

文章编号:1002-2082(2015)02-0294-06

光学表面非均匀中频误差的评价与修正

张昊宇, 钟波, 赵世杰, 李瑞洁, 李海波, 陈贤华

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要:针对光学元件使用过程中中频误差将导致光学元件的激光破坏这一问题, 提出一种中频误差突出频率提取方法。采用基于统计学的多样本数据处理, 对于每一种采样方向都可以得到数个较为突出的不合格频率。利用这些频率进行确定性加工后, 在特定方向, 空间频率 $0.044\ 1\ \text{mm}^{-1}$, $0.085\ 8\ \text{mm}^{-1}$, $0.041\ 7\ \text{mm}^{-1}$ 所出现的不合格次数分别降至加工前的 23.9%, 18.3%, 29.2%, 而整体中频误差减少至 50.1%。结果表明, 此方法降低了由光学表面中频误差方向性与局部性引起的不确定性。

关键词:光学加工; 中频误差; 小波变换; 频率提取

中图分类号: TN201

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201536.0205003

Evaluation and modification of nonuniform mid-spatial frequency error in optic surface

Zhang Haoyu, Zhong Bo, Zhao Shijie, Li Ruijie, Li Haibo, Chen Xianhua

(Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

Abstract: Mid-spatial frequency (MSF) wavefront error leads to laser damage during the use of optics. Therefore the accurate evaluation and modification are necessary in manufacture. A unique way based on multi-sample analysis was proposed for error frequency. Several outstanding frequencies were found in every sampling direction. After eliminating with the help of these frequencies, along with certain sample direction, unqualified frequency errors in $0.041\ 7\ \text{mm}^{-1}$, $0.085\ 8\ \text{mm}^{-1}$, $0.041\ 7\ \text{mm}^{-1}$ were down to 23.9%, 18.3%, 29.2%, respectively, while the MSF in whole optic surface decreased to half. According to the method above, the uncertainty caused by directionality and regionality of MSF in optic surface can be restrained.

Key words: optic fabrication; mid-spatial frequency error; wavelet transform; frequency extraction

引言

中频误差指空间频率在 $0.030\ 3\ \text{mm}^{-1} \sim 8.3\ \text{mm}^{-1}$ 频段内的波前误差, 表现为波纹误差, 在光学元件使用过程中, 中频误差在经过长的传输距离后, 转化为较大的强度调制, 恶化系统输出的光束质量。以国家点火装置 (NIF) 为例, 中频误差将影响焦斑拖尾、近场调制与散射性能^[1]。因

此, 抑制光学表面的中频误差是光学元件加工的重要内容之一。美国利弗莫尔实验室 (LLNL) 在研制 NIF 的过程中提出了以功率谱密度 (PSD) 特征曲线评价中频误差^[2-4], 其主要的思路是通过计算得出光学元件表面中频误差的 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 曲线在特征曲线之上则为不合格。作为

收稿日期: 2014-09-15; 修回日期: 2014-10-16

基金项目: 国家科技重大专项课题 (2013ZX04006011-101)

作者简介: 张昊宇 (1990—), 男, 四川达州人, 硕士, 主要从事光学冷加工相关工艺研究。E-mail: hao_yu_zhang@126.com

通信作者: 陈贤华, 男, 副研究员, 主要从事光学冷加工相关工艺研究。E-mail: chenmail2@163.com

中频误差评价指标,PSD能够准确测定出不合格的频段,但却无法定位不合格频段在元件表面的区域,从而不能进行确定性加工。针对此,国防科技大学的戴一帆、杨智等人提出使用二维小波变换确定不合格频段所对应的区域,从而指导确定性加工^[5-8]。上述方法适用于中频误差均匀的光学表面,而处理误差空间尺度有所波动的光学表面则较为困难。为解决其在非均匀中频误差表面的问题,本文提出一种新型的中频误差突出频率提取方法,相比于传统的提取方法,此方法改变了样本的采样方式,充分考虑样本方向性与局部性对数据处理结果的影响,并采用了基于统计学的样本数据处理,由传统的单根 PSD 曲线对比变为 PSD 曲线中不合格频率出现次数统计处理,新方法的优势在于可以更为全面地反映光学表面的中频信息。得到突出误差频率后,使用二维小波变换对其进行区域检测,并指导确定性加工。

1 光学加工中的小波变换

为确定性修正光学表面中频误差,需要从采样信号中提取空间信息,小波变换是空间和频率的局部变换,其本质是将一个函数分解成各频率分量的小波基,由于小波基只在非常短的一段区间有非零值,且可以按比例伸展和压缩以获取低频和低频信号,因此可以得到不同频率的具体空间信息,函数 $f(t)$ 的小波变换如下:

$$W_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$$

式中: $\psi(t)$ 为小波基; a, b 分别为伸缩因子和平移因子; $*$ 表示取共轭。

考虑到光学表面是二维平面,因此需要使用二维连续小波变换(CWT2D)作为分析工具,一般通过下式表示:

$$WT_f(a,\theta,b) = \frac{1}{a} \iint f(\bar{x}) \psi^* [a^{-1} r_{\theta}^{-1} (\bar{x} - \bar{b})] d\bar{x}$$

当选取各向同性的基本小波分析时, $\theta=0$,

$$r_{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{而在本文中,所选取的小波基为各项}$$

同性的 Mexican2d 小波,因此公式可化简为^[9-11]

$$WT_f(a,b) = \frac{1}{a} \iint f(\bar{x}) \psi^* [a^{-1} (\bar{x} - \bar{b})] d\bar{x}$$

2 中频误差非均匀性分析

2.1 PSD 指标的计算

中频误差 PSD 曲线的计算是一种基于傅里叶变换的处理方法,通常所选用的傅里叶变换方法为一维离散傅里叶变换,公式如下:

$$(F_n\{y\})_k = \sum_{j=0}^{n-1} y_j e^{-\frac{2\pi i j k}{n}} k = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

而 PSD 特征曲线的计算公式如下:

$$\text{PSD} = L \cdot f^{-b} \quad (0.030 \text{ mm}^{-1} \leq f \leq 8.3 \text{ mm}^{-1})$$

式中: n 是序列中的采样点数; L, b 均为经验取值,在本文中, $L=0.0005, b=2$ 。

在分别计算得到中频误差 PSD 曲线与 PSD 特征曲线后,使用双对数曲线函数描述两者,通过对比,即可得到中频误差不合格的频率点。

2.2 中频误差的方向性与局部性

评价光学表面中频误差前,需要先选取样本,由于光学表面的面形分布不均匀,不同区域不同方向的样本存在较大的差异,如图 1 所示。

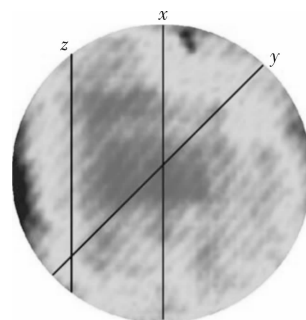


图 1 光学表面的采样线选取

Fig. 1 Sample line on optic surface

图中 x, y 为不同方向的采样线, x, z 为相同方向不同区域的采样线,分别画出其 PSD 误差曲线并与 PSD 特征曲线对比,如图 2 所示。

可以看出,由于光学表面的非均匀性,采样线 x 中的中频误差成分更为丰富,因此中频误差不合格的频率较多;而采样线 y 的方向与面形波纹方向近乎垂直,误差的频带不在中频范围内,因此中频误差不合格的频率较少。虽然采样线 x 与 z 的采样方向相同,但采样区域的不同也会造成计算结果不同。比如采样线 a 在 0.044 mm^{-1} 空间频率下处于合格状态,而采样线 z 处于不合格状态。通过以上分析可以得出,PSD 误差曲线的计算与采样线的区域和方向均有很大的相关性,因此在实际检测和加工过程中,需要对其进行特定处理,以便得到准确的误差频率。

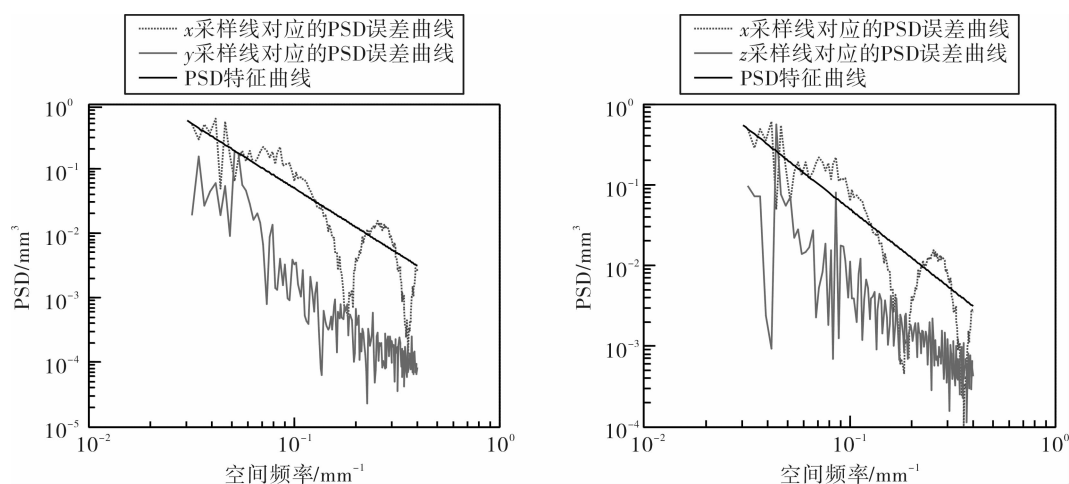


图2 不同方向不同区域采样线的 PSD 误差对比

Fig. 2 PSD errors of sample lines in different directions or areas

3 非均匀中频误差突出频率提取

在传统的功率谱密度特征曲线评价中,不合格频率的提取方法:在同一方向上选取数条采样线,分别对其进行傅里叶变换,得到 PSD 误差。再对数条采样线的 PSD 误差进行平均处理,得到光学表面的 PSD 误差曲线,PSD 误差曲线在 PSD 特征曲线上方时,即为不合格,通过此方法可以提取出不合格频率。但正如前文中所提到的,在非均匀的光学表面中,中频误差有着较强的方向性与局部性,若按照传统方法提取,不合格频率往往会被掩盖。因此,本文采取如下方法提取中频误差:

1) 首先选取某一方向作为参考方向,再选择与参考方向一致的多条采样线,对每一条采样线均进行傅里叶变换并得到 PSD 误差曲线。

2) 将得到的 PSD 误差曲线与 PSD 特征曲线进行对比,统计出所有不合格频率并记录。对每一条 PSD 误差曲线均作此处理,并将不合格频率出现的次数叠加。

3) 根据统计结果得到出现次数较多的数个不合格频率。

4) 选取其他方向的采样线,重复上述过程,通过各个方向的不合格频率即可提取光学表面中频误差。

以上采样方法可以覆盖不同方向不同区域的中频误差信息,相比于传统的提取方法,此方法更加完备,能更有针对性地加工数个突出误差频率所对应的区域。

4 实验验证

为验证前文提出方法的可行性,在口径为 410 mm 的透镜表面进行加工实验。采样线的选取方向如图 3 所示。首先选取 A 方向作为参考方向,按照上述方法得到出现次数最多的 3 个不合格频率,然后再选取 B 方向、C 方向和 D 方向的采样线,重复上述过程。

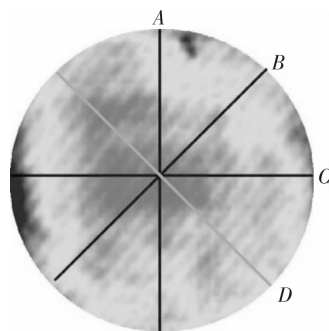


图3 实验中采样线的选取

Fig. 3 Sample line in experiment

统计结果如表 1 所示,可以看出,每个方向都有其特定的突出不合格频率,且各方向的不合格频率的出现次数也有较大差距,此结论也验证了光学表面中频误差的非均匀性。

针对表中不合格频率,通过多次二维小波变换得到不合格频率所对应的区域,此方法在文献[7]中已有介绍。通过确定性加工修正这些区域,确定性加工的主要参数如下:抛光盘材料为 73# 沥青,直径 50 mm,偏心距为 5 mm,公转速度为 180 r/min,自转速度为 50 r/min。由于有多个不

合格频率,因此对应多个不合格区域,在每个区域的加工时间与该频率的不合格次数相关,不合格次数越多,加工该误差频率区域的时间越长,本次加工的总时间约为 40 min。

表 1 不同采样线的突出误差频率与不合格次数

Table 1 Marked error frequency and unqualified number in different sample lines

mm ⁻¹ /(个)	A 方向	B 方向	C 方向	D 方向
频率 1/不合格次数	0.044 1/389	0.053 9/379	0.036 8/168	0.061 3/96
频率 2/不合格次数	0.085 8/191	0.056 4/295	0.034 3/162	0.036 8/87
频率 3/不合格次数	0.041 7/185	0.058 8/213	0.031 9/125	0.034 3/83

经过确定性修正后,仍按照同样的方法选取采样线,考察加工前各个方向采样线突出的不合格频率,并给出不合格频率次数的对比图 4。

可以看出所有突出误差频率对应的不合格次数均有所减少,以 A 方向为例,加工后,空间频率 0.044 1 mm⁻¹,0.085 8 mm⁻¹,0.041 7 mm⁻¹所出现的不合格次数分别降至加工前的 23.9%,18.3%,29.2%。说明经过确定性修正,特定频率的中频误差得到很好地抑制。而 D 方向的不合格频率出现次数减少的幅度较小,推测原因如下:D 方向的

初始不合格频率次数较小,已接近确定性加工的极限精度,因此加工效果并不明显。

图 5 给出加工前后空间频率为 0.044 1 mm⁻¹的区域,可以看出,加工前此频率对应的区域有较强的方向性,抛光过程中的走刀痕迹较为明显,加工后的误差区域分布较为均匀,且总体的幅值也有所降低。

为定量分析光学表面的整体中频误差是否被抑制,统计所有不合格频率出现的总次数,并得到图 6。

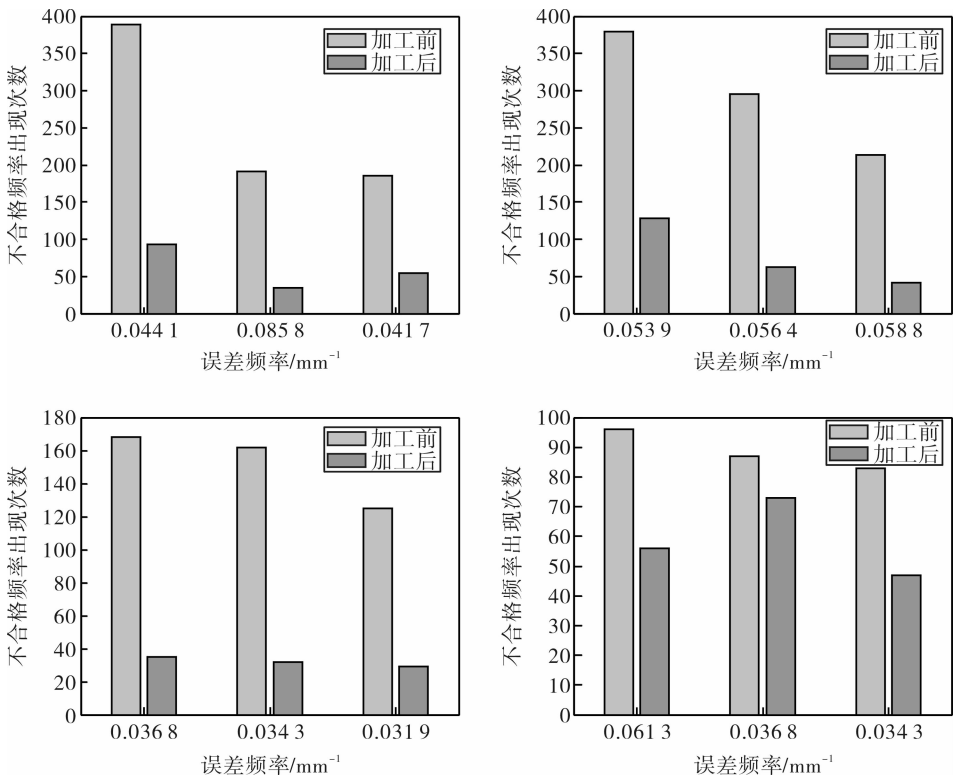


图 4 加工前后不合格频率出现次数对比图(按顺序依次为 ABCD 方向)

Fig. 4 Unqualified frequency in different sample directions before and after processing (order is ABCD)

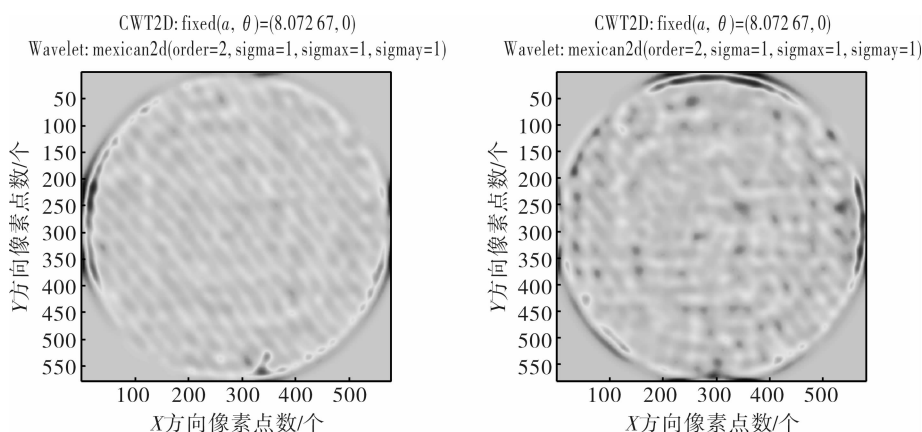
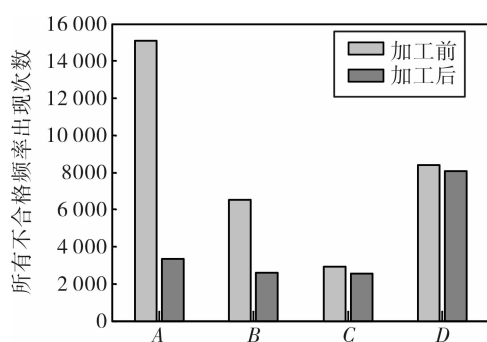
图5 0.044 1 mm⁻¹空间频率所对应区域(左图加工前,右图加工后)Fig. 5 Area corresponding to 0.044 1 mm⁻¹ spatial frequency (left: before processing, right: after processing)

图6 加工前后不合格频率出现的总次数

Fig. 6 Number of unqualified frequency before and after processing

可以看出,加工后总不合格频率出现的次数降至加工前的 50.1%。经过确定性加工,中频误差在某些采样方向上得到较好地抑制,而在某些方向的抑制效果较差,总体来说光学表面的整体中频误差情况有所改善。造成特定频率的中频误差大幅度改善,而整体表面的中频误差改善效果随着采样方向变化而变化的原因是:目前所采用的确定性去除针对中频误差较为突出的频率,因此特定频率的中频误差大幅度改善;同时,在去除过程中,由于加工工具的口径及精度限制,并不能非常精确地进行特定区域修正,因此会对整体中频误差的改善造成不可控的影响。

5 结束语

使用本文中的误差频率提取方法,能够准确得到非均匀光学表面不合格中频误差频率。在此基础上,通过确定性修正加工,不合格频率对应区域的中

频误差得到大幅度抑制,在某特定方向,空间频率 0.044 1 mm⁻¹, 0.085 8 mm⁻¹, 0.041 7 mm⁻¹ 所出现的不合格次数分别降至加工前的 23.9%, 18.3%, 29.2%。同时,整个光学表面的中频误差也得到较好地控制,加工后总不合格频率出现的次数降至加工前的 50.1%。实验证明,本文提出的中频误差提取方法降低了由光学表面空间频率方向性与局部性引起的不确定性,能够有效地应用于非均匀中频误差评价与修正。

参考文献:

- [1] Zhang Chunlai, Wang Zhiguo, Xiang Xia, et al. FDTD simulation in the vicinity of pit cracks on fused silica rear-surface[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61 (11): 114210-1-10.
章春来, 王治国, 向霞, 等. 熔石英后表面坑点型划痕对光场调制的近场模拟[J]. 物理学报, 2012, 61 (11): 114210-1-10.
- [2] Aikens D M, Wolfe C R, Lawson J K. Use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility[C]. USA: International Society for Optics and Photonics, 1995.
- [3] Liao D, Yuan Z, Tang C, et al. Mid-spatial frequency error (PSD-2) of optics induced during CCOS and full-aperture polishing[J]. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2013, 8:13031-13031.
- [4] Liao D, Wang J, Zhao S, et al. Analysis of the optic/impurity-particle/pad interaction for reduction of scratches formed on optics during pad polishing[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2014, 391:

- 96-100.
- [5] Yang Zhi, Dai Yifan, Wang GuiLin. The use of wavelet in evaluating optics based on power spectral density character curve[J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 627-629.
- 杨智,戴一帆,王贵林. 小波在基于功率谱密度特征曲线评价中的应用[J]. 激光技术, 2007, 31(6): 627-629.
- [6] Zhou Xusheng, Li Shengyi, Dai Yifan, et al. Correcting errors in definite area: a new method for controlling mid-spatial-frequency errors in optical surface[J]. Optic and Precision Engineering, 2007, 15(11):1568-1673.
- 周旭升,李圣怡,戴一帆,等. 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):1568-1673.
- [7] Yang Zhi. Study on specification and analysis of frequency band errors in deterministic optical machining[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- 杨智. 确定性光学加工频带误差的评价与分析方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2008.
- [8] Wu Jun, Wu Zhen. Imaging characteristic and image reconstruction of synthetic aperture optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(4): 567-573.
- 吴俊,吴桢. 合成孔径光学系统的成像特性和图像复原[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 567-573.
- [9] Boggess A, Narcowich F J. A first course in wavelets with Fourier analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- Boggess A, Narcowich F J. 小波与傅里叶分析基础[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [10] Li Shengyi, Dai Yifan. New technology for manufacturing and measurement of large and middle-scale aspheric surfaces[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- 李圣怡,戴一帆. 大中型光学非球面镜制造与测量新技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
- [11] Chen M, Pang Q, Wang J, et al. Analysis of 3D microtopography in machined KDP crystal surfaces based on fractal and wavelet methods[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(7): 905-913.