

文章编号: 1002-1582(2026)04-0419-09

基于计算全息的自由曲面形位误差同步检测方法

刘泽禹, 张海涛*, 刘钰, 吴东航

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 光学系统先进制造全国重点实验室, 吉林 长春 130033)
(2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 提出了一种基于复合计算全息图 (CGH) 的原位解耦检测方法。方法在主检测全息图基础上, 集成球形安装回射器 (SMR) 靶球、猫眼及平面基准等多种辅助对准区域, 在同一视场内建立光学与机械的统一基准。利用 SMR 产生的柱面正交焦线与猫眼波前特征, 构建了六自由度位姿解算模型, 实现了在一次干涉测量中对面形误差与位姿偏差的同步分离。搭建了立式原位干涉检测装置。实验结果表明, 所提出方法获得的自由曲面面形测量结果与高精度轮廓仪扫描结果在宏观形貌和特征结构上高度一致, 验证了该方法在原位、同步形位检测中的可行性和稳定性。方法有效解决了自由曲面形位误差混杂的关键问题, 为高端光学系统装调与误差预补偿提供了新的检测手段。

关 键 词: 应用光学; 自由曲面; 形位误差; 计算全息图; SMR 靶球

中图分类号: O439

文献标识码: A

Synchronous detection method for geometric tolerance of free-form surfaces based on computer-generated holography

LIU Zeyu, ZHANG Haitao*, LIU Yu, WU Donghang

(1. State Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An in-situ decoupling detection method based on composite computer-generated hologram (CGH) is proposed. On the basis of the main detection hologram, this method integrates various auxiliary alignment regions, including Sphere Mounted Retroreflector (SMR) target spheres, cat's eye reflectors, and planar references, establishing a unified optical and mechanical reference within the same field of view. By utilizing the orthogonal cylindrical focal lines generated by SMRs and the wavefront characteristics of the cat's eye reflectors, a six-degree-of-freedom (6-DoF) pose estimation model is constructed, enabling the simultaneous separation of surface form errors and positional deviations in a single interferometric measurement. A vertical in-situ interferometric detection setup was developed. Experimental results show that the freeform surface profiles obtained using the proposed method are highly consistent with those scanned by a high-precision profilometer, both in macroscopic topography and characteristic structures, verifying the method's feasibility and stability for in-situ and simultaneous form and position detection. This method effectively addresses the critical issue of mixed form and position errors in freeform surfaces, providing a new detection technique for the alignment and error pre-compensation of high-end optical systems.

Keywords: applied optics; freeform surfaces; geometric tolerance; computer-generated hologram; SMR target sphere

收稿日期: 2026-01-25; 收到修改稿日期: 2026-04-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62475259); 吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目 (2024SYHZ0049); 吉林省科技发展计划项目 (20250202037NC)

作者简介: 刘泽禹 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事光学检测研究。18943001712@163.com

张海涛 (1987—), 男, 研究员, 博士, 从事光学加工研究。

* 通讯作者: zhanght@sklao.ac.cn

0 引 言

面向大口径、高数值孔径、宽谱段与多功能集成的先进光学系统发展需求,自由曲面光学元件以其在像质校正、系统紧凑化以及色差与像差协同优化方面的显著优势,已成为高性能光学设计的重要支撑,并广泛应用于空间遥感、极紫外光刻、高端成像与激光加工等关键领域^[1]。然而,自由曲面固有的强非旋转对称性与复杂几何形貌,显著增加了其制造与检测的技术难度,相较于传统球面与低阶非球面元件,自由曲面在面形误差表征、基准建立与装调一致性控制上面临更大的挑战。特别是在实际工程中,面形误差与元件的空间位姿偏差常呈高度耦合状态,导致误差来源难以有效区分与量化,严重制约了光学系统的综合性能。传统自由曲面检测手段主要包括三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)轮廓扫描、接触式轮廓仪测量以及基于标准球面/平面波前的干涉检测等^[2-6]。CMM与轮廓仪虽能获得高精度自由曲面轮廓数据,但测量效率低且难以在真实装调状态下原位反映元件形位误差。而采用标准波前干涉仪检测时,由于自由曲面与标准波前之间存在巨大的像差,往往需要折射或反射补偿元件(如零位补偿器),且对系统加工与装调误差极为敏感。这些传统方法普遍存在“面形测量精度高,但无法同时获取其绝对空间姿态”的共同难题。

计算全息技术为复杂非球面乃至自由曲面的零位干涉检测提供了有效途径。通过将待测自由曲面与期望出射波前之间的光程差编码至复合计算全息图(Computer Generated Hologram, CGH),可以在干涉仪中直接产生与自由曲面相匹配的补偿波前,实现大口径、高陡度自由曲面的高精度全场检测^[7-12]。然而,现有CGH检测方法普遍存在一个核心问题:将“面形测量”与“位姿标定”作为分步或分离的任务进行。通常做法是:首先在某一参考装调状态下测量自由曲面面形;随后,再通过额外的基准球、猫眼或其他对准手段估计其空间位姿。这种分布测量的流程不可避免地导致面形误差测量结果中混入装调残差,使得在统一的机械基准下精确获得真实的形位误差信息变得异常困难。

针对上述形位误差强耦合与基准不统一的挑战,本文在前期的计算全息补偿检测自由曲面位姿测量模型研究的基础上^[13],提出了一种基于复合CGH的自由曲面形位误差原位同步检测与误差解

耦方法。该方法通过在单片CGH上集成主检测全息图与SMR(Sphere Mounted Retroreflector)靶球、猫眼以及平面基准等多种辅助对准全息结构,并利用SMR靶球生成柱面波的设计,建立光学基准与机械基准的统一,实现了在单次干涉测量获取高精度待测自由曲面的面形误差的同时控制六自由度空间位姿偏差。实验结果表明,所提出方法在保持CGH零位干涉高精度优势的同时,显著提升了自由曲面多自由度装调与形位误差的评定效率和准确性。本研究为极紫外光刻等高端光学系统的原位误差预补偿和装调优化提供了全新的技术路径。

1 原 理

1.1 复合CGH分区设计及SMR靶球正交焦线对准机理

为在同一干涉视场内实现自由曲面面形检测与测量前光机位姿的同步校准,本文提出了一种基于多功能分区编码的复合CGH设计方法^[14]。该设计通过在全息图不同区域加载特定的目标波前,建立各误差自由度与干涉条纹特征之间的单调映射关系,从而构建从“干涉仪—CGH姿态匹配”到“待测件位姿锁定”,再到“主面形测量”的闭环检测链路。主检测区域(Main Test)位于中心,用于生成与待测自由曲面设计值相匹配的补偿波前;若系统处于理想位姿,该区域将呈现代表面形加工误差的零位条纹。对准区域(Alignment)被设计为反射平面波。其中,对准区域用于消除CGH相对于干涉仪的倾斜误差;平面基准区域(Plane Ref)作为待测件的机械基准参考,于收敛绕 x, y 轴的倾斜自由度 θ_x, θ_y 。猫眼区域(Cat-eye)设计为会聚球面波,焦点位于待测件表面,通过猫眼反射原理实现轴向位置 Z 的精确定位。

SMR基准区域(SMR Zone)是实现横向与滚转误差解耦的核心。传统的对准通常采用球面波聚焦于待测镜中心,难以区分横向平移与旋转。为此,本文提出一种基于柱面会聚波(Cylindrical Converging Wave, CCW)的正交焦线对准机制。通过在SMR子区编码柱面波前,使测量光束在某一子午方向产生会聚,而在正交方向保持准直,从而在SMR角锥顶点附近形成焦线(Focal Line)。此时,SMR子区仅对垂直于焦线方向的横向位移敏感,将二维对准问题拆解为两个独立的一维约束。具体地,SMR₁包含两类正交子区:

(1) SMR₁-X子区:生成焦线平行于 x 轴的柱面波(光功率主要集中在 y 方向),该子区干涉条纹仅对 Y 向平移敏感;

(2) SMR₁-Y子区: 生成焦线平行于y轴的柱面波(光功率主要集中在x方向), 该子区干涉条纹仅对X向平移敏感。此外, SMR₂-Y同样生成焦线平行于y轴的柱面波, 配合SMR₁-Y构成差分基线, 通过两个子区条纹的相对变化解算绕光轴的滚转误差 θ_z 。

相较于传统基于球面波前聚焦的SMR对准方法, 本文提出的柱面波正交焦线机制在解耦能力、理论分辨率及装调效率方面具有显著优势。传统方法单个球面波前SMR子区对横向平移($\delta x, \delta y$)和轴向离焦(δz)均有响应, 但其灵敏度矩阵的条件数较大(典型值 >10), 导致横向与滚转误差严重耦合, 需依赖多个空间分离的靶球及迭代拟合算法方能解算六自由度位姿。本文采用正交柱面波设计, 使SMR₁-x子区仅对 δy 敏感, SMR₁-y子区仅对 δx 敏感, 其灵敏度矩阵近似为对角占优阵, 条件数降至接近理论最小值1, 从而实现单靶球内横向自由度的独立解耦。

1.2 SMR对准灵敏度与理论分辨率分析

为量化评估SMR子区的对准精度, 本文基于干涉条纹的相位变化灵敏度进行理论推导。根据双光束干涉原理, 设干涉仪对条纹变化的最小可分辨相位阈值为 $\Delta W_{\min}$, 可以表示为

$$\Delta W_{\min} = \eta \lambda \quad (1)$$

式中, λ 为工作波长; η 为条纹判读灵敏度系数(本文取 $\eta=0.1$, 即对应0.1根条纹的目视判别能力)。考虑到SMR子区为矩形口径, 且在x,y方向具有不同的对准灵敏度, 本文引入有效F数(Effective F-number, $F^\#$)的概念来描述各子区的几何特性。首先, 定义会聚距离 f 为CGH子区中心到SMR虚焦点(角锥顶点)的主光线几何路径长度。设CGH基板下表面中心为原点, 子区中心坐标为 $r_{\text{CGH}}=(X, Y, 0)$, SMR顶点坐标为 $r_{\text{SMR}}=(x, y, z)$, 则 f 可表示为

$$f = \|r_{\text{CGH}} - r_{\text{SMR}}\| = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + z^2} \quad (2)$$

进而, 定义该子区在横向自由度(如x方向)上的有效 $F^\#$ 为会聚距离与该方向有效口径 $D_{(x,\text{eff})}$ 的比值

$$F_x^\# = \frac{f}{D_{(x,\text{eff})}}, F_y^\# = \frac{f}{D_{(y,\text{eff})}} \quad (3)$$

在小偏差近似与双程回返条件下, 横向微小位移 d 将转化为干涉图中的倾斜(Tilt)载频。基于波前微分关系, 可得系统对横向位移的理论分辨率阈值为 $\delta_{\min}$ 为

$$\delta_{(x,\min)} \approx F_x^\# \cdot (\eta \lambda), \delta_{(y,\min)} \approx F_y^\# \cdot (\eta \lambda) \quad (4)$$

式(4)表明, 对准灵敏度与子区的有效F数成反比。 F 数越小(即光锥角越大), 系统对横向位移越敏感。对于轴向定位, 当SMR发生轴向离焦 Δz 时, 返回波前主要表现为离焦项(Power)。根据离焦波前像差公式, 轴向位移引入的波前光程差为

$$\delta W_{\text{defocus}} \approx \frac{\Delta z}{8(F^\#)^2} \cdot 2 \quad (5)$$

同理, 令 $\delta W_{\text{defocus}} = \Delta W_{\min}$, 可得轴向对准分辨率 δ_{axial} 为

$$\delta W_{\text{defocus}} \approx 4(F^\#)^2 \cdot (\eta \lambda) \quad (6)$$

需要指出的是, 式(5)和式(6)的推导基于理想SMR模型, 即假设SMR角锥棱镜的顶点与其外部球壳的球心严格重合, 且角锥的二面角误差为零。实际制造中, SMR存在两类典型误差: 顶点偏心误差 Δe (顶点与球心的空间偏移)和二面角误差 δ_α (三个反射面间的 90° 偏差)。顶点偏心误差将导致回返波前中引入与横向位移相耦合的附加离焦项, 使得式(5)中的轴向位移灵敏度发生改变。设顶点偏心矢量在横向平面内的分量为 Δe_{xy} , 则轴向位移 Δz 对应的实际波前光程差修正为

$$\delta W_{(\text{defocus,real})} = \delta W_{(\text{defocus,ideal})} + 2\Delta e_{xy} \left(\frac{\Delta x}{f} \right) \quad (7)$$

式中 Δx 为光束在SMR有效口径内的横向偏移。该修正项意味着, 在相同轴向位移下, 顶点偏心会导致干涉条纹中出现非对称的倾斜分量, 从而在判读离焦量时引入系统偏差 $\Delta z_{\text{bias}} \approx (f/R) \cdot \Delta e_{xy}$, R 为SMR球壳半径。以0.75英寸SMR为例, $f=430\text{mm}$, $R=19.05\text{mm}$; $\Delta e_{xy}=5\mu\text{m}$, Δz_{bias} 约为 $0.11\mu\text{m}$, 与本文目标轴向分辨率同量级, 不可忽略。

二面角误差 $\delta\alpha$ 则使回返波前产生以像散和慧差为主的残余波前畸变, 其峰谷值约为 $2\lambda \cdot \delta\alpha / \pi$ (λ 为波长)。当 $\delta\alpha = 2\text{arcsec}$ 时, 残余畸变约为 $\lambda/30$, 虽小于轴向分辨率阈值, 但会在SMR对准判据中引入等效的伪离焦信号, 造成约 $0.02\mu\text{m}$ 的附加轴向不确定度。因此, 在高精度位姿解算中, 必须对SMR制造误差进行标定与补偿。

为定量评估SMR制造误差对六自由度位姿测量结果的影响, 本文建立如下误差传递模型。定义SMR的实际回返波前 W_{real} 可分解为理想波前 W_{ideal} 与误差项 ΔW_{SMR} 之和

$$W_{\text{real}} = W_{\text{ideal}} + \Delta W_{\text{SMR}} \quad (8)$$

式中, ΔW_{SMR} 由顶点偏心误差 $\Delta e=(\Delta e_x, \Delta e_y, \Delta e_z)$ 和二面角误差 $\delta\alpha=(\delta\alpha_x, \delta\alpha_y, \delta\alpha_z)$ 共同贡献, 在Zernike

多项式基下展开为

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{SMR}}(\rho, \theta) = & A_{\text{tilt}} \cdot \rho \cos \theta + B_{\text{tilt}} \cdot \rho \sin \theta + \\ & C_{\text{defocus}} \cdot (2\rho^2 - 1) + \\ & D_{\text{astig}} \cdot \rho^2 \cos 2\theta + \\ & E_{\text{coma}} \cdot (3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta + \dots \end{aligned} \quad (9)$$

式中, 系数与误差参数的关系可近似为

$$\begin{aligned} A_{\text{tilt}} &\approx 2\Delta e_x/R, B_{\text{tilt}} \approx 2\Delta e_y/R, \\ C_{\text{defocus}} &\approx 2\Delta e_z/R, D_{\text{astig}} \approx \lambda \cdot \delta\alpha_{xy}/\pi, \\ E_{\text{coma}} &\approx \lambda \cdot \delta\alpha_z/\pi \end{aligned} \quad (10)$$

式中 R 为 SMR 球壳半径, $\delta\alpha_{x/y}$ 为绕 x 或 y 轴的二面角误差, $\delta\alpha_z$ 为绕光轴的二面角误差。将上述误差波前代入之前推导的位姿解算模型, 可得到各自由度测量偏差的解析表达式: 横向位移测量偏差 δx_{bias} 、 δy_{bias} : 主要受顶点偏心 Δe_x 、 Δe_y 影响, 偏差量约为 $\Delta e_{xy}/2$, 与 SMR 安装方向相关。对于 $\Delta e_{xy}=5\mu\text{m}$, 引入的横向偏差约为 $2.5\mu\text{m}$, 超过了系统理论分辨率, 必须进行单轴标定。轴向位移测量偏差 δz_{bias} : 受 Δe_z 主导, 偏差量约为 $\Delta e_z/2$ 。同时, 二面角误差中的像散分量 D_{astig} 会通过离焦判据耦合引入约 $0.1 \cdot (\delta\alpha/1\text{arcsec}) \mu\text{m}$ 的附加偏差。滚转角测量偏差 θz_{bias} : 主要由二面角误差 $\delta\alpha_z$ 贡献, 偏差量约为 $\delta\alpha_z/2$ 。当 $\delta\alpha_z=2\text{arcsec}$ 时, $\theta z_{\text{bias}} \approx 1\text{arcsec}$, 大于系统理论滚转分辨率 (0.43arcsec), 不可忽略。

为抑制上述 SMR 制造误差对测量精度的影响, 本文采取以下补偿策略:

(1) 误差预标定: 使用高精度三坐标测量机对所用 SMR 进行出厂标定, 获取其实际顶点偏心矢量 Δe 和二面角误差 $\delta\alpha$, 并将其作为系统常数代入解算模型。

(2) 旋转平均法: 在系统标定阶段, 将 SMR 绕其机械轴旋转 90° 、 180° 、 270° 进行多次测量, 通过平均消除由固定方向偏心引入的定向偏差。

经上述综合补偿后, SMR 制造误差对横向、轴向及滚转测量的残余影响可控制在理论分辨率的 $1/3$ 以内 (即 $\delta_{(x\text{bias}, \text{res})} < 0.12\mu\text{m}$, $\delta_{(y\text{bias}, \text{res})} < 0.15\mu\text{m}$, $\theta_{(z\text{bias}, \text{res})} < 0.15\text{arcsec}$), 满足亚微米级位姿检测需求。

在理论最小分辨位移方面, 根据式 (4) 的推导, 柱面波与球面波的横向分辨率理论值相同, 均与有效 F 数成反比。然而, 球面波在横向位移下产生的波前变化为倾斜与离焦的混合项, 其判读需同时解析多项 Zernike 系数, 而柱面波仅产生纯倾斜项, 判读信噪比更高, 实际可达分辨率优于球面波约 $20\sim 30\%$ 。以本文实验参数为例, 球面波方法对 δ_x 的分辨率约为 $0.45\mu\text{m}$, 而柱面波方法达到 $0.36\mu\text{m}$ 。

上述推导建立了 SMR 子区几何参数与对准精度的理论联系, 表明通过优化设计会聚距离 f 与子区口径, 可实现满足亚微米级装调需求的位姿锁定能力。

1.3 基于 SMR 辅助对准的自由曲面 CGH 干涉检测系统原理

本文检测系统如图 1 所示, 由于干涉仪、复合 CGH、待测自由曲面、SMR 靶球组件及六自由度调整工装组成。为保证基准传递的刚性与一致性, SMR 靶球通过精密工装与待测件固连, 使其对准状态能够精确反映待测件在测量坐标系下的真实位姿^[15]。

系统装调误差自由度向量定义为

$$E = [\delta_x, \delta_y, \delta_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z]^T \quad (11)$$

式中 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 分别为横向与轴向平移偏差, θ_x, θ_y 为绕 x, y 轴的倾斜偏差, θ_z 为绕光轴的滚转偏差。

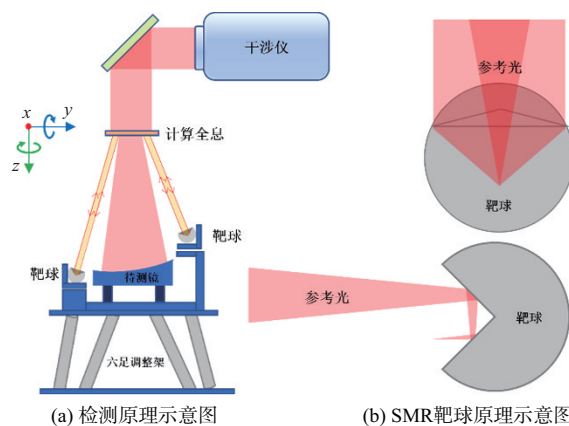


图 1 检测系统示意图

如图 2 所示, 系统工作流程遵循“由粗到精、分维锁定”的原则, 具体步骤如下:

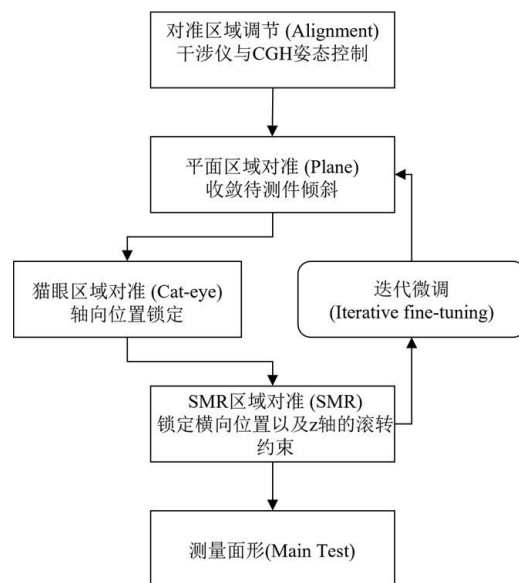


图 2 检测流程示意图

(1) 姿态标定 (Alignment): 利用对准区域与平面基准区域的干涉条纹, 首先收敛倾斜自由度 θ_x, θ_y , 确立干涉仪 CGH 待测件的角度基准;

(2) 轴向锁定 (Cat-eye): 切换至猫眼区域, 利用球面波对离焦极其敏感的特性, 调节位移平台 Z 轴直至出现零位大条纹, 完成轴向位置 δz 的锁定;

(3) 横向与滚转解耦 (SMR): 进入 SMR 基准区域, 利用正交柱面波产生的焦线特征, 分别对横向平移 $\delta x, \delta y$ 及滚转 θz 进行独立约束与调节。在此过程中, 引入迭代微调机制 (Iterative fine-tuning) 以消除自由度间的微量串扰;

(4) 同步测量 (Main Test): 在六自由度位姿均收敛至设计阈值后, 采集主区域干涉图。此时获取的数据即为包含精确位姿信息的自由曲面形数据。

本文方法利用同一 SMR 靶球上的正交子区实现横向解耦, 并配合 SMR 的单基线即可解析滚转, 将六自由度对准流程简化为“倾斜→轴向→横向→滚转”的串行收敛链, 各步判据相互独立, 迭代次数减少约 50%。综合而言, 本方法在保持高分辨率的同时, 显著降低了解耦复杂度和装调时间成本。

2 系统仿真建模与波前验证

2.1 仿真目的与方法

本节旨在验证复合 CGH 各功能分区的波前编码正确性, 并在理论层面确认对准判据的物理响应特性^[16]。根据第 2 节的原理设计, 检测系统的主要参数以及 CGH 区域分布如表 1 和表 2 所示, 各分区的理想波前特性设定如下: 对准区域与平面基准区域设计为平面波, 用于消除光轴倾斜误差; SMR 基准区域设计为柱面会聚波, 用于在空间形成正交焦线以解耦横向与滚转误差; 猫眼区域设计为球面波, 用于轴向位置锁定。鉴于第 1.2 节已基于有效 F 数给出了对准精度的理论灵敏度分析, 本节重点关注波前形态与像差特征的验证, 不再重复数值反推。通过高分辨率干涉测量获取各分区实测波前, 并与理论设计波前进行差分拟合。从而在理论层面建立对准判据与物理误差之间的确定性映射关系。

利用光学设计软件 Zemax OpticStudio 建立与实验光路一致的全系统光线追迹模型。针对不同的 CGH 功能子区, 分别通过 Zernike standard 面型进行相位编码。仿真输出量为各分区光束经过系统回溯后的像面波前相位分布。在数据后处理阶段, 将光程差转换为相位数据, 并结合 Zernike 多

项式的低阶项, 对波前的主导像差特征进行分解与判别, 从而验证各分区判据对特定自由度的物理响应机制^[17]。

表 1 系统仿真关键结构参数

参数名称	数值	单位
工作波长 λ	632.8	nm
工作距离 L	638	mm
SMR ₁ 位置	(0, 167.5, 425)	mm
SMR ₂ 位置	(0, -145.5, 643.5)	mm

(注:坐标系原点位于 CGH 下表面几何中心)

表 2 CGH 对准区域分布表

区域	中心坐标	中心坐标	孔径尺寸	孔径尺寸
	x/mm	y/mm	x/mm	y/mm
SMR ₁ - x	0	99	38	26
SMR ₁ - y_1	-30	99	20	28
SMR ₁ - y_2	30	99	20	28
SMR ₂ - y	0	-99	38	26

2.2 各功能分区波前仿真结果与判据分析

基于全系统光线追迹模型, 实验所用的 CGH 设计了包括检测主全息、基准全息 (SMR 子区、cat-eye 区、plane 区) 和对准全息在内的多个区域, CGH 结构设计如图 3 所示, 各功能子区在像面处的仿真波前分布如图 4 所示, 通过对波前相位的 Zernike 分解, 验证了各分区对特定自由度的响应机制。首先, 对于平面基准区域 (如图 4 (d) 所示), 其设计目标为理想平面波。仿真结果显示, 有效口径内的波前相位呈现均匀分布, 残差极小 (RMS 优于 $\lambda/1000$), 其主要的低阶像差表现为倾斜项 (Tilt)。这表明该区域对系统绕 x, y 轴的相对倾斜误差 (θ_x, θ_y) 具有高灵敏度的线性响应, 适用于 CGH 的姿态及待测件的角度粗调。

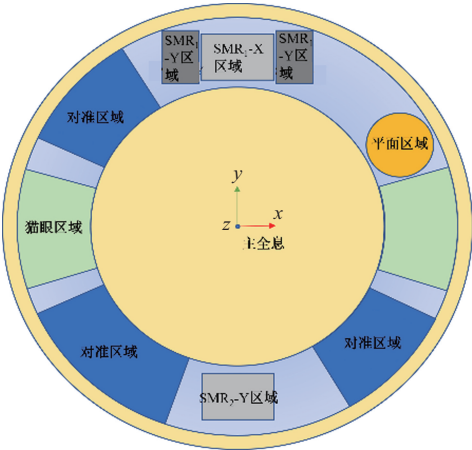


图 3 CGH 布局示意图

其次, SMR₁ 基准区域包含两类正交设计的子区。其中, SMR₁-X 子区 (图 4 (a)) 生成光功率主要集中在 y 方向的柱面会聚波, 在空间形成平行

于 x 轴的焦线，因此仅对 Y 向平移(δ_y)敏感；SMR₁- Y 子区（图4（b））则生成光功率主要集中在 x 方向的柱面会聚波，仅对 X 向平移(δ_x)敏感。从仿真波前图可见，两类子区均呈现显著的各向异性特征，主要由离焦项（Defocus）与像散项（Astigmatism）构成。这一特性验证了本文提出的“正交焦线解耦”策略，即当系统发生横向偏移时，返回的干涉条纹会优先在对应敏感子区呈现整体倾斜变化，从而实现了横向自由度的独立约束，同时也从物理光学角度验证了矩形子区的方向性口径使得横向对准判据天然具备方向选择性。

最后，针对绕光轴的滚转约束，SMR₂- Y 子区（图4（c））同样设计为生成焦线平行于 y 轴的柱面波。该区域与SMR₁- Y 子区在空间上构成一组长基线。当待测件发生绕光轴的滚转误差(θ_z)时，虽然SMR₁- Y 和SMR₂- Y 均会产生相位变化，但由于力臂的存在，两者的变化量将呈现差异。通过读取两个子区对准判据的差分信号，即可实现对滚转自由度的高精度解算与收敛。

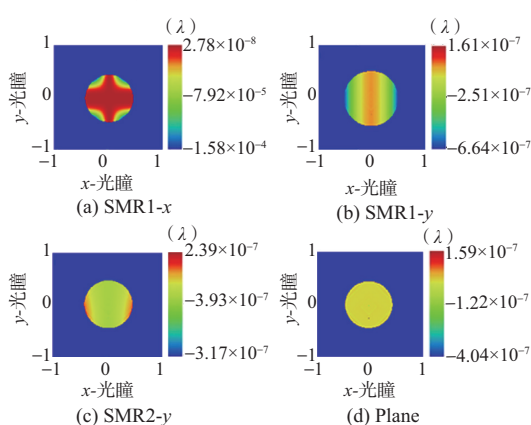


图4 像面处波前图

2.3 对准分辨率理论估算

基于第1.2节推导的灵敏度公式及有效F数概念，在工作波长 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 条件下，对系统的理论对准分辨率进行定量评估。设定干涉条纹的最小可分辨相位阈值为 $\Delta W_{\min} = 0.1\lambda$ （约对应 $h=0.1$ 的目视判读能力）。根据系统装配坐标，各SMR子区的有效会聚距离 f （CGH子区中心至角锥顶点的几何路径）计算如下：SMR₁- x 约为430.5mm，SMR₁- y_1 与SMR₁- y_2 约为431.5mm，SMR₂- y 约为645.2mm。结合各子区的有效口径尺寸，计算可得各自由度的理论分辨率指标：

横向平移分辨率：SMR₁- x 子区对 δx 的理论分辨率约为 $0.36\mu\text{m}$ ；SMR₁- y_1 与SMR₁- y_2 子区对 δy 的单路分辨率均约为 $0.49\mu\text{m}$ ，双路平均后可提升至 $0.35\mu\text{m}$ ；SMR₂- y 子区对 δ_y 的分辨率约为 $0.79\mu\text{m}$ 。

滚转角分辨率：利用SMR₁与SMR₂构成的差分基线（ Y 向基线长度 $L \approx 313.1\text{mm}$ ），通过读取两个靶球的 δx 判据差分，解算得到绕光轴的滚转(θ_z)分辨率约为 0.43arcsec 。上述结果表明，该系统设计具备亚微米级的位姿锁定能力，且分辨率与判别阈值 η 呈线性关系，为实验装调阶段的对准顺序规划与阈值设置提供了可靠的定量参考。

3 实验验证与结果分析

3.1 立式原位干涉检测平台搭建

为满足大口径自由曲面光学元件在重力自适应状态下的高精度检测需求，本文搭建了立式向下原位干涉检测平台。平台以商用Fizeau型移相干涉仪为核心测量主机，出射的标准平面波经扩束准直后垂直入射至复合CGH元件^[18]。CGH作为波前分割与编码的核心器件，衍射后分别形成用于面形测量的主全息光路以及用于位姿标定的多个辅助对准光路。待测自由曲面反射镜通过专用工装安装于下方的六自由度（6-DoF）精密调整架上，调整架固定于花岗岩隔振基座以隔绝地面微震。为确保光学基准与机械基准的严格统一，SMR靶球通过刚性支架与镜体支撑结构实现一体化装夹，确保SMR的空间位置能够真实、实时地反馈待测光学表面的刚体位姿变化。此外，实验环境严格控制在恒温（ $22.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ）、恒湿（ $50\% \pm 5\%$ ）及标准大气压条件下；为进一步抑制空气湍流引起的随机折射率波动，检测光路置于封闭的防风罩内，并引入层流净化系统以维持腔内气流的稳态分布，从而最小化环境噪声对纳米级相位测量的影响。

在正式开展检测之前，必须对实验装置进行全面的校准与验证，确保各组件的性能指标满足设计预期。本实验通过对整体实验平台进行绝对检测的方法来标定其系统误差，首先将被测面的几何中心与参考平面对应点调整至共焦状态，然后绕被测镜光轴等角度间隔旋转 N 次，依次采集各旋转位置下的干涉数据。通过解析旋转过程中引起的非对称面形变化，可提取出旋转非对称误差分量；进一步结合平移参考面的测量数据，即可计算获得待测面的旋转对称误差分量。标定结果为：RMS=3.643nm，PV=24.447nm。

3.2 光机基准对准流程与判据响应分析

为实现从粗装调到精测量的快速收敛，实验采用“由粗到精、分维锁定”的闭环对准策略。首先，利用CGH外围的对准区域（Alignment Zone）进行系统姿态标定，调节干涉仪主机的俯

仰与偏航旋钮,直至该区域干涉条纹调节至稀疏条纹的状态,从而确立干涉仪光轴与CGH法线的基准对齐关系。其次,进行轴向位置的粗调与锁定,将干涉仪切换至Align模式捕获主光斑后,观测猫眼区域(Cat-eye Zone),利用六维调整架驱动待测件沿Z轴移动;借助球面波对离焦误差的高灵敏度特性,使猫眼区域条纹由密变疏,最终收敛至接近零条纹的单色视场,实现轴向距离的精确匹配。

随后,进入关键的横向与滚转精调阶段。如图6所示,SMR基准区域的条纹形态直接反映了待测件的位姿状态。当待测件在横向(X, Y)或滚转(θ_z)自由度上存在偏差时(如图5(c)所示),受柱面波前固有的像散特性影响,SMR区域条纹表现为显著的倾斜、密集以及特征性的“V”形弯曲或非对称分布。此时,通过六维调整架微调X, Y平移及 θ_z 旋转,使所有SMR子区的干涉条纹同步收敛至稀疏、平直且相互平行的状态(如图5(b)所示),即可判定自由曲面已在统一机械基准下归位。最后,在确认六自由度位姿均已收敛至设计阈值并锁定工装后,切换至主检测区域采集移相干涉图,获取去除主要位姿误差后的自由曲面面形数据。该实验结果证实,平直的平行条纹是高精度对准的显著标志,而条纹的弯曲变形则直观反映了复合位姿偏差的存在,验证了基于SMR柱面波判据对多自由度误差的解耦与指示能力。

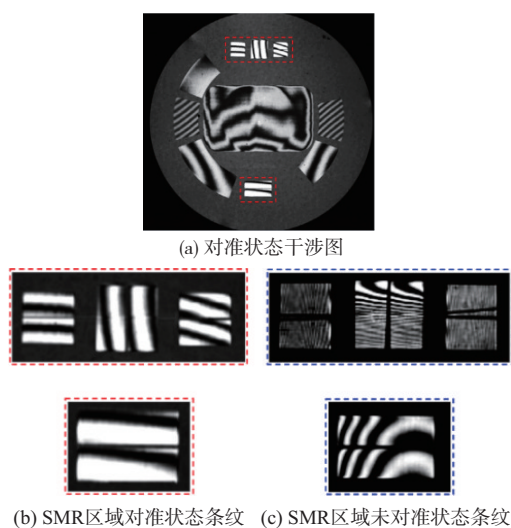


图5 光机对准干涉图

上述对准流程中,各自由度收敛阈值的设定依据第1.2节的理论分辨率及系统装调需求确定,具体数值如下:倾斜自由度 θ_x, θ_y 阈值 $\leq 1 \text{ arcsec}$ (通过对准区域零条纹目视判读,对应相位倾斜 $< \lambda/20$);轴向位置 δz 阈值 $\leq 0.5 \mu\text{m}$;横向平移 $\delta x, \delta y$ 阈值 $\leq 0.5 \mu\text{m}$ (SMR子区倾斜条纹判读,以

干涉图整体倾斜 < 1 根条纹为判据);滚转 θ_z 阈值 $\leq 1 \text{ arcsec}$ 。收敛判定的具体操作流程为:在每一步调节中,实时采集对应区域干涉图,利用内置移相算法实时计算Zernike低阶系数(倾斜、离焦、像散),当各系数绝对值连续三次测量均低于预设阈值时,即判定该自由度已收敛。该量化判据确保了多轮重复性测试中位姿复现的一致性。

3.3 多轮重新装调后重复性测量

为评估检测系统的稳定性与测量结果的置信度,开展了多轮复现性实验。实验方案为:完整执行一次检测流程(包括待测件装夹、CGH对准、位姿调整、面形测量)后,将待测件完全取下并重新装调,再次重复上述全部步骤。共进行10次独立重复测量,每次测量均独立记录面形误差的RMS值及PV值。每一轮检测均严格执行相同的SMR对准与相位解算流程,记录主全息区域的面形数据。测量结果的统计趋势如图6所示。数据分析表明,10组数据的面形RMS值均值为 97.616 nm ,PV值均值为 557.247 nm 。关键指标RMS值的波动极小,经计算,其标准差仅为 0.90 nm ;PV值的峰谷波动范围控制在 37 nm 以内。这一结果表明,即便在非真空的常规实验室环境下,基于SMR的原位检测方法仍能保持亚纳米级的RMS重复性,这不仅验证了光机对准流程的高鲁棒性,也证明了该系统具备极高的机械抗环境干扰能力。

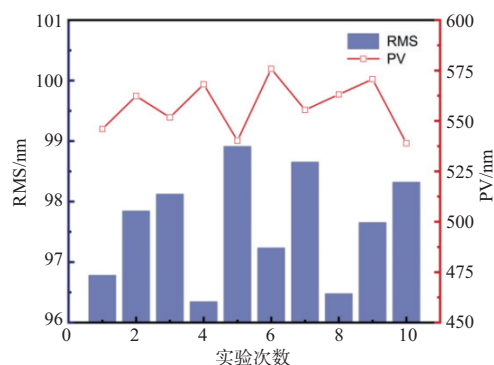


图6 多轮独立装调检测结果

系统的测量不确定度主要来源于多个方面。系统误差主要包括CGH的设计残差、基底透射波前误差、刻蚀工艺引入的制造误差,以及干涉仪参考镜面形误差和光学系统畸变等,这些误差可通过高精度标定和误差补偿算法进行有效抑制。随机误差则主要由环境气流扰动、机械振动以及探测器噪声引起,可通过控制实验环境、多次测量平均等方式降低其影响。综合评估,本系统的测量精度能够满足高精度自由曲面检测的应用需求。

3.4 与轮廓仪测量结果比对

本文实验所采用的待测元件为一非旋转对称的自由曲面反射镜。为进一步验证本文方法检测结果的准确性,采用LuphoScan高精度三维轮廓仪对该自由曲面元件进行对比测量。轮廓仪作为一种非零位、接触式扫描测量方法,其测量结果不受位姿误差耦合影响,可直接反映面形的绝对轮廓。对比测量在同一环境条件下进行,测量路径覆盖元件全口径。检测结果如图7所示,为: $PV=0.968\lambda$, $RMS=104.401nm$ 。图7(a)为轮廓仪测得的全口径面形误差分布图。从图中可以看出,该元件的面形误差呈现出中心对称的环带状高阶结构,并在边缘区域存在局部凹陷(蓝色区域)与抬升(红色区域)特征。图7(b)展示了沿X轴和Y轴的中心截面轮廓曲线,展示了其复杂的中高频误差细节。为验证正确性,用luphacan轮廓仪测量,两者面形分布基本一致,偏差为6.875nm。基于重复性测试所展现的亚纳米级稳定性以及与轮廓仪结果检测结果的相对误差,可以合理推断本文方法的测量准确性已达到与行业基准设备相当的水平。进一步验证了本方法的核心优势——在保证面形测量精度的同时同步输出六自由度位姿偏差。

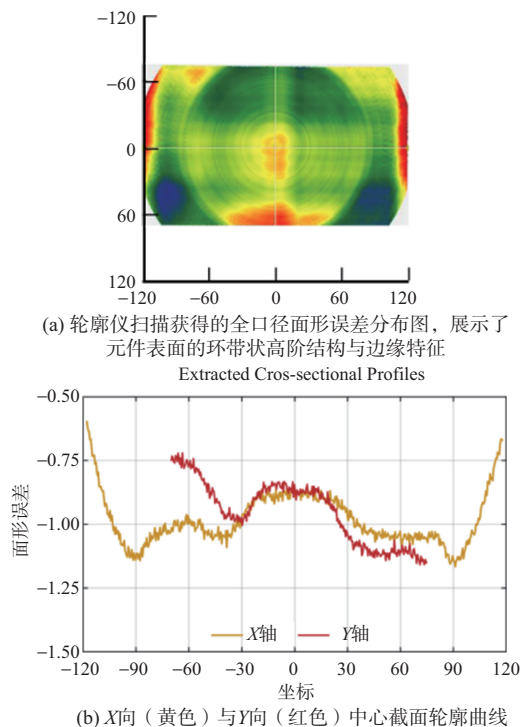


图7 待测自由曲面元件的面形误差轮廓仪检测结果

4 结 论

针对极紫外光刻等高端光学系统中自由曲面元件形位误差一体化评定的现实挑战,本文发展

了一种基于SMR辅助复合计算全息的原位同步检测与误差解耦方法。通过理论建模与系统实验验证,本研究的实践意义与技术突破主要体现在以下方面:

在技术路径上,通过在单片复合计算全息图中集成主检测结构与多种辅助对准单元,并结合柱面会聚波形成正交焦线的设计,有效实现了光学基准与机械基准的统一,为自由曲面元件形位误差的一体化原位评定开辟了新的技术可能性。

实验数据表明,所构建的系统具有良好的环境适应性与测量重复性。在常规实验环境下,面形测量重复精度达到亚纳米级,反映出该系统在光机对准与抗干扰方面的可靠性。进一步通过与超高精度轮廓仪的交叉比对,证明了所获取的面形数据具有高度保真性,验证了该方法的测量准确性。

需要指出的是,本文方法的高精度位姿解耦依赖于SMR靶球与待测自由曲面之间的刚性固连关系。在本文实验条件下,该假设成立,实验验证了方法的可行性与重复性。然而,在实际高端光学系统的装调与测试场景中,可能存在柔性支撑、真空环境、大温变工况典型工况,本文方法尚未进行充分验证:针对上述更复杂的装调场景,后续研究将围绕柔性基准解耦、真空兼容型SMR设计、热误差在线补偿等方向展开。

本方法的突出价值在于,在实现高精度面形测量的同时,有效分离装调误差,为精密光学制造中“形位混叠”难题的解决提供了可行方案。这在一定程度上有望推动光学检测由“单一几何量测量”向“形位一体化评价”的模式转变。

参考文献:

- [1] 李艳秋,南雁北,陈雨情,等.极紫外光刻机曝光系统光学设计研究与进展[J].光学学报,2023,43(15):1522002.
Li Yanqiu, Nan Yanbei, Chen Yuqing, et al. Research and progress on optical design of exposure systems in extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43 (15): 1522002.
- [2] 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 Rihong, Sun Yue, Shen Hua. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0112001.
- [3] 侯溪,张帅,胡小川,等.超高精度面形干涉检测技术进展[J].光电工程,2020,47(8):200209.
Hou Xi, Zhang Shuai, Hu Xiaochuan, et al. The research progress of surface interferometric measurement with higher accuracy[J]. Opto-Electron Eng, 2020, 47(8): 200209.
- [4] 梁子健,杨雨英,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.

- Liang Zijian, Yang Yongying, Zhao Hongyang, et al. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology[J]. Chinese Optics, 2022, 15(2): 161.
- [5] 陈善勇, 薛帅, 熊玉朋, 等. 面向制造的光学面形超精密测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 0312011.
- Chen Shanyong, Xue Shuai, Xiong Yupeng, et al. Research progress of ultra-precision measurement of optical surfaces for manufacturing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 0312011.
- [6] 李明泽, 侯溪, 赵文川, 等. 非球面光学表面缺陷检测技术现状和发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9): 202204.
- Li Mingze, Hou Xi, Zhao Wenchuan, et al. Current situation and development trend of aspheric optical surface defect detection technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(9): 202204.
- [7] 黎发志, 郑立功, 闫锋, 等. 自由曲面的CGH光学检测方法与实践[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1021—1056.
- Li Fazhi, Zheng Ligong, Yan Feng, et al. Optical testing method and its experiment on freeform surface with computer-generated hologram[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 1021—1056.
- [8] 黄亚, 王丰璞, 李新南, 等. 基于计算全息的大口径离轴非球面子镜的衍射混合补偿检测方法[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1212004.
- Huang Ya, Wang Fengpu, Li Xinnan, et al. Large aperture off-axis aspherical segment test using refraction and diffraction mixed compensation based on computer generated hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1212004.
- [9] 刘佳妮, 陈安和, 李智勇, 等. 小口径深度凸非球面的高精度面形检测[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9): 202201.
- Liu Jiani, Chen Anhe, Li Zhiyong, et al. High-precision shape measurement technology for convex aspheric with small aperture and large convex asphericity[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(9): 202201.
- [10] 王慎, 刘泉, 国成立, 等. 基于计算全息图零位补偿的同轴高次非球面干涉检测技术研究[J]. 中国光学, 2025, 18(2): 237.
- Wang Shen, Liu Quan, Guo Chengli, et al. CGH null compensation testing of high-order coaxial aspherical surfaces[J]. Chinese Optics, 2025, 18(2): 237.
- [11] 王慎, 曹耘, 闫力松. 计算全息零位补偿离轴非球面干涉检测技术[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(6): 20250156.
- Wang Shen, Cao Yun, Yan Lisong. CGH null compensation testing method of off-axis aspheric mirror surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(6): 20250156.
- [12] Huang Ya, Zhu Rihong, Ma Jun, et al. Asphericity and discrete phase calculation for optical freeform surface test with computer generated holograms[J]. Advanced Materials Research, 2013, 718(2013): 1797—1803.
- [13] 李雯研, 程强, 曾雪锋, 等. 计算全息补偿检测自由曲面的高精度位姿测量[J]. 光学精密工程, 2023, 31(11): 1581.
- Li Wenyan, Cheng Qiang, Zeng Xuefeng, et al. High-precision posture measurement for measuring freeform surface with computer generated hologram compensation[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(11): 1581.
- [14] 冯婕. 基于CGH高精度非球面检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2014.
- Feng Jie. Highly accuracy aspheric surface testing based on computer-generated hologram[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [15] 吴一凡, 陈建发, 崔泽曜, 等. 基于CGH多镜定姿定态的离轴光学系统装调方法[J]. 光学学报, 2024, 44(3): 0322002.
- Wu Yifan, Chen Jianfa, Cui Zeyao, et al. Alignment method for off-axis optical systems based on CGH Multi-mirror attitude determination[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(3): 0322002.
- [16] 王施相, 孔令豹, 吕昊宇. 光学自由曲面测量与误差评估技术研究进展[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822013.
- Wang Shixiang, Kong Lingbao, Lv Haoyu. Advances in measurement and error evaluation technique of optical freeform surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822013.
- [17] 李佳, 程强, 王孝坤, 等. 计算全息检测技术的精度溯源研究现状分析[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(8): 20240135.
- Li Jia, Cheng Qiang, Wang Xiaokun, et al. Analysis of the current status of research on accuracy traceability based on computational holographic detection technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(8): 20240135.
- [18] 高松涛. 超高精度非球面面形检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- Gao Songtao. Research on Ultra-precise aspheric surface testing [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.