

# 大口径平板中频波前均方根的测量方法

柴立群<sup>1</sup> 石琦凯<sup>1</sup> 魏小红<sup>1</sup> 徐建程<sup>2</sup> 李强<sup>1</sup> 刘昂<sup>1</sup> 徐凯源<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)  
(<sup>2</sup>浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

**摘要** 在高功率激光系统中,大口径元件的中频波前影响系统的安全运行,中频波前均方根(PSD1)是用来评价中频波前质量的关键参数。由于大口径干涉仪在系统传递函数(STF)上不能完全满足中频波前的检测要求,提出采用小口径高分辨率干涉仪检测的统计分析方法,建立了统计理论模型,分析了测量不确定度。建立了子区域 PSD1 检测装置,提出了子区域倾斜补偿法,提高了检测精度。理论及实验结果表明针对 400 mm×400 mm 分析区域,子区域数量设置为 4×4,置信水平为 95.4%时,测量不确定度为±0.266 nm。该方法与大口径干涉仪检测法的对比实验表明,400 mm×400 mm 分析区域内检测结果偏差小于 5%。子区域统计分析法是对大口径干涉仪检测法的有益补充,对先进光学制造工艺的优化具有重要的参考价值。

**关键词** 测量;波前检测;统计方法;大口径平板;中频波前均方根

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0108003

## Testing of Root Mean Square of Mid-Spatial-Frequency Wavefront for Large Flat

Chai Liqun<sup>1</sup> Si Qikai<sup>1</sup> Wei Xiaohong<sup>1</sup> Xu Jiancheng<sup>2</sup> Li Qiang<sup>1</sup> Liu Ang<sup>1</sup> Xu Kaiyuan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China)  
(<sup>2</sup>Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

**Abstract** In high-power laser system, mid-spatial-frequency wavefront of large flat influences safety of the system and root mean square of mid-spatial-frequency wavefront (PSD1) is used to evaluate corresponding wavefront. Because large-aperture interferometer can't fully meet the demand of the need of system transfer function (STF) for testing mid-spatial-frequency wavefront, a statistical method based on small-aperture interferometer is proposed, and the uncertainty is analyzed. Testing system is set up, and the sub-region tilt compensating method is developed. Testing resolution is improved. Theoretical and experimental result shows that for 400 mm×400 mm analyzing region, when the number of sub-region is set to 4×4 and confidence level is 95.4%, uncertainty is ±0.266 nm. In comparing test with large-aperture interferometer, deviation between two methods in analyzing region of 400 mm×400 mm is less than 5%. Sub-region statistical analyzing method is a useful compensation for large-aperture testing method and plays a critical role for optimization of advanced optical fabrication technics.

**Key words** measurement; wavefront testing; statistical method; large flat; root mean square of mid-spatial-frequency wavefront

**OCIS codes** 120.3940; 120.4800; 120.5050; 070.2615

## 1 引言

惯性约束聚变系统(ICF)中包含有数以千计的大口径光学元件,对光学元件波前质量的评价除常规的波前峰谷(PV)值、均方根(RMS)值外,对全频段波前都提出了严格的质量要求<sup>[1,2]</sup>。其中波前中频段误差会在系统终端造成焦斑旁瓣,且是高功率

激光系统中引起非线性自聚焦的重要原因<sup>[3,4]</sup>,严重危害激光系统的安全运行,是高功率固体激光系统特别关注的参数。美国国家点火装置(NIF)定义波前中频段的空间周期在 2.5 mm 至 33 mm 之间,除采用不同角度方向的一维波前功率谱密度(PSD)作为质量评价参数外,更多关注的是中频波前的均

收稿日期: 2011-06-27; 收到修改稿日期: 2011-09-30

基金项目: 中国工程物理研究院资助项目(05010708)资助课题。

作者简介: 柴立群(1973—),女,硕士,副研究员,主要从事精密光学检测技术方面的研究。E-mail: chailiqun@163.com

方根值(定义其为 PSD1)<sup>[5,6]</sup>,并提出了具体的指标要求,如在大口径反射镜反射波前的 PSD1 值要求不超过 1.8 nm 等。为保证 PSD1 检测结果的置信度,相应地要求检测设备(大口径干涉仪)的系统传递函数(STF)在 2.5 mm 空间周期处优于 0.7,并且系统信噪比优于 10:1<sup>[7]</sup>。国内大口径干涉仪在 STF 上并不能完全满足 PSD1 的检测需求,造成了该频段光学元件加工和控制的盲区,已成为限制系统性能提升的瓶颈环节之一。国内基于统计理论<sup>[8]</sup>,利用小口径干涉仪测量大口径元件子区域波前,并利用各子区域 PSD 的加权平均来间接得到大口径元件的 PSD,没有分析各子区域波前的相关性等引入的测量不确定度,且没有进行定量的误差分析,尚不能直接用来计算 PSD1。因而本文重点利用数据统计分析的方法定量计算了 PSD1 算法及子区域测量法等引入的误差,以期实现大口径平板波前 PSD1 的定量检测,对光学元件工艺改进、质量评价等提供技术支撑,保障高功率激光装置研制的顺利进行。

## 2 PSD1 的数值计算方法

PSD1 的数值计算方法流程如图 1 所示。

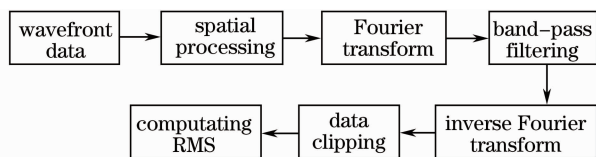


图 1 PSD1 数值计算流程图

Fig. 1 Flowchart of numerical computation of PSD1

波前  $\Phi$  经快速傅里叶变换后得到频域信息,并与频域滤波窗相乘,相乘结果再进行逆傅里叶变换,取变换结果的实部即可以得到带通滤波后的中频波前  $\Phi_{\text{bandpass}}$ ,计算方法为

$$\Phi_{\text{bandpass}} = \text{Re}\{\mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}(\Phi) \times f_{\text{filter}}]\}. \quad (1)$$

与波前梯度均方根的数值计算方法<sup>[9]</sup>类似,空域处理时需要空域添加合适的窗函数(如汉宁窗等)或采用周期延拓的方式(如 Quadflip 技术等)。加汉宁窗时,由于中心及边缘数据的权重不一样,在实际计算中,边缘数据会由于较低的信噪比而出现奇异值,对波前边缘数据的计算带来不确定性,因而文中空域处理选用 Quadflip 技术。

带通滤波选择频域滤波,滤波器的选用需要综合考虑空域的“振铃”现象与带通滤波的有效性,矩形滤波器与误差函数型滤波器(美国 NIF 系统选用)的表达式分别为

$$f_{\text{filter}}(f_x, f_y) = \begin{cases} 1 & (0.0303 \text{ mm}^{-1} \leq f \leq 0.4 \text{ mm}^{-1}) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases}, \quad (2)$$

$$f_{\text{filter}}(f_x, f_y) = \begin{cases} 0.5 \times \left[ \text{erf}\left(20 \times \left| \frac{f}{0.4} - 1 \right| \right) + \text{erf}\left(20 \times \left| \frac{f}{0.0303} - 1 \right| \right) \right] & (0.0303 \leq f \leq 0.4) \\ 1 - 0.5 \times \left[ \text{erf}\left(20 \times \left| \frac{f}{0.4} - 1 \right| \right) + \text{erf}\left(20 \times \left| \frac{f}{0.0303} - 1 \right| \right) \right] & (f > 0.4 \text{ or } f < 0.0303) \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $f_x, f_y$  分别为波前频域行、列方向频率,  $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ 。

选取部分元件工序检测波前数据,定量对比了

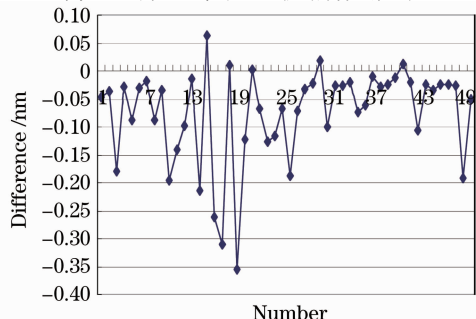


图 2 两种频域滤波器 PSD1 计算之差

Fig. 2 Difference of PSD1 computed by different filters

两种滤波器的 PSD1 计算结果之差(误差函数型滤波器减矩形滤波器计算结果),如图 2 所示。

由计算结果可见,矩形滤波器的 PSD1 计算结果总体相对误差函数型滤波器的略大,差值平均值为 0.0727 nm,这是由于矩形滤波器引入了较大的“振铃”误差所致。相对于 PSD1 的指标(如 1.8 nm 而言),误差函数型滤波器的结果更为精确。

## 3 PSD1 测试的统计方法

### 3.1 检测原理

设待测大口径平板光学元件的波前分布为  $\Phi_L(x, y)$ ,选择矩形区域用来计算,其  $x$  和  $y$  方向的空间长度为  $L_x$  和  $L_y$ ,将待测波前分成  $N$  个子区域,

第  $i$  个区域内的波前分布为  $\Phi_{L_i}(x, y)$ ,  $\Phi_{L_i}(x, y)$  在第  $i$  个区域外的值为零, 则大口径波前  $\Phi_L(x, y)$  可理解为

$$\Phi_L(x, y) = \sum_{i=1}^N \Phi_{L_i}(x, y), \quad (4)$$

设  $\Phi_L(x, y)$  的频谱为  $V(u, v)$ ,  $\Phi_{L_i}(x, y)$  的频谱为  $V_i(u, v)$ , 根据线性理论可知全口径波前的功率谱密度  $f_{\text{PSD-L}}(u, v)$  可表示为<sup>[6,8,10]</sup>

$$f_{\text{PSD-L}}(u, v) = |V(u, v)|^2 / (L_x L_y) = \left| \sum_{i=1}^N V_i(u, v) \right|^2 / (L_x L_y) = \frac{1}{L_x L_y} \left[ \sum_{i=1}^N L_{x_i} L_{y_i} f_{\text{PSD-L}_i}(u, v) + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \sqrt{f_{\text{PSD-L}_i}(u, v) f_{\text{PSD-L}_j}(u, v)} \cos \theta_{ij}(u, v) \right], \quad (5)$$

式中  $f_{\text{PSD-L}_i}(u, v)$  表示第  $i$  个区域内的波前功率谱密度,  $\theta_{ij}(u, v)$  表示频谱复数  $V_i(u, v)$  和  $V_j(u, v)$  相位之差, 对随机分布的波前函数而言, 可以认为  $V_i(u, v)$  和  $V_j(u, v)$  中的相位分量是不相关的, 因此可认为  $\theta_{ij}$  是在  $0 \sim 2\pi$  间均匀分布的随机数, 则  $\cos \theta_{ij}$  的期望值为 0, 因此(5)式变为<sup>[8]</sup>

$$f_{\text{PSD-L}}(u, v) \approx \frac{1}{L_x L_y} \left[ \sum_{i=1}^N L_{x_i} L_{y_i} f_{\text{PSD-L}_i}(u, v) \right] = \frac{S_i}{S_0} \sum_{i=1}^N f_{\text{PSD-L}_i}(u, v). \quad (6)$$

根据巴塞伐能量守恒定律, 由子区域波前 PSD1 的加权平均即可以得到大口径平板的 PSD1 值, 各子区域面积权重相等的情况下, 大口径平板的 PSD1 值由(6)式计算得

$$F_{\text{PSD1}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N/2} f_{\text{PSD-L}_i} \times \Delta\nu} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N f_{\text{PSD-L}_i}^2}{N}}. \quad (7)$$

在实际测量时, 先用大口径干涉仪(空间分辨率较低)得到大口径光学元件的波前  $\Phi_L(x, y)$ , 然后用小口径高分辨率干涉仪测量每个子区域波前  $\Phi_{0i}(x, y)$ (已去倾斜和平移量)。在  $\Phi_L(x, y)$  中找到与  $\Phi_{0i}(x, y)$  在空间上匹配的区域  $\Phi_{L_i}(x, y)$ , 对  $\Phi_{L_i}(x, y)$  进行最小二乘拟合得到该区域的倾斜量和平移量  $k_{L_x}$ ,  $k_{L_y}$  和  $d_L$ , 则可以将子区域波前  $\Phi_i(x, y)$  修正为

$$\Phi_i(x, y) = \Phi_{0i}(x, y) + k_{L_x} x + k_{L_y} y + d_L, \quad (8)$$

然后计算  $\Phi_i(x, y)$  的 PSD1, 并按照(6)式计算大口径平板波前的 PSD1。

### 3.2 误差分析

采用子区域统计法测量 PSD1, 其误差来源除数值计算方法外, 主要来源于子区域数量及子区域与全口径倾斜量的差异引入的误差。

由  $N$  个相同大小的子区域组合而成, 可表示为

#### 3.2.1 子区域数量选择

为保证一定的置信度, 干涉仪系统测量的一维有效频率区间定义为

$$3f_0 < f < f_N/2, \quad (9)$$

式中  $f_0 = 1/L_0$  表示最低空间频率, 其中  $L_0$  为一维采样长度,  $N$  为 CCD 采样点数,  $f_N$  为 Nyquist 采样频率。由于中频波前定义空间周期为  $2.5 \sim 33$  mm, 因而为有效测量 33 mm 的空间周期, 子区域的采样长度需大于 99 mm。从而子区域的数量必须限制在一定范围内, 如对于  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  的元件, 子区域划分数量不得大于  $16(4 \times 4)$ , 而不可能无限制地增加。

为了定量地评估子区域数量对计算误差的影响, 选取了 50 组实测数据, 在不同子区域数量情况下, 按(6)式计算元件全口径的波前 PSD, 并在全频段积分 PSD 得到波前均方根  $R_{\text{RMS1}}$ , 与由波前直接计算出的均方根  $R_{\text{RMS2}}$  相减,  $R_{\text{RMS1}} - R_{\text{RMS2}}$  与子区域数量的关系见图 3,  $R_{\text{RMS1}} - R_{\text{RMS2}}$  的方差与子区域数量的关系见表 1。

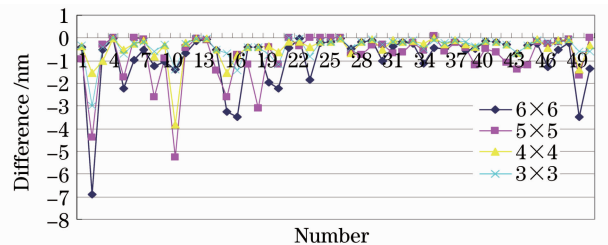


图 3 不同子区域数量时的计算误差

Fig. 3 Error induced by different numbers of sub-region

表 1 不同子区域数量时  $R_{\text{RMS1}} - R_{\text{RMS2}}$  的方差

Table 1 Standard deviation of  $R_{\text{RMS1}} - R_{\text{RMS2}}$  for different numbers of sub-region

Number of sub-region	3×3	4×4	5×5	6×6
$\sigma / \text{nm}$	0.499	0.611	1.097	1.231

由计算结果可见,计算精度随着子区域数量的增加会有一定程度的下降,原因在于计算  $R_{RMS1}$  时采用(6)式,忽略了各子区域波前的相关性,随着子区域数量的增加,该项引入的误差越来越大,如何准确求解(5)式中的相关项来进一步降低计算误差,还有待进一步的深入研究。

### 3.2.2 波前倾斜量引入误差

为评价子区域波前与全口径波前倾斜量差异引入的误差,利用 65 组大口径平板元件的工序检测波前数据,并统一选取  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$  大小区域用来模拟计算 PSD1。如图 4 所示进行子区域划分(各子区域之间无重叠),分别计算了子区域去倾斜、不去倾斜的情况下利用(6)式计算的全口径波前 PSD1,以及全口径波前数据直接计算的 PSD1,结果如图 5 所示。

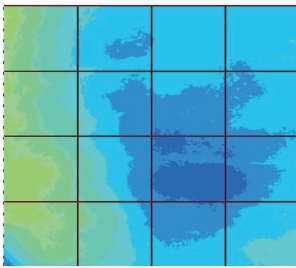


图 4 大口径平板子区域划分示意图

Fig. 4 Diagram of distribution of sub-region of large flat

其中方法 1、2 分别代表子区域去倾斜、不去倾斜的情况下计算的全口径 PSD1 值,方法 3 代表全口径波前数据直接计算得到的 PSD1 值。图 5 中方法 1、2 两组数据与方法 3 数据的差值分别如图 6 中曲线 1、2 所示。

图 6 曲线 1 与曲线 2 的平均值分别为  $-0.025\text{ nm}$

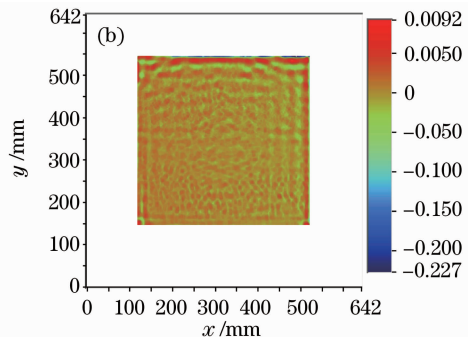
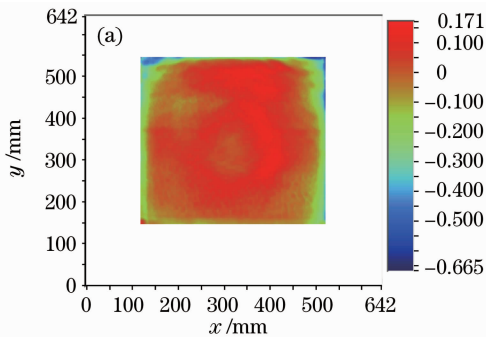


图 7 大口径干涉仪检测结果。(a)测试波前;(b)中频波前

Fig. 7 Testing result of large-aperture interferometer. (a) Testing wavefront; (b) mid-spatial frequency wavefront

其次在子区域波前 PSD1 检测系统上进行了测试,干涉仪测试口径为  $\phi 150\text{ mm}$ (对应测试方形子区域最大约为  $106\text{ mm} \times 106\text{ mm}$ ),采样间距为

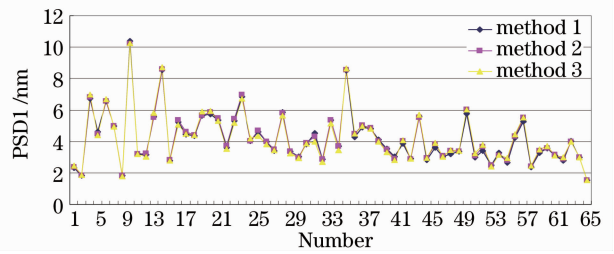


图 5 不同方法计算的大口径平板的 PSD1 值

Fig. 5 Computed PSD1 for large flat using different methods

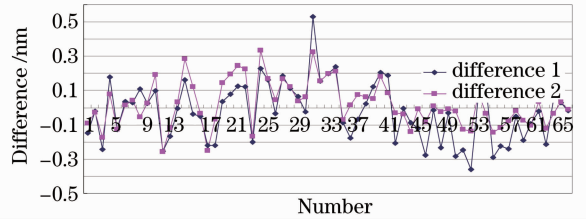


图 6 子区域去倾斜与否计算的 PSD1 之差

Fig. 6 Difference of PSD1 of tilt-removed or not of sub-aperture

及  $0.019\text{ nm}$ ,方差分别为  $0.171\text{ nm}$  及  $0.133\text{ nm}$ 。可见子区域不去倾斜,即与全口径波前对应区域保持相同倾斜量的情况下,可以得到较高的测试精度,不确定度为  $\pm 0.133\text{ nm}$  时,置信水平为  $69.2\%$ ,不确定度为  $\pm 0.266\text{ nm}$  时,置信水平为  $95.4\%$ 。

### 3.3 实 验

由于目前缺乏更高精度的 PSD1 检测溯源方法,检测精度的考核只能通过两种方法的对比实验开展。利用一块大口径平板,并选取  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$  区域进行计算比对。首先在 ZYGO 24" 干涉仪上进行了测试,波前测试结果及中频波前计算结果如图 7 所示,PSD1 为  $9.182\text{ nm}$ 。

$0.165\text{ mm}$ 。大口径元件的放置方向为垂直放置,为实现多个子区域波前测试,元件平移支撑台必须能够实现水平及垂直方向的定量平移,同时要求能够



实现大口径元件的精密倾斜、俯仰调节。实测子区域波前数据经过倾斜补偿处理后,计算得到的各子

区域中频波前见图 8,相应的 PSD1 计算结果见表 2。

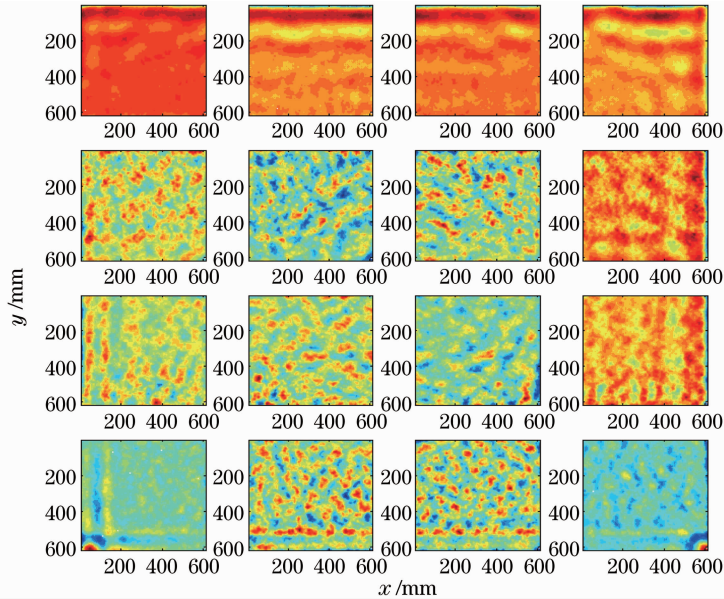


图 8 子区域中频波前图

Fig. 8 Diagram of mid-spatial frequency of sub-aperture wavefront

表 2 子区域 PSD1 计算值(单位: nm)

Table 2 Computed PSD1 of sub-aperture (unit: nm)

15.660	15.456	12.903	12.297
5.544	5.226	4.577	6.214
5.350	4.094	4.425	5.405
8.954	6.604	5.931	7.934

由表 2,根据(7)式计算得到全口径 PSD1 为 8.788 nm,由图 8 可知,当元件存在塌边等相位变化较大区域时,其对应部分的 PSD1 值相对较大。

目前存在的主要问题是两种口径干涉仪 STF、信噪比、波前测试精度等均不一致,对大口径干涉仪直接检测法而言,存在的主要误差由 STF 偏低引入,统计检测法则主要由子区域相关性、倾斜补偿的拟合误差等引入,但由对比实验可以看出,两种方法的检测结果接近,PSD1 检测偏差相对误差不到 5%。子区域统计检测法测试过程较为繁琐,但可以有效评价各子区域的 PSD1,对加工工艺的优化及最终产品质量的控制有着独特的优点,相对于大口径干涉仪检测法,不失为一种较好的补充检测方法。

## 4 结 论

针对大口径平板元件 PSD1 的检测,建立了 PSD1 的数值计算方法和子区域统计检测方法的理论模型,提出采用小口径高分辨率干涉仪检测子区域波前 PSD1,实现大口径平板波前 PSD1 的检测。

利用实测波前数据重点进行了数值计算方法、子区域数量选择、倾斜补偿法的误差分析,计算结果表明误差函数型滤波器相对矩形滤波器计算结果更为精确;在忽略子区域相关性的情况下,子区域的数量以较少为宜;子区域与全口径对应区域保持相同倾斜量的情况下,针对 400 mm×400 mm 分析区域,子区域数量设置为 4×4,置信水平为 95.4%时,测量不确定度为±0.266 nm。利用子区域 PSD1 检测装置,与大口径干涉仪直接检测的全场结果进行了对比实验,实验结果表明两种方法检测结果偏差小于 5%,子区域统计分析法不失为一种有效的、可操作性较强的检测方法,其突出优点在于同时可得到各子区域 PSD1 的定量检测结果,对先进光学制造工艺过程的优化有着特别重要的参考意义。但如何准确求解各子区域的相关性,以进一步提高 PSD1 的检测精度,尚需要进行深入的研究。

## 参 考 文 献

- 1 D. M. Ailens. The origin and evolution of the optics specification for the National Ignition Facility[C]. *SPIE*, 1995, **2536**: 2~12
- 2 M. Bray, A. Liard, G. Chabassier. Laser mégajoule optics(I): new method of optical specification [C]. *SPIE*, 1999, **3739**: 449~460
- 3 Liu Hongjie, Jing Feng, Zhuo Yanlei *et al.*. Relation between wavefront power spectral density and wings of focal spot[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 504~508  
刘红婕,景峰,左言磊等.激光波前 PSD 与焦斑旁瓣的关系[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 504~508
- 4 Dai Yaping, Xie Hu, Li Yingzhu *et al.*. Propagation of power

- spectral density: theoretical and numerical analysis[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4): 337~342
- 戴亚平, 谢 虎, 李银柱 等. 功率谱密度传输性质的理论分析和数值模拟[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4): 337~342
- 5 D. M. Aikens, C. R. Wlofe, J. K. Lawson. The use of power spectral density (PSD) function in specifying optics for the National Ignition Facility[C]. *SPIE*, 1995, **2576**: 281~291
- 6 J. M. Eison, J. M. Bennett. Calculation of the power spectral density from surface profile data[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(1): 201~208
- 7 C. R. Wolfe, J. D. Downie, J. K. Lawson. Measuring the spatial frequency transfer function of phase-measuring interferometers for laser optics [ C ]. *SPIE*, 1996, **2870**: 553~557
- 8 Xu Jiancheng, Xu Qiao, Chai Liqun. Statistical measurement of power spectral density of large optical component [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1905~1908
- 徐建程, 许 乔, 柴立群. 大口径光学元件功率谱密度的统计法测量[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(8): 1905~1908
- 9 Chai Liqun, Xu Qiao, Si Qikai. Study of numerical computation of wavefront gradient of optics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(6): 841~844
- 柴立群, 许 乔, 石琦凯. 光学元件波前梯度的数值计算方法[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(6): 841~844
- 10 Chai Liqun, Yu Yingjie, Si Qikai *et al.*. Wavefront testing of large-aperture continuous phase plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 809~814
- 柴立群, 于瀛洁, 石琦凯 等. 大口径连续相位板波前检测[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 809~814

栏目编辑:李文喆