

# 激光与光电子学进展

## 面向制造的光学面形超精密测量技术研究进展

陈善勇<sup>1,2</sup>, 薛帅<sup>1,2</sup>, 熊玉朋<sup>1,2</sup>, 彭小强<sup>1,2</sup>, 戴一帆<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学智能科学学院装备综合保障技术重点实验室, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>超精密加工技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 超精密测量是光学制造的前提。高精度的光学面形测量仍然遵循零位检验原则, 计算机生成全息图(CGH)是自由曲面等复杂面形零位检验所必需的补偿器。为此, 面向制造过程, 重点论述CGH补偿检验原理及其衍射级次的鬼像干扰、投影畸变校正、测量不确定度与绝对检验问题, 探讨CGH补偿检验的局限与应对方法。针对制造过程中产生的动态演变局部大误差的测量难题, 论述子孔径拼接测量、自适应补偿干涉测量方法, 探讨加工原位干涉测量进展。最后, 从超高精度测量与溯源、混合光学零件的宏微跨尺度测量、自主可控面形测量仪器及其原位集成三个方面对光学面形测量技术发展进行展望。

**关键词** 测量; 超精密测量; 零位检验; 光学面形计量; 光学自由曲面; 计算机生成全息图

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222608

### Research Progress of Ultra-Precision Measurement of Optical Surfaces for Manufacturing

Chen Shanyong<sup>1,2</sup>, Xue Shuai<sup>1,2</sup>, Xiong Yupeng<sup>1,2</sup>, Peng Xiaoqiang<sup>1,2</sup>, Dai Yifan<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Ultra-Precision Machining Technology of Hunan Province, Changsha 410073, Hunan, China

**Abstract** Ultra-precision measurement is the precondition for optics manufacturing. Null test is still the fundamental principle for high-precision measurement of optical surfaces. Computer generated holograms are indispensable for null test of complex surfaces including freeforms. Problems oriented to manufacturing are discussed with emphasis including the principle of CGH null test and its ghost disturbance orders of diffraction, projection distortion correction, uncertainty, and absolute test. The limit of CGH null test is also presented along with possible solutions. For challenges in measuring the dynamically evolving local big errors generated during the manufacturing process, subaperture stitching test and adaptive null test methods are discussed. The progress of *in-situ* interferometry for machining is then briefly introduced. Finally a prospect of optical surface measurement is presented with focus on ultra-high precision measurement and traceability, macro-micro multiscale measurement of hybrid optics, independently controllable instruments for optical surface metrology, and *in-situ* integration.

**Key words** measurement; ultra-precision measurement; null test; optical surface metrology; freeform optical surfaces; computer generated hologram

## 1 引言

光学零件的面形精度通常要求深亚微米级或更高, 表面粗糙度优于 10 nm。光学零件制造有超精密车削和超精密研抛等不同工艺路线, 10 mm 级小口径的光学零件则多用注塑或玻璃模压工艺。无论采用何

种工艺, 要想突破加工机床“母机”精度限制, 进一步提高加工精度, 都必须采取反馈补偿机制, 因而面形误差的超精密测量显得至关重要。特别对于超精密研抛来说, 工艺本身就是基于面形误差高点对应材料去除的确定性修形过程, 面形测量精度直接决定了最终加工精度。因此, 光学测量技术研究应面向制造并领先于

收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2022-10-13; 录用日期: 2022-10-17; 网络首发日期: 2022-10-27

基金项目: 国家自然科学基金((51975578, 51991371))

通信作者: \*dyf@nudt.edu.cn

制造技术研究。20 世纪六七十年代随着 Offner 补偿检验<sup>[1]</sup>、反射式补偿检验技术<sup>[2]</sup>发展成熟,促成了以计算机控制光学表面成形(CCOS)<sup>[3]</sup>技术为代表的加工技术的飞跃式发展。随后的 30 余年内,非球面取代传统的球面成为光学系统设计的主角。进入 21 世纪后,以磁流变抛光、离子束抛光等为代表的新一代光学加工技术日渐成熟<sup>[4]</sup>,其高可控确定性使得离轴非球面得到广泛应用,自由曲面也开始崭露头角。光学自由曲面极大地增加了系统设计的自由度,可显著提升消除复杂像差的能力,其应用也从早期的照明、红外领域向可见光、紫外等短波段成像系统拓展,因而面形日趋复杂而精度要求越来越高。自由曲面不再具有回转对称性,传统的回转对称补偿器已无法胜任自由曲面的测量,计算机生成全息图(CGH)成为必不可少的补偿器,它通过全息图样(理论上可以是非回转对称的任意复杂形状)的衍射产生自由曲面测试波前,传输到被测面时与之完全匹配,实现自由曲面像差的精确补偿。CGH 补偿检验技术得到飞速发展,近十年来国内也已摆脱了原先依赖进口的局面,先后有多家单位能够设计和制作 CGH,一举扫清了自由曲面测量以及受其制约的加工技术的主要障碍。

CGH 补偿检验是一种零位检验,如果被测面没有面形误差,则得到零条纹的干涉图样。零位检验要求使用补偿器来精确补偿被测非球面或自由曲面的像差,使得测试光束经过补偿器后传输到被测面时,处处保持法向入射到被测面,此时干涉条纹直接反映了面形误差。非球面和自由曲面还有很多其他测量方法,如倾斜波前干涉仪(TWI)<sup>[5]</sup>、相位偏折术(PMD)<sup>[6-7]</sup>、剪切干涉仪<sup>[8]</sup>、Shack-Hartmann 检验<sup>[9]</sup>和相位恢复<sup>[10]</sup>等非零位检验方法,仪器读数不能直接给出面形误差,必须经过复杂计算才能得到。此外,由于在克服阿贝误差等主要误差源贡献上取得突破,基于测头扫描的轮廓仪如英国 Taylor Hobson 的 LumphoScan<sup>[11]</sup>和荷兰 TNO 的 NANOMEFOS<sup>[12]</sup>轮廓仪精度得到了显著提升,面形测量精度达到均方根(RMS)值 20 nm 左右,基本满足中等口径光学零件的测量需求,更大口径、更高精度的面形测量则还需借助零位检验。到目前为止,要想得到高精度的光学面形测量结果,零位检验仍然是必须遵守的原则。

光学面形的测量技术发展迅速,近两年国内陆续有若干代表性研究团队对最新研究进展进行了综述<sup>[13-15]</sup>。本文对此不再赘述,而是以国防科技大学精密工程研究团队的工作为基础,面向制造过程,重点介绍光学复杂面形的超精密测量技术新进展,探讨几个目前仍然值得关注或未来亟待解决的问题。

## 2 复杂面形的 CGH 补偿检验

### 2.1 CGH 补偿检验原理

波前干涉仪长期以来是光学面形超精密测量的首

选,可以在一次测量中获得全场的面形误差。干涉测量本质上测得的是被测表面与干涉仪镜头参考面之间的相对高度差,对应为被测面反射的测试光束与参考面反射的参考光束之间的光程差(OPD),反映在干涉仪探测器获取的双光束干涉条纹图中。干涉仪标准镜头有平面(TF)和球面(TS)两种,对应测试光束可认为是理想的平面波或球面波,可以直接对光学平面和球面进行零位检验,对于非球面则需要辅助的补偿器以平衡由非球面度(偏离最佳拟合球面的量)带来的像差。传统补偿器采用平面和球面组合,不能用于非回转对称的自由曲面的零位检验。CGH 在平面基底上制造衍射结构,名义上可以对测试波前产生任意相位调制,使其匹配被测的自由曲面形状,因而 CGH 已经成为自由曲面干涉测量的主流补偿器<sup>[16]</sup>。

图 1(a)为本课题组设计的 CGH 补偿检验某自由曲面的光路,点光源为 TS 的焦点,测试球面波经 CGH 衍射传输到被测面处与其理论面形匹配,被反射后沿原路返回干涉仪。被测面为含有 X、Y 交叉项的扩展多项式描述的离轴自由曲面,测试光束近似对准其几何中心法向,图 1(b)所示为最终加工的反射镜实物及测量结果,峰谷值(PV)为  $0.238\lambda$ ,其中  $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$ (下同),接近可见光衍射受限成像要求。CGH 上除了测试主全息外,还可以同步制作对准全息和标记全息,分别用于干涉仪和 CGH、被测面和 CGH 的精确对准。如图 1(c)所示,CGH 的工作原理类似线性光栅,只不过其光栅图样不是直线而是曲线。刻线周期随位置不同而变化,一个条纹周期对应  $2m\pi$  相位调制(叠加到入射波前上), $m$  为衍射级次。CGH 图样可以简单地看成是相位函数的等高线图,相位函数由入射波前与出射波前(与被测面匹配)确定。因为不需要实际物光,只通过计算机即可合成图样,理论上 CGH 可以生成任意的相位调制进而重构出零位测试所需的自由曲面波前。CGH 图样通常制作成二元台阶,具有给定的占空比。通常为了横向或轴向分离不同衍射级次的干扰,需要加入倾斜或/和离焦载频。图 1(d)为实际测量系统照片,利用对准全息和标记全息可快速实现光路对准<sup>[13]</sup>。

CGH 相位函数可通过优化或直接计算确定。例如,用 Zernike 多项式建模 CGH 的相位函数,优化多项式系数使得零位测试系统的波前误差最小。当被测面很复杂时,优化可能找不到好的结果。更直接的方法是用一个离散点集来描述相位函数,离散点上的相位值可直接计算得到,因为 CGH 相位函数是从被测面反射的测试光束传播到 CGH 平面的光程与 CGH 平面传播到干涉仪点光源的光程之和的相反数。

载频的设计对整个 CGH 补偿检验有重要影响,要检查经被测面反射、两次透过 CGH 的不同衍射级次的干扰,一方面要尽量避免出现干扰级次的衍射鬼像,另一方面要注意 CGH 制作工艺对衍射图样的最小周期

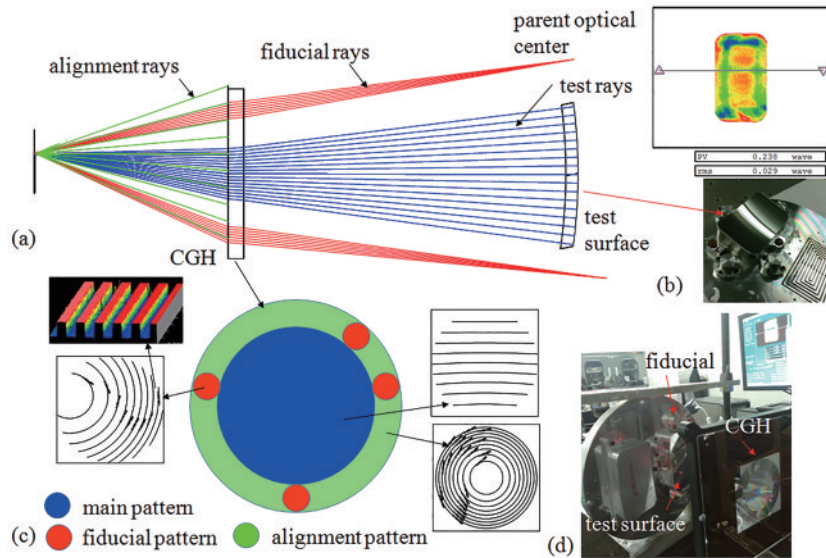


图 1 自由曲面的 CGH 补偿检验。(a)测量光路;(b)被测镜及测量结果;(c) CGH 图样及衍射结构;(d)测量系统<sup>[13]</sup>

Fig. 1 CGH null test of freeform surface. (a) Test layout; (b) test surface and result; (c) CGH patterns and diffraction structures; (d) test system<sup>[13]</sup>

有限制。有时 CGH 自身反射的光线也可能形成鬼像,例如采用 TF 和 CGH 对柱面反射镜进行补偿检验时,一般会考虑绕平行于柱面轴线(X轴)的倾斜载频,如图 2(a)<sup>[17]</sup>所示,因为测试主全息图样为不等间距的直线光栅,比曲线图样更易加工和保证精度。但此时容易出现平行于柱面轴线方向的鬼像条纹,如图 2(b)<sup>[17]</sup>所示,这主要是 CGH 反射光线形成的干扰,因为参考平面与倾斜柱面之间能够找到一个窄带的等光程区域。同理,用 TS 和 CGH 补偿检验同轴非球面时,如

果采用离焦载频,全息图样是回转对称的,也容易出现环形窄带鬼像条纹,如图 2(c)所示。因此,这类 CGH 设计时需要检查并避免 CGH 反射光束形成的鬼像干扰。

CGH 通常采用二元台阶型结构,可直接适用大规模集成电路制造的光掩模制作工艺,分为涂胶、曝光、显影、刻蚀和清洗等主要步骤。CGH 补偿器设计结果是用 Zernike 多项式描述的相位函数  $W(x, y)$  或 Grid Phase 描述的相位曲面离散点集,在此基础上可计算任意高度值的等高线。等高线是坐标平面上的光滑曲线,必须离散化处理并编码成激光或电子束直写系统支持的特殊数据格式(如 GDSII 格式)。CGH 图形的离散化编码是将公差约束的图形边界曲线近似分割为一系列线段,图形则被近似为一系列首尾连接的多边形。多边形分割越细,近似精度越高,但计算效率越低,因此离散化过程要在曲线近似的精度与计算效率之间进行折中。本课题组借鉴数控曲线插补算法思想,引入最大弦长约束,可避免频繁计算线段与曲线的切点或交点,显著提高编码效率<sup>[18]</sup>。

### 2.2 CGH 补偿检验的投影畸变校正

投影畸变是面向制造的 CGH 补偿检验的一个重要问题。当用干涉仪测量平面或球面时,被测面的横坐标可以认为是与干涉仪 CCD 像素坐标线性对应的;但在非球面或自由曲面补偿检验中不再成立,因为像差会导致像素坐标与镜面横坐标之间存在非线性对应关系,即所谓的投影畸变。Zhao 等<sup>[19-20]</sup>提出了投影畸变的数学描述方法,从 Zernike 多项式的梯度推导出一组正交矢量多项式。面形误差用于指导修形之前必须进行畸变校正,否则因为加工位置与实际误差位置不对应极易造成中高频残差,导致最终修形精度受限。

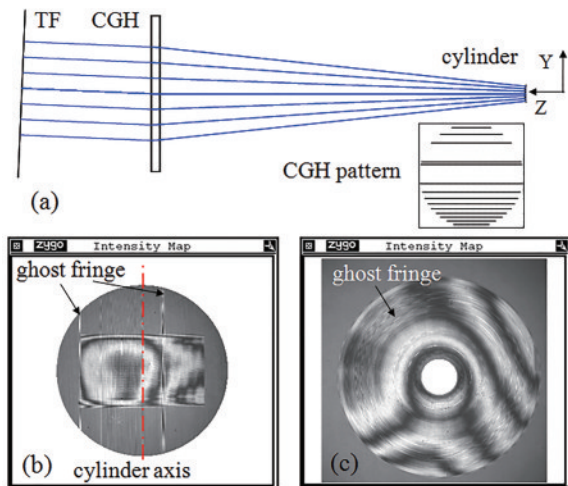


图 2 CGH 补偿检验的鬼像干扰。(a)柱面测量光路及倾斜载频<sup>[17]</sup>;(b)柱面测量时 CGH 反射形成鬼像条纹<sup>[17]</sup>;(c)同轴非球面测量时 CGH 反射形成鬼像条纹

Fig. 2 Ghost disturbance in CGH null test. (a) Test layout for a cylinder with tilt carrier<sup>[17]</sup>; (b) ghost fringe resulted from reflection of CGH in null test of a cylinder<sup>[17]</sup>; (c) ghost fringe resulted from reflection of CGH in null test of an on-axis asphere

另一方面,即使测量结果不用于修形,也应尽量避免或校正投影畸变,因为畸变可能使得干涉条纹分布不均匀,密集于局部小区域从而减小动态测量范围。另外,当存在测量系统失调时,畸变使得失调引入的像差变复杂,甚至包含高阶像差。

投影畸变包含干涉仪内部光学系统与CGH补偿检验光路的贡献,前者通常可以忽略,认为从干涉仪 CCD 像素坐标到 TF 或 TS 参考面横向坐标具有线性对应关系,主要校正 CGH 补偿器到被测面部分光路的畸变。畸变校正可通过标记点或光线追迹方法标定非线性对应关系。标记点方法直接标定实际测量系统中 CCD 像素坐标到被测面横坐标的非线性关系,要求将一定数量的标记点尽量贴近被测面布置,标记点在被测面上的横坐标可用坐标测量等手段获得。对于同轴非球面,只需要沿坐标轴布置一维标记点阵列即可<sup>[21]</sup>;对于非回转对称的自由曲面,则需要在整个曲面上布置二维标记点阵列<sup>[22]</sup>。

光线追迹方法不需要标记点阵列,而是通过对测量系统模型进行光线追迹确定 CCD 像素坐标到被测面横坐标的非线性关系,因而可以生成密集网格采样的

数据点阵,具有高精度和效率的优点,但前提是用于追迹的模型应与实际测量系统一致。值得一提的是,通常测量系统模型是类似图 1(a)所示采用点光源来表示干涉仪 TS 的焦点,但对该模型追迹并不合理,因为其出瞳平面并非与实际测量系统中干涉仪 CCD 平面共轭,两者的坐标对应关系不是线性的。与 CCD 像素坐标线性对应的是 TS 参考面或与其共焦的任意参考球面(RS)的横坐标,如图 3<sup>[23]</sup>所示,在 CGH 平面处设置一个虚拟 RS,则光线与该虚拟 RS 的交点 P、Q 的高度  $h_2$ 、 $h_1$  之比与 CCD 像素坐标  $v_2$ 、 $v_1$  之比相等  $h_2/h_1=v_2/v_1$ ,光线与 CGH 平面的交点的高度则不是线性比例关系。利用这个虚拟 RS 作为桥梁,可以建立 CCD 像素坐标与被测面的横坐标对应关系。图 4 是本课题组设计的 CGH 补偿检验某离轴抛物面时,应用光线追迹方法进行投影畸变校正的结果,被测抛物面顶点曲率半径约为 4 m,离轴量为 1 m,通光口径为 1.055 m,非球面度约为 2.1 mm,大离轴量使得畸变严重,被测面的圆形口径对应实测干涉图样变为液滴形,必须进行校正才能确保修形加工到高精度。

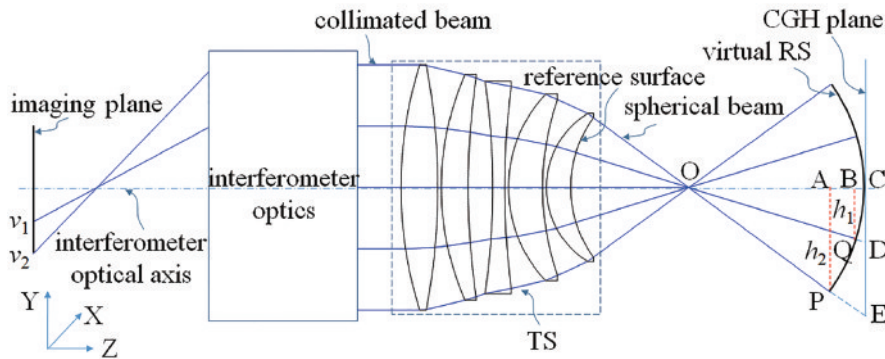


图 3 干涉仪 CCD 像素坐标与参考球面而不是 CGH 平面坐标的线性对应关系<sup>[23]</sup>

Fig. 3 Linear mapping between pixels on the imaging plane and transverse coordinates on the virtual RS instead of the CGH plane<sup>[23]</sup>

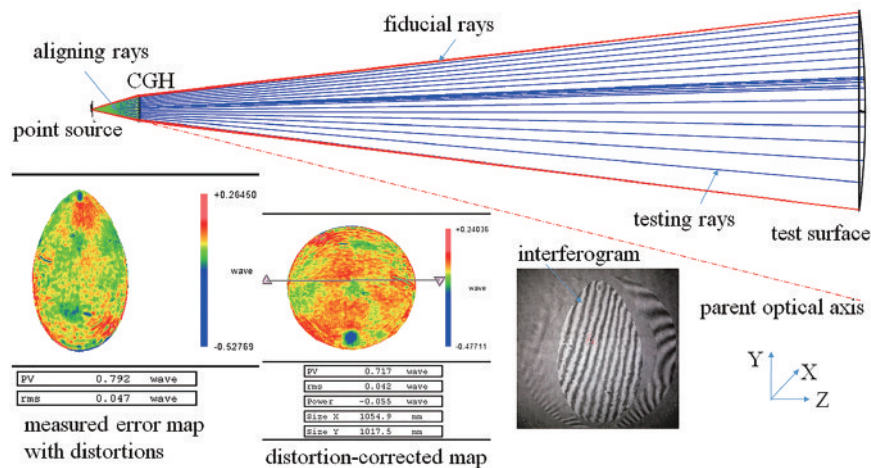


图 4 大离轴抛物面的 CGH 补偿检验投影畸变校正<sup>[23]</sup>

Fig. 4 Mapping distortion correction for CGH null test of a parabolic surface with large off-axis paraboloid<sup>[23]</sup>

### 2.3 CGH 补偿检验的不确定度与绝对检验

CGH 作为标准具生成与被测面形匹配的测试波前,其精度直接决定了补偿检验的精度。在 CGH 补偿检验系统中,误差源除了干涉仪及其镜头参考面的误差外,主要贡献来自 CGH,包括 CGH 基板厚度差(平行差)、CGH 衍射结构制造误差(图样位置畸变、占空比误差、刻蚀深度误差等)和位置失调引入的像差。图 5<sup>[24]</sup>为 CGH 补偿检验的不确定度溯源链,其中基板厚度差通常利用 0 级透射波前校准,失调引入像差可以通过对测量系统的光学模型进行光线追迹,建立

失调量-波像差的映射关系模型,准确检测失调量后计算得到其对测量结果的不确定度贡献。通常被测镜在使用中有明确的装调公差范围,如果测量时失调量控制在公差范围内,则引起的像差可以忽略。对衍射结构制造误差进行严格估计并建立不确定度传递模型极具挑战,涉及大面积(100 mm×100 mm 量级)的 CGH 衍射结构三维形貌测量与衍射波前误差评价问题,虽然采用拼接测量技术能够扩大显微干涉仪的测量范围<sup>[25]</sup>,但效率太低,而且从大面积衍射结构误差建立衍射波前误差的物理模型也非常困难。

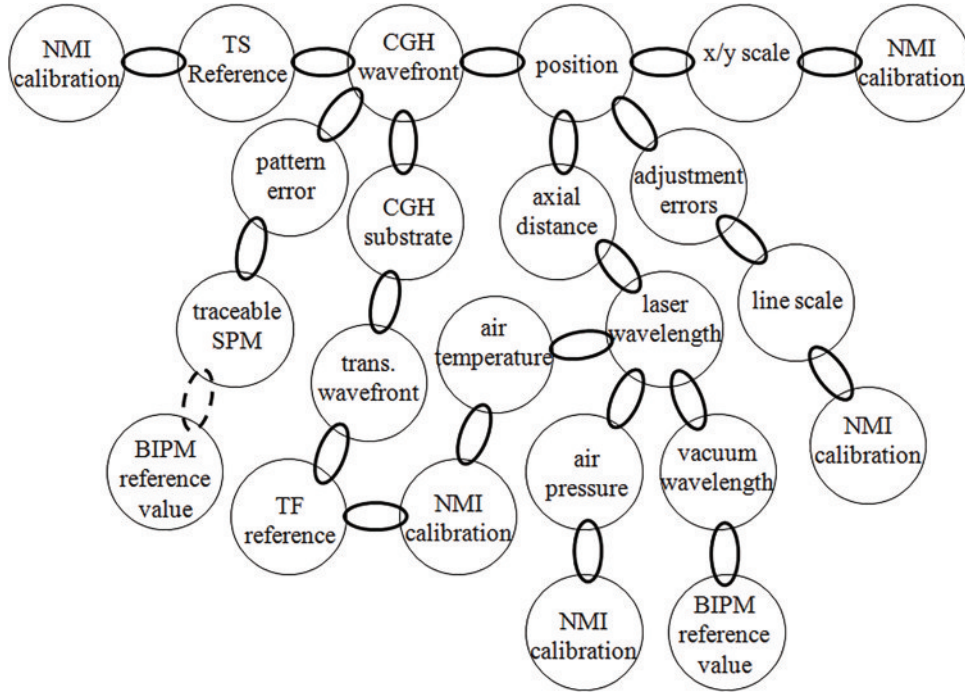


图 5 CGH 补偿检验的溯源链<sup>[24]</sup>

Fig. 5 Traceability chain of CGH null test<sup>[24]</sup>

目前较多采用的方法是根据当前制造工艺水平,对 CGH 补偿检验的合成不确定度进行估计,如衍射结构直写的位置畸变一般约为 0.1 μm,刻蚀深度误差在 5% 以内,根据全息图样的条纹周期可以简单估计 RMS 值不确定度为纳米级。更直接的方法是进行比对测试,用相同工艺制作条纹周期相近的球面测试全息,其衍射产生的球面波前误差可用有证标准球面反射镜来标定。图 6 为本课题组采用的 CGH 补偿检验标准球面镜,在测试主全息边缘位置约 Φ10 mm 圆形区域同步制作了比对全息图样,施加倾斜载频以分离干扰级次的影响。比对实验测量结果为 PV 0.052λ 和 RMS 0.004λ,与被测球面及干涉仪镜头参考面的精度相当,说明 CGH 测量精度与之相当甚至更优。

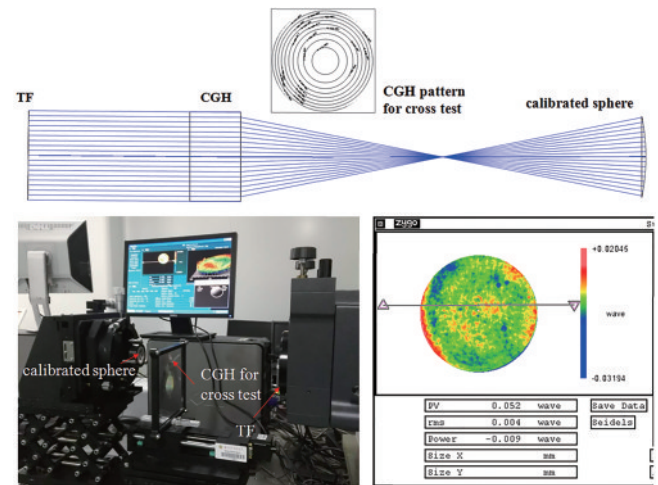


图 6 用已校准球面镜进行 CGH 补偿互检

Fig. 6 CGH cross test with a calibrated sphere

上述不确定度估计或比对测试方法只能给出 CGH 补偿检验精度水平的近似估计,不满足极紫外光刻(EUVL)物镜、X 射线掠入射反射镜等纳米、亚纳米精度要求的光学零件检验需求。绝对检验是一种可行解决方案,利用测量系统在不同位置或构型下测量结

果中包含的不同误差分量具有不同表现形式,可以通过简单的数学操作分离出系统误差而获得真实的被测面形。绝对检验可在一般的计量实验室完成而不必溯

源至国家计量院,符合量值传递体系扁平化趋势。光学平面绝对检验常用三平面互检辅以平移旋转法<sup>[26]</sup>,光学球面绝对检验则可用共焦位置翻转和猫眼位置的三位置测量方法<sup>[27]</sup>或随机球法<sup>[28]</sup>。非球面或自由曲面的绝对检验要复杂得多,因为没有猫眼位置可利用。本课题组通过 CGH 前后翻转并利用类似猫眼的焦线位置测量,实现柱面镜 CGH 补偿的绝对检验,测量结果溯源至平面镜的面形。如图 7 所示。首先在共焦位置测量得到  $W_1$ ;然后将 CGH 绕平行于柱面轴线翻转  $180^\circ$ (CGH 刻蚀面前后翻转且位置上下颠倒),同样在共焦位置测量得到  $W_2$ ;最后将 CGH 恢复原位,利用与焦线重合的参考平面(RF)将测试光束上下翻转后返回干涉仪,测量得到  $W_3$ 。从三次测量数据可以分离出 CGH 引入的误差  $H(x,y)$ ,表示为

$$H(x,y) = [W_1(x,y) - W_2(x,y) + W_3(x,y) + W_3(x,-y) - 2R(-x,y) - 2R(-x,-y) - 4P(x) + 2A(x,y)]/4, \quad (1)$$

式中: $R(x,y)$ 是 TF 参考面误差; $P(x)$ 是 RF 沿 X 轴(与焦线重合)的面形误差; $A(x,y)$ 是 CGH 前后翻转引入的像差,主要是基板厚度引入的 Y-球差,可通过对测量系统光线追迹确定。对于基板厚度 6.4 mm 的 CGH,当柱面测试波前的  $F/\#$  大于 7.3 时,引入像差  $A$  小于  $\lambda/100$ <sup>[17]</sup>。

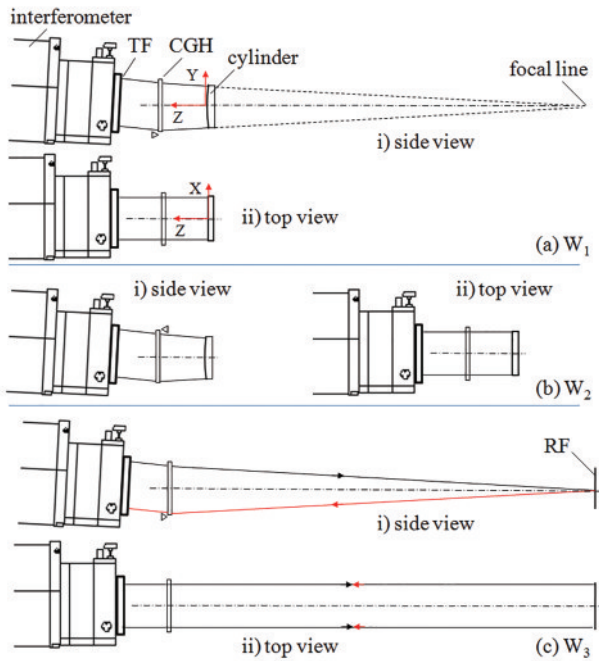


图 7 柱面绝对检验的三步法。(a)  $W_1$ ; (b)  $W_2$ ; (c)  $W_3$ <sup>[17]</sup>  
Fig. 7 Three-step absolute test of cylinders. (a)  $W_1$ ; (b)  $W_2$ ; (c)  $W_3$ <sup>[17]</sup>

同轴非球面因其回转对称性,可用  $N$  步旋转平均法<sup>[29]</sup>进行绝对检验,将被测面绕光轴等间隔旋转  $N$  步,获得  $N$  个测量数据,取平均将分离出被测面除  $kN\theta$  谐波分量外的非回转对称分量  $T_A$ ,或更常用的是将测量

数据反向旋转回到  $0^\circ$  位置(可在干涉仪软件中直接操作),取平均则分离出系统误差中除  $kN\theta$  谐波分量外的非回转对称分量  $R_A$ 。上述方法无法区分系统误差与被测面的回转对称分量 ( $R_S + T_S$ ),德国 Carl Zeiss<sup>[30]</sup>、美国 Zygo 公司<sup>[31]</sup>在检测 EUVL 的微曝光物镜(MET)时采用了该方法。当然,为了实现 EUVL 要求的 0.1 nm 级精度,补偿器精度、旋转平均法的坐标定位精度都要达到很高要求<sup>[32]</sup>。系统误差包含干涉仪及其镜头参考面、CGH 的共同贡献,其中干涉仪及其镜头参考面误差可用常规的平面或球面绝对检验。CGH 误差则包含了基板误差以及衍射结构制造误差,目前主要采用 0 级衍射波前测量的方法来校准基板误差<sup>[33-34]</sup>,而分离或校准衍射结构制造引入的误差还是个难题。

CGH 复用方案是试图获得衍射结构制造误差(图样误差)的一个代表,基本思想是在同一个 CGH 的同一区域上制作两套不同的衍射结构,一套产生用于测量的非球面波前,另一套则产生标准球面波前,后者可用球面绝对检验方法校准,从而间接获得非球面波前的误差。例如孪生 CGH(Twin-CGH)方法<sup>[35]</sup>基于衍射图样畸变引入的波像差与条纹的空间频率成正比这一事实,通过五次测量可得到图样误差。如图 8(a)所示,该 CGH 具有两套衍射图样:图样 1 的  $-1$  级衍射生成会聚的球面波前,用经典的三位置方法(三次测量)对某球面进行绝对检验;图样 1 的  $+1$  级衍射生成发散的球面波前,测量同一个球面。因为同一个衍射图样的误差在  $-1$  级与  $+1$  级衍射波前中符号相反,而基板误差则相同,利用前四次测量可以准确分离得到 CGH 衍射图样误差。最后一次测量利用衍射图样 2 来测量被测非球面,该图样的  $-1$  级衍射生成非球面波前,其图样误差根据两套图样的空间频率关系,从图样 1 的

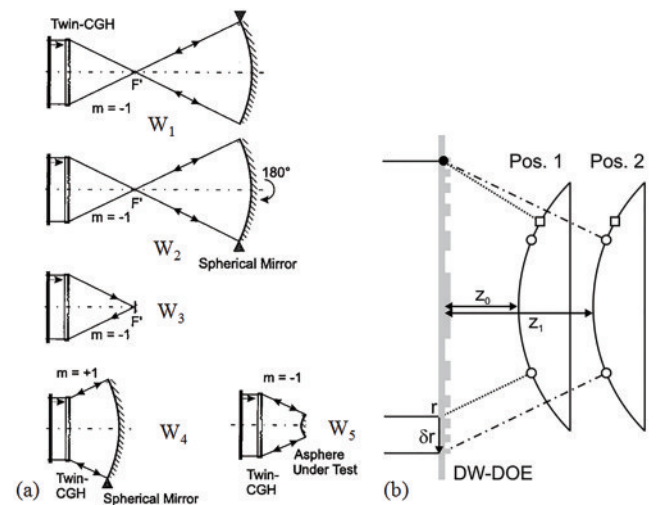


图 8 非球面绝对检验的 CGH 复用技术。(a) 孪生 CGH<sup>[35]</sup>; (b) 径向剪切<sup>[38]</sup>  
Fig. 8 CGH multiplexing techniques for absolute test of aspheres. (a) Twin-CGH<sup>[35]</sup>; (b) radial shearing<sup>[38]</sup>

图样误差间接获得。两套图样制作在 CGH 上同一个区域,实际是多路复用思想,常用两种方案<sup>[36]</sup>,一种是孔径分割法,将两套图样依次占用一个小孔径进行编码,为避免形成干涉图中出现断带,子孔径分割的尺寸必须足够小,根据 CCD 的采样尺寸确定。另一种是复光场叠加,直接将两个衍射图样对应的复光场函数进行叠加后编码。第二种 CGH 复用的方法是组合 CGH (Combo-CGH)<sup>[37]</sup>,与孪生 CGH 类似,只是认为如果图样 1 生成的球面波与图样 2 生成的非球面波的准焦点接近,空间频率接近,则两个图样的制造误差接近,从而简化测量过程。Combo-CGH 的一个改进方案是不用猫眼位置来进行球面绝对检验,因为猫眼位置存在对准要求严格、波前横移破坏坐标对应关系的问题,改用径向剪切方法代替。此时 CGH 产生两个零位检验的非球面波前,分别对应轴向不同位置时的非球面,两次测量可实现径向剪切,再结合旋转平均法实现绝对检验,如图 8(b)<sup>[38]</sup>所示。

### 2.4 CGH 补偿检验的局限

CGH 利用计算机生成衍射图样并制作在基板上,理论上可以实现任意复杂面形的零位检验,基本满足常见光学成像系统的面形测量需求,但实际由于工艺限制,CGH 补偿检验并非万能,存在一定的面形适用范围。

一是口径受限。大口径凸非球面的 CGH 补偿检

验要求 CGH 口径应略大于被测面口径,而 CGH 口径受制造工艺限制。目前成熟的光掩模制造工艺适用 6 英寸(约 152 mm)规格的基板,更大口径 CGH 制造虽然能实现,但以牺牲精度和效率为代价。一个可行解决方案是结合子孔径拼接,将被测面划分为一系列相邻重叠的子孔径,依次测量后拼接优化得到全口径面形。子孔径拼接主要考虑不同位置子孔径需要补偿的像差不同,确保能获得准确的子孔径测量数据,其次要考虑子孔径扫描运动必然引入误差,特别是补偿检验中失调像差存在显著影响,拼接优化算法必须能够正确区分并解耦出真实的面形误差。本课题组分别提出了凸非球面的近零位补偿子孔径拼接和零位补偿子孔径拼接算法。其中近零位补偿是只补偿大部分像差,确保剩余像差可被干涉仪解析即可,这可以利用一对双向回传的 Zernike 相位板(用 CGH 实现)来实现,调整回转角度能够生成可变的彗差和像散,实现不同面形、不同位置子孔径的像差补偿,如图 9(a)<sup>[39-41]</sup>所示。因为 CGH 成对使用,采用 4 台衍射结构可提高衍射效率到 81% 左右。零位补偿则需针对不同离轴位置的子孔径分别设计不同的 CGH,测量时更换 CGH,如图 9(b)<sup>[42]</sup>所示,灵活性有所降低,优点是每个子孔径都满足零位检验条件<sup>[43-44]</sup>。该方法同样应用于大口径柱面、非圆柱面的测量,为激光武器系统中的单晶硅反射镜制造提供检测支撑,指导修形达到 PV  $\lambda/4$  精度

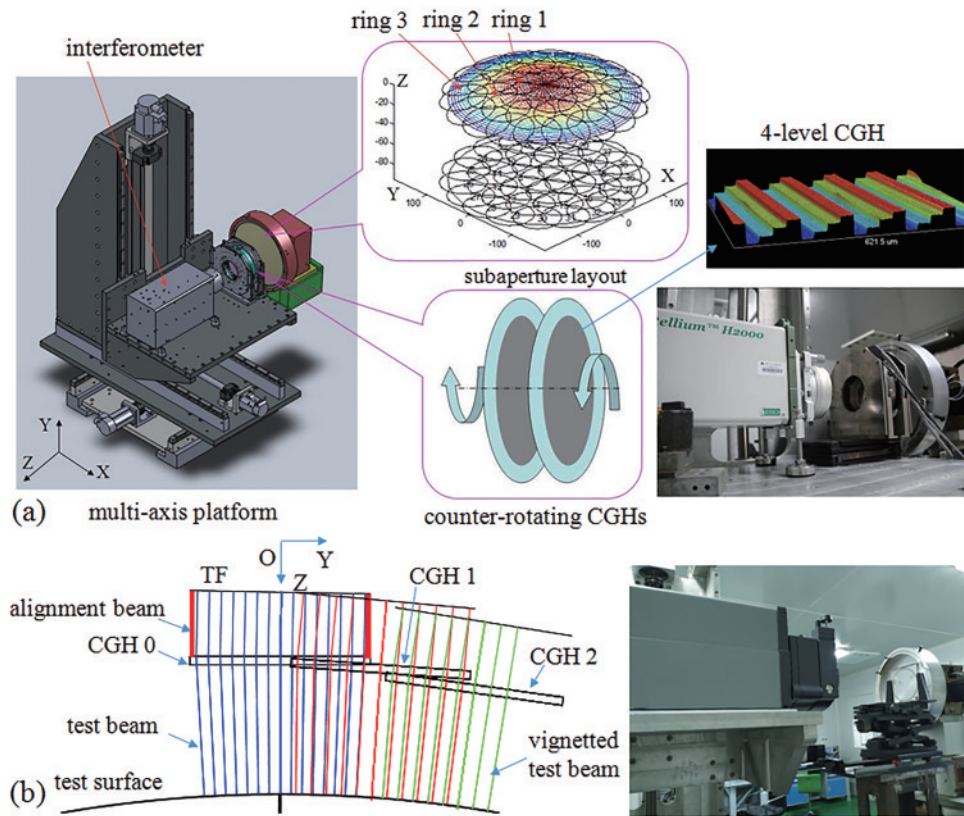


图 9 大口径凸非球面的 CGH 补偿子孔径拼接测量。(a)近零位检验<sup>[39-41]</sup>; (b)零位检验<sup>[42]</sup>

Fig. 9 Subaperture stitching with CGHs for measuring large convex aspheres. (a) Near-null test<sup>[39-41]</sup>; (b) null test<sup>[42]</sup>

要求。

二是衍射图样的最小周期限制。一般来说,被测面的非球面度及其斜率决定了 CGH 衍射图样的条纹周期,目前光掩模工艺能以高精度实现最小条纹周期  $2\ \mu\text{m}$  的 CGH 制造,通常具备  $2\ \text{mm}$  左右非球面度的补偿能力。图 10 为本课题组设计的 CGH 补偿检验某高陡度非球面,被测面为高次非球面,顶点曲率半径约为  $334\ \text{mm}$ ,离轴量为  $183.73\ \text{mm}$ ,通光口径是  $300\ \text{mm}$  边长的正方形,非球面度约为  $3.56\ \text{mm}$ ,充分表明单个 CGH 具有大像差补偿能力。然而,CGH 补偿检验对某些非球面度较小的非球面却可能失效。如图 11(a) 所示,口径为  $3\ \text{m}$  的高次非球面,顶点曲率半径为  $3.564\ \text{m}$ ,非球面度约为  $0.5\ \text{mm}$ ,边缘不同高度的曲面法向在距离镜面约  $2.44\ \text{m}$  处即相交,需将 CGH 置于相交位置与被测镜面之间,且 CGH 越靠近被测镜,补偿后的剩余像差越小,这也符合“萌芽时就消灭它”的消像差原则,但结果是 CGH 口径过大而无法实现。同理,CGH 补偿检验对于图 11(b) 所示鸥翼型高次非球面存在困难,这种面形存在曲率反向的拐点,使其分为中心部分凸面与边缘环带部分的凹面(回转轴线与母线对称轴不重合的轮胎面)。针对口径为  $10\ \text{mm}$  级的光学面形,本课题组提出白光干涉显微测量结合子孔径拼接的方法,可同时获得全口径分布的面形、中频及高频(粗糙度、微结构)形貌,适用于凹/凸鸥翼型非球面、菲涅耳衍射透镜等复杂面形,如图 11(c) 所示。子孔径测量时,白光干涉仪显微物镜的光轴近似对准子孔径的几何中心法向,只要子孔径大小和局部斜率变化在物镜的视场和容许斜率极限之内,就可以获得子孔径的三维形貌。因此,在标准的白光干涉仪上集成一个多自由度调整平台,如图 12(a) 所示,调

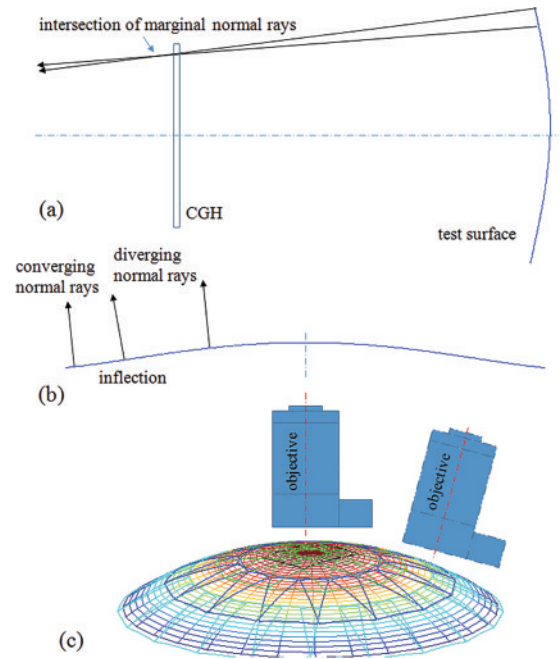


图 11 CGH 补偿检验失效的情形。(a)CGH 尺寸过大;(b)鸥翼型非球面;(c)干涉显微拼接测量<sup>[46]</sup>  
Fig. 11 Failure cases of CGH null test. (a) Impractical size of CGH required; (b) gull-wing asphere; (c) stitching-based interference microscopy<sup>[46]</sup>

整子孔径与白光干涉仪的相对位姿进行扫描测量,然后利用 6 自由度对准误差优化算法,将所有子孔径形貌数据拼接在一起即可得到全口径的面形误差。图 12(b) 是用于比对验证的 CGH 补偿检验光路,如前所述,CGH 只能测得鸥翼非球面中心  $\Phi 7\ \text{mm}$  左右的凸面部分,曲率反转部分无法测得。图 12(c) 是 CGH 补偿检验时的零条纹干涉图样。白光干涉显微拼接测量则可以得到全口径  $\Phi 9.8\ \text{mm}$  的面形误差,如图 12(d) 所示。从中取出中心  $\Phi 7\ \text{mm}$  凸面部分如图 12(e) 所示,与图 12(f) 所示 CGH 补偿检验结果一致。

用 CGH 同时检验两个(以上)面形时也要考虑类似问题。CGH 相比传统补偿器的一个优点是在同一个基板上不同区域同步制作不同衍射图样,用于检验共用镜坯的多个表面(多面共体)或指导系统装调非常方便。图 13(a) 为本课题组设计的用于某望远镜主镜、三镜装调的 CGH,用同一个 CGH 上不同区域生成主镜和三镜面形的补偿检验波前。因为同步制作的全息图样具有很高的相互位置精度(亚微米级),可以认为生成的两个测试波前具有理想的位置关系,因而能够同时测得主镜、三镜面形及其两者之间的装调误差。不过,对于图 13(b) 所示的情形,主镜和三镜的曲面法向相交,一般要求将 CGH 置于相交位置与被测镜面之间,这将导致 CGH 尺寸过大,而 CGH 远离被测镜面则存在两个图样重叠的问题,因此解决方法可用前面提到的多路复用技术。

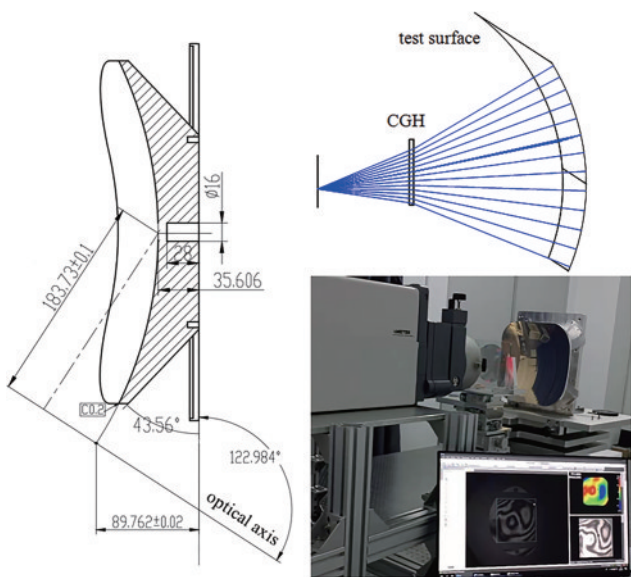


图 10 大非球面度( $3.56\ \text{mm}$ )离轴高次非球面的 CGH 补偿检验  
Fig. 10 CGH null test of an even asphere with large aspheric departure ( $3.56\ \text{mm}$ )



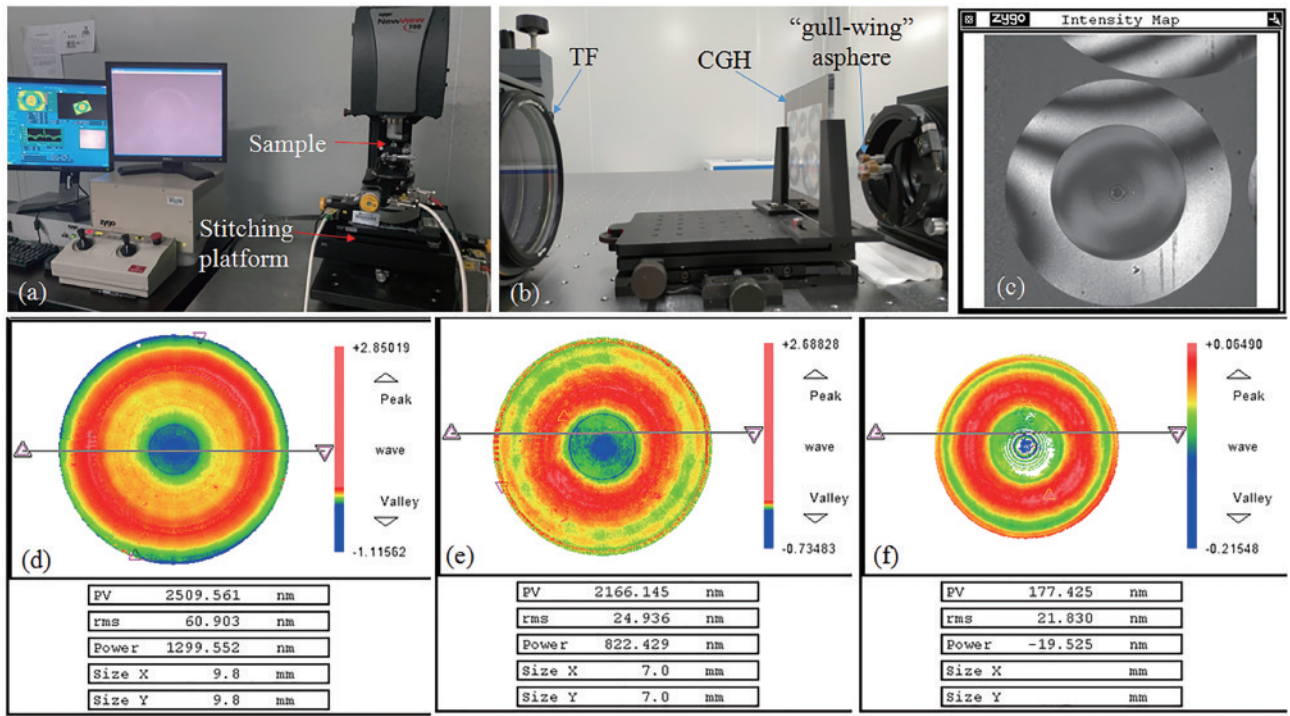


图 12 鸱翼非球面的比对测试。(a)拼接干涉显微测量;(b)CGH 补偿检验;(c)CGH 补偿检验的零条纹干涉图样;(d)拼接干涉显微测量的全口径面形误差(RMS 60.9 nm);(e)拼接结果的中心凸面部分(RMS 24.9 nm);(f) CGH 补偿检验的中心凸面部分(RMS 21.8 nm)<sup>[46]</sup>

Fig. 12 Comparative test of a gull-wing asphere. (a) Stitching interference microscopy; (b) CGH null test; (c) null fringe interference pattern for CGH null test; (d) full aperture surface error (RMS 60.9 nm) obtained by stitching interference microscopy; (e) central convex part of stitched map (RMS 24.9 nm); (f) central convex part of CGH null test (RMS 21.8 nm)<sup>[46]</sup>

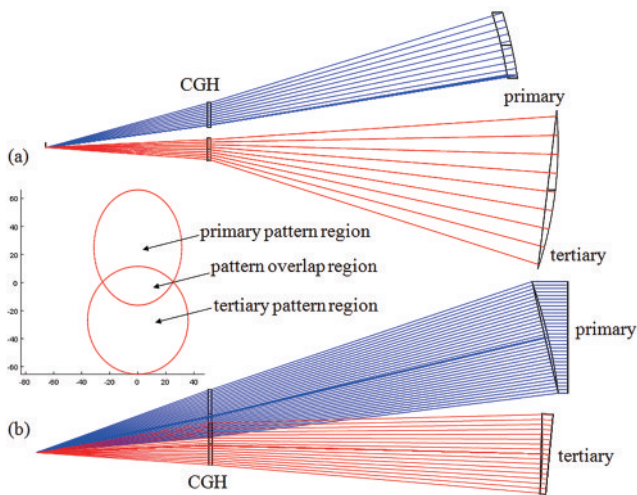


图 13 共用 CGH 补偿检验同时测量主镜、三镜。(a)衍射图样不重叠;(b)衍射图样重叠

Fig. 13 Sharing CGH null test for simultaneous measurement of primary and tertiary mirrors. (a) Without pattern overlap; (b) with pattern overlap

### 3 制造过程中面形误差的测量

#### 3.1 局部大误差的子孔径测量重构

光学零件加工一般经历铣磨、研磨、抛光等几个阶段,其中:铣磨阶段采用数控成形方法加工出最接近理想面形的球面或非球面,面形误差通常为 10 μm

量级;抛光阶段则基于面形误差高点可控去除的确定性修形原理,将 1 μm 量级的面形误差逐步减小到亚微米甚至纳米级;研磨阶段是中间衔接工艺,是决定后续抛光能否高效收敛到高精度的关键。但是研磨加工的不确定性远不如抛光加工,特别是复杂面形的局部曲率变化使得研磨盘与被加工面很难贴合,容易出现局部误差很大的情形,例如:常见的塌边或翘边,以及局部凹坑或突起,对应的误差梯度太大,导致干涉条纹太密甚至不可见,干涉仪无法解析,如图 14(a)所示;全口径测量因局部误差太大而出现数据缺失,如图 14(b)所示。此时甚至难以判断面形误差是高点还是低点,无法顺利衔接到后续的抛光阶段。这一阶段目前主要依靠坐标测量或超精密轮廓仪,或者猜测为误差高点或低点进行试加工,然后根据加工效果判断,这种“盲抛”方式风险很大,容易导致加工过程无法继续收敛。

无论是传统补偿器还是 CGH 补偿器,都是针对名义被测面形设计以精确补偿其像差,当制造误差超出波面干涉仪本身的动态测量范围时将无法解析。解决方案之一是对局部大误差进行子孔径测量,通过提高横向分辨率来提升干涉仪解析能力。例如:换用 F/# 更大的 TS,其焦点与全口径测量时 TS 的焦点重合;将干涉仪绕焦点转动,保持 CGH 和被测面不动,对准被测面上局部大误差区域进行零位检验,此时 CGH 只用到局部区

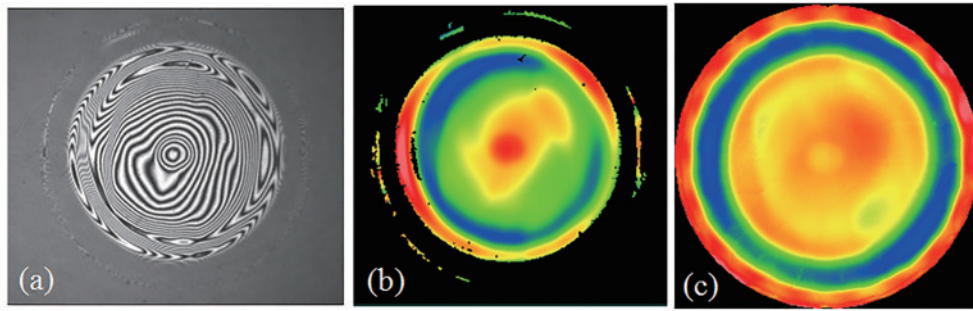


图 14 子孔径测量解析局部大误差。(a)全口径条纹不可解析;(b)全口径测量数据缺失;(c)子孔径拼接重构面形

Fig. 14 Subaperture test enabling resolving local big error. (a) Irresolvable full aperture fringes; (b) data loss in full aperture measurement; (c) reconstructed surface error by subaperture stitching

域。本课题组应用图 9(a)所示近零位子孔径拼接方法测量重构得到全口径面形,如图 14(c)所示,能够很好地解析图 14(b)中缺失数据区域,用于指导修形。

### 3.2 自适应补偿干涉测量

在光学面形加工过程中,加工误差的变化是一个未知自由曲面的动态演变过程,传统干涉测量不具备适应其动态演变的能力。如能引入自适应补偿思想,对该误差进行反馈控制的可变补偿,能显著提高光学加工效率和智能化水平。常用的自适应补偿器有变

形镜(DM)<sup>[47-50]</sup>和空间光调制器(SLM)<sup>[51]</sup>。DM的精度相对较低,产生的自由曲面像差模式有限,因为其驱动器数目和行程受限。有时DM作为近零位补偿器使用,有一定的剩余波像差,而其变形量也需要高精度校准<sup>[52]</sup>。本课题组提出用SLM作为自适应补偿器,进行制造过程中的面形测量<sup>[53]</sup>。SLM作为一个可重构的干涉型CGH,可用于发散光束,产生任意可重构相位调制,达到中等调制范围和精度<sup>[54]</sup>。基于SLM的自适应补偿干涉原理如图 15(a)<sup>[55]</sup>所示,透射

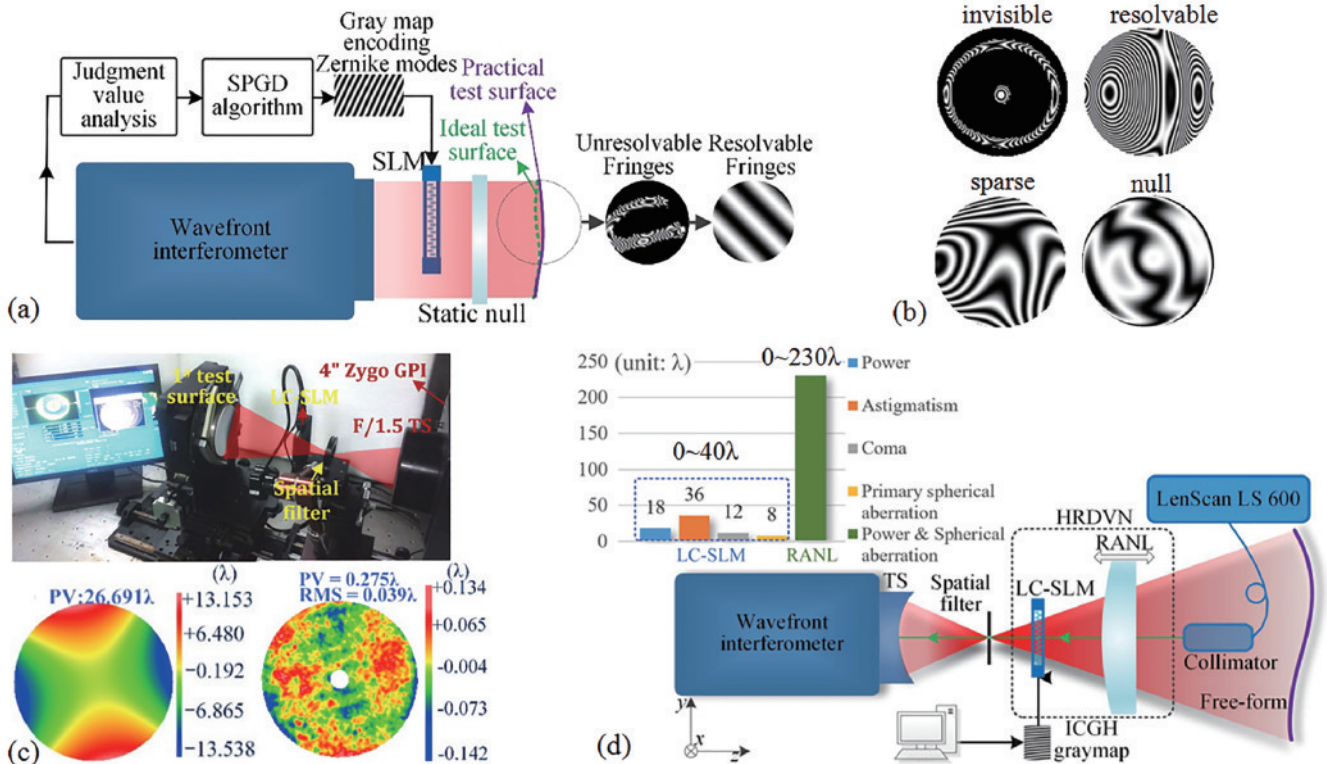


图 15 基于 SLM 的自适应补偿干涉测量。(a)基于 SLM 相位函数迭代闭环控制的未知面形重构<sup>[55]</sup>;(b)从不可解析条纹逐渐稀疏化为零条纹状态<sup>[55]</sup>;(c)双二次 Zernike 多项式曲面的测量(测量系统、自由曲面偏离量和互检点对点差结果 RMS 0.039λ)<sup>[54]</sup>;

(d)折衍混合补偿器结合 SLM 和高次非球面单透镜可适用大范围自由曲面像差<sup>[57]</sup>

Fig. 15 SLM-based adaptive null interferometry. (a) Unknown surface reconstruction based on iterative close-loop control of the SLM phase function<sup>[55]</sup>; (b) fringe reduction from invisible to null fringe states<sup>[55]</sup>; (c) measurement of bi-conic Zernike surface (setup, freeform departure, and point-to-point difference of 0.039λ RMS from cross test)<sup>[54]</sup>; (d) hybrid refractive and diffractive null combining the SLM with high order even asphere singlet can be adapted to a large range of freeform aberrations<sup>[57]</sup>

型 SLM 用作自适应补偿器,用随机并行梯度下降 (SPGD) 算法进行闭环控制,迭代产生自适应波前以使条纹稀疏化,补偿效果通过采集干涉图来实时监控并保证收敛。无法解析的密集条纹最终将变成可解析的稀疏条纹,如图 15(b)<sup>[55]</sup>所示,测量后可反演重构出被测面形。实验表明非球面度约  $26\lambda$  的双二次 Zernike 曲面测量后与 Zygo Verifire Asphere 干涉仪直接测量结果一致,点对点作差后为  $0.039\lambda$  RMS,如图 15(c)<sup>[54]</sup>所示。

本课题组还提出将 SLM 与可补偿大范围球差的高次非球面单透镜补偿器<sup>[56]</sup>组合,这样一个折衍混合补偿器能够适应大范围像差,其中回转对称像差  $0\sim 230\lambda$ ,非回转对称像差  $0\sim 40\lambda$ ,如图 15(d)<sup>[57]</sup>所示。实验验证了其测量自由曲面的能力,被测面的偏离量中回转对称和非回转对称分量分别是  $173.486\lambda$  和  $23.786\lambda$ 。测量结果与 LumphoScan 轮廓仪测量结果进行点对点作差后为 RMS  $0.036\lambda$ <sup>[13]</sup>。

### 3.3 加工原位干涉测量

光学面形的原位或在位、在机测量是指在机床上的加工原位对光学零件进行测量。通常超精密测量大多局限在环境控制良好的计量室内,对被加工零件进行离线测量。零件的二次装夹必然引入误差,甚至由于装夹状态改变引入变形,降低生产效率和加工精度,而且大型零件拆装转运等过程也存在安全隐患。

在超精密车床上集成高精度位移测头是常见的原位测量方式<sup>[58-60]</sup>。通常测头借助超精密车床本身的运动轴来实现被测面形的扫描测量,虽然机床运动精度高,但运动误差以相同方式“复印”到加工与测量结果中,因而必须校准或分离出运动误差才能获得真实面形<sup>[61-63]</sup>。相比之下,采用紧凑型干涉仪<sup>[64-65]</sup>进行全场测量可以避免扫描运动误差的影响,但包含补偿器在内的整个测量光学系统布局可能受加工原位空间的限制,灵活性较差。图 16<sup>[65-66]</sup>为本课题组在超精密车床上集成的 CGH 补偿原位测量系统,被加工零件为两个反射镜面(S1、S3)共体,用同一个 CGH 同时测量其面形和位姿误差,指导加工实现面形精度优于 RMS  $0.1\lambda$ ,与另一个共体反射镜面对面装配后即可成像。

研抛加工的环境控制比超精密车削要宽松得多,对原位测量系统的抗环境干扰能力要求更高。不过,随着瞬时相移技术发展,可在生产车间环境使用的动态干涉仪日臻成熟<sup>[67]</sup>,突破了研抛加工原位干涉测量的最大瓶颈。需进一步解决的问题在于建立测量数据与加工机床坐标系之间的准确位置关系,将镜面上的定位误差从亚像素级( $0.1\sim 1\text{ mm}$ )提升到  $10\ \mu\text{m}$  级,有效抑制错位产生的中频误差,这对于高精度加工非常重要。

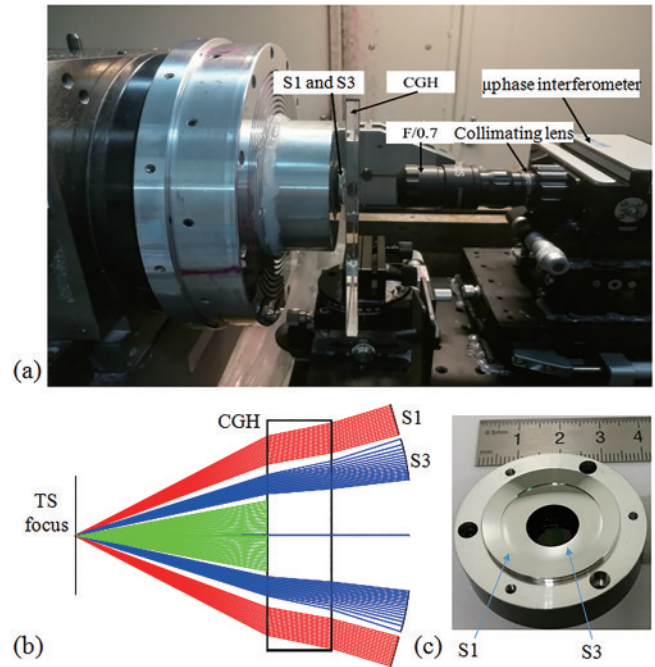


图 16 超精密车削原位 CGH 补偿干涉测量。(a)测量系统<sup>[65]</sup>;(b)同时测量 S1 和 S3 两个反射镜面形<sup>[65]</sup>;(c)加工的 S1 和 S3 共体反射镜<sup>[66]</sup>

Fig. 16 *In-situ* CGH null test integrated on an ultra-precision turning machine. (a) System setup<sup>[65]</sup>; (b) simultaneous measurement of mirror surfaces S1 and S3<sup>[65]</sup>; (c) machined surfaces S1 and S3 sharing the same substrate<sup>[66]</sup>

## 4 结束语

尽管形形色色的面形测量技术发展迅速,但补偿干涉检验仍然是非球面、自由曲面等光学面形测量的主要手段,特别是高精度测量,现阶段还必须遵循零位检验原则。CGH 补偿器以其灵活的像差补偿能力,已经成为自由曲面零位检验的不二之选,基本满足多数情况下光学成像系统中的面形测量需求。一些特殊的面形如大口径凸非球面、小口径鸥翼型非球面等,可结合子孔径拼接方法实现全口径测量。随着 CGH 制作工艺能力的持续发展,CGH 补偿检验的口径受限、线宽受限问题也将进一步得到缓解。CGH 补偿检验与子孔径拼接方法结合,或借助 SLM 等新型可编程器件进行动态光场调制,能够将制造过程中原本无法解析的局部大误差重构出来,使得干涉测量有望从抛光精修阶段向前延伸到研磨和粗抛阶段,甚至与传统坐标测量等测量工艺顺利衔接,确保迭代修形过程高效收敛。

未来光学面形测量技术的发展仍需领先于光学制造技术发展,并且与光学系统设计创新发展相适应。从先进光学成像系统背景需求出发,下一步光学测量技术研究应重点关注以下三个方面:

1) 超高精度测量与溯源。任何测量值只有在给出的测量不确定度范围内溯源到计量单位上才可靠,这种溯源过程需要通过不间断的校准链将测量结果与一个标准参考物联系起来。国际计量委员会用真空中的光速和时间频率标准来定义长度单位,而表面形状计量作为长度计量的一个分支,要求测量值最终能够溯源到长度基本单位。目前作为标准参考物的平面或球面镜头在很多国家计量院都能够实现纳米精度校准,因而通过量值传递可将其生成的平面或球面测试波前溯源到长度单位。但是测量非球面或自由曲面时,如何评价补偿器生成的测试波前误差,获得真实的被测面形,是当前光学复杂表面计量测试的难题,也是 EUVL 光刻物镜自由曲面和 X 射线掠入射反射镜制造<sup>[68]</sup>必须解决的问题。

2) 混合光学零件的宏微跨尺度测量。混合光学零件是传统几何光学、衍射光学以及超表面光学相结合的新器件,典型特征是在复杂曲面上叠加微纳衍射结构<sup>[69]</sup>或超表面结构<sup>[70]</sup>,从而在单个器件上集成高性能成像、光谱分光或光场调制等多个功能,可适应新一代光电载荷往紧凑化、大数值孔径和高光谱分辨方向的发展需求。这类器件的测量涉及大尺寸的宏观复杂面形和曲面基底的微纳结构(包括亚波长结构),需解决宏微跨尺度测量、评价问题,为建立制造误差与光学性能之间的映射关系提供支撑,最终指导加工出高性能器件。

3) 自主可控面形测量仪器及其原位集成。目前高精度面形测量的干涉仪仍然过度依赖进口,超精密轮廓仪更是几乎被进口仪器垄断,应加大自主可控技术研发和仪器工程化研究力度。另一方面,超精密加工原位面形测量技术发展较缓慢,部分原因也是受限于进口测量仪器缺乏开放性和可扩展性,不支持定制化改造。如能从测量原理、技术和仪器集成上取得突破性进展,将对原位测量技术产生积极推动作用。基于零/近零阿贝误差设计的超精密轮廓仪设计思想结合经典的误差分离方法,有望在高精度光学面形的原位测量上首先取得突破。

### 参 考 文 献

- [1] Offner A. A null corrector for paraboloidal mirrors[J]. *Applied Optics*, 1963, 2(2): 153-156.
- [2] Jones R A. Computer controlled optical surfacing with orbital tool motion[J]. *Proceedings of SPIE*, 1985, 0540: 41-48.
- [3] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.  
Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004.
- [4] Li S Y, Dai Y F. Large and middle-scale aperture aspheric surfaces: lapping, polishing, and measurement [M]. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2016.
- [5] Garbusi E, Pruss C, Osten W. Interferometer for precise and flexible asphere testing[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(24): 2973-2975.
- [6] Faber C, Olesch E, Krobot R, et al. Deflectometry challenges interferometry: the competition gets tougher! [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8493: 84930R.
- [7] Su P, Parks R E, Wang L R, et al. Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(23): 4404-4412.
- [8] Ghim Y S, Rhee H G, Davies A, et al. 3D surface mapping of freeform optics using wavelength scanning lateral shearing interferometry[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5098-5105.
- [9] Platt B C, Shack R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2001, 17(5): S573-S577.
- [10] Fienup J R. Phase retrieval for optical metrology: past, present and future[C]//*Optical Fabrication and Testing 2017*, July 9-13, 2017, Denver, Colorado, United States. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2017: OW2B.1.
- [11] Berger G, Petter J. Non-contact metrology of aspheric surfaces based on MWLI technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8884: 88840V.
- [12] Henselmans R, Cacace L A, Kramer G F Y, et al. The NANOMEFOS non-contact measurement machine for freeform optics[J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(4): 607-624.
- [13] Chen S Y, Xue S, Zhai D D, et al. Measurement of freeform optical surfaces: trade-off between accuracy and dynamic range[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(5): 1900365.
- [14] 朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0112001.  
Zhu R H, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0112001.
- [15] 梁子健, 杨甬英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 161-186.  
Liang Z J, Yang Y Y, Zhao H Y, et al. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 161-186.
- [16] 陈善勇, 戴一帆, 薛帅. 光学自由曲面的 CGH 补偿干涉测量技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
Chen S Y, Dai Y F, Xue S. CGH compensated interferometry technique for optical free-form surfaces [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [17] Chen S Y, Dai Y F, Zhai D D, et al. Quasi-absolute interferometric testing of cylinders[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(9): 2278-2281.
- [18] Gan Z H, Peng X Q, Chen S Y, et al. Fringe discretization and manufacturing analysis of a computer-generated hologram in a null test of the freeform surface

- [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(34): 9913-9921.
- [19] Zhao C Y, Burge J H. Orthonormal vector polynomials in a unit circle, Part I: basis set derived from gradients of Zernike polynomials[J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 18014-18024.
- [20] Zhao C Y, Burge J H. Orthonormal vector polynomials in a unit circle, Part II: completing the basis set[J]. *Optics Express*, 2008, 16(9): 6586-6591.
- [21] Novak M, Zhao C, Burge J H. Distortion mapping correction in aspheric null testing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7063: 706313.
- [22] Robinson B M, Reardon P J. Distortion compensation in interferometric testing of mirrors[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(3): 560-565.
- [23] Chen S Y, Hu H, Guan C L. Fiducial free correction of mapping distortion in null test of aspheres and freeforms [J]. *Optics Communications*, 2022, 506: 127560.
- [24] 戴一帆, 陈善勇. 复杂光学表面形状的纳米精度测量如何溯源? [M]// 钟掘. 10000 个科学难题·制造科学卷. 北京: 科学出版社, 2018: 317-321.  
Dai Y F, Chen S Y. Nano-precision measurement of complex optical surfaces: How to make it traceable? [M]// Zhong J. 10000 selected problems in sciences: manufacturing science. Beijing: Science Press, 2018: 317-321.
- [25] Chen S Y, Lu W W, Chen W W, et al. Efficient subaperture stitching method for measurement of large area microstructured topography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 127: 105974.
- [26] Parks R E, Shao L, Evans C J. Pixel-based absolute topography test for three flats[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(25): 5951-5956.
- [27] Elssner K E, Burow R, Grzanna J, et al. Absolute sphericity measurement[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(21): 4649-4661.
- [28] Griesmann U, Wang Q D, Soons J, et al. A simple ball averager for reference sphere calibrations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5869: 58690S.
- [29] Evans C J, Kestner R N. Test optics error removal[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(7): 1015-1021.
- [30] Dörband B, Seitz G. Interferometric testing of optical surfaces at its current limit[J]. *Optik*, 2001, 112(9): 392-398.
- [31] Glatzel H, Ashworth D, Bajuk D, et al. Projection optics for EUVL micro-field exposure tools with 0.5 NA [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9048: 90481K.
- [32] Chkhalo N I, Malyshev I V, Pestov A E, et al. Problems in the application of a null lens for precise measurements of aspheric mirrors[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): 619-625.
- [33] Zhao C Y, Burge J H. Optical testing with computer generated holograms: comprehensive error analysis[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8838: 88380H.
- [34] Lin W C, Chang S T, Ho C F, et al. Absolute measurement method for correction of low-spatial frequency surface figures of aspherics[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(5): 055101.
- [35] Reichelt S, Pruss C, Tiziani H J. Absolute interferometric test of aspheres by use of twin computer-generated holograms[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(22): 4468-4479.
- [36] Reichelt S, Tiziani H J. Twin-CGHs for absolute calibration in wavefront testing interferometry[J]. *Optics Communications*, 2003, 220(1/2/3): 23-32.
- [37] Simon F, Khan G, Mantel K, et al. Quasi-absolute measurement of aspheres with a combined diffractive optical element as reference[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(34): 8606-8612.
- [38] Mantel K, Geist E, Harder I, et al. Interferometric quasi-absolute tests for aspherics using a radial shear position [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3178-3120.
- [39] Chen S Y, Zhao C Y, Dai Y F, et al. Reconfigurable optical null based on counter-rotating Zernike plates for test of aspheres[J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1381-1386.
- [40] 宋兵, 陈善勇, 王贵林. 基于双回转相位板的非球面子孔径测量技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1112007.  
Song B, Chen S Y, Wang G L. Subaperture testing technique of aspheres based on counter-rotating phase plates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1112007.
- [41] Chen S Y, Xue S, Dai Y F, et al. Subaperture stitching test of convex aspheres by using the reconfigurable optical null[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 91: 175-184.
- [42] Chen W W, Chen S Y, Tie G P, et al. Null test of large convex aspheres by subaperture stitching with replaceable holograms[J]. *Optics Communications*, 2020, 466: 125665.
- [43] Chen S Y, Xue S, Wang G L, et al. Subaperture stitching algorithms: a comparison[J]. *Optics Communications*, 2017, 390: 61-71.
- [44] Xue S, Dai Y F, Zeng S Y, et al. Interferometric stitching method for testing cylindrical surfaces with large apertures[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 19767-19789.
- [45] 路文文, 郭景阳, 陈善勇. 鸥翼型非球面元件的白光干涉拼接测量[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0912001.  
Lu W W, Guo J Y, Chen S Y. White light interferometry stitching measurement of gull-wing aspheric optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0912001.
- [46] Chen S Y, Lu W W, Guo J Y, et al. Flexible and high-resolution surface metrology based on stitching interference microscopy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106915.
- [47] Pruss C, Tiziani H J. Dynamic null lens for aspheric testing using a membrane mirror[J]. *Optics Communications*, 2004, 233(1/2/3): 15-19.
- [48] Huang L, Choi H, Zhao W C, et al. Adaptive interferometric null testing for unknown freeform optics metrology[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23): 5539-5542.
- [49] Vorontsov M A. Decoupled stochastic parallel gradient descent optimization for adaptive optics: integrated approach for wave-front sensor information fusion[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(2): 356-368.
- [50] Zhang L, Zhou S, Li D, et al. Pure adaptive

- interferometer for free form surfaces metrology[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 7888-7898.
- [51] Cao Z L, Xuan L, Hu L F, et al. Investigation of optical testing with a phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. Optics Express, 2005, 13(4): 1059-1065.
- [52] He Y W, Huang L, Hou X, et al. Modeling near-null testing method of a freeform surface with a deformable mirror compensator[J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9132-9138.
- [53] Xue S, Chen S Y, Fan Z B, et al. Adaptive wavefront interferometry for unknown free-form surfaces[J]. Optics Express, 2018, 26(17): 21910-21928.
- [54] Xue S, Chen S Y, Tie G P, et al. Adaptive null interferometric test using spatial light modulator for free-form surfaces[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8414-8428.
- [55] Xue S, Deng W X, Chen S Y. Intelligence enhancement of the adaptive wavefront interferometer[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 11084-11102.
- [56] Xue S, Chen S Y, Tie G P. Near-null interferometry using an aspheric null lens generating a broad range of variable spherical aberration for flexible test of aspheres[J]. Optics Express, 2018, 26(24): 31172-31189.
- [57] Xue S, Chen S Y, Tie G P, et al. Flexible interferometric null testing for concave free-form surfaces using a hybrid refractive and diffractive variable null[J]. Optics Letters, 2019, 44(9): 2294-2297.
- [58] Zhang Y, Cheng H N, Wu R M, et al. Data processing for point-based *in situ* metrology of freeform optical surface[J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13414-13424.
- [59] Yao J N, Anderson A, Rolland J P. Point-cloud noncontact metrology of freeform optical surfaces[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10242-10265.
- [60] Wang S X, Cheung C F, Kong L B, et al. Fiducial-aided calibration of a displacement laser probing system for *in situ* measurement of optical freeform surfaces on an ultra-precision fly-cutting machine[J]. Optics Express, 2020, 28(19): 27415-27432.
- [61] Yu J, Shen Z X, Wang X Q, et al. *In situ* noncontact measurement system and two-step compensation strategy for ultra-precision diamond machining[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30724-30739.
- [62] Zhang X D, Zeng Z, Liu X L, et al. Compensation strategy for machining optical freeform surfaces by the combined on- and off-machine measurement[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24800-24810.
- [63] Fu X Y, Bing G, Zhao Q L, et al. Improved error separation technique for on-machine optical lens measurement[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(4): 045005.
- [64] Wang D D, Fu X Y, Xu P, et al. Compact snapshot dual-mode interferometric system for on-machine measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 132: 106129.
- [65] Xiong Y P, Luo T C, Dai Y F, et al. *In situ* measurement and error compensation of monolithic multisurface optics[J]. Optics Communications, 2021, 484: 126665.
- [66] Xiong Y P, Dai Y F, Tie G P, et al. Engineering a coaxial visible/infrared imaging system based on monolithic multisurface optics[J]. Applied Optics, 2018, 57(34): 10036-10043.
- [67] Wyant J C. Dynamic interferometry[J]. Optics and Photonics News, 2003, 14(4): 36-41.
- [68] 邓婷, 刘锋伟, 覃蝶, 等. X射线柱面反射镜的非零位干涉测量[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0434001.
- Deng T, Liu F W, Qin D, et al. Non-null interferometric test of X-ray cylindrical reflect mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0434001.
- [69] 李江, 高筱钧, 付作立, 等. 超快激光仿生复眼加工研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002704.
- Li J, Gao X J, Fu Z L, et al. Research advancement on fabrication of artificial compound eye using ultrafast laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002704.
- [70] 邓子岚, 李枫竣, 史坦, 等. 超构光栅调控衍射光场的物理及应用[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823011.
- Deng Z L, Li F J, Shi T, et al. Metagratings for controlling diffractive optical fields: physics and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823011.