6	(-148,58)	2.8	35	23	60.7	(-148,59)	2.2
0	23	68.0	(-148,58)	2.8	40	23	63.6	(-148,59)	2.2
5	23	65.7	(-148,58)	2.8	45	23	64.0	(-148,59)	2.2
10	23	65.5	(-148,58)	2.8	50	23	66.0	(-148,59)	2.2
15	23	63.8	(-149,59)	1.4					

4　结　　论

本文主要对 WTDW 自适应环境温度补偿方法和环境温度变化下基于 WTDW 的高可靠性损伤成像方法进行研究。理论和实验结果表明,WTDW 无需事先建立校准参数或模型便能自适应补偿 Lamb 波监测信号中的温度影响,而且克服了传统 DTW 的温度过补偿问题,从而保留了被补偿信号中的损伤信息,最终有效提高了环境温度大范围变化下 Lamb 波高分辨率损伤成像结果的可靠性。本文研究对于进一步推动航空结构 Lamb 波损伤监测技术的实际应用具有积极意义。本文后续研究将选择不同材料和尺寸的结构件,并采用不同压电片阵列布置对常见类型损伤开展实验研究,逐步积累足够多的实验数据以验证本文所提方法在不同损伤监测场合下的适用性。

参考文献

[1] YUAN S F, REN Y Q, QIU L, et al. A multi-response-based wireless impact monitoring network for aircraft composite structures[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7712-7722.

[2] 陶静雅, 袁慎芳. 基于频散补偿与路径-波速映射的损伤成像[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 210-218.
TAO J Y, YUAN SH F. Damage imaging method based on dispersion compensation and path-wave velocity mapping for complex composites[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 210-218.

[3] QING X L, LI W Z, WANG Y S, et al. Piezoelectric transducer-based structural health monitoring for aircraft applications[J]. Sensors, 2019, 19(3): 545.

[4] 冯勇明, 杨建元, 陈卫东, 等. 基于概率成像的复合材料结构健康监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3): 253-257.
FENG Y M, YANG J Y, CHEN W D, et al. Structural health monitoring system for composite matrial based on probabilistic damage imaging[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(3): 253-257.

[5] GORGIN R, LUO Y, WU Z. Environmental and operational conditions effects on lamb wave based structural health monitoring systems: A review[J]. Ultrasonics, 2020, 105: 106114.

[6] LIU G Q, XIAO Y C, ZHANG H, et al. Baseline signal reconstruction for temperature compensation in Lamb wave-based damage detection[J]. Sensors, 2016, 16(8): 1273.

[7] SUN H, YI J Y, XU Y, et al. Identification and compensation technique of non-uniform temperature field for Lamb wave-and multiple sensors-based damage detection[J]. Sensors, 2019, 19(13): 2930.

[8] 谢学多, 肖黎, 屈文忠. 温变工况下螺栓松动检测的独立成分分析方法[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(5): 922-928.
XIE X D, XIAO L, QU W ZH. Independent component analysis method for bolt looseness detection under temperature varying conditions[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5): 922-928.

[9] WANG P, ZHOU W S, LI H. A singular value decomposition-based guided wave array signal processing approach for weak signals with low signal-to-noise ratios[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,

2019, 141: 106450.

[10] WANG Y S, GAO L M, YUAN S F, et al. An adaptive filter-based temperature compensation technique for structural health monitoring[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25(17): 2187-2198.

[11] SUN F Q, WANG N, HE J J, et al. Lamb wave damage quantification using GA-based LS-SVM[J]. Materials, 2017, 10(6): 648.

[12] QIU L, FANG F, YUAN S F. Improved density peak clustering-based adaptive Gaussian mixture model for damage monitoring in aircraft structures under time-varying conditions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 126: 281-304.

[13] REN Y Q, QIU L, YUAN S F, et al. Gaussian mixture model based path-synthesis accumulation imaging of guided wave for damage monitoring of aircraft composite structures under temperature variation[J]. Structural Health Monitoring, 2018: 284-302.

[14] TIAN Y, WANG Z L, LU C. Self-adaptive bearing fault diagnosis based on permutation entropy and manifold-based dynamic time warping[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 114: 658-673.

[15] 沈昭仰, 李海洋, 甄冬, 等. 基于动态时间规整的行星齿轮箱轴不对中故障诊断方法研究[C]. 第十二届全国振动理论及应用学术会议, 南宁: 中国振动工程学会, 2017:102-107.
SHEN ZH Y, LI H Y, ZHEN D, et al. Research on fault diagnosis method of planetary gearbox shaft misalignment based on dynamic time warping[C]. The 12th National Conference on Vibration Theory and Application, Nanning: China Society of Vibration Engineering, 2017:102-107.

[16] DOUGLASS A C S, HARLEY J B. Dynamic time warping temperature compensation for guided wave structural health monitoring[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, 65(5): 851-861.

[17] 蔡建, 石立华, 卿新林. 基于相对测量波数的线性频散信号构建方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 948-954.
CAI J, SHI L H, QING X L. Linear-dispersive signal construction method based on measured relative wavenumbers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 948-954.

[18] ZHANG Z, TANG P, DUAN R. Dynamic time warping under pointwise shape context[J]. Information Sciences, 2015, 315: 88-101.

[19] MAUS V, CMARA G, CARTAXO R, et al. A time-weighted dynamic time warping method for land-use and land-cover mapping[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2016, 9(8): 3729-3739.

[20] ZUO L L, LI Y. A weighted DTW approach for similarity matching over uncertain time series[J]. Journal of Computing and Information Technology, 2018, 26(3): 179-190.

作者简介

汪懿,2018 年于宁波工程学院获得学士学位,现为南京航空航天大学硕士研究生,主要研究方向为结构健康监测、测试信号处理。
E-mail: wangyi0905@nuaa.edu.cn

Wang Yi received her B.Sc. degree from Ningbo University of Technology in 2018. She is currently a master student at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interests include structural health monitoring and test signal processing.

蔡建(通信作者),2005 年于河海大学获得学士学位,2008 年于南京航空航天大学获得硕士学位,2012 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南京航空航天大学副研究员,主要研究方向为结构健康监测、测试信号处理。
E-mail: caijian@nuaa.edu.cn

Cai Jian (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Hohai University in 2005, and received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2008 and 2012, respectively. He is currently an associate professor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interests include structural health monitoring and test signal processing.

付尚琛,2009 年于陆军航空兵学院获得学士学位,2015 年于陆军工程大学获得博士学位,现为南京陆军工程大学副教授,主要研究方向为雷击防护与损伤在线监测等。
E-mail: fshangchen@hotmail.com

Fu Shangchen received his B.Sc. degree from PLA Aviation School in 2009, and received his Ph.D. degree from Army Engineering University of PLA in 2015. He is currently an associate professor at Army Engineering University of PLA. His research interests include lightning protection and on-line monitoring of lightning damage.