

DOI : 10.3901/JME.2013.01.164

# 基于经验模态分解的精密光学表面 中频误差识别方法\*

毕 果 郭隐彪 杨 峰

(厦门大学物理与机电工程学院 厦门 361005)

**摘要：**对于高端光学元件，除限制低频面形误差和高频表面粗糙度之外，需要严格控制中频误差，以确保其使用性能。目前国际上广泛采用功率谱密度(Power spectral density, PSD)曲线评价中频误差，该方法以 Fourier 变换为基础，在全局水平上给出中频误差的综合评价。但是，光学元件磨削与抛光工艺过程中，局部波动和变周期波动是常见的中频误差存在形式。为更加准确地评价中频误差，指导补偿加工，需要识别中频误差频率及位置信息。鉴于此，从光学表面属于非平稳空间信号的角度出发，提出基于经验模态分解的精密光学表面中频误差提取和识别方法，对光学表面拟合残差进行经验模态分解，得到一系列固有模态函数，根据各阶固有模态函数特征，识别不同空间位置存在的表面误差和波动频率，并将其合成得到光学表面的中频和高频误差。仿真与实际检测结果分析证实该方法可以有效识别中频误差特征及其方位。

**关键词：**光学表面 中频误差 经验模态分解 误差分离

**中图分类号：** TG58

## Mid-spatial Frequency Error Identification of Precision Optical Surface Based on Empirical Mode Decomposition

BI Guo GUO Yinbiao YANG Feng

(School of Physical and Mechanical &amp; Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

**Abstract :** Mid-spatial frequency surface error of optical lens is crucial to the performance of high-energy laser systems and high-resolution optical systems. Power spectrum density (PSD) is generally employed to evaluate mid-spatial frequency error of optical surface. PSD is based on Fourier transform which averages local characters to the whole space. And it gives a whole evaluation of mid-spatial frequency error of optical surface. It not only weakens characters but also loses location information of surface error. Abrasive processing, such as grinding and polishing, always introduces local waviness with time-varying frequency on optical lens surface, PSD fails for this situation. A new error separation method, which is based on empirical mode decomposition, is introduced in this paper in order to more accurately evaluate mid-spatial frequency error and guide compensation machining. Curve of optical surface is preliminary fitted and the difference between the origin data and the fitting curve is decomposed to a series of intrinsic mode functions (IMFs). Local waviness characters of optical lens surface and its frequency can be recognized from each IMF and the corresponding instantaneous frequency plot. All IMFs are divided into high-frequency group and mid-spatial frequency group by average of instantaneous frequency of each IMF considering with IMF characters. IMFs in the same group are added to acquire high-frequency error or mid-spatial frequency error of optical surface. The simulation and experimental results of optical surface with different machining methods are employed to validate the effectiveness and correctness of the method.

**Key words :** Optical surface Mid-spatial frequency error Empirical mode decomposition Error separation

### 0 前言

国际上把光学元件机械加工的几何误差分为

三类，几何形状误差、表面粗糙度误差和介于两者之间的波纹度误差，在频域上分别对应为低频带、高频带和中频带。普通光学元件表面质量主要关注低频面形误差和高频表面粗糙度，利用 PV 值、RMS 值等传统光学指标进行评价<sup>[1-3]</sup>。光学元件的中频误差会导致的光束高频调制和非线性增益，将造成光

\* 国家自然科学基金(51075343)和福建省自然科学基金(2012J05098)资助项目。20120412 收到初稿，20121116 收到修改稿

学元件的丝状破坏和降低光束的可聚焦功率,对极紫外或新兴的X射线光学而言,中频段误差产生的小角度散射会极大地降低光学系统的分辨率<sup>[4]</sup>。因此,强激光光学系统以及天体望远镜等高分辨率观测系统要求对光学元件波前质量进行全空间频段的控制<sup>[5]</sup>。

目前,国际上广泛采用美国劳伦斯·利弗莫尔实验室提出的功率谱密度(Power spectral density, PSD)曲线评价元件的中频误差<sup>[6-7]</sup>,利用光学表面数据 Fourier 变换得出光学元件表面中频误差的 PSD 曲线,通过与特征曲线对比判断误差是否合格。该方法对光学元件的中频误差提出综合的评价。KHAN 等<sup>[8]</sup>尝试利用 PSD 分析单点金刚石切削铝材的表面数据,区分不同振源对表面质量的影响,指导过程参数优化。许乔等<sup>[9]</sup>对惯性约束聚变激光驱动器的典型光学元件进行了波前功率谱密度的检测和分析,定量地给出了光学元件制造误差在空间频段的分布,从而系统分析了元件误差扰动对光束质量的影响。程灏波等<sup>[10]</sup>采用功率谱密度和残余误差两种方法评价磁流变抛光非球面元件表面的中频误差,由此建立消除表面残余误差的磁流变抛光工艺规范,制造出一块面形精度达到  $\lambda/30(\lambda=0.6328\ \mu\text{m})$ ,残余误差为  $3\lambda/1\ 000$  的抛物面光学反射镜。刘耀红等<sup>[11]</sup>用原子力显微镜对不同工艺下获得的超光滑反射镜基片进行了功率谱密度检测,并对结果进行分析,以指导光学元件加工。

数控小工具抛光是非球面光学元件广泛采用的超精密加工方式,用一个尺寸比被加工零件小得多的抛光模,在计算机控制下,以一定的路线、速度和压力抛光元件表面,改变任何一个区域的抛光时间或压力,可以精确地获得要求的材料去除量。这种加工方式使得在小工具停留时间长的区域其中频误差含量较大,停留时间短或不停留的区域,中频误差含量相对较小,从而造成光学表面各频段误差分布不均匀的现象普遍存在<sup>[12-13]</sup>。鉴于光学元件抛光加工的特点,现有 PSD 曲线以及高斯滤波器等经典滤波手段无法实现中频误差频率及位置的精确识别。从元件表面属于空间非平稳信号的角度出发,徐建程等<sup>[14]</sup>尝试利用 Wigner 分布函数评价光学元件中频误差,识别局部小尺度波前畸变的空间频率和空间位置,不仅判断光学元件的中频误差是否满足惯性约束聚变系统要求,还能确定不满足要求的特定区域,从而有效指导光学元件返修。

本文提出基于经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)的光学元件中频误差提取和识别技术,通过对光学表面拟合残差进行 EMD 处理,

得到一系列固有模态函数(Intrinsic mode functions, IMFs),根据各阶 IMF 特征,识别不同空间位置存在的表面误差和波动频率,并将其合成得到光学表面的中、高频误差。精磨和抛光光学元件检测结果证实该方法可以有效识别中频误差特征及其方位。

## 1 光学表面形貌检测试验

### 1.1 试验设备

如图 1 所示,利用泰勒霍普森公司的 PGI-1240 非球面测量系统对抛光的球面以及精磨之后的非轴对称非球面光学元件表面进行检测。采用接触式检测方式,使用 60 mm 长测杆配套  $2\ \mu\text{m}$  锥形金刚石测头测量光学元件表面曲线,扫描速度为  $0.25\ \text{mm/s}$ ,测量量程为  $12.5\ \text{mm}$ ,分辨率为  $0.8\ \text{nm}$ 。

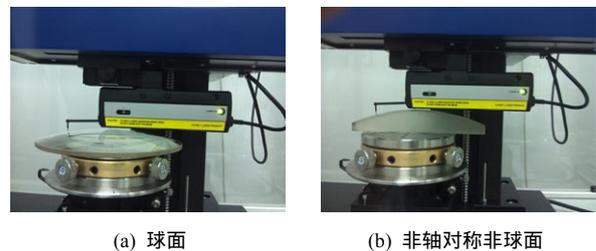


图 1 试验设备及光学元件

### 1.2 试验规划

对光学球面子午线、非轴对称非球面沿加工轨迹和垂直加工轨迹方向分别进行测量,测量参数如表 1 所示,面形曲线如图 2 所示。

表 1 测量参数

|             | 采样间隔 $\Delta x/\mu\text{m}$ | 扫描长度 $x/\text{mm}$ |
|-------------|-----------------------------|--------------------|
| 球面子午线       | 1.00                        | 120                |
| 非球面沿加工轨迹方向  | 1.00                        | 120                |
| 非球面垂直加工轨迹方向 | 0.25                        | 15                 |

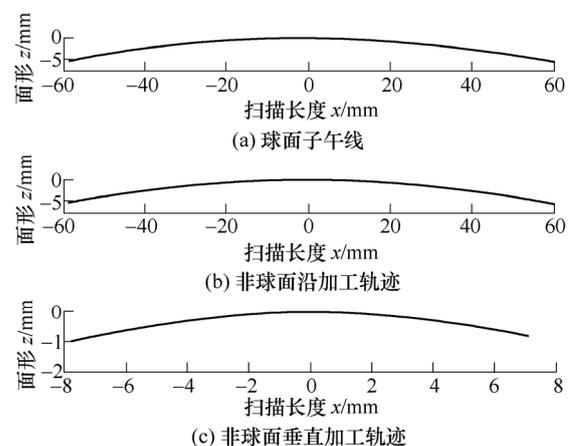


图 2 光学元件检测曲线

### 1.3 光学元件曲线拟合

球面方程如下

$$z = -R_x + \sqrt{R_x^2 - x^2} \quad (1)$$

式中  $R_x$  —— 球面半径

$x$  —— 子午线方向坐标

$z$  —— 测量点高度坐标

非轴对称非球面一般理论方程为

$$z(x, y) = -R_x + \sqrt{R_x^2 - x^2} + \frac{C_s y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + e)C_s^2 y^2}} \quad (2)$$

$$C_s = 1 / \left( -R_y + \sum_{i=1}^6 a_i x^{2i} \right)$$

式中  $R_x, R_y$  —— 非球面主轴、副轴基础半径

$e$  —— 非球面系数

$a_i$  —— 非球面副轴系数

$x, y$  —— 长、短轴方向坐标

根据式(1)和式(2)球面和非球面通用方程,采用 Levenberg-Marquart 迭代法对光学元件检测得到的离散数据  $F(x)$  进行非线性最小二乘拟合,拟合曲线和残差分别用  $c_0(x)$  和  $s(x)$  表示

$$s(x) = F(x) - c_0(x) \quad (3)$$

## 2 光学表面误差分离技术

### 2.1 EMD 基本过程

EMD 方法是 HUANG 等<sup>[15]</sup>于 1998 年提出的非平稳信号处理方法,直接根据信号局部特征进行自适应信号分解。可以将复杂的信号分解成一系列 IMF。函数成为 IMF 的条件如下所述<sup>[15]</sup>。

(1) 信号过零点与极点数相等或至多相差 1 个。

(2) 由局部极大值点确定的上包络线和由局部极小值点确定的下包络线的均值都为零,即信号关于时间轴局部对称。

对任一实信号  $s(x)$  进行 EMD 的基本流程如图 3 所示,具体步骤如下<sup>[15]</sup>。

(1) 找到  $s(x)$  所有极大值点和极小值点,利用三次样条拟合得到  $s(x)$  的上、下包络线  $s_{\max}(x)$  和  $s_{\min}(x)$ ,并计算它们的平均值曲线

$$m_{11}(x) = [s_{\max}(x) + s_{\min}(x)] / 2 \quad (4)$$

在  $s(x)$  中减去  $m_{11}(x)$  得  $h_{11}(x)$

$$h_{11}(x) = s(x) - m_{11}(x) \quad (5)$$

如果  $h_{11}(x)$  不满足 IMF 的条件,将  $h_{11}(x)$  代替原信

号  $s(x)$  重复上面的步骤得到

$$h_{1k}(x) = h_{1(k-1)}(x) - m_{1k}(x) \quad (6)$$

式中,  $k \geq 2$ ,直到  $h_{1k}(x)$  满足 IMF 条件,称此过程为 IMF 筛选,由此从原始信号  $s(x)$  中分解出一阶 IMF,记作

$$c_1(x) = h_{1k}(x) \quad (7)$$

(2) 从原始信号  $s(x)$  中减去  $c_1(x)$  得到一阶剩余信号

$$r_1(x) = s(x) - c_1(x) \quad (8)$$

将  $r_1(x)$  代替原信号  $s(x)$  重复步骤(1),依次得到 2 阶 IMF,直到  $n$  阶 IMF 和剩余信号  $r_n(x)$ ,且  $r_n(x)$  为单调函数,则原始信号可以表示成 IMF 和剩余信号之和的形式

$$s(x) = \sum_{i=1}^n c_i(x) + r_n(x) \quad (9)$$

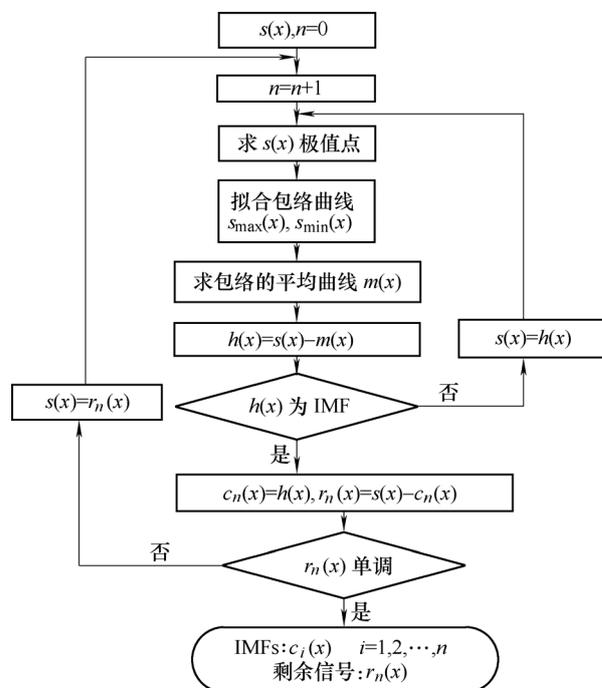


图 3 EMD 基本流程

### 2.2 IMF 的瞬时频率

EMD 将复杂信号分解成一系列 IMF,IMF 是单分量信号,其瞬时频率具有实际物理意义<sup>[15]</sup>。对于第  $i$  阶 IMF  $c_i(x)$ ,其 Hilbert 变换  $\hat{c}_i(x)$  为

$$\hat{c}_i(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(q)}{x - q} dq = c_i(x) \frac{1}{\pi x} \quad (10)$$

$c_i(x)$  的解析信号为

$$\begin{aligned} \zeta_i(x) &= c_i(x) + j\hat{c}_i(x) = A_i(x)\exp(j\varphi_i(x)) \\ A_i(x) &= \sqrt{c_i^2(x) + \hat{c}_i^2(x)} \\ \varphi_i(x) &= \arctan \frac{c_i(x)}{\hat{c}_i(x)} \end{aligned} \quad (11)$$

则第  $i$  阶 IMF  $c_i(x)$  的瞬时频率

$$f_i(x) = \varphi'(x)/(2\pi) = \frac{d\varphi(x)}{dx} / (2\pi) \quad (12)$$

瞬时频率  $f_i(x)$  的平均值

$$\bar{f}_i = \langle f_i(x) \rangle_x \quad (13)$$

式中,符号  $\langle \cdot \rangle_x$  表示对所有  $x$  求均值。则第  $i$  阶 IMF 的平均波长

$$\bar{\lambda}_i = 1/\bar{f}_i \quad (14)$$

### 2.3 光学表面误差分解

利用 EMD 将光学表面进行误差分解步骤如下所述。

(1) 首先根据光学表面类型,利用通用公式对其进行面形曲线  $F(x)$  进行拟合,得到拟合曲线  $c_0(x)$  和残差  $s(x)$ 。

(2) EMD 残差  $s(x)$  得到各阶 IMF  $c_i(x)$ 。

(3) 计算 IMF 瞬时频率  $f_i(x)$  和平均波长  $\bar{\lambda}_i$ 。

(4) 按照式(15)所示的准则,根据平均波长将各阶 IMF 分为中频和低频组,各组内叠加得到光学表面高频和中频误差;剩余信号  $r_n(x)$  与拟合面形  $c_0(x)$  合成得到低频误差。IMF 分组准则参考美国劳伦斯·利弗莫尔实验室在研制 NIF 过程中对空间波长的划分<sup>[16-17]</sup>。

$$\begin{cases} \bar{\lambda}_i < 0.12 \text{ mm} & \text{高频} \\ \bar{\lambda}_i \geq 0.12 \text{ mm} & \text{中频} \end{cases} \quad (15)$$

## 3 数据分析结果

### 3.1 局部波动识别仿真

图4所示为存在局部振纹和白噪声干扰的平面轨迹仿真,对其进行EMD得到11阶IMF,选择有代表性的3~6阶IMF及其瞬时频率如图5所示。第3阶IMF为高频IMF,无显著特征,1、2阶IMF与其类似,因此图谱省略。7~11阶IMF为低频小能量波动,波动幅值相对其他IMF可忽略,且无显著特征,因此图谱也省略。第4阶IMF在5mm附近出现显著能量波动,从瞬时频率图上估计该处波动空间频率约为  $2.5 \text{ mm}^{-1}$ 。第5阶IMF在5mm, 19mm, 31mm处存在显著能量波动,对应瞬时频率约为  $2.5 \text{ mm}^{-1}$ 、 $1.4 \text{ mm}^{-1}$  和  $1.1 \text{ mm}^{-1}$ 。第6阶IMF在19mm, 31mm处还残存小能量波动。由此判断该平面轨迹在5mm, 19mm, 31mm附近存在局部波纹度特征,其波长约为0.4mm, 0.7mm和0.9mm。

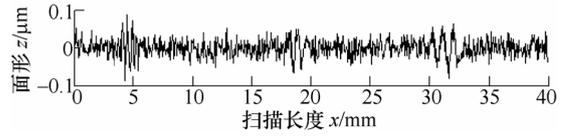
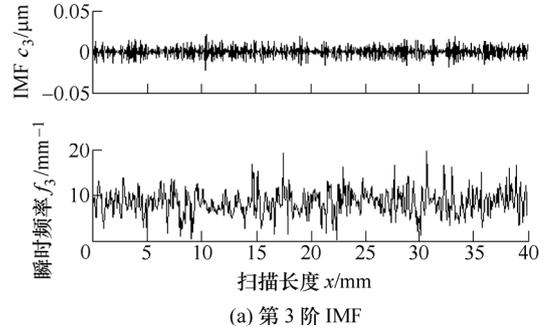
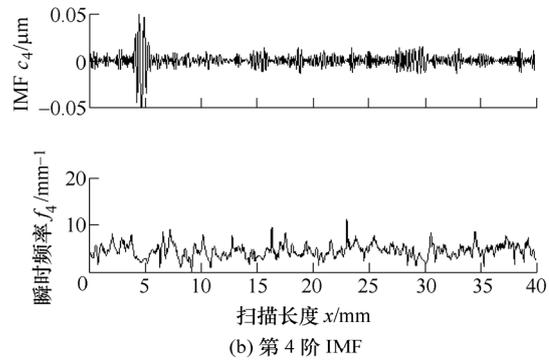


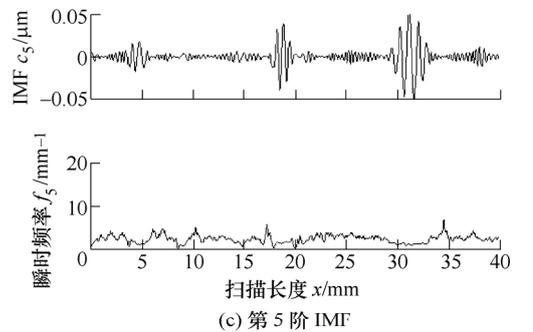
图4 存在局部振纹和白噪声干扰的平面轨迹



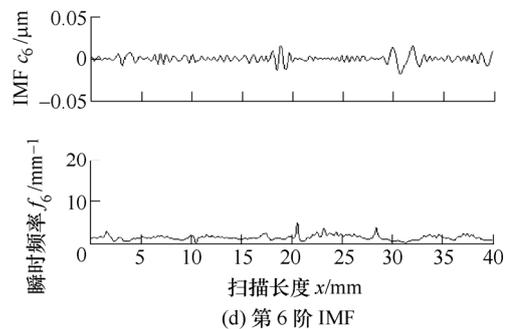
(a) 第3阶 IMF



(b) 第4阶 IMF



(c) 第5阶 IMF



(d) 第6阶 IMF

图5 平面轨迹 EMD 的 3~6 阶 IMF

根据式(13)、式(14)求各阶 IMF 平均波长数值如表 2 所示,对照式(15)的阶段划分,并结合各阶 IMF 谱图,将 1~3 IMF 合并得到平面轨迹线的高频误差,将 4~11 阶 IMF 合并得到平面轨迹线的中

频误差,如图 6 所示。显然,通过 EMD 将面形误差进行分离,可以准确识别中频波纹度波长及其存在的空间方位。

表 2 平面轨迹各阶 IMF 平均波长

| IMF 平均波长/mm |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 1 阶         | 2 阶  | 3 阶  | 4 阶  | 5 阶  | 6 阶  | 7 阶  | 8 阶  | 9 阶  | 10 阶  | 11 阶  |
| 0.07        | 0.07 | 0.12 | 0.23 | 0.43 | 0.71 | 1.31 | 2.92 | 6.33 | 12.05 | 24.98 |

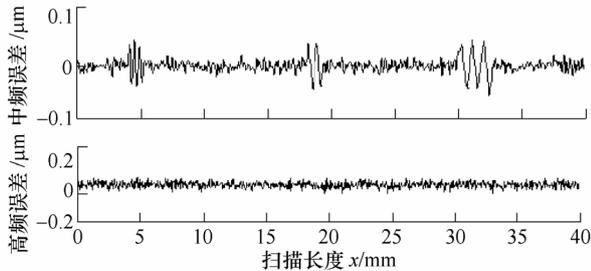


图 6 平面轨迹的误差分解

### 3.2 抛光光学球面数据分析

对球面子午线 EMD 得到 18 阶 IMF,各阶 IMF 平均波长如表 3 所示。将拟合残差与 EMD 剩余信号合成得到低频面形误差,10 阶以上合成得到中频面形误差,10 阶及以下 IMF 合成得到高频面形误差,分别如图 7 所示。

表 3 球面拟合残差各阶 IMF 平均波长

| IMF 平均波长/ $\mu\text{m}$ |      |      |      |      |       |       |       |       |
|-------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1 阶                     | 2 阶  | 3 阶  | 4 阶  | 5 阶  | 6 阶   | 7 阶   | 8 阶   | 9 阶   |
| 3.00                    | 3.10 | 4.20 | 6.10 | 9.40 | 13.70 | 22.00 | 29.20 | 51.00 |
| IMF 平均波长/mm             |      |      |      |      |       |       |       |       |
| 10 阶                    | 11 阶 | 12 阶 | 13 阶 | 14 阶 | 15 阶  | 16 阶  | 17 阶  | 18 阶  |
| 0.09                    | 0.12 | 0.16 | 0.41 | 0.92 | 1.81  | 3.54  | 10.29 | 27.76 |

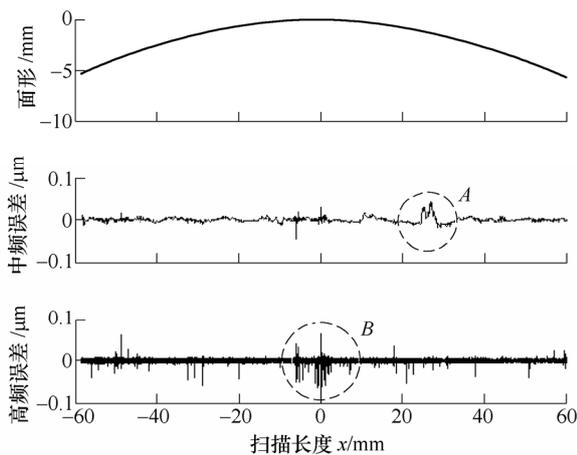


图 7 光学球面子午线误差分离结果

该光学元件表面经过抛光之后,中频误差曲线幅值相对于高频误差而言,数值较小,因此,该元件主要存在无规律分布的高频误差,不存在分布广泛的中频误差,仅在图 7 所示 A(28 mm 附近)处存

在局部高点。如图 8 所示,为高频误差曲线局部 B 处放大,其他局部细节特征与 B 处类似。可见,经过抛光之后,该光学表面较为光滑,仅有个别地方存在突起,整个采样全长上随机分布着局部细小凹陷,有可能是由于磨削阶段引起的细微裂纹。

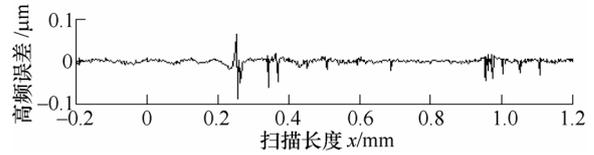


图 8 图 5 高频误差局部 B 处放大图

### 3.3 精磨光学非球面数据分析

对精磨之后的光学非球面元件采取沿加工轨迹方向和垂直于加工轨迹方向两种检测方式得到两条表面曲线,分别对其进行非线性最小二乘拟合之后,对残差进行 EMD 处理,如图 9 所示为 9~14 阶 IMF。第 9 阶及以下 IMF 为无规律随机波动,第 10~12 阶 IMF 在 24~48 mm 段内有较为明显的能量波动,第 13 阶 IMF 在 -20~20 mm 段内有显著能量波动,第 14 阶 IMF 在 0~40 mm 段略微存在能量波动,第 14 阶以上 IMF 幅值相对前几阶 IMF 幅值可以忽略不计。

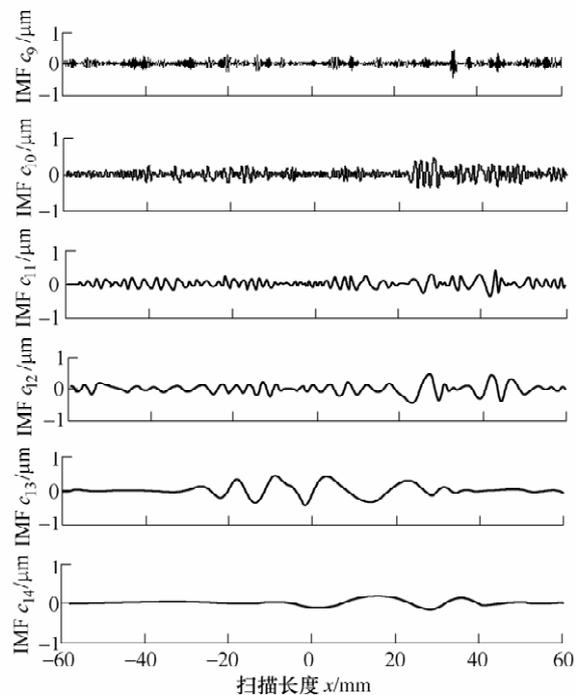


图 9 光学非球面沿加工轨迹方向残差 EMD 的 9~14 阶 IMF

表 4 为各阶 IMF 的平均波长,结合各阶 IMF 实际情况将 1~9 阶 IMF、10 阶及以上 IMF 分别合成得到光学非球面沿加工轨迹方向的高频、中频误差曲线,将光学非球面拟合结果与 EMD 剩余信号结合得到其面形曲线如图 10 所示。在该光学元件的顶

部存在周期性的波动形式,在 30 mm 附近存在一处凹陷,该光学非球面沿加工轨迹方向的中频误差波动幅值与高频误差相当,不十分显著。

表 4 非球面沿加工轨迹方向拟合残差各阶 IMF 平均波长

| IMF 平均波长/ $\mu\text{m}$ |      |      |      |       |       |       |       |        |
|-------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1 阶                     | 2 阶  | 3 阶  | 4 阶  | 5 阶   | 6 阶   | 7 阶   | 8 阶   | 9 阶    |
| 1.50                    | 2.30 | 3.80 | 6.42 | 10.60 | 17.20 | 32.10 | 61.00 | 116.00 |
| IMF 平均波长/mm             |      |      |      |       |       |       |       |        |
| 10 阶                    | 11 阶 | 12 阶 | 13 阶 | 14 阶  | 15 阶  | 16 阶  | 17 阶  |        |
| 0.24                    | 0.51 | 1.05 | 2.71 | 4.45  | 7.80  | 11.86 | 29.70 |        |

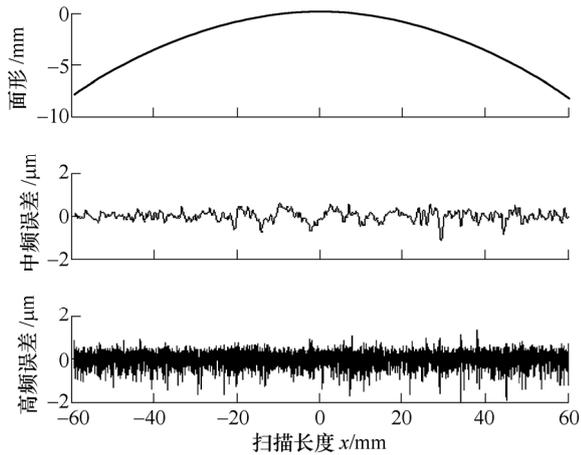


图 10 光学非球面沿加工轨迹方向误差分解

对垂直于加工轨迹的检测曲线进行拟合和残差 EMD,得到 5~10 阶 IMF 如图 11 所示。第 5 阶及以下 IMF 为无规律随机波动,第 6 阶 IMF 在 6 mm 以外的边缘部分出现不明显的波动,第 7 阶 IMF 在

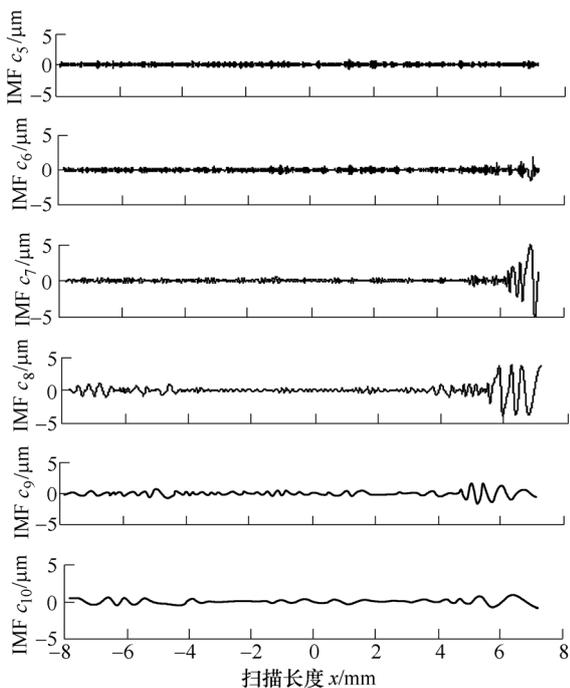


图 11 光学非球面沿加工轨迹方向残差 EMD 的 5~10 阶 IMF

6 mm 以外的边缘部分出现显著波动,第 8 阶 IMF 除了在 5.5 mm 以外的边缘部分出现显著波动外,在 -4 mm 以外的另一边缘处也有小幅值周期性波动存在。第 9 阶 IMF 在 6 mm 附近也存在一定的波动。第 10 阶以上 IMF 无显著的波动形式。

表 5 为其各阶 IMF 的平均波长,结合各阶 IMF 实际情况将 1~6 阶 IMF、7 阶及以上 IMF 分别合成得到光学非球面沿加工轨迹方向的高频、中频误差曲线,将光学非球面拟合结果与 EMD 剩余信号结合得到其面形曲线如图 12 所示。显然,该光学元件经过精磨之后,在垂直于加工轨迹方向的边缘部分有明显中频误差,需要在后续抛光工序中进行修正。

表 5 非球面沿垂直轨迹方向拟合残差各阶 IMF 平均波长

| IMF 平均波长/ $\mu\text{m}$ |      |      |       |       |       |       |
|-------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1 阶                     | 2 阶  | 3 阶  | 4 阶   | 5 阶   | 6 阶   | 7 阶   |
| 2.10                    | 3.70 | 6.40 | 11.10 | 21.30 | 40.10 | 70.40 |
| IMF 平均波长/mm             |      |      |       |       |       |       |
| 8 阶                     | 9 阶  | 10 阶 | 11 阶  | 12 阶  | 13 阶  |       |
| 0.19                    | 0.40 | 0.77 | 1.51  | 3.23  | 7.42  |       |

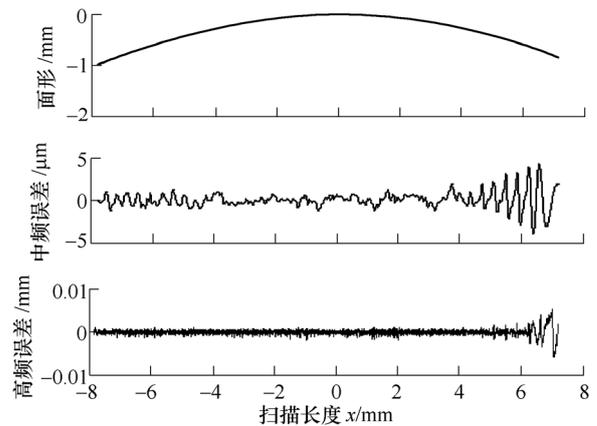


图 12 光学非球面垂直加工轨迹方向误差分解

### 4 结论

(1) 利用 EMD 对光学元件检测曲线拟合残差进行自适应滤波,得到一系列 IMF,根据各阶 IMF 特征及其平均波长对拟合残差进行分解与合成,实现面形低频误差、波纹度中频误差以及表面粗糙度高频误差的分离。

(2) 各阶 IMF 属于单分量信号,不受原始数据中其他空间频率成分的干扰,可以清晰识别元件表面局部波动,判别光学元件表面中频误差不合格的空间方位,其瞬时频率反映了各个空间位置上波动的频率,有助于了解中频误差形成的原因。

## 参 考 文 献

- [1] TAMKIN J M , MILSTER T D. Effects of structured mid-spatial frequency surface errors on image performance [J]. *Applied Optics* , 2010 , 49(33) : 6522-6536.
- [2] 陈明君,董申,李旦,等. 脆性材料超精密磨削时影响表面质量因素的研究[J]. *机械工程学报*, 2001 , 37(3) : 1-4.  
CHEN Mingjun ,DONG Shen ,LI Dan ,et al. Study on the influence factors of the surfacess quality in ultra-precision grinding machining of brittle materials[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* , 2001 , 37(3) : 1-4.
- [3] SONG Jianfeng , YAO Yingxue , XIE Dagang , et al. Effects of polishing parameters on material removal for curved optical glasses in bonnet polishing [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* , 2008 , 37(5) : 29-33.
- [4] HARVEY J E , KOTHA A. Scattering effects from residual optical fabrication errors [J]. *Proceeding of SPIE* , 1995 , 2576 : 155-174.
- [5] 沈卫星,徐德行. 强激光光学元件表面功率谱密度函数估计[J]. *强激光与粒子束*, 2000 , 12(4) : 392-396.  
SHEN Weixing , XU Deyan. Power spectral density function estimate in high power laser optical element surface[J]. *High Power Laser & Particle Beams* , 2000 , 12(4) : 392-396.
- [6] JANECKO D J. Power spectrum standard for surface roughness : Part 1[J]. *Proceedings of SPIE* , 1989 , 1165 : 175-182.
- [7] MERLE E J , BENNETT J M. Calculation of the power spectral density from surface profile data[J]. *Applied Optics* , 1995 , 34(1) : 201-208.
- [8] KHAN G S ,SAREPAKA R G V ,CHATTOPADHYAY K D, et al. Characterization of nanoscale roughness in single point diamond turned optical surfaces using power spectral density analysis[J]. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2004 , 11(1) : 25-30.
- [9] 许乔,顾元元,柴林. 大口径光学元件波前功率谱密度检测[J]. *光学学报*, 2001 , 21(3) : 344-347.  
XU Qiao , GU Yuanyuan , CHAI Lin. Measurement of wavefront power spectral density of large optical components[J]. *Acta Optica Sinica* ,2001 ,21(3) :344-347.
- [10] 程灏波,冯之敬,王英伟. 磁流变抛光光学非球面元件表面误差的评价[J]. *清华大学学报*, 2004 , 44(11) : 1497-1500.  
CHENG Haobo , FENG Zhijing , WANG Yingwei. Evaluation on the figure errors of optical a spheric surfaces after magnetorheological polishing[J]. *Journal of Tsinghua University* , 2004 , 44(11) : 1497-1500.
- [11] 刘耀红,滕霖,李大琪,等. 功率谱密度(PSD)在评价超精密光学表面中的应用研究[J]. *航空精密制造技术*, 2006 , 42(2) : 1-3.  
LIU Yaohong , TENG Lin , LI Daqi , et al. Application of power spectral density to specify optical super-precision surface[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology* , 2006 , 42(2) : 1-3.
- [12] 周旭升,李圣怡. 光学表面中频误差的控制方法-确定区域修正法[J]. *光学精密工程*, 2007 , 15(11) : 1668-1673.  
ZHOU Xusheng ,LI Shengyi. Correcting errors in definite area: a new method for controlling mid-spatial frequency errors in optical surface[J]. *Optics and Precision Engineering* , 2007 , 15(11) : 1668-1673.
- [13] JONES R A. Computer simulation of smoothing during computer-controlled optical polishing[J]. *Applied Optics* , 1995 , 34(7) : 1162-1169.
- [14] 徐建程,李海波,范长江,等. 基于 Wigner 分布函数的光学元件评价方法[J]. *强激光与粒子束*, 2010 , 22(11) : 2621-2624.  
XU Jiancheng , LU Haibo , FAN Changjiang , et al. Specification of optical components using Wigner distribution function[J]. *High Power Laser & Particle Beams* , 2010 , 22(11) : 2621-2624.
- [15] HUANG N E , SHEN Zheng , LONG S R , et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences* , 1998 , 454 : 903-995.
- [16] SCHINHAERL M , RASCHER R , STAMP R. Utilization of time-variant influence functions on the computer controller polishing[J]. *Precision Engineering* , 2008 , 32(1) : 47-54.
- [17] AIKENS D M , WOLFE C R , LAWSON J K. The use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the national ignition facility[J]. *Proceeding of SPIE* , 1995 , 2576 : 281-292.

作者简介: 毕果(通信作者), 女, 1978 年出生, 讲师。主要研究方向为精密加工状态监测与质量控制。

E-mail : guobi@xmu.edu.cn

郭隐彪, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密加工、机电一体化、微补偿控制技术和微机电系统。

E-mail : guoyb@xmu.edu.cn