

基于 CGH 的大口径长焦距离轴抛物面反射镜测量

胡晨^{1,3}, 魏朝阳^{1,3*}, 万嵩林¹, 江国昌¹, 顾昊金¹, 邵建达^{1,2,3**}¹中国科学院上海光学精密机械研究所精密光学制造与检测中心, 上海 201800;²中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光材料重点实验室, 上海 201800;³中国科学院大学材料科学与光电子工程中心, 北京 100049

摘要 随着激光脉冲宽度极限的不断突破以及峰值功率的不断提高,脉宽压缩光栅的尺寸需要进一步增大。但反射式曝光系统所需大口径长焦距离轴镜的高精度加工检测成为制约大口径光栅制作的难题。采用计算全息补偿检测不需要复杂的设计和装调,但同样会引入非回转对称和复杂的二维投影畸变。传统的畸变校正方法由于精度受限或计算复杂不利于工程应用。提出基于数值计算的畸变校正方法,该方法具有简单通用易于编程的优点。利用 800 mm 口径折反镜在直径为 18 m 光学平台上搭建了面形检测光路,通过系统误差标定去除以及畸变校正的方法实现了高精度面形测量,经磁流变迭代加工后,面形精度 RMS 可收敛至 0.013λ ($\lambda=632.8$ nm),这为后续大口径反射式曝光系统的建立奠定了基础。

关键词 离轴抛物面镜; 计算全息图; 误差标定; 投影畸变校正

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230567

1 引言

啁啾脉冲放大(Chirped pulse amplification, CPA)技术^[1]已经被广泛应用于拍瓦激光系统。随着激光脉冲宽度极限的不断突破以及峰值功率的不断提高,其核心器件脉宽压缩光栅的尺寸需要进一步增大^[2-5]。然而如何突破现有曝光系统对光栅尺寸的限制是一个具有挑战性的课题^[6-10]。随着近些年光学加工技术的进步,采用离轴抛物面(OAP)反射镜产生双光束静态干涉场曝光所需的高质量平行光束的方法,从而有可能实现大尺寸光栅掩模的制作。该方法的实现受所需的大口径长焦距离轴镜高精度加工检测制约。

通常离轴抛物面的加工检测方法主要是用辅助镜得到同心光束而进行零位检验,辅助镜又可分为无像差点法及补偿法^[11]。轴上平行光束经抛物面会聚成完善的同心光束,为此进行无像差点检验需要用同一个口径的标准平面镜^[12]。然而,由于离轴抛物面镜口径接近 2 m,大尺寸的高精度平面镜本身就难以获得;而传统补偿法中的补偿器是将离轴抛物面当作同轴母镜的部分区域进行检测,由于光路具有回转对称性,在大口径、大离轴量条件下,采用球面透镜组成的补偿器在设计、加工和装配方面的难度大大增加,无法满足实际需求^[13]。同时,由于测量时离轴镜中心不位于光轴中心,离轴镜的位置调整困难^[14],且会产生较大的投影

畸变,这为后续高精度数控加工带来困难。

衍射式光学补偿法采用衍射光学元件计算全息片(Computer generated hologram, CGH)作为二元衍射元件^[15],相位可以直接根据非球面方程及光路配置获得,理论上只要刻线密度不超过现有加工能力,就能实现任意面形的补偿。为了避免引入高载频导致的 CGH 口径更大、条纹更密,加工难度变大甚至难以加工的问题,通常会将 CGH 平移并倾斜离轴抛物面,将其几何中心移至于干涉仪轴上,将离轴抛物面作为轴上自由曲面进行补偿检测^[16]。但该方法还是会引入非回转对称和复杂的二维投影畸变,且畸变相对较大无法满足高精密数控加工对工件定位精度的需求,必须进行高精度的校正。在对畸变进行校正时,一般都采用“标记点”法^[17-19],即在被测镜面上做网格状的标记点,检测后提取出对应标记点在电荷耦合器件(CCD)坐标的位置,根据二者的对应关系,利用特定的算法校正畸变。由于标记点法的精度高低取决于标记点的数量,而提取大量的标记点坐标通常费时费力且容易出现误差。因此,如果畸变较大且对校正精度要求苛刻,则会利用光线追迹的方法,推导出 CCD 坐标到镜面坐标的映射函数,但解析推导过程相对复杂且繁琐^[20],面对更为复杂的曲面时不利于工程应用,因此,需要考虑更简单、通用的畸变校正方法。

本文提出了一种采用商用瞬态泰曼格林干涉仪基

收稿日期: 2023-02-24; 修回日期: 2023-03-29; 录用日期: 2023-04-11; 网络首发日期: 2023-04-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(62205352)、国家重点研发计划(2020YFA070304)

通信作者: *siomwei@siom.ac.cn; **jdshao@siom.ac.cn

于 CGH 补偿检测方法,实现了大口径、长焦距离轴抛物面镜的高精度面形测量。为了避免环境振动、气流等因素对长光程光路测量精度的影响,除了使用瞬态干涉仪外,考虑到实际平台限制,为尽量缩短光路,采用大口径标准平面反射镜作为折反镜,在有限长度的气浮平台上满足该长光路的干涉检测。为了保证离轴镜的加工检测精度,着重分析了检测光路中各元件(扩束器、CGH 以及折反镜等)引入的面形误差,将各误差综合为系统误差后标定去除,并针对干涉测量后的投影畸变校正提出了一种基于光线追迹点的数值计算方法,通过少量标记点即可完成校正且给出校正误差。最后,基于误差标定和畸变校正后的检测结果,采用磁流变加工技术完成了 $1650\text{ mm} \times 1120\text{ mm}$ 离轴抛物面镜的高精度加工。

表 1 离轴抛物面镜的设计参数

Table 1 Optical design prescription of OAP mirror

Optical parameter	Value	Note
Aperture	$1650\text{ mm} \times 1120\text{ mm}$	
Material	Glass ceramics	
Vertex radius of curvature	$2.4 \times 10^4\text{ mm}$	
Off-axis distance	2000 mm	Distance from the parent vertex
Conic constant	-1	Parabola
Aspheric departure	118 μm	Astigmatic peak-to-valley departure
Measure method	Null test with standard plane mirror	

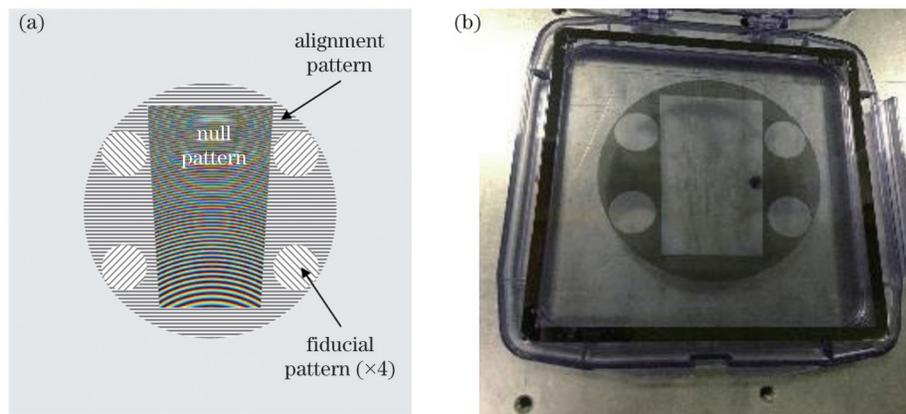


图 1 用于零位测量的 CGH。(a)CGH 上的衍射区域;(b)CGH 实物图

Fig. 1 CGH for null test. (a) Diffractive sections on CGH; (b) physical map of CGH

根据设计光路,CGH 到镜面中心的距离为 $2.315 \times 10^4\text{ mm}$,这种长干涉腔长的检测光路对振动以及气流非常敏感,严重时甚至造成干涉条纹无法解析,极其考验干涉仪的抗环境干扰能力。为了降低振动对测试光路的影响,需将检测光路置于隔振气浮平台上。采用折反镜可以有效缩短光路长度,但由于受空间限制即隔振气浮平台长度(为 18 m)小于干涉腔长,因此引入的误差接近折反镜自身面形误差的 2 倍,这对高精度离轴镜的制造是难以接受的。为此,在充分利用平台长度的基础上必须尽量减小折反镜的口径。综合

2 CGH 补偿检测方法

2.1 检测光路

离轴抛物面镜的设计制造参数如表 1 所示。利用 CGH 可以补偿任意自由曲面的特点,将离轴位置的抛物面镜通过旋转、平移,使干涉仪的主光线与离轴抛物面中心点的法线重合。基于该思路,所采用的 CGH 由亚利桑那光学计量公司 (Arizona optical metrology, AOM) 制造,设计内容有主全息区域、对准区域和标记点区域,如图 1(a) 所示。测量时,100 mm 口径的平行光以一定角度入射 CGH 主全息区域后产生补偿波前,对准区域用于与激光平面干涉仪对准,标记点区域产生 4 个聚焦于待测离轴镜 4 个边角点的光点,用于标记确定离轴镜位置,实际测量使用的 CGH 如图 1(b) 所示。

考虑,在距离轴镜面几何中心 17 m 的位置放置折反镜,经计算实际干涉测量区域的口径约为 600 mm,标记区域为 660 mm。因此,基于现有条件选用口径为 800 mm 的标准平面镜作为折反镜。检测光路示意图如图 2(a) 所示。

实际测量过程中,采用 4D 泰曼格林型瞬态干涉仪^[21],如图 2(b) 所示,型号为 PhaseCam 6000,性能参数如表 2 所示。表 2 中:RMS 为均方根。

由表 1 可知,干涉仪有效口径[半峰全宽(FWHM)]为 9 mm,为了匹配现有的 CGH,需要设计并制作

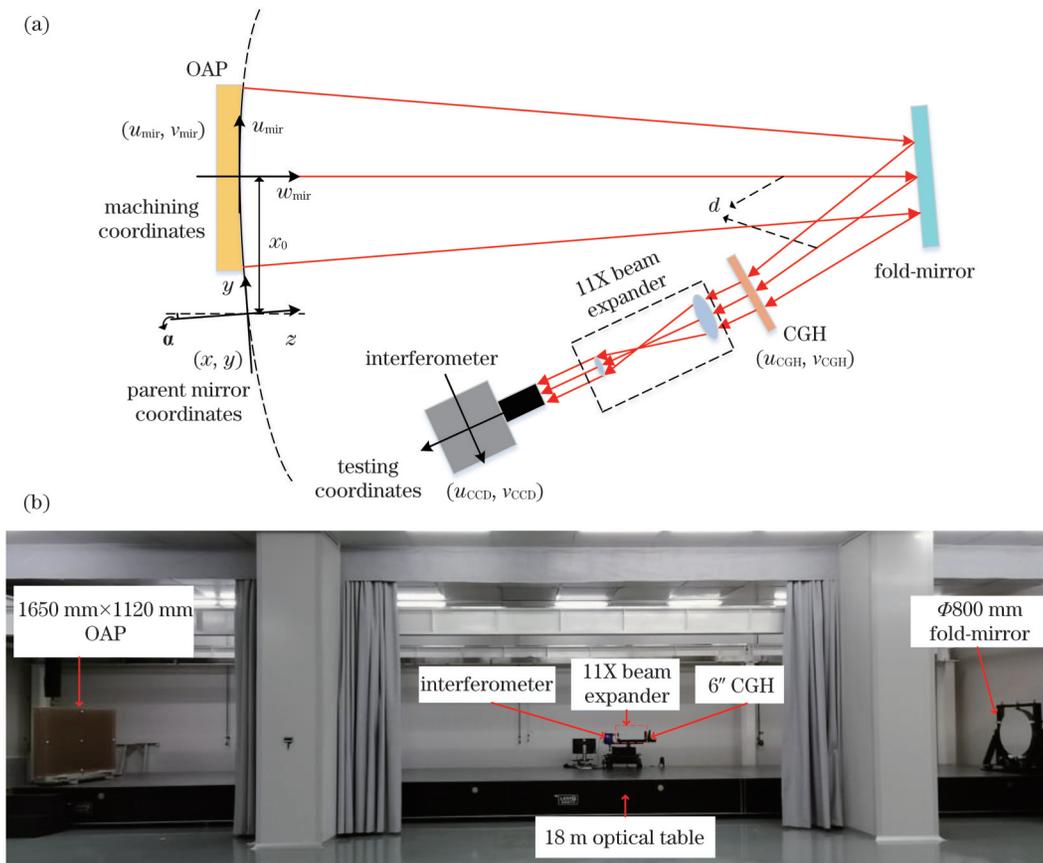


图 2 离轴抛物面镜的 CGH 检测光路。(a) 光路示意图; (b) 实际光路图

Fig. 2 Optical path of testing off-axis paraboloid mirror with CGH. (a) Schematic diagram of optical path; (b) photograph of optical path

表 2 PhaseCam 6000 的主要技术规格

Table 2 Main specifications of PhaseCam 6000

Specification	Value
Description	Vibration insensitive dynamic Twyman-Green interferometer
Acquisition mode	Instantaneous phase shifting with pixelated phase sensor
Beam diameter	9 mm collimated FWHM
Focus range /mm	± 12.5
Minimum exposure / μ s	30
RMS repeatability	$< 0.001\lambda$
RMS precision	$< 0.002\lambda$

11 倍扩束系统, 以将干涉仪出射光束扩束到 100 mm。考虑到 4D 干涉仪的调焦范围较小, 只有 ± 12.5 mm。为了实现干涉条纹的清晰调焦, 设计扩束系统时, 出瞳位置需要匹配该干涉仪的调焦面。为此采用开普勒式 (即主、次镜均为正透镜) 结构, 设计参数如表 3 所示, 避免伽利略式 (即次镜为负透镜) 结构, 该结构会造成干涉条纹成像面在扩束系统主次镜之间, 导致干涉仪因调焦距离受限而无法调焦到成像面, 造成条纹不清晰进而无法正确解析出面形的情况。采用该结构后, 干涉仪扩束后的光束将沿轴向产生 180° 翻转, 需要注意面形与实际离轴镜的位置关系。

表 3 扩束系统光学设计参数

Table 3 Optical design parameters of beam expander

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi-diameter /mm	Conic constant
OBJ	INF	INF		60.00	
1	260.20	20.00	SILICA	60.00	
2	INF	603.86		60.00	-0.636
3	50.60		N-BK7	12.70	
4	-50.60			12.70	
IMA		INF		4.36	

在完成测量光路搭建后, 对粗抛完成后的离轴镜进行面形检测。为了便于分析, 将三坐标 (Coordinate measuring machine, CMM) 测量得到的数据导出为与干

涉仪一致的数据格式。将干涉仪测量后的面形与蔡司 CMM 面形进行对比, 除了干涉测量结果存在投影畸变外, 特征分布基本一致, 如图 3 所示 (图 3 中: PV 为峰谷值)。

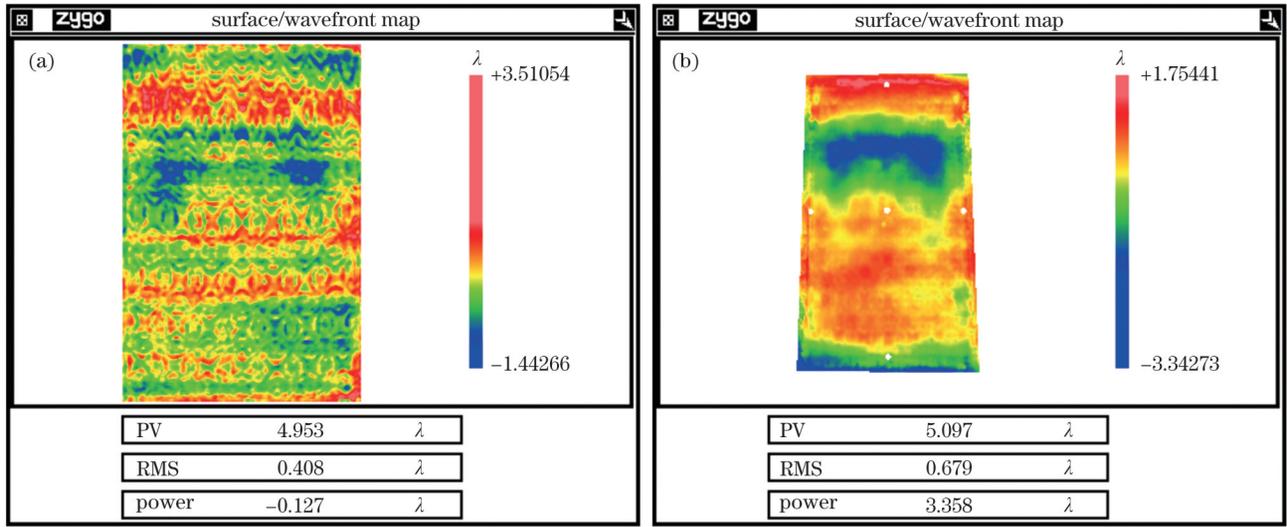


图 3 不同测量方式结果比较。(a)CMM测量的面形(对扫描测量步距为 10 mm 的数据进行 2 mm 插值);(b)干涉仪测量的面形
Fig. 3 Comparison of results from different measurement methods. (a) Surface map measured by CMM (2 mm interpolation for data with scanning step of 10 mm); (b) surface map measured by interferometer

2.2 误差分析及标定

检测光路中除干涉仪外,主要的光学元件包括 CGH、匹配扩束系统以及折反镜,为了实现离轴镜的高精度测量,必须标定并消除引入的误差。测量光路中的系统误差包括以下 3 种误差。

1) CGH 设计制造误差

CGH 设计制作误差^[22]直接影响离轴镜的测量精度,主要误差包括:编码误差、图形误差、刻蚀深度误差以及基板的制造误差,具体误差分配如表 4 所示。基板透过波前作为较大的误差源需要进行精确校准,标定方法为将 CGH 插入空腔测得的透过波前再减去空腔波前。通过该方法标定的结果如图 4 所示。

表 4 CGH 设计和制造误差分配
Table 4 CGH design and fabrication error budget

Design and fabrication contributor	Figure error RMS
Design residual	0.1
Wavelength uncertainty of 0.002 nm	0.1
Encoding error	0.5
Patterning error (10 nm RMS in one direction)	0
Etching uniformity error	0
Substrate thickness	0
Substrate wedge (1.5 μrad)	0
Substrate index error of 0.0001	0
CGH substrate deformation error / design (the same deformation on both faces, that is not seen in the transmission measurement). Assumes 1 μm sag over 140 mm diameter	0
Total RSS	0.5

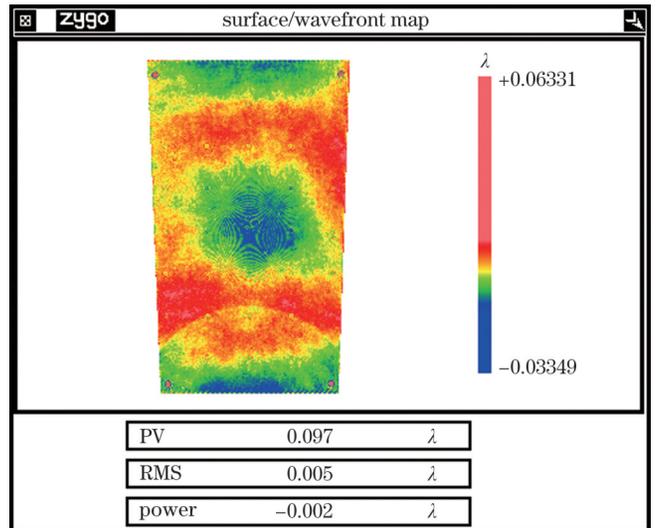


图 4 CGH 基板通光口径内的透过波前误差
Fig. 4 Transmitted wavefront error of the CGH substrate over the clear aperture

若未校准基板,则基底透过波前误差 RMS 为 3.2 nm (去除 power 后),再加上 CGH 设计/制造误差,总误差 (RSS)RMS 为 3.2 nm。

2) 扩束系统设计制造误差

上述的开普勒式扩束系统除了匹配出瞳位置以及对面形翻转 180°外,对面形检测的影响主要还存在两个方面:一是扩束系统存在轴外像差,为了避免过多倾斜条纹导致轴外误差,而引入干涉光路回程误差的影响,测量时可以将干涉图像调至零条纹;二是本身扩束系统存在制造误差,为了减小其影响,首先采用高精度标准平面镜自准直测量扩束系统透过波前,随后采用数控抛光机床完成配修,最后在每次测量前采用参考平面镜标定扩束系统的波前误差,将其作为测量光路的系统误差进行扣除。

实际加工中,次镜采用球面透镜,主镜采用非球面透镜,其中主镜迎向平行光的面一般为椭球面。基于购买商业化产品可节约成本和时间的考虑,主镜经优化后可先按照接近球面透镜采购,随后在球面的基础上,根据设计要求加工成非球面,初始理论

透过波前残差为 5λ ,如图 6(a)所示。利用测量干涉仪与对应球面次镜,并采用高精度标准平面镜自准直测量系统的透过波前,随后采用数控抛光机床完成非球面配修得到扩束系统的透过波前,如图 6(b)所示。

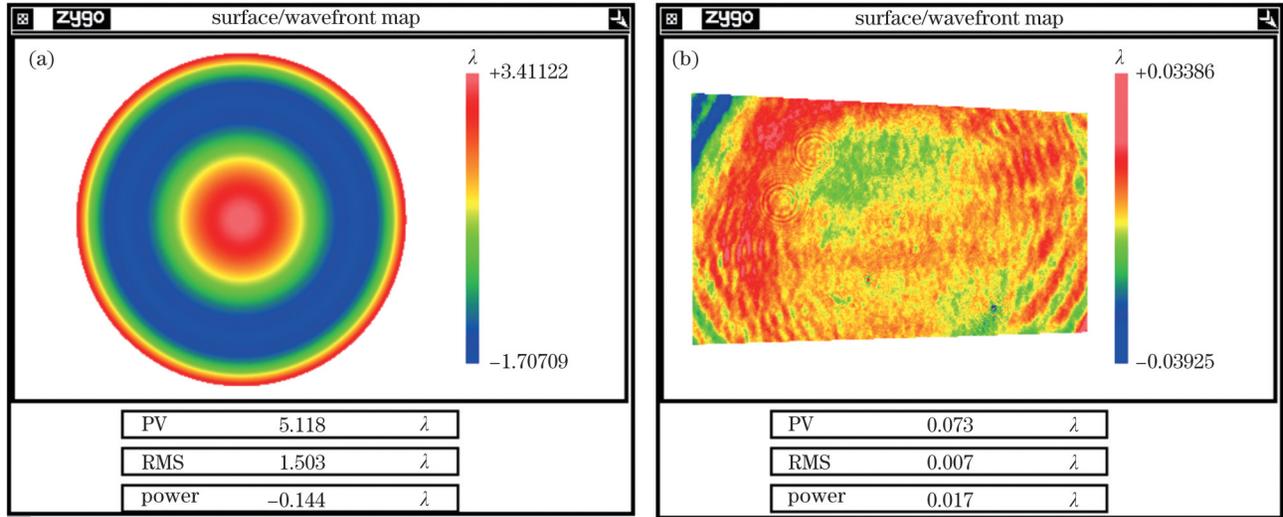


图 5 扩束系统透过波前误差。(a)理论透过波前误差(球差);(b)配修后通光口径内透过波前误差(去除离焦后)
Fig. 5 Transmitted wavefront error of beam expanding system. (a) Theoretical transmitted wavefront error (spherical aberration); (b) transmitted wavefront error over the clear aperture after polishing(after removing power)

3) 折反镜误差标定

上述的高精度大口径平面标准镜较难获得,其作为折反镜置于光路中,系统误差将会随面形误差放大

约 2 倍,若不加以标定,可能会成为整个光路的主要误差源,光路中所用的 $\Phi 800$ mm 折反镜的面形误差如图 7 所示。

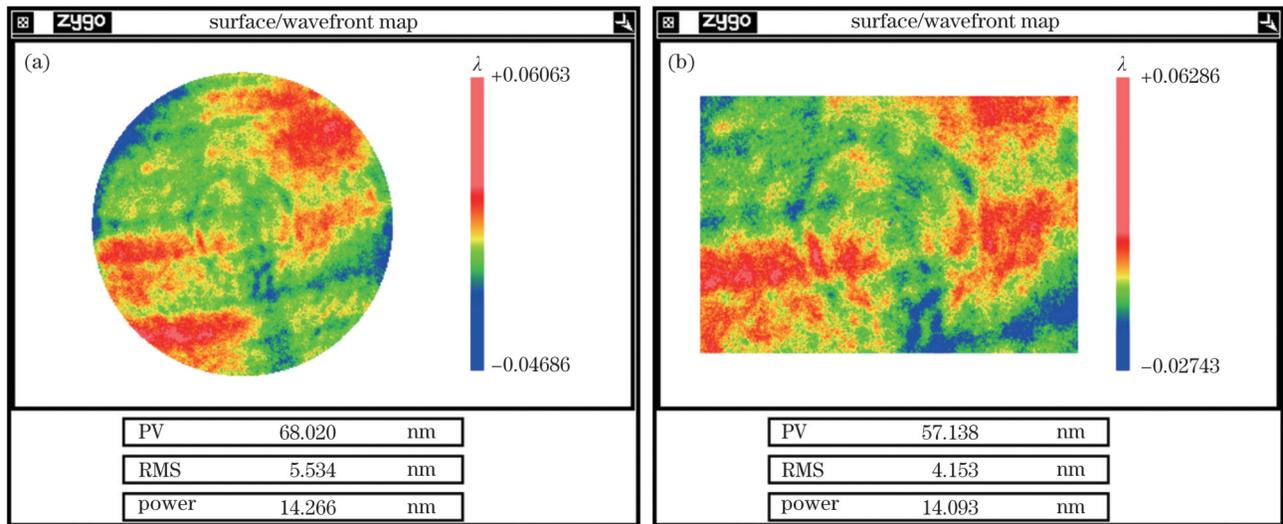


图 6 测量光路中 $\Phi 800$ mm 折反镜的面形误差。(a)反射面形误差(90% 通光口径);(b)有效测量区域面形误差
Fig. 6 Figure error of $\Phi 800$ mm fold-mirror in measuring optical path. (a) Figure error (90% clear aperture); (b) figure error of effective measurement area

利用干涉仪的 Fiducials 功能以及光线追迹,可以精确地确定平面镜在补偿光路中实际有效的测量区域,如图 6(b)所示。在实际加工中,由于平面镜位置距离干涉仪位置较远,难免会出现定位误差。假设平面镜的定位误差均为 10 pixel,对应实际尺寸约为 5 mm。则平移、旋转综合引入误差 RMS 为

2.59 nm,如图 7 所示,定位误差产生的中高频误差将在后续加工中采用平滑光顺的方式去除。因此,经过标定后的平面镜引入到系统的残差 RMS 将不超过 5.2 nm。

综上,将 CGH、扩束系统和折反镜的可标定误差叠加,并使环状面足够大,可以覆盖 105% 的离轴抛物

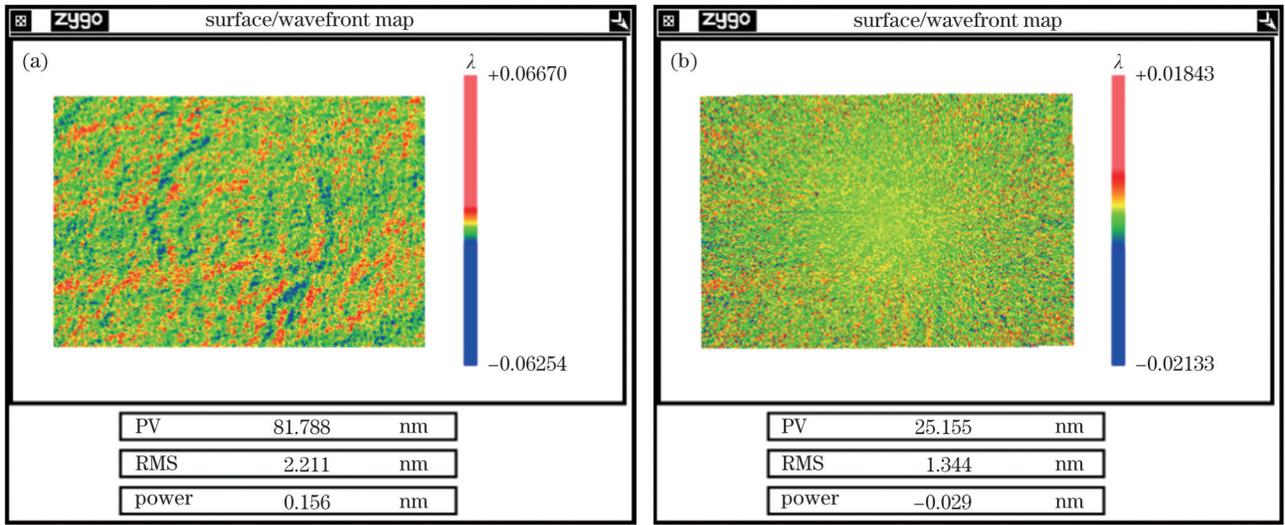


图 7 测量光路中 $\Phi 800$ mm 折反镜的定位误差。(a) 平移(5 mm, 5 mm); (b) 旋转 0.5°

Fig. 7 Positioning error of $\Phi 800$ mm fold-mirror. (a) Translation (5 mm, 5 mm); (b) rotation 0.5°

面区域, 则测量出光路的系统误差 RMS 为 11 nm, 面形分布如图 8 所示。经误差补偿后, 该测量光路的测

量误差 RMS 将不大于 5.4 nm。其中, 折反镜的面形误差为主要误差来源, 具体残差分配情况如表 5 所示。

表 5 测量误差分配

Table 5 Measurement error budget

Measuring component contributor	Figure error RMS /nm
Interferometer	<1.2
Beam expanding system (remove after calibration)	<0.7
CGH (remove after calibration)	0.5
Flod mirror (5° reflecting angle, remove after calibration)	<5.2
Total RSS	<5.4

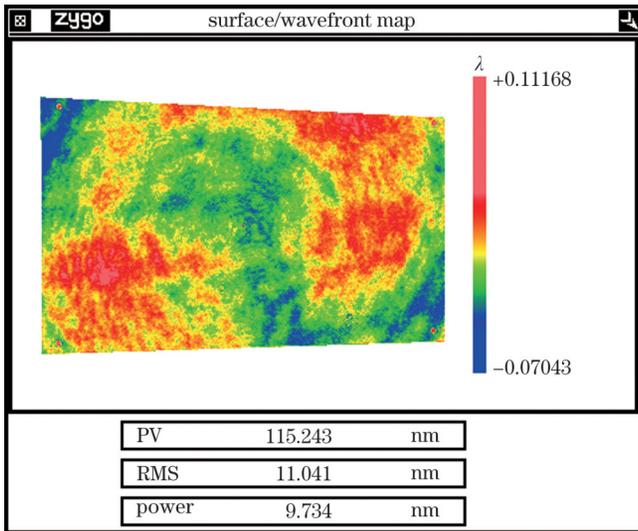


图 8 测量光路系统误差

Fig. 8 System error of measuring optical path

2.3 投影畸变校正

离轴镜数控加工实现精密修形的前提是要保证加工坐标系与检测坐标系相互匹配, 从而实现去除函数与面形误差精确定位卷积, 因此需要对检测得到的畸变数据进行校正。根据零位补偿光学系统的设计原

则, 光线以镜面法线方向经折反镜反射后与 CGH 相交, 以平行光出射后通过扩束系统与干涉仪进行入瞳匹配, 最后投射到 CCD 上。其中, 折反镜和扩束系统不会引入投影误差畸变, 可以简化光线追迹的计算。畸变校正的核心就是建立镜面坐标点、CGH 坐标点、CCD 坐标点之间的映射关系。由于 CGH 与 CCD 之间不存在非线性畸变, 且商用干涉仪的成像畸变可以忽略不计^[23], 只需进行仿射变换校正^[24]。因此, 重点关注镜面坐标点与 CGH 坐标点之间的数值映射关系。

通过坐标变换将镜面坐标点变换到子镜坐标系下, 子镜点通过双三次插值来计算数据的曲面点法线, 为了在边界上插值可以使用二次外插来扩展数据或在计算前选取比实际镜面口径更大的数据点。在对数据进行双三次拟合后, 计算对角线向量并进行叉乘得到每个顶点位置的法向量^[25]。在获得各点的法向量后, 根据镜面与 CGH 平面的相对位置关系即可计算得到法线(即光线)与 CGH 平面的交点。在得到子镜坐标点以及对应投射到 CGH 的交点坐标后, 根据预设的成像畸变模型, 通过最小二乘法获得该模型的参数, 从而建立坐标之间的映射关系。具体方法如图 9 所示。

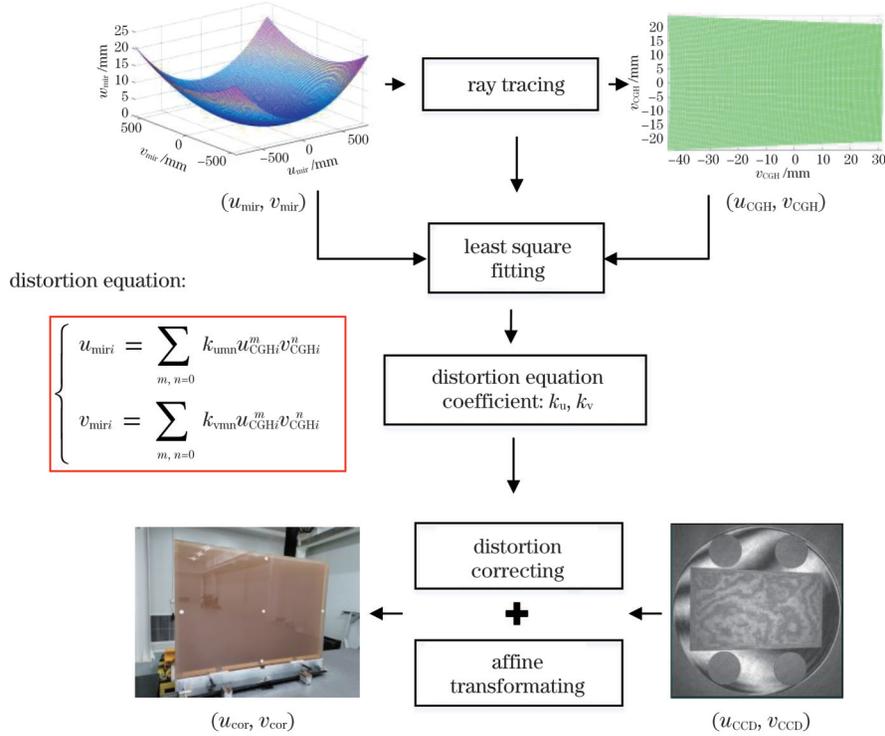


图 9 畸变校正流程图

Fig. 9 Flow chart of distortion correction

通常非球面方程^[12]可表示为

$$z(x, y) = \frac{cS^2}{1 + \sqrt{1 - (K + 1)c^2S^2}} + A_1S^4 + A_2S^6 \dots, \quad (1)$$

式中: $c=1/R$ 为非球面顶点曲率; K 为圆锥系数; A_1, A_2, \dots 为高次项系数; $S^2 = x^2 + y^2$ 。

设 (x, y, z) 为母镜镜面上的点, 离轴方向为 x 方向, 且离轴量为 x_0 , 则经过旋转、平移变换得到离轴子镜坐标点为

$$\begin{cases} u_{mir} = x \cos \alpha + z \sin \alpha + x_0 \\ v_{mir} = y \\ w_{mir} = -x \sin \alpha - z \cos \alpha + z(x_0, 0), \\ \alpha = \arctan \left[\frac{\partial z(x_0, 0)}{\partial x} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $(u_{mir}, v_{mir}, w_{mir})$ 为坐标变换后子镜坐标系下(通常也为加工坐标系)的镜面点坐标, 子镜坐标点通过双三次插值计算得到曲面点的法线向量, 即 $(n_u, n_v, 1)$, 与平面 CGH 交点坐标可表示为

$$\begin{cases} u_{CGH} = [n_u u_{mir} (d - w_{mir}) + u_{mir} + \Delta u_{CGH}] \cos \psi \\ v_{CGH} = n_v v_{mir} (d - w_{mir}) + v_{mir} \end{cases} \quad (3)$$

式中: (u_{CGH}, v_{CGH}) 为 CGH 平面上的畸变点; (u_{mir}, v_{mir}) 为 CGH 对应的镜面点坐标; d 为离轴镜中心到 CGH 的距离。由于补偿设计时一般会通过平移、旋转 CGH 以排除二元光学元件的其他衍射级次对测量的干扰, 因此, 式(3)中, $\Delta u_{CGH}, \psi$ 分别为 CGH 的平移和旋转量。

由式(1)可知, 目前一般非球面以旋转对称系统为

主, 在干涉测量中通常出现的畸变形式都是沿径向的畸变, 故在离轴状态下的畸变形式基本上以桶形、枕形以及梯形畸变等几何形变为主^[26]。显然, 上述 CGH 检测光路其畸变形式可表示为

$$\begin{cases} u_{miri} = \sum_{m,n=0} k_{umn} u_{CGHi}^m v_{CGHi}^n \\ v_{miri} = \sum_{m,n=0} k_{vmn} u_{CGHi}^m v_{CGHi}^n \end{cases}, \quad (4)$$

式中: 在 CGH 平面上的点集为 $\{(u_{cghi}, v_{cghi})\}$; m, n 为各项的幂数; k_{umn}, k_{vmn} 为各项的系数。根据不同的畸变特性, 可以灵活地应用式(4), 理论上多项式的项数越多, 级次越高, 几何精度也越高, 但可能会出现过拟合的现象。为了避免畸变模型过拟合, 针对所提干涉仪 CCD 像素尺寸情况, 选取的理论网格划分间隔为 2 mm, 采用光线追迹方法获得对应畸变点, 当选取拟合级次 $m, n=4$ 时, 计算得到的理论校正点与镜面点位置偏差最大值为 0.0963 mm、RMS 为 0.0233 mm, 其偏差值已远小于干涉仪的测量分辨率, 完全可以满足实际加工中的畸变校正需求, 该方法可以较快选取合适的拟合级次。

CCD-CGH 仿射关系参数的求解需要在镜面上用 CMM 定位, 其特征点坐标集为 $\{(u_{miri}, v_{miri})\}$, 根据上述畸变模型得到在 CGH 平面上的对应点集为 $\{(u_{CGHi}, v_{CGHi})\}$, 在干涉仪 CCD 上对应的像素坐标集为 $\{(u_{CCDi}, v_{CCDi})\}$, 则可利用 Fiducials 功能直接读取获得, 将镜面中心标记点 (u_0, v_0) 对应的 CCD 位置坐标作为基准原点 (u_{CCD0}, v_{CCD0}) , 建立 CCD-CGH 的仿射变换模型, 具

体可表示为

$$\begin{bmatrix} u_{\text{CCD}} \\ v_{\text{CCD}} \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\text{CGH}} \\ v_{\text{CGH}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\text{CCD}0} \\ v_{\text{CCD}0} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: s 为缩放参数; θ 为旋转参数。

当得到仿射变换参数后, 将式(5)代入式(4), 畸变校正方程可表示为

$$\begin{cases} u_{\text{cori}} = \frac{1}{s^{(m+n)}} \sum_{m,n=0} k_{\text{umn}} \left\{ \left[(u_{\text{CCD}i} - u_{\text{CCD}0}) \cos \theta - (v_{\text{CCD}i} - v_{\text{CCD}0}) \sin \theta \right]^m \cdot \right. \\ \left. \left[(u_{\text{CCD}i} - u_{\text{CCD}0}) \sin \theta + (v_{\text{CCD}i} - v_{\text{CCD}0}) \cos \theta \right]^n \right\} \\ v_{\text{cori}} = \frac{1}{s^{(m+n)}} \sum_{m,n=0} k_{\text{vmn}} \left\{ \left[(u_{\text{CCD}i} - u_{\text{CCD}0}) \cos \theta - (v_{\text{CCD}i} - v_{\text{CCD}0}) \sin \theta \right]^m \cdot \right. \\ \left. \left[(u_{\text{CCD}i} - u_{\text{CCD}0}) \sin \theta + (v_{\text{CCD}i} - v_{\text{CCD}0}) \cos \theta \right]^n \right\} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: 校正后的镜面点坐标集为 $\{(u_{\text{cor}}, v_{\text{cor}})\}$ 。在实际标定过程中, 除了中心标记点外, 至少还需要一对特征点, 然后利用最小二乘法计算获得仿射变换参数。为了提升校正精度和计算畸变校正误差, 通常采用 5 点或 9 点标记方法完成畸变校正和误差校验。

3 离轴镜的加工验证

将上述技术用于 $1650 \text{ mm} \times 1120 \text{ mm}$ 离轴抛物面镜的数控磁流变抛光加工中。在镜面上用 CMM 选取 9 个点作为畸变校正点 $(u_{\text{mir}}, v_{\text{mir}})$, 同时得到对应的 CCD 坐标点 $(u_{\text{CCD}}, v_{\text{CCD}})$, 代入畸变校正方程得到校正后的镜面点坐标 $(u_{\text{cor}}, v_{\text{cor}})$, 将实际镜面点与校正后镜面点的位置偏差作为评价畸变校正的校正误差, 其中位置坐标偏差为

$$\begin{cases} u_{\text{err}} = u_{\text{mir}} - u_{\text{cor}} \\ v_{\text{err}} = v_{\text{mir}} - v_{\text{cor}} \\ \rho_{\text{err}} = \sqrt{u_{\text{err}}^2 + v_{\text{err}}^2} \end{cases}. \quad (7)$$

畸变校正点的坐标位置以及位置误差如表 6 所示, 其中校正误差最大值为 1.96 mm , 小于用于检测的干涉仪的测量分辨率, 该测量精度已能满足数控磁流变抛光加工的定位精度要求。

采用上述方法对畸变面形进行校正, 根据校正后的面形, 对离轴抛物面反射镜利用磁流变抛光技术 (Magnetorheological finishing, MRF) 进行加工。经过多次迭代加工后, 干涉仪测量得到的面形收敛结果如图 11(a) 所示。不同于一般成像系统只关注 RMS 值, Peak to valley (PV) 值可能对成像质量影响不大, 但在曝光系统中则需要综合考虑。离轴抛物面的反射镜作为反射曝光系统的核心器件被应用于光栅制作, 对曝光光场均匀性以及制作得到的光栅衍射波前都提出明确的指标要求。其中, 依据光场衍射理论, 曝光光场均匀性与离轴镜面形误差的 RMS 值密切相关, 而面形误差的 PV 值则直接关系到所制造光栅的衍射波前。对大口径光学元件而言, 仅简单地用两个点 (峰谷) 来描述面形测量结果将不再准确。所以采用 ZYGO 公司提出 PV_r 指标替代, 该值是利用 36 阶

表 6 标记点的位置偏差

Table 6 Position deviation of marked points

No.	Marked points / mm				Deviation / mm		
	u_{mir}	v_{mir}	u_{CCD}	v_{CCD}	u_{err}	v_{err}	ρ_{err}
1	0	0	652.12	600.52	0.00	0.39	0.39
2	0	-510	645.63	365.70	0.58	0.64	0.86
3	0	510	647.73	835.50	0.78	-0.11	0.78
4	775	0	196.70	603.01	1.82	-0.37	1.86
5	775	0	1036.20	598.19	1.08	1.64	1.96
6	775	510	1034.30	821.00	0.84	0.64	1.05
7	775	-510	1033.10	376.40	-1.07	0.39	1.14
8	775	-510	189.80	350.00	-0.23	-0.57	0.62
9	775	510	192.60	856.10	-0.94	-0.27	0.98
Max deviation					1.82	1.64	1.96
RMS					0.95	0.69	1.18

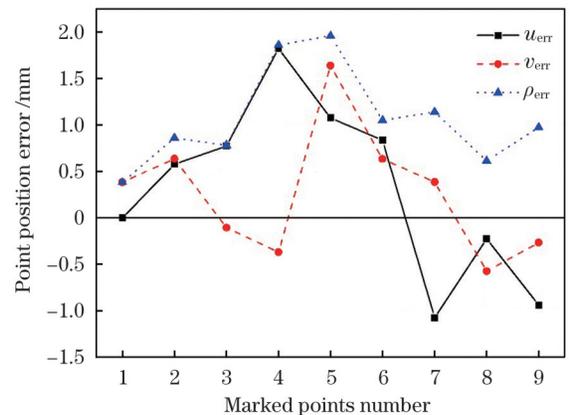


图 10 畸变校正误差

Fig. 10 Distortion correction error

Zernike 多项式拟合实际面形误差得到的 PV 值, 再加上 3 倍的残差均方根, 排除了不同测量分辨率和个别奇异点的干扰, 相对于 PV 值更加客观和稳定。在实际加工中, 通过统计量 RMS 可以分析出波面的缓慢变化情况, 且在满足指标要求的前提下, 通常 PV_r 与 RMS 比值越小说明波面越连续光滑, 所产生的光场就越均匀。

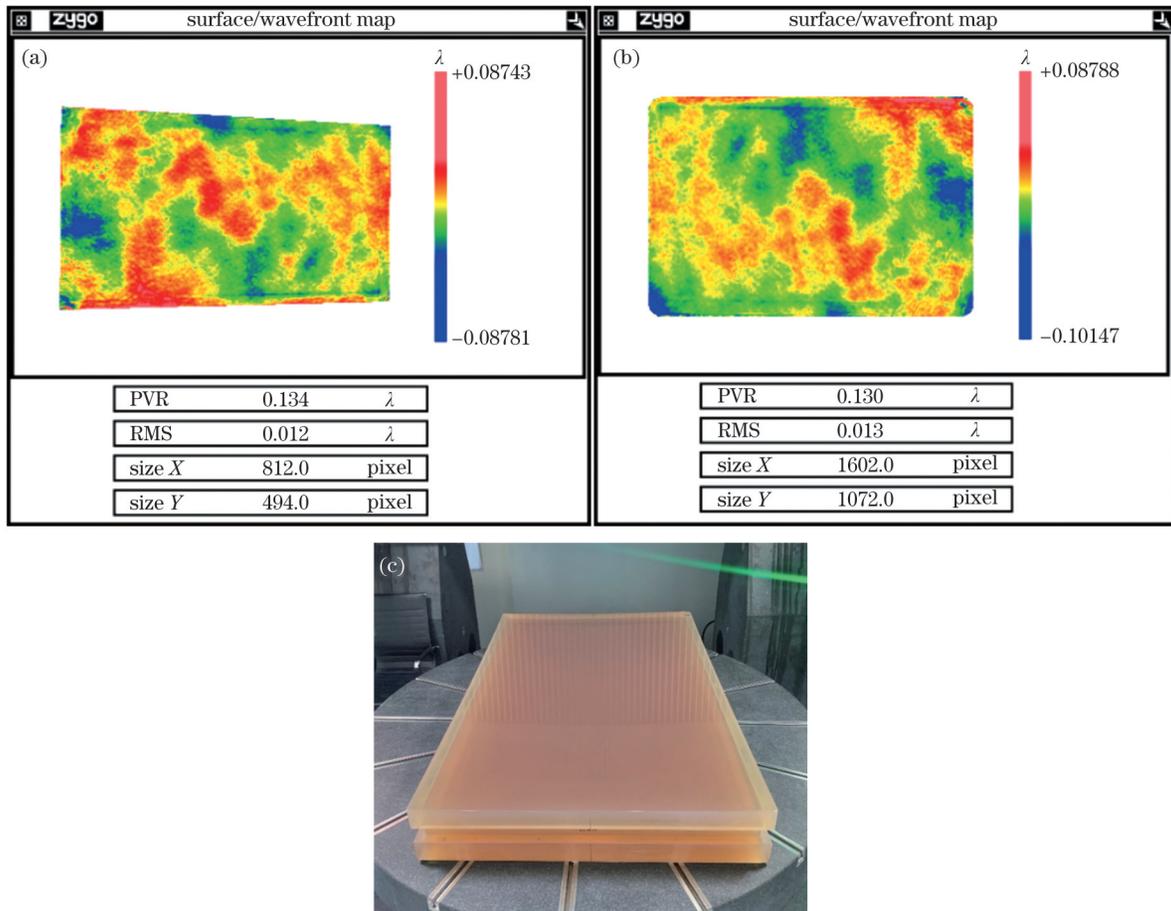


图 11 迭代抛光结果。(a)畸变校正前的面形;(b)畸变校正后的面形;(c) 1650 mm \times 1120 mm 离轴抛物面反射镜

Fig. 11 Iterative polishing results. (a) Surface map before distortion correction; (b) surface map after distortion correction; (c) 1650 mm \times 1120 mm off-axis paraboloid mirror

最终,经过畸变校正后的离轴镜面形结果:PVR为 0.130λ ,RMS为 0.013λ ,如图 11(b)所示。对比畸变校正前后的面形结果,校正后的面形分布与数值同未校正的基本一致,且与实际工件坐标相吻合,该结果为后续曝光光场的分析和性能的评价提供良好的基础。

4 结 论

针对 1650 mm \times 1120 mm 长焦距离轴抛物面反射镜的检测,引入了 $\Phi 800$ mm 折反镜以缩短 CGH 补偿检测光路。通过误差分析计算,将光路中可标定误差投影至 CCD 上作为系统误差进行去除,从而实现了检测精度提升。考虑到测量同时产生的投影畸变误差,给出了基于光线追迹以及成像畸变模型拟合的校正方法,与传统方法相比,该方法非常适合于数值编程计算。经加工验证,面形精度 RMS 可收敛至 0.013λ ($\lambda=632.8$ nm),所提方法满足高精度离轴镜检测加工的要求,为后续大口径反射式曝光系统的建立奠定基础。

所提的畸变校正模型主要针对径向畸变,即畸变形式基本上以桶形、枕形以及梯形畸变等几何形变为主,若要校正更复杂的形变则需探索更适合的畸变校正模型。

参 考 文 献

- [1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 55(6): 447-449.
- [2] 冷雨欣. 上海超强超短激光实验装置[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100001.
Leng Y X. Shanghai ultra-strong and ultra-short laser experimental device[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100001.
- [3] 李儒新, 程亚, 冷雨欣, 等. 超快光学与超强激光技术前沿研究[J]. 中国科学(信息科学), 2016, 46(9): 1236-1254.
Li R X, Cheng Y, Leng Y X, et al. Research on the frontier of ultrafast optics and ultra-intense laser technology[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2016, 46(9): 1236-1254.
- [4] Zhang W F, Kong W J, Wang G M, et al. Review of pulse compression gratings for chirped pulse amplification system[J]. Optical Engineering, 2021, 60(2): 020902.
- [5] 张文飞, 孔伟金, 李宗文, 等. 金属/介质膜宽压缩光栅研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 010004.
Zhang W F, Kong W J, Li Z W, et al. Research progress of metal/dielectric film pulse width compression grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 010004.
- [6] Raub A, Frauenglass A, Brueck S. Large area patterning using interferometric lithography: US8685628 B2[P/OL]. 2014-04-01. <https://www.freepatentsonline.com/8685628.pdf>.
- [7] 钱国林, 吴建宏, 李朝明. 全息光栅并列拼接法的研究[J]. 光学学报, 2022, 42(21): 2105002.
Qian G L, Wu J H, Li C M. Parallel splicing method for holographic gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(21): 2105002.
- [8] Turukhano B G, Gorelik V P, Kovalenko S N, et al. Phase

- synthesis of a holographic metrological diffraction grating of unlimited length[J]. *Optics & Laser Technology*, 1996, 28(4): 263-268.
- [9] Pati G S, Heilmann R K, Konkola P T, et al. Generalized scanning beam interference lithography system for patterning gratings with variable period progressions[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2002, 20(6): 2617-2621.
- [10] Qiao J, Kalb A, Guardalben M J, et al. Large-aperture grating tiling by interferometry for petawatt chirped-pulse-amplification systems[J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9562-9574.
- [11] 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.
- [12] Malacara D. Optical shop testing[M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2007.
- [13] Ruda M. Methods for null testing sections of aspheric surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1979, 69(10): 1418-1419.
- [14] Zheng L G, Xue D L, Zhang X J. Computer-aided alignment for off-axis asphere null test[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5638: 319-323.
- [15] MacGovern A J, Wyant J C. Computer generated holograms for testing optical elements[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(3): 619-624.
- [16] 黎发志, 罗霄, 赵晶丽, 等. 离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 709-716.
- Li F Z, Luo X, Zhao J L, et al. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(4): 709-716.
- [17] Novak M, Zhao C, Burge J H. Distortion mapping correction in aspheric null testing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7063: 706313.
- [18] Zhao C Y, Burge J H. Orthonormal vector polynomials in a unit circle, application: fitting mapping distortions in a null test[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7426: 253-260.
- [19] 李锐钢, 郑立功, 薛栋林, 等. 大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 533-538.
- Li R G, Zheng L G, Xue D L, et al. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4): 533-538.
- [20] 曾雪锋, 闫锋, 薛栋林, 等. 计算全息图补偿检测离轴非球面中的投影畸变校正技术[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1109003.
- Zeng X F, Yan F, Xue D L, et al. Distortion correction in testing of off-axis asphere with computer-generated hologram[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 1109003.
- [21] 4D Technology[EB/OL]. [2023-01-02]. <https://4dtechnology.com/>.
- [22] Chang Y C, Burge J H. Error analysis for CGH optical testing[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3782: 358-366.
- [23] 高松涛, 武东城, 苗二龙. 大偏离度非球面检测畸变校正方法[J]. *中国光学*, 2017, 10(3): 383-390.
- Gao S T, Wu D C, Miao E L. Distortion correcting method when testing large-departure asphere[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10(3): 383-390.
- [24] 曾文锋, 李树山, 王江安. 基于仿射变换模型的图像配准中的平移、旋转和缩放[J]. *红外与激光工程*, 2001, 30(1): 18-20, 17.
- Zeng W F, Li S S, Wang J A. Translation, rotation and scaling changes in image registration based affine transformation model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(1): 18-20, 17.
- [25] MathWorks. Surfnorm[EB/OL]. [2023-01-02]. <https://ww2.mathworks.cn/help/matlab/ref/surfnorm.html>.
- [26] 李安. 复杂离轴光学畸变计算校正研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 19-23.
- Li A. Computational correcting research for complicated off-axis optical distortion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 19-23.

Measurement of Large Aperture Long Focus Off-Axis Paraboloid Mirror Based on Computer Generated Hologram

Hu Chen^{1,3}, Wei Chaoyang^{1,3*}, Wan Songlin¹, Jiang Guochang¹, Gu Haojin¹, Shao Jianda^{1,2,3**}

¹*Precision Optical Manufacturing and Testing Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

²*Key Laboratory for High Power Laser Material, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences Shanghai 201800, China;*

³*Center of Material Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

Objective With the continuous development of laser pulse width limits and improvement of peak power, the size of the pulse compression grating (PCG) must be further increased. However, the high-precision manufacturing and testing of large aperture and long focal distance off axis parabolic (OAP) mirrors required by reflective exposure systems, has presented a difficult challenge that restricts the manufacturing of large aperture gratings. The method based on computer generated holograms (CGH) does not require a complex design and setup, however, it introduces non-rotational symmetry and complex two-dimensional projection distortion. When correcting distortion, traditional marker points and analytical methods have limited accuracy or complex calculations, which are not conducive to engineering applications. Therefore, this study proposes a distortion correction method based on numerical calculation, with the advantages of simplicity, versatility, and ease of programming. Based on the CGH test optical path, high-precision surface measurement can be achieved using system error calibration and distortion correction methods, laying the foundation for OAP mirror surface accuracy manufacturing and subsequent establishment of large aperture reflective exposure systems.

Methods Initially, a $\Phi 800$ mm folding mirror is adopted to effectively shorten the optical path length, enabling development of a CGH measurement optical path on an 18 m vibration isolation air flotation optical table (Fig. 2), and design a beam expansion system

that matches the measurement aperture of the interferometer and CGH. Subsequently, the measurement errors introduced by the main optical elements in the optical path, excluding the interferometer, including CGH, beam expansion system, and fold mirror, are analyzed in detail, and the errors introduced are calibrated and removed. Thereafter, to ensure that the machining coordinate system matches the testing coordinate system, to achieve the precise positioning and convolution of the removal function and figure error, it is necessary to correct the distorted surface map measurement. Therefore, the mapping relationship between mirror, CGH, and CCD coordinate points is established based on the imaging distortion model (Fig. 9). Finally, according to the corrected surface map, the OAP mirror is fabricated using Magnetorheological Finishing (MRF) technology.

Results and Discussion. Once the measurement optical path is established, the surface map measured by the interferometer was compared with that measured by the coordinate measurement machine (CMM). Except for the projection distortion in the interferometric measurement results, the distribution of other features is basically consistent (Fig. 3). When the CGH calibratable errors, beam expander system, and fold mirror are superimposed, the measurement optical path system error is 11 nm RMS (Fig. 8). After error compensation, the measurement optical path error does not exceed RMS 5.4 nm (Table 5). Among them, the fold mirror figure error is the main error source. The coordinate positions and positional errors of the distortion correction points are listed (Table 6). The maximum correction error is 1.96 mm, which is smaller than the testing interferometer measurement resolution. This measurement accuracy meets the of magnetorheological computer numerical control (CNC) machining positioning accuracy requirements. Post processing, the OAP mirror figure error after distortion correction is PVr: 0.130λ , RMS: 0.013λ (Fig. 11). By comparing the surface map distributions before and after distortion correction, it can be observed that the corrected surface map distribution and values are fundamentally consistent with those uncorrected s, and with the mirror coordinates. This result provides a good basis for subsequent light field exposure analysis and performance evaluation.

Conclusions For the measurement of a 1650 mm \times 1120 mm long focal distance OAP mirror, an Φ 800 mm fold mirror is introduced to shorten the CGH compensation measurement optical path. Using error analysis and calculation, the calibratable error in the optical path is projected onto the CCD, and then calibrated and removed, thereby achieving improved measurement accuracy. Considering the projection distortion error caused by simultaneous measurement, a correction method based on ray tracing and imaging distortion model fitting is proposed. Compared with traditional methods, the proposed method is extremely suitable for numerical programming calculations. Once processing verification completes, the figure accuracy can converge to RMS 0.013λ , and meet the requirements of high-precision OAP mirror specifications and manufacturing, laying a foundation for the subsequent establishment of large aperture reflective exposure systems.

Key words off axis paraboloid mirror; computer generated hologram; error calibration; mapping distortion correction