

复合材料散斑检测中的小波降噪技术

Wavelet De-Noising of Shearography Image of NDT for Composite

北京航空工程技术研究中心 崔永忠 丁利平

中国科学技术大学电子工程与信息科学系 张 坚

[摘要] 电子剪切散斑干涉检测技术非常适宜复合材料的无损检测。但散斑图像往往含有较大的噪声, 如何对散斑图像进行降噪处理是一个非常重要的问题。小波变换是变分辨率的分析方法, 可以有效地降低噪声, 而同时又较好地保存了图像细节, 本文应用小波降噪技术来对散斑图像进行降噪处理, 取得了较好的效果。

关键词: 剪切散斑 小波变换 降噪

[ABSTRACT] Electronic shearography interference testing technology is extremely fitting for non-destructive testing of composite. The testing image of shearography includes much noise, so de-noising is a very important problem to resolve. Wavelet transformation is multi-resolution analysis, which can reduce noise effectively and keep details of image at the same time. Wavelet de-noising technique is applied to reduce noise of shearography image and experimental result is satisfactory.

Keywords: Shearography Wavelet transformation Denoising

随着相移技术和数字图像处理技术的发展, 电子剪切散斑干涉术 (Electronic Shearing Speckle Pattern Interferometry, ESSPI) 在复合材料无损检测中显得越来越重要。剪切散斑干涉检测技术是通过干涉图像的判读来进行检测的, 因此散斑图像的可读性好坏非常重要。而散斑图像往往含有较大的噪声, 如何对散斑图像进行降噪处理是一个非常重要的问题。

传统的基于频域降噪处理的方法, 一般是采用低通滤波, 将高频的噪声分量滤去, 但由于分辨率不可变的问题, 图像的细节信息也随之丢失了。小波变换是变分辨率的分析方法, 可以在有效地降低噪声的同时, 较好地保存图像细节。

1 小波降噪原理

小波分析的思想来源于伸缩与平移方法。1984

年, 法国地球物理学家 Morlet 引入小波概念后, 经 Meyer、Grossmann、Daubechies 和 Mallat 等人的研究, 形成了较为完整的小波分析方法。

1.1 小波变换

母小波 (基本小波) 函数 $\psi(x)$ 经过伸缩、平移后得到的一个小波序列 $\psi_{a,b}(x)$ 如下:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (1)$$

信号 $f(x)$ 的连续小波变换定义为

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{a,b}^*(x) dx = \langle f(x), \psi_{a,b}(x) \rangle \quad (2)$$

式中, a 为尺度因子; b 为平移因子; $*$ 为共轭; $\langle \cdot \rangle$ 为内积运算。

上式描述了信号与小波序列的内积关系, 其物理意义在于它反映了信号与小波序列函数的相似程度。小波变换就是将信号 $f(x)$ 与小波基做卷积。因此连续小波变换可以理解为将信号和小波函数进行比较的结果, 幅值和相位综合反映了它们的相似程度。

小波分解的实质是把信号在小波基上展开, 将其分解到不同频带上的过程。信号的小波分解 (小波级数) 是一种无限和式, 由于采样频率和计算机的限制, 往往将这个和式截取到某个期望阈值而得到信号的一个近似表示。三级小波分解示意图如图 1 所示。

在图 1 中, S 表示待分析信号, cA_i 为近似 (Approximation) 系数, 它是尺度系数构成的行向量, 它反映了信号的低频部分; cD_i 为细节 (Detail) 系数, 它是小波系数构成的行向量, 它反映了信号的高频部分。

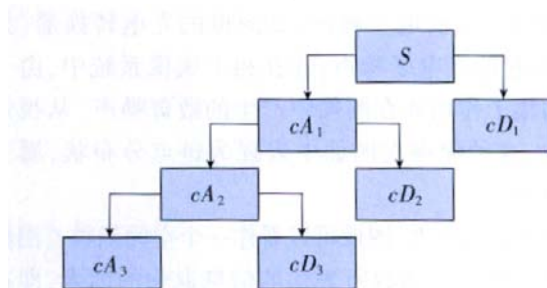


图 1 三级小波分解示意图

Fig.1 Three-tier wavelet decomposition

1.2 小波降噪方法

小波具有低熵性、去相关性、选基灵活和多分辨率等特点^[1]。小波变换在时域、频域均具有很好的局部性,其变尺度的特性使得小波变换对确定的信号具有一种“集中”的能力^[2]。在信号处理领域中,利用离散小波变换的方法进行信号降噪已经获得了越来越广泛的应用。其基本原理就是根据小波变换的性质和噪声的统计特性,选择合适的阈值以及阈值函数,根据该阈值和阈值函数对含噪的小波系数进行非线性变换,并对变换后的小波系数实施逆变换,从而得到经降噪的信号^[3]。

在小波变换域中,比较大的小波系数一般都是信号信息,而小的系数则是噪声信息。噪声能量集中于高频,而图像频谱则分布于一个有限区间^[4]。因此,可通过设定合适的阈值,将小于阈值的系数置零,而保留大于阈值的系数。然后经过阈值函数映射得到估计系数,对估计系数进行逆变换,得到降噪后的信号。小波变换的降噪流程如图 2 所示。

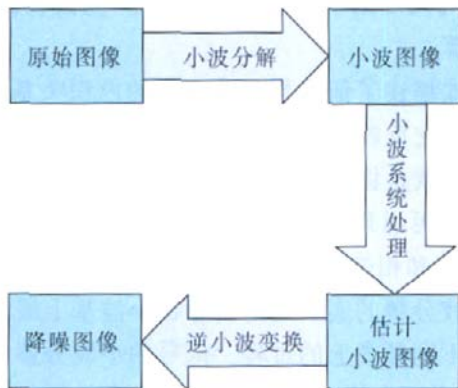


图 2 小波变换的降噪流程

Fig.2 De-noising process of wavelet transform

1.3 图像噪声分析

经分析,电子剪切散斑检测图像的噪声由以下 3 个方面的噪声构成: 图像采集电路阻性器件中的电子运动而产生的电子噪声; 图像的光电转换器(如 CCD)引起的光电子噪声; 在相干成像系统中,由于光波的相干作用而在图像中产生的散斑噪声。从视觉角度看,这种噪声在图像中表现为斑点分布状,属于高斯白噪声。

从数学角度看,图像可以看作一个空间函数 f , 图像噪声就是使这个函数所表达的信息退化的因素,即在噪声的影响下,图像退化为 \tilde{f} 。按噪声使图像退化的方式可分为加性噪声和乘性噪声,可以分别表达如下式

$$\tilde{f} = f + n \quad (3)$$

$$\tilde{f} = f \cdot n \quad (4)$$

式中, n 为噪声。

从噪声的性质来分析,散斑噪声既包含乘性噪声的成分,也包含加性噪声的成分,可由下式表达:

$$\tilde{f} = f \cdot n_m + n_a \quad (5)$$

式中, n_m 为乘性噪声; n_a 为加性噪声。

大部分情况下,加性噪声对图像的影响远小于乘性噪声的影响,所以可将加性噪声忽略,认为散斑噪声是一种乘性噪声。

2 图像小波阈值降噪

通过上面的分析可以看出,图像小波降噪方法的主要工作是对原始的含噪图像进行小波分解,然后选取合适的阈值对变换后的小波系数进行处理。

2.1 图像分解

对图像进行小波分解就是用低通滤波器 H 和高通滤波器 G 对图像的行列进行滤波(卷积),然后进行二取一的下抽样。这样进行一次小波变换就将图像分解为一个低频子带 LL (水平方向和垂直方向均经过低通滤波)和 3 个高频子带(即用 HL 表示的水平高通、垂直低通子带,用 LH 表示水平低通、垂直高通子带,用 HH 表示的水平高通、垂直高通子带),分辨率为原来的 $1/2$,频率范围各不相同。第二次小波变换只对 LL 子带进行,进一步将 LL 子带分解为 $LL1$ 、 $LH1$ 、 $HL1$ 和 $HH1$,分辨率为原来的 $1/4$,频率范围进一步减半,依此类推。所以,每进行一次小波变换得到 4 个子带,进行次分解就得到个子带,若进行 3 层分解,则得 10 个子带。图 3 所示为图像的 3 层分解示意图(共有 10 个子带),图中箭头所指方向为同一空间方向。

2.2 阈值选取

在小波阈值降噪技术中,阈值的选择是决定算法

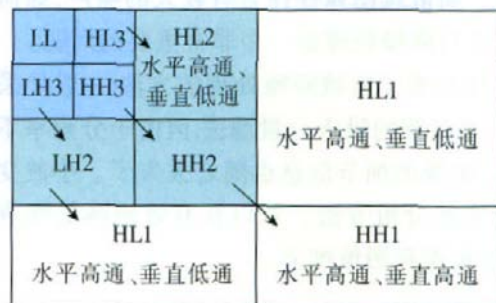


图 3 图像三级小波分解示意图

Fig.3 Three-tier wavelet decomposition of image

性能的关键因素。如果阈值较大,可去掉大部分噪声,但也去掉了图像细节;如果阈值较小,虽然保留了图像细节,但噪声去除效果不理想。阈值设定方法有硬阈值(Hard-Thresholding)法和软阈值(Soft-Thresholding)法。

硬阈值法是将绝对值小于阈值的小波系数置为0,而将绝对值大于阈值的小波系数不加任何处理地给予保留。硬阈值法可以很好地保留图像边缘等局部特征,但得到的估计小波系数的连续性差,在含有丰富边缘图像中会出现振铃、伪吉布斯(Pseudo-Gibbs)效应等视觉失真。

软阈值法是令绝对值小于阈值的信号点的值为0,而其它信号点向0收缩。在处理绝对值大于阈值的小波系数时,不是完全保留而是作收缩处理,即减小这些系数,这样可使重建的信号比较光滑。但这种算法减小了绝对值大的小波系数,造成了一定的高频信息损失,其结果导致了图像的边缘模糊等失真现象。

设图像 f 经过小波变换后的系数为 W_f , 阈值设为 T , 经过阈值函数处理过的小波系数为 \hat{W}_f 。硬阈值法的计算公式如式 6 所示,软阈值法的计算公式如式 7 所示。

$$\hat{W}_f = \begin{cases} W_f, & |W_f| \geq T \\ 0, & |W_f| < T \end{cases} \quad (6)$$

$$\hat{W}_f = \begin{cases} \text{sign}(W_f) \cdot (|W_f| - T), & |W_f| \geq T \\ 0, & |W_f| < T \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\text{sign}(\cdot)$ 为取符号运算。

Doncho 提出的全局阈值的计算方法^[9]如下。

$$T = \sqrt{2 \log(n)} \quad (8)$$

式中, n 为信号长度; σ^2 为噪声方差。

可由绝对偏差的中值来估计。

$$T = \text{Median}(|d|) / 0.6745 \quad (9)$$

式中, d 为最细尺度上的小波系数; $\text{Median}(\cdot)$ 为取中值运算。

3 试验研究

本文采用渥拉斯顿(Wollaston)棱镜的剪切散斑检测系统,设计了复合材料检测试件,试件的蒙皮为玻璃钢材料,蜂窝结构为纸质。试件长 350mm;宽 180mm;高 25mm。蒙皮厚度 4mm。蜂窝构成形式为正六边形,边长为 6mm。人工制作的脱粘区域分别为直径 40mm、20mm 和 10mm 的 3 个圆形区。试件采用热加载,对 40mm 缺陷进行检测,得到的原始检测结果如图 4 所示。检测图像大小为 768×576 像素。

经过对常用小波的对比研究,本文选用 sym7 小波,对原始检测图像进行 3 层分解,分解结果如图 5 所示。之所以进行 3 层分解是兼顾计算量和降噪效果,因为如果分解层次过少,虽然计算量减少,但降噪效果不佳;反之,增加分解层数,计算量增加,处理图像的效率降低。图 5 中的各部分完全对应于图 3 中的各部分。



图 4 原始检测结果

Fig.4 Raw test results

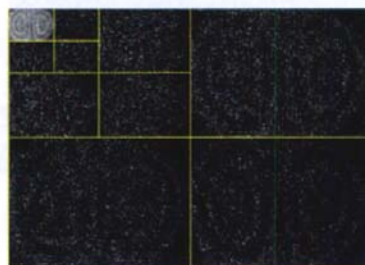


图 5 sym7 小波 3 层分解

Fig.5 Sym7 wavelet three-tier decomposition

根据硬阈值法对变换后的小波系数进行处理,然后进行重构,得到的降噪图像如图 6 所示。同理,软阈值法的降噪图像如图 7 所示。

通过对比,可看出采用软阈值方法的降噪效果比采用硬阈值方法的效果要光滑一些,但边缘比较模糊。这与理论分析的结果完全一致。

硬、软阈值方法都是对水平、垂直和对角三个方向的小波细节系数进行处理,目的是保留一些高频的



图 6 硬阈值法降噪结果

Fig.6 Result of hard-thresholding de-noising

