

# 三维编织复合材料预制件表面图象滤波 与纹理分析研究

万振凯 李嘉禄 王晓生

(天津纺织工学院计算机系, 天津 300160)

**摘要** 首先介绍了三维编织复合材料预制件表面图象的采集方式、滤波技术以及平均编织角的测试过程; 然后介绍了采用基于边缘方向判决的自适应滤波器对采集的三维编织复合材料预制件表面图象进行滤波和边缘提取以及对处理后的预制件图象进行纹理分析, 而得到功率谱图的方法. 通过纹理分析方法对预制件的滤波图象进行平均编织角测量的结果, 及通过标准图象验证了系统的可行性试验结果说明, 系统具有较高的精度, 是一种行之有效的测量三维编织复合材料预制件平均编织角的新方法.

**关键词** 复合材料预制件 测试系统 三维织物 滤波 纹理分析

中图分类号: TP391.41 TS05 文献标识码: B 文章编号: 1006-8961(2000)11-0958-05

## Analysis and Research of Filter and Texture about Three Dimension Composite Preform Surface Image

WAN Zhen-kai, LI Jia-lu, WANG Xiao-sheng

(Computer Department of Tianjin Institute of Textile Science and Technology, Tianjin 300160)

**Abstract** This paper introduced mode of collecting, technology of filtering and measuring process about image of three dimension composite preform surface. After image of preform surface which was filtered by based direction adaptive filter(BDAF), we can calculate spectrun of image of preform surface that had been manipulated. We can measure average angle using method of texture analysis. It has been proved to be correct by sandard image. The experiment shows the system will be accurate. Practice shows that it is one of the effective and new technique about measuring average angle of three dimension composite preform.

**Keywords** Composite preform, Measuring system, Three dimension weaving, Texture analysis

## 0 简介

三维编织复合材料是由三维编织预制件增强的一种新型的复合材料. 复合材料三维整体编织技术是80年代发展起来的高新纺织技术, 由于用此三维编织预制件增强而生成的复合材料不分层, 同时具有优越的抗冲击性能, 并且具有比强度高、比模量高和综合力学性能好<sup>[1]</sup>等优点, 是制作结构件的理想材料, 因此受到航天、航空部门的高度重视.

随着三维编织技术的发展, 人们提出了多种编织方法, 其中, 四步法和二步法代表了该领域的主

流. 图1为典型的四步法编织机示意图.

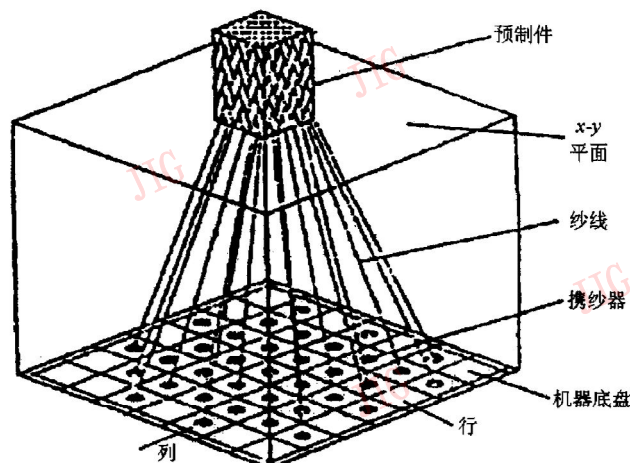


图1 四步法编织机示意图

由图 1 可见, 悬挂在机器上方的为编织出的复合材料预制件, 其四步法编织过程为, 首先将携纱器按预定的编织工艺排列在机器的底盘上, 这样机器底盘的纤维以行和列排列的主体部分决定了预制件的形状, 称之为主体纱. 这里预制件是以主体纱的行数和列数来定义的, 如行数为  $m$ , 列数为  $n$ , 则表示为  $m \times n$  编织. 底盘根据编织工艺按行、列运动时, 携纱器则带动纤维运动, 并按四步法编织工艺过程, 将编织纤维束排列成矩形阵列, 且纱线和纤维束按不同的方向取向, 并相互交织在一起, 以形成一个不分层的三维四相的整体结构, 从而编织出预定的三维复合材料预制件. 该矩形截面的三维编织预制件表面状态如图 2 所示.



图 2 理想三维编织复合材料表面图

由于三维编织预制件的结构参数不同, 其所生成的复合材料的性质就不同, 因此为了满足复合材料的性能要求, 就必须对参数进行测量和控制. 其中三维编织复合材料预制件表面编织角就是重要的结构参数之一. 这里三维编织复合材料预制件表面编织角定义为编织纱线在表面和织物成形方向的夹角, 图 2 中的  $\theta$  角即为理想状态下三维编织复合材料预制件表面编织角; 图 3 为实际编织复合材料预制件的表面结构图.

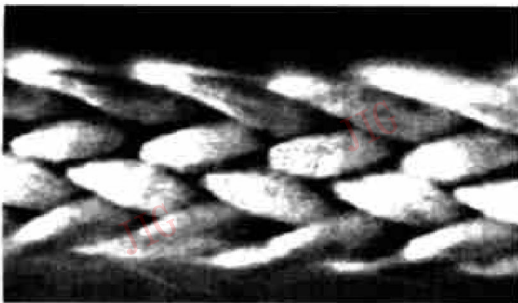


图 3 实际三维编织复合材料预制件表面结构图

由于表面编织角是否均匀与增强后复合材料性质有着重要关系, 因此, 编织过程中需要控制该编织角, 当然也就需要不断测量该编织角. 然而, 由于目前对于三维编织复合材料预制件表面编织角的测试仍处于手工测量方式, 而自动测试还没有形成一套成熟的测试理论和方法, 因此, 用计算机对其表面纹理进

行分析有着重要意义. 图 4 为系统配置原理图<sup>[2]</sup>.

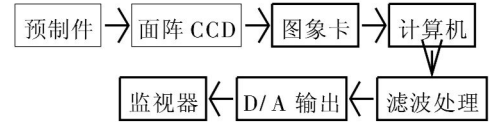


图 4 系统结构图

## 1 三维编织复合材料预制件表面图象滤波技术

虽然三维编织复合材料预制件表面图象具有明显的二维周期性, 但是与各个图象区域的边缘相比, 各个图象区域的灰度差别较小, 为了测量其有关参数, 如表面编织角、花节长度等, 就必须进行滤波. 目前滤波技术可分为线性和非线性滤波两大类, 针对三维编织复合材料预制件表面图象特征, 经过大量实验, 本文系统采用基于边缘方向判决的自适应滤波器, 而该基于边缘方向判决自适应滤波器的基本思想为: 设噪声图象在点  $(i, j)$  处的模型为

$$x(i, j) = s(i, j) + n(i, j) \quad i, j = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

其中,  $s(i, j)$  是理想图象,  $n(i, j)$  是均值为 0 的白噪声,  $s(i, j)$  与  $n(i, j)$  不相关,  $M \times M$  是二维图象尺寸,  $x(i, j)$  表示观测样本, 是二维非平稳随机过程. 矩阵滤波窗大小为  $L \times L$ , 在  $L \times L$  窗内的样本集合为

$$W_x(i, j) = \{x(k, l)\} \quad (2)$$

$i - N \leq k \leq i + N, j - N \leq l \leq j + N, l = 2N + 1$ , 其中,  $N$  是常数.

计算方法过程如下:

### 1.1 局部均值和方差估计

假设在  $(i, j)$  某一个小的区域内,  $x(i, j)$  是平稳的, 采用  $9 \times 9$  窗,  $M_x, V_x$  定义为

$$M_x = \frac{1}{(2N+1)(2N+1)} \sum_{k=i-N}^{i+N} \sum_{l=j-N}^{j+N} x(k, l) \quad (3)$$

$$V_x = \frac{1}{(2N+1)(2N+1)} \times \sum_{k=i-N}^{i+N} \sum_{l=j-N}^{j+N} (x(k, l) - M_x)(x(k, l) - M_x) \quad (4)$$

### 1.2 噪声方差估计

通过分析受污染的图象信号可见, 在图象的任何区域, 必有  $V_x \geq V_n$ , 即在边缘区,  $V_x > V_n$ ; 在平坦区, 噪声的变化实质上反映了观测信号的变化, 必有  $V_x \approx V_n$ . 根据这一思想, 可将  $9 \times 9$  滤波窗内的象素分割为互不重叠的  $3 \times 3$  子域(如图 5 所示), 并可以算出各个子区域的均值  $m_{subi}$  和方差  $V_{subi}$ . 取方差的

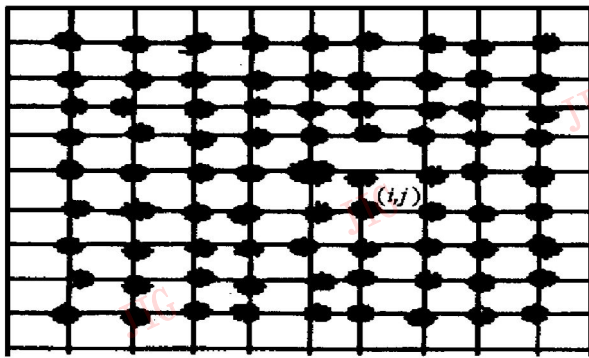


图5 二维滤波窗

最小值表示噪声的方差, 即有

$$V_n = \min\{V_{subi}; i = 1, 2, \dots, 9\} \quad (5)$$

在  $W_x$  内, 信号变化因子为

$$r = \max\{V_x - V_n, 0\}.$$

### 1.3 边缘及方向检测

对于图3所示的二维图象, 不仅要判断边缘的存在, 而且要判断边缘的方向, 如对图6所示的由子区域均值构成的  $3 \times 3$  窗, 即可采用二维梯度掩模在均值子区域上判决边缘和方向. 本文系统中仅考虑4个方向(见图7).

$m_{11}$	$m_{12}$	$m_{13}$
$m_{21}$	$m_{22}$	$m_{23}$
$m_{31}$	$m_{32}$	$m_{33}$

图6 均值窗

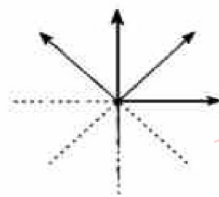


图7 边缘方向

其方向掩模为

$$H = \{H_\theta; \theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$$

其中, 各  $H_\theta$  分别为

$$H_{0^\circ} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, H_{45^\circ} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$H_{90^\circ} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, H_{135^\circ} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

利用上述掩模, 能把所指方向上的幅度斜升突出出来, 如果在均值子区域,  $H_{0^\circ}$  最大, 则说明在图象中存在垂直方向的边缘, 且输出  $y_{i,j}$  为

$$\begin{cases} \text{若 } |m_{21} - m_{22}| \leq |m_{23} - m_{22}|, \text{ 则} \\ y_{i,j} = \text{MEN}\{x(i+k, j+l)\} + (x_{i,j} - \overline{x_{k,l}}) \cdot r/V_x \\ i-1 \leq k \leq i+1, j-2 \leq l \leq j \\ \text{若 } |m_{21} - m_{22}| > |m_{23} - m_{22}|, \text{ 则} \\ y_{i,j} = \text{MEN}\{x(i+k, j+l)\} + (x_{i,j} - \overline{x_{k,l}}) \cdot r/V_x \\ i-1 \leq k \leq i+1, j \leq l \leq j+2 \end{cases} \quad (7)$$

如果  $H_{45^\circ}$  最大, 说明有沿  $135^\circ$  方向的边缘输出如下:

$$\begin{cases} \text{若 } |m_{31} - m_{22}| \leq |m_{13} - m_{22}|, \text{ 则} \\ y_{i,j} = \text{MEN}\{x(i+k, j+l)\} + (x_{i,j} - \overline{x_{k,l}}) \cdot r/V_x \\ i \leq k \leq i+2, j-2 \leq l \leq j \\ \text{若 } |m_{21} - m_{22}| > |m_{23} - m_{22}|, \text{ 则} \\ y_{i,j} = \text{MEN}\{x(i+k, j+l)\} + (x_{i,j} - \overline{x_{k,l}}) \cdot r/V_x \\ i-2 \leq k \leq i, j \leq l \leq j+2 \end{cases} \quad (8)$$

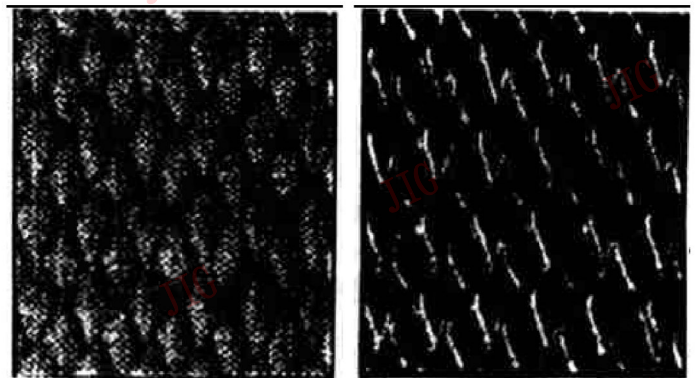
同样可以得出在  $90^\circ$  方向,  $135^\circ$  方向的输出如下:

$$\begin{cases} \text{若 } |m_{12} - m_{22}| \leq |m_{32} - m_{22}|, \text{ 则} \\ y_{i,j} = \text{MEN}\{x(i+k, j+l)\} + (x_{i,j} - \overline{x_{k,l}}) \cdot r/V_x \\ i-2 \leq k \leq i, j-1 \leq l \leq j+1 \\ \text{若 } |m_{12} - m_{22}| > |m_{32} - m_{22}|, \text{ 则} \\ y_{i,j} = \text{MEN}\{x(i+k, j+l)\} + (x_{i,j} - \overline{x_{k,l}}) \cdot r/V_x \\ i \leq k \leq i+2, j-1 \leq l \leq j+1 \\ \text{若 } |m_{11} - m_{22}| \leq |m_{11} - m_{22}|, \text{ 则} \\ y_{i,j} = \text{MEN}\{x(i+k, j+l)\} + (x_{i,j} - \overline{x_{k,l}}) \cdot r/V_x \\ i-2 \leq k \leq i, j-2 \leq l \leq j+1 \\ \text{若 } |m_{11} - m_{22}| > |m_{33} - m_{22}|, \text{ 则} \\ y_{i,j} = \text{MEN}\{x(i+k, j+l)\} + (x_{i,j} - \overline{x_{k,l}}) \cdot r/V_x \\ i \leq k \leq i+2, j \leq l \leq j+2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \text{若 } |m_{11} - m_{22}| \leq |m_{11} - m_{22}|, \text{ 则} \\ y_{i,j} = \text{MEN}\{x(i+k, j+l)\} + (x_{i,j} - \overline{x_{k,l}}) \cdot r/V_x \\ i-2 \leq k \leq i, j-2 \leq l \leq j+1 \\ \text{若 } |m_{11} - m_{22}| > |m_{33} - m_{22}|, \text{ 则} \\ y_{i,j} = \text{MEN}\{x(i+k, j+l)\} + (x_{i,j} - \overline{x_{k,l}}) \cdot r/V_x \\ i \leq k \leq i+2, j \leq l \leq j+2 \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\overline{x_{k,l}}$  是含在图象区域内坐标点的象素均值;  $\text{MEN}\{x(i+k, j+l)\}$  表示对图象窗  $x(i+k, j+l)$  内所有样本取均值操作.

图8为滤波计算输出结果图. 图8(a)是原始图象, 尺寸为  $512 \times 512$  象素 256 灰度级图象, 材料来源于天津纺织工学院复合材料研究所. 图8(b)为采用 BDAF 算法滤波后的效果图.



(a) 采样原始图象 (b) BDAF 滤波后的效果图

图8 三维编织复合材料预制件图象滤波效果图

## 2 三维编织复合材料预制件表面图象纹理分析

纹理是图象的重要特征, 通常认为纹理反映了图

形粗糙与光滑的程度, 如今纹理分析技术分为统计方法、谱分析方法和结构方法<sup>[3]</sup>三大类. 其中用统计方法分析纹理是基于图象区域的灰度直方图, 它主要用于描述图象的反差; 而谱分析方法是利用图象区域的相关函数来描述图象的周期, 而且由于三维编织复合材料预制件表面图象具有周期性, 因而用谱分析方法对图象进行检测, 还可以完成图象平均编织角的测量.

### 3 谱分析用于三维编织复合材料预制件表面编织角测量的基本思想

二维图象的自相关函数和图象的功率谱, 都说明图象的谱特性, 尤其是图象的功率谱含有图象纹理的重要特征信息, 其波峰描述了纹理间的周期信息, 因而可以用这种波峰出现的方向来描述复合材料编织纱的纹理走向, 进而可测量编织角. 这也是三维编织复合材料预制件表面角测量的一种新方法, 它有望改变目前手工测量的现状. 这种方法的基本算法为二维傅立叶变换<sup>[4]</sup>:

$$F(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \{f(n, m) \times \exp[-i(2nk\pi/N + 2ml\pi/M)]\} \quad (11)$$

其中,  $F(k, l)$  为图象序列的二维傅立叶变换;  $f(n, m)$  为输入的二维图象序列;  $N, M$  为图象的  $X, Y$

方向上的像素值. 其图象功率谱可用下式表示

$$P_{ff}(\omega, \omega) = |F(\omega, \omega)|^2 \quad (12)$$

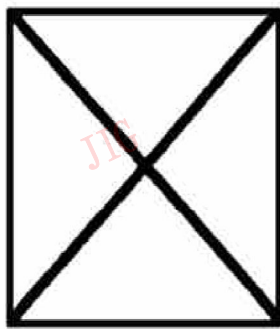
然后对得到的功率谱  $P_{ff}(\omega, \omega)$  进行归一化, 并将其输出到显示器上, 为了便于分析, 可把  $P_{ff}(\omega, \omega)$  用极坐标形式表示为  $P_{ff}(r, \Phi); r = (\omega_x^2 + \omega_y^2)^{1/2}; \Phi = \arctan(\omega_y/\omega_x)$ ;

再以  $\Phi$  为方向对  $P_{ff}(r, \Phi)$  进行积分, 则得到角向功率谱  $P_\Phi(\Phi) = \int P_{ff}(r, \Phi) dr$ ; 在得到  $P_\Phi$  后, 就可以  $\Phi(0 \sim 180^\circ)$  为横坐标, 以相应的  $P_\Phi(\Phi)$  为纵坐标, 作出角向功率谱分布图.

### 4 实验结果

为验证系统的可靠性, 利用上述原理对图 9(a) 所示的标准图象进行了参数测试, 图 9(b) 为计算得到的纹理结构图<sup>[5]</sup>, 图 9(c) 为角向功率谱图. 由图 9(c) 可以看出, 在图中有两个峰值, 说明在被分析的图象中有两个明显的纹理特征. 进一步通过软件计算得出该两纹理角度相差  $90.1^\circ$ , 说明系统测试结果是正确的.

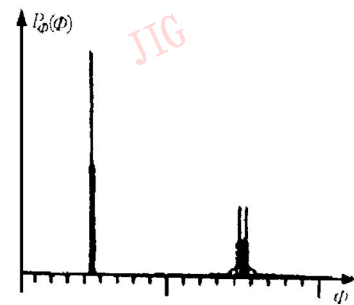
为研究三维复合材料预制件表面图象参数测量的准确性, 还用理想复合材料预制件图象作为被测对象, 进行了分析(图 10).



(a) 标准原始图象

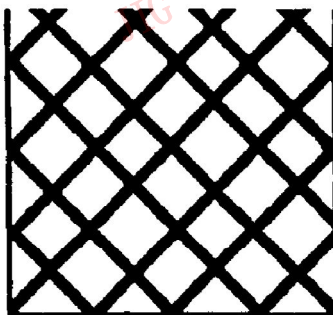


(b) 标准图象的纹理结构图



(c) 标准图象的角向功率谱图

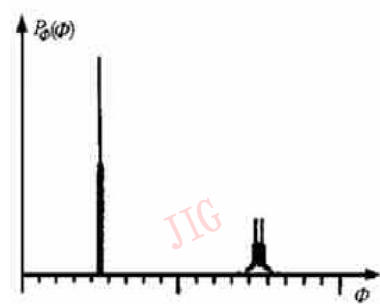
图 9 标准图象参数测试结果



(a) 理想复合材料预制件图象



(b) 理想复合材料预制件图象纹理图



(c) 理想预制件图象角向功率谱图

图 10 理想复合材料预制件表面图象参数测试结果

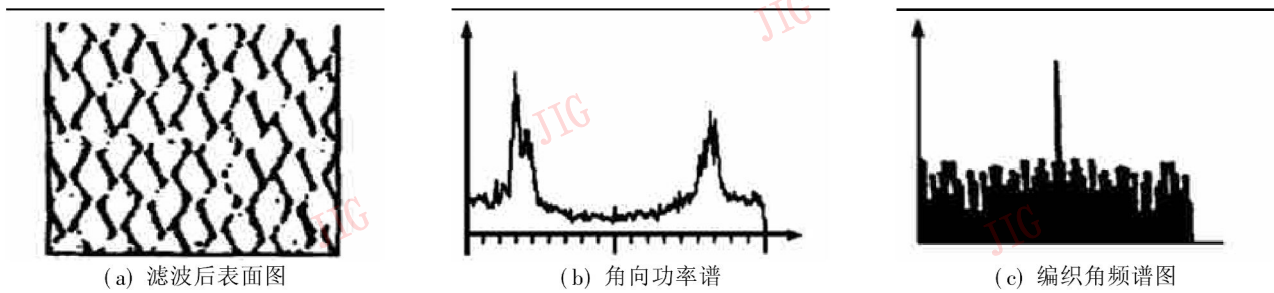


图 11 玻璃纤维三维编织复合材料预制件实验结果图

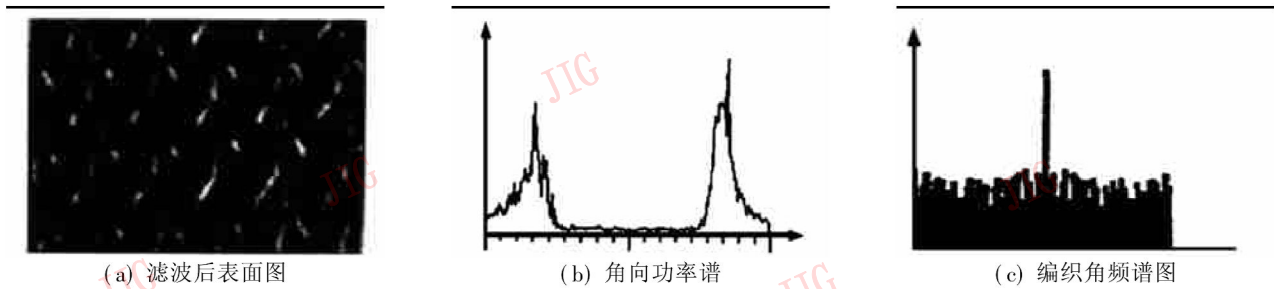


图 12 碳纤维三维编织复合材料预制件实验结果图

在图 10(a) 所示的图象中,手工测试得到的表面编织角为  $89.7^\circ$ ,而纹理测试的表面编织角为  $90.2^\circ$ ,说明用图象的纹理特性来测量三维编织复合材料预制件表面编织角是可行的。

图 11 为玻璃纤维三维编织复合材料预制件实验结果图,实验材料来源于天津纺织工学院复合材料研究所,该材料手工测试得到的表面编织角为  $37.8^\circ$ ,纹理测试的编织角为  $38.0^\circ$ 。

图 12 为碳纤维材料三维编织复合材料预制件实验结果图,实验材料来源于天津纺织工学院复合材料研究所.该材料手工测试得到的表面编织角为  $42.1^\circ$ ,而纹理测试的编织角为  $42.9^\circ$ 。

由于角向功率谱可以计算出织物的平均编织角,而且由编织角频谱图还可以分析编织角的周期不匀<sup>[6]</sup>,从而为改善编织工艺提供了基础。

## 5 结束语

本文讨论了三维编织复合材料预制件纹理分析的基本方法,并讨论了 BDAF 图象滤波计算的实现过程.从而为复合材料的性能分析提供了理论依据,也为复合材料的应用提供了可靠的技术手段和依据。

本文的完成得到了南开大学韩维桓教授的大力支持,在此深表谢意。

### 参 考 文 献

1 吴德龙等. 纺织结构复合材料的力学性能. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998: 183~ 220.

2 万振凯. 面阵 CCD 摄像机视频信号数据采集及其图象处理. 电子与自动化, 1998, 27(3): 14~ 17.  
 3 李学明, 万振凯. 三维编织复合材料预制件表面性能测试. 产业与纺织品, 1997, 15(4): 32~ 37.  
 4 万振凯, 李嘉禄. 三维编织复合材料预制件表面编织角检测与不均匀分析研究. 纺织学报, 1999, 20(6): 39~ 41.  
 5 Hentschel H C E, Procaccia J. The infinite number of generalizaed dimension of fractals and strange attractors. physica D8, 1983: 420~ 440.  
 6 韩其睿等. 复合材料三维编织结构的单元体模型. 复合材料学报, 1996, 13(8): 76~ 80.



**万振凯** 1964 年生, 1987 年毕业于天津纺织工学院自动化系, 副教授, 现任计算机系副主任, 天津纺织工学院网络中心主任. 主要研究方向为图象处理与计算机网络。



**李嘉禄** 1947 年生, 教授, 博士生导师, 天津纺织工学院复合材料研究所所长. 主要研究方向为复合材料三维编织技术。



**王晓生** 1955 年生, 高级技工, 天津纺织工学院复合材料研究所研究人员. 主要从事机械设计研究。