

温变工况下螺栓松动检测的独立成分分析方法^{*}

谢学多, 肖黎, 屈文忠

(武汉大学工程力学系 武汉, 430072)

摘要 导波损伤检测技术的关键在于检测出结构损伤引起的导波信号变化,但环境温度变化也会影响导波传播过程,引起信号改变,导致损伤检测的失败。为了消除温度变化的影响,笔者采用独立成分分析(independent component analysis, 简称 ICA)方法处理导波响应信号。作为一种盲源分离的算法,ICA 能够从混合信号中提取得到独立的未知源信号分量。因此利用 ICA 方法能将导波的响应源信号从被温度变化干扰的混合信号中分离出来,实现消除温度变化干扰的目的。为验证该方法的可行性,以螺栓连接铝板为对象进行实验,采集不同温度下螺栓全紧及松动状态的导波响应信号,将其经过 ICA 方法处理后应用到损伤定位算法中。结果表明,应用 ICA 处理后的导波信号能够成功定位松动螺栓,证实了 ICA 方法排除温度变化对导波传播影响的有效性。

关键词 导波; 螺栓松动; 损伤检测; 温度变化; 独立成分分析

中图分类号 TH113.1

引言

螺栓连接构件在工程结构中应用广泛^[1]。但在工程结构运行过程中,螺栓连接构件易受循环荷载与强迫振动作用而产生松动损伤^[2]。因此,对螺栓健康状态进行有效检测具有重要意义^[3]。超声导波由于其在结构中传播距离远的特性,适用于大范围结构健康状态的评估,因此基于超声导波的损伤识别方法被广泛用于结构损伤识别的研究中^[4]。张伟伟等^[5]提出了一种基于杜芬方程 Lyapunov 指数特性的超声导波识别方法,成功提高超声导波的损伤检测灵敏度。Wang 等^[6]采用基于导波的时间反转方法研究螺栓预载的变化,成功判断了螺栓的状态。

导波方法检测螺栓松动依赖于导波在被检测结构中传播时受损伤影响而发生变化,但当外在因素影响结构而使得导波传播过程发生变化时,将导致损伤检测失败^[7]。因此,有必要在导波传播过程或响应信号处理过程中排除外界干扰因素的影响。环境温度变化作为工程实际中最常见的干扰因素,在损伤检测中考虑如何消除显得尤为重要。目前,许多研究已经涉及在导波方法损伤检测中消除温度变化的影响。Kijanka 等^[8]通过研究不同温度下 PZT 片作动的剪应力与正应力分量来分析温度对于

Lamb 波传播的影响。Roy 等^[9]将温度作为材料的一个物理性质参数,提出一种新的温度补偿模型。为了减少因温度影响而需采集的基准信号数目,Clarke 等^[10]提出了将最佳基准选择(optimal baseline selection, 简称 OBS)和基准信号扩展(baseline signal stretch, 简称 BSS)相结合的策略。虽然这些研究在消除温度对于导波传播影响方面取得较为瞩目的成果,但仍需进一步研究以提高温变环境下导波损伤检测方法的可靠性。Dobson 等^[11]提出用独立成分分析(ICA)方法处理温变环境下管道损伤检测问题,取得较好结果。但该研究没有分析 ICA 方法消除温度变化影响的具体原理。笔者在此基础上采用 ICA 方法研究温变工况下基于 Lamb 波的螺栓松动检测问题,分析了温度变化对于导波信号影响及 ICA 方法消除该影响的原理。ICA 方法是一种数值统计方法,该方法直接处理导波响应信号以消除温度变化影响,无需考虑被测结构与压电片等部件受温度影响的机理,只需研究导波本身受温度变化的影响,分析过程简便快捷。为验证其有效性,笔者在铝板上进行了螺栓松动损伤检测实验。通过加热铝板采集到不同温度下的导波响应信号,将其经过 ICA 方法处理后应用到损伤定位算法中,进行螺栓松动的检测与定位。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51378402)

收稿日期:2016-11-14;修回日期:2017-03-17

1 ICA 方法消除温变对导波影响原理

温度变化主要改变被测结构、传感器和粘结层材料的属性,从而对导波传播过程产生影响。其中,传感器和粘结层受温度变化的影响主要导致导波响应信号幅值的变化,但可通过选择对温度变化不敏感材料的方式使其减小^[12]。而由温度变化引起的结构材料属性变化却不可避免,该变化将使得导波响应信号产生时移,主要是由于温度变化导致了结构的缩胀与导波波速的变化^[13]。为方便分析,考虑一个汉宁窗调制的正弦信号 X_0 作为参照信号

$$X_0 = u_0 h(t) \sin \omega t \quad (1)$$

其中: $h(t)$ 为汉宁窗; u_0 为幅值; ω 为角频率。

另一温度下的对比信号 X_1 相对于 X_0 将产生一个 δt 的时移

$$X_1 = u_0 h(t) \sin \omega(t + \delta t) \quad (2)$$

考虑公式 $t=d/v$ 对于温度变化量 δT 的微分形式为

$$\frac{\delta t}{\delta T} = \frac{1}{v} \frac{\delta d}{\delta T} - \frac{d}{v^2} \frac{\delta v}{\delta T} \quad (3)$$

温度变化量与导波传播距离 d 、波速 v 分别有如下关系

$$\frac{\delta d}{\delta T} = \alpha d \quad (4)$$

$$\frac{\delta v}{\delta T} = k \quad (5)$$

其中: α 为材料的热膨胀系数; k 为波速随温度变化的系数。

将式(4,5)代入式(3)可得

$$\delta t = \frac{d}{v} \left(\alpha - \frac{k}{v} \right) \delta T \quad (6)$$

对于金属结构而言, α 为正数值, k 为负数值,因此温度的增长将对导波产生一个正的 δt 值。将式(2)减去式(1),得到参照信号与对比信号的差信号为

$$X_1 - X_0 = U_0 (\sin \omega(t + \delta t) - \sin \omega t) \quad (7)$$

其中: $U_0 = u_0 h(t)$ 。

假设 δt 足够小,将式(6)代入式(7)并且考虑波长 $\lambda = 2\pi v/\omega$, 有如下近似结果

$$|X_1 - X_0|_{\max} = 2\pi \frac{d}{\lambda} U_0 \beta \delta T \quad (8)$$

其中: $\beta = \left(\alpha - \frac{k}{v} \right)$ 。

式(8)表明,当导波传播距离与波长为常数时,参照信号与对比信号的差信号最大值正比于温度的

变化量。这意味着在结构损伤检测中,当温度差造成的导波信号差大于一定程度时,结构损伤引起的信号变化将会被掩盖,导致损伤检测失败。

采用 ICA 方法消除温度变化影响的基本思想是假定所需处理的观测信号由几个独立的信号混合而成,通过某个算法就可分离出这些独立的信号成分,从而排除观测信号中的干扰^[14]。笔者采用的算法为快速 ICA 算法,基本原理如下。

由式(2)可知,某一温度下的导波观测信号为

$$X_n = u_0 h(t) \sin \omega(t + \delta t_n) \quad (9)$$

其中: $n=0,1,2,\dots,N$ 为温度值编号。

对于具有 M 个数据点的观测信号,任意一点处的信号值为

$$x_{mn} = u_0 h(t_m) \sin \omega(t_m + \delta t_n) \quad (10)$$

其中: $m=0,1,2,\dots,M$ 为数据点编号。

式(10)可扩展为

$$x_{mn} = u_0 h(t_m) (\sin \omega t_m \cos \omega \delta t_n + \cos \omega t_m \sin \omega \delta t_n) = u_0 [h(t_m) \sin \omega t_m \quad h(t_m) \cos \omega t_m] \cdot [\cos \omega \delta t_n \quad \sin \omega \delta t_n]^T \quad (11)$$

其中:上标“T”表示矩阵的转置。

由此,可将不同温度下的导波观测信号用矩阵形式表示为

$$\mathbf{X}_{MN} = u_0 \cdot \begin{bmatrix} h(t_1) \sin \omega t_1 & h(t_1) \cos \omega t_1 & a_{13} & \cdots & a_{1k} \\ h(t_2) \sin \omega t_2 & h(t_2) \cos \omega t_2 & a_{23} & \cdots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ h(t_M) \sin \omega t_M & h(t_M) \cos \omega t_M & a_{M3} & \cdots & a_{MK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega \delta t_1 & \cos \omega \delta t_2 & \cdots & \cos \omega \delta t_N \\ \sin \omega \delta t_1 & \sin \omega \delta t_2 & \cdots & \sin \omega \delta t_N \\ b_{31} & b_{32} & \cdots & b_{3N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{K1} & b_{K2} & \cdots & b_{KN} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中: $a_{mk} (m=1,2,\dots,M; k=3,4,\dots,K)$; $b_{kn} (k=3,4,\dots,K; n=1,2,\dots,N)$, 均为与观测信号中噪声部分相关的元素。

由于文中仅考虑温度变化,不考虑其他因素带来的噪声干扰,故取 $a_{mk} = 0, b_{kn}$ 取任意值。式(12)可简化为

$$\mathbf{X}_{MN} = u_0 \mathbf{C}_{MK} \mathbf{S}_{KN} = \mathbf{O}_{MK} \mathbf{S}_{KN} \quad (13)$$

其中: \mathbf{S}_{KN} 为温度变化等因素造成的干扰项; \mathbf{O}_{MK} 为由两条独立信号 O_1, O_2 组成的矩阵,且

$$O_1 = u_0 h(t) \sin \omega t \quad (14)$$

$$O_2 = u_0 h(t) \cos \omega t \quad (15)$$

其中:信号 O_1 等于未受温度变化影响的参照信号 X_0 ; O_2 与信号 O_1 相位相差 90° 且波包形状相同。

可知矩阵 \mathbf{X} 满足 ICA 方法适用的独立性条件, 因此可通过 ICA 方法分离得到 O_1 。

首先对矩阵 \mathbf{X} 进行白化处理以降低其复杂度, 即将 \mathbf{X} 线性转换, 使其元素不相关且具有单位方差

$$E[\mathbf{W}, \mathbf{W}^T] = \mathbf{I} \quad (16)$$

其中: \mathbf{W} 表示矩阵 \mathbf{X} 的白化矩阵; $E[\mathbf{W}; \mathbf{W}^T]$ 为 \mathbf{W} 的协方差矩阵; \mathbf{I} 为单位阵。

一种简单的白化方法是利用矩阵的特征值分解

$$\mathbf{W} = \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{V}^T \quad (17)$$

其中: \mathbf{V} 和 \mathbf{D} 分别为协方差矩阵 $E[\mathbf{X}, \mathbf{X}^T]$ 的特征矩阵和特征值对角阵。

白化完成后, 采用牛顿快速迭代算法对矩阵 \mathbf{W} 的每一列进行优化计算, 迭代结果如下

$$\bar{W}_{n,k} = \langle \mathbf{Z}g(\bar{W}_{n,k-1}^T \mathbf{Z}) \rangle - \langle g'(\bar{W}_{n,k-1}^T \mathbf{Z}) \rangle \bar{W}_{n,k-1} \quad (18)$$

其中: $\bar{W}_{n,k}$ 表示第 k 阶迭代结果的第 n 列元素; 正交矩阵 $\mathbf{Z} = \mathbf{W}\mathbf{X}$; $g(x)$ 是以 x 为变量的非线性函数, 可取 $g(x) = \tanh(x)$; $g'(x)$ 表示 $g(x)$ 的导函数; $\langle \cdot \rangle$ 表示求均值操作; 上标“ $-$ ”代表归一化处理。

执行式(18)的迭代过程, 直到迭代结果满足收敛条件

$$\{ |\bar{W}_{n,k} - \bar{W}_{n,k-1}| \} < \epsilon \quad (19)$$

其中: $\{ \cdot \}$ 表示求和运算; $| \cdot |$ 表示求绝对值操作; ϵ 为设置的收敛值。

迭代结束后, 可得到优化矩阵 \mathbf{P} , 且

$$\mathbf{P} = \mathbf{S}^{-1} \quad (20)$$

其中: 上标“ -1 ”代表求逆操作。

因此可得到结果矩阵

$$\mathbf{O} = \mathbf{P}\mathbf{X} \quad (21)$$

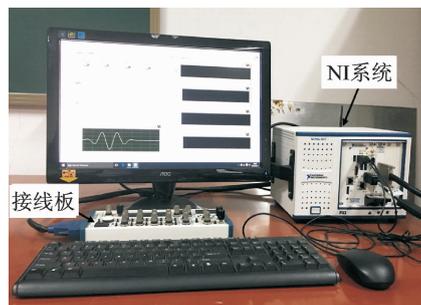
从结果矩阵 \mathbf{O} 中提取出 O_1 就得到了未受温度变化影响的源信号, 这意味着可将温度变化带来的信号时移 δt 去除, 从而排除温度变化对于后续损伤检测的影响。

2 实验

2.1 实验设备与过程

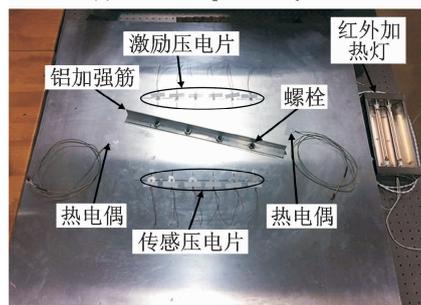
整体实验装置如图 1 所示, 由 NI 数据采集系统和实验试件两部分构成。实验试件为 $1\ 000\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$ 的铝板, 粘贴有 2 列各 6 个直径 $6.3\ \text{mm}$ 、厚 $0.2\ \text{mm}$ 的压电陶瓷片组成压电作动/传感阵列, 另粘贴有两片热电偶, 用于测量铝板温度。铝板通过 4 个螺栓与长为 $500\ \text{mm}$ 的铝加强筋连接, 整体示意图见图 2。铝板置于柔软海绵上模

拟自由边界条件, 下置一红外加热灯实现铝板的升温。经过测试, 在实验中将红外加热灯置于距铝板底部 $400\ \text{mm}$ 处, 可使得对于本实验主要考虑的压电阵列包围区域, 加热所得近似为均匀温度场。NI 数据采集系统产生激励信号并采集波动响应信号, 具体过程由 LabVIEW 软件编程实现。



(a) NI 数据采集系统

(a) NI data acquisition system



(b) 铝板试件

(b) Aluminum plate specimen

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

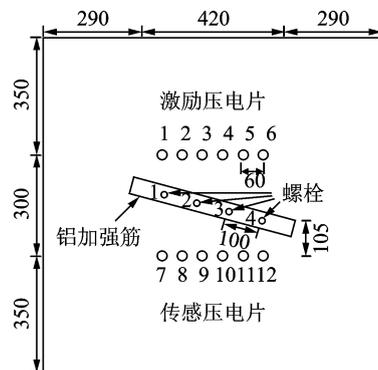


图 2 铝板试件示意图(单位: mm)

Fig. 2 Schematic diagram of aluminum plate (unit: mm)

实验共使用 12 个压电片, 其中 1~6 号作为激励阵列, 7~12 号作为传感阵列。如图 3 所示的 3.5 周期、中心频率 $125\ \text{kHz}$ 、汉宁窗调制正弦信号作为激励信号。实验中, 先保持 4 个螺栓为全紧状态, 在室温下 ($22\ ^\circ\text{C}$) 依次加热铝板, 每当铝板温度上升 $2\ ^\circ\text{C}$ 采集一组响应信号, 将激励信号作用于 1~6 号压电片, 同时记录 7~12 号压电片上采集到的信号,

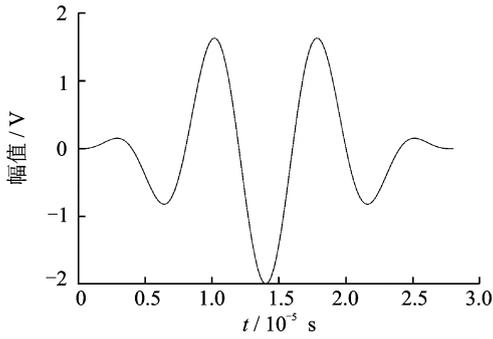


图 3 激励信号波形
Fig. 3 Excitation signal

作为基准信号。然后打开红外灯加热铝板, 每当铝板温度上升 2 °C 采集一组响应信号, 总共采集 22 ~ 40 °C 之间的 10 组信号数据。最后, 使铝板温度保持 40 °C, 松动 2 号螺栓, 采集损伤状态信号。

2.2 实验结果与分析

本实验中响应信号共有 36 条传感路径的数据, 而每条路径数据的分析过程完全相同。因此文中不失一般性地展示图 2 中传感路径 3~9 上采得数据的分析结果。

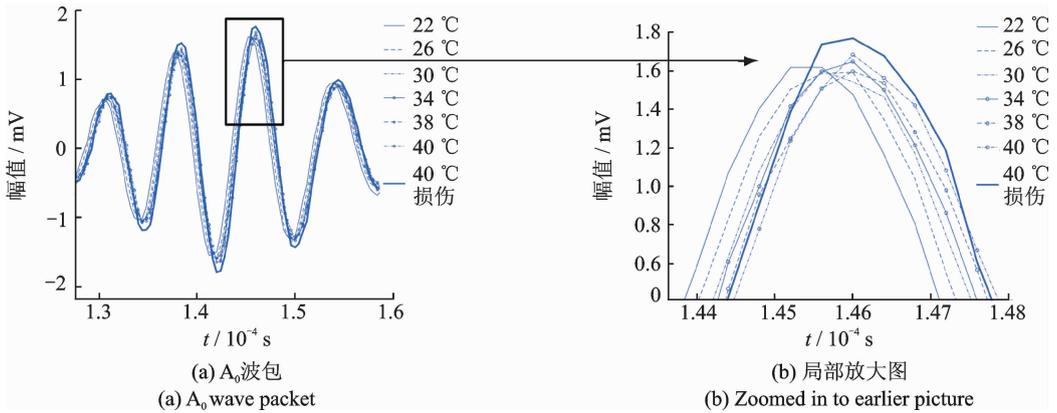


图 4 各温度下响应信号和损伤状态信号
Fig. 4 Signals at different temperatures and damaged signal

可以预见, 当温度变化达到一定值, Lamb 波响应信号中由于温度干扰而产生的时移变化将掩盖损伤带来的信号变化, 导致检测失败。为研究这一现象, 现将 22 °C 时的 Lamb 波信号作为基准信号, 40 °C 时螺栓松动状态下的响应信号作为当前信号进行损伤的检测。笔者采用相关系数损伤检测方法, 其原理是利用基准信号与当前信号间的相关系数构造各传感路径的损伤指标

$$DI = 1 - |r| \quad (22)$$

其中: r 为两组信号的相关系数。

2.2.1 温度对 Lamb 波信号的影响

本实验响应信号中有 A_0 与 S_0 两种模式波包, 两者都能体现温度变化对导波影响。但在 125 kHz 激励频率下 A_0 波包幅值更大, 故以下将选择 A_0 波包作为分析对象, 以便于观察温度变化影响。现选取部分温度下采集的响应信号与 40 °C 下的损伤状态信号进行时域对比, 结果如图 4(a) 所示。为详细观察各信号之间的差异, 将图 4(a) 中局部信号放大, 如图 4(b) 所示。由图 4(b) 可以看出, 22 °C 下的 Lamb 波信号最先出现, 说明其波速最大, 随着温度逐渐增大, 信号波速依次减小。这表明各温度下的信号之间存在时移, 且随着温度升高, 时移逐渐加大。该结论与式(6)中时移 δt 与温度差 δT 之间正相关的关系一致。并且比较 40 °C 下完整状态与损伤状态信号波形可知, 螺栓松动导致铝板中导波信号幅值大小发生变化, 相对而言, 螺栓松动引起的导波信号相位变化可以忽略不计。因此, 消除各温度下信号间的时移就可消除温度变化对导波的影响, 而保留损伤引起的信号变化。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})(d_i - \bar{d})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2 \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}} \quad (23)$$

其中: c 为基准信号; d 为当前信号; \bar{c} 和 \bar{d} 分别表示两组信号的均值。

考虑到结构中任意一点距离传感路径越远, 对该传感路径损伤指数的依赖性越低, 可以依此建立直角坐标系, 并引入正态分布方程确定结构中任一位置的损伤指数

$$P(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right) \cdot DI \quad (24)$$

其中： $u =$

$$\frac{\sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2} + \sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2} - 1}{\sqrt{(x_a-x_s)^2 + (y_a-y_s)^2}} \quad (25)$$

表示结构中任意一点到当前传感路径的距离,式中, (x, y) 表示结构中任意一点坐标值, $(x_a, y_a), (x_s, y_s)$ 分别表示激励压电片与传感压电片的坐标值。通过各传感路径的损伤指数相加,得到由所有路径信号确定的结构任一位置存在损伤的概率。将损伤指数数值转化为像素值,便可用图像表征损伤定位结果,像素值越高代表该点存在损伤的概率越大。上述两组信号的定位结果如图 5 所示,图 5(b)为取阈值为 0.98 后的结果。观察图 5(a)可知,定位结果出现了两块代表损伤的深色图像,其中颜色较浅的一块与代表 2 号螺栓位置的黑色圆圈大致重合。这表明损伤定位结果显示出了 2 号螺栓的松动状态,但温度变化的影响使得定位算法额外显示出一个虚假的损伤位置。从图 5(b)可以明显看出,经过阈值

化处理后正确表示 2 号螺栓松动状态的深色图像已经消失,只剩下代表虚假损伤位置的图像。这表明损伤信息被掩盖,螺栓松动检测出现了误报。

2.2.2 ICA 处理结果分析

在实验条件下,由于仪器电信号干扰等因素存在,将同一路径下各温度的响应信号进行 ICA 处理后,得到的结果矩阵中除了一条去除温度变化影响的源信号外,还包含几条噪声信号。将结果矩阵各分量信号与各温度下的响应信号对比,可排除不含特定波形的噪声信号,得到两条相位相差近 90° 且与响应信号具有相同形状波包的信号,即理论部分的信号 O_1 与 O_2 ,选取其中相位滞后的信号即为所需目标信号。该信号与部分温度下响应信号的时域对比如图 6(a)所示,图 6(b)为图 6(a)中局部信号放大。从图 6(b)看出,ICA 处理后的信号图形与 22°C 时的信号较为吻合,虽然不是完全重合,但两组信号已十分接近。说明经过 ICA 的处理,温度变化产生的时移得到了消除,成功分离出了源信号。

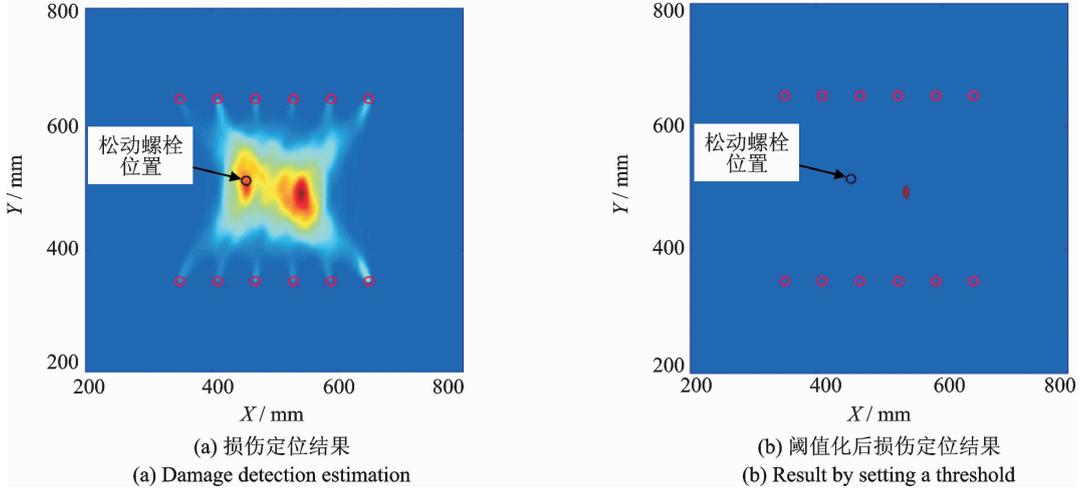


图 5 未处理信号损伤定位结果

Fig. 5 Damage detection estimation without ICA processing

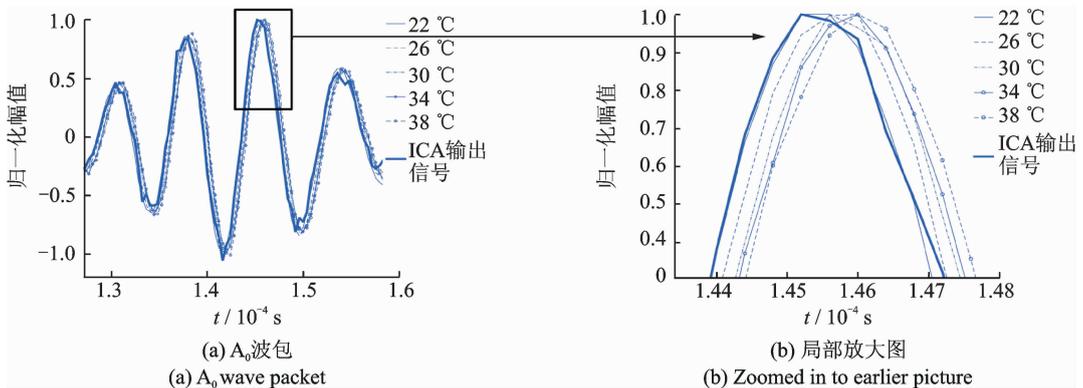


图 6 ICA 输出信号与各温度下响应信号

Fig. 6 Output signal of ICA and response signals at different temperatures

除了在时域图上直接观察,还可从数值方面分析 ICA 方法消除温度变化干扰的效果。以 22 °C 下的响应信号作为基准信号,根据式(22,23)计算各温度下响应信号及 ICA 输出信号与基准信号之间的整体差异值(difference value, 简称 DI)。计算结果数值越大,表示信号间整体差异越大。所得计算结果如图 7 所示,图中曲线为各温度差下 DI 值的线性回归曲线。可以看到,回归曲线斜率为正数,表明随着温差增大,DI 值增大,这也是信号间时移随温差增大而增大的体现。此外,ICA 输出信号的 DI 值为 0.8%,在回归曲线上对应的横坐标为 2.6,意味着 ICA 输出信号与基准信号间的整体差异相当于 2.6 °C 温差下信号间的整体差异,说明 ICA 方法将 22 °C 与 40 °C 之间 18 °C 的温度变化对于 Lamb 波信号的影响减小到 2.6 °C 之内,体现了该方法消除温度变化对导波影响的作用。

最后,将 ICA 方法得到的无损伤状态下的输出信号作为基准信号,ICA 方法得到的螺栓松动状态

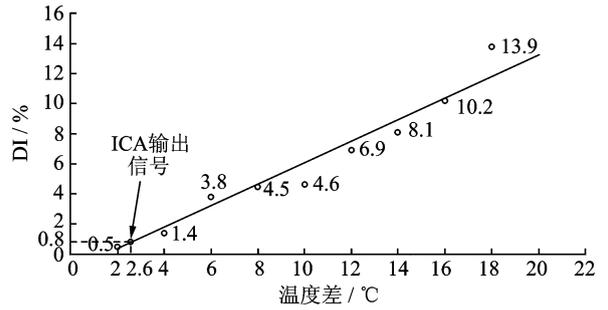
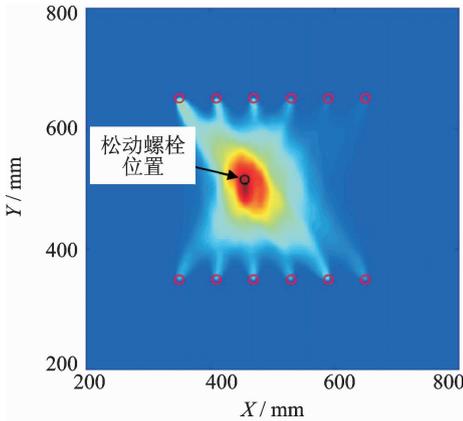


图 7 各温度下响应信号及 ICA 输出信号与基准信号的整体差异值曲线

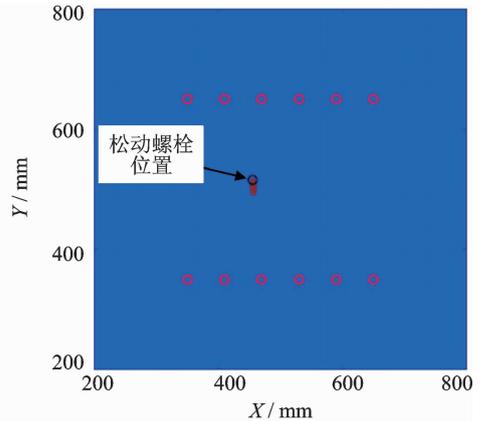
Fig. 7 Curve of overall difference values between response signals at different temperatures and ICA signal and the reference signal

下的输出信号作为当前信号,进行相关系数损伤定位计算,结果如图 8(a)所示,图 8(b)所示为阈值化后结果。由图 8(b)可以看出,定位算法结果与松动螺栓的位置基本吻合,表明该工况下的螺栓松动得到了成功识别,验证了采用 ICA 方法消除温度变化对于导波传播影响的有效性。



(a) 损伤定位结果

(a) Damage detection estimation



(b) 阈值化后损伤定位结果

(b) Result by setting a threshold

图 8 ICA 处理后损伤定位结果

Fig. 8 Damage detection estimation after ICA processing

3 结束语

笔者以铝板为实验对象,进行了温变工况下的螺栓松动检测实验。实验结果表明,温度变化对导波传播的影响使得损伤检测出现误报。将波动信号进行 ICA 方法处理后,损伤检测算法正确显示了松动螺栓位置,补偿了温度变化对导波信号的影响。若将该方法与基准信号扩展方法相结合,可有效地增大基准信号扩展方法适用的温差范围。但需要说明的是,文中 ICA 方法处理的导波信号最大温差为

18 °C,在损伤检测中成功消除了温度变化的影响。如果温变值超出一定范围,由于 ICA 算法是根据统计上的独立性分离源信号与干扰信号,温差过大将导致导波受温度变化影响的部分成为独立的主要成分,使得源信号无法得到分离,ICA 温度补偿方法的有效性就难以保证。ICA 温度补偿方法适用的最大温差范围还有待进一步研究。

参 考 文 献

[1] 徐超,周帮友,刘信恩,等. 机械螺栓连接状态监测和辨

- 识方法研究进展[J]. 强度与环境, 2009, 36(2):28-36.
- Xu Chao, Zhou Bangyou, Liu Xinen, et al. A review of vibration-based condition monitoring and identification for mechanical bolted joints[J]. Structure & Environment Engineering, 2009, 36(2): 28-36. (in Chinese)
- [2] 向志海, 黄俊涛. 螺栓松紧程度的受控敲击检测方法[J]. 实验力学, 2012, 27(5):545-551.
Xiang Zhihai, Huang Juntao. A controlled tap detection method for bolt tightness[J]. Journal of Experiment Mechanics, 2012, 27(5):545-551. (in Chinese)
- [3] Doyle D, Zagrai A, Arritt B, et al. Damage detection in bolted space structures[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2009, 21(3): 251-264.
- [4] Raghavan A C, Cesnik C E S. Review of guided-wave structural health monitoring[J]. Shock & Vibration Digest, 2007, 39(2):91-114.
- [5] 张伟伟, 武静, 马宏伟. 基于 Lyapunov 指数的超声导波检测技术[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(2):250-257.
Zhang Weiwei, Wu Jing, Ma Hongwei. Ultrasonic guided wave inspection method based on Lyapunov exponents[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(2):250-257. (in Chinese)
- [6] Wang Tao, Liu Shaopeng, Shao Junhua, et al. Health monitoring of bolted joints using the time reversal method and piezoelectric transducers[J]. Smart Materials & Structures, 2016, 25(2):025010.
- [7] Lim H J, Sohn H, Yeum C M, et al. Reference-free damage detection, localization, and quantification in composites[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133(6): 3838-3845.
- [8] Kijanka P, Packo P, Staszewski W J, et al. Actuation stress modelling of piezoceramic transducers under variable temperature field[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2016, 27(3):337-349.
- [9] Roy S, Lonkar K, Janapati V, et al. A novel physics-based temperature compensation model for structural health monitoring using ultrasonic guided waves[J]. Structural Health Monitoring, 2014, 13(3):321-342.
- [10] Clarke T, Simonetti F, Cawley P. Guided wave health monitoring of complex structures by sparse array systems: Influence of temperature changes on performance[J]. Journal of Sound & Vibration, 2010, 329(12):2306-2322.
- [11] Dobson J, Cawley P. Independent component analysis for improved defect detection in guided wave monitoring[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 104(8):1-12.
- [12] Croxford A J, Wilcox P D, Drinkwater B W, et al. Strategies for guided-wave structural health monitoring[J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2007, 463(2087):2961-2981.
- [13] Lu Y, Michaels J E. A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations[J]. Ultrasonics, 2005, 43(9):717.
- [14] Hyvärinen A, Hurri J, Hoyer P O. Independent component analysis[J]. Neural Computing Surveys, 2001, 4(1):60-83.



第一作者简介: 谢学多, 男, 1992年6月生, 博士生。主要研究方向为基于波动的结构健康监测。

E-mail: xueduoxie@whu.edu.cn