

文章编号: 1001- 4322(2001)02- 0133- 04

大口径光学元件检测中的主要误差及其影响*

张蓉竹¹, 许 乔², 顾元元², 蔡邦维¹

(1. 四川大学 光电系, 四川 成都 610064; 2. 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘 要: 使用 PSD 作为大口径光学元件的质量评价标准, 为保证检测系统的精度, 标定了作为测试系统的大口径相移干涉仪的系统传递函数, 并讨论了对 ICF 驱动器中所使用的光学元件进行检测时产生的两种主要误差, 即: 由于放置倾斜导致的低频误差和由干涉条纹引入的高频误差。同时还分析了这些误差在进行计算和分析时可能造成的影响以及消除的方法。

关键词: 大口径光学元件; 传递函数; 误差; PSD

中图分类号: O 437 **文献标识码:** A

由于 PSD (Power Spectral Density) 具有很强的频谱描述功能被认为是一种非常适合于大口径元件使用的评价标准^[1,2], 在实际检测工作中, 为保证测量的精度, 必须对所使用的干涉仪的传递函数进行标定, 这样才可能避免由仪器本身或由检测过程所带来的影响, 而得到真实的检测结果。在进行传递函数标定时, 一般采用相位比较法, 为此我们设计了高精度台阶位相板, 并得到了标定结果。由于测量过程中会出现各种误差, 如倾斜导致的低频误差、干涉条纹导致的误差等等, 本文针对在大口径光学元件检测过程中的这些误差及其影响作了较为深入和仔细的讨论。

1 PSD 的计算

根据定义可知, 可由如下公式计算被检光学元件的 PSD 值 $P(f)$ ^[3]

$$P(f) = \frac{\Delta x}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} z(n) e^{-i2\pi f n \Delta x} \right|^2 \quad (1)$$

式中 $z(n)$ 是所测得的元件的空间位相值; N 是总采样点数; Δx 是采样间距; f 是空间频率。很明显, 这里采用的是离散傅立叶变换的计算方法。由于计算本身的不连续性, 导致了计算得到的 PSD 曲线出现了较强的不稳定的振荡。为了减少该不稳定性带来的误差, 同时也为了得知整个被测面的信息, 我们将多条采样线所对应的 PSD 值在频域上进行了平均, 所使用的公式为式(2), 其中 P_i 是单条采样线的 PSD 值。

$$P(f)_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(f) \quad (2)$$

2 检测系统的传递函数 G_{OTF}

在使用干涉仪对光学元件进行具体检测前, 为保证仪器的测量精度, 必须对所使用的干涉仪的传递函数进行标定, 这样才可能避免由仪器本身或由检测过程所带来的影响(如非相干导致的高频信息的损失), 而得到真实的检测结果。在使用 PSD 进行干涉仪的传递函数标定时, 一般采用相位比较法, 即将测量所得的 PSD 值与理论计算所得的 PSD 值相比而得

$$G_{\text{OTF}}(f) = \sqrt{P(f)_{\text{test}}/P(f)_{\text{ideal}}} \quad (3)$$

由(3)式可知, 在进行系统的传递函数的标定时, 必须有一个已知的理论上的 PSD 值, 因此我们设计并制作了一个高精度、具有已知相位信息的标准的台阶相位板^[1,2], 其检测结果如图 1。相位高度差为 100nm, $\phi 00\text{mm}$ 。通过干涉仪测得的数据计算得到实测 PSD 值, 而根据理想台阶相位值计算得到 PSD

* 收稿日期: 2000-11-27; 修订日期: 2001-01-09

基金项目: 惯性约束聚变青年科学基金资助课题

作者简介: 张蓉竹(1975-), 女, 博士研究生, 现在主要从事精密检测及强激光非线性传输问题的研究。

的理论值。在具体计算中, 为了避免由于不同算法带来的计算误差, 我们构造了标准位相板的数学模型, 可用阶跃函数 $z(x) = \begin{cases} 50\text{nm}, & 0 < x < 50 \\ -50\text{nm}, & 50 < x < 100 \end{cases}$ 来表示, 式中 x 是样品的长度坐标。使用了相同的计算公式(1)得到 $P(f)_{\text{ideal}}$ 和 $P(f)_{\text{test}}$ 。通过(3)式得到的系统 G_{OTF} 结果如图 2 所示。

由图可见我们使用的这一检测系统(大口径相移干涉仪)的频率响应特性。由于大口径干涉仪的低通滤波性能, 在较高频段时其传递数值仅分别为 0.75 (透射, 图 2(b)) 和 0.70 (反射, 图 2(a)) 左右。同时, 因为我们所使用的离散傅立叶变换在频率为 0 时没有确定值的存在, 所以在接近零频时的值是不准确的, 存在较大误差。

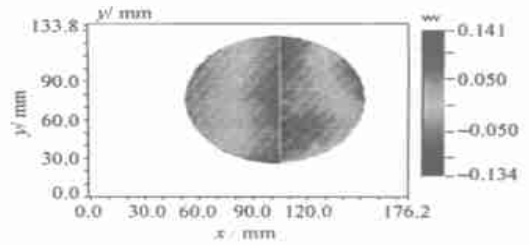


Fig 1 The testing result of the step employed in the calculation process

图 1 计算所用台阶板检测结果(透射方式)

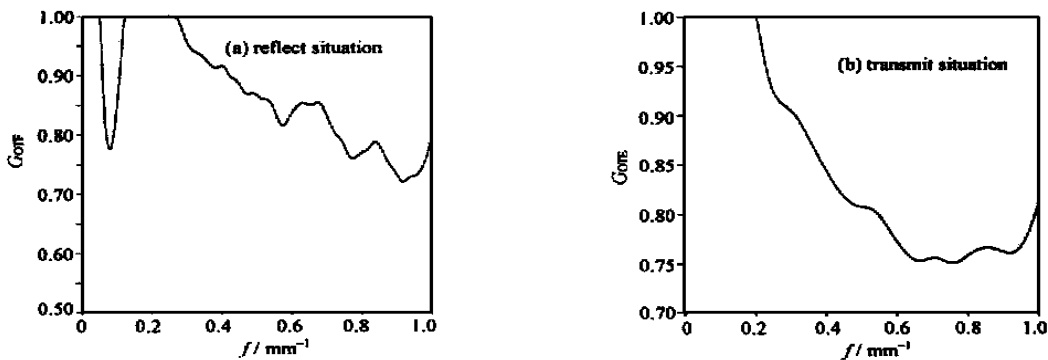


Fig 2 The transfer functions of the system in reflect and transmit situation

图 2 反射和透射情况下的系统传递函数

3 使用 PSD 定标时的主要误差及其影响

在使用干涉仪对大口径光学元件进行检测时, 不可避免的会引入一些误差, 如放置时的倾斜和检测时被检元件两个面反射光产生的干涉条纹引入的调制等。下面分别对这两种情况进行讨论。

3.1 由光学元件放置引入的低频误差

检测时待检元件与干涉仪标准板之间的相对位置是很难保证完全平行的, 这样使得我们得到的相位图形并非一个水平的台阶, 而是倾斜的, 由于我们计算 G_{OTF} 时使用的是平的数学台阶计算 $P(f)_{\text{ideal}}$, 为了确保传递函数的正确性, 我们通过最小二乘法拟合将其矫正, 如图 3、4 所示, 图中横坐标是样品表面尺寸的长度坐标, 纵坐标表示被测物体的位相高度。

这一误差从频域上看在整个计算中属于低频信息, 为讨论该误差对 PSD 以及系统传递函数计算的影响, 我们分别对这两种情况进行 PSD 计算, 并比较其结果如图 5、6。比较两个结果, 明显可以看到, 倾斜状况下的 PSD 曲线在较低频时有比较大的振荡且整条曲线振荡趋势很不规则; 校偏后所得的 PSD 曲线在低频部分的振荡相对较弱, 而且整个曲线的振荡显得较有规则。图 5、6 都是根据同一条采样线进行计算的结果, 为了进一步讨论这两种情况下的区别, 我们将相对应的 20 条采样线进行平均运算, 然后使用(4)式将两条平均 PSD 曲线在对应频率进行比较。

$$V = P_1(f) / P_2(f) \tag{4}$$

式中 P_1 是倾斜状况下的平均 PSD 值; P_2 则是对应校偏后的平均 PSD 值。其比值 V 则具体反映了校偏前后计算结果的差距。注意图 5、6 的纵轴为对数坐标, 比较后的结果如图 7, 图中横坐标是空间频率, 纵坐标是相对比值。由图可见, 相同的采样线在不同情况下得到的 PSD 值有一定差别。表现在, 校偏前的 PSD 值要小于校偏后约 0.6 个数量级, 尤其是靠近零频附近的值相差很大, 这也说明由于计算方法(离

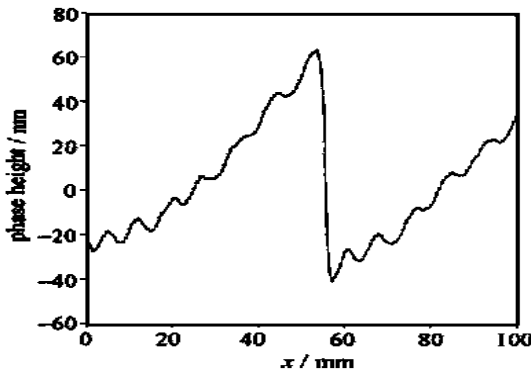


Fig 3 The phase data of the defective step
图 3 倾斜状况下的台阶相位图形

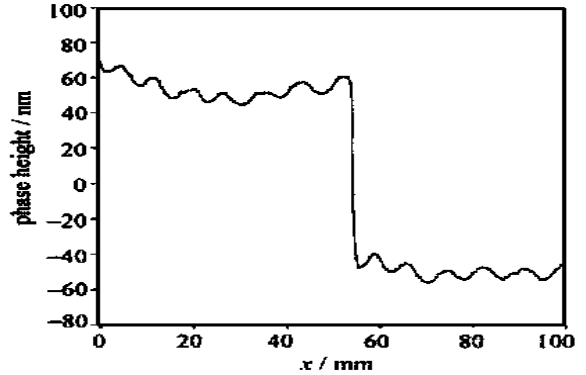


Fig 4 The phase data of the parallel step
图 4 校偏后的台阶相位图形

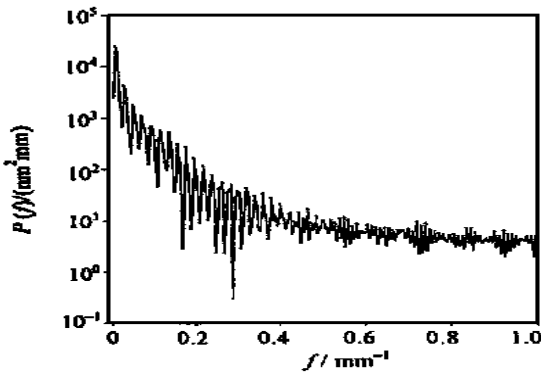


Fig 5 The PSD curve of the defective step
图 5 倾斜状况下的 PSD 曲线

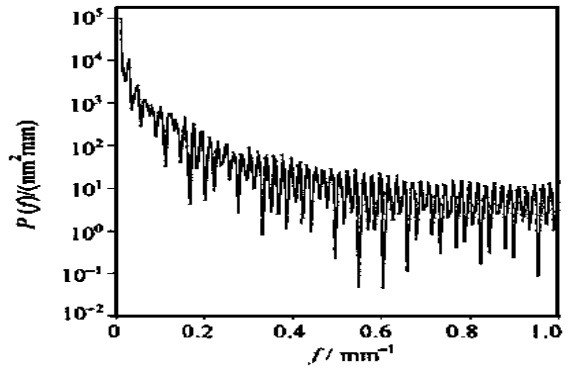


Fig 6 The PSD curve of the parallel step
图 6 校偏后的 PSD 计算结果

散傅立叶变换)带来的零频附近值是不可靠的。因此由于不可避免的放置倾斜带来的低频误差会给我们的 PSD 分析带来一定的影响,在求 G_{OTF} 或做其他分析时应先将该低频误差消除。

3.2 由干涉条纹引入的较高频段误差的影响

除了元件在检测过程中由于放置带来的低频倾斜误差外,在大口径光学元件的检测中常常还会出现一种高频的误差调制,那是由于被检元件两个表面反射光产生干涉所带来的。从图 1 中可以清楚地看到干涉条纹,在频域分析中认为这些条纹所带的是较高频段的噪声,从台阶相位图中则表现为台阶平面上的波动。为讨论这一噪声的影响,我们可以通过利用商用软件中的 Gaussian 内核平滑函数对数据进行平滑处理,使之更符合我们进行 G_{OTF} 标定时的运算要求,得到如图 8 所示图形。

将图 8 与图 4 进行比较可看出,原本加在台阶平台上的调制已基本消除。将这一较光滑的相位数据进行 PSD 计算后得到如图 9 所示的结果。

比较图 9 与图 6,可见这两个图并没有太大的差别,整个趋势都非常相似,为得到更为明确的结论,我们同样进行了对应 PSD 曲线的比较,结果如图 10 (95% 以上的比值约为 1)。因此,我们可以说检测过程中的高频误差不会对我们的分析造成直接的影响。

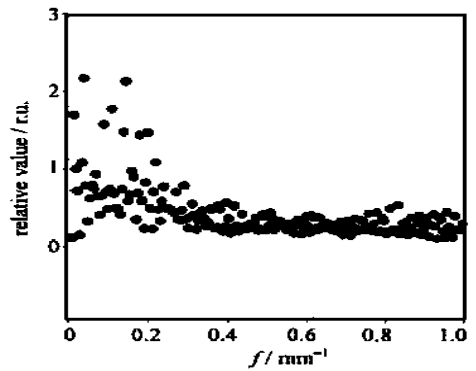


Fig 7 The compare result of the defective and the parallel step
图 7 校偏前后 PSD 曲线对应频段值比较

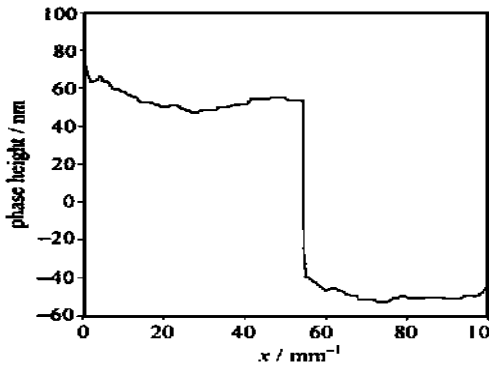


Fig 8 The phase data of the step after been smoothed
图 8 消除干涉条纹引入的高频误差后的相位图形

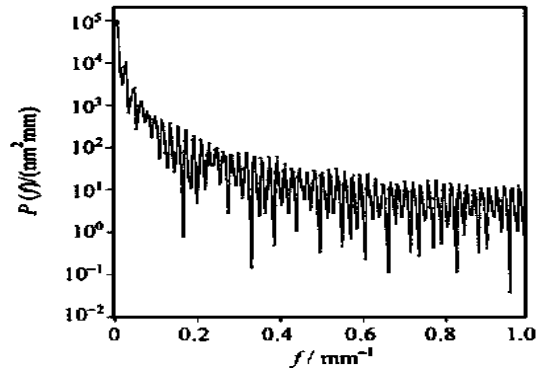


Fig 9 The PSD curve of the smooth step
图 9 平滑处理后的台阶 PSD 计算结果

4 结 论

在使用 PSD 对元件进行质量评价时,要先讨论可能的几种误差,主要是由于放置倾斜导致的低频误差和由于干涉条纹引起的高频误差。本文首次使用台阶相位板对我国现有的大口径干涉仪进行了传递函数标定和误差分析。通过计算得出结论:低频误差对 PSD 计算有一定的影响,而高频误差对 PSD 的计算影响不大。由此我们可以在对大口径光学元件的面型进行 PSD 分析时,对基本的误差采取适当的处理方式,即运算前将倾斜的相位数据进行矫正,从而得到可靠的分析结果。

参考文献:

- [1] Takacs P Z, Li M X O, Furenlid K. A step-height standard for surface profiler calibration[A]. SPIE[C], 1993, 1993: 65
- [2] Novak E, Ai C, Wyant J C. Transfer function characterization of laser Fizeau interferometer for high spatial frequency phase measurements[A]. SPIE[C], 1997, 3134: 114
- [3] 张蓉竹,蔡邦维,杨春林,等. 功率谱密度的数值计算方法[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 661.
[Zhang R Z, Cai B W, Yang C L, et al Numerical method of the power spectral density of the wavefront. High power laser and particle beams, 2000, 12(6): 661] (in Chinese)
- [4] Lawson J K, Wolf C R, Manes J B, et al. Specification of optical components using the power spectral density function[A]. SPIE[C], 1995, 2536: 38
- [5] Aikens D M. The origin and evolution of optics specifications for the National Ignition Facility[A]. SPIE[C], 1995, 2536: 2
- [6] Daniels A. Random transparency targets for modulation transfer function measurements in the visible and infrared regions[J]. Opt Eng, 1995, : 860
- [7] Harris F J. On the use of windows for Harmonic analysis with the discrete Fourier transform[J]. IEEE, 1978, 66: 51
- [8] Aikens D M, Wolf C R, Lawson J K. The use of Power Spectral Density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility[A]. SPIE[C], 1995, 2576: 281.

Testing errors and its influence of the large aperture optical elements

ZHANG Rong-zhu¹, XU Qiao², GU Yuan-yuan², CAI Bang-wei¹

(1. Optoelectronic Department of Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

Abstract In this paper, the power spectral density is employed as the specification criterion of the large aperture optical elements because it has the function to describe the fabrication quality of the optical elements in frequency domain. To guarantee the precision of the testing process, the transfer function of the testing system has been confirmed. Furthermore, the main errors appeared in the testing process and their influences have been discussed in detail. The results show that the low frequency error, which caused by the placement, affect the testing result greatly. And the high frequency error, which caused by the interference, does not have more effect on the testing.

Key words: large aperture optical elements; transfer function; errors; power spectral density