

文章编号: 1000-5013(2010)02-0141-04

小波滤波在表面形貌评定和分析中的应用

张耕培, 崔长彩

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 为提高表面形貌评定的准确性, 将小波滤波应用于表面形貌分析, 提出根据滤波截止波长确定分解次数的方法. 比较不同小波基对表面形貌评定基准及其参数的影响, 并与国际标准建议的高斯滤波器进行比较分析. 结果表明, 小波基准线曲线光滑自然, 形态完美, 是一条算术平均中线, 优于传统评定基准线.

关键词: 表面评定; 形貌; 小波; 滤波; 基准线

中图分类号: TH 161+.14; TN 713

文献标识码: A

表面形貌评定方法, 基本上可分为多项式拟合法、滤波法、Motif法和分形法^[1], 而其中的滤波法包括高斯滤波、小波滤波等滤波方法. 高斯滤波器作为一种零相移滤波器, 被广泛应用于表面频率特征的分离中. 在高斯滤波中, 表面被假定作为一种正态随机过程. 小波理论是一个新领域, 它从根本上解决了傅里叶变换所不能解决的问题. 小波分析在时域和频域都具有良好的局部化性能, 可以聚焦到对象的任意细节. 表面形貌评定应用小波的多尺度变焦特性, 对各种表面元素在不同尺度上进行分离和提取. 小波的分解次数由分解波长和采样间距决定; 而对于不同精度的工作表面, 分解波距和采样间距不同, 分解次数要视具体情况而定. 本文将小波滤波应用于表面形貌分析, 以提高表面形貌评定的准确性.

1 小波滤波原理

1.1 小波变换原理

小波分析的主要思想是, 将信号 $f(t)$ 分解为一系列基函数 Ψ 的和. 对于具有有限能量的信号或平方可积的信号 $f(t)$, 其小波变换定义为

$$W_{\tau}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{a,b}(t) f(t) dt, \quad a > 0. \quad (1)$$

式(1)中: a 为尺度参数, b 定位参数, 函数 $\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 称为小波函数. 改变 a 的值, 对函数 $\Psi(t)$ 具有伸展($a > 1$)和收缩($a < 1$)作用; 改变 b 的值, 可实现函数 $\Psi_{a,b}(t)$ 对信号 $f(t)$ 的平移与扫描.

随着尺度 a 的减小, 小波基 $\Psi_{a,b}(t)$ 支撑区也随之变窄, 而其傅里叶变换 $\Psi_{a,b}(\omega)$ 的频谱则随之向高频端展宽; 反之亦然. 这就实现了窗口大小自适应变化. 当信号频率增高时, 时窗宽度变窄, 而频窗高度增大, 以利于检测快变信号, 提高时域的分辨率; 反之亦然. 因为小波具有频率可变和位置可变的特性, 所以小波变换就可以克服传统变换的不足^[2].

1.2 典型小波基

正交小波具有相同的分解和重构尺度、小波函数. 典型的正交小波基有 Haar 小波、Symlets(Sym)小波、Coiflets(Coif)小波及 Daubechies(Db)小波.

Haar 小波的主要优点是计算简单及正交性很好, 并且具有线性相位特性, 滤波结果无畸变. 但由于它在时域上是不连续的, 因此作为基小波性能并不是很好, 尤其是在分析表面连续信号时, 会导致分析

收稿日期: 2008-10-11

通信作者: 崔长彩(1972-), 女, 副教授, 主要从事精密测量技术与优化算法的研究. E-mail: cuiclc@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(T0850004); 福建省科技计划重点项目(200810020)

结果的不连续.

Daubechies 小波是一组紧支撑正交小波族. 尽管低通滤波器在通带内有振荡, 其频率特性还是基本接近理想滤波器特性. 相对于 Haar 小波, Daubechies 小波具有较好的频率分辨特性, 应用于工程表面分析, 可以较好地分离粗糙度、波度等频率成分.

Symlets 小波是改进 Daubechies 小波而得的, 不但具有双正交性, 而且还具有紧支撑、近似对称性. 在实际应用中, 对称小波已经产生了很好的效果, 因而在细节提取上更为优越.

Coiflets 小波具有近似对称的尺度和小波函数. 其低通滤波的止带和高通滤波的通带内都有较大的振荡, 因此, 幅度传输特性并不好.

双正交小波 BiorSplines(Bior) 分解与合成的小波尺度函数是不同的, 而且所有的小波与尺度函数都具有对称或反对称波形. 因此, 采用双正交小波可以获得线性相位^[3]. 小波基的支撑长度越短, 频率相干性越高, 时域分辨率较好, 有利于处理边界信号; 支撑长度越长, 频率精度越高, 时域分辨率较差, 易导致边界效应^[4]. 对于由小波变换引起的边界效应, 可仿照高斯滤波引起的边界效应解决方案^[5], 使用边界延拓^[6]; 亦可通过改变形变端数据长度结构^[6]进行解决.

1.3 表面分析的小波模型

通过上述小波变换, 原始信号 $f(t)$ 被分解为 d_{j+1} 子集和 a_{j+1} , 分别代表信号高频和低频成分在尺度 $2^{-(j+1)}$ 上的信息. 对表面信号 $f(x)$ 的整个分解过程, 是一个在各行和各列上简单的重复过程. 经过在尺度空间的 j 次分解之后, 原始信号被小波系列 a_j, d_1, \dots, d_j 所代替^[7], 可表示如下

$$W_j[f(x)] = (a_1, d_1) = (a_2, d_1, d_2) = (a_j, d_1, d_2, \dots, d_j). \tag{2}$$

假定表面成分由粗糙度 $\eta(x)$ 、波度 $\eta_1(x)$ 、形状误差 $\eta''(x)$ 等成分组成, 有

$$f(x) = \eta(x) + \eta_1(x) + \eta''(x). \tag{3}$$

各种成分的主要区别在于其所占频率带不同, 因此可以用一带通滤波器将其分离开. 通过前文所述的小波变换, 小波系数 d_1, \dots, d_j 可以代表高频带 $1/\lambda \sim 1/\lambda_c$ 的信息, 即表面粗糙度. 其中: λ_c 是由采样间隔决定的高频上限, λ 为粗糙度频率下限. d_{j+1}, \dots, d_j 代表着频率带 $1/\lambda_c \sim 1/\lambda_{wc}$ 为波度成分, $1/\lambda_{wc}$ 为波度成分的频率下限. 尺度系数 a_j 代表着低频带 $1/\lambda_{wc} \sim 1/l$ 的信息, l 是采样长度 ($l = l_x$ 或 $l = l_y$).

通过逆小波变换, 可以将以上表面各种成分分别完整重构出来. 对于小波算法, 逆小波变换与小波变换的区别仅在于其运算符相反. 如粗糙度、波度和形状误差分别为

$$\begin{aligned} \eta(x) &= IW(d_1, \dots, d_j) = \sum_{j=1}^j \{d_j(x) + \rho[A_{j-1}(x)]\}, \\ \eta_1(x) &= IW(d_{j+1}, \dots, d_j) = \sum_{j=j+1}^j \{d_j(x) + \rho[A_{j-1}(x)]\}, \\ \eta''(x) &= IW(a_j) = a_j(x) - W[d_j(x)]. \end{aligned}$$

其中: $A(x)$ 为 $f(x)$ 的分解子集; ρ, μ 为两个加权算法, 用于分离高频和低频成分. 在计算中, 为了得到 $\eta(x), \eta_1(x)$, 尺度系数 a_j 置为零, 然后进行逆小波变换, 可计算出 $\eta(x), \eta_1(x)$.

1.4 分解次数选取算法

小波分解的频率空间划分有 2 的幂的关系. 因此, 将小波分解的尺度和截止波长都转换到归一化截止频率上, 可得小波分解尺度与滤波截止波长, 以及数据采样间隔之间的关系. 即 $2^{N+1} = \lambda/\Delta s$. 其中: N 为小波分解时所需层次, λ 为截止波长, Δs 为待分析数据的采样间距. 当截止波长与采样间距的商刚好为 2 的整数幂时, 小波分解 N 层所得的结果为 $N = (\log_2(\lambda/\Delta s)) - 1$. 当截止波长与采样间距的商不是 2 的整数幂时, 小波分解不能准确地获得所需要的截止频率, 只能用近似值代替, 有

$$N = \text{INT}(\log_2(\lambda/\Delta s)) - 1. \tag{4}$$

小波分解次数还受到分解波长的影响. 当截止波长大于小波基支撑长度时, 则分解次数不受影响. 对于不同精度的工作表面, 分解波距和采样间距不同, 分解次数要视具体情况而定.

2 实例采集和计算分析

表面轮廓包括表面粗糙度轮廓、表面波纹度轮廓和主要轮廓信息^[8]. 其中, 对表面粗糙度轮廓的典

型评定参数有如下定义: R_a 为算术平均偏差, R_p 为最大轮廓峰高, R_v 为最大轮廓谷深, R_z 为最大轮廓高度, R_q 为均方根偏差, R_{sk} 为偏斜度.

实验使用的被测对象为表面参数 R_a 为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 的标准样件, 测量仪器为 LI 型接触式激光干涉轮廓仪. 以 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的采样间隔在被测表面测得一段信号, 对该段信号使用不同得小波基进行评定. 选取 0.8 mm 的滤波截止波长, 根据式 (4) 得出分解层数为 8. 评定结果如表 1 所示. Daubechies, BiorSplines, Symlets, Coiflets 小波基在 8 级小波分解下, 所构造的表面轮廓评定基准线, 如图 1 所示. 表 1 中: 标记为“点”、“虚”的基准线, 分别对应图 1(a)~(d) 中的点线和虚线, 图 1 中的黑线为表面原始轮廓线.

表 1 不同小波基在同一被测表面下的评定结果

小波基	$R_a/\mu\text{m}$	$R_p/\mu\text{m}$	$R_v/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$	R_{sk}
Db6 (点)	0.867 5	1.749 2	2.025 7	3.774 9	0.944 6	- 0.111 0
Db9 (虚)	0.858 0	1.782 1	2.082 2	3.864 3	0.954 5	- 0.087 4
Coif1 (点)	0.886 5	1.612 9	2.008 0	3.620 9	0.962 6	- 0.102 3
Coif4 (虚)	0.857 5	1.710 8	2.059 4	3.770 3	0.924 9	- 0.130 8
Sym4(点)	0.859 8	1.693 3	2.078 1	3.771 4	0.931 0	- 0.139 0
Sym8(虚)	0.867 6	1.707 4	2.050 0	3.757 3	0.922 6	- 0.126 6
Bior3.7 (点)	0.866 4	1.774 8	2.077 6	3.852 4	0.953 1	- 0.097 9
Bior3.9 (虚)	0.868 4	1.701 3	2.081 1	3.862 7	0.955 2	- 0.092 9

使用截止波长为 0.8 mm 的高斯滤波器, 对上述同一表面轮廓进行滤波处理及评定. 评定结果如下: R_a 为 $0.8593\text{ }\mu\text{m}$, R_p 为 $2.0764\text{ }\mu\text{m}$, R_v 为 $2.3362\text{ }\mu\text{m}$, R_z 为 $4.4126\text{ }\mu\text{m}$, R_q 为 $0.9178\text{ }\mu\text{m}$, R_{sk} 为 -0.1376 . 由表 1 和以上的高斯滤波器处理结果可知, 各小波基得到的参数与标准件表面参数 R_a 的差别不是很大. 由小波基之间的对比可以发现, 双正交小波基 Bior3.7 和 Bior3.9 的 R_a 绝对值差值较小, R_z , R_q , R_{sk} , R_p 与 R_v 的绝对值差值较小. 由其他小波基得到的 R_a 绝对值差值较大, R_p 与 R_v 等其他参数的绝对值差值也较大. 这与从图 1(a)~(d) 中看到, 由黑实线表征的被测表面轮廓特征是有一定出入的. 证明了双正交小波基得到的表面轮廓参数评定结果, 能够较好地表现被测表面轮廓的特征.

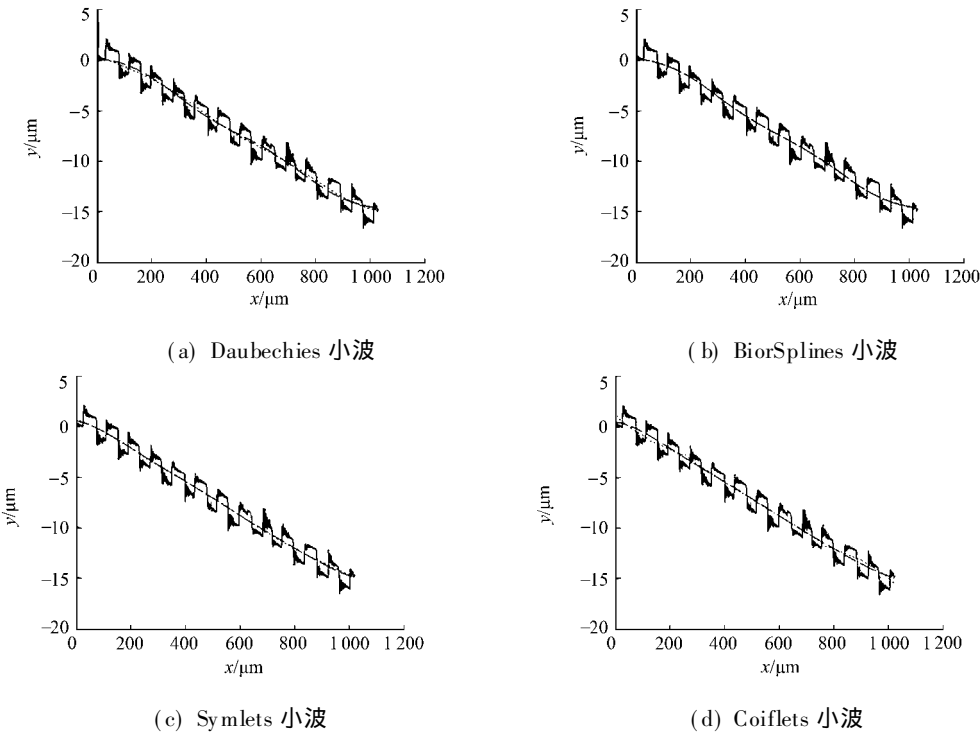


图 1 小波构造的基准线

Fig. 1 Reference with wavelet filtering

图 1(a)~(d) 中的点线与虚线均为小波构造的评定基准线, 都很光滑且能较好地表现被测轮廓的基准. 图 2 中平滑曲线为高斯滤波器构造的评定基准线, 也能较好地表现轮廓基准, 但相比小波基准, 则

显得不够光滑. 根据 ISO 3274 的规定^[9], 在运用高斯滤波方法之前, 首先使用最小二乘去除原始轮廓的形状曲线. 图 3 为由高斯基准线得到的粗糙度轮廓.

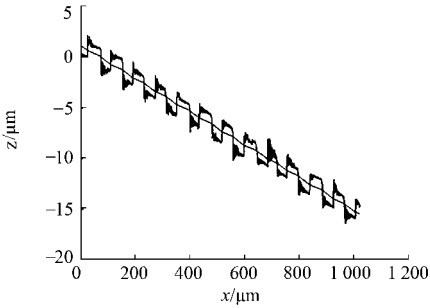


图 2 高斯滤波器构造的评定基准线

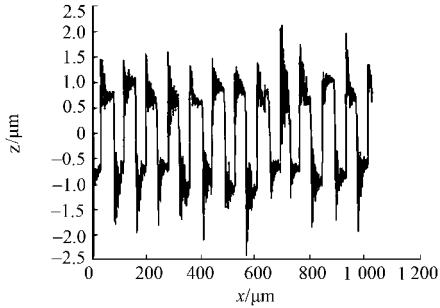


图 3 由高斯基准线得到的粗糙度轮廓

Fig. 2 Evaluation reference with Gaussian filter Fig. 3 Roughness profile obtained by Gaussian reference

3 结束语

与传统方法比较, 小波基准线具有由小波分解自动产生, 无须假定其具有某种特定函数的表达式, 因而没有拟合误差等优点. 它克服了函数拟合等回归方法的不足, 曲线光滑自然, 形态完美, 基准线是一条算术平均中线, 且精度高. 实例证明, 小波基准线优于传统评定基准线.

参考文献:

[1] 蒋向前. 新一代 GPS 标准理论与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
[2] 刘柏森. 自适应提升小波算法研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
[3] 曾文涵. 双树复小波表面分析模型及加工过程形貌辨识方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
[4] 李惠芬, 蒋向前, 李柱. 小波理论的发展及其在表面功能评定中的应用[J]. 现代计量测试, 2001, 10(5): 6-8.
[5] 李惠芬. 基于新一代 GPS 体系的表面稳健高斯滤波技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
[6] 陈庆虎. 小波重构的边界数据处理方法[J]. 武汉交通科技大学学报, 2000, 24(2): 160-162.
[7] JIANG X Q, BLUNT L, STOUT K J. Application of the lifting wavelet to rough surfaces[J]. Precision Engineering, 2001, 25(2): 83-89
[8] ISO. ISO 4287: 1997 Geometrical product specification (GPS) —— Surface texture: Profile method—— Terms, definitions and surface texture parameters[S]. Geneva: Publién Suisse, 1997
[9] ISO. ISO 3274: 1996 Geometrical product specifications (GPS) —— Surface texture: Profile method —— Nominal characteristics of contact (stylus) instruments[S]. Geneva: Publién Suisse, 1996

Surface Morphology Evaluation and Analysis
Based on Wavelet Filtering

ZHANG Geng-pei, CUI Chang-cai

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In order to enhance the evaluation accuracy of surface morphology, the wavelet filtering is used to the analysis of surface morphology, in which the decomposing number is determined according to the filtering cutoff wavelength. The influences of different wavelet bases on the evaluation references and parameters of the surface morphology are compared, and the comparative analysis between the Gaussian filtering recommended by ISO and wavelet filtering is given. The results have shown that the wavelet reference is smooth and natural with a perfect form as an arithmetic average center line, and better than the traditional one as well.

Keywords: surface evaluation; morphology; wavelet; filtering; reference line

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)