

# 惯性约束聚变系统中米量级光学元件 波面误差检测技术研究进展

徐隆波<sup>1</sup> 周游<sup>2</sup> 朱日宏<sup>1</sup> 刘世杰<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

**摘要** 介绍了惯性约束聚变系统中米量级光学元件的中低频波面误差检测技术及其研究进展, 包括大口径 Fizeau 干涉仪直接检测法、瑞奇-康芒检测法、斜入射检测法和子孔径拼接检测法。阐述了各种检测方法引入的测量误差及误差消除方法, 对进一步提高波面误差测量精度的必要性和方法进行了展望。

**关键词** 激光技术; 中低频波面误差; 干涉检测; 测量误差

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.120001

## Research Progress on Wavefront Aberration Detection Technology of Meter-Sized Optical Elements in Inertial Confinement Fusion Systems

Xu Longbo<sup>1</sup> Zhou You<sup>2</sup> Zhu Rihong<sup>1</sup> Liu Shijie<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** The low and medium frequency wavefront aberration detection techniques of meter-sized optical elements applied in inertial confinement fusion system and their research progress are introduced, which includes direct detection based on large-aperture Fizeau interferometers, Ritchey-Common detection method, oblique detection method, and sub-aperture stitching detection method. The introduction of measurement errors and corresponding elimination methods are illustrated, and the necessity of further improving the measurement accuracy of wavefront aberration and methods are prospected.

**Key words** laser technique; low and medium frequency wavefront aberration; interferometric detection; measurement error

**OCIS codes** 140.3295; 120.4630; 120.3180

## 1 引言

惯性约束聚变(ICF)是实现受控热核反应的主要方式之一, 目前普遍采用激光驱动方式。用于驱动 ICF 的高功率激光装置对光学元件的质量和数量均有较高要求。由于波面特性会影响光束的近场分布、远场分布和频率转换效率, ICF 系统对光学元件的波面误差提出了较高要求, 通常根据其空间频率将全频段波面误差划分为低频误差、中频误差、高频误差三部分<sup>[1]</sup>。

低频误差是指空间尺度大于 33 mm 的波面误差, 用于表征测试口径内的最大波面误差的峰谷值(PV)和一定空间周期范围内波面误差梯度的均方根(GRMS)值。中频误差是指空间尺度介于 0.12~33 mm 的波面误差, 用于表征特定空间频率上的相位噪声振幅的平方, 通常用波面的中频段误差均方根(RMS)值和

收稿日期: 2016-05-10; 收到修改稿日期: 2016-07-13; 网络出版日期: 2016-12-06

作者简介: 徐隆波(1979—), 男, 本科, 助理研究员, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: 13541740240@163.com

\* 通信联系人。E-mail: shijieliu@siom.ac.cn

功率谱密度(PSD)曲线(又称塌陷曲线)来综合表征光学元件的波面中频误差。中频段又分为中频 I 段(2.5~33 mm)和中频 II 段(0.12~2.5 mm),本文所述的 PSD1 和 PSD2 分别表示中频 I 段和中频 II 段波面误差的 RMS 值。一般规定功率谱密度曲线不可以超过临界曲线。高频误差是指空间尺度小于 0.12 mm 的波面误差,通常用表面粗糙度均方根值表征。

以国家点火装置(NIF)为例,该装置需要数千件个通光口径不小于 42 cm×42 cm 的大口径平面光学元件,这些光学元件大部分为矩形,外形尺寸(对角线)接近甚至超过 1 m,主要包括以下几种类型<sup>[2-3]</sup>。

1) 大口径钹玻璃片。作为激光增益介质,用于激光器的主放大系统和功率放大系统,与激光传输方向呈布儒斯特角放置以降低玻璃表面的反射损耗、提高钹玻璃片对抽运光的吸收效率;外形尺寸为 810 mm×460 mm×40 mm,每束 18 片,共需 3456 片,要求透射波面误差 PV 值优于  $\lambda/3$ ( $\lambda=632.8$  nm)、GRMS 值优于 7.7 nm/cm、PSD1 优于 1.8 nm、PSD2 优于 1.1 nm。

2) 大口径偏振片。用于主放大器系统,与激光传输方向呈布儒斯特角放置,配合大口径电光开关,用于控制和保持激光束的偏振方向,表面镀有满足一定反射率和透射率的介质膜,能够对不同偏振方向的激光进行筛选;外形尺寸为 810 mm×430 mm×90 mm,要求反射波面误差 PV 值优于  $\lambda/3$ 、GRMS 值优于 7.7 nm/cm、PSD1 优于 1.8 nm、PSD2 优于 1.1 nm。

3) 大口径传输反射镜。位于功率放大器系统之后、末级空间滤波器和终端光学系统之间,与激光束呈一定角度放置,用于改变光束传输方向、实现光束编组<sup>[2]</sup>;表面镀有高反射率的介质膜,外形尺寸随工作角度略有变化,典型尺寸为 610 mm×440 mm×85 mm,要求透射波面误差 PV 值优于  $\lambda/3$ 、GRMS 值优于 7.7 nm/cm、PSD1 优于 1.8 nm、PSD2 优于 1.1 nm。

4) 脉冲压缩光栅。该类元件为衍射光学元件,是利用脉冲压缩光栅的色散特性对激光脉冲宽度进行压缩来获得皮秒甚至飞秒量级的高功率激光脉冲,需要具备良好的波面特性和负载能力。为满足系统要求,脉冲压缩光栅的设计尺寸为 1400 mm×380 mm×150 mm,全口径反射波面误差 PV 值优于  $0.7\lambda$ ,该类元件的通光口径远远超出现有主流干涉仪的检测范围。

综上所述,ICF 系统中的米量级光学元件具有尺寸大、精度高、数量多等特点,为了能够满足装置建造对质量、进度、成本、效率的要求,需采取适当的检测方法来保证米量级大口径光学元件的检测精度和检测效率,以提高元件的加工精度和加工效率,并为产品的最终检验提供质量评判依据。本文对米量级光学元件的低、中、高频波面误差的主要测量方法及研究进展进行了详细梳理,特别是对每种检测方法的误差来源及消除方法进行了仔细分析,这些结果为米量级光学元件波面误差测量方法的选择及改进提供了建议和参考。

## 2 波面误差检测技术

### 2.1 低频波面误差检测技术

光学元件低频波面误差的高精度检测主要采用干涉检测法。干涉检测法是基于光波叠加原理,通过分析干涉场的明暗分布、条纹形状和条纹级数,从而获取被测元件的波面误差信息,具有量程大、精度高等特点。目前使用较多的干涉检测方法主要有 4 种,分别为大口径 Fizeau 干涉仪直接检测法<sup>[4]</sup>、瑞奇-康芒(Ritchey-Common)检测法<sup>[5]</sup>、斜入射检测法<sup>[6]</sup>和子孔径拼接检测法<sup>[7]</sup>。

#### 2.1.1 大口径 Fizeau 干涉仪直接检测法

美国 ZYGO 公司研制的 ZYGO 相移干涉仪和 4D 公司推出的动态干涉仪是目前最常见的数字激光干涉仪。ZYGO 相移干涉仪是一个双通道测量系统,具备相位调制、波长调谐、动态测量等多种高精度测量模式。随着相关技术的发展,激光干涉仪的测量口径从 4 inch (10.16 cm)扩大至 32 inch (81.28 cm),电荷耦合器件(CCD)分辨率达到 1024 pixel×1024 pixel 甚至更高。结合 ZYGO 提供的测试软件可以获得高精度的测量结果<sup>[8]</sup>,小口径测量通道 PV 值准确度可以达到  $\lambda/30$ ,大口径测量通道采用卧式结构,平面样品的测量 PV 值准确度可以达到  $\lambda/10$ 。

对于尺寸达到米量级的光学元件,由于受到干涉仪测量口径的限制,无法在正入射情况下对其进行全口径波面误差的测量。但对于大口径钹玻璃片这类在激光系统中以布儒斯特角放置的光学元件,可以在使用角度下进行测量,获得全口径透射波面误差,测量光路如图 1 所示。

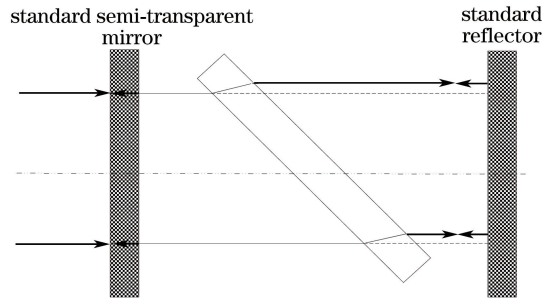


图1 布儒斯特角下透射波面误差测量光路图

Fig. 1 Optical path for detecting transmitted wavefront aberration under Brewster angle

大口径 Fizeau 干涉仪直接检测法属于相对测量,测量误差主要包括干涉仪标准透射镜和反射镜表面制造误差、光线偏转走离误差以及外界环境气流扰动造成的随机误差,这些误差都会影响测量结果的准确度<sup>[4,9-11]</sup>。降低测量误差的方法主要有以下几种。

1) 干涉仪系统空腔误差配修。为降低干涉仪的空腔误差,在加工干涉仪标准镜的时候,先将标准透射镜的参考波面 PV 值加工到  $\lambda/12$ ,精修标准反射镜的参考面面形,使这两个标准面组合产生的空腔误差达到最小,最大程度降低干涉仪空腔误差对测量结果的影响。以 ZYGO 的 600 mm 口径干涉仪为例,有效口径内的空腔误差 PV 值可以达到  $\lambda/12$ ,如图 2 所示,其中色度条不同颜色表示相对于理想零平面的不同高度值。对于透射波面误差 PV 值大于  $0.2\lambda$  的光学元件,空腔误差可以忽略。

2) 去除系统空腔误差。为获得高精度的测量结果,可以测量并扣除干涉仪的空腔误差。在正入射条件下测量光学元件的透射波面误差时,可以直接在检测结果中扣除干涉仪的空腔误差,但必须保证元件透射波面与干涉仪空腔波面空间位置的一致性,即元件透射波面与干涉仪空腔波面必须点对应。在布儒斯特角条件下测量元件透射波面误差时,需要考虑光束折射产生的错位误差,如图 3 所示,其中  $h$  为被测元件的厚度, $\alpha$  为入射角, $d_1$  为错位量。放置元件前后两个标准镜的空腔匹配不同,需要计算错位量。

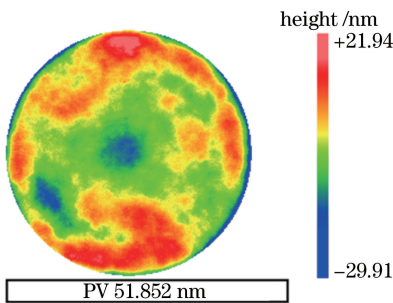
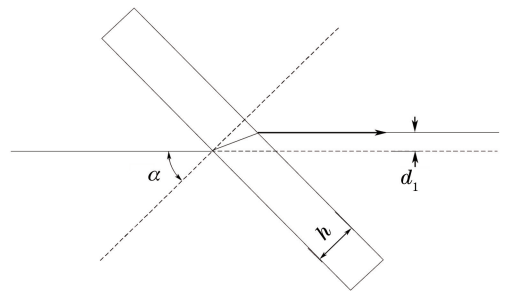


图2 空腔误差分布图

Fig. 2 Distribution map of empty cavity error

图3 斜入射法测量光线偏折示意图<sup>[12]</sup>Fig. 3 Schematic diagram of light walk-off in oblique detection method<sup>[12]</sup>

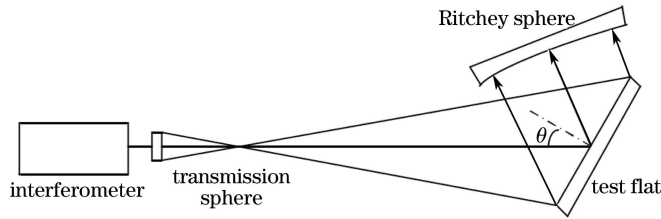
错位量  $d_1$  与被测元件的厚度  $h$ 、折射率  $n$  及入射角  $\alpha$  有关<sup>[12]</sup>,可表示为

$$d_1 = \frac{h \sin \alpha (\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \quad (1)$$

由(1)式可知,在测量平行平板元件透射波面误差时,若入射角度为  $57^\circ$ ,元件厚度为 42 mm,元件材料的折射率为 1.54,则入射光束经过被测元件后的整体偏移量为 20.4 mm。为消除错位误差,需要在获取系统空腔误差前将标准反射镜向光线偏离方向移动相应距离,这样才能保证系统空腔误差去除的准确性。

### 2.1.2 瑞奇-康芒检测法

瑞奇-康芒法是一种较为传统的、用于检测大口径平面元件反射波面误差的检测方法,原理是干涉仪准直光束经过标准镜头以球面波的形式出射,干涉仪镜头的焦点恰好位于标准球面镜的曲率中心,被测平面元件以一定角度插入测试光路,测试光束经被测平面元件反射到标准球面镜,再沿原光路返回到干涉仪内部,

图4 瑞奇-康芒检测法测量光路图<sup>[13]</sup>Fig. 4 Optical path of Ritchey-Common detection method<sup>[13]</sup>

与参考光束发生干涉,从而获得被测平面元件波面误差,测量光路如图4所示。

瑞奇-康芒检测法的优点是可以用小口径干涉仪来实现大口径平面元件的波面误差检测。但要实现米量级光学元件的全口径检测,需要一个口径大于被测元件的球面镜(1.3倍左右)。球面镜的制造与检测技术相对成熟,球面镜自身的制造误差可以通过测量获得,并可以作为系统误差在测试结果中扣除。

温度变化、自重、支撑机构引起的变形都会影响大口径光学元件的面形。其中支撑方式的影响尤为显著,合适的支撑方式对保持大口径光学元件面形精度尤为重要。标准球面镜和被测平面元件均可以采取钢带支撑、背面辅以重锤分散重力的方式来降低自重引起的面形变化<sup>[14]</sup>。调整机构可采用旋转平台和俯仰调整轴,以实现两个自由度的电控调整。

采用瑞奇-康芒检测法获得的波像差可以分解为4部分:干涉仪球面镜头的透射波面误差、标准球面反射镜的反射波面误差、被测元件的反射波面误差以及干涉仪系统的离焦误差。其中干涉仪球面镜头和标准球面反射镜的波面误差可以预先标定,作为系统误差予以扣除。而干涉仪系统的离焦误差与被测元件的反射波面误差混在一起,需要旋转角度进行两次测量来将二者分离<sup>[15-16]</sup>。

为了利用瑞奇-康芒法实现平面光学元件波面误差的高精度检测,文献[5]中提出了利用检测系统光瞳面与被测平面镜表面的坐标映射关系插值拟合平面镜面形的方法,结合最小二乘法,计算光路调整引入的离焦误差,获得更为真实的平面镜波面误差,测量误差RMS可控制在 $\lambda/100$ 量级<sup>[16]</sup>。

在实际测试时,瑞奇角作为影响瑞奇-康芒检测精度的主要因素,它的选择范围及其计算精度对测试结果有较大影响<sup>[17]</sup>。通过仿真,认为瑞奇角的最佳范围为 $20^\circ \sim 50^\circ$ ,且当瑞奇角测量误差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内时,测量误差可以忽略。

瑞奇-康芒法在恢复被测平面元件波面误差过程中通常会用到拟合方法,被测元件的中频波面误差会损失,因此瑞奇-康芒法常被用作ICF系统中米量级大口径光学元件加工过程的检测。

### 2.1.3 斜入射检测法

斜入射检测法<sup>[6,18-19]</sup>的基本原理是将小口径平面干涉仪出射的测量光束以一定倾斜角度照射到被测平面上,在被测平面元件后合适位置处放置一个与干涉仪等口径的标准反射镜,反射镜将测量光束按原光路反射回干涉仪,并与参考光束发生干涉,从而获取被测元件的波面误差,测量光路如图5所示。斜入射检

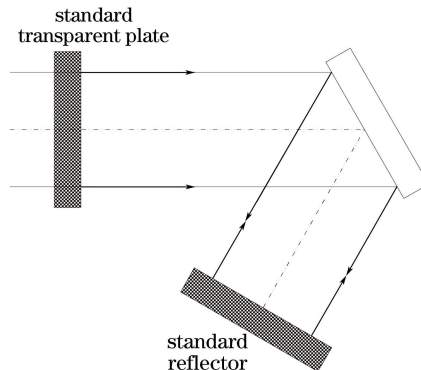


图5 斜入射检测法测量光路图

Fig. 5 Optical path of oblique detection method



测法的特点是使用小口径的平面镜作为参考镜,平面参考镜与被测平面镜之间的距离很短,降低了空气扰动、温场变化对检测结果的影响。当被测平面元件的形状与参考镜的口径满足一定条件时,才可以进行全口径检测,测量精度受限于干涉仪标准参考镜的波面误差。

斜入射检测法只能在一个方向上扩展测量范围,有一定局限性。然而,应用于 ICF 系统中的大口径偏振片和反射镜的有效通光口径基本上都不超过 410 mm,该方法可以利用 600 mm 口径干涉仪实现长度不大于 900 mm 的光学元件的全口径波面误差测量。

在检测冷加工后的光学元件基板时,由于干涉仪标准反射镜表面通常没有镀膜,在斜入射下光束经被测表面多次反射后形成的干涉条纹对比度会明显降低,因此,选择和调整入射角时需要考虑干涉条纹的对比度能否满足干涉仪的测量要求。

对于镀有高反膜的元件,在正入射情况下由于反射率太高而无法进行测量,利用斜入射法可以提高干涉条纹的对比度。也有一些镀膜元件在实际使用角度(如  $45^\circ$ )下反射率很小,干涉条纹对比度很差,无法进行测量;但当入射角调整到  $60^\circ$  时反射率显著增大,可以获得满足要求的干涉条纹图像,这种情况可以通过换算得到实际使用角度下的波面误差,如图 6 所示。

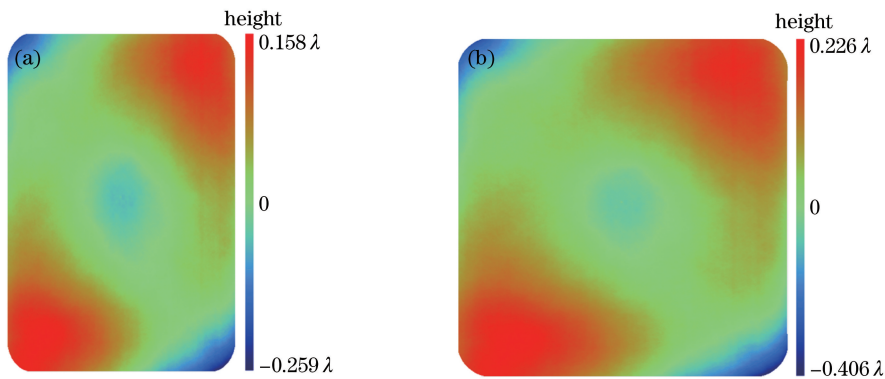


图 6 反射波前图。(a) 入射角  $60^\circ$ ; (b) 换算后的,入射角  $45^\circ$

Fig. 6 Reflection wavefront maps. (a)  $60^\circ$  incidence; (b) calculated,  $45^\circ$  incidence

#### 2.1.4 子孔径拼接检测法

子孔径拼接检测法的基本原理是将被测大口径平面镜的整个表面划分成若干个子孔径,各子孔径之间有一定的重叠;用小口径平面干涉仪按预先设定的路线依次对各个子孔径进行波面误差检测,利用子孔径重叠部分信息提取出各个参考面之间的相对平移、倾斜等信息,依次将各子孔径波面误差放到同一个坐标系下进行拼接处理,进而得到大口径平面镜波面误差。

在子孔径拼接测试过程中,经常会出现外界环境因素导致的错位误差、随机误差以及机械结构导致的子孔径定位误差等,这些误差通常表现为封闭子孔径循环拼接时的剩余误差。针对此问题国内外已提出多种误差均化算法,并取得了良好效果。然而,干涉仪参考镜波面误差引入的系统误差会在子孔径拼接过程中被放大,最终影响拼接检测的精度。Bray<sup>[20]</sup>讨论了拼接累积误差,认为参考镜波面误差的二阶项在拼接过程中会造成拼接误差的累积,即误差的放大效应。为了降低参考镜波面误差对拼接精度的影响,Chen 等<sup>[21]</sup>提出了利用 Zernike 二阶多项式对子孔径间重叠区域数据进行拟合的方法,在拼接结果中消除参考面拟合数据以获得较高的拼接精度<sup>[7,22-23]</sup>。文献 [21]指出,当被测平面面形精度较高且拼接次数较多时,由于存在误差的放大效应,参考镜自身的离焦和象散须在  $\lambda/1000$  量级,同时采用更高阶的 Zernike 多项式进行拟合。

对于口径超过 1 m 的脉冲压缩光栅,可使用 600 mm 大口径干涉仪结合一维精密移动平台拼接测量的方法,测量光路如图 7 所示。仅在一维方向上移动被测测量级光学元件,采用顺序扫描拼接模式和误差均化的拼接算法就可以实现全口径内的波面误差检测。比较石英玻璃材料光学均匀性的直接测量结果与拼接结果,如图 8 所示。由图可知,拼接检测方法测量精度 RMS 优于  $\lambda/100$ 。该方法解决了米量级光学元件表面面形加工误差的工程测量问题,为米量级光学元件材料均匀性的测量提供了解决方案。

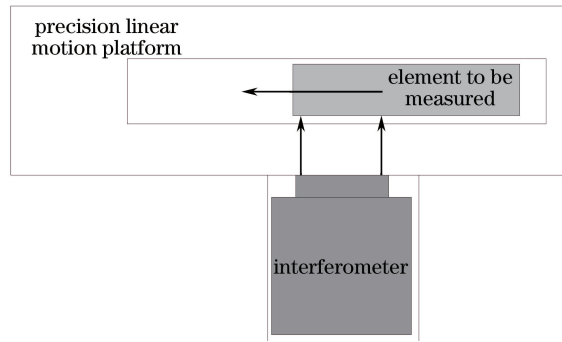


图 7 子孔径拼接检测示意图

Fig. 7 Illustration of sub-aperture stitching detection

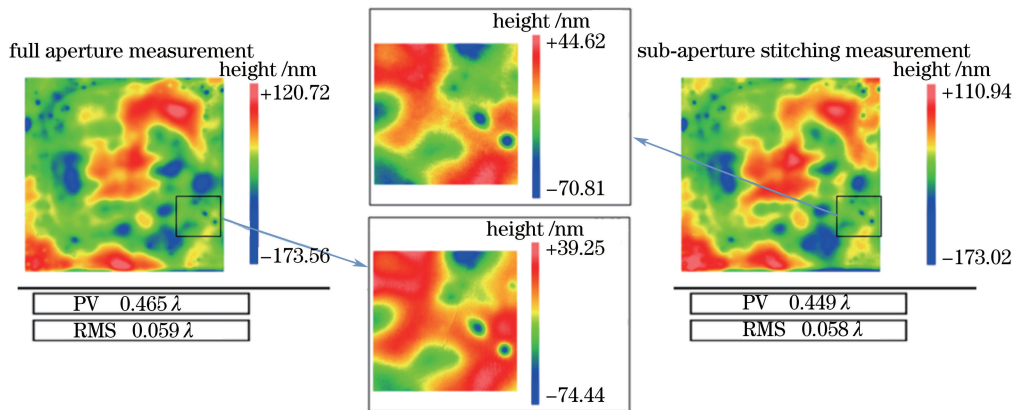


图 8 材料均匀性的直接测量结果与拼接结果的比较

Fig. 8 Result comparison of material homogeneity between direct measurement and sub-aperture stitching detection

## 2.2 中频波面误差检测技术

### 2.2.1 中频 I 段 PSD1 检测方法

对于中频 I 段 PSD1 的测量,由于中频 I 段最高空间频率为  $0.4 \text{ mm}^{-1}$ ,采用 600 mm 的大口径干涉仪可直接检测,检测方法同 2.1 节的低频波面误差检测方法,得到检测数据后再使用滤波算法进行计算分析<sup>[24-27]</sup>,即可得到中频 I 段的 PSD1。PSD1 的检测精度主要受干涉仪的系统传递函数和分辨率、干涉仪标准镜的系统误差及样品的平行度等因素的影响<sup>[28]</sup>。

干涉仪的系统传递函数是表征干涉仪对不同空间频率幅值的衰减程度,会影响干涉仪测量的纵向分辨率和中频误差的测量准确性。因此为了降低干涉仪系统传递函数的影响程度,需要对整个干涉仪的光学系统和结构进行优化分析。为了能够检测到中频 I 段的空间频率段<sup>[29]</sup>,对干涉仪的分辨率提出了一定的要求。中频 I 段的最高空间频率为  $0.4 \text{ mm}^{-1}$ ,那么对于口径为 600 mm 的干涉仪,其 CCD 分辨率至少为  $960 \times 960$ ,对应的横向分辨率应高于  $0.63 \text{ mm/pixel}$ 。对实验室引进的 ZYGO 干涉仪进行系统传递函数的测量,在空间频率为  $0.4 \text{ mm}^{-1}$  的条件下,系统传递函数一般可达到 70% 以上。

干涉仪的标准镜同样会引入自身制造过程中产生的中频误差,一般规定制造中产生的中频误差应小于被测样品的  $1/3$ ,这对标准镜的加工提出了较高的要求。对于某些 PSD1 要求非常高的光学元件(如优于  $0.8 \text{ nm}$ ),在检测过程中需要采用绝对检测技术来标定标准镜的自身误差,从而在检测结果中进行扣除,以实现绝对测量<sup>[30-31]</sup>。

对于高平行度光学元件(平行平板)的测量,多次反射会在测量结果中产生寄生条纹,这对中频的测量会造成非常大的影响<sup>[28]</sup>,未消除寄生条纹的检测结果如图 9 所示,其中 PSD1 为  $2.4 \text{ nm}$ 。如果在测量过程中遇到这种情况,对于平行度没有严格要求的元件,通常会加工成一定的楔角。而对平行度具有较高要求的元件,通常需要使用可切换成不同偏振态(圆和线偏振态)的干涉仪,并使用线偏振光源进行测量,或者结合使用波长调谐移相干涉仪,以增加干涉仪激光器的调谐频率从而消除寄生条纹,得到被测光学元件真实的中频

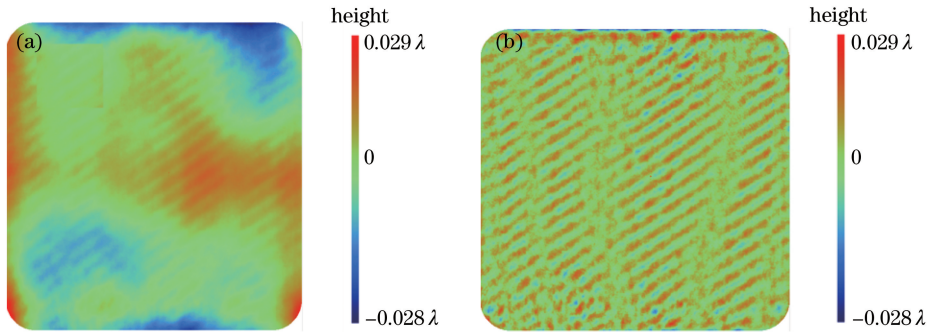


图 9 带有寄生条纹的 (a) 波前和 (b) 中频 I 段波面误差分布图

Fig. 9 (a) Wavefronts and (b) aberration distributions at medium frequency I with additional fringes

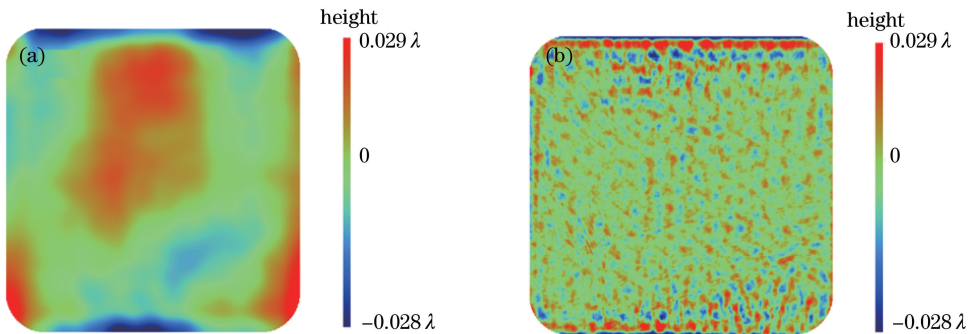


图 10 消除寄生条纹后的 (a) 波前和 (b) 中频 I 段波面误差分布图

Fig. 10 (a) Wavefronts and (b) aberration distributions at medium frequency I with additional fringes suppressed

误差分布。采用线偏振光源消除寄生条纹后的检测结果如图 10 所示,其中 PSD1 为 1.5 nm。

### 2.2.2 中频 II 段 PSD2 检测方法

对于中频 II 段 PSD2 的测量,由于中频 II 段的最高空间频率为  $8.3 \text{ mm}^{-1}$ ,因此大口径干涉仪的分辨率无法满足其测量要求,需要使用高分辨率小口径干涉仪(图 11)或光学轮廓仪(图 12)进行检测<sup>[32-33]</sup>。

通过高分辨率小口径干涉仪或光学轮廓仪对大口径元件表面进行离散采样检测后,取平均得到整块元件的 PSD2,对 PSD2 的检测除确保检测系统具有较高测量精度和重复性精度外,关键在于离散采样量及分布的选取。理论上,取样越充分越能够使检测结果接近真值,但取样量的增加会加大检测工作量,且检测周期的加长会导致检测结果易受环境的影响。邓燕等<sup>[34]</sup>经过实验证明,对于应用在 ICF 系统中口径为 410 mm 的光学元件,在中频 II 段的误差分布基本呈随机分布的状态,  $5 \times 5$  和  $3 \times 3$  采样的检测结果相差并不大,因而  $3 \times 3$  的采样方式足以满足要求,如图 13 所示。

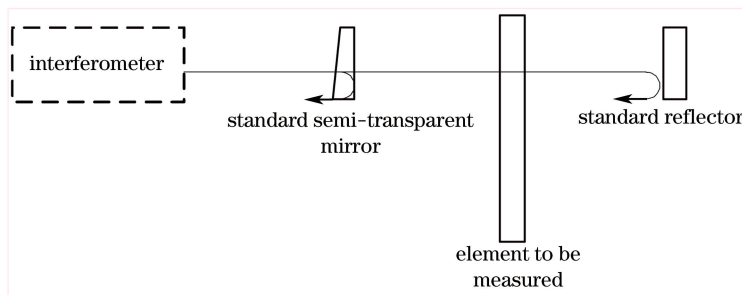


图 11 高分辨率小口径干涉仪测量示意图

Fig. 11 Schematic diagram of measurement by small-bore interferometer with high resolution

PSD2 的检测精度同样受干涉仪的系统传递函数和分辨率、干涉仪标准镜的系统误差等因素的影响。为了能够检测到 PSD2 的空间频率段,无论是高分辨率干涉仪还是光学轮廓仪,当最高可测空间频率达到  $8.3 \text{ mm}^{-1}$  的要求时,系统传递函数一般都大于 80%<sup>[32]</sup>。对于 10 mm 的测量口径,设备的分辨率必须高于

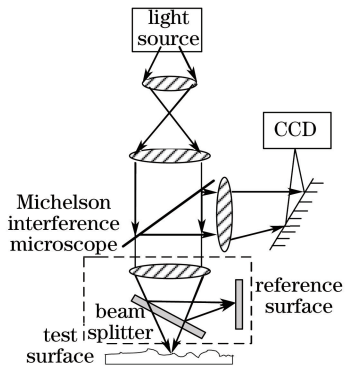
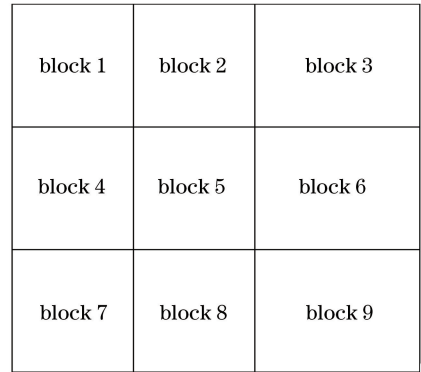
图 12 光学轮廓仪测量示意图<sup>[32]</sup>Fig. 12 Schematic diagram of measurement by optical profiler<sup>[32]</sup>

图 13 采样区域示意图

Fig. 13 Illustration of sampling areas

0.03 mm/pixel, 两个设备的系统 PSD2 同样应小于被测样品的 1/3。

高分辨率小口径干涉仪相比于光学轮廓仪具有调整视场大和测量速度快的优点, 通过增加标准反射镜还可以实现光学元件透射波面 PSD2 的测量。光学轮廓仪具有更高的系统传递函和横向分辨率, 通过匹配和切换不同倍率的镜头, 还可以实现更高空间频率的测量, 测量范围比干涉仪更加突出。

### 3 结束语

介绍了应用于 ICF 系统的不同类型米量级光学元件的低、中频波面误差检测技术及研究进展, 分析了影响低、中频波面误差测量精度的各类因素, 并评述了相应的解决方法。为获得较大的单束输出能量和较好的光束质量, 研究人员对 ICF 系统的光学元件提出了非常严格的要求, 波面误差是关键指标之一。这些要求接近现有加工水平的极限, 且现有检测设备和检测方法的检测精度也已基本接近元件的加工精度, 对于大口径干涉仪标准镜自身的波面误差, 需要寻求具备更高精度的方法来标定和消除。借鉴中小口径绝对检测技术的经验, 未来还需要进一步研究更大口径的绝对检测技术。

目前 ZYGO 公司已提出 800 mm 口径平面干涉仪标准镜的绝对检测方法, 该检测方法可以保证得到高置信度的低频波面误差分布, 但不适用于绝对中频误差分布的检测。国外研究人员提出了基于斜入射法实现绝对面形的测量方法, 但在实际测量过程中该方法的重复性精度需要进行进一步实验验证。

综上所述, 在大口径光学元件的高精度测量过程中, 仍然需要对关键的检测方法和装置进行深入研究; 同时基于现有的大口径干涉检测装置, 还要建立大口径纳米量级高置信度计量装置和寻求标准传递技术, 以实现其他同类设备的量值溯源。

### 参 考 文 献

- 1 Wolfe C R, Lawson J K. The measurement and analysis of wavefront structure from large aperture ICF optics[C]. SPIE, 1995, 2633: 361-385.
- 2 English R E, Jr, Laumann C W, Miller J L, *et al.* Optical system design of the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1998, 3482: 726-736.
- 3 Baisden P A, Atherton L J, Hawley R A, *et al.* Large optics for the National Ignition Facility[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 295-351.
- 4 Deck L L. Model-based phase shifting interferometry[J]. Applied Optics, 2014, 53(21): 4628-4637.
- 5 Zhu Shuo, Zhang Xiaohui. Comparative study on data processing method for large flat mirror in Ritchey-Common test[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(5): 698-703.  
朱 硕, 张晓辉. 瑞奇-康芒式大口径平面镜面数据处理方法对比研究[J]. 应用光学, 2015, 36(5): 698-703.
- 6 Han Zhigang, Chen Lei, Gao Bo, *et al.* Absolute flatness measurement method based on oblique incidence testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 707-712.



- 韩志刚, 陈磊, 高波. 基于斜入射的平面度绝对检验方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 707-712.
- 7 Zhou You, Wang Qing, Liu Shijie. A method to modify systematic errors in the stitching[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 051202.
- 周游, 王青, 刘世杰. 一种修正子孔径拼接中系统误差的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 051202.
- 8 ZYGO. Large aperture systems[EB/OL]. [2016-07-11]. [http://www.zygo.com/?/met/interferometers/large\\_aperture/](http://www.zygo.com/?/met/interferometers/large_aperture/).
- 9 de Groot P J. Correlated errors in phase-shifting laser Fizeau interferometry[J]. Applied Optics, 2014, 53(19): 4334-4343.
- 10 Xu Kaiyuan, Li Qiang, Liu Ang, *et al.* Accuracy transfer method of large aperture standard mirrors' absolute surface error[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3210-3214.
- 徐凯源, 李强, 刘昂, 等. 大口径标准镜绝对面形精度传递方法[J]. 强激光与离子束, 2013, 25(12): 3210-3214.
- 11 Guo Renhui, Li Jianxin, Zhu Rihong, *et al.* An adaptive phase selecting method of wavelength tuning at long interference cavity length[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0112004.
- 郭仁慧, 李建欣, 朱日宏, 等. 长干涉腔波长移相计算的自适应相位筛选法[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112004.
- 12 Li Qiang, Liu Ang, Gao Bo, *et al.* Error analysis of absolute test method of inhomogeneity of optical materials[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(3): 463-468.
- 李强, 刘昂, 高波, 等. 光学材料光学不均匀性绝对测量误差分析[J]. 应用光学, 2013, 34(3): 463-468.
- 13 Tian Xiuyun, Wu Shibin, Wu Fan, *et al.* Quantitative test method of Ritchey-Common test in large high precision flat measurements[J]. Optical Technique, 2004, 30(4): 486-488.
- 田秀云, 吴时彬, 伍凡, 等. 高精度大口径平面镜瑞奇-康芒定量检测方法研究[J]. 光学技术, 2004, 30(4): 486-488.
- 14 Feng Shulong, Zhang Xin, Weng Zhicheng, *et al.* Study on support way of large-aperture mirror with flat rear surface[J]. Optical Technique, 2004, 30(6): 679-681.
- 冯树龙, 张新, 翁志成, 等. 大口径平背形主镜支撑方式的选择[J]. 光学技术, 2004, 30(6): 679-681.
- 15 Zhu Shuo, Zhang Xiaohui. Study on high precision Ritchey-Common test and analysis of test distance influence[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0112001.
- 朱硕, 张晓辉. 高精度瑞奇-康芒检测法研究及测试距离精度影响分析[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0112001.
- 16 Zhu Shuo, Zhang Xiaohui. Application of error detaching to Ritchey-Common test for flat mirrors[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 7-12.
- 朱硕, 张晓辉. 误差分离技术在平面镜瑞奇-康芒法检测中的应用[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 7-12.
- 17 Zhu Shuo, Zhang Xiaohui. Analysis and verification for accuracy of Ritchey angle in flat mirror test[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612001.
- 朱硕, 张晓辉. Ritchey角精度对平面镜检测的影响的分析与验证[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612001.
- 18 Ma Chuntao, Luo Hongxin, Wang Jie, *et al.* Surface error measurement of plane mirrors based on oblique incidence[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(7): 071201.
- 马春桃, 罗红心, 王劫, 等. 斜入射法检测平面反射镜的面形误差[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7): 071201.
- 19 Liu Zhaodong, Chen Lei, Han Zhigang, *et al.* Measurement of large aperture SiC flat mirrors by oblique incidence interferometry[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1437-1443.
- 刘兆栋, 陈磊, 韩志刚, 等. 斜入射干涉检测大口径碳化硅平面反射镜[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1437-1443.
- 20 Bray M. Stitching interferometry and absolute surface shape metrology: Similarities[C]. SPIE, 2001, 4451: 375-383.
- 21 Chen S Y, Dai Y F, Li S Y, *et al.* Error reductions for stitching test of large optical flats[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(5): 1543-1550.
- 22 Deng Wantao, Wang Kaiwei, Bai Jian, *et al.* Elimination of reference surface error on high-accuracy subaperture stitching[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1194-1198.
- 邓万涛, 汪凯巍, 白剑, 等. 高精度子孔径拼接中参考面误差的去除方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1194-1198.
- 23 Li Yong, Tang Feng, Lu Yunjun, *et al.* A Method for reducing the error accumulation in sub-aperture stitching interferometer for flat optics[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0708006.
- 李永, 唐锋, 卢云君, 等. 一种降低平面子孔径拼接累积误差的方法[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708006.
- 24 Williams W H. NIF large optics metrology software: Description and algorithms[R]. Livermore: Lawrence Livermore

- National Laboratory, 2000: 1-48.
- 25 Jiang Tao, Yang Wei, Guo Yinbiao, *et al.* Mid-spatial frequency error identification of precision based on empirical mode decomposition-Wigner-Ville distribution[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(3): 032003.  
姜涛, 杨炜, 郭隐彪, 等. 基于经验模态分解-Wigner分布的光学元件中频误差识别[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(3): 032003.
- 26 Xu Qiao, Gu Yuanyuan, Chai Lin, *et al.* Measurement of wavefront power spectral density of large optical components [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3): 344-347.  
许乔, 顾元元, 柴林, 等. 大口径光学元件波前功率谱密度检测[J]. 光学学报, 2001, 21(3): 344-347.
- 27 Chai Liqun, Xu Qiao, Deng Yan, *et al.* Study on numerical computation of wavefront power spectrum density in high power laser system[J]. Optical Technique, 2005, 31(4): 577-579.  
柴立群, 许乔, 邓燕, 等. 强激光系统波前功率谱密度的数值计算研究[J]. 光学技术, 2005, 31(4): 577-579.
- 28 Liu S J, Jin C X, Zhou Y, *et al.* Investigation on measurement of mid-frequency wavefront error for large optics in high-power laser system[C]. SPIE, 2015, 9525: 952536.
- 29 Xu Jiancheng, Deng Yan, Chai Liqun, *et al.* The effect of CCD on high spatial resolution interferometric optical test[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5): 793-796.  
徐建程, 邓燕, 柴立群, 等. CCD对高空间分辨率波前干涉检测的影响[J]. 光子学报, 2006, 35(5): 793-796.
- 30 Evans C, Smith C, Soobitsky J, *et al.* Full area calibration of large optical flats[C]. ASPE Topical Meeting, 2009: 7-10.
- 31 Tinker F, Bray M, Smith D, *et al.* Full surface mapping and calibration of large interferometer flats[C]. SPIE, 2007, 6671: 1-12.
- 32 Sykora D M, de Groot P. Instantaneous measurement Fizeau interferometer with high spatial resolution[C]. SPIE, 2011, 8162: 812610.
- 33 de Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 1-65.
- 34 Deng Yan, Wang Xiangfeng, Ji Baojian, *et al.* Measurement of mid-frequency wavefront for large-aperture optics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3333-3337.  
邓燕, 王翔峰, 嵇保建, 等. 大口径光学元件中频波前的检测[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3333-3337.