

一种光学元件表面中频误差提取的新方法^{*}

任志英¹, 林有希¹, 黄健萌¹, 肖维军², 高诚辉¹

(1. 福州大学机械工程及自动化学院 福州, 350108) (2. 福建福光股份有限公司 福州, 350015)

摘要 光学元件表面面形误差属于非平稳空间信号,为了在分离光学元件表面各频段面形误差的同时尽可能保留原始信号各频段的细节特征,结合超精密抛光的球面光学元件表面特点,提出一种基于双树复小波变换(dual tree complex wavelet transform,简称 DT-CWT)的自适应分离法。利用 DT-CWT 的多分辨分析、方向性好和良好的时频局部化分析能力等特点,对实测的抛光光学元件表面进行 DT-CWT 的多尺度分解,并在重构时加入自适应影响因子,成功分离了各频段的面形误差。通过对经 DT-CWT 直接分离法与 DT-CWT 自适应分离法得到的高、中、低频面形误差进行参数表征,实验证明基于 DT-CWT 自适应分离法更为有效地分离光学元件各个频段的面形误差及误差特征,便于后续的认识与评定工作。

关键词 光学元件; 面形误差; 双树复小波变换; 自适应分离; 参数表征

中图分类号 TG58; TH161

引言

光学元件在紫外和 x 射线光学以及高功率激光损伤阈值等领域的应用越加广泛与频繁^[1],因此对于光学元件表面质量也提出了更高的要求。表面质量影响因素除了光学元件自身材料外,主要是光学元件在机加工过程中残留的面形误差,它分为 3 种,即属于高频段面形误差的表面粗糙度、属于中频段面形误差的表面波纹度和属于低频段面形误差的几何轮廓形位误差。这些面形误差对光束的调制作用会严重影响光束质量。因此在光学元件表面质量评定中对各频段面形误差的正确提取是一个关键环节,其目标是在保持原有信号细节的基础上最大限度地分离出高、中、低频信号。目前,国内外学者做了不少研究。文献[2]从光学元件表面属于非平稳空间信号的角度出发,提出了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。文献[3]通过理论分析 Winger 分布函数与功率谱密度之间的关系,得到了局部波前畸变的评价方法和指标。这些方法对高、中、低频段分离没有严格区分,导致各个频段范围内的成分不能完全分离,特别是中频信号的分离,一些属于中频段的重要信息隐藏到其

他频段中,最终使中频的细节特征变得模糊。这将为后续的评价带来误差,甚至可能得到错误的结论。另一方面,中频信号是数控小刀具在抛光过程中留下的一些波纹,其受到加工温度、刀具及抛光液等影响,属于非平稳空间信号。

双树复小波变换因具有多分辨分析、近似平移不变性和方向性好等优点,是分析非平稳信号强有力的工具,目前已在图像去噪^[4]、图像纹理提取^[5]和图像加强^[6]等方面取得了成功应用。因此,笔者利用 DT-CWT 对光学元件表面形貌进行多尺度分解,同时通过引入自适应系数对各个尺度下的高中低频进行分解与重构得到各频段面形误差。并对各频段面形误差进行参数表征,证实了该方法可以有效分离出高、中、低各频段成分。

1 光学元件表面形貌测量与表征

1.1 实验设备

实验采用美国 KLA-Tencor 公司的 MicroXam-100 型光学轮廓仪对抛光球面光学元件表面进行扫描。MicroXam-100 型光学轮廓仪是一种全功能非

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51375094);福建省自然科学基金资助项目(2015J01195);清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLTkf13B02);福州市科技局资助项目(2014-G-74);福州大学人才基金资助项目(XRC-1576)

接触白光移相干涉仪,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 。实验设备示意图及实验光学元件样品如图 1 和图 2 所示。

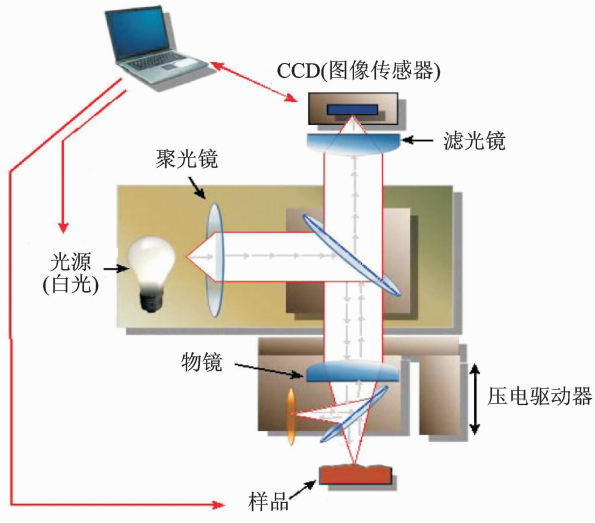


图 1 实验设备示意图

Fig.1 The schematic diagram of experimental equipment

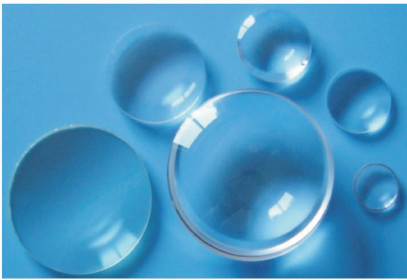


图 2 光学元件样品

Fig.2 The optical components sample

1.2 实验规则与实际检测曲线

球面光学元件常采用子午线来确定光学元件的面形,子午线影响镜片的焦斑、像散以及屈光度等光学性能^[2]。对抛光光学元件的子午线进行测量,其中测量参数如表 1 所示,测量得到的曲线如图 3 所示。

表 1 测量参数

Tab.1 Measurement parameters

测量参数	采用间距/ μm	扫描长度/ mm	采用点数
球面子午线	0.1	1.4	1 400

1.3 各频段面形误差数学建模及参数表征

光学元件表面信号 $f(x_i)$ 分为低频、中频和高频面形误差,建立以下数学模型

$$f(x_i) = h_1(x_i) + h_2(x_i) + h_3(x_i) \quad (1)$$

其中: $h_3(x_i)$ 为低频分量; $h_2(x_i)$ 为中频分量; $h_1(x_i)$ 为高频分量。

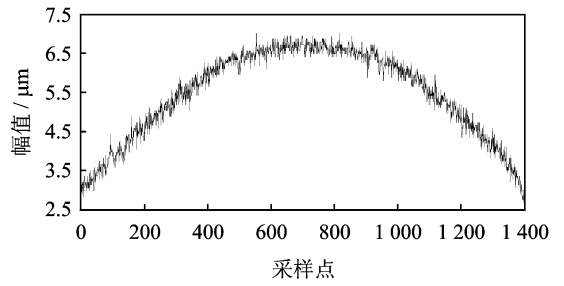


图 3 抛光光学元件子午线测量曲线

Fig.3 Meridian measurement curve of the polishing optical element

目前,光学元件表面质量各波段评价分析受到足够的重视,对于低频段面形误差的评价主要采用波前梯度均方根 (gradient root mean square, 简称 GRMS) 值作为指标来表征低频相位畸变的大小^[7]。张颖等^[8]通过理论分析,对 GRMS 值的求解提出修正并推导修正后 GRMS 值与焦斑尺寸的解析式。文献^[9-10]利用功率谱密度 (power spectral density, 简称 PSD) 与焦斑旁瓣具有非常好的相似性,仿真分析设计具有焦斑旁瓣要求的光学元件对中频段波前指标。万敏等^[11]定量分析了光学元件面形误差各参数 (幅度、类型、空间尺度和空间分布等) 对光束质量的影响,得出在初始设计中需要对高频误差规定更严格的容差。文献^[12]基于经典标量衍射理论分析了中高频误差对环围能量比的影响,得出了环围能量比随着中高频误差 GRMS 的增加近似呈指数规律衰减,并且随着中高频误差的增大,能量转移曲线出现反复振荡。

结合当前国内外光学元件面形参数的表征状况,笔者选取不同参数对光学元件各波段面形误差进行表征。对于低频段面形误差的几何轮廓形位误差,波前位相梯度被认为是与系统聚焦能力联系最密切的参数,其值越小,焦斑尺寸越集中,说明光学元件低频面形精度越高。因此采用 GRMS 值作为指标来表征低频相位畸变的大小^[7],其公式为

$$f_{\text{GRMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial h_3(x)}{\partial x} \right)^2} \quad (2)$$

其中: $h_3(x)$ 为采样点低频段面形误差高度值。

对中频段面形误差的表面波纹度,采用采样长度的偏斜度 (Sk) 参数进行表征,Sk 反映了在采样长度内面形误差曲线对于基准线的对称性。当 Sk 接近于 0 时,说明曲线高度存在对称分布,间接反映了抛光加工工艺情况。偏斜度公式为

$$f_{\text{sk}} = \frac{1}{R_a^3} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_2^3(x) \right] \quad (3)$$

其中: R_a 为中频段面形误差的粗糙度均方根; $h_2(x)$ 为中频段面形误差的高度值。

对高频段面形误差的粗糙度, 采用均方根 (root mean square, 简称 RMS) 参数进行表征。随着粗糙度 RMS 值的减少, 其表面散射传递函数曲线所围的面积越大, 光学零件信息容量越大, 成像效果越好^[13]。RMS 公式为

$$f_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_1^2(x)} \quad (4)$$

其中: $h_1(x)$ 为采样点高频段面形误差高度值。

2 DT-CWT 自适应误差分离理论

2.1 DT-CWT 自适应基本理论

DT-CWT 理论由 Kingsbury 首次提出^[14], Selesnick 等^[15]进一步提出了 DT-CWT 的分解与重构算法, 其分解与重构所设计的滤波器满足有限支撑、完全重构条件、近似的半帧移以及对称性等条件, 较好地解决了实离散小波变换的平移改变性以及方向性有限的缺点, 并且 DT-CWT 保持着实离散小波变换多分辨率分析和良好时频局部化分析能力等优点。DT-CWT 完全可以对非平稳随机信号进行分解, 其函数公式^[14]为

$$f(s) = \sum_{k \in \mathbb{Z}^2} a_{j,L} \varphi_{j,L}(s) + \sum_{b \in B} \sum_{j \leq J} \sum_{l \in \mathbb{Z}^2} d_{j,L}^b \psi_{j,L}^b(s) \quad (5)$$

其中: $s = (s_1, s_2)$, $a_{j,L}$ 和 $d_{j,L}$ 分别为信号的光滑与细节部分; $B = \{\pm 15^\circ, \pm 45^\circ, \pm 75^\circ\}$; J 为最粗糙的分解层; L 为细节的分解层; $\varphi_{j,L}$ 为尺度函数; $\psi_{j,L}$ 为小波函数。

DT-CWT 对任意非平稳随机信号进行分解, 得到多尺度下高低频小波系数。根据目前传统小波理论, 主要针对各尺度进行系数重构最终得到目标信号; 然而目标信号不一定完全符合理想的目标信号, 可能存在一些信息在另一个频段信号中。为改善这一情况, 笔者通过在各层尺度重构中加入一个自适应影响因子 $t_j, j = 1, 2, \dots, n$ 进行自适应处理, 即当处于不同频段界限时, 通过自适应调整, 保证重构得到的信号接近于理想目标信号。

2.2 光学元件表面面形误差分类

美国劳伦斯·利弗莫尔实验室在研制国家点火设施 (national ignition facility project, 简称 NIF)^[16-17] 过程中对空间波长进行光学表面面形误差分类, 并得到了认可, 如表 2 所示。

表 2 光学元件表面面形误差分类

Tab. 2 The surface error classification of the optical surface

名称	范围
高频分量面形误差	$\lambda_i < 0.12 \text{ mm}$
中频分量面形误差	$0.12 \text{ mm} \leq \lambda_i < 33 \text{ mm}$
低频分量面形误差	$\lambda_i \geq 33 \text{ mm}$

将采集信号经 DT-CWT 分解, 重构得到多尺度下高频误差信号。重构得到的信号瞬时频率具有重要的实际物理意义^[18], 高频误差信号 $h_1(x)$ 瞬时频率为

$$g(x_i) = \frac{h'_1(x_i)}{2\pi} = \frac{h_1(x_i)}{2\pi \Delta x} \quad (6)$$

其离散形式为

$$g(x_i) = \frac{h_1(x_{i+1}) - h_1(x_i)}{2\pi \Delta x} \quad (7)$$

其中: Δx 为采样间距。

瞬时频率的平均值为

$$\bar{g}(x_i) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g(x_i) \quad (8)$$

多尺度下重构得到高频误差平均波长为

$$\lambda_i = 1/\bar{g}(x_i) \quad (9)$$

2.3 DT-CWT 自适应分离光学元件表面面形误差

任意采集光学元件表面信号, 对其进行 DT-CWT 自适应分解高、中、低频面形误差基本流程如图 4 所示, 具体步骤如下。

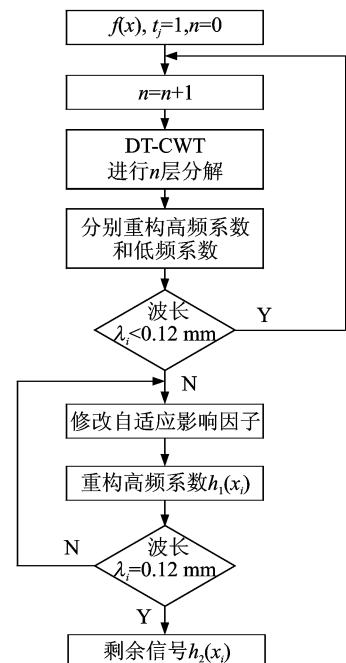


图 4 DT-CWT 自适应分离光学表面面形误差流程图
Fig. 4 DT-CWT adaptive optical surfaces separating surface error chart

1) 设定高频系数自适应影响因子 $t_j, j=1, 2, \dots, n$ 并将其全部置“1”处理;

2) 将原始表面信号 $f(x_i)$ 进行 DT-CWT 的 n 层分解,得到最底层的低频系数 $d_n(x_i)$ 以及各层的高频系数 $c_j(x_i), j=1, 2, \dots, n$;

3) 对分解得到具有细节信号的高频系数 $c_j(x)$ 进行重构得到

$$h_1(x_i) = \sum_{j=1}^n \text{IDTCWT}c_j(x_i)t_j \quad (10)$$

4) 将具有细节信号的高频系数 $c_j(x)$ 全部置零处理,并对低频系数进行信号的重构 $h_3(x)$, 记作

$$h_3(x_i) = \text{IDTCWT}d_n(x_i) \quad (11)$$

5) 对得到的信号 $h_1(x)$ 进行瞬时频率计算与平均波长 λ_i 计算,如果 $\lambda_i < 0.12 \text{ mm}$, 改变第 n 层

高频系数自适应影响因子 t_j , 重复上面的步骤 2~4, 直到 $\lambda_i = 0.12 \text{ mm}$ 结束循环。

6) 分离中频面形误差, 公式为

$$h_2(x_i) = f(x_i) - h_1(x_i) - h_3(x_i) \quad (12)$$

3 实验结果与分析

3.1 DT-CWT 自适应分离光学元件表面面形误差

对图 3 测量的抛光球面光学元件子午线数据进行 DT-CWT 多尺度分解,得到多尺度分解下高频系数与低频系数重构后的面形误差,如图 5 所示。同时分别对高频系数面形误差进行瞬时频率与平均波长的计算,得到多尺度分解下高频系数重构面形

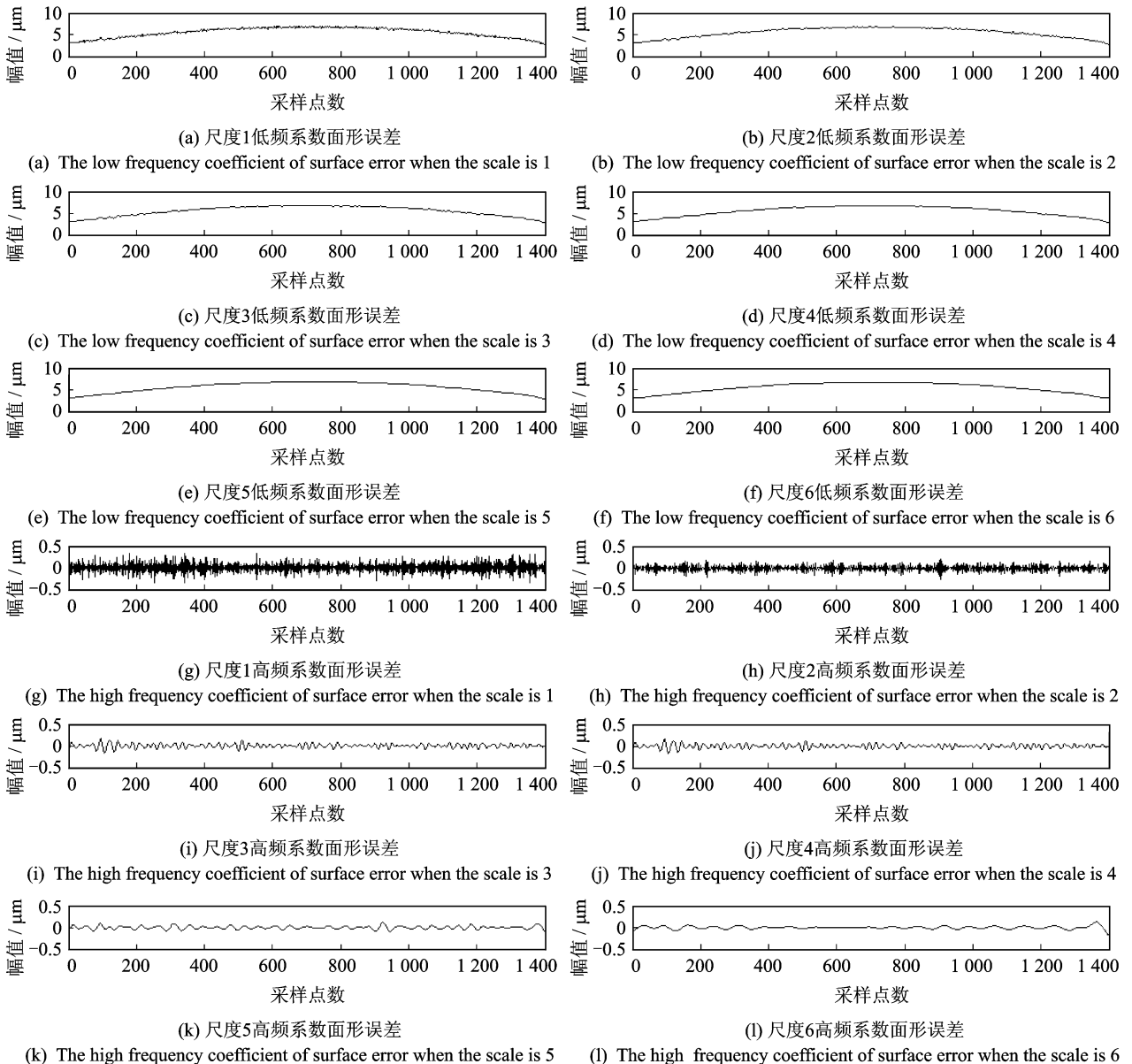


图 5 高频系数与低频系数重构得到的面形误差

Fig. 5 The surface shape error obtained by reconstructing the high-frequency and low-frequency coefficients

误差平均波长,如表3所示。

表3 多尺度分解下高频系数重构面形误差平均波长

Tab.3 Mean wavelength of the surface shape error obtained by reconstructing the high-frequency coefficients under multi-scale decomposition

分解层	平均波长
第1层	0.003 1
第2层	0.008 8
第3层	0.022 8
第4层	0.048 4
第5层	0.115 2
第6层	0.248 8

由图5看出,随着分解尺度的增加,低频系数重构面形误差变化微小,而高频系数重构面形误差变化较大。结合表3可知,当分解尺度在第5层时,其波长在界定范围的边缘波长区域。当分解尺度到达第6层时,第6层高频系数重构的面形误差已出现了实际属于中频波纹度面形误差,说明其高频系数包含一定的中频波纹度误差成分,采用DT-CWT直接分离法存在分离不彻底现象,对于后续的特征将存在影响。现在通过改变多尺度下第5层及后面层数的自适应系数,调整DT-CWT分解尺度下的系数比例,得到经过自适应多尺度分解高频系数重构面形误差的平均波长,如表4所示。

表4 自适应多尺度分解高频系数重构面形平均波长

Tab.4 Mean wavelength of the surface shape error obtained by reconstructing the high-frequency coefficients under multi-scale decomposition

分解层	平均波长
第1层	0.003 1
第2层	0.008 8
第3层	0.022 8
第4层	0.048 4
第5层	0.115 2
第6层(自适应处理)	0.120 0
第7层	0.362 1

从表4可看出,经过自适应处理完第6层高频系数重构面形误差平均波长恰好等于0.12mm。故将前5层高频系数进行重构得到高频段面形误差,对第6层及以上高频系数进行重构得到中频段面形误差,同时用DT-CWT提取低频系数并重构得到低频段面形误差,最后得到各频段面形误差,如图6所示。为能更好地说明该方法的优越性,将DT-CWT直接分离法与DT-CWT自适应分离法分别计算各频段面形误差平均波长,如表5所示。抛光光学表面DT-CWT自适应分离各频段面形误差如

图6所示。用DT-CWT直接分离法对高、中、低频面形误差进行重构,如图7所示。

表5 抛光光学表面各频段实际面形误差平均波长

Tab.5 Mean wavelength of the actual surface shape error of the polishing optical surface

方法名称	低频分量 面形误差	中频分量 面形误差	高频分量 面形误差
直接分离	92.33	0.248 8	0.003 1
自适应分离	92.33	0.120 0	0.002 8

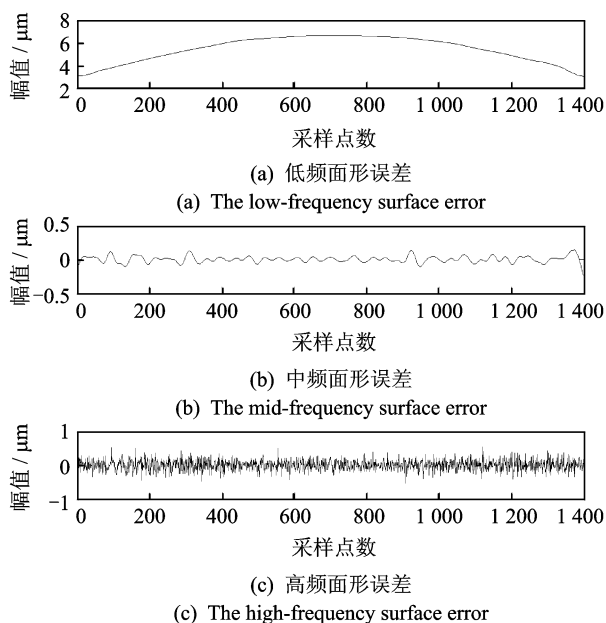


图6 抛光光学表面DT-CWT自适应分离各频段面形误差
Fig.6 The surface shape error of the polishing optical surface by DT-CWT adaptive separation

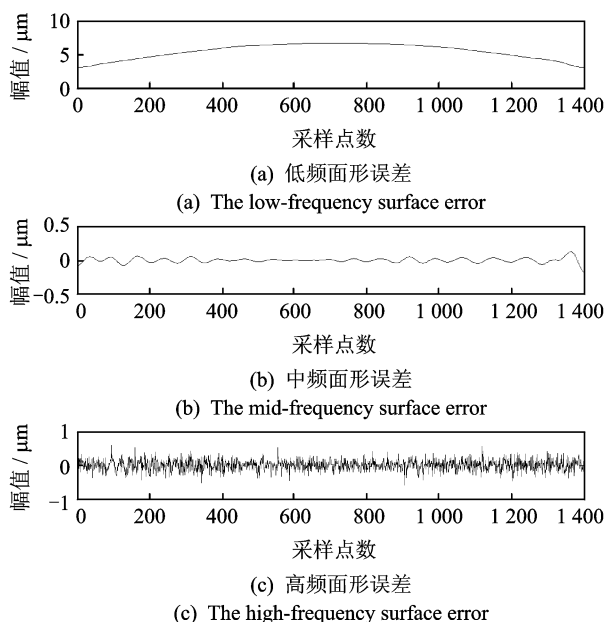


图7 抛光光学表面DT-CWT直接分离各频段面形误差
Fig.7 The surface shape error of the polishing optical surface by DT-CWT direct separation

从表 5 看出,基于 DT-CWT 自适应分离法得到的中频面形误差平均波长刚好为 0.12 mm,实现了将光学元件表面的高频与中频面形误差完全分离。对比图 7,发现图 6 中得到的中频面形误差曲线包含的信息较多,能最大限度反映原始信号本身的性质,有利于加工特征识别及表面参数评定。

3.2 抛光光学元件面形误差的参数评定

若不能完全将面形误差进行分离,将造成本属于该频段的信息缺失,给后续表征结果带来一定的误差,甚至给出错误的评价结论。分别对 DT-CWT 直接分离法与 DT-CWT 自适应分离法获得的各频段面形误差进行参数表征,如表 6 所示。

表 6 抛光光学元件表面各频段实际面形误差参数表征

Tab. 6 Actual surface profile error of polishing optical surface of characterization parameters

方法名称	低频分量 面形误差	中频分量 面形误差	高频分量 面形误差
	波前 梯度均方	采样长度 的偏斜度	均方根/ μm
DT-CWT 直接分离法	0.081 9	-0.116 1	0.159 7
DT-CWT 自适应分离法	0.081 9	-0.069 0	0.154 1

从表 6 可以看到,两种方法最终得到的中频和低频面形误差参数评定也存在一定的误差,与图 6 和图 7 呈现的区别保持一致。结合 DT-CWT 自适应分离法得到的面形误差图和表征参数值进行实测抛光光学元件表面质量的评定,发现:图 6(a)中低频分量面形误差的波前梯度均方根趋近于 0,焦斑尺寸较为集中;图 6(b)中频面形误差分量整理高度值较为对称,但计算得出采样长度的偏斜度略小于 0,说明该抛光工艺存在一定缺陷,如抛光液溶度不够均匀,可以经过一定的改进与实验得到最佳加工工艺,使采样长度的偏斜度越加接近于 0;高频分量面形误差的均方根值较小,且从图 6(c)高频面形误差图可以看出改曲线上的高度值对称度较高,无局部缺陷现象出现。

4 结 论

1) 对实际的抛光光学元件表面子午线进行 DT-CWT 多尺度分解,通过计算多尺度分解得到高频系数重构面形误差的瞬时频率,进而得到平均波长。引入自适应系数,使 DT-CWT 具有搜索目标

的能力,最终实现光学元件高中低频面形误差的精确分离。实验结果证明,采用 DT-CWT 自适应方法得到的中频面形误差所包涵的信息比采用 DT-CWT 直接分离法得到的中频误差所包含的信号更全面,便于中频误差的缺陷识别,以指导实际加工工艺。

2) 通过比较两种方法得到的面形误差并进行参数评定,得出 DT-CWT 直接分离法与 DT-CWT 自适应分离法所得表征参数值存在一定区别,说明了在进行实际面形误差分离时,能否完全分离高、中、低频面形误差将对后续的特征与评价产生一定的影响。

参 考 文 献

- [1] Tsbben H, Ringel G, Kratz F, et al. The use of power spectral density (PSD) to specify optical surfaces[J]. Proc Spie, 1996, 2775:240-250.
- [2] 毕果,郭隐彪,杨峰. 基于经验模态分解的精密光学表面中频误差识别方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1):164-170.
Bi Guo, Guo Yinbiao, Yang Feng. Mid-spatial frequency error identification of precision optical surface based on empirical mode decomposition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 164-170. (in Chinese)
- [3] 徐建程,李海波,范长江. 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, Li Haibo, Fan Changjiang. Specification of optical components using Wigner distribution function[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(11): 2621-2624. (in Chinese)
- [4] Kingsbury N. Image processing with complex wavelets [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, 1999, 357: 2543-2560.
- [5] Magarey J F A, Kingsbury G. Motion estimation using a complex-valued wavelet transform [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1998, 46(4):1069-1084.
- [6] Kingsbury N G. The dual-tree complex wavelet transform: a new efficient tool for image restoration and enhancement[C]// European Signal Processing Conference. Rhodes: [s. n.], 1998: 319-322.
- [7] 冯友君,林中校,张蓉竹. 连续位相板均方根梯度对焦斑平滑特性的影响[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 1042021-1042028.
Feng Youjun, Lin Zhongxiao, Zhang Rongzhu. The in-

- fluence of root mean square phase gradient of continuous phase plate on smoothing focal spot[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 1042021-1042028. (in Chinese)
- [8] 黄晚晴, 张颖, 刘兰琴, 等. 光学元件波前梯度均方根与焦斑尺寸的关系[J]. *光学学报*, 2012, 12: s1140031-s1140034.
Huang Wanqing, Zhang Ying, Liu Lanqin, et al. Relation between the root-mean-squared gradient of optics and the size of focal spot[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 12: s1140031-s1140034. (in Chinese)
- [9] 袁静, 魏晓峰, 栗敬钦, 等. 产生旁瓣的激光波前功率谱密度与焦斑性能分析[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(S1): 154-159.
Yuan Jing, Wei Xiaofeng, Li Jingqin, et al. Analysis of the power spectral density of the laser wave-front producing the wings and the performance of focal spot[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(S1): 154-159. (in Chinese)
- [10] 刘红婕, 景峰, 左言磊, 等. 激光波前功率谱密度与焦斑旁瓣的关系[J]. *中国激光*, 2006, 33(4): 504-508.
Liu Hongjie, Jing Feng, Zuo Yanlei, et al. Relation between wave front power spectral density and wings of focal spot[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(4): 504-508. (in Chinese)
- [11] 万敏, 苏毅, 张卫, 等. 光学器件面形误差对光束质量的影响[J]. *光学学报*, 2002, 22(4): 495-500.
Wan Min, Su Yi, Zhang Wei, et al. Influence of the surface error of optical elements on beam quality[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(4): 495-500. (in Chinese)
- [12] 吴冬良, 戴一帆, 王贵林. 光学加工中高频误差对环境能量比的影响[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2705-2711.
Wu Dongliang, Dai Yifan, Wang Guilin. Influence of mid-and-high frequency errors in optical processing on fractional encircled energy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2705-2711. (in Chinese)
- [13] Harvey J E, Thompson A K. Scattering effects from residual optical fabrication-errors [J]. *International Conferences on Optical Fabricatio*, 1995, 2576: 155-174.
- [14] Selesnick I W, Baraniuk R G, Kingsbury N G. Hilbert transform pairs of wavelets bases[J]. *IEEE Signal Processing Letter*, 2001, 8(6): 170-173.
- [15] Selesnick I W, Baraniuk R G, Kingsbury N G. The dual-tree complex wavelet transform[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(6): 123-151.
- [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.
- [18] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear 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.



第一作者简介:任志英,女,1980年1月生,博士、副教授。主要研究方向为摩擦学中表面表征、信号特征提取及振动测试等。

E-mail: renzyrose@126.com

通信作者简介:高诚辉,男,1953年9月生,教授、博士生导师。主要研究方向为摩擦学及数字化制造等。

E-mail: gch@fzu.edu.cn

