

文章编号 1004-924X(2009)09-2255-07

# 小波滤波及奇异性分析在表面形貌评定中的应用

崔长彩,张耕培,张 彬,张 倩

(华侨大学 机电及自动化学院,福建 泉州 362021)

**摘要:**为了定位和减弱由于震动等因素引入检测数据中的奇异性信号,从而更加准确地分离表面粗糙度轮廓以评定表面形貌,提出了一种基于小波的奇异性检测和滤波的方法。首先应用小波变换检测奇异性信号对样品表面轮廓测量数据进行预处理以减弱奇异信号对表面参数评定的影响,然后采用小波滤波分解表面轮廓以获得粗糙度尺度轮廓,在此基础上对其三维典型参数进行计算。验算实例采用两类:在实测数据的基础上外加已知的奇异特征和典型带有奇异信号的实测数据。实验结果表明:第一类数据经过小波奇异性处理后与原始未加奇异特征的粗糙度轮廓参数非常接近, $S_a$ 、 $S_z$ 、 $S_q$ 、 $S_{sk}$ 和 $S_{ku}$ 的相对变化分别为0.27%、0.78%、0.51%、0.04%和1.04%,第一类数据经过小波奇异性处理轮廓测量数据后与原始外加奇异特征的实测数据未经奇异性处理的小波滤波表面粗糙度参数 $S_a$ 、 $S_z$ 、 $S_q$ 、 $S_{sk}$ 和 $S_{ku}$ 的相对变化分别为1.14%、20.63%、1.95%、3.81%、8.86%;第二类实测数据小波奇异性处理前后的小波滤波表面粗糙度参数 $S_a$ 、 $S_z$ 、 $S_q$ 、 $S_{sk}$ 和 $S_{ku}$ 的相对变化分别为6.2%、27.47%、9.54%、131.62%、53.77%。实验结果表明,采用精度较高的小波滤波提取表面粗糙度轮廓之前通过奇异性算法抑制奇异特征,可得到更加合理的表面参数评定结果。

**关键词:**小波分析;奇异性检测;小波滤波;表面粗糙度;评定

中图分类号:TP391.4 文献标识码:A

## Application of wavelet filtering and singularity analysis to evaluation of surface roughness

CUI Chang-cai, ZHANG Geng-pei, ZHANG Bin, ZHANG Qian

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

**Abstract:** In order to locate and exclude the singularity induced by vibration and to evaluate the surface texture exactly, a wavelet singularity detection and filtering method is presented. Firstly, the wavelet singularity analysis is used to preprocess the sampled surface and then the 3-dimensional roughness profile is extracted by using the wavelet filter. Then, the typical evaluation parameters of roughness profile are computed and the results are compared with two kinds of samples: measured data manually added singularity and measured data with singularity originally. Experimental results show that for the first kind of data roughness parameters after singularity processing for the first kind of data with added singularity are similar to those of original surface, and the relative changes of  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_q$ ,  $S_{sk}$  and  $S_{ku}$  are 0.27%, 0.78%, 0.51%, 0.04%, 1.04% respectively. The relative changes of  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_q$ ,  $S_{sk}$  and  $S_{ku}$  before and after singularity processing for the first kind of data with added singularity are 1.14%,

收稿日期:2008-07-22;修订日期:2008-09-24.

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(No. T0850004);福建省科技计划重点资助项目(No. 2008I0020)

20.63%、1.95%、3.81%、8.86%。For the second kind of data the relative changes of  $S_a, S_z, S_q, S_{sk}$  and  $S_{ku}$  before and after singularity processing are 6.2%、27.47%、9.54%、131.62%、53.77% respectively. The experiments prove that more reasonable evaluation results can be obtained if the singularity is excluded from the surface before the roughness profile is extracted by using the wavelet filtering.

**Key words:** wavelet analysis; singularity detection; wavelet filtering; surface roughness; evaluation

## 1 引言

在机械加工领域,表面信息对于表面加工的指导作用至关重要。相对于表面二维信息,三维表面结构信息更能反映加工表面的实际特征,因此对三维表面形貌的测量和评定是热点研究问题。表面形貌的测量手段可以分为两大类:一类是非接触式测量,例如干涉测量法、光切测量法;另一类是接触式测量,即传感器的触头(触针)直接与被测表面接触,当触针在被测表面上移动时,触针便随表面轮廓起伏而起伏,通过传感器把触针的上下位移转换成电信号,然后加以放大和处理,就可以得到表面轮廓信息<sup>[1]</sup>。

由于测量仪器的机械传动系统和测量环境等振动因素的存在,接触式测量方法得到的表面信号往往包含振动引入的误差信号,而这些信号存在其自身特点——奇异性特征。奇异性信号是指信号本身或它的某阶导数在某一时刻存在突变的信号,而奇异性检测就是要将信号的奇异点识别出来。小波分析是近年来迅速发展起来的新兴学科,它被认为是傅立叶分析的突破性进展,由于小波变换同时具有良好的时域和频域局部特性以及对信号的自适应能力,所以利用小波变换来分析信号的奇异性并分离信号是一种行之有效的方法<sup>[2-4]</sup>。

文中采用接触式激光干涉表面轮廓测量仪,其三维测量模式为逐行扫描测量模式。由于测量时存在环境振动与机械传动装置的振动,最终会导致测量结果出现测量行与测量行之间的奇异性与测量行内的奇异性。文中对一合成表面(实测表面附加奇异数据)和一实测表面进行了小波奇异性预处理,并使用小波滤波得到三维表面粗糙度轮廓,对其典型参数进行了评定和比对。

## 2 三维表面形貌典型评定参数

根据 ISO 新一代几何产品技术规范与认证(GPS)标准 25178-2<sup>[5]</sup>,三维表面结构包括表面粗糙度轮廓、表面波纹度轮廓和原始轮廓信息,其中对表面粗糙度轮廓评定的典型参数定义如下,式中  $A$  为评定区域面积,  $Z(x, y)$  为评定轮廓高度。

(1) 算术平均偏差(arithmetical mean height)  $S_a$ :

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy. \quad (1)$$

(2) 最大高度(maximum height)  $S_z$ :

$$S_z = S_p + S_v, \quad (2)$$

其中,  $S_p$  和  $S_v$  分别是评定区域内最大峰高和最大谷深。其具体计算也可以根据下式:

$$S_z = |Z_{\max}(x, y) - Z_{\min}(x, y)|, \quad (3)$$

其中,  $Z_{\max}(x, y)$  和  $Z_{\min}(x, y)$  分别是评定区域内轮廓高度最大值和最小值。

(3) 均方根偏差(root mean square height)  $S_q$ :

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z^2(x, y) dx dy}. \quad (4)$$

(4) 偏斜度(skewness)  $S_{sk}$ :

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left( \frac{1}{A} \iint_A Z^3(x, y) dx dy \right). \quad (5)$$

(5) 陡峭度(kurtosis)  $S_{ku}$ :

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left( \frac{1}{A} \iint_A Z^4(x, y) dx dy \right). \quad (6)$$

## 3 小波分析基本原理

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

$$W_a f(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{a,b}(t) f(t) dt, a > 0, \quad (7)$$

式中,  $a$  为尺度参数,  $b$  为定位参数, 函数  $\psi_{a,b}(t)$  称为小波函数, 即:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (8)$$

改变  $a$  的值, 对函数  $\psi_{a,b}(t)$  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。随着尺度的减小, 小波基  $\psi_{a,b}(t)$  支撑区也随之变窄, 而其傅立叶变换  $\psi_{a,b}(\omega)$  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的自适应变化, 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<sup>[6]</sup>。

#### 4 信号奇异性分析原理及其算法

定义 1 设函数  $x(t)$  在  $t_0$  附近具有下述特征:

$$|x(t_0+h) - p_n(t_0+h)| \leq A|h|^\alpha, n < \alpha < n+1. \quad (9)$$

称  $x(t)$  在  $t_0$  处的 Lipschitz 指数为  $\alpha$ , 用于表示信号  $x(t)$  在  $t_0$  点的光滑度, 它是用来表现函数局部特征的一种度量。式中  $A$  为大于 0 的常数;  $h$  为一个充分小的量;  $p_n(t_0)$  为过  $x(t_0)$  点的  $n$  次多项式;  $n$  为正整数。若  $x(t)$   $n$  次可微, 但  $n$  阶导数不连续, 且  $n+1$  次不可微, 则  $n < \alpha < n+1$ 。通常  $\alpha$  越大, 该点的光滑度越高;  $\alpha$  越小, 该点的奇异性越大。如果函数  $x(t)$  在某一点可导, 则  $\alpha \geq 1$ ; 如  $x(t)$  在某一点不连续但其值有限, 则  $0 \leq \alpha \leq 1$ <sup>[7]</sup>。

定理 1 设  $f(t)$  为能量有限的一维信号, 小波  $\psi(t)$  是实连续可微的, 且具有  $n$  阶消失距 ( $n$  为整数), 则任给  $t_0$  邻域内的点  $t$ ,  $f(t)$  具有 Lipschitz 指数  $\alpha$ , 当且仅当对任意常数  $A$  大于 0 时,  $f(t)$  满足:

$$|W_s f(t)| \leq A s^\alpha. \quad (10)$$

当尺度参数  $s$  趋于 0 时, 式(10)正是  $|W_s f(t)|$  渐进衰变的条件。且由式(10)可以得到

$$\log |W_s f(t)| \leq \log A + \alpha \log s. \quad (11)$$

可知在尺度  $1 \sim 2^J$  ( $J$  为整数) 上, 当信号的奇

异指数  $\alpha > 0$  时, 其小波变换的模随尺度  $s$  的增加而增大; 当奇异指数  $\alpha = 0$  时, 信号的小波变换模不随尺度变化; 当奇异指数  $\alpha < 0$  时, 小波变换模随着尺度的增加而减小。

定义 2 对  $t_0$  邻域内的任意点  $t$ , 若在尺度  $s$  上满足:  $|W_s f(t)| \leq |W_s f(t_0)|$ , 则称  $(s, t_0)$  为一模极大值点,  $|W_s f(t_0)|$  称为在  $(s, t_0)$  点的小波变换模极大值。若二维平面  $(s, t)$  上某一曲线上的点均为模极大值点, 则称此曲线为极大值线。小波变换模极大值携带了信号的大部分信息, 信号的所有奇异点都被模极大值点定位, 所以可用小波变换模极大值来确定奇异信号的位置和重构信号<sup>[8]</sup>。

在表面检测数据测量行与测量行之间(即矩阵的行)进行奇异性检测算法如下:

(1) 在尺度  $1 \sim 2^J$  上, 用 Mallat 算法对原始信号进行二进小波多分辨分解, 得到其在各个尺度  $2^j$  上的小波变换  $W_{2^j} f(t)$  和与其对应的低频信号  $S_{2^j} f(t)$ 。

(2) 寻找各尺度下小波变换  $W_{2^j} f(t)$  的模极大值点。对最大尺度  $2^J$ , 找出最大的模值记为  $M$ , 取阈值  $T = CM/J$ ,  $C$  为常数。把  $2^j$  尺度上幅度小于  $T$  的模极大值去掉。对剩余的模极大值点编号为  $t_i^j$ , 对应模值和正负号分别记为  $\text{mod}(t_i^j)$  和  $\text{sign}(t_i^j)$ ,  $i$  为非负整数。

(3) 在尺度  $2^{j-1}$  上,  $t_i^j$  对应点的半径为  $2^{j-1}$  的邻域内, 寻找一模极大值点  $t_i^{j-1}$ , 其符号为  $\text{sign}(t_i^{j-1})$  且幅值满足关系:  $0.75 \leq \text{mod}(t_i^j) / \text{mod}(t_i^{j-1}) \leq 1$ 。若找到这样的点, 就认为  $t_i^j$  和  $t_i^{j-1}$  在同一条极大值线上。否则认为  $t_i^j$  对应点的模极大值是由噪声随机造成的, 应去掉。按此做法遍历整个尺度。

(4) 重复(3)的做法直到尺度为  $2^2$ , 得到不同的极大值线, 把不在极大值线上的模极大值全部去掉。

(5) 因为在尺度  $2^1$  上噪声的小波变换模极大值占优, 因此把该尺度上小波变换模极大值全部去掉。每个极大值点的奇异指数  $\alpha$  可以通过  $2^\alpha \approx |W_{2^{n+1}} f(t_0)| / |W_{2^n} f(t_0)|$  近似获得, 所以可用极大值线估计出保留的各极大值点的奇异指数。用尺度  $2^2$  上的模极大值通过  $|W_{2^1} f(t_0)| \approx |W_{2^2} f(t_0)| / 2^\alpha$  算出尺度  $2^1$  上相同位置上模极大值。

(6) 对各个尺度的小波变换进行 5 点三次平滑, 然后把保留的模极大值回注到平滑结果中, 重

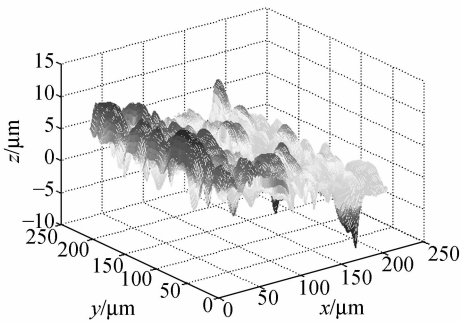
构出去噪结果<sup>[8]</sup>。

在测量行(即矩阵的列)内进行奇异性检测如步骤(1)~(6),可得到奇异性修正后的表面信号。

## 5 实验结果与讨论

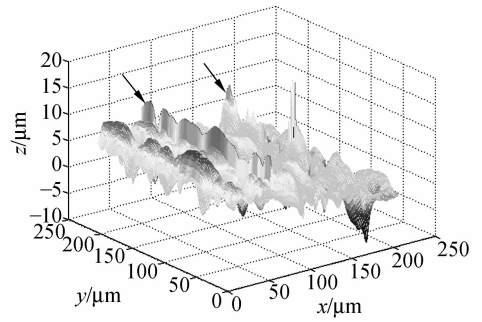
### 5.1 实测表面加入已知奇异信号对算法验证

为验证小波奇异性算法的有效性,首先采用合成的表面信号。原始表面实测信号如图 1(a)所示,奇异信号包括一个恒定幅值信号和一个如图 1(b)所示的随机信号,合成信号如图 1(c)所示,箭头所示为奇异信号所在行位置,图 1(d)是采用文中算法去除奇异特征后的信号。



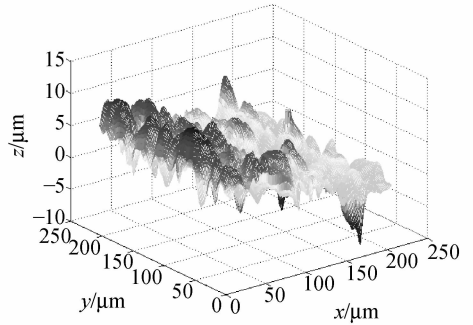
(a) 原始表面

(a) Original surface



(c) 合成的表面

(c) Constructed surface

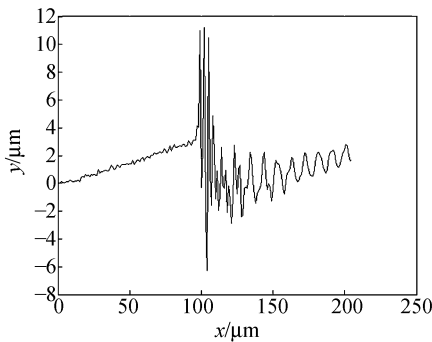


(d) 经奇异性分析处理后的表面

(d) Surface processed by singularity analysis

图 1 本文算法的实验结果

Fig. 1 Experimental result of the presented method



(b) 引入的随机奇异信号

(b) Radom singular signal

由图 1 可见小波奇异性检测算法对合成表面信号中奇异特征有明显的抑制作用,图 1(d)与图 1(a)非常接近,因此奇异性处理后使得由图 1(b)中信号所表示的奇异值对表面基准面和表面参数评定的影响明显降低。为了进一步验算算法的有效性,对原始表面、合成表面与奇异性处理后表面分别采用小波滤波获得粗糙度轮廓,采用分块评定求均值法对其典型参数进行了评定,评定结果如表 1 所示。

表 1 原始表面、合成表面及其奇异性处理后表面粗糙度轮廓评定结果

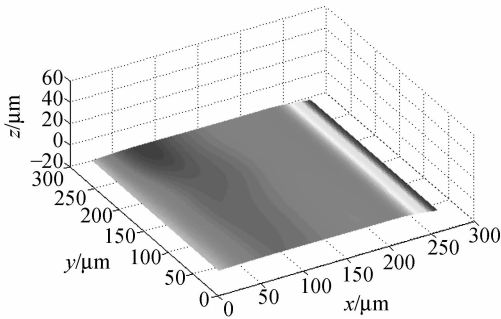
Tab. 1 Roughness parameters of measured surface, constructed surface and surface after singularity exclusion

评定参数	$S_a$	$S_z$	$S_q$	$S_{sk}$	$S_{ku}$
原始表面轮廓	2.893 5 $\mu\text{m}$	8.806 8 $\mu\text{m}$	3.247 7 $\mu\text{m}$	0.833 4	1.427 7
合成表面轮廓	2.918 6 $\mu\text{m}$	10.706 7 $\mu\text{m}$	3.294 2 $\mu\text{m}$	0.864 8	1.570 3
奇异性处理后合成表面轮廓	2.885 6 $\mu\text{m}$	8.875 9 $\mu\text{m}$	3.231 2 $\mu\text{m}$	0.833 1	1.442 5
合成表面处理前、后相对变化	1.14%	20.63%	1.95%	3.81%	8.86%
处理后与原始表面相对变化	0.27%	0.78%	0.51%	0.04%	1.04%

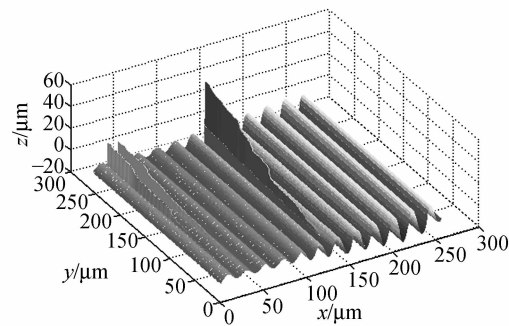
对表 1 中计算结果进一步分析可见,奇异特征的存在对表面参数的评定有明显的影响,其中含有奇异信号的合成表面使  $S_z$  的值有较大增大,其它参数的评定值增大略小;奇异性处理后表面粗糙度轮廓的评定参数结果非常接近未加入奇异测试数据的原始表面的评定结果,除了参数  $S_{ku}$ ,其它参数相对变化都在 1% 以下,明显优于未经奇异性处理合成表面的评定参数。

5.2 实测实例对算法的验证

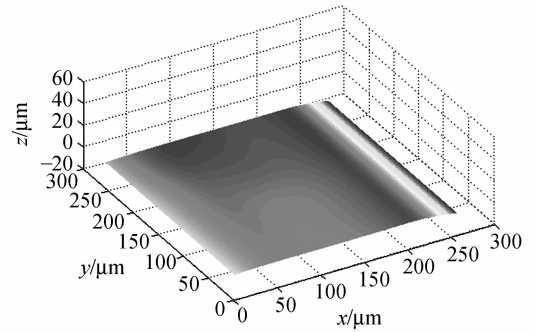
实验使用 LI 型接触式轮廓仪对一表面进行测量。使用奇异特征分析方法对原始测量数据进行预处理,然后对处理前、后的轮廓测量信号,使用小波分解与重构确定表面评定基准面并分离出粗糙度轮廓信号,如图 2(a)~2(d)所示。



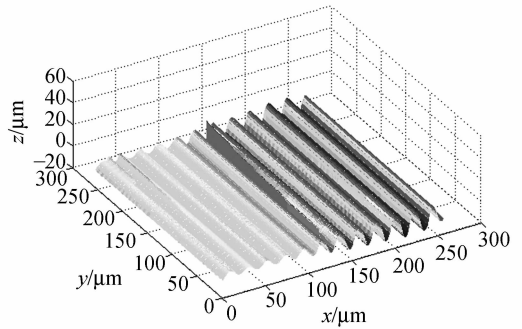
(a) 未经奇异特征处理的小波基准面  
(a) Wavelet reference surface before singularity processing



(b) 未经奇异特征处理的小波粗糙度轮廓  
(b) Roughness profile before singularity processing



(c) 奇异特征处理后的小波基准面  
(c) Wavelet reference surface after singularity processing



(d) 奇异特征处理后的小波粗糙度轮廓  
(d) Roughness profile after singularity processing

图 2 奇异特征处理前后的小波粗糙度基准及其轮廓

Fig. 2 Wavelet reference surface and roughness profile before and after singularity processing

由图 2 可看出小波奇异性检测算法对表面大奇异特征信号能进行有效的抑制。图 1(b)与图 1(d)为奇异性修正前后的表面粗糙度信号,明显可见处理前的表面有较大奇异性,奇异特征对评定表面的影响是比较大的,所以对表面奇异特征的修正是必要的。对上述表面粗糙度轮廓采用分块评定求均值法进行评定,典型参数的评定结果如表 2 所示。

表 2 表面奇异性处理前后典型粗糙度参数的小波评定结果

Tab. 2 Roughness parameters before and after singularity processing

评定参数	$S_a$	$S_z$	$S_q$	$S_{sk}$	$S_{ku}$
未处理粗糙度轮廓	3.818 9 $\mu\text{m}$	17.702 5 $\mu\text{m}$	4.421 4 $\mu\text{m}$	0.253 3	2.814 4
处理后粗糙度轮廓	3.582 3 $\mu\text{m}$	12.839 3 $\mu\text{m}$	3.999 5 $\mu\text{m}$	-0.080 1	1.301 0
相对变化	6.2%	27.47%	9.54%	131.62%	53.77%

从计算结果看,由于奇异特征的存在,奇异性处理前后评定结果有变化,且处理后结果有所减小,其中, $S_{sk}$ 和 $S_{ku}$ 变化较大, $S_z$ 次之, $S_a$ 和 $S_q$ 在10%以下。由于小波分解的可定位性,并且小波评定基准面来自对表面信号的小波分解和重构,因此小波奇异性分析预处理会直接改善小波滤波确定的基准面,从而改善评定结果,因此小波奇异性分析更加适合于小波滤波对表面轮廓结构的分离和处理。由于小波滤波的多分辨率分析特性,对表面轮廓结构的分解更加准确,因此经过奇异特性处理后的计算结果优于未经处理的评定结果。

## 参考文献:

- [1] 仇谷烽,郭培基,懈滨,等. 接触式非球面轮廓测量的数据处理模型[J]. 光学精密工程, 2007,15(4): 492-498.  
CHOU G F, GUO P J, XIE B, *et al.*. Mathematical model of contacting aspheric surface contour measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (4):492-498. (in Chinese)
- [2] 曹万鹏,陈刚,车仁生,等. 一种基于小波变换的照明无关边缘检测和模糊增强方法[J]. 光学精密工程, 2007,15(7):1143-1150.  
CAO W P, CHEN G, CHE R SH, *et al.*. An illumination-independent edge detection and fuzzy enhancement based on wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (7):1143-1150. (in Chinese)
- [3] 刁彦华,王玉田,陈国通. 基于小波变换模极大值的信号奇异性检测[J]. 河北工业科技, 2004, 21 (1):1-3.  
DIAO Y H, WANG Y T, CHEN G T. Singularity detection of signals based on wavelet transform modulus maximum [J]. *Hebei Journal of Industrial*, 2004, 21(1):1-3. (in Chinese)
- [4] 方勇华,孔超,兰天鸽,等. 应用小波变换实现光谱的噪声去除和基线校正[J]. 光学精密工程, 2006,14(6):1088-1092.  
FANG Y H, KONG CH, LAN T G, *et al.*. De-

## 6 结 论

小波奇异性分析是基于信号与噪声的奇异性的不同,将噪声的小波变换模极大值从所有的模极大值中去掉,然后重构信号,达到去噪的目的,从而可更加准确地进行粗糙度轮廓参数评定。实验中,处理后的信号中的大奇异特征成份明显减少,证明了小波奇异性分析在表面形貌测量中的有效作用。同时,小波的多分辨率分析特性具有更加准确的滤波作用,在表面形貌评定中具有重要应用价值。

- noising and baseline correction of spectrum by wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (6):1088-1092. (in Chinese)
- [5] ISO25178-2, Geometrical product specifications Surface texture; Areal -Part 2 Terms, definitions and surface texture parameters [S].
- [6] 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.  
LIU B S. *The study and realization about adaptive wavelet transforms via lifting* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. (in Chinese)
- [7] 袁保奎,郭基伟,唐国庆. 基于小波奇异性分析变压器油中氢气监测[J]. 高电压技术, 2001,27(5): 20-21.  
YUAN B K, GUO J W, TANG G Q. Analysis of online detection of hydrogen gas concentration in power transformer based on singularity detection with wavelet [J]. *High Voltage Engineering*, 2001, 27(5):20-21. (in Chinese)
- [8] 张书玲,王宏宇,李华. 小波奇异性分析用于示波信号去噪[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1998, 28(6):471-474.  
ZHANG SH L, WANG H Y, LI H. Application of wavelet singularity analysis in denoising of oscillographic signals [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 1998, 28(6):471-474. (in Chinese)

## 作者简介:



崔长彩(1972—),女,山东胶南人,工学博士,副教授,1996年于佳木斯大学获得学士学位,2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位,2008年于华中科技大学教育部制造技术国际标准研究中心博士后出站,现为国立华侨大学副教授,主要从事精密测量技术、智能算法及其应用等方面的教学与研究。E-mail: cuicbc@hotmail.com



张耕培(1984—),男,湖北荆州人,硕士研究生,2006年于长江大学获得学士学位,主要从事智能检测与控制的研究。E-mail: judgebill@126.com



张彬(1983—),男,河北保定人,硕士研究生,2006年于佳木斯大学获得学士学位,主要从事智能检测与控制的研究。E-mail: zhangbinjms@yahoo.com.cn



张倩(1986—),女,新疆伊犁人,硕士研究生,2007年于华侨大学获得学士学位,主要从事精密测量技术的研究。E-mail: zqzrylili@126.com

## ●下期预告

## 光谱成像仪 CCD 组件热分析及验证

郭亮,吴清文

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春, 130033)

某型光谱成像仪是一台集多光学通道和多探测器于一身的复杂的空间光学遥感器,其光机结构、安装方式和载荷分布均呈非对称形式,整机热控十分复杂。CCD 组件作为成像的重要组成部分,同时也是整机热控的难点,其热设计的好坏直接关系到成像的质量。本文着重讨论分析了某型光谱成像仪 CCD 组件热设计的特点,给出了相应的热设计方案,应用 IDEAS-TMG 对此组件进行了仿真分析,达到了热控设计的指标要求,最后通过试验对热设计方案进行了验证,试验结果表明:CCD 器件工作时升温速率为  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,两次试验中最高温度分别为  $33.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $26.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。