

文章编号: 1001-3806(2007)06-0627-03

小波在基于功率谱密度特征曲线评价中的应用

杨 智, 戴一帆*, 王贵林

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 为了解决功率谱密度仅仅是一种强激光条件下光学元件表面质量评价指标, 无法对通过加工来消除某频段误差进行确定性指导这一问题, 采用小波理论对光学元件表面误差进行了分析和试验验证, 在利用功率谱密度特征曲线找到表面误差不合格频率带的基础上, 利用二维连续小波变换得到了能作为加工过程反馈的不合格频率带的对应区域。结果表明, 利用此方法能有效地找到特定误差频段对应的区域, 从而指导加工, 提高加工的效率。

关键词: 光学设计与制造; 光学评价; 小波; 功率谱密度特征曲线

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

The use of wavelet in evaluating optics based on power spectral density character curve

YANG Zhi DAI Yi-fan, WANG Gu-i-lin

(College of Mechanics Engineering and Automation National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In order to solve the problem that power spectral density function (PSD) is only an evaluation guideline to specify large aperture optical components' quality of laser system and can't provide effective guidance for eliminating certain frequency segment error a wavelet method was used to analysis the optical surface errors. Firstly, PSD character curve was used to find the unqualified frequency range, secondly, two dimensional continuous wavelet transform was used to find the corresponding region of this frequency segment which can use as feedback to a machining process. The experiments' results show the use of wavelet can find the corresponding region of certain frequency segment effectively.

Key words optical design and fabrication; optics specification; wavelet; power spectral density character curve

引 言

对于强激光条件下大口径光学元件的质量评价, 传统上采用的波前均方根值 (root mean square, RMS)、波峰波谷值 (peak to valley, PV) 及泽尼克多项式等指标因缺乏定量化的波前频谱描述功能, 而不能准确完整的反映强激光系统对光学元件的要求^[1,2]。美国劳伦斯利弗莫尔实验室 (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) 在研制国家点火装置 (National Ignition Facility, NIF) 的过程中提出了以功率谱密度 (power spectral density function, PSD) 特征曲线对光学表面进行评价的新方法^[3-5], 其主要的思路是通过计算得出光学元件表面误差的 PSD 曲线, 然后将其与 PSD 特征曲线相比较, 当光学元件表面误差的 PSD 在特征曲线之下时是合格的, 在特征曲线之上则为不合格, 在国内的一

些研究论文中, 一般也以此作为判定光学元件表面是否合格的标准^[1,6,7], 国际社会于 1997 年颁布光学国际标准 ISO 10110 时, PSD 成为了评价光学元件表面质量的新参数^[8]。

作为一种评价指标, PSD 是能满足要求的, 然而, 当光学元件利用 PSD 特征曲线检测为不合格时, 无法知道不合格频带在元件表面发生的区域, 从而不能指导下一步的加工。因为 PSD 是一种基于傅里叶变换的处理方法, 是一种全局性的变化。为了将 PSD 特征曲线与加工更紧密地联系起来, 作者决定在此基础上采用一种局域性的信号处理方法, 即小波变换。具体而言, 也就是先利用 PSD 特征曲线找到不合格频带, 然后通过小波变换来得到此不合格频段误差发生的特定区域, 从而指导加工, 最终减少或消除此频带误差, 提高加工的效率。

1 PSD 特征曲线

目前, 大体上把制造误差分为 3 类: 几何形状误差、表面粗糙度和介于两者之间的表面波纹度, 相应的在频域对应低频、高频和中频。LLNL 在研制 NIF 中,

作者简介: 杨 智 (1978-), 男, 博士研究生, 主要从事微光机电方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: dy@nudt.edu.cn

收稿日期: 2006-09-15 收到修改稿日期: 2006-11-14

按照具体的空间波长 L 更进一步将其分为^[3]: (高频段) $L < 0.12\text{mm}$, 对应 $f > 1/L = 8.33\text{mm}^{-1}$; (中频段) $0.12\text{mm} \leq L \leq 33\text{mm}$, 对应 $0.03\text{mm}^{-1} \leq f \leq 8.33\text{mm}^{-1}$; (低频段) $L > 33\text{mm}$, 对应 $f < 0.03\text{mm}^{-1}$ 。

基于此分布, LLNL采用的 PSD 特征曲线为^[5]:

$$\text{FSD} \leq A \cdot f^{-b}, \quad 0.03\text{mm}^{-1} \leq f \leq 8.33\text{mm}^{-1} \quad (1)$$

式中, $A = 1.05$, $b = 1.55$, f 为频率, 单位为 mm^{-1} , PSD 单位为 $(\text{mm})^2 \cdot \text{mm}$ 。当以 $\log\text{-}\log$ (双对数) 曲线描述 (1) 式时, 其为一条具负斜率的直线, 此即 PSD 特征曲线。在下面的试验中, 以此作为找到不合格频带的依据。

2 试验研究

2.1 试验原理及步骤

具体而言, 试验分为以下几个步骤: (1) 用干涉仪测得一光学元件的表面误差数据; (2) 计算得出误差数据的 PSD 曲线; (3) 用 PSD 特征曲线与测得的 PSD 曲线进行比较, 找出不合格的频带; (4) 针对第 3 步得

出的不合格的频带, 利用小波方法找出其相对用的空域分布图, 即针对此频带误差的表面区域。

为验证方法的可行性, 试验对一块口径 450mm , $f/8$ 的大镜用 ZYGO 干涉仪进行了测量, CCD 阵列有效像素为 220×218 , 采样周期 $2.068\text{mm}/\text{pixel}$, 波长为 632.8nm 。干涉仪测量结果如图 1a 所示。图 1c 为测得的 PSD 曲线与 PSD 特征曲线的比较 (其中测得的 PSD 曲线为 10 条采样线的 PSD 平均值, 且为做快速傅里叶变换, 对实测数据作了补零处理)。

由图 1c 可知, 大镜 PSD 曲线有些频率点在 PSD 特征曲线之上, 所以这一大镜是不符合要求的。为简单起见, 以图 1c 中 $f = 0.03\text{mm}^{-1}$ 也即中频的起始频率作为考查频带的中心频率。不难看出, 对于其它不合格的频带可做类似处理。

考虑到大镜表面为二维面及考察频带的选择任意性, 选用二维连续小波变换 (continuous wavelet transform 2-D, CW T2D) 作为分析工具, 一般简记表示为^[9]:

$$W_f(a, \theta, \bar{b}) = 1/a \cdot \iint \bar{x} \phi^* [a^{-1} r_0^{-1} (\bar{x} - \bar{b})] d\bar{x} \quad (2)$$

式中, $\bar{x} = [x_1, x_2]^T$ 是平面直角坐标, $f(\bar{x})$ 表示二维信号, $W_f(a, \theta, \bar{b})$ 即表示 $f(\bar{x})$ 的二维连续小波变换, $\bar{b} = [b_1, b_2]^T$ 分别是 x_1, x_2 方向的位移, \bar{x}, \bar{b} 表达式中上标 T 表示转置, a 是尺度因子, $r_0 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ 是坐标旋转因子, θ 为坐标系逆时针旋转角度, $\phi[a^{-1} r_0^{-1} (\bar{x} - \bar{b})]$ 表示二维基本小波 $\phi(\bar{x})$ 的尺度伸缩、坐标旋转及二维位移, 上标* 表示取共轭。

试验采用 Mexican2D 小波, 其表达式为:

$$\Psi(f_1, f_2) = 2\pi(f_1^2 + f_2^2) \exp[-(f_1^2 + f_2^2)/2] \quad (3)$$

式中, (f_1, f_2) 表示频域面坐标。

首先找到与不合格中心频率对应的尺度, 由尺度与频率之间关系^[10]:

$$F_s = \frac{F_c}{a \cdot \Delta} \quad (4)$$

式中, F_c 为所采用小波的原始中心频率, a 为尺度, Δ 为 CCD 阵列采样周期, F_s 为与尺度相对应频率, 也即要考察的中心频率。就 Mexican2D 小波而言, 参考 MATLAB 小波工具箱, 计算得其原始中心频率 $F_c = 0.25\text{mm}^{-1}$, 将其与采样周期 $\Delta = 2.068\text{mm}/\text{pixel}$, $F_s = f = 0.03\text{mm}^{-1}$ (即开始设定的要考察频带的中心频率 $f = 0.03\text{mm}^{-1}$) 代入 (4) 式式得: $a = 4.04$ 。因为 Mexican2D 小波是各向同性的, θ 无关紧要 (θ 为 (2) 式中坐标系逆时针旋转角度), 取 $\theta = 0$ 。利用另一个小波工具箱对原始误差数据进行二维连续小波变换^[11], 如图 2 所示 (图中标题 fixed 表示固定尺度 $a = 4.04$ 及 $\theta = 0$)。

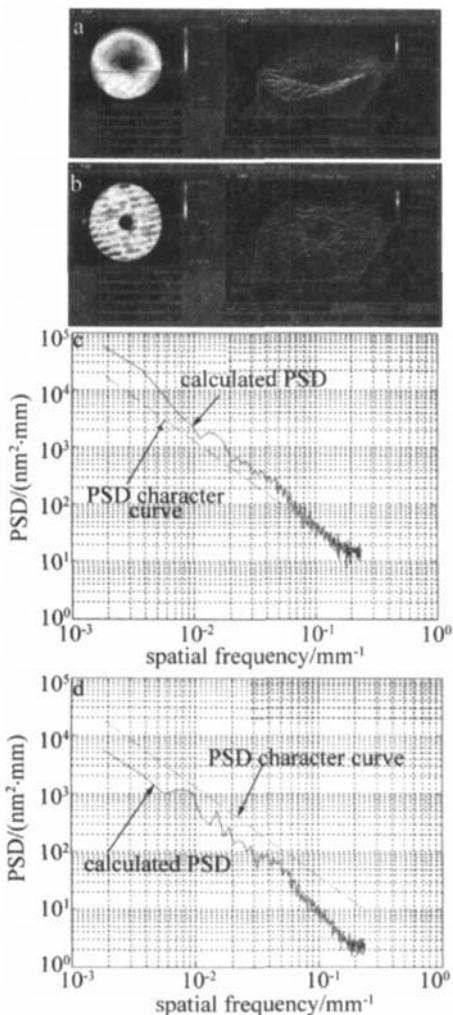


Fig 1 The surface error and the calculated PSD vs PSD character curve a— the surface error firstly b— the surface error secondly c— the calculated PSD vs PSD character curve firstly d— the calculated PSD vs PSD character curve secondly

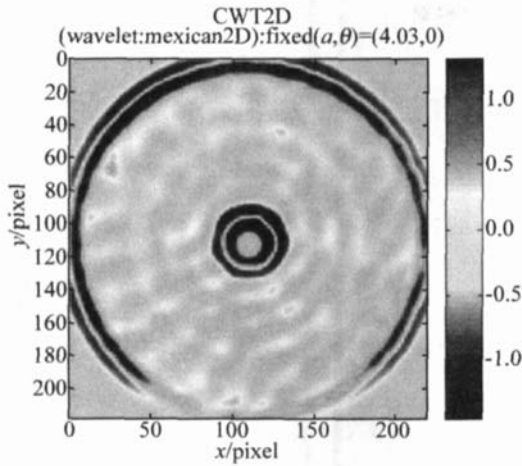


Fig 2 CWT2D of surface error after the first time measure (scale factor $a=4.03$)

2.2 试验结果

可见, 针对此频段的对应区域靠近中心固定孔和边缘, 即边缘效应明显。同理, 可得到其它不合格频带的对应区域 (从略)。当不合格频带的对应区域找出, 下一步便可指导加工, 最终减少或消除此频带误差, 提高加工的效率。针对不同的加工方法, 一般就有不同的局域消除方式, 譬如通常的数控抛光, 一般可通过适当选择抛光盘大小及均匀抛光的方式达到局域频带误差消除的目的, 将另文讨论, 这里从略。

为比较起见, 这儿将同一大镜最终加工后的测量结果给出, 如图 1b 所示, 图 1d 为其 PSD 曲线与特征曲线的比较, 可见, 此时大镜是符合要求的。

3 结 论

从实际的效果看, 利用小波的方法能找到不合格频带的对应区域, 从而为下一步提高加工效率打下基础。然而有一个问题, 即如何考虑干涉仪频率响应特

性对真实误差数据的影响。因为干涉仪光学系统的复杂性, 一般的方法是通过试验, 即对一已知样品进行检测进而标定^[3], 然而, 高质量的台阶或正弦位相光栅样品难以获得, 同时, 它也不能对测量系统的设计和构建进行有效的指导。基于此考虑, 笔者从原理上对以柯林斯公式描述的光学系统与小波之间的联系进行了一些探讨, 下一步就希望针对具体的干涉仪进行讨论。

参 考 文 献

- [1] XU Q, GU Y Y, CAILL *et al* Measurement of wavefront power spectral density of large optical components [J]. *Acta Optica Sinica* 2001, 21 (3): 344~ 347 (in Chinese).
- [2] YANG H F, JIANG Z F. Research of Zernike modal wavefront reconstruction of 19th element Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Laser Technology* 2005 29 (5): 484~ 487 (in Chinese).
- [3] LAWSON J K, WOLFE C R, MANES K R *et al*. Specification of optical components using the power spectral density function [J]. *SPIE*, 1995 2536: 38~ 50.
- [4] AKENS 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]. *SPIE*, 1995 2536: 281~ 292.
- [5] AKENS D M. The origin and evolution of the optics for the national ignition facility [J]. *SPIE*, 1995 2536: 2~ 12.
- [6] REN H, ZHUO Zh Y, JIANG X D *et al* Discussion of the specific method of power spectral density [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2002 14 (2): 279~ 282 (in Chinese).
- [7] XU F, WEI Q Zh WU F. Analysis about evaluating method of power spectral density function [J]. *Optical Instruments* 2000, 22 (3): 21~ 24 (in Chinese).
- [8] ISO 10110- 1997, Optics and optical instrument [S].
- [9] YANG F Sh. The engineering analyses and application of wavelet transform [M]. Beijing Science Press 1999. 1~ 12 (in Chinese).
- [10] The Mathworks Inc Wavelet toolbox 3.0.1 [EB/OL]. http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/wavelet/wavelet_ug/pdf_2004-09-13
- [11] The YAW Toolbox Team. Yaw toolbox 1.0 [EB/OL]. <http://thea.tec.ucl.ac.be/yawtb/pmwiki.php/Main/YAWTb> 2002-06-15
- [10] AN ISMOV S I, KAPEL DV, CH B L, PERELMAN T L. Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses [J]. *Soviet Physics Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* 1974 39 (2): 375~ 377.
- [11] SHEN ZH, LU J N, IX W. Study of the heating mechanism of a semiconductor irradiated by picosecond and nanosecond laser pulses [J]. *Chinese Journal of Lasers* 1999, 26 (9): 859~ 863 (in Chinese).
- [12] ALLMEN M V. Laser-beam interaction with materials physical principles and applications [M]. Berlin: Springer-Verlag 1987. 201~ 207.
- [13] LOU F, JIANG J J, SUN C W. Variation in damage thresholds of Si photodiodes with laser pulse duration [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2004 16 (6): 685~ 688 (in Chinese).
- [14] ELSAYED-ALIH E, NORRIS T B, PESSOT M A *et al* Time-resolved observation of electron-phonon relaxation in copper [J]. *Phys Rev Lett* 1987, 58 (12): 1212~ 1215.

(上接第 626 页)

- [5] ZHAO G, CHEN J G, ZHANG J *et al*. Analytical description of the damage threshold of femtosecond pulses [J]. *Laser Technology* 2006 30 (1): 90~ 92 (in Chinese).
- [6] YOU M, ZHAO W, CHENG G H *et al*. Crystallization in PTR glass induced by irradiation of femtosecond lasers [J]. *Laser Technology* 2006 30 (1): 41~ 42 (in Chinese).
- [7] LIU Zh, LIR X, YU W *et al*. Heating of planar metal targets by ultrashort laser pulses [J]. *Acta Optica Sinica* 2000 20 (10): 1297~ 1304 (in Chinese).
- [8] CHNE J K, BERAUN J E, GRMES L E *et al*. Modeling of femtosecond laser-induced nonequilibrium deformation in metal films [J]. *International Journal of Solids and Structures* 2002 39 (12): 3199~ 3216.
- [9] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S *et al*. Femtosecond picosecond and nanosecond laser ablation of solids [J]. *Appl Phys* 1996 A63 (2): 109~ 115.