

文章编号:1674-8190(2013)02-247-05

小波去噪法在复合材料变形测量中的应用

张婷, 郑锡涛

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 为了提高数字散斑相关方法(DSCM)在复合材料变形测量中的精度,将数字散斑技术与小波去噪技术相结合,采用阈值去噪法对小波系数进行阈值量化处理,并进行复合材料的拉伸试验,同时使用DSCM及引伸计进行测量,再使用该小波去噪法对DSCM测量的结果进行去噪,并与引伸计所测结果相比较。结果表明:去噪后的DSCM的测量结果与引伸计测量的结果吻合得更好,精度更高,说明该小波去噪法能够较好地去除数字散斑相关测量和计算中的噪声。

关键词: 小波去噪;数字散斑相关方法;复合材料;变形测量

中图分类号: V214.8; O348

文献标识码: A

Application of Wavelet Denoising to Deformation Measurement of Composites

Zhang Ting, Zheng Xitao

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of deformation measurement with the Digital Speckle Correlation Method(DSCM) in composites, digital speckle technology is combined with wavelet denoising technology, and threshold denoising method is used to threshold quantification for wavelet coefficients. Then the tensile test of composites which is measured with DSCM and extensometer is performed, and this wavelet denoising method is used to the results of the measurement with DSCM. Finally, it shows that the results agree well with the measurement results of the extensometer. The wavelet denoising method can be used in the DSCM to eliminate the noises preferably.

Key words: wavelet denoising; Digital Speckle Correlation Method; composites; deformation measurement

0 引言

数字散斑相关方法(Digital Speckle Correlation Method,简称DSCM)是在20世纪80年代初由W. H. Peters和W. F. Ranson等^[1]提出的,是一种用于测量物体面内位移的非接触光学测量方法。

DSCM主要包括数字散斑图像的形成与采集、数字散斑相关计算、后处理等步骤。图像采集过程中和相关计算时引入的噪声影响了数字散斑

相关的测量精度,而系统的假设和环境与光源的不稳定性、CCD相机的电子噪声和相关搜索定位时引入的噪声等是导致测量结果产生误差的主要原因。因此,为了使DSCM得到进一步的应用与研究,需要对如何去除或减少这些噪声对测量精度的影响进行研究。小波分析在信号的瞬态分析、图像的边沿分析、图像处理、数据压缩、分形信号等方面得到了广泛的应用,是一种信号去噪的有力工具。

本文将小波分析与DSCM相结合,提出一种适用于DSCM的小波去噪方法,并将其运用在DSCM中对玻璃纤维复合材料进行变形测量,来验证小波去噪在数字散斑技术中的良好去噪效果,以为材料及其结构的变形测量提供一定的参考。

收稿日期:2012-01-14; 修回日期:2012-02-19

通信作者:郑锡涛,zhengxt@nwpu.edu.cn

1 DSCM 原理

DSCM 是光测力学与现代数字图像处理技术相结合的产物,是一种从物体表面随机分布的散斑或者人工制作的散斑中直接提取变形量的全场非接触光测实验力学方法。

DSCM 的基本原理是:首先用 CCD 相机记录下被测物体变形前后的两幅散斑图像,散斑可以根据物体本身的物理特性自然生成或者人工生成;然后通过相关搜索算法,根据变形前后两幅图像的匹配程度,确定物体变形前后对应的位置,从而得到全场位移。其中,衡量变形前后图像匹配程度的数学标准称为相关系数公式,通过求相关系数的极大值可以实现变形量的提取。

相关系数定义^[2]如下

$$C(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [f(x_i, y_j) - \bar{f}] [g(x_i^*, y_j^*) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [g(x_i^*, y_j^*) - \bar{g}]^2}} \quad (1)$$

式中: N 和 M 为计算窗口的大小; $f(x, y)$ 和 $g(x^*, y^*)$ 为变形前后所记录图像的灰度值分布; \bar{f} 为样本子区平均值; \bar{g} 为目标子区平均值。

在变形前后的散斑图上各取大小为 $M \times N$ 的子区域,计算相关系数 C ,当 C 取最大值时, u 和 v 即为变形后子区域中心的位移。相关系数曲面有较好的单峰性,对提高搜索算法的精度具有重要作用。式(1)中, C 的取值范围为 $[0, 1]$, $C_{max} = 1$, 主峰性强。

2 小波去噪法

设被噪声污染的一个信号的基本模型为

$$f(t) = s(t) + n(t) \quad (2)$$

式中: $s(t)$ 为有用信号; $n(t)$ 为一个 $(0, \sigma^2)$ 的宽平稳高斯白噪声。

小波变换是线性变换,故两个信号之和的小波变换等于两个信号小波变换的和。令 $Wf(j, k)$ 为 $n(t)$ 的小波变换, $\Psi(t)$ 为实函数,则有^[3]

$$E\{|Wf(j, k)|^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E\{n(u)n(v)\} \Psi_j(k-u)\Psi_j(k-v) dudv$$

$$= \frac{\sigma^2 \|\Psi\|^2}{j} \quad (3)$$

对于上述白噪声信号,其小波变换的平均功率与尺度 j 成反比,幅值随着小波变换尺度的增加而不断减小。随着尺度的增加,白噪声小波变换的方差也会有规律地减小,即 $D_j = D_{j-1}/2$, 其中 D_j 和 D_{j-1} 分别为白噪声小波变换在第 j 与第 $j-1$ 尺度的方差。小波去噪的本质是消除信号 $f(t)$ 中的噪声 $n(t)$, 恢复有用信号 $s(t)$ 。

小波在信号(图像)去噪领域已得到了越来越广泛的应用。其中阈值去噪方法^[4-6]是一种实现简单、效果较好的小波去噪方法。阈值法的去噪依据是通过图像进行小波变换,得到小波变换系数,信号对应的小波系数包含重要的信息,其数据较少,幅值变化较大。而噪声对应的小波系数的分布则恰好相反,通过设定特定的阈值对小波系数进行取舍,得到估计小波系数,最后通过估计小波系数进行小波重构,得到去噪后的图像。本文采用改进的软阈值函数来对小波系数进行阈值量化处理。改进的软阈值函数表达式为

$$\eta(w) = \begin{cases} w + T - \frac{T}{2k+1} & w < -T \\ \frac{1}{(2k+1)T^{2k}} w^{2k+1} & |w| \leq T \\ w - T + \frac{T}{2k+1} & w > T \end{cases} \quad (4)$$

式中: T 为阈值。

改进后的软阈值函数图如图 1 所示,横坐标表示信号的原始小波系数,纵坐标表示阈值化后的小波系数。

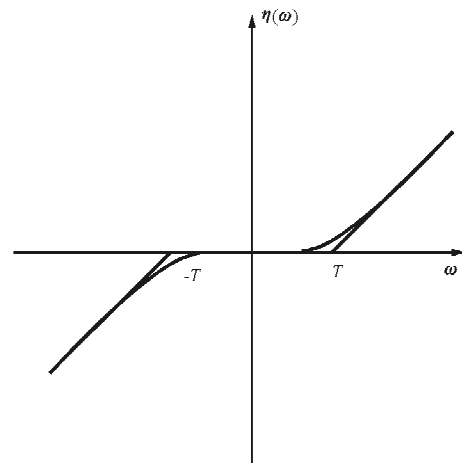


图 1 改进后的软阈值函数
Fig. 1 Improved soft threshold function

从图 1 可以看出,在噪声与有用信号之间有一个平滑的过渡区,更符合自然信号(图像)的连续性特性。

3 DSCM 的小波去噪设计

在 DSCM 中,对散斑图像的离散光强—灰度进行相关计算时,容易引入噪声。散斑图像有两组噪声源,即无位移噪声源和带位移噪声源。无位移噪声源是在不同时刻两幅原始无位移图像的相关位移数据,带位移噪声源是有位移与原始图像的相关位移数据。本文分别对这两种噪声源进行去噪处理,并且在设计小波去噪算法中运用了两种噪声的低频信号和高频信号分别相减的方法,因为随机高频噪声相减会提高高频噪声的频率,从而更易于去噪,同时也易于消除与位移信号频率接近的低频扰动噪声^[6]。

小波去噪详细步骤如下:

第一,对两种噪声源信号进行小波分解计算,得到低频系数和高频系数。

第二,对各个分解尺度下的高频系数进行阈值量化处理,无位移噪声信号这时仍存在低频部分,所以将无位移噪声信号与带位移噪声信号的低频和高频分别相减,即前者的高频部分减后者的高频部分,前者的低频部分减后者的低频部分。

第三,根据相减后的低频系数和相减后的高频系数进行小波逆变换信号重构。

第四,重构后的信号进行小波变换,保留低频部分。

第五,进行逆变换,即可得到去噪后的结果。

数字散斑相关方法的小波去噪流程如图 2 所示。其中,无位移的数字散斑相关测量是在试样静止的情况下,对同一散斑图连续采集两次得到的。由于噪声的影响,实际上此相关计算得到的相对位移并不为 0,数字散斑相关实际测试结果与理论有差异,周围环境和相机本身的电子噪声是产生这些误差的主要原因,如果对该结果进行小波去噪处理,这些噪声会明显减弱。

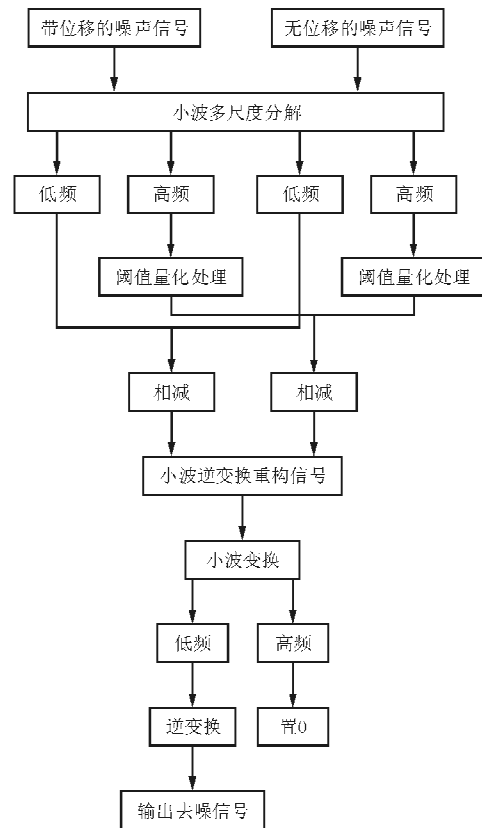
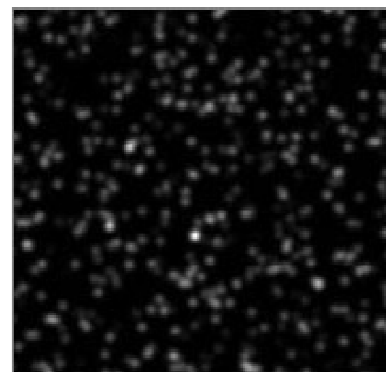


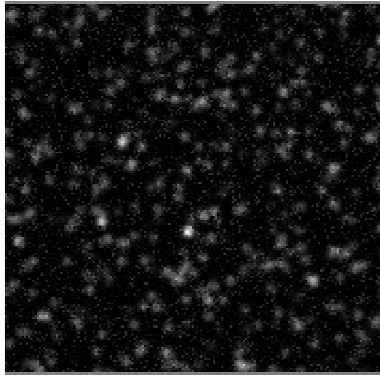
图 2 小波去噪流程图

Fig. 2 Flow chart of wavelet denoising

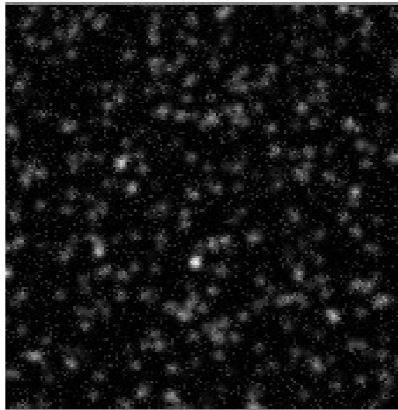
为了验证该算法,对原始图加入高斯白噪声后进行了平移,如图 3 所示。在图像行列上每隔 10 个像素点计算一个样点的位移,在整像素位移定位上采用改进的遗传算法,在亚像素位移定位上采用曲线拟合法,将计算结果与理论预测值进行比较,结果如表 1 所示, u 和 v 分别为横向位移和纵向位移。



(a) 原始图



(b) 加噪图



(c) 加噪后平移图

图3 模拟散斑图

Fig. 3 Simulated speckle pattern

表1 计算结果

Table 1 Calculation results

参数	预测值/像素	计算值/像素	误差/%
u	5.052	5.046	0.119
v	5.052	5.057	0.099

从表1可以看出,该算法去噪效果明显,数据准确度高,测量精度可达0.01个像素到0.005个像素。该方法适合对材料进行变形分析,在实际工程测量中有助于材料力学信息的提取。

4 复合材料单向板拉伸试验

目前复合材料在军用和民用方面的使用越来越广泛,对复合材料的研究也越来越被重视。玻璃纤维具有成本、低耐热耐化学腐蚀好、拉伸强度和耐冲击强度高、绝热及绝缘性能好等特点,因此被广泛应用于航空航天领域,如飞机的机翼、天线部

件、雷达罩等。

为了验证该小波去噪法在数字散斑相关测量中的应用,本文对玻璃纤维复合材料单向板进行拉伸试验,并用DSCM和引伸计进行变形测量,再用小波去噪法对数字散斑相关测试结果进行去噪,比较去噪前与去噪后的结果。

试样为 90° 铺层单向板,试样名义长度250 mm,工作段名义长度150 mm,名义宽度25 mm,实测厚度2.34 mm。试验中将该试样正面喷斑、背面安装引伸计,用DSCM和引伸计分别测量试样的变形情况。变形前的散斑图(参考图像)和加载载荷为5 745.9 N时的散斑图(目标图像)如图4所示。拉伸试验的结果如表2所示,位移量均为轴向位移。



(a) 变形前



(b) 变形后

图4 复合材料试样的表面散斑图

Fig. 4 Speckle pattern of composite specimen

表2 试验结果
Table 2 Test results

序号	载荷/N	引伸计 位移/mm	DSCM		去噪后	
			位移/mm	误差/%	位移/mm	误差/%
1	0	0	0	0	0	0
2	708.8	0.022	0.033	50.00	0.030	36.36
3	1366.4	0.058	0.070	20.68	0.065	12.07
4	1847.7	0.090	0.067	-25.56	0.073	-18.89
5	2135.8	0.110	0.144	30.91	0.128	16.36
6	2464.1	0.134	0.123	-8.21	0.127	-5.22
7	2730.0	0.155	0.176	13.55	0.173	11.61
8	3047.1	0.177	0.195	10.17	0.190	7.34
9	3325.2	0.198	0.258	30.30	0.230	16.16
10	3578.0	0.217	0.239	10.14	0.231	6.45
11	3875.8	0.240	0.255	6.25	0.254	5.83
12	4183.7	0.264	0.259	-1.89	0.261	-1.14
13	4464.4	0.286	0.293	2.45	0.290	1.40
14	4793.4	0.312	0.344	10.26	0.336	7.69
15	5076.3	0.335	0.309	-7.76	0.319	-4.78
16	5393.9	0.361	0.320	-11.36	0.331	-8.31
17	5745.9	0.382	0.353	-7.59	0.374	-2.09

注:误差是通过 DSCM 所测值相对于引伸计所测值计算得到的相对误差。

从表2可以看出,该小波去噪法在数字散斑相关测量中噪声信号大大减少,去噪效果明显,去噪后的结果与引伸计所测的结果较去噪前吻合得更好,相对误差基本上在20%以内,有个别点偏差较大,这与数字散斑相关方法本身的假设有关。

在利用相关系数计算提取变形信息时,其数学模型成立的条件为:假设物体表面上的散斑点在变形前后的灰度值不变;物体的变形为面内变形,忽略离面变形。而在实际测量中,一般都不严格符合上面的假设,所以在利用上面假设的前提下而提出的理论和公式来计算变形信息时,会引入误差。总体来说,经小波去噪后的数字散斑相关测量结果基本呈线性关系,符合复合材料的力学性能,说明利用该小波去噪法对复合材料进行变形测量是可行的。

5 结论

(1) 将小波技术运用在 DSCM 中进行去噪处理,提出了一种适用于数字散斑相关法的小波去噪

算法,并进行了模拟验证以及玻璃纤维复合材料的拉伸试验。

(2) 小波去噪法能够较好地去除数字散斑相关测量和计算中的噪声,去噪后的数字散斑相关方法的测量结果精度更高,为数字散斑技术在材料及其结构的变形测量中的应用和研究提供了可靠的理论与实验依据。

参考文献

- [1] Peters W H, Ranson W F. Digital image techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 427-432.
- [2] 金观昌, 孟利波, 陈俊达, 等. 数字散斑相关技术进展及应用[J]. 实验力学, 2006, 21(6): 689-702.
Jin Guanchang, Meng Libo, Chen Junda, et al. The progress and application of digital speckle correlation method [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(6): 689-702. (in Chinese)
- [3] 郭代飞, 高振明, 张坚强. 利用小波门限法进行信号去噪[J]. 山东大学学报, 2001, 36(3): 306-311.
Guo Daifei, Gao Zhenming, Zhang Jianqiang. Application of wavelet threshold to signal de-noising[J]. Journal of Shandong University, 2001, 36(3): 306-311. (in Chinese)
- [4] 张智, 韩国玺. 基于小波变换的图像阈值去噪分析[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(1): 101-103, 108.
Zhang Zhi, Han Guoxi. Analysis of image threshold de-noising based on wavelet transform[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2010, 33(1): 101-103, 108. (in Chinese)
- [5] 刘红莉, 王国宇, 马原. 基于水下图像小波变换的图像阈值去噪方法的研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(15): 79-81, 84.
Liu Hongli, Wang Guoyu, Ma Yuan. Study on image threshold de-noising based on underwater image wavelet transform[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(15): 79-81, 84. (in Chinese)
- [6] 姚学锋, 吴震, 金观昌. 数字散斑相关法中的小波减噪分析[J]. 清华大学学报, 2001, 41(4/5): 108-111.
Yao Xuefeng, Wu Zhen, Jin Guanchang. Wavelet denoising using the digital speckle correlation method[J]. Journal of Tsinghua University, 2001, 41(4/5): 108-111. (in Chinese)

作者简介:

张婷(1986-),女,硕士研究生。主要研究方向:光测力学。
郑锡涛(1964-),男,博士后,教授。主要研究方向:复合材料力学性能宏观和细观分析。

(编辑:赵毓梅)