

基于复 Morlet 小波相位的红外调制热像检测方法

赵诗琪¹, 郭兴旺¹, 刘颖韬²

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 为了提高红外调制热像法对复合材料缺陷的检测能力, 研究了利用基于复 Morlet 小波相位分析的红外热像序列处理方法。依据热激励调制频率和红外图像采样频率, 自适应地选择小波变换尺度总数, 然后利用复 Morlet 小波系数相位从原始热像序列重建相位图序列。对含有分层缺陷的玻璃纤维增强复合材料参考试件进行了调制热像检测实验, 以信噪比为评价指标对该方法的实际处理效果进行了定量评定, 并与傅里叶变换法进行了对比。结果表明: 复 Morlet 小波相位法可以分离调制热像信号的低频和低频噪声, 能稳定地提取试件不同深度的分层缺陷, 对热激励调制频率的变化有良好宽容性, 因此是调制热像法的有效数据处理方法。

关键词: 无损检测; 调制热像; 复 Morlet 小波变换; 玻璃纤维增强复合材料

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0904002

Infrared modulated thermography based on complex Morlet wavelet phase

Zhao Shiqi¹, Guo Xingwang¹, Liu Yingtao²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to increase the detection capability of infrared modulated thermography for defects in composite materials, an infrared image sequence processing method using the complex Morlet wavelet phase analysis was studied. According to the modulation frequency of thermal excitation and the sampling frequency of infrared imaging, the total number of scales used in wavelet transform was selected adaptively, and then a phase image sequence was reconstructed from the raw thermal image sequence by using the complex Morlet wavelet coefficients. An experiment of modulated thermography was performed on a glass fiber reinforced plastic reference sample containing delamination defects, the application effects of the method were quantitatively evaluated and compared with the Fourier transform method by the signal-to-noise ratio. The results show that the complex Morlet wavelet phase method can separate the low frequency and high frequency noise from the thermal image signal, and extract the subsurface defects at different depth robustly; it keeps a good tolerance to the change of the modulation frequency; so it is an effective algorithm of the modulated thermography.

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2018-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61571028, U1433122)

作者简介: 赵诗琪(1993-), 女, 硕士生, 主要从事红外无损检测方面的研究。Email: gcqzsq@126.com

导师简介: 郭兴旺(1964-), 男, 副教授, 博士, 主要从事红外热像无损检测理论和技术方面的研究。Email: xingwangguo@buaa.edu.cn

Key words: non-destructive testing; modulated thermography; complex Morlet wavelet transform; glass fiber reinforced plastic

0 引言

红外无损检测(Infrared Non-Destructive Testing, IR NDT) 是目前应用较为广泛的无损检测技术之一,该检测技术具有单次检测面积大、非接触、速度快、可单面检测、检测结果直观等优势,已应用于飞机复合材料结构、功能涂层、风力发电机叶片和火箭发动机喷口绝热层的检测等方面^[1]。根据热激励波形的不同,IR NDT 有脉冲、调制、变频调制、阶跃热像法等多种形式^[2-3]。调制热像法,又称 Lock_in 热像法,是常用的 IR NDT 方法之一,通常以选定频率的简谐热波对试件进行热激励,在被测试件内部由于缺陷区和无缺陷区的内部结构及热物性参数不同,导致热波在物体内部传播时的幅值和相位不一致。通过对表面热波信号进行分析、获取相位或幅值的异常就可以对内部缺陷进行检测和识别^[4]。

调制热像法的常用数据处理算法是快速傅里叶变换(FFT)相位法^[5],但是由于傅里叶变换本身在时域分辨率上的局限性,不能完全表征热信号的瞬态过程。而小波变换可以在品质因数 Q 不变的情况下利用小波的时频多分辨分析,可同时获得信号的时域特征和频域特征。小波理论最早由 Mallat 于 1989 年提出^[6]。Mallat 建立了小波变换快速算法,用于信号和图像的分解和重建,提出利用 Lipschitz 指数在多尺度上对信号和图像以及噪声的数学特性进行描述。目前,小波理论在红外热像序列处理方面的运用主要是红外热像序列去噪^[7]和缺陷信息提取^[8-9]。在脉冲热像法的热像序列数据处理方面,X.Maldague 和 F. Galmiche 提出采用小波脉冲相位法计算碳纤维复合材料的缺陷深度^[8],选择的母小波函数是复 Morlet 小波函数。该方法不仅可以重建缺陷深度,而且小波

系数相位对比度的最大值和深度呈线性关系。在调制热像法的热像序列数据处理方面,Robert Olbrycht 和 Boguslaw Wiecek 等人采用复 Morlet 小波处理调制热像序列,结论表明:以带宽为 1 Hz、中心频率为 1 Hz 的复 Morlet 母小波函数处理调制热像序列的结果与快速傅里叶变换的处理结果最接近^[10]。

参考文献[10]提供了中心频率和带宽的选择方案,但是没有研究小波变换尺度参数的选择。利用小波变换的多尺度分析特点可以有效降低噪声,提取热像序列数据的缺陷特征。文中根据调制红外热像法的特点,探究针对调制红外热像法的小波变换尺度参数最优化选择方案,提出了利用复 Morlet 小波变换后得到的小波系数相位重建相位图序列的热像序列处理方法。以预制分层缺陷的玻璃纤维增强塑料层压板作为参考试件,以傅里叶变换法为对比方法,考察了复 Morlet 小波相位法的实际应用效果。

1 复 Morlet 小波基本原理

复小波变换公式为^[10]:

$$WT(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt = WT_R(a, \tau) + jWT_I(a, \tau) \quad (1)$$

式中: $a > 0$ 为尺度因子; τ 为位移因子; $\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right)$ 为母小波函数 $\psi(t)$ 经过伸缩 a 、位移 τ 后的小波基函数; $WT_R(a, \tau)$ 为小波系数 $WT(a, \tau)$ 的实部; $WT_I(a, \tau)$ 为小波系数 $WT(a, \tau)$ 的虚部。通过 $WT_R(a, \tau)$ 和 $WT_I(a, \tau)$ 可以计算得到各个尺度下小波系数的幅值和相位值:

$$A(a, \tau) = \sqrt{WT_R(a, \tau)^2 + WT_I(a, \tau)^2} \quad (2)$$

$$\varphi(a, \tau) = \begin{cases} \arctan(WT_I(a, \tau)/WT_R(a, \tau)) & WT_R(a, \tau) > 0 \\ \arctan(WT_I(a, \tau)/WT_R(a, \tau)) + \pi & WT_R(a, \tau) < 0, WT_I(a, \tau) \geq 0 \\ \arctan(WT_I(a, \tau)/WT_R(a, \tau)) - \pi & WT_R(a, \tau) < 0, WT_I(a, \tau) < 0 \\ \frac{\pi}{2} & WT_R(a, \tau) = 0, WT_I(a, \tau) > 0 \\ 0 & WT_R(a, \tau) = 0, WT_I(a, \tau) = 0 \\ -\frac{\pi}{2} & WT_R(a, \tau) = 0, WT_I(a, \tau) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据参考文献[10],采用带宽为 1 Hz、中心频率为 1 Hz 的复 Morlet 函数为母小波函数,其时域公式为:

$$\psi(t)=\frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} \exp\left(-\frac{t^2}{f_b}+j2\pi f_c t\right) \quad (4)$$

式中: f_b 为母小波带宽,取值 $f_b=1$ Hz; f_c 为中心频率,取值 $f_c=1$ Hz。

记母小波函数在尺度 a 下的小波基中心频率为 f_a ,它的计算公式为:

$$f_a=f_c \times f_s / a \quad (5)$$

式中: f_s 为采样频率。从公式(5)可以看出, f_a 与尺度 a 成反比。在 t 时刻,当小波变换系数的模在尺度 a 处取得最大值时,被分析信号在 t 时刻的局部频率与尺度 a 处小波基的中心频率 f_a 相近或相同,该尺度下的小波基能够高度表征被分析信号,也可称该尺度是可以表征被分析信号的有效尺度,记为 a_e 。

2 调制红外热像无损检测实验

调制热像检测实验装置采用自行开发的红外热像检测系统,该系统主要由红外热像仪、卤素灯、热激励控制器、计算机和应用软件组成,如图 1 所示。加热灯与红外热像仪在试件同侧,属于单面法检测。红外热像仪置于试件正前方,距离试件 64 cm 处。其分辨率为 320 pixel×240 pixel,温度灵敏度为 0.08 K,最高帧频为 60 Hz。加热灯为双联卤素灯,总功率为 2 600 W。灯以 45°的入射角照射试件,与试件中心的距离为 45 cm。应用软件可设置热激励和热像采集参数,使加热灯按给定的调制频率发出热波,红外热像仪同步记录试件表面温度场的变化。

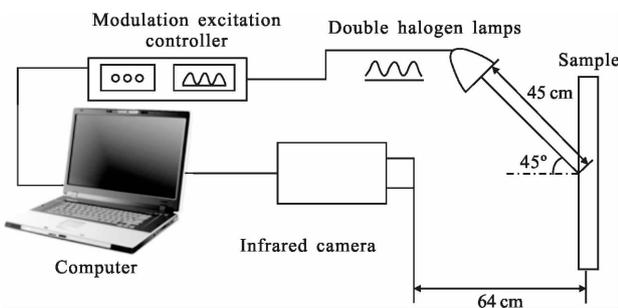


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

实验试件为预置分层缺陷的玻璃纤维增强塑料

(GFRP)层压板,其几何尺寸如图 2 所示,长度单位为 mm。该试件由多层玻璃纤维铺层(SW280F-90a)压结制成,试件外形尺寸为 200mm×150mm×2.5mm,在试件的边缘用预先插入 0.05 mm 厚的钢片、成型后再拔出的方法预制了 10 个分层缺陷,其形状为梯形,上底为 12 mm、下底为 6 mm、高为 19 mm,面积为 171 mm²。试件的两个短边中心处有 1 对缺陷,与试件检测表面的距离(即缺陷深度)为 0.3 mm。试件的两个长边处有 4 对缺陷,缺陷深度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 mm,缺陷厚度均为 0.05~0.06 mm。为了增强检测表面的红外发射率,在检测面涂了黑漆。

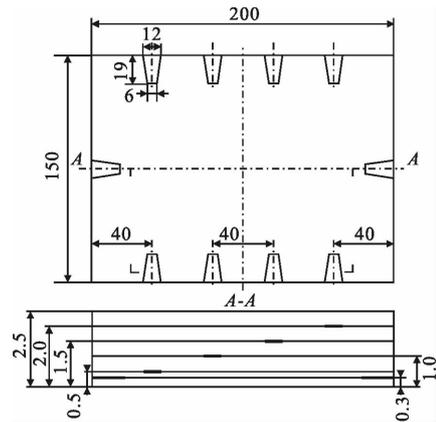


图 2 试件几何图

Fig.2 Shape and size of the sample (all dimensions in mm)

设计了三组调制频率不同的调制热像法实验,调制频率分别为 $f=0.0625$ Hz、 $f=0.0413$ Hz、 $f=0.03125$ Hz,采样时长分别为 $T=48$ s、 $T=72$ s、 $T=64$ s,采样频率均为 $f_s=1$ Hz。

3 应用复 Morlet 小波变换的红外热像序列处理及参数筛选

3.1 调制热波信号

根据调制热像法进行缺陷检测的原理,设试件前表面受简谐热波加热,热波的热流密度为:

$$q(t)=\begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ q_0 \sin(2\pi ft), & t > 0 \end{cases} \quad (6)$$

对于厚度有限的被测试件,可看作有限厚度无限大平板。根据一维传热理论,可以得到稳态阶段试件表面过余温度的近似解为^[11]:

$$\theta(t) = \frac{q_0 \sqrt{\alpha}}{\lambda \sqrt{\omega}} \left(1 + 2e^{-\frac{2L}{\mu}} \cos\left(\frac{2L}{\mu}\right) + e^{-\frac{4L}{\mu}} \right)^{\frac{1}{2}} \times \sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{4} - \phi\right) \quad (7)$$

其中

$$\phi = \phi(L) = \arctan \left(\frac{e^{-\frac{2L}{\mu}} \sin\left(\frac{2L}{\mu}\right)}{1 + e^{-\frac{2L}{\mu}} \cos\left(\frac{2L}{\mu}\right)} \right) \quad (8)$$

式中： α 为热扩散系数； λ 为材料热导率； μ 为热扩散波长， $\mu = \sqrt{\alpha/\pi f}$ ； L 为无限大平板的厚度。无缺陷区的 L 为试件的厚度，缺陷区的 L 为缺陷深度。根据公式(8)可得，试件表面过余温度的稳定热波分量的相位 ϕ 是厚度 L 的函数。因此，可以利用相位或相位差检测缺陷。

3.2 尺度总数 M 和各尺度值 a 的选择

实际调制热像信号是对单一频率余弦信号和阶跃信号热流激励瞬态响应的叠加，含有低频噪声和 高频噪声。利用小波变换的多尺度特性和调制热激励的调制频率 f ，可以将调制热像信号中余弦分量与噪声分量分离。同时，当小波基的中心频率 f_a 与调制频率 f 最接近时，小波基分解得到的小波系数能有效表征调制信号的相位，该小波基对应的尺度 a 为小波分析调制热像信号的有效尺度 a_e 。为了快速找到 a_e ，可使各尺度下小波基的 f_a 在频域内等间隔分布。记尺度总数为 M ，第 i 个尺度对应的值记作 a_i ，尺度 a_i 下小波基的中心频率为 f_{ai} ，则令 f_{ai} 满足：

$$f_{ai} = f_s \cdot (M+1-i)/2M \quad i=1, 2, \dots, M \quad (9)$$

可得到各尺度下小波基的 f_{ai} 在频域内等间隔分布。根据公式(5)，尺度 a_i 下，小波基的中心频率：

$$f_{ai} = f_c \cdot f_s / a_i \quad (10)$$

根据公式(9)、(10)可得，尺度 a_i 的计算公式为：

$$a_i = 2f_s M / (M+1-i) \quad i=1, 2, \dots, M \quad (11)$$

公式(9)表明各尺度对应的小波基的中心频率 f_{ai} 在频域内等间隔分布后， f_{ai} 与母小波函数的带宽 f_b 和中心频率 f_c 无关，与尺度总数 M 和采样频率 f_s 有关。

为了观察实际调制热像信号中的噪声分布，参数试验采用了两组信号，分别记为 θ_1 和 θ_2 。信号 θ_1 取自调制热像序列中任意一像素点的热像信号。调制热像序列的调制频率 $f=0.0625$ Hz。信号 θ_2 是单一频率的理想稳定热波信号，表达式为：

$$\theta_2(n) = 1 + \sin\left(2\pi f \frac{n}{f_s} - \frac{\pi}{2}\right) \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (12)$$

式中： $f=0.0625$ Hz。两组信号的采样频率 $f_s=1$ Hz，采样点数 $N=48$ ，包含 3 个调制周期。

为了探究尺度总数对信号 θ_1 和信号 θ_2 的小波分解的影响，设置了 4 组参数试验，其尺度总数 M 如表 1 所示，计算得到小波系数的时间-频率图(简称：时频图)。

表 1 尺度总数 M 选择

Tab.1 Choice of the total number of scales M

| Signal | Total number of scales M | | | |
|------------|----------------------------|----|----|----|
| θ_1 | 8 | 12 | 16 | 20 |
| θ_2 | 8 | 12 | 16 | 20 |

图 3 和图 4 分别为 M 取不同值时，两组数据的小波变换时频图。

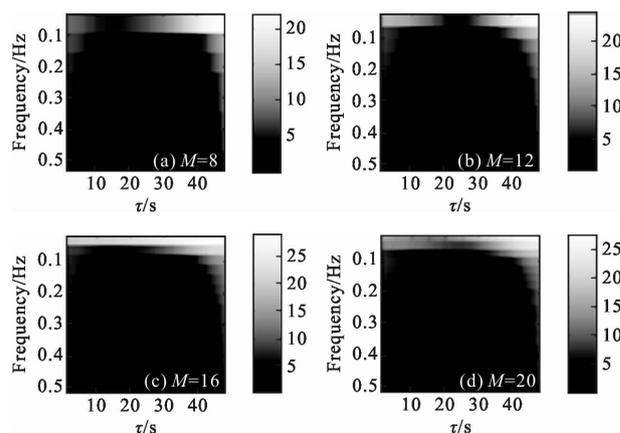


图 3 信号 θ_1 的小波系数时频图

Fig.3 Time-frequency graph of wavelet coefficients of signal θ_1

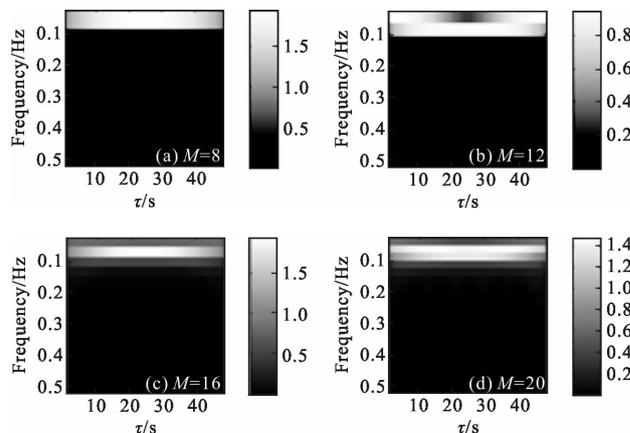


图 4 信号 θ_2 的小波系数时频图

Fig.4 Time-frequency graph of wavelet coefficients of signal θ_2

比较两组结果发现, 实际调制热像信号存在大量低频的噪声信号, 当选择的尺度数目过小时, 频率分辨率变小, 无法区分低频噪声和余弦分量。为了有效表征调制热像信号, 同时降低调制热像信号中低频噪声和低频噪声, 可选择合适的尺度总数 M , 使调制热像法信号调制频率 f 位于尺度 a_{M-1} 的频谱范围内。由于各尺度的中心频率为等间隔, 可令 f 满足:

$$\frac{f_{a(M-1)}+f_{aM}}{2} \leq f \leq \frac{f_{a(M-1)}+f_{a(M-2)}}{2} \quad (13)$$

式中: $f_{aM}, f_{a(M-1)}, f_{a(M-2)}$ 依次分别为尺度 a_M, a_{M-1}, a_{M-2} 下小波基的中心频率。由公式(9)、公式(13)可以得到:

$$\frac{3f_s}{4f} \leq M \leq \frac{5f_s}{4f} \quad (14)$$

当小波分解的尺度总数 M 满足公式(14)时, 尺度 a_{M-1} 的小波变换系数可以有效表征调制热像信号, 同时降低噪声分量的干扰, 是小波分析调制热像序列的有效尺度 a_e 。

3.3 相位图的筛选

根据公式(3), 小波系数相位在计算过程中会产生突变, 该时刻的相位图含有大量噪声。当被分析的热像序列是调制频率 $f=0.0625\text{ Hz}$ 、采样频率 $f_s=1\text{ Hz}$ 、采样时长 $T=48\text{ s}$ 、分辨率为 $320\text{ pixel} \times 240\text{ pixel}$ 的调制热像温度序列, 根据公式(14), 选择小波分解尺度总数 $M=15$, 第 14 个尺度为有效尺度, 即 $a_e=a_{14}$ 。

对热像序列中每个像素点的温度序列进行小波变换, 提取有效尺度 a_e 所对应的小波相位图序列。图 5 和图 6 分别为一个典型像素点的调制热像信号温度曲线及其有效尺度下小波系数相位曲线, 小波系数相位曲线为周期变化的正切曲线, 且周期与调制热像信号的周期一致。图 7 为非突变时刻的小波系数相位图。图 8 为小波系数相位值突变时间的相位图。

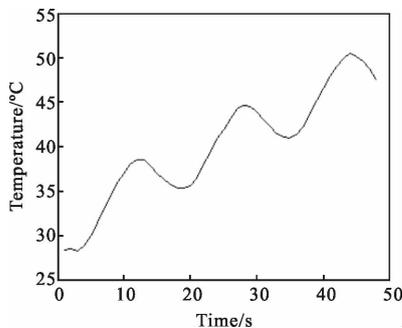


图 5 典型的调制热像信号曲线

Fig.5 A typical curve of the modulated thermal signal

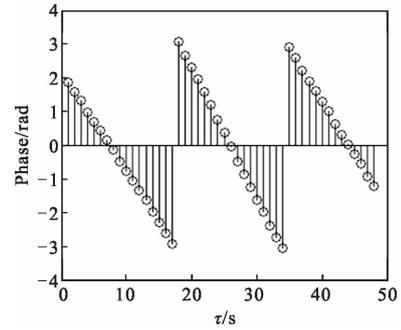


图 6 有效尺度 a_e 下的小波系数相位曲线

Fig.6 Phase curve of the wavelet coefficients with the effective scale a_e

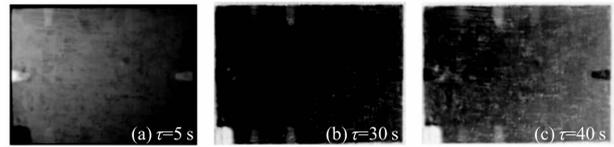


图 7 非突变时刻的小波系数相位图

Fig.7 Phase images of wavelet coefficients when the phase doesn't jumps

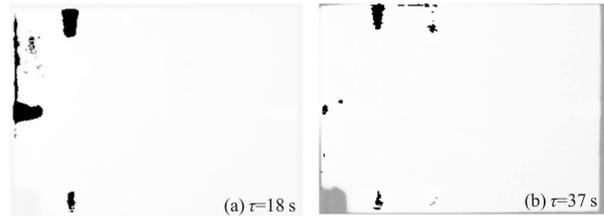


图 8 突变时刻的小波系数相位图

Fig.8 Phase images of wavelet coefficients when the phase jumps

比较图 7 和图 8 可得出: 由于试件内部具有不一致性, 导致热波在试件内传递不均匀, 进而引起各个像素点小波系数相位突变在时间上存在差异, 造成相位图噪声过大, 影响缺陷识别。由图 5 和图 6 可得出: 小波系数相位的变化周期与热激励作用于试件的调制周期一致。因此, 可以利用热激励调制周期 ($1/f$) 定位并剔除调制周期开始、结束时刻及其邻近时刻的小波系数相位图。

3.4 实验数据处理结果及分析

为了探究小波相位法与傅里叶变换法对表征不同深度缺陷的优劣, 采用两种算法处理调制热像法实验所采集的热像序列, 获得小波系数相位图序列和 FFT 相位图。记三组调制热像法实验分别为实验 1、实验 2、实验 3。根据公式(14), 三组实验采用的小波分解尺度总数 M 和有效尺度 a_e 如表 2 所示。

表 2 实验尺度总数 M 和有效尺度

Tab.2 Total number of scales M and effective scale of the experiments

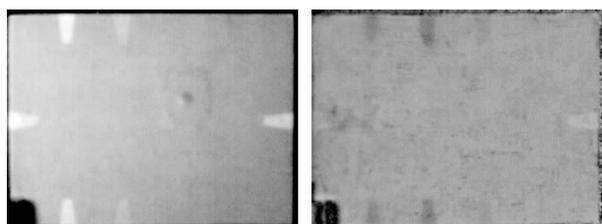
| No. | Modulation frequency f/Hz | Total number of scales M | Effective scale a_e |
|-----|------------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1 | 0.062 5 | 20 | 19 |
| 2 | 0.041 3 | 30 | 29 |
| 3 | 0.031 25 | 40 | 39 |

选取信噪比作为定量评价标准,其定义为:

$$S = |\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}| / \sigma_{nd} \quad (15)$$

式中: \bar{T}_d 和 \bar{T}_{nd} 分别为有缺陷区和无缺陷区相位值的平均值; σ_{nd} 为无缺陷区相位值的标准差。

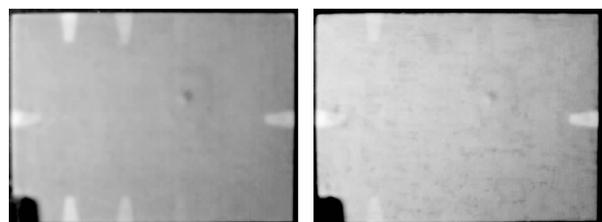
三组实验的热像序列处理结果分别如图 9~11 所示。其中,图 9(a)、图 10(a)和图 11(a)分别为三组实验的小波系数相位法结果;图 9(b)、图 10(b)和图 11(b)分别为三组实验的傅里叶变换相位图。表 3、表 4 和表 5 分别为三组实验中用两种方法求得的相位图像的信噪比。复 Morlet 小波相位法的缺陷信噪



(a) $\tau=24$ s 小波系数相位图 (b) $f_0=0.0625$ Hz FFT 相位图
(a) Phase image of wavelet coefficients with $\tau=24$ s (b) Phase image of FFT method with $f_0=0.0625$ Hz

图 9 调制频率 $f_0=0.0625$ Hz 实验结果图

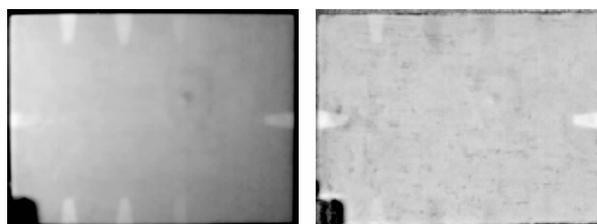
Fig.9 Experimental results for modulation frequency $f_0=0.0625$ Hz



(a) $\tau=69$ s 小波系数相位图 (b) $f_0=0.0430$ Hz FFT 相位图
(a) Phase image of wavelet coefficients with $\tau=69$ s (b) Phase image of FFT method with $f_0=0.0430$ Hz

图 10 调制频率 $f_0=0.0430$ Hz 实验结果图

Fig.10 Experimental results for modulation frequency $f_0=0.0430$ Hz



(a) $\tau=51$ s 小波系数相位图像 (b) $f_0=0.03125$ Hz FFT 相位图
(a) Phase image of wavelet coefficients with $\tau=51$ s (b) Phase image of FFT method with $f_0=0.03125$ Hz

图 11 调制频率 $f_0=0.03125$ Hz 实验结果图

Fig.11 Experimental results for modulation frequency $f_0=0.03125$ Hz

比的获取方法是取每个缺陷在相位图序列中的信噪比的最大值。FFT 相位法的结果图为 FFT 变换后频率 f_0 等于热激励调制频率 f 、或最接近热激励调制频率 f 的相位图。

表 3 调制频率 $f_0=0.0625$ Hz 时两种方法相位图像的信噪比

Tab.3 SNRs of the phase images of the two methods for the modulation frequency $f_0=0.0625$ Hz

| Location of defects /mm | Complex Morlet wavelet phase method | FFT phase method |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Left edge 0.3 | 32.87 | 1.03 |
| Right edge 0.3 | 12.15 | 3.42 |
| Top edge 0.5 | 9.89 | 5.69 |
| Bottom edge 0.5 | 14.25 | 4.94 |
| Top edge 1.0 | 4.83 | 5.69 |
| Bottom edge 1.0 | 4.28 | 7.97 |
| Top edge 1.5 | 2.68 | 1.32 |
| Bottom edge 1.5 | 0.78 | 1.81 |

表 4 调制频率 $f_0=0.0413$ Hz 时两种方法相位图像的信噪比

Tab.4 SNRs of the phase images of the two methods for the modulation frequency $f_0=0.0413$ Hz

| Location of defects /mm | Complex Morlet wavelet phase method | FFT phase method |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Left edge 0.3 | 32.69 | 16.33 |
| Right edge 0.3 | 14.00 | 9.75 |
| Top edge 0.5 | 10.50 | 2.75 |
| Bottom edge 0.5 | 19.53 | 5.13 |
| Top edge 1.0 | 7.99 | 1.34 |
| Bottom edge 1.0 | 10.88 | 2.29 |
| Top edge 1.5 | 1.21 | 2.22 |
| Bottom edge 1.5 | 3.58 | 0.46 |

表 5 调制频率 $f_0=0.031\ 25\ \text{Hz}$ 时两种方法相位图像的信噪比

Tab.5 SNRs of the phase images of the two methods for the modulation frequency $f_0=0.031\ 25\ \text{Hz}$

| Location of defects /mm | Complex Morlet wavelet phase method | FFT phase method |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Left edge 0.3 | 16.76 | 14.45 |
| Right edge 0.3 | 5.97 | 16.11 |
| Top edge 0.5 | 4.55 | 4.46 |
| Bottom edge 0.5 | 8.33 | 2.41 |
| Top edge 1.0 | 5.37 | 2.42 |
| Bottom edge 1.0 | 6.58 | 5.93 |
| Top edge 1.5 | 1.24 | 1.66 |
| Bottom edge 1.5 | 3.55 | 2.77 |

结合三组实验的复 Morlet 小波相位法和 FFT 相位法的结果图和信噪比可以发现：

(1) 复 Morlet 小波相位法结果图没有受到材料表面杂斑信号影响,缺陷区域清晰,轮廓完整,且不论缺陷深浅,在相位图均为亮斑,即缺陷处的小波系数相位总是超前于非缺陷处的小波系数相位。随着热激励调制频率 f 的降低,可以检测到较深层缺陷。对于 FFT 相位法,从结果图中看到:当提取的频率 f_0 等于热激励调制频率 f 时,可以检测到深度不大于 1.5 mm 的分层缺陷,如图 9(b)和图 11(b);当提取的频率 f_0 不等于热激励调制频率 f 时,只能检测部分深度缺陷,如图 10(b)。其次,在图 9(b)和图 11(b)中,浅层缺陷为亮斑,深层缺陷为暗斑,即缺陷处的相位与非缺陷处的相位的超前和滞后关系随缺陷深度的变化发生了反转,可能存在某种深度缺陷被漏检的情况。同时,暗斑处缺陷轮廓不清晰,相位图整体受材料表面杂斑的影响比较大,含有明显的噪声。

(2) 对于深度为 0.3 mm 和 0.5 mm 的浅层缺陷,最佳调制频率位于 [0.041 3 Hz, 0.062 5 Hz] 区间内,且复 Morlet 小波相位法的信噪比高于 FFT 相位法;对于深度为 1.0 mm 的中层缺陷,最佳调制频率位于 0.041 3 Hz,复 Morlet 小波相位法的信噪比略高于 FFT 相位法;对于深度为 1.5 mm 的较深层缺陷,最佳调制频率位于 [0.031 25 Hz, 0.041 3 Hz] 区间内,复 Morlet 小波相位法与 FFT 相位法检测效果相近;对

于深度为 2.0 mm 的深层缺陷,在两种方法的结果图中均无法观测到。

(3) 调制热像法对 GFRP 层压板分层缺陷的检测效果与热激励信号的调制频率有关,适当降低调制频率可以检测到较深的缺陷,调制频率达到 0.031 25 Hz 时可以检测到深度不大于 1.50 mm 的分层缺陷。对于深度大于等于 2.00 mm 的分层缺陷,可能需要更低的调制频率,而对应的调制周期也会更长。

4 结论

(1) 复 Morlet 小波相位法可以有效去除调制热像信号的低频和低频噪声,相当于带通滤波器,利用该方法可以提取包含调制频率 f 的一定频率范围内的信号,达到降噪目的。

(2) 文中给出了复 Morlet 小波分析时尺度的自适应选取方案,以提取有效尺度——调制频率所在尺度。实验验证了该方案的有效性。

(3) 复 Morlet 小波相位法能稳定地提取试件不同深度的分层缺陷,对热激励调制频率 f 的选取要求较低,即对热激励调制频率的变化有良好的宽容性。当存在不同深度缺陷时,由于缺陷区小波系数相位总超前于非缺陷区小波系数相位,采用复 Morlet 小波相位法不会存在漏检情况。而 FFT 相位法只有在特定频率 f 下才能取得对应深度缺陷的较佳检测结果,存在某种深度缺陷漏检的情况。

(4) 针对小波系数相位图序列的后处理,文中提出一种去除小波系数相位突变时刻的相位图方法,保留了小波变换在时域内多分辨率的特性,进而更全面地表征不同深度的缺陷特征。而小波基位移量 τ 和缺陷深度的关系仍待进一步研究。

参考文献:

[1] Vavilov V P, Burleigh D D. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing[J]. *NDT & E International*, 2015, 73(1): 28-52.

[2] Siddiqui J A, Arora V, Mulaveesala R, et al. Infrared thermal wave imaging for nondestructive testing of fibre reinforced polymers [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55 (7): 1239-1245.

[3] Vavilov V. Thermal NDT: historical milestones, state-of-the-art and trends [J]. *Quantitative Infrared Thermography*

- Journal*, 2014, 11(1): 66–83.
- [4] Delanthabettu S, Menaka M, Venkatraman B, et al. Defect depth quantification using lock-in thermography [J]. *Quantitative Infrared Thermography Journal*, 2015, 12(1): 37–52.
- [5] Liu Junyan, Dai Jingmin, Wang Yang. Theory and experiment of IR lock-in thermography with image sequence processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 346–351. (in Chinese)
刘俊岩, 戴景民, 王扬. 红外图像序列处理的锁相热成像理论与试验[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 346–351.
- [6] Mallat S G. A Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674–693.
- [7] Ba Guijie. Research on infrared image characteristics and applications based on generalized wavelet transform [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 40–55. (in Chinese)
巴桂洁. 基于广义小波变换的红外图象特性分析及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 40–55.
- [8] Galmiche F, Maldague X. Depth defect retrieval using the wavelet pulsed phased thermography [C]//Proceedings of the 5th Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT), 2000: 036.
- [9] Guo Wei, Dong Lihong, Wang Haidou, et al. Phase spectra extract of thermal wave with wavelet decomposition and coating thickness estimation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0904003. (in Chinese)
郭伟, 董丽虹, 王海斗, 等. 基于小波分解的热波相位特征提取及喷涂层厚度评价[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(9): 0904003.
- [10] Robert Olbrycht, Boguslaw Wiecek, Grzegorz Gralewicz, et al. Comparison of Fourier and wavelet analyses for defect detection in lock-in and pulse phase thermography [J]. *Quantitative Infrared Thermography Journal*, 2007, 4(2): 219–232.
- [11] Guo Xingwang, Li Ransheng, Ding Mengmeng. Simulating modulated thermography of cladding debond in solid rockets [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(2): 9–15. (in Chinese)
郭兴旺, 李苒笙, 丁蒙蒙. 固体火箭包覆层脱粘调制红外热波检测法的数值模拟 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(2): 9–15.