

基于小波的AW表面拓扑结构特征分析

吴松林¹, 刘苍毅², J. Valicek³

(1 空军工程大学工程学院, 陕西西安 710038; 2 空军工程大学理学院, 陕西西安 710051; 3 捷克Ostrava技术大学机械工程学院, Czech Republic Ostrava-Poruba 1 578033)

摘要: 为了详细地研究水切割-AWJ (abrasive water jet) 表面的主要特征, 本文分别研究了由传统接触式测量仪和光学测量仪获得的信号。通过对信号的小波分解和重构, 提取了形态误差、波纹度以及粗糙度等表面特征。另外, 本文还详细地论述了小波基函数的选择以及小波分解层次确定等基本的应用问题。实验结果表明小波能够有效地应用于AWJ表面拓扑结构特征的分析 and 描述。

关键词: 小波; 表面拓扑; 信号处理

中图分类号: TM93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2005)04-0081-04

小波是实现工程表面纹理和拓扑结构特征分析的有效方法之一^[1~3], 小波分析技术广泛地应用于图像处理 and 信号理解, 其原因是小波分析方法可有效地分解二维或三维信号^[4]。在工程表面分析的应用研究中, Y. Gao、S. Lu 等提出了基于小波和分数维的工程表面分析方法, 实现了表面拓扑特征的分离。Shengyu Fu 和 J. Raja 总结了有关的分析方法, 并根据小波基函数及其尺度函数的转换特性, 详细的研究了不同小波基函数在工程表面信号分析中的区别、优劣, 据此提出了小波基函数的合理选择方法^[2]。

1 表面特征的分解和合成

如果 $z(t)$ 表示表面综合形貌, 则表面信号滤波的数学过程可描述如下: Input $z(t) \Rightarrow$ Filtering $h(t) \Rightarrow$ Output $g(t)$ 。其数学运算可以简单地写作: $g(t) = z(t) * h(t)$ 。显然, 表面特征分离的理想数学模型应为 $z(t) = g_1(t) + g_2(t) + g_3(t) = z(t) * h_2(t) + z(t) * h_3(t)$ 。其中, $H_i(\omega)$ 为 $h_i(t)$ 的富里叶变换, w_i 表示信号中各成分的分界频率。 $H_i(w) = \begin{cases} 1, & w_{i-1} < |w| < w_i, i=1, 2, 3; w_0 < w_1 < w_2 < w_3 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$

假定 $\psi_{a,b}(t) = (1/\sqrt{a})\psi((t-b)/a)$ 其中 $b = n, a = 2^k$, 则, 经过小波变换, $z(t)$ 可以被分解为 $z(t) = \sum d_{k,n}\psi_{k,n}(t)$ 。其中 $d_{k,n} = W_f[n, 2^k]$ 。在实际应用中, 多分辨分析可以给出如下离散算法。

设基本小波函数 $\psi(t)$ 由两组系数 $\{h_n\}$ 和 $\{g_n\}$ 定义, $\Phi(t)$ 为一多分辨分析的生成元, 则 $\Phi(t) = \sum h_n\Phi(2t-n)$; $\psi(t) = \sum g_n\Phi(2t-n)$ 。其中, $g_n = (-1)^n h_{1-n}$ 。假定存在 $\{C_n^0\}$, 满足 $z(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} C_n^0 \phi(t-n)$, 同时定义: $z(t) = z_0, \phi_{k,n}(t) = 2^{k/2}\phi(2^k t - n), \psi_{k,n}(t) = 2^{k/2}\psi(2^k t - n)$ 。

则, $z(t)$ 可以描述为 $z_0 = z_{-1} + s_{-1}, z_1 = z_{-2} + s_{-2}, \dots, z_{-N+1} = z_{-N} + s_{-N}$ 。其中 $z_{-k} = \sum_n C_n^k \phi_{-k,n}(t), s_{-k} = \sum_n d_n^k \psi_{-k,n}(t), (k=1, 2, \dots, N)$ 。 $C_n^k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{j \in \mathbb{Z}} C_j^{k-1} h_{j-2n}, d_n^k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{j \in \mathbb{Z}} C_j^{k-1} g_{j-2n}, (k=1, 2, \dots, n)$ 。这样 $z(t) = s_{-1} + s_{-2} + \dots + s_{-N} + z_{-N}$, 其中 $s_{-k} (k=1, 2, \dots, N)$ 为具有有限带宽的信号。显然, k 越小则 s_{-k} 的频率越高, s_{-N} 则是一低频信号。 $z(t)$ 可分解具有有限带宽的信号组合。在合适的分解层次下, 将信号分解为两组, 并定义

收稿日期: 2004-09-10

基金项目: 国家留学基金、捷克科学基金资助项目 (the Czech Science Foundation Project "Machine Fault Diagnostics", 101/04/1530)

作者简介: 吴松林 (1960-), 男, 陕西西安人, 副教授, 主要从事设备管理、故障诊断、信息处理等研究。

$s_2(t) = s_{-1}s_{-2} + \dots + s_{-N}$; $s_1(t) = z_{-N}$, 即 $z(t) = s_1(t) + s_2(t)$ 。如果理解 $s_2(t)$ 为信号 $z(t)$ 的表面粗糙度成分, 而 $s_1(t)$ 则是信号 $z(t)$ 的形态误差和波纹度成分之和, 后者往往被用来作为表面粗糙度参数计算基准线。

综上所述, $z(t)$ 可以表示为 $z(t) = \sum_m z_{m(t)}$, $m \in m_{\text{FormError}}, m_{\text{Waviness}}, m_{\text{Roughness}}$ 。表面形貌信号可以理解为不同的 dyadic 尺度或频率成分之和。既 $z_{\text{Waviness}}(t) + z_{\text{Roughness}}(t) = z(t) - z_{\text{FormError}}(t)$ 。在特定层次下进行分解, 通过小波近似重构, 容易获得 $z_{\text{FormError}}$ 。用 $z(t)$ 减去 $z_{\text{FormError}}(t)$, 可以用来产生 $z_{\text{Waviness}}(t)$, 方法仍然是通过小波分解、近似重构。最终可以获得表征表面粗糙度分布的 $z_{\text{Roughness}}(t)$ 。

通常, 工程表面信号分析中, 需要考虑小波基函数及其尺度函数对信号的转换特性, 希望获得良好的线性幅值和相位转换特性。可以考虑使用的小波基函数有: 具有线性滤波特性的正交 Haar 小波, 非线性相位滤波特性的 Daubechies 小波, 近似线性相位滤波的正交 Coiflet 小波以及线性相位滤波特性的 Biorthogonal 小波。实际应用中可根据具体问题进行适当的选择。Shengyu Fu 和 J. Raja 分析了以上几种小波基函数的差异并提出在工程表面分析应用中的最佳选择是 Biorthogonal 小波系列(实际推荐的是 Bior6.8)。

2 实验

实验采用两种方法测量 AWJ 表面信号。一是传统的接触式测量仪(HOMMEL TESTER T8000), 另外是光学法。通过对反射光空间分布的分析实现表面的测量和评价^[4-5]。光学方法的基本原理如图1所示, 采用功率为3 mW 波长为650 nm 的二氧化碳激光光源, 以小角度(10或20度)照射被测试表面。由于反射光阴影的光强度与表面漫反射率以及倾角呈比列关系, 因此, 通过监测 $I(\phi)$ 可以实现表面轮廓的测量^[4-5]。光强度的变化通过 1090×1370 像素的 CCD 记录并转换为电信号。

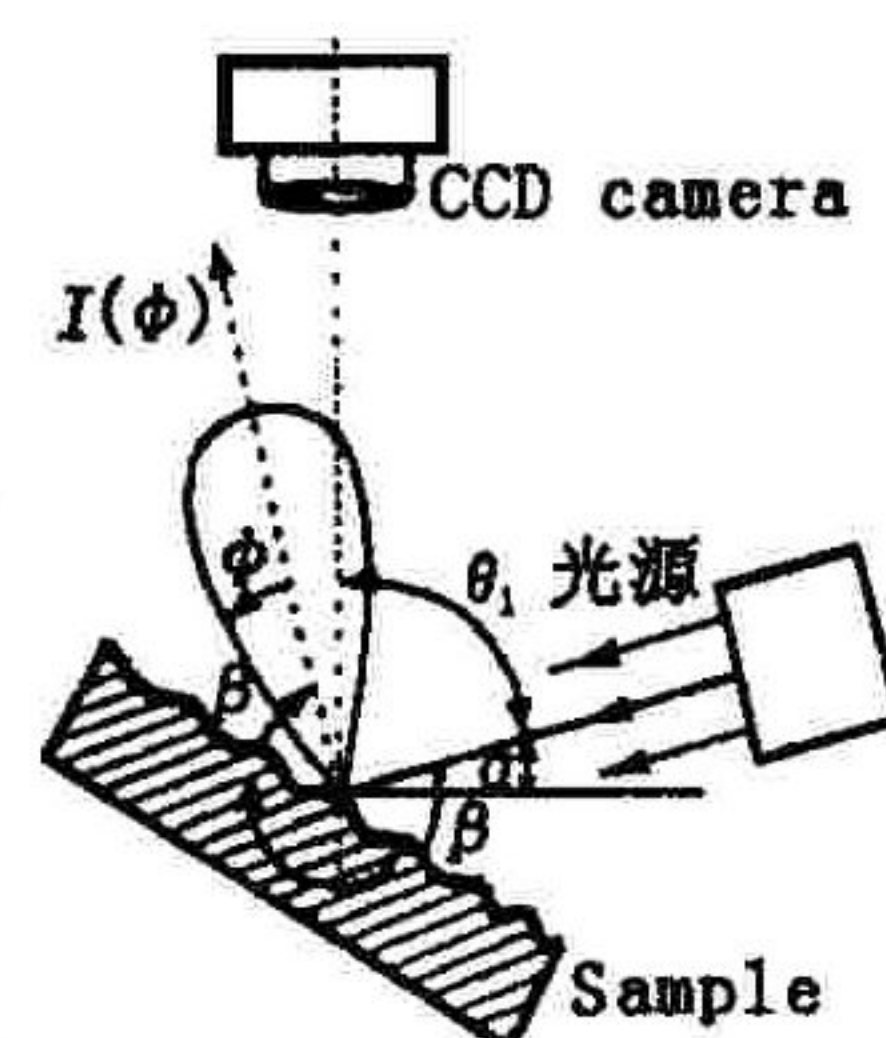


图1 光学测试方法原理

金属试样的尺寸为 $20 \times 20 \times 0.8$ (mm), 分别使用了三种材料制备(铝合金、中碳钢和高碳钢)。每一个表面分别用接触式测量仪和上述的光学方法进行测量。试样表面被划分为三个区域(如图2), 沿着与表面高度垂直的方向(图示的水平方向)进行测量。测量线分别距试样顶端2 mm、4 mm 和6 mm。

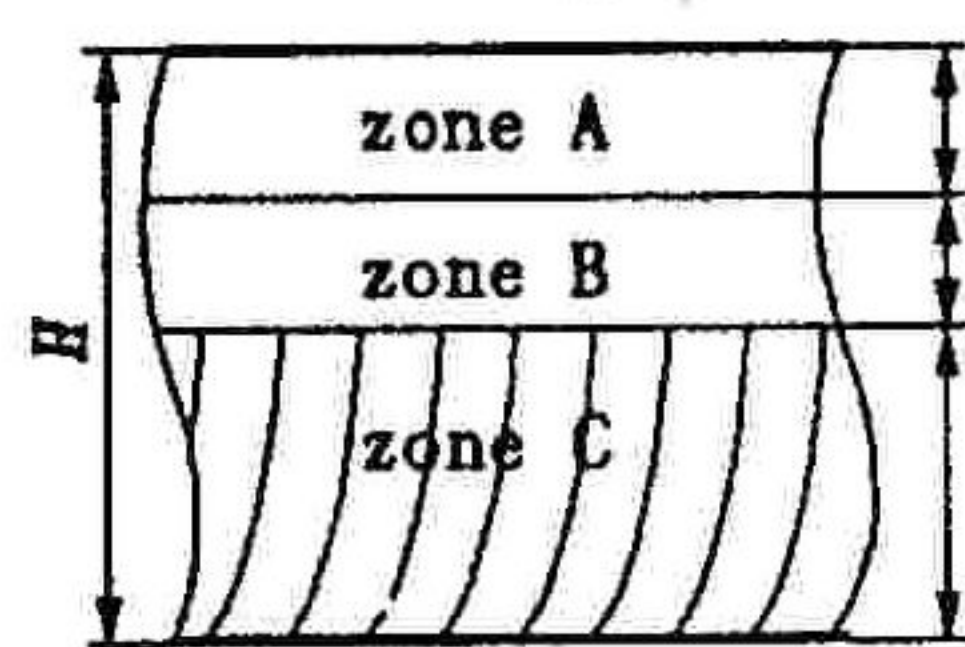


图2 AWJ试样表面及测试区域划分

图3为接触式测量仪获得的试样表面轮廓信号(x 为mm, y 为 μm)。图4是区域C信号的FFT谱图(振幅为 μm)。经统计分析, 获得形态误差和波纹度的频段为: $0 \sim 1.7\text{mm}^{-1}$ 。多分辨分析是利用小波分解滤波器不断地对表面信号进行滤波, 以获得信号结构特征的合理分解。选择 Biorthogonal (Bior 6.8) 为小波变换的基函数, 对图3的信号进行分解。小波分解层次 N 由信号的分界频率 f_0 (或波距 w_0) 以及信号采样频率 f_{sample} (或波距 w_{sample}) 按式(1)进行估计。

$$N = \log_2(f_{\text{sample}}/f_0) \text{ 或 } N = \log_2(w_0/w_{\text{sample}}) \quad (1)$$

如图4所示, 因此, 分解波纹度时 $N = 6.1196 \approx 6$, 分解形态误差时 $N = 7.7476 \approx 8$ 。通过小波分解、重构, 分别获得了信号的粗糙度、波纹度以及形态误差信号。图5(纵坐标为 μm)、图6(横坐标为mm, 纵坐标为 μm)和图7(横坐标为mm, 纵坐标为 μm)分别显示了不同测试区域A、B和C的信号分析结果。其中图5为形态误差信号与原始信号的比较。表1为粗糙度参数 Ra 的估计及其与根据 RC DIN7768 (SN EN ISO 4288) 所规定的标准参数的滤波器进行计算得到的粗糙度参数 Ra^* 的比较。相对误差 δ 由 $\delta = |Ra - Ra^*|/Ra^*$ 计算。

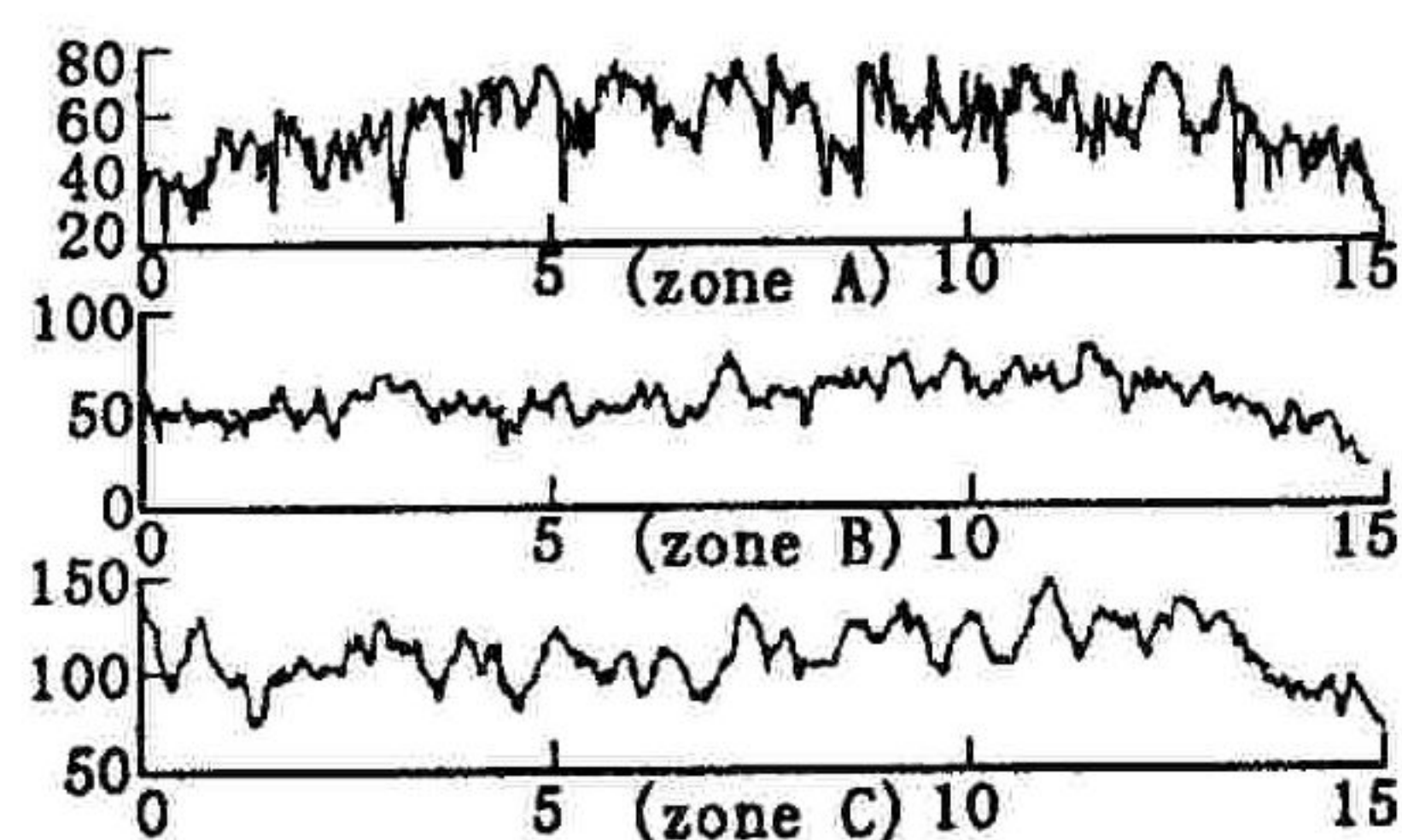


图3 表面信号

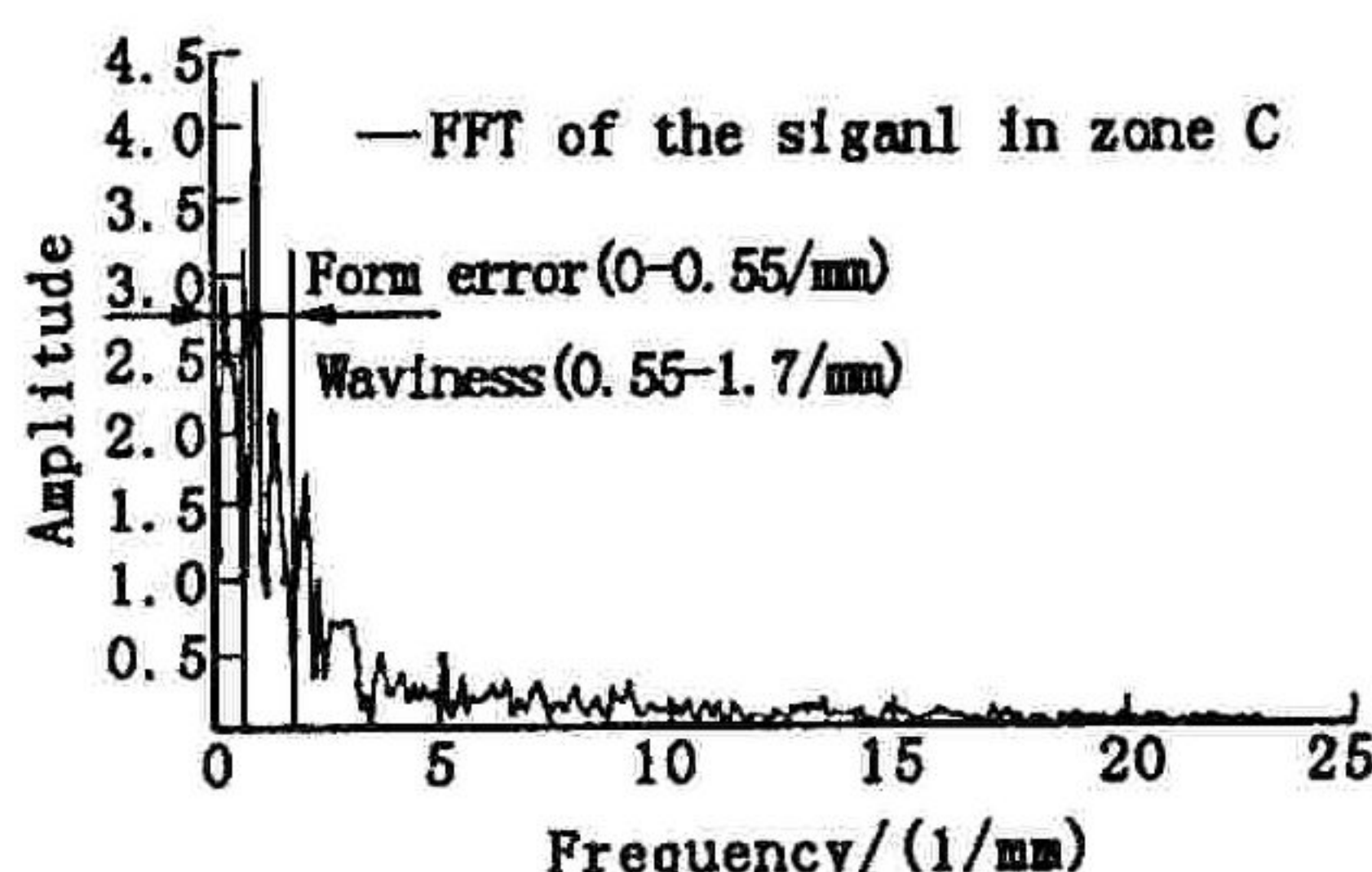


图4 C区信号的PSD估计

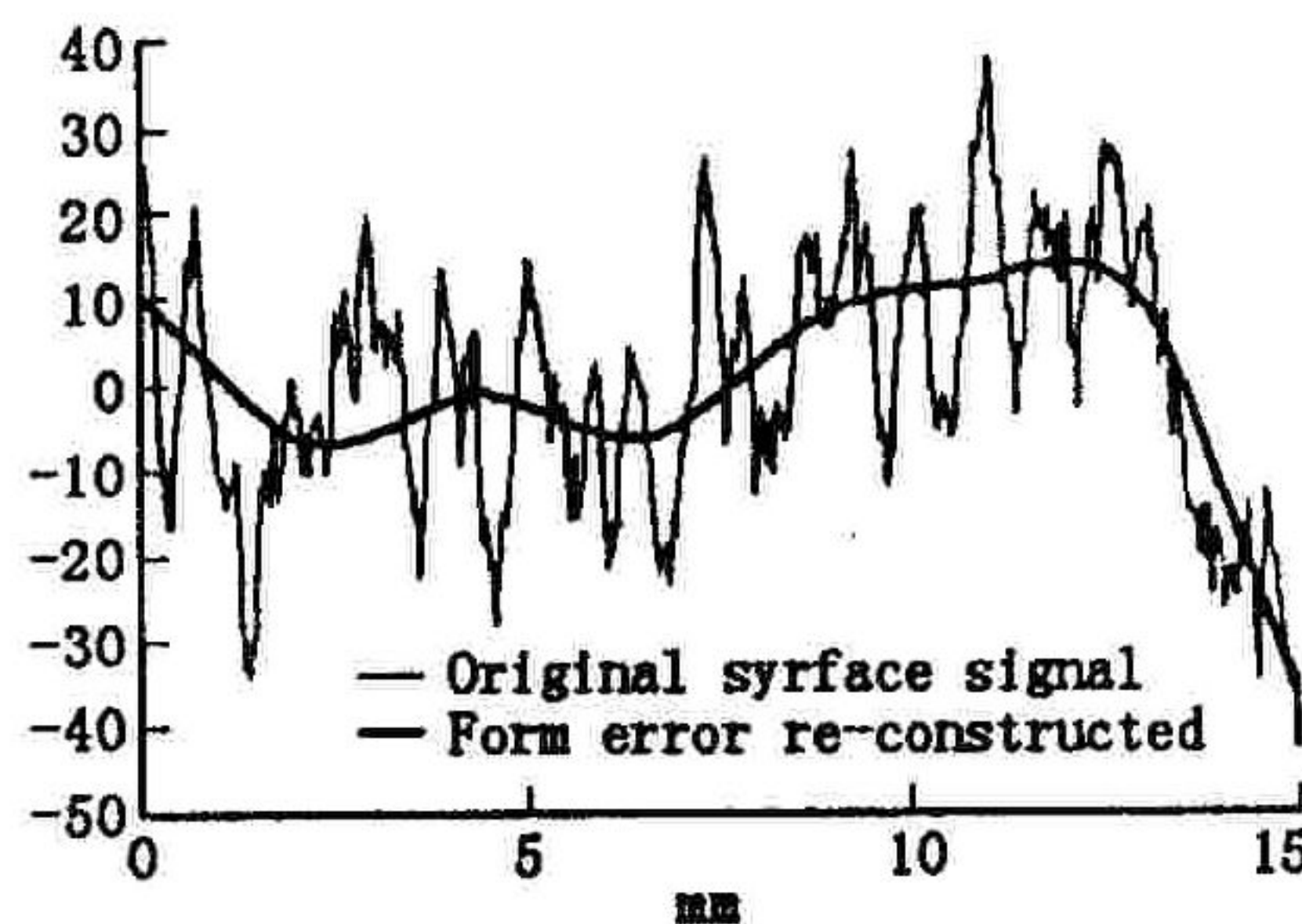


图5 重构的C区形态误差与原始比较

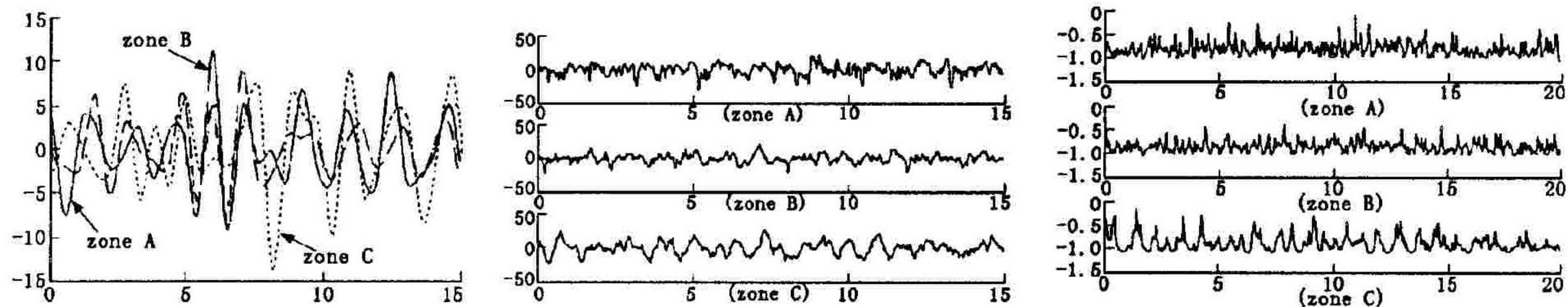


图 6 重构的 A、B 和 C 区波纹度信号 图 7 重构的 A、B 和 C 区粗糙度信号 图 8 光学法测得的表面轮廓信号

通常,AWJ 表面有比较明显的水切削痕迹特征,以特定的空间频率分布在被加工的表面,形成该表面的主要结构特征。这一特征在 C 区域较为明显。以切削痕迹为主的频率特征反映了水流参数在该区域出现了较为明显的变化。为了详细研究 AWJ 表面这一特殊的拓扑特征,沿图 2 所示的水平方向设置了 12 条测量线(编号:No. 1 ~ No. 12),分别分布于 A, B 和 C 区域,由上述的光学方法进行表面的形貌变化测量。

表 1 粗糙度参数 Ra 的估计及其比较

编号	Ra/ μm	Ra*/ μm	f/(1/mm)	分解层次	$\delta(\%)$
1-3a	3.7392	3,50	118.9061	6	6.83
1-3b	3.8665	3,70	118.4834	6	4.50
1-3c	4.5191	4,20	118.9061	6	7.59
1-4a	3.1245	3,00	119.1895	6	4.15
1-4b	3.2459	3,20	119.6172	6	1.43
1-4c	3.2487	3,40	119.3317	6	4.45
2-1a	6.9733	6,70	118.9061	6	4.08
2-1b	9.0665	9,20	119.0476	6	1.45
2-1c	10.3160	10,30	118.9061	6	0.16

图 8(横坐标为 mm,纵坐标为 Auxiliary units)所示的信号分别为试样表面 A, B 和 C 区域的测试图像(No. 1、No. 5 和 No. 12),图 9 为其中两个图像的 Burg PSD 估计(No. 1 和 No. 12)。

经过统计分析,信号波纹度的频带为 0.55 ~ -1.7mm⁻¹。图 10 给出了试样表面 12 条测量线信号(No. 1 ~ No. 12)的 Burg PSD 谱图。

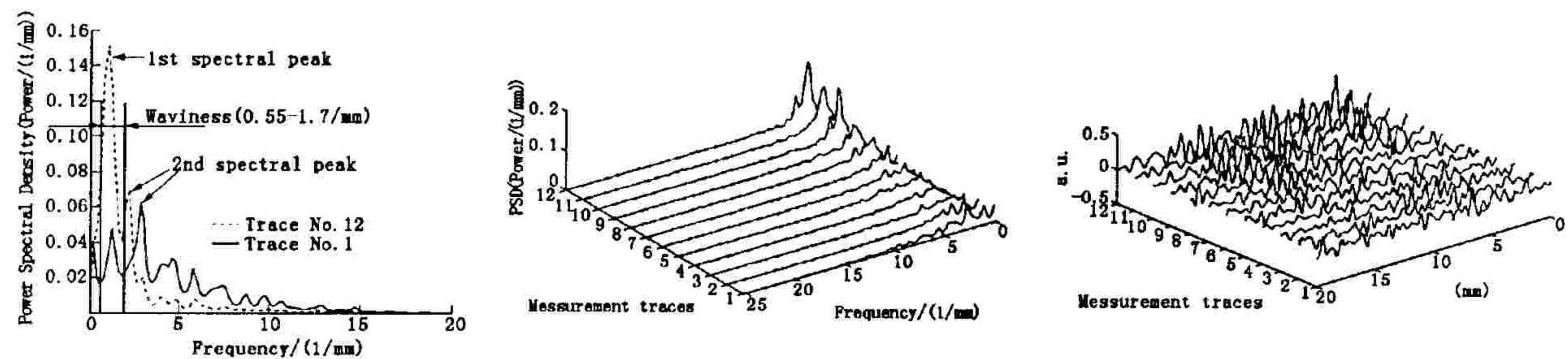


图 9 不同区域的 Burg PSD 图 10 12 条测量线信号的 Burg PSD 图 11 重构获得的波纹度信号

很明显,从 A、B、C 区,信号低频分量的能量不断增加,而且谱峰(图 9 和图 10)对应的频率值不断减小。为了分离表面信号特征,通过小波分解、重构获得波纹度成分,根据式(1),小波分解层次确定为:信号的形态误差 $N \approx 7$ (估计值 6.542 9);信号的波纹度 $N \approx 5$ (估计值 4.914 8)。图 11 为通过小波分解、重构获得的 12 条波纹度信号,图 12 为波纹度信号 RMS 变化。可以看出 A 区测得的信号其低频成分较 B 区略高,并随着测量线向 C 区推移,信号波纹度的 RMS 不断地增加。这一现象基本上反映了 AWJ 表面拓扑结构特征。另外,从图 9 和图 10 可以看出,图 8 的信号在低频区域包含有两个主要成分,图 9 的两个谱峰(the 1st spectral peak 和 the 2nd spectral peak)。这两个低频成分主导了 AWJ 表面结构特征的主要方面。

图 13 和图 14 为对应于 12 条测量线(No. 1 ~ No. 12)的各波纹度信号中 1st和 2nd谱峰对应波长的变化规律。从中可以得出:在 C 区,1.0 mm 和 0.5 mm 波长的波纹度信号是该表面轮廓结构的主要方面。

3 结论

滤波是工程表面分析、评价、过程诊断和状态监测的基本步骤。小波分析是分离表面信号特征,并描述表面多尺度特征的一种有效的方法。但成功应用这一方法,需要选择合适的小波基函数、准确地确定分解的标准以及有效地利用小波分解、合成。

本文采用小波分解和重构的方法对 AWJ 加工表面信号进行了一系列有效的实验研究。实验结果表明:从信号中提取的形态误差信号、波纹度信号和粗糙度信号是合理的;能够有效地描述工程表面的多尺度特

征,并为表面评价、粗糙度计算提供有效的信息。另外,通过小波分解和重构,本文详细地分析、描述了 AWJ 表面光学信号的典型特征,不仅描述了波纹度信号的变化趋势,而且通过统计分析确定了该表面信号波纹度成分中主要波长的规律。在基于小波分解、重构和根据标准滤波器计算得到的粗糙度参数之间,存在一定的误差;另外,对于不同精度的工作表面,粗糙度与低频信号的分界波距、采样间距都是不同的,如何有效地确定 N 的取值,往往要视实际情况而定。

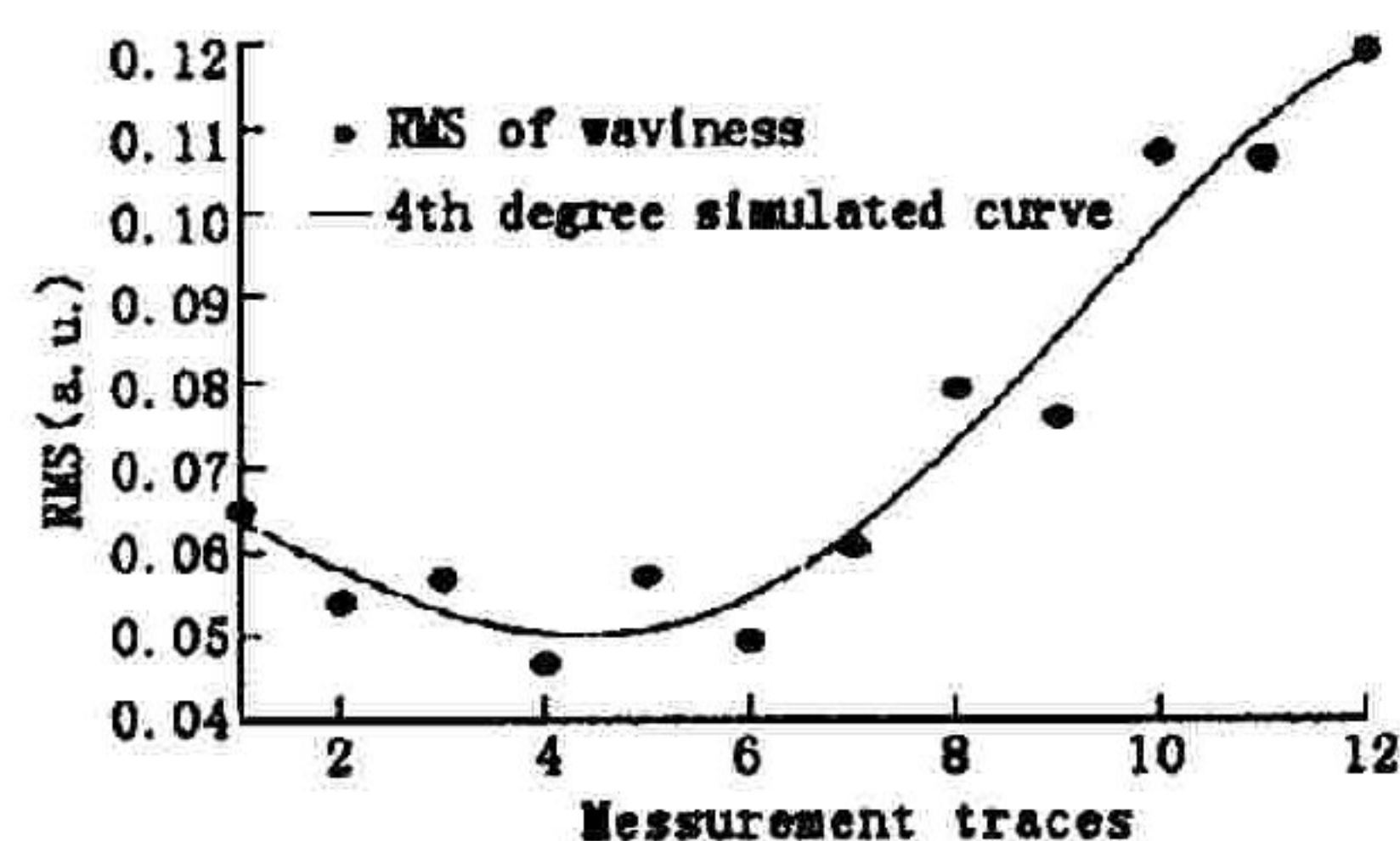
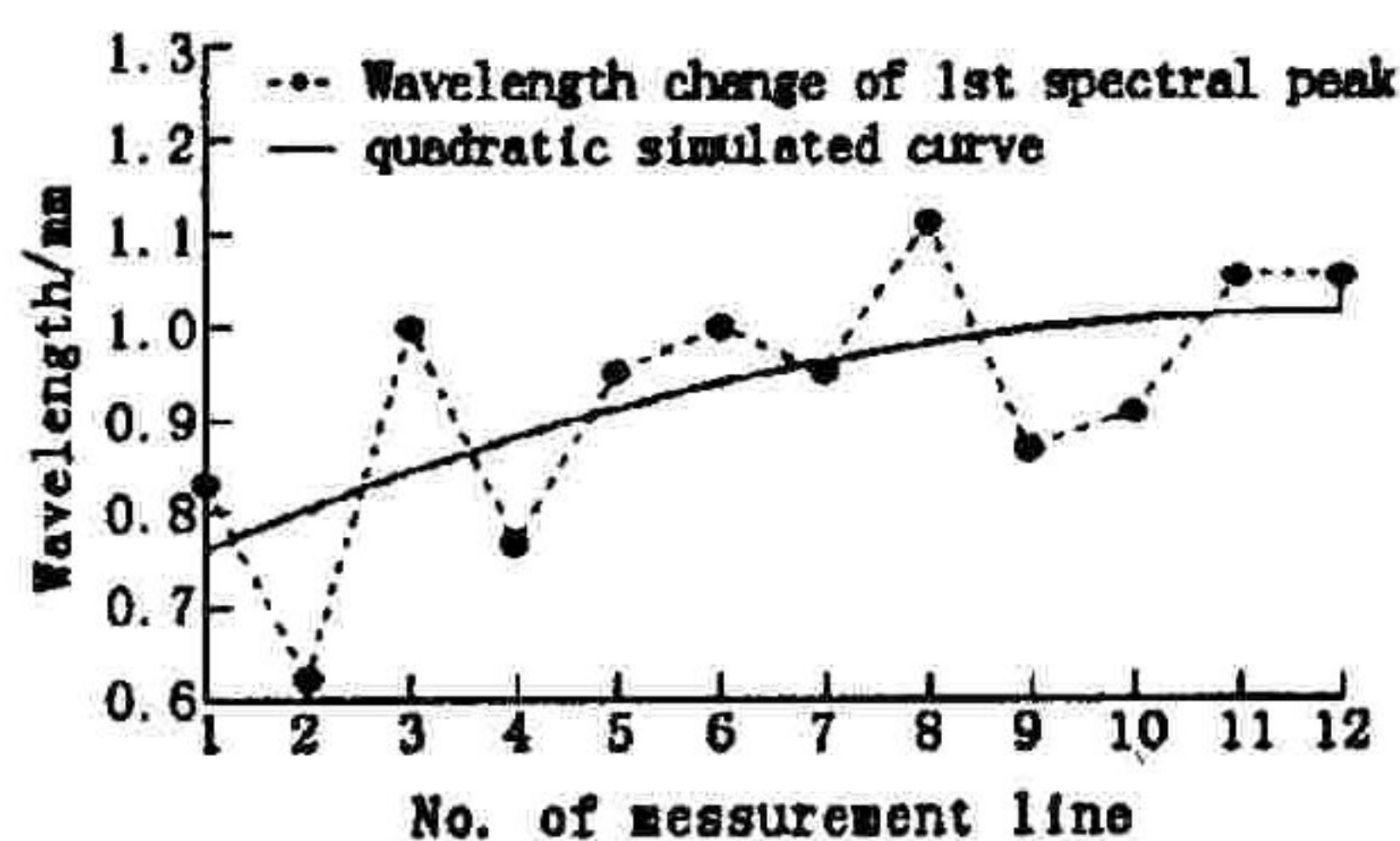
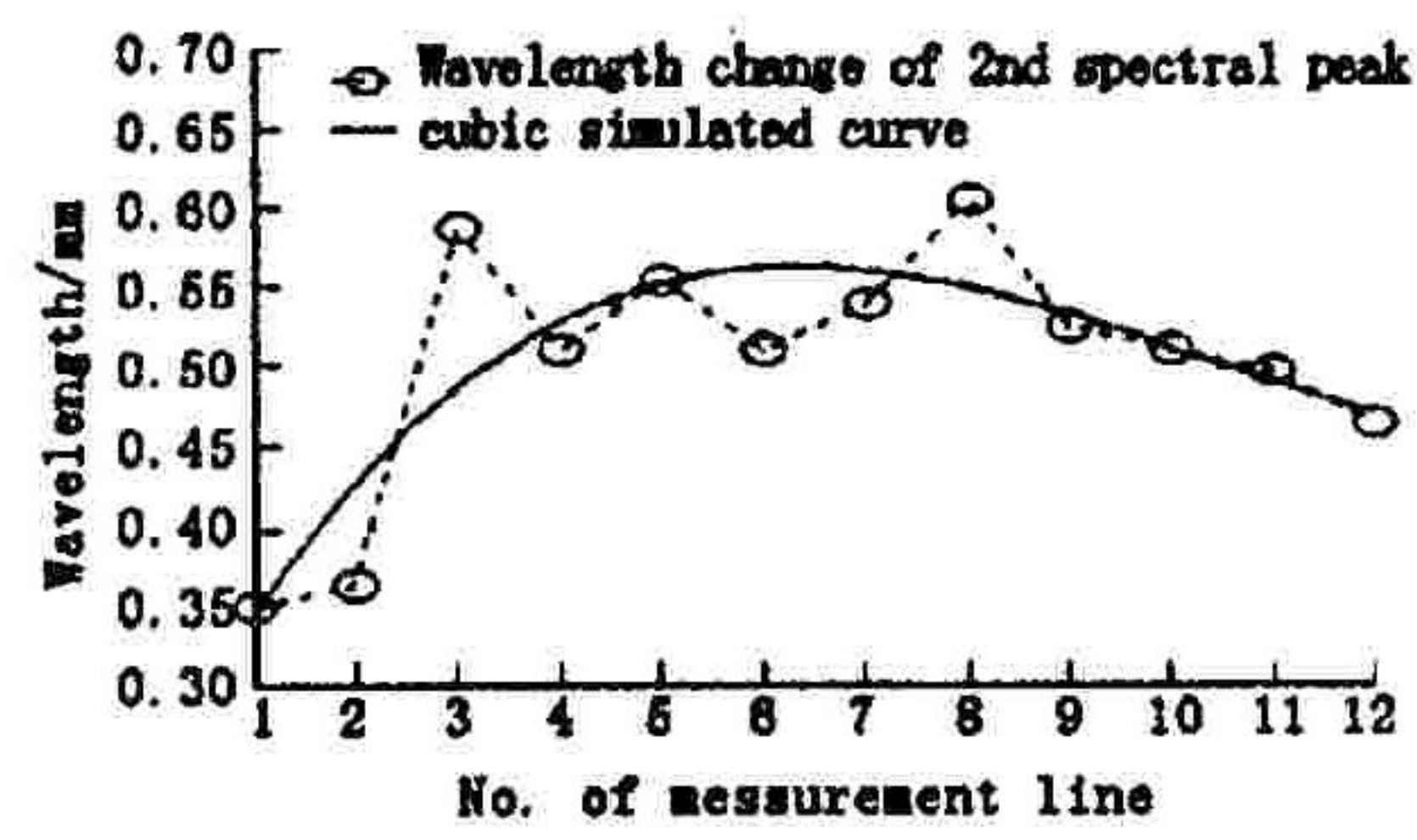


图 12 12 条波纹度信号 RMS 的变化过程

图 13 1st谱峰波长的变化及其拟合曲线图 14 2nd谱峰波长的变化及其拟合曲线

参考文献:

- [1] Raja J, Muralikrishnan B. Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness and Form[J]. *Precise Engineering*, 2002, 26(2): 325 - 329.
- [2] Shengyu Fu, Muralikrishnan B, Raja J. Engineering Surface Analysis with Different Wavelet Bases[J]. *Trans. of ASME Journal of Manufacture Science and Engineering*, 2003. 2: 13 - 20
- [3] Kenneth R Castleman. *Digital Image Processing*[M]. New York: Prentice - Hall, 1996.
- [4] Valíček J, Držík M. Optical Method for Surface Analyses and Their Utilization for Abrasive Liquid Jet Automation. in *Proc. 2001 WJTA American Waterjet Conference*, M. Hashish (ed), St. Louis: WJTA, 2001.
- [5] Držík M, Hlaváček L, Mádr V. Inspection of Surfaces Machined by Water jet[J]. *NDT World*, 2003, 19(1): 63 - 64.

(编辑: 姚树峰)

Wavelet- based Separation for Synthetic Topographical Characterization

of Surface Prepared by Abrasive Water Jet

WU Song - lin¹, LIU Chang - yi², J. Valicek³

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China; 2. The Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China ; 3. Faculty of Mechanical Engineering Ostrava Technical University, Ostrava - Poruba, Czech Republic)

Abstract: In order to study the synthetic topographical characterization of surface created by abrasive water jet (AWJ) and carry out a detailed research for the process of the surface creating, this paper researches the surface signals obtained by both the contact profiler and a new developed optical instrument. Through wavelet decomposition and re - construction of surface signal, surface features, such as form error, waviness and roughness are separated rationally. Some fundamental issues, such as the selection of wavelet bases and the determination of wavelet decomposition level are discussed in detail. The results of a series of experiments show the efficiency of the wavelet - based method.

Key words: wavelet; surface topography ; signal processing