

文章编号 1004-924X(2010)07-1661-07

巴特沃思小波在表面形貌信号分离中的应用

张 浩,袁怡宝,张 峰

(哈尔滨工业大学 电气与自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了快速准确地分析工程表面,提出了一种基于巴特沃思小波的滤波方法。首先,讨论了小波滤波器的低通幅度传输特性,并以此作为选择适合表面形貌分析小波滤波器的依据。然后,介绍了巴特沃思小波滤波器的构造原理,并给出了它的快速实现算法;综合其优良的传输特性和高效的实现算法,以巴特沃思小波作为表面分析的滤波器,对实际表面轮廓进行了多层分解。最后,利用巴特沃思小波建立了表面轮廓评定的基准线,并给出了确定小波分解层数的方法。实验结果表明,巴特沃思小波能够快速准确地实现表面轮廓的多尺度分析,稳定可靠地提取表面中线;在普通计算机上提取 11 200 点数据表面中线仅耗时 60 ms,利用该中线计算所得 R_a 值相对误差仅比利用高斯中线所得 R_a 值相对误差大 0.12%。

关键词:表面计量学;小波分析;巴特沃思小波;幅度传输特性

中图分类号: TN713.4; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1661

Application of Butterworth wavelet to surface topographic signal separation

ZHANG Hao, YUAN Yi-bao, ZHANG Feng

(School of Electrical Engineering and Automation,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to analyze engineering surfaces fast and accurately, a new filtering approach based on Butterworth wavelet is proposed. Firstly, the transmission characteristic of a low-pass filter based on a wavelet is discussed, then it is taken as a primary reference to choose an appropriate wavelet base for surface analysis. The construction principle of the Butterworth wavelet filter is briefly introduced, and a fast algorithm for implementing this filter is illuminated. By combining the eminent transmission characteristic and efficient algorithm, the Butterworth wavelet is selected as the analyzing filter to decompose the surface profile with arbitrary orders. Finally, the Butterworth wavelet is also applied to calculating the reference line for profile evaluation and to offering a method to determine decomposed orders. The experimental results indicate that the Butterworth wavelet can achieve the multi-scale analysis of surface profile quickly and accurately and can extract its mean line reliably. The total calculation of this extraction for 11 200 data points only costs 60 ms by general PC and the relative error of R_a obtained by this extracted mean line is only 0.12% larger than the result by Gaussian filter.

Key words: surface metrology; wavelet analysis; Butterworth wavelet; amplitude transmission characteristic

收稿日期:2009-09-07;修订日期:2009-11-17.

基金项目:教育部留学回国人员科研基金资助项目(No. AEBQ24403704)

1 引言

在表面形貌评价理论中,表面轮廓被分离成长波、中波、短波,分别代表形状、波纹和粗糙度。在这一过程中,滤波器尤其是数字滤波器是主要分离手段^[1],ISO11562 已明确推荐高斯滤波器作为表面轮廓长短波分离滤波器的国际标准^[2-4]。工程表面一般由多种工艺加工形成,而每种加工工艺都有独特的纹理频带(波长),在实际工作中,需要通过滤波方法将不同的频带(波长)成分提取出来,以便进行质量分析,并以此监控加工过程。此时,高斯滤波器有限的多尺度分析能力使其不再适用,而小波滤波器作为一种多尺度、多分辨率的分析工具备受关注。小波滤波器具有良好的时频局域化特性,能够在不同尺度上分离和提取各种表面元素,对于高频信息,可将时间窗口调小,从而给出较好的精度;对于低频信息,可将时间窗口变大,从而给出完全信息。因为具有这种类似于调焦距的伸缩能力,小波滤波器又被称为数学显微镜^[5-6]。

将小波滤波器应用于表面形貌分析是表面测量领域研究的一个热点方向,但就目前的情况来说,表面小波滤波技术还存在许多问题。首先,小波滤波器本质上仍然具有滤波器的性质,在众多的小波基中,如何选择适合于表面形貌分析的小波滤波器,是第一个需要解决的问题。其次,小波滤波器是一种二分滤波器,通常需要多层分解和重构才能达到滤波分析目的。单层分解重构的速度影响并不明显,但多层分解重构的速度与传统的高斯滤波器比较要慢很多,因此其计算速度急需进一步提高。再次,利用小波滤波器也可建立表面轮廓基准线,其基准线的获取决定于分解层数,而如何确定分解层数又是一个关键问题。

为了解决以上问题,本文提出了以巴特沃思(Butterworth)小波为滤波工具的工程表面分析方法。巴特沃思小波具有优秀的幅度传输特性和快速的实现算法,完全能够满足小波滤波器在表面测量领域的应用要求。

2 小波滤波器

在研究传统表面形貌滤波器时,评价该滤波

器是否适合于表面形貌测量主要根据 4 个条件:第一,零相移,不产生相位失真;第二,幅度传输特性尽量与国际标准高斯滤波器接近且截止特性平滑;第三,要尽量抑制边缘效应的影响;第四,较高的计算效率。这 4 个评价条件也可以用在小波滤波器的选择上^[7]。

2.1 小波滤波器的幅度传输特性

过去的很多文献中均简单地认为小波滤波器的低通幅频特性就是分解低通函数的幅频特性,这是不可取的。实际上,小波滤波器的低通幅频特性取决于分解低通函数幅频特性与重构低通函数幅频特性的乘积,这可以用多分辨率滤波器组的结构组成来证明。图 1 是双通道多采样率滤波器组分解与重构过程中的典型环节^[8]。其中 $y(k)$ 是离散输入信号, $s(k)$ 是离散重构信号,设 $Y(z)$ 和 $S(z)$ 分别是分解低通滤波器 $h_0(k)$ 和分解高通滤波器 $h_1(k)$ 的 Z 变换; $G_0(z)$ 和 $G_1(z)$ 分别是重构低通滤波器 $g_0(k)$ 和重构高通滤波器 $g_1(k)$ 的 Z 变换。

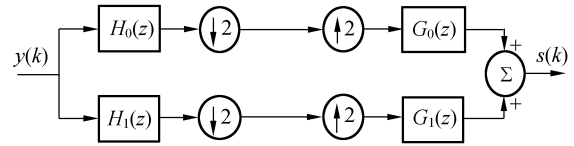


图 1 小波滤波器组

Fig. 1 Filter bank of wavelet transform

如图 1 所示,双通道滤波器组的系统函数为

$$S(z) = S_0(z) + S_1(z) = \frac{1}{2} [H_0(z)G_0(z) + H_1(z)G_1(z)]Y(z) + \frac{1}{2} [H_0(-z)G_0(z) + H_1(-z)G_1(z)]Y(-z), \quad (1)$$

根据完美重构条件(PR 条件),有

$$H_0(-z)G_0(z) + H_1(-z)G_1(z) = 0, \quad (2)$$

则

$$S(z) = S_0(z) + S_1(z) = \frac{1}{2} [H_0(z)G_0(z) + H_1(z)G_1(z)]Y(z), \quad (3)$$

从式(3)中可以看出,低通滤波输出为

$$S_0(z) = \frac{1}{2} H_0(z)G_0(z)Y(z), \quad (4)$$

因此,得到低通滤波器的传输特性为

$$T(z) = \frac{1}{2} H_0(z)G_0(z). \quad (5)$$

在众多小波基中,最常用的小波基是 Daubechies 小波和双正交样条小波,其中, Daubechies 小波滤波器具有平滑的截止特性,但它们的相频特性却是非线性的,非线性相频特性会扭曲表面滤波结果,所以不适合用于表面形貌测量。双正交样条与 Daubechies 小波不同,它的构造原理决定了它是零相移滤波器,其中 bior6.8 不但具有平滑的截止特性,而且其低通幅频特性接近于水平,没有过冲,因此从传输特性上讲, bior6.8 比较适合于表面形貌测量^[9]。但是由于卷积算法的限制,样条小波变换的实现速度通常都比较慢,如果需要进行多层分解重构时,计算效率将是一个必须考虑的问题。

2.2 巴特沃思小波

下面简要介绍一下 Averbuch 提出的巴特沃思小波,详细内容可参阅文献^[10-11]。

对于一给定序列 $y(k) k \in \mathbf{N}$,用 $d(k)$ 表示 $y(k)$ 奇序列, $e(k)$ 表示 $y(k)$ 偶序列。利用 $2n$ 阶离散 B 样条函数对 $e(k)$ 插值,同时设 $\sigma(k)$ 是离散 B 样条在节点中点的值,就可以得到如下关系式:

$$\sigma(z^2) = zU(z)e(z^2), \quad (6)$$

其中:

$$U(z) = \frac{(1+z^{-1})^{2n} - (-1)^n(1-z^{-1})^{2n}}{(1+z^{-1})^{2n} + (-1)^n(1-z^{-1})^{2n}}. \quad (7)$$

分析式(6)和(7)可知,它们实际上实现了小波提升算法的预测过程,其中 $\sigma(k)$ 就是利用 $e(k)$ 对 $d(k)$ 的预测。小波提升算法是由 Sweldens 提出的,它的分解过程一般包含 3 个计算步骤:分裂、预测、提升^[12-13]。巴特沃思小波的构造和变换过程借鉴了提升小波的模式:

首先,将 $y(k)$ 按奇偶抽取成 $d(k)$ 和 $e(k)$ 两个子序列,即分裂。接着,利用式(6)完成对 $d(k)$ 的预测,重新定义奇序列 d^n 为原奇序列与预测值之间的差值,则

$$d^n(z^2) = d(z^2) - zU(z)e(z^2). \quad (8)$$

最后,更新偶序列 e^n ,完成提升过程:

$$e^n(z^2) = e(z^2) + \frac{U(z)z^{-1}}{2}d^n(z^2). \quad (9)$$

提升过程是利用更新过程消除因原始数据抽取而产生的混迭失真。客观上,这一步也就是低通滤波。

重构过程是分解过程的逆过程,可以用 e^n 和 d^n 重构原始信号 $y(k)$ 。

参考多分辨率分析方法,定义分解与重构滤波器组如下:

$$\begin{cases} H_1(z) = z[1-U(z)] & H_0(z) = 1 + \frac{U(z)}{2}z^{-1}H_1(z) \\ G_0(z) = 1 + U(z) & G_1(z) = z^{-1}[1 - \frac{U(z)}{2}G_0(z)] \end{cases}. \quad (10)$$

于是,双通道分解过程可以写成:

$$e^n(z^2) = \frac{1}{2}(H_0(z)Y(z) + H_0(-z)Y(-z)), \quad (11)$$

$$d^n(z^2) = \frac{1}{2}(H_1(z)Y(z) + H_1(-z)Y(-z)), \quad (12)$$

其中: $e^n(z^2)$ 与 $d^n(z^2)$ 分别对应着分解低通和高通信号,而信号重构过程则可以写成:

$$Y(z) = G_0(z)e^n(z^2) + G_1(z)d^n(z^2). \quad (13)$$

需要说明的是,小波的重构低通滤波器 G_0 就等于巴特沃思的幅度平方函数,所以这种小波也被称为巴特沃思小波。

巴特沃思小波满足双正交条件:

$$\begin{cases} G_0(z) = -z^{-1}H_1(-z) \\ G_1(z) = +z^{-1}H_0(-z) \end{cases}. \quad (14)$$

进而满足 PR 条件,即

$$\begin{cases} G_0(z)H_0(z) + G_1(z)H_1(z) = 2 \\ G_0(z)H_0(-z) + G_1(z)H_1(-z) = 0 \end{cases}. \quad (15)$$

它的小波函数和尺度函数都是中心对称,因此,分解和重构滤波器都具有零相移特性。

参考式(8),设 $F_n(z^2) = zU(z)$,则

$$d^n(z^2) = d(z^2) - F_n(z^2)e(z^2), \quad (16)$$

当 $n=1$ 时, $F_1(z) = (1+z)/2$,它是一个 FIR 滤波器,值得注意的是,一阶巴特沃思小波就是 bior2.2 滤波器。当 $n=2$ 时, $F_2(z)$ 是一个 IIR 滤波器,可以用下面两步递归算法实现^[11]:

$$\begin{cases} wz(k) = 4\alpha^2 y(k) - \alpha^2 wz(k-1) \\ s(k) = wz(k) + wz(k+1) - \alpha^2 s(k+1) \end{cases}, \quad (17)$$

式中: $\alpha^2 = 3 - 2\sqrt{2}$, $wz(k)$ 是中间过程序列。同理,更高阶巴特沃思小波变换一样可以用这种递归算法实现。

对于二阶巴特沃思小波,图 2 给出了它的分解低通滤波器和重构低通滤波器的幅度传输特性,可以看到巴特沃思小波的分解低通滤波器的幅度传输特性是含有过冲的,但如式(5)计算后的

低通滤波器就不再含有过冲,且其低通幅度传输特性接近水平直线,如图 3 所示。事实上,二阶巴特沃思小波的低通传输特性与 bior6.8 低通传输特性重合,二者偏差仅有 0.37%。综合考虑幅度传输特性、零相移特性和计算效率,巴特沃思小波无疑是一个优秀的可应用于表面形貌测量的小波滤波器。

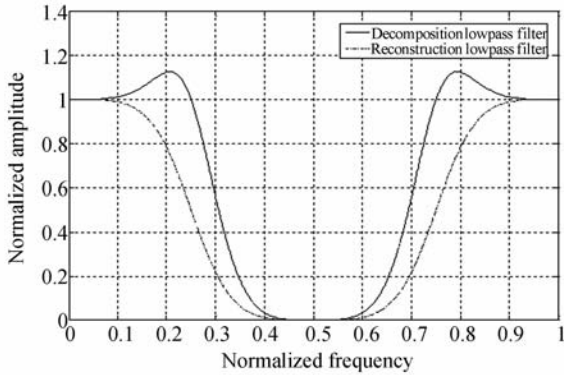


图 2 二阶巴特沃思小波 $H_0(z)$ 和 $G_0(z)$ 幅度传输特性
Fig. 2 Amplitude transmission characteristics for $H_0(z)$ and $G_0(z)$ of Butterworth wavelet in order $n=2$

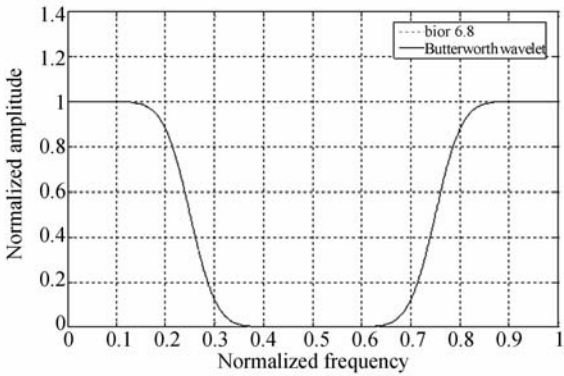


图 3 低通滤波器幅度传输特性

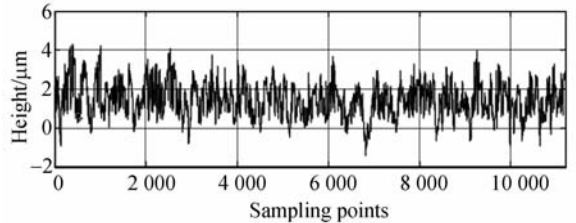
Fig. 3 Amplitude transmission characteristics of low-pass filters

3 巴特沃思小波分析工程表面

小波变换本质上是一滤波过程,但它优于传统的数字滤波方法。与传统数字滤波器的单一截止频率相比,小波滤波器具有更大的自由度,利用多分辨率分析思想,可实现多层分解,更详细地反映表面信息。很多情况下,小波滤波器被用来分

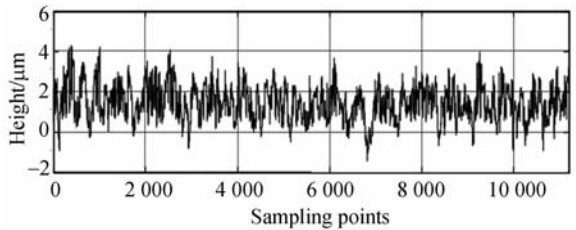
析表面轮廓组成,以进行缺陷检测和监控生产流程^[14]。

如前所述,小波滤波器的滤波器效果决定于其幅度传输特性,但其又有特殊性,小波滤波器是一种二分滤波器。通常,它的低通和高通幅频特性是关于 $\pi/2$ 对称的,即截止频率为 $\pi/2$ 。从原理上说,它需要根据要求制定分解层数,由分解层数决定其总的幅度传输特性,进而得到不同滤波器结果。就单层分解滤波结果而言,根据图 3 中对二阶巴特沃思小波滤波器低通幅度传输特性的分析,它与 bior6.8 双正交样条小波接近,因此对同一信号分解所得结果也应该很接近。如图 4 中,(a)是利用 bior6.8 对表面轮廓采样信号单层分解且重构所得滤波结果,(b)是二阶巴特沃思小波滤波器的滤波结果,可以看出二者的结果非常接近。



(a) bior6.8 滤波结果

(a) Filtering results of bior6.8



(b) 巴特沃思小波滤波结果

(b) Filtering results of Butterworth wavelet

图 4 Bior6.8 与巴特沃思小波滤波结果比较

Fig. 4 Comparison of filtering results by bior6.8 and Butterworth wavelet

用二阶巴特沃思滤波器对一表面原始轮廓进行多分辨率分析,即多层分解。其中,原始轮廓总的测量长度 5.6 mm,采样间距为 $0.5 \mu\text{m}$ 。如图 5 可知,随着分解层数的增加,其滤波结果逐渐平滑,并反映了轮廓趋势,多层次的分解使得粗糙度、波纹度、形状以及缺陷信息更加详尽的显现出来。

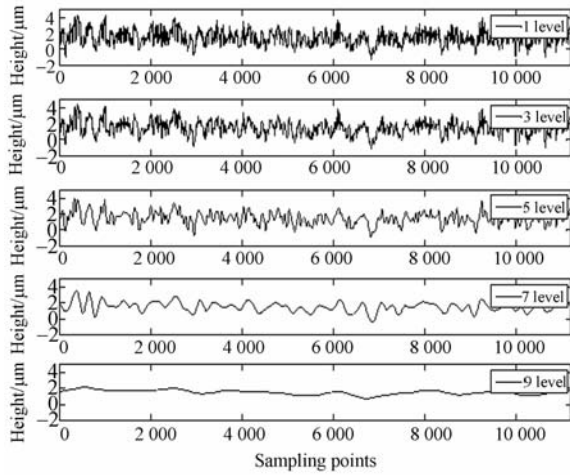


图 5 巴特沃思小波多分辨率分析

Fig. 5 Multi-resolution analysis by Butterworth wavelet

4 巴特沃思小波获取表面中线

除了用巴特沃思小波对表面进行多分辨率分析之外,还可以利用它提取表面轮廓的小波中线,以便对表面进行参数评定。

在提取中线之前,首先要确定分解层数。滤波器的截止特性是通过截止波长表述的,所以在利用小波分析法提取表面轮廓中线时,首先要根据实际需要确定截止波长,进而确定小波分析的分解层数^[15]。

假设截止波长为 λ_c ,滤波器的截止频率为:

$$\omega_c = \frac{2\pi}{\lambda_c}, \quad (18)$$

n 层小波分解的截止频率为 $\pi/2^n$,所以小波分解的层数为

$$n = \log_2 \lambda_c - 1, \quad (19)$$

例如:当 $\lambda_c = 1\ 600$,则 $n = 9.643\ 9$, n 取 9。

在确定了分解层数之后,就可以用巴特沃思小波滤波器求取表面中线。小波对数据 $\{c_k^n\}$ 每分解一次,则数据长度减为原来一半: $\{c_k^0\}$ ($k=1,2,\dots,2^M$) 分解一次成 $\{c_k^1\}$ ($k=1,2,\dots,2^{M-1}$) 和 $\{d_k^1\}$ ($k=1,2,\dots,2^{M-1}$),若分解 n 次,则数据长度减为 2^{M-n} 。重构过程正好相反,每一次重构则数据长度加倍。其中,重构时需要将细节数据设为零,这样就能重构出低通信号,即表面中线。

另外,由于小波滤波器的支撑长度有限,所以在小波滤波器结果的边缘仍然会出现失真。而且,由于多层分解和多层重构,其边缘效应势必会累加起来产生更严重的边缘效应。这里给出一种预处理方法帮助小波滤波器有效地抑制边缘效应。

(1) 首先,对待处理的轮廓数据进行修剪,使其两端都等于 0,

$$y'(k) = y(k) - y(1) - \frac{y(N) - y(1)}{N-1}(k-1) \quad (k=1,2,\dots,N). \quad (20)$$

(2) 将修剪得到的数据 y' 带入到巴特沃思小波滤波器中运算,得到 s' 。运算过程中两端边界点处各加长适当长度数据,并设置为 0,对于二阶巴特沃思小波,两端需要各加长一位数据。

(3) 最后用式(21)对 s' 作还原运算,得到输出 s ,

$$s(k) = s'(k) + y(1) + \frac{y(N) - y(1)}{N-1}(k-1) \quad (k=1,2,\dots,N). \quad (21)$$

为了验证二阶巴特沃思小波可用于表面中线提取,本文利用它对一标称值 $R_a = 0.86\ \mu\text{m}$ 的表面粗糙度多刻线样板进行了实际评定。首先利用 Form Talysurf Series2 对多刻线样板进行采样,获取原始表面轮廓数据,如图 6,标准样块的纹理为矩形方波。然后,分别用二阶巴特沃思滤波器和高斯滤波器对表面原始轮廓滤波,并提取表面

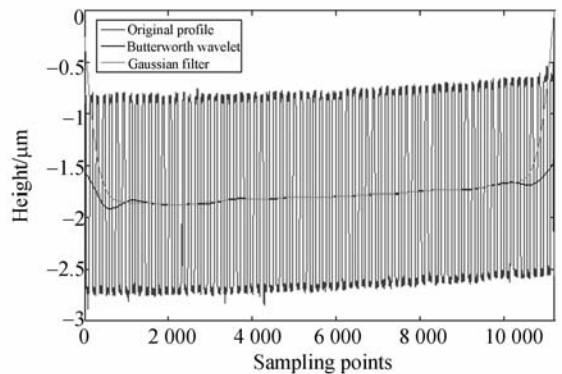


图 6 巴特沃思小波与高斯滤波器滤波结果比较

Fig. 6 Comparison of filtering results by Butterworth wavelet and Gaussian filter

中线。其总的采样点数仍然取 11 200, 滤波器截止波长设为 0.8 mm, 由式(19)可知, 则小波分解层数为 9, 所得表面中线如图 6 所示, 可以看出巴特沃思小波与高斯滤波器一样可以很好地提取粗糙度中线。用原始轮廓减去表面中线, 得到粗糙度数据, 计算出 R_a 值。表 1 给出了利用高斯滤波器和二阶巴特沃思小波对样板提取中线后, 计算所得 R_a 值, 并给出了与标称值的相对误差。二者的相对误差仅相差 0.12%, 由此可知, 巴特沃思小波能够以高精度提取表面中线。

表 1 用不同中线所得值

Tab. 1 Value computed by different mean lines

中线种类	高斯中线	巴特沃思小波中线
$R_a/\mu\text{m}$	0.874 2	0.875 3
相对误差/%	1.66	1.78

以上算法使用 matlab 语言编程, 并在配置为 Pentium dual 1.6 GHz 和 1 G 内存的普通 PC 机上运行, 完成一次巴特沃思小波表面中线提取(包含边缘效应抑制算法)需要 60 ms, 而用 bior6.8

完成一次中线提取至少需要 0.2 s, 可见巴特沃思小波滤波器的运算效率比双正交样条小波的运算效率高。

5 结 论

提出以小波低通信道的幅频特性而不是单独以分解或重构滤波器的幅频特性为依据来选择小波滤波器。综合考虑二阶巴特沃思小波具有平滑的截止特性和优良的低通特性, 巴特沃思小波滤波器具有双正交和零相移特性且其可采用提升和递归结合算法来加快小波变换速度, 本文提出并实现了利用巴特沃思小波进行表面形貌分析, 并利用其建立工程表面轮廓中线。实验表明, 二阶巴特沃思小波滤波器能够快速准确地实现表面轮廓的多尺度分析, 稳定可靠地提取表面轮廓中线。在普通计算机上提取一次表面中线仅耗时 60 ms, 其计算效率比双正交样条小波高; 利用巴特沃思小波中线所得 R_a 的相对误差与高斯中线结果仅相差 0.12%, 精度很高。

参考文献:

- [1] BRUZZONE A A G, MONTANARO J S, FERRANDO A, *et al.*. Wavelet analysis for surface characterisation: an experimental assessment[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2004, 53(1):479-482.
- [2] International Organization for Standardization. ISO4287: 1997. Geometrical product specification (GPS)-surface texture: profile method-terms, definitions and surface texture parameters[S]. Switzerland: International Organization for Standardization.
- [3] 张浩, 袁怡宝, 张峰, 等. 广义 B 样条滤波器在表面形貌测量中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(9):1722-1726.
ZHANG H, YUAN Y B, ZHANG F, *et al.*. Application of generalized B spline filter to surface measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1722-1726. (in Chinese)
- [4] 许景波, 袁怡宝, 刘泊. B 样条滤波器建立表面轮廓中线的办法[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(8):1411-1415.
XU J B, YUAN Y B, LIU B. Establishment of mean line in surface metrology by B-spline filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8):1411-1415. (in Chinese)
- [5] 李海燕, 刘国栋, 刘炳国, 等. 双密度小波在表面形貌信号分离中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(6):1093-1097.
LI H Y, LIU G D, LIU B G, *et al.*. Application of double density wavelet transform to surface topographic signal separation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6):1093-1097. (in Chinese)
- [6] RAJA J, MURALIKRISHNAN B, SHENGYU F. Recent advances in separation of roughness, waviness and form[J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(2):222-235.
- [7] XIAO S J, JIANG X Q, BIUNT L, *et al.*. Comparison study of the biorthogonal spline wavelet filtering for areal rough surfaces[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41(13-14):2103-2111.
- [8] 樊启斌. 小波分析[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
FAN Q B. *Wavelet Analysis*[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008. (in Chinese)

- [9] SHENGYU F, MURALIKRISHNAN B, RAJA J. Engineering surface analysis with different wavelet bases[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003,125:844-852.
- [10] AMIR Z A, VALERY A Z. Construction of biorthogonal discrete wavelet transforms using interpolatory splines [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2002,12(1):25-56.
- [11] AMIR Z A, ALEXANDER I B P, VALERY A Z. Butterworth wavelet transforms derived from discrete interpolatory splines; recursive implementation[J]. *Signal Processing*, 2001,81(11):2363-2382.
- [12] JIANG X Q, BLUNT L, STOUT K J. Application of the lifting wavelet to rough surfaces[J]. *Precision Engineering*, 2001,25(2):83-89.
- [13] SWELDENS W. The lifting scheme: a custom design construction of biorthogonal wavelets [J]. *Appl. Comput. Harmon. Anal.*, 1996,3(2):186-200.
- [14] JIANG X, SCOTT P, WHITEHOUSE D. Wavelets and their applications for surface metrology [J]. *Manufacturing Technology*, 2008,57(1):555-558.
- [15] CHEN Q H, YANG S N, LI Z. Surface roughness evaluation by using wavelets analysis [J]. *Precision Engineering*, 1999,23(3):209-212.

作者简介:



张 浩(1979—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生,2005年于哈尔滨理工大学获得硕士学位,主要从事表面形貌测量、数字信号处理、图像处理等方面的研究。E-mail: zhanghaowo79@163.com



张 峰(1973—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,1996年、2005年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为信号检测、盲信号处理等。E-mail: hrbhitzf1123@sohu.com

导师简介:



袁怡宝(1964—),男,江苏启东人,教授,博士生导师,主要从事表面计量学,微形状计量学,纳米计量学及其应用,自动化测试技术与仪器,数字信号处理,光、机、电传感器技术等方面的研究。E-mail: yibaoyuan2008@yahoo.cn