

文章编号 1004-924X(2017)02-0425-08

二维经验模态分解在工程表面形貌 误差评定中的应用

任志英¹, 高诚辉^{1*}, 罗德海¹, 林有希¹, 张世忠²

(1. 福州大学机械工程及自动化学院, 福州 350108;

2. 福建省福光股份有限公司, 福州 350004)

摘要:针对目前表面微观形貌面形误差分离方法中存在边界畸变及自适应差等缺点,提出了将具有自适应时频分辨能力的二维经验模态分解算法(bidimensional empirical mode decomposition, BEMD)应用于三维工程表面面型误差分离中,同时用 Riesz 变换构造单演信号,计算信号整体的频率特征,完成对二维经验模态分解算法的终止准则的改进,使其能严格按照 ISO4287 所规定的截止波长分离三维表面各频段形貌误差。仿真结果表明,本文新方法相比于国标 ISO 中高通滤波以及常用小波滤波,在分离三维工程粗糙表面各面型误差时,所得分离图形效果远优于传统方法所得,且各频段误差对应的三维评定参数误差均小于 5%。最后对光学镀膜元件实例进行分析,结果表明该算法能够很好地分离各形貌误差的空间信息,所得参数评定基准面相对传统方法不存在边界畸变等问题,因此该方法在实际工程表面评定应用中具有可行性。

关键词:二维经验模态分解;三维表面形貌;误差评定;终止准则;Riesz 变换

中图分类号: TH161.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172402.0425

Application of bidimensional empirical mode decomposition in error evaluation for engineering surface texture

REN Zhi-ying¹, GAO Cheng-hui^{1*}, LUO De-hai¹, LIN You-xi¹, ZHANG Shi-zhong²

(1. College of mechanical engineering and automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fu Guang Limited by Share Ltd, Fujian Province, Fuzhou 350004, China)

* Corresponding author, E-mail: gch@fzu.edu.cn

Abstract: In consideration of the disadvantages such as boundary distortion and poor adaptability in the method for microstructure surface error separation, the bidimensional empirical mode decomposition (BEMD) with adaptive time-frequency resolution capacity was put forward and applied to three-dimensional engineering surface error separation; at the same time, Riesz transform was utilized to construct monogenic signal, calculated overall frequency characteristics of the signal and improved the termination criterion for bidimensional empirical mode decomposition, thus keeping it in strict accordance with the error specified in ISO4287 for each frequency band of the 3D surface with cutoff wavelength and long separation. The simulation results show that compared with Gaussian filter in ISO and

收稿日期: 2016-08-21; **修订日期:** 2016-10-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51375094); 福建省自然科学基金资助项目(No. 2015J01195); 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金资助项目(No. SKLTKF13B02); 福州市科技局资助项目(No. 2014-G-74); 福州大学人才基金资助项目(No. XRC-1576)

commonly-used wavelet filter, this new method can achieve a far better separation effect than traditional methods in error separation for 3D engineering rough surface, and the 3D evaluation parameter errors corresponding to the error in each frequency band are all lower than 5%. Finally, an instance analysis was conducted in the optical filming elements, and the results show that the method can well separate the spatial information of each surface error, and the reference surface for parameter evaluation is free from problems such boundary distortion compared with traditional methods. Hence, the application of the method in actual engineering surface error evaluation is of great feasibility.

Key words: bidimensional empirical mode decomposition; 3D surface topography; error evaluation; termination criterion; Riesz transform

1 引言

在计量学领域,产品功能特征的评定主要取决于产品表面特征信息。而表面形貌在其横向和纵向轮廓中包含复杂的表面不平整度,主要是表面粗糙度、表面几何形状误差、以及介于两者之间的表面波纹度等误差^[1]。因此,如何准确分离获得表面形貌的各误差特征成分成为产品表面功能评定的基础和前提。传统表面形貌误差的评定中通常更多只关注表面粗糙度,实际加工中这三类误差往往同时产生,为了更好地评定表面特征形貌和表面质量,人们根据各部分误差波长特征采用不同截止波长的滤波器进行滤波分离^[2]。当前主要的滤波方法是高斯滤波和小波滤波,ISO11562^[3]采纳了用经典高斯滤波器分离表面粗糙度,其计算简单,但容易引起边界畸变。Chen 等^[4]人引入小波方法,其多分辨率多尺度的特性在某些产品和精密元件上得到了较好的应用,但小波的分解层数受分解波长和采样间距制约,缺乏自适应性^[5]。为提高自适应能力,J. C. Nunes 等^[6]人提出了二维经验模式分解方法,该方法将非线性、非平稳信号自适应地分解为一系列频率由高到低、时间特征尺度由小到大的固有模态函数,实现了分解时具有自适应多尺度的局部时频分辨能力及完全数据驱动的特性,目前在图像融合^[7]、故障诊断^[8]、图像纹理分析^[9]等方面得到了较好的应用,然而传统 BEMD 分解筛分过程的终止条件是以标准差为准则,若直接应用于三维工程表面形貌分离,则无法满足 ISO4287 所规定的以截止波长为分界点。为了更好分析 BEMD 分解信号的波长特性,引入 Riesz 变换构造二维单演信号,单演信号能够优秀的反应信号局

部特征,尤其是局部相位包含了大量信号的频谱信息^[10]。因此,本文通过 Riesz 变换构造单演信号,以计算信号整体的频率特征,实现对传统 BEMD 分解算法的终止准则的改进,使其严格按照国标分离工程表面各频段形貌误差,对比高斯滤波和小波滤波两种方法,验证改进的 BEMD 算法的准确性和优越性,为表面几何形貌误差的分离提供了一种新的方法。

2 表面形貌的数学模型与参数表征

2.1 数学建模

表面几何结构的微观形貌是表面粗糙度、表面波纹度和表面形状误差等多种成分的总和。作为信号,各部分的频率(波长)特征不同,表面粗糙度属于高频信号,表面形状误差属于低频信号,相对而言表面波纹度属于中频信号。用 $I(x, y)$ 表示采集的表面形貌数据, $f(x, y)$ 表示低频分量的形状误差信号, $w(x, y)$ 表示中频分量的波纹度信号, $r(x, y)$ 表示高频分量的粗糙度信号,建立数学模型^[11]:

$$I(x, y) = f(x, y) + w(x, y) + r(x, y). \quad (1)$$

其中各频段误差分量的划分由波长确定,频率和波长互为倒数,ISO4287 通过设定截止波长

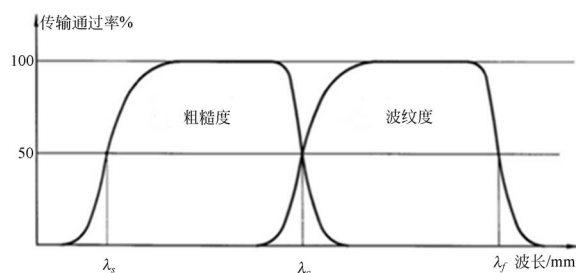


图 1 表面形貌截止波长划分图

Fig. 1 Cutoff wavelength of surface topography

对表面形貌进行滤波^[12],如图 1 所示。

其中 $\lambda_s, \lambda_c, \lambda_f$ 分别为分离表面粗糙度,表面波纹度和几何形状误差的截止波长,ISO4287 还推荐了相应的 $\lambda_s, \lambda_c, \lambda_f$ 值及测头直径 f_{tip} ,如表 1 所示。

表 1 截止波长
Tab.1 Cutoff wavelength

λ_c/mm	λ_f/mm	λ_c/λ_s	$r_{tip}/\mu\text{m}$
0.08		30	2
0.25	2.5	100	
0.8		300	5 or 2
2.5	8		
8	25		10,5 or 2

2.2 表面形貌误差参数表征

由于三维表征比二维表征更为复杂,出现了大量的表征参数,使得三维表征参数体系更为繁杂。参考目前国内外使用最普遍的 ISO25178-2 中 Areal 参数体系^[13],分别选取不同的参数对表面形貌各频段误差分量进行表征。

对高频分量的粗糙度,考虑到与传统检测方法的衔接,采用了均方根 S_q 参数进行表征。均方根偏差定义为采样区域内,表面相对于基准面的各点偏离的均方根值,更能准确反应粗糙度的综合情况:

$$S_q = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r^2(x_i, y_j), \quad (2)$$

式中: $r(x, y)$ 代表高频分量粗糙度偏离基准面的幅值。

对于中频分量的表面波纹度,采用峭度 S_{ku} 参数进行表征, S_{ku} 表示形貌轮廓曲线变化的尖峭程度,反映了轮廓高 S_{ku} 度分布曲线偏离高斯分布的严重程度^[14]。当表面轮廓偏距符合高斯随机分布时候,其表面的峭度为 3, $S_{ku} > 3$ 时形貌分布集中在中心,称为尖峰态,而一个表面幅值分布平缓的表面峭度 $S_{ku} < 3$,称为低峰态:

$$S_{ku} = \frac{1}{W_a} \left[\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega^4(x_i, y_j) \right], \quad (3)$$

式中: W_a 代表波纹度分量的均方根, $\omega(x, y)$ 代表波纹度分量偏离基准面的幅值。

对低频分量的几何形状误差,其属于实际表面总体形状相对理想表面形状的偏移,一般将表面形貌滤波后的残留误差通过重构作为评定参数的实际基准面使用,因此可以将其与理想设计基

准面进行对比,求其最大重构误差来表征几何形状误差:

$$\delta_i = \max(f(x, y) - I'(x, y)), \quad (4)$$

式中: $I'(x, y)$ 代表理想设计基准面幅值。

3 二维经验模态滤波算法

3.1 传统二维经验模态分解

传统二维经验模态分解算法在二维信号的处理上具有多尺度多分辨率的优势,多数用于图像分析和纹理分析。二维经验模态分解是将信号自适应分解成一系列具备不同尺度特征的二维固有模态函数(BIMF)以及表示数据整体趋势的残余项。设原始采样数据为 $I(x, y)$, x 表示行采样点, y 表示列采样点,则传统 BEMD 算法主要步骤如下所示:

①外部初始化余量 $r_0(x, y) = I(x, y), i = 1$;

②内部初始化序列 $h_0(x, y) = r_{i-1}(x, y), j = 1$;

③提取 $h_{j-1}(x_1, y_1)$ 局部最大值和局部最小值;分别对局部极大值和局部最小值进行曲面拟合,形成三维数据的上包络面 $e_{\max}(x, y)$ 和下包络面 $e_{\min}(x, y)$,并计算上下包络面的均值:

$$m_{j-1}(x, y) = \frac{[e_{\max}(x, y) + e_{\min}(x, y)]}{2}. \quad (4)$$

④减去均值信号,得到新序列:

$$h_j(x, y) = h_{j-1}(x, y) - m_{j-1}(x, y). \quad (5)$$

⑤计算循环终止条件;标准差:

$$SD = \sum \frac{|h_{j-1}(x, y) - h_j(x, y)|^2}{h_j^2(x, y)}. \quad (6)$$

⑥若 SD 小于给定的阈值(默认 0.2),则有第 i 个固有模态函数 $BIMF_i = h_j(x, y)$,并更新余量

$$r_i(x, y) = r_{i-1}(x, y) - BIMF_i(x, y). \quad (7)$$

否则 $j = j + 1$,转到②重新计算;

以上分解的结果,原始采样数据就可以得到一系列 BIMF 分量和一个余量数据,而且满足:

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^n BIMF_i(x, y) + r_n(x, y). \quad (8)$$

3.2 Riesz 变换

为了更好的分离表面形貌各频段误差,必须先确定信号的频率特性。在一维经验模态分解中,用一维的 Hilbert 变换来构造输入信号对应的解析信号进而可以得到输入信号的频谱信息,

同理要得到二维经验模态分解过程的频率特征需要先构造对应信号的二维解析信号,但在处理二维信号中,二维 Hilbert 变换来构造的二维解析函数却缺乏多方向性的延伸和拓展,Michael. Felsberg 等^[10]人基于 Riesz 变换和向量场理论提出了一种满足各向同性的新二维解析信号,并将其命名为单演信号。单演信号基于 Riesz 变换,是一维 Hilbert 变换在二维欧式空间的向量值的扩展,Riesz 变换的空域表达为:

$$(R_x(x, y), R_y(x, y)) = \left(-\frac{x}{2\pi(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}}, -\frac{y}{2\pi(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \right). \quad (9)$$

对于二维输入信号 $I(x, y)$,其单演信号定义为:

$$I_M(x, y) = (I, R_x * , R_y * D), \quad (10)$$

其中: * 表示卷积运算。于是二维解析信号频谱信息的局部振幅 l_A ,局部相位 l_p 就可以通过以下公式得到:

$$l_A = |I_M(x, y)| = \sqrt{I^2 + R_x^2\{i\} + R_y^2\{i\}}, \quad (11)$$

$$l_p = \text{atan2}(\sqrt{R_x^2\{i\} + R_y^2\{i\}}, I), p \in [0, \pi) \quad (12)$$

通过进一步计算局部相位,得到有物理意义的局部频率 l_f :

$$l_f = \sqrt{\left(\frac{\partial l_p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial l_p}{\partial y}\right)^2}. \quad (13)$$

3.3 改进的二维经验模态算法

从传统 BEMD 分解算法流程可以看出,如果采用传统的 BEMD 算法分解采样的三维表面形貌数据,分解后的各阶 BIMF 是通过标准差 SD 作为阈值筛选出来的,并不是严格按照表 1 标准所要求的截止波长滤波所得。利用 Riesz 变换求出局部频率,并换算成波长,将其与形貌分离的截止波长标准进行对比判定,替代传统算法筛选终止准则,使之能适用于表面形貌不同频段误差的准确分离,算法主要流程如图 2 所示。最后可以就得到表示频段误差的二维固有模态函数 BIMF 及残余形貌 $r_n(x, y)$ 。

4 仿真与实测结果

4.1 仿真数据分析

为了说明改进的二维经验模态算法能较好的应用到三维表面形貌的分离,选用采样点为 64 ×

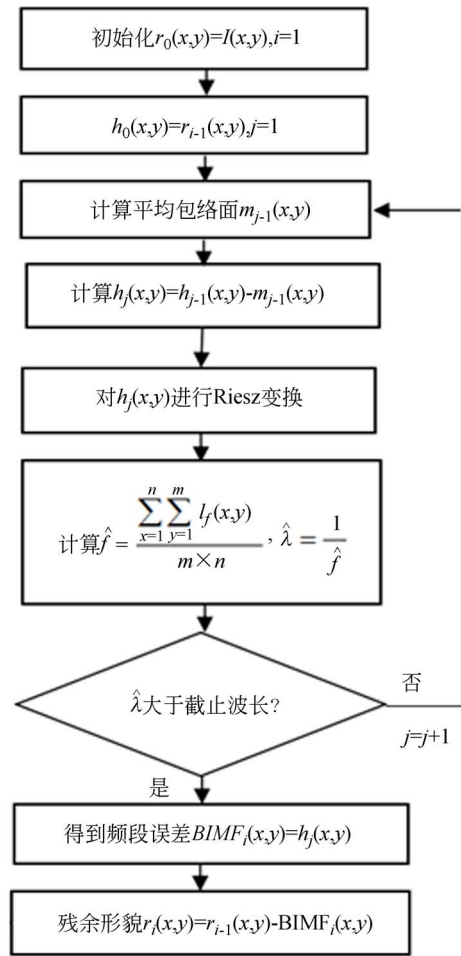


图 2 改进的二维经验模态分解流程图
Fig. 2 Flow chart of modified BEMD

64 的随机 peaks 函数作为基准表面进行仿真实验,其原始基准面形貌如图 3 所示,并在原始形貌上加入平整分布的随机误差,其波纹度 $S_{ku} = 2.938 2$,粗糙度 $S_q = 0.206 0 \mu\text{m}$,加入随机误差后的表面形貌如图 4 所示。

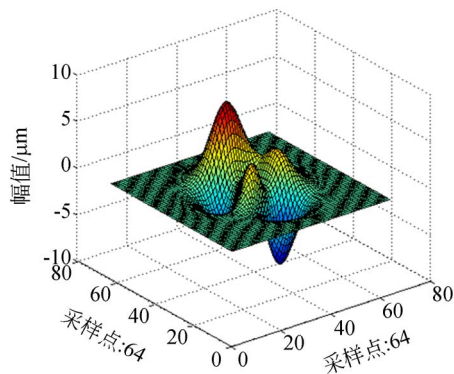


图 3 仿真基准面
Fig. 3 Simulation datum

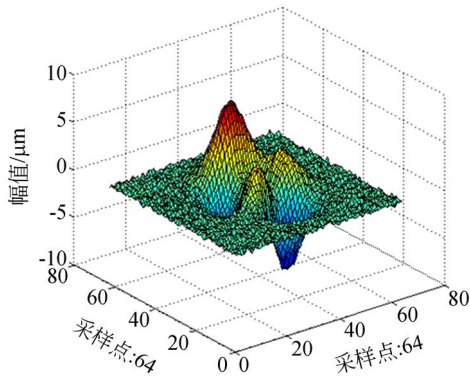
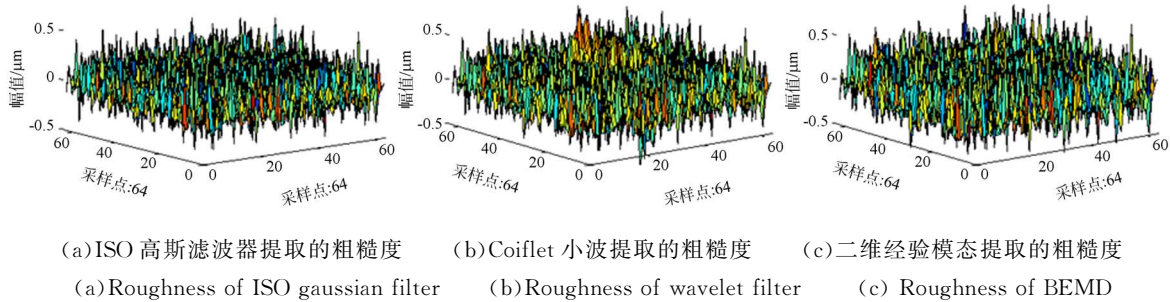


图 4 加入随机误差的表面
Fig.4 Surface of random error

实验选用表 1 中 $\lambda_i = 2.5 \text{ mm}$, $\lambda_c = 0.08 \text{ mm}$ 的滤波器截止作为标准,同时使用高斯滤波,小波滤波及 BEMD 分解三种算法分别对图 4 仿真形貌进行分离,得到其粗糙度、波纹度及重构的基准面如图 5~7 所示,从粗糙度对比图中可以看出粗糙度分离结果大致相同,而分离得到波纹度和基

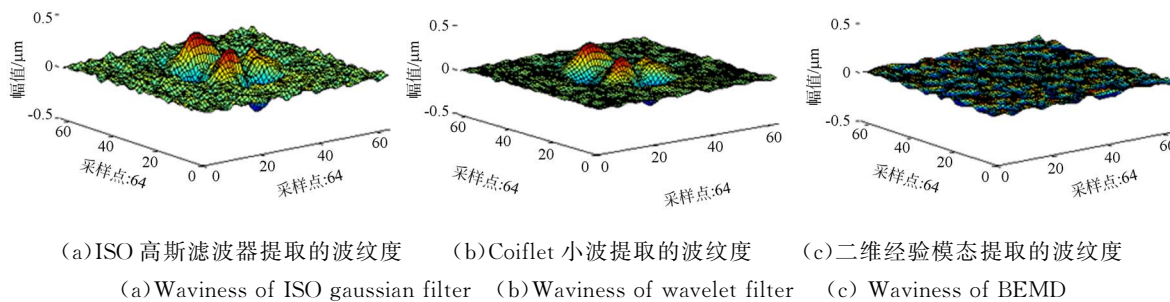
准面几何形状有较大的差异。高斯滤波分离在截止波长处只有 50% 的通过率,因此得到的波纹度面图 6(a)受基准形貌的几何形状影响较大,并有粗糙度不平整的残留,其重构的基准面图 7(a)对比仿真基准面图 3 可见在四周边界处有较大的起伏畸变现象,表明其分离的几何形状误差较大;小波滤波具有不错的分辨率和多尺度特性,从图 6(b)可见小波滤波提取的波纹度面较好的反应了部分误差的随机性,但因为小波算法的每次分解都只能进行二分分解,而波纹度与几何形状误差分离过程的截止波长 λ_f 并不是 2 的整数幂,在重构中采用了近似值代替,导致其中心处仍然聚集残留几何形状形貌;另外小波分解重构的基准面图 7(b)其边界处仍有小部分起伏不平整;而 BEMD 分解提取的波纹度面更好的反应了随机误差的平整分布情况,其重构的基准面也更接近仿真基准面。



(a)ISO 高斯滤波器提取的粗糙度 (b)Coiflet 小波提取的粗糙度 (c)二维经验模态提取的粗糙度
(a)Roughness of ISO gaussian filter (b)Roughness of wavelet filter (c) Roughness of BEMD

图 5 仿真表面粗糙度

Fig.5 Roughness of simulations surface



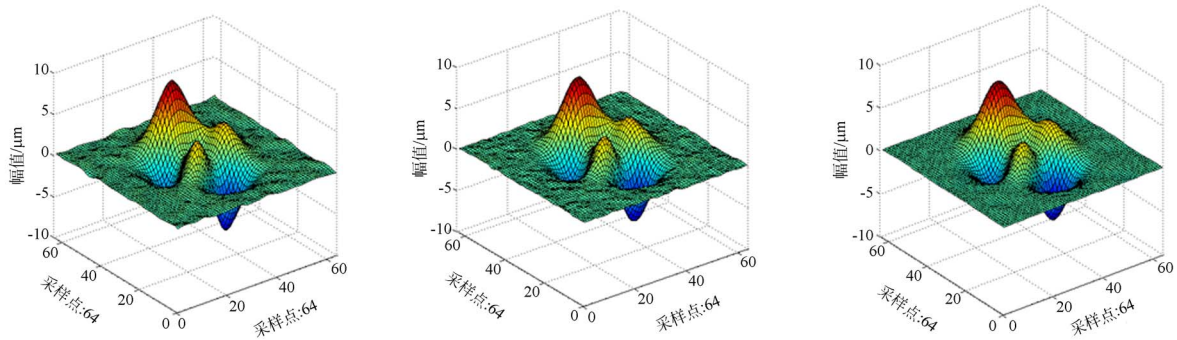
(a)ISO 高斯滤波器提取的波纹度 (b)Coiflet 小波提取的波纹度 (c)二维经验模态提取的波纹度
(a)Waviness of ISO gaussian filter (b)Waviness of wavelet filter (c) Waviness of BEMD

图 6 仿真表面波纹度

Fig.6 Waviness of simulations surface

三维图形具有较好的视觉效果,但是难于定量的描述,进一步对形状误差,波纹度和粗糙度的几何形貌进行参数量化表征,得到表 2 数据,从表中各种方法所得的参数评定结果与原始仿真形貌数据进行对比可以看出,BEMD 的几何形状重构

误差最小,波纹度的峭度以及粗糙度的均方根值都更接近原始仿真形貌的真实值,波纹度和粗糙度的评定误差均小于 5%,由此可见,BEMD 算法应用于非平稳三维表面几何形貌误差分离具有一定优越性。



(a)ISO 高斯滤波器重构的基准面 (b)Coiflet 小波重构的基准面 (c)二维经验模态重构的基准面
 (a)Datum plane of ISO gaussian filter (b)Datum plane of wavelet filter (c) Datum plane of BEMD

图 7 仿真表面的重构基准面

Fig. 7 Datum plane of simulation surface

表 2 仿真表面参数评定

Tab. 2 Characterization parameters of simulation surface

参数名称	几何形状误差最大 几何重构误差/ μm	波纹度峭度/ μm	粗糙度均方根/ μm
仿真形貌	0.0	2.938 2	0.206 0
ISO 高斯滤波	0.715 6	5.086 9(73.13%)	0.222 6(8.05%)
小波滤波	0.390 3	4.488 1(52.75%)	0.237 9(15.49%)
BEMD	0.331 7	3.063 8(4.27%)	0.214 4(4.08%)

4.2 实测光学镀膜元件表面形貌误差分析

为了进一步验证改进的 BEMD 算法能应用于三维表面几何结构的微观形貌分析,采用美国 KLA-Tencor 公司的 MicroXam -100 型光学轮廓仪扫描的三维光学镀膜元件表面。MicroXam-100 型光学轮廓仪是一种全功能非接触白光移相干涉仪,其最小采样间距为 $0.078 \mu\text{m}$,测量最大量程为 100 mm ,分辨率为 0.01 nm 。现进行最小采样间距,得到的整体微观形貌如图 9 所示。

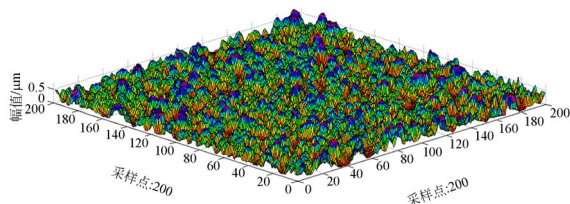
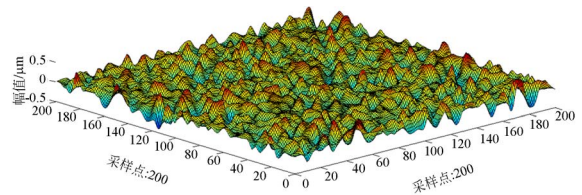


图 9 光学镀膜元件表面样品三维图

Fig. 9 Three-dimensional figure of optical coating samples

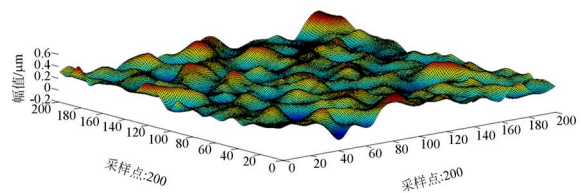
选用表 1 中 $\lambda_c = 0.08 \text{ mm}$, $\lambda_t = 2.5 \text{ mm}$ 滤波器截止波长作为标准,运用 BEMD 算法对实测数据进行滤波,得到各频段误差如图 10 所示。

从图 10(a)可得出,经过滤波分离后镀膜后三维光学元件表面的粗糙度表面分布较为平均,测得粗糙度 $S_q = 0.301 4 \mu\text{m}$,镀膜效果好,图 10 (b)镀膜元件的波纹度面呈周期性起伏,测得波纹度 $S_{ku} = 3.053 4$;图 10(c)几何形状误差面中可以观察到表面平整且光滑,没有明显形变。



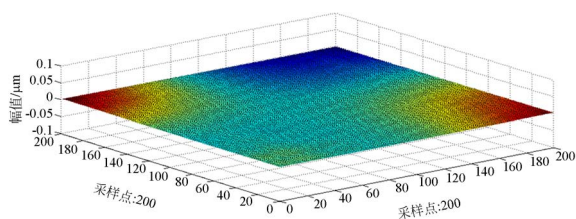
(a) 镀膜元件表面粗糙度

(a)Roughness of optical coating samples



(b) 镀膜元件表面波纹度

(b)Waviness of optical coating samples



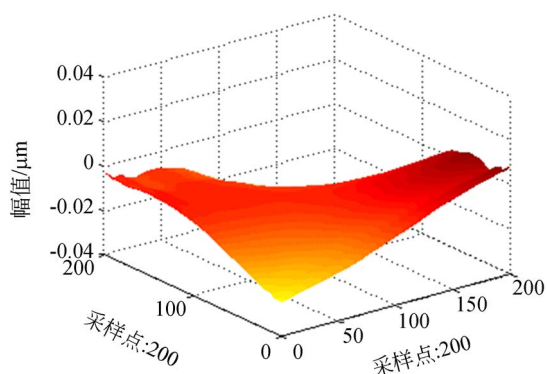
(c)镀膜元件形状误差

(c) Shape error of optical coating samples

图 10 光学镀膜元件表面各频段误差

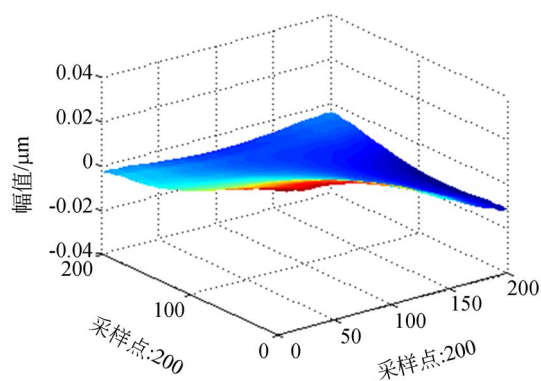
Fig. 10 Frequency error of optical coating samples

针对实测数据来说,其理想的标准基准面是未知的,通过参数量化比较各类算法存在局限性,为了进一步说明几种算法在实际工程使用中的区



(a)ISO 高斯滤波所得实测基准面

(a) Datum plane of ISO gaussian filter

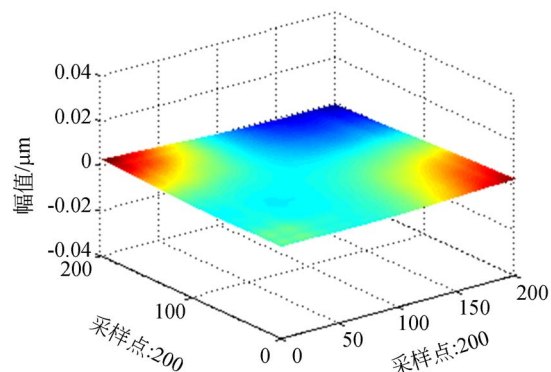


(b)coiflet 小波所得实测基准面

(b) Datum plane of wavelet filter

参考文献:

- [1] BORYCZKO A. Effect of waviness and roughness components on transverse profiles of turned surfaces [J]. *Measurement*, 2013,46(1): 688-696.
- [2] RAJA J B, MURALIKRISHNAN S F. Recent ad-



(c)二维经验模态所得实测基准面

(c) Datum plane of BEMD

图 11 光学镀膜元件重构的基准表面

Fig. 11 Datum plane of optical coating samples

别,将三种算法分别分解镀膜元件数据,并对参数评定基准面在同一微观尺度下进行比较,如图 11 所示,可见高斯滤波后的基准面在微观尺度下 4 个边界开始出现较大的畸变,影响后续参数评定的准确性,小波滤波得到的基准面方向性较好,但仍有一边出现了边界畸变,而 BEMD 分解所得的基准面保持相对平坦和光滑,有利于评定要求平整镀膜的光学元件。

5 结 论

本文通过以上理论分析以及实例运用得出以下结论:通过结合具有频谱信号的 Riesz 变换,改进终止准则的 BEMD 算法,能够严格适用于表面各频段误差的精确分解;实验仿真对比高斯滤波和小波滤波,结果表明其分解后的重构误差最小,波纹度和粗糙度评定参数误差均小于 5%,将 BEMD 算法应用于三维非平稳形貌的误差分离具有一定的有效性和优越性;BEMD 对于实际光学元件镀膜数据的各频段误差提取,不仅可以有效提取各频段误差的空间信息,而且分离的基准面平坦光滑,有利于后续参数评定。

vances in separation of roughness, waviness and form[J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(2): 222-235.

- [3] REN ZH Y, GAO CH H, SHEN D. 3D profile filter algorithm based on parallel generalized B-spline approximating Gaussian [J]. *Chinese Journal of*

- Mechanical Engineering*, 2015, 1(28): 148-154
- [4] CHEN Q, YANG S, LI Z. Surface roughness evaluation by using wavelets analysis [J]. *Precision Engineering*, 1999, 23(3): 209-212.
- [5] 任志英, 高诚辉, 林建兴, 等. 基于双树复小波变换的三维粗糙表面评定方法研究[J]. *中国机械工程*, 2014 (13): 1795-1799.
REN ZH Y, GAO CH H, LIN J X, *et al.*. Evaluation method of three - dimensional rough surface based on dual-tree complex wavelet transform methods [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014 (13): 1795-1799. (in Chinese)
- [6] NUNES J C. Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(12): 1019-1026.
- [7] 冯孔森. 基于改进的二维经验模态分解的医学图像融合[D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
FENG K SH. *Medical Image Fusion Based on Improved Bidimensional Empirical Mode Decomposition* [D]. Jiling: Jiling University, 2012. (in Chinese)
- [8] 周义. 快速二维经验模态分解和相位追踪方法及其在导波无损检测中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
ZHOU Y. *Fast bi-dimensional Empirical Mode Decomposition and Phase Tracking Method and Their Applications in the Guided-wave-based Non-destructive Testing* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)
- [9] 沈滨, 崔峰, 彭思龙. 二维 EMD 的纹理分析及图像瞬时频率估计[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(10): 205-212.
SHEN B, CUI F, PENG S L. Bidimensional EMD for Texture Analysis and Estimation of the Instantaneous Frequencies of an Image [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(10): 205-212. (in Chinese)
- [10] FELSBERT M, SOMMER G. The monogenic signal [J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2001, 49(2): 3136-3144.
- [11] 任志英, 高诚辉, 黄健萌. 基于 L^∞ 回归稳健拟合的气缸套内表面形貌评定[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(17): 99-106.
REN ZH Y, GAO CH H, HUANG J M. Based on L^∞ regression with robust fitting algorithm for surface topography evaluation of the inner wall of the cylinder jackets [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50 (17): 99-106. (in Chinese)
- [12] ISO 4287. Geometrical product specifications (GPS) - Surface Texture; Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters; International Organization for Standardization[S]. 1997.
- [13] ISO 25178-2. Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture; Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters; International Organization for Standardization[S]. 2012.
- [14] 张志航. 基于小波分析的微细电火花切割表面三维粗糙度评定研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
ZHANG ZH H. *Research on Three-dimensional Roughness Assessment of MWEDM Surface Based on Wavelet Analysis* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)

作者简介:



任志英(1980—),女,浙江嵊州人,博士,副教授,2015年于福州大学获得博士学位,现为福州大学机械工程学院硕士生导师,主要从事摩擦学中表面表征方法研究。E-mail: renzyrose@126.com



高诚辉(1953—),男,福建福清人,博士,教授;1990年在机械部机械科学研究院获得博士学位。现为福州大学副校长,机械工程及自动化学院博士生导师,主要从事摩擦学研究,数字化设计等。E-mail: gch@fzu.edu.cn