

鸥翼型非球面元件的白光干涉拼接测量

路文文^{1,2}, 郭景阳^{1,2}, 陈善勇^{1,2*}¹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;²超精密加工技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 针对鸥翼型非球面面形检测的难题, 提出了一种白光干涉拼接测量方案。基于白光显微干涉测量结合子孔径拼接的测量原理对扫描路径进行规划。搭建白光干涉拼接测量平台完成了对 10 mm 鸥翼型非球面的 59 个子孔径的高精度测量。利用同步子孔径拼接算法对测得的子孔径数据进行拼接, 得到了全口径面形误差。开展了利用高精度轮廓仪和计算机生成全息图(CGH)补偿器对鸥翼型非球面面形进行检测的对比实验。结果表明, 所提检测方案的面形误差数值和分布均与高精度轮廓仪和 CGH 补偿器得到的结果吻合, 有效验证了所提测量方案的正确性。

关键词 测量; 鸥翼型非球面; 白光干涉拼接; 全口径; 高精度

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0912001

White Light Interferometry Stitching Measurement of Gull-Wing Aspheric Optics

Lu Wenwen^{1,2}, Guo Jingyang^{1,2}, Chen Shanyong^{1,2*}

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

²Hunan Key Laboratory of Ultra-Precision Machining Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract In order to solve the problem of gull-wing aspheric profile detection, a white light interferometry stitching measurement scheme is proposed. The scanning path is planned by combining white light micro-interferometry with the measurement principle of subaperture stitching. The white light interferometry stitching measurement platform is constructed, and the high-precision measurement of 59 subapertures of a 10 mm gull-wing aspheric surface is completed. The measured subaperture data are stitched by using the synchronous subaperture stitching algorithm, and the full-aperture profile error is obtained. The comparative experiments on the detection of gull-wing aspheric surface by using high-precision profiler and computer generated hologram (CGH) compensator are carried out. The results show that the profile error and distribution of the proposed detection scheme are consistent with those obtained by high-precision profiler and CGH compensator, which effectively verifies the correctness of the proposed measurement scheme.

Key words measurement; gull-wing aspheric surface; white light interferometry stitching; full aperture; high precision

1 引言

小口径非球面为光学系统的设计和性能优化提

供了更多的自由度, 可有效降低光学系统的复杂性, 使系统趋于小型化、轻量化和集成化, 故其已在头戴式显示器、微型数码相机、医用内窥镜和显微镜镜头等

收稿日期: 2021-09-30; 修回日期: 2021-11-08; 录用日期: 2021-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(52005503)

通信作者: *mesychen@163.com

器件中得到了广泛应用^[1-4]。小口径非球面的口径通常在 10 mm 量级。随着非球面透镜在高精度光学系统中的推广,玻璃精密模压、复合模压和注塑成型^[5-9]等小口径非球面制造技术近 10 年在我国飞速发展。就目前小口径非球面制造检测领域来看,无法实现经济有效的全口径面形检测是阻碍行业发展的一大难题,因为传统接触式测量易对被测表面造成损伤。主流的显微轮廓测量方式具有横向测量范围小等局限,已不能满足小口径非球面的高精度检测需求。对于非球面,鸥翼型面形检测难题尤为突出。鸥翼型非球面是一类特殊的回转对称型高次非球面,其母线的曲率方向会发生反转,即存在凹凸性改变的拐点,形如鸥翼。由于这类元件的面形方程较为特殊,故目前鲜有测量手段能够满足全口径高精度测量的需求。

波面干涉测量技术是当前的主流非球面检测方法。通常波面干涉测量的参考镜为平面镜或者球面镜,不能直接对非球面实现零位测量,但使用补偿器可将入射波前转换为待测非球面波前^[10-11]。然而,不论是透射式补偿器(Offner 补偿镜),还是以计算机生成全息图(CGH)为代表的衍射式补偿器,目前均无法适应鸥翼型非球面的曲率反转特性,故难以实现鸥翼型非球面的零位补偿干涉检验。

超精密轮廓扫描测量技术可实现自由曲面光学面形的高精度和高通用性检测,相关的典型系统代表有荷兰埃因霍恩科技大学制造的 NANOMEFOS 系统和英国 Taylor Hobson 公司制造的 LupoScan 系统,系统中采用运动轴与测量轴分离的技术来提升测量基准精度^[12]。另外,日本松下公司 UA3P-6 型超高精度三维轮廓测量仪和荷兰埃因霍恩 IBS 精密机械公司研发的 Isara 400 超精密测量仪均采用零阿贝误差的设计结构,同样能实现面形超精密扫描检测^[13]。以上系统测量精度优于 100 nm。然而,该类测量技术是基于逐点扫描方式的,测量效率与分辨率较低,无法实现高精度轮廓扫描运动基准和误差的实时补偿是该技术应用的瓶颈,也是导致测量设备成本高昂的主要原因。

常规的干涉显微轮廓测量方法常用于测量微器件的表面形貌、纹理和微系统功能表面等^[14-17]。白光干涉显微镜、扫描探针显微镜等器件的纵向测量分辨率在亚纳米量级,但横向测量范围太小且横向分辨率取决于显微镜的数值孔径。子孔径拼接方法通过测量一系列子孔径的方式来拼接得到全口径数据,能够有效扩展测量范围,近 20 年来在复杂光学

面形干涉测量方面得到了较多的应用^[18-19]。子孔径拼接方法耦合白光干涉显微镜同样能够解决测量视场太小的问题,实现衍射器件微纳结构的高精度拼接检测。然而,白光干涉显微拼接测量的报道局限于平面微结构测量,且拼接测量方法并不适用于曲面^[20-21],故小口径鸥翼型非球面面形测量仍具有很大的挑战性。

本文为解决鸥翼型非球面光学元件高精度测量难题,提出了一种白光干涉环形扫描测量耦合子孔径拼接的解决方案。首先,分析了鸥翼型非球面的测量特性,搭建了白光干涉环形扫描测量平台,完成了 10 mm 级口径鸥翼型非球面面形子孔径高精度测量。然后,采用子孔径拼接算法实现了全口径鸥翼型非球面面形的拼接。最后,通过多种测量对比实验证实了所提方案的正确性。

2 白光干涉拼接测量

白光干涉显微技术将宽光谱干涉原理与显微成像技术相结合,利用干涉光路使待测结构表面反射的测试光束与干涉物镜内的参考光束会聚,进而得到干涉条纹^[22]。利用干涉条纹对表面高度信息极其敏感的特性,白光干涉显微技术能够实现亚纳米级的高度检测。由于使用的是宽光谱的白光光源,故在电荷耦合器件(CCD)上采集的干涉图样是不同波长分量干涉图样合成的结果,干涉图样极大值的位置为测试光束与参考光束等光程(零光程差)处。利用压电陶瓷驱动器逐层扫描白光干涉波包的峰值信号获得每个像素点对应的高度信息,进而还原出被测表面的三维形貌。传统的白光干涉显微测量受显微放大和 CCD 的限制,测量视场一般在 1 mm 左右,在大口径情况下往往不能满足测量需求。借鉴子孔径拼接“以小拼大”的思想,将两者的优势相结合,既满足高精度,又能实现全口径检测。

2.1 子孔径划分

白光干涉拼接测量主要包含子孔径划分、测量路径规划、测量平台设计和子孔径拼接算法。子孔径划分是指在被测光学元件全口径表面确定子孔径布局,并依此规划测量路径,确定测量时子孔径对准与调零的名义位置。在非球面的子孔径划分中,由于非球面的曲率是连续变化的,故需要考虑很多因素,其中对复杂的离轴非球面子孔径划分更是一项精细又复杂的工作,很难做到完全智能或最优。确定子孔径划分的基本要素是横向分辨率、区域重叠系数和全口径覆盖,幸运的是这些要求其实都不需

要精确控制,因此允许划分过程粗略进行。下面对被测鸥翼型非球面光学元件展开子孔径划分。如图 1 所示,鸥翼型非球面光学元件口径约为 10 mm,有效口径为 9.8 mm,面形方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^4 \alpha_i r^{2i}, \quad (1)$$

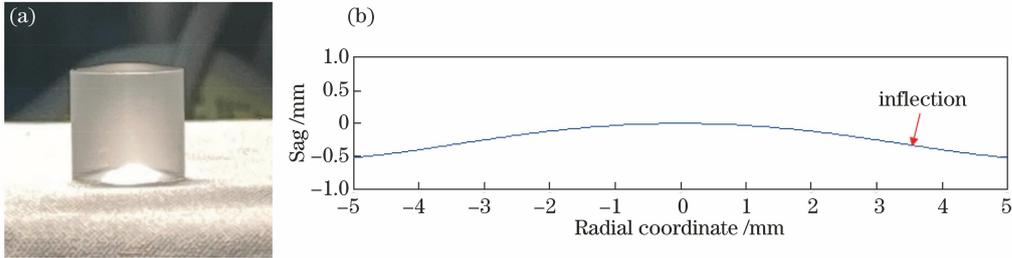


图 1 鸥翼型非球面光学元件。(a)样品;(b)鸥翼型表面在拐点处分为中心凸面和外凹面

Fig. 1 Gull-wing aspheric optics. (a) Sample piece; (b) gull-wing surface divided into central convex and outer concave at inflection point

表 1 面形参数

Table 1 Parameters of surface shape

Parameter	R /mm	K	α_1	α_2	α_3	α_4
Value	16.02	0	0	$-3.7045134 \times 10^{-4}$	$-9.7543842 \times 10^{-7}$	$-8.70055945 \times 10^{-8}$

在子孔径划分前应明确两点:1)划分的子孔径数量应尽可能少以提高测量重复性和测量效率;2)子孔径的大小和子孔径范围内的表面坡度均受限于标准显微物镜镜头。依据上述两点,子孔径划分简述如下。

2.1.1 标准显微物镜镜头选择

白光干涉仪配备不同放大倍率的标准物镜镜头以适应不同的测量对象和要求。通常来讲,较低放大倍率的物镜镜头的数值孔径(NA)低,测量视场(FOV)大,可测表面坡度较小。根据划分子孔径数量最少原则,可从最低放大倍率开始检查相应测量视场内的被测表面倾斜角度是否在物镜镜头可测坡度范围内,这一过程可通过计算子孔径大小(R/D)来实现。对于球面表面,表面倾斜角度 α (表面法线

式中: z 为光学表面矢高方向坐标; c 为顶点曲率,是顶点曲率半径 R 的倒数; r 为极半径,在直角坐标系 $O-XYZ$ 中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; K 为二次常数; α_i 为第 i 个高次项系数。各参数值如表 1 所示。

与表面矢高方向间的夹角)与子孔径之间的关系为

$$1/\sin \alpha = 2R/D. \quad (2)$$

表 2 为白光干涉仪标准物镜镜头(成像探测器阵列大小为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$)的规格参数。在可测坡度限制下计算出的子孔径大小如表 2 中最后一行所示。受实验条件限制,现有白光干涉仪型号为 Zygo NewView 700s ($0.75 \times$ 光学缩放、 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$),拟选用 $5.50 \times$ Michelson 型物镜镜头。由于选择的物镜镜头和所用的白光干涉仪测量视场光学缩放值($1 \times$ 和 $0.75 \times$)与探测器阵列像素数不同,故换算后得到的测量视场约为 2.15 mm^2 。该视场下被测光学元件的表面倾斜角度为 3.78° ,满足 $5.50 \times$ 物镜镜头可测表面坡度限制(7.27°)。

表 2 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 探测器阵列下标准物镜镜头规格

Table 2 Specifications of standard objective lens with $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ detector array

Parameter	$2.75 \times$	$5.50 \times$	$10.00 \times$	$20.00 \times$	$50.00 \times$
Type	Michelson	Michelson	Mirau	Mirau	Mirau
NA	0.08	0.15	0.30	0.40	0.55
FOV /(mm^2)	3.00	1.50	0.83	0.42	0.17
Slope limit /($^\circ$)	3.71	7.27	14.53	21.80	28.13
R/D	7.73	3.95	1.99	1.35	1.06

2.1.2 子孔径的位置和方位

物镜镜头选定后意味着测量视场 FOV 和可测坡度限制已经确定。根据子孔径表面倾斜角度应小

于可测坡度限制的原则,确定子孔径的位置和方位。测量子孔径时测试光束的光轴与子孔径几何中心法线重合,子孔径的方位角是指元件的回转对称中心

轴与子孔径几何中心法线之间的夹角。因此,首先建立起被测光学元件和子孔径间的关系。如图 2 所示,在被测光学元件的表面回转中心顶点处建立全局坐标系 O - XYZ 。表面矢高方向与 Z 轴平行。 X 轴方向上的子孔径几何中心位于 XOZ 平面内,设其坐标为 $(x_0, 0, z_0)$ 。在子孔径几何中心点建立局部坐标系 O_s - $U_sV_sW_s$,该点处曲面法线平行于 W_s 轴,记 Z 轴和 W_s 轴间的夹角为 β ,即子孔径的旋转方位角。几何中心不在 XOZ 平面上的子孔径可绕 Z 轴旋转角度 γ (等间距方位角)得到。白光干涉显微测量的子孔径数据为三维数据点集 $\{(u_s, v_s, w_s)\}$,横坐标数值 (u_s, v_s) 由测量视场对应的探测器阵列的像素数给出。 w_s 为局部表面高度信息,其值是未知的,可由全局坐标系 O - XYZ 中被测光学元件的曲面方程确定。

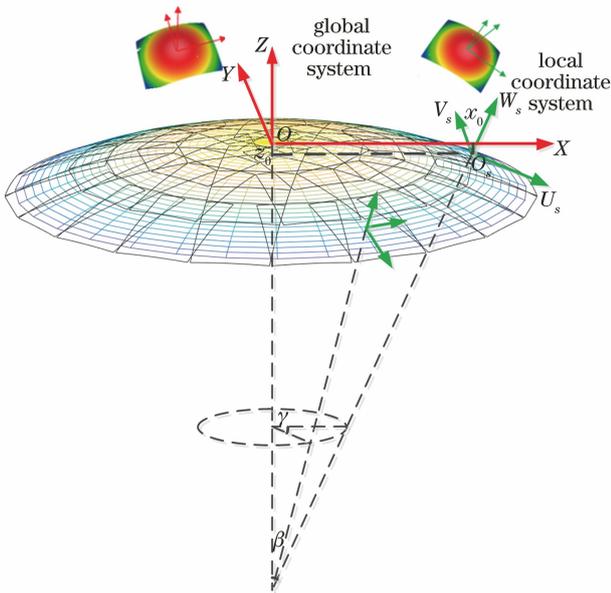


图 2 基于全局坐标系和局部坐标系间转换的子孔径划分
Fig. 2 Subaperture division based on transformation between global coordinate system and local coordinate system

全局坐标系 O - XYZ 到局部坐标系 O_s - $U_sV_sW_s$ 的刚体变换矩阵 T_s 可描述为

$$T_s = R_Z(\gamma)T_X(x_0)T_Z(z_0)R_Y(\beta), \quad (3)$$

式中: $R_Z(\gamma)$ 表示全局坐标系绕 Z 轴转动角度 γ ; $T_X(x_0)$ 和 $T_Z(z_0)$ 分别表示全局坐标系沿 X 轴平移 x_0 和沿 Z 轴平移 z_0 ; $R_Y(\beta)$ 表示全局坐标系绕 Y 轴转动角度 β 。 $R_Z(\gamma)$ 、 $T_X(x_0)$ 、 $T_Z(z_0)$ 和 $R_Y(\beta)$ 的表达式为

$$R_Z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$T_X(x_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$T_Z(z_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$R_Y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对于曲面上给定的几何中心 (x_0, y_0, z_0) , 旋转角 β 和 γ 由表面法向决定, 故两坐标系中采样点的齐次坐标转换可表示为

$$[x \ y \ z \ 1]^T = T_s [u_s \ v_s \ w_s \ 1]^T. \quad (8)$$

应用式(1)的曲面方程 $z = f(x, y)$, 求解给定采样点 (u_s, v_s) 处的局部曲面高度 w_s 。由采样数据集可计算出测量视场内的表面倾斜角度。根据以往经验, 相邻子孔径的区域重叠率范围为 10%~40%, 可满足拼接算法的要求, 且不会引起数据冗余^[20], 进而可粗略给定 β 和 γ 的初始值。结合表面倾斜角度不大于可测坡度限制(7.27°)的条件, 确定子孔径的位置和方位。用 MATLAB 软件模拟这一过程, 展示重叠区域和全孔径覆盖情况, 并可根据实际测量条件进行优化调整。如图 3 所示, 鸥翼型非球面的子孔径划分总数量为 59 个。离轴(被测光学元件回转对称轴)距离相同的子孔径显示相同的颜色。子孔径划分的设计参数包括子孔径旋转角 β 和等间距方位角 γ , 几何中心坐标 (x_0, z_0) , 如表 3 所

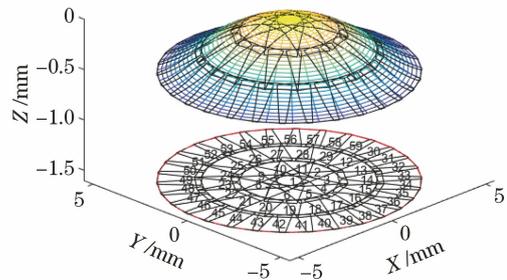


图 3 鸥翼型表面的子孔径划分
Fig. 3 Subaperture division for gull-wing surface

示。值得注意的是,第二环和第三环的旋转角 β 的值是一样的,这是因为这两环分布在面形拐点的左右两侧。

表 3 鸥翼型表面子孔径设计参数

Table 3 Design parameters of subaperture for gull-wing surface

Parameter	Central ring	First ring	Second ring	Third ring
$\beta / (^{\circ})$	0	4.5	8.0	8.0
$\gamma / (^{\circ})$	0	36	20	12
x_0 / mm	0	1.3102	2.7099	4.1450
z_0 / mm	0	-0.0526	-0.2103	-0.4236

2.2 扫描路径规划

根据子孔径划分进行扫描路径规划。全口径测量需扫描多个子孔径,将鸥翼型非球面光学元件回转对称轴心所在测量区域定义为**中心环**,从轴心顶点沿径向依次向外辐射出**第一环**、**第二环**、**第三环**等。如图 4 所示,假设白光干涉仪物镜镜头测试光束轴为 Z 轴,令鸥翼型非球面光学元件(以下称为被测件)的回转对称轴与白光干涉物镜测试光束轴

重合,与 Z 轴垂直的面记为 XOY 平面。白光干涉测量时测试光束始终保持沿面形待测区域中心点法线方向入射,携带面形误差的光线返回后与参考光束干涉形成质量较好的干涉条纹,进而完成子孔径测量。中心环测量区域是以被测件回转对称轴为中心,测试光束保持垂直入射。当测量第一环离轴位置子孔径时,为保证测量过程中测量子孔径区域中心点的法向始终与测试光束光轴重合,将被测件绕 Y 轴旋转角度 β ,再微调被测件在水平面 XOY 内的位置,使得测试光束沿法线方向入射第一环离轴位置子孔径,调整白光干涉仪 Z 向聚焦后进行测量。在该位置测量结束后,被测件沿自身回转对称轴旋转一定角度(等间距方位角 γ),测量该相邻子孔径,如图 4(b)所示。随后依次测量,直到旋转一周后回到初始第一环离轴位置子孔径结束,至此完成第一环的测量,如图 4(d)所示。同理可完成第二环、第三环等的测量工作,当测量环的测量区域完全覆盖被测件的全口径时,测量完成,如图 4(e)所示。

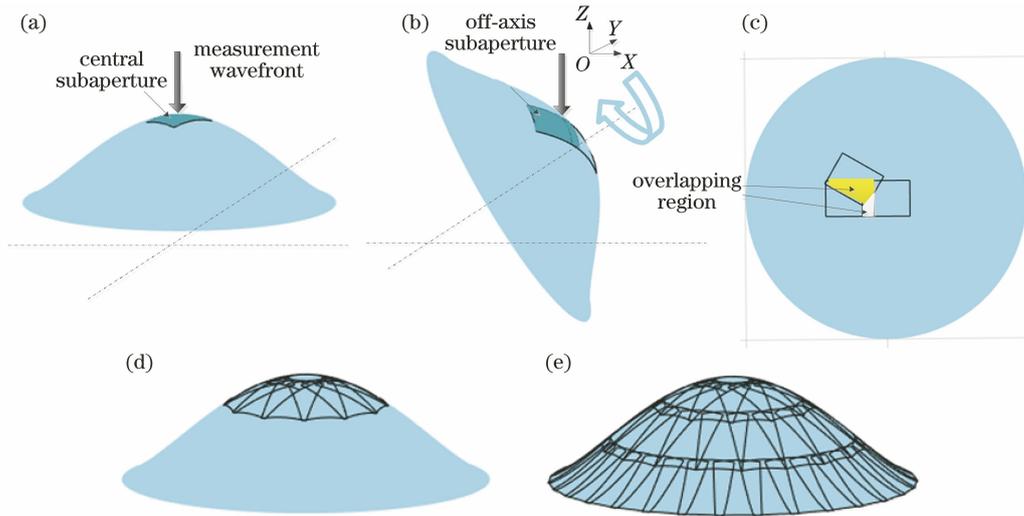


图 4 扫描测量路径规划。(a)中心环子孔径;(b)第一环离轴位置子孔径;(c)中心环子孔径与第一环离轴位置子孔径的重叠区域;(d)中心环与第一环测量路径规划;(e)全口径测量路径规划

Fig. 4 Scanning measurement path planning. (a) Central ring subaperture; (b) first ring off-axis position subaperture; (c) overlapping region of central ring subaperture and first ring off-axis position subaperture; (d) measurement path planning of central ring and first ring; (e) measurement path planning of full aperture

2.3 扫描拼接测量平台

在白光干涉拼接测量方法中,当对被测件进行测量时,应满足测试光束光轴与子孔径测量区域中心的法向重合,且在测量过程中需对被测件的空间位置和姿态进行精密调整。白光干涉仪自带的样品台通常为四自由度(沿着 X/Y 轴平移 200 mm,绕 X/Y 轴旋转倾斜 $\pm 4^{\circ}$)电控平台,无法满足测量过

程中研究人员对被测件位姿的控制需求。根据被测件扫描路径规划,搭建白光干涉仪环形扫描拼接测量平台,如图 5 所示。

扫描拼接测量平台由白光干涉仪、精密调整机构等组成。精密调整机构包括倾斜调整台、电控直线位移台、偏转转台、回转转台和四维调整台。四维调整台在整个扫描拼接测量过程中负责保持子孔径

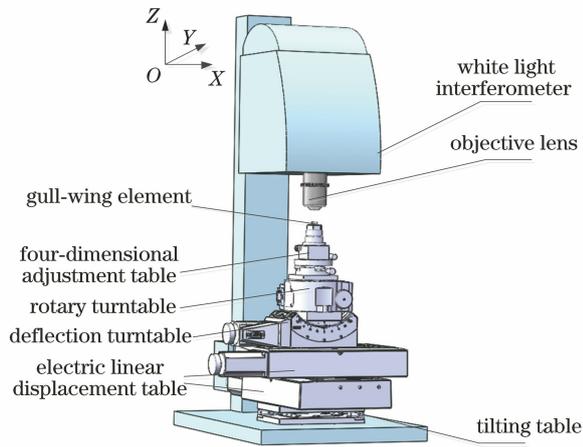


图 5 扫描测量平台三维模型图

Fig. 5 Three-dimensional model diagram of scanning measurement platform

测量区域中心与路径规划测量中心一致。回转转台为电控转台,旋转角度范围大于 360° ,且双向重复定位精度优于 $\pm 1''$,可实现周向 360° 子孔径扫描测量时对相邻子孔径 γ 角度间隔的精确控制。偏转转台为电控转台,旋转角度范围为 $-45^\circ \sim 45^\circ$,单向重复定位精度优于 $20''$,可实现中心环、第一环、第二环等转换时对夹角 β 的精确控制,这也保证了环带子孔径与测量光束的垂直。电控直线位移台的行程范围为 $0 \sim 102$ mm,双向重复定位精度优于 $\pm 2 \mu\text{m}$,位移分辨率优于 $0.2 \mu\text{m}$ 。精密调整机构通过对测量平台位姿的精确调整实现被测件的扫描拼接测量。扫描拼接测量流程图如图 6 所示,具体步骤:

1) 被测件对心。为获取质量较好的干涉条纹,环形扫描拼接测量过程中需始终保持测试光束的光轴与待测子孔径区域的中心法向重合。因为被测件在测量过程中历经不同环形位置、同环内周向不同位置,所以测量初始时需保证被测元件的回转对称中心、测试光束中心和测量区域中心同心。首先,调整四维调整台实现被测件回转对称中心与电动转台中心间的同心。然后,调整电控直线位移台和两自由度倾斜调整台实现测量中心与上述两心的同心,以减小拼接时位置误差的影响;

2) 中心子孔径测量。对心工作完成后开始中心环子孔径测量。调整白光干涉仪 Z 向平移聚焦,使被测件表面上的中心局部轮廓移动至干涉显微物镜正下方,且处于正确的对焦位置,直至出现清晰的白光干涉条纹;

3) 离轴子孔径测量。调整偏转转台使被测件旋转角度 β ,调整 X 轴向电控直线位移台使被测件

的指定离轴位置移动至干涉显微物镜正下方,且处于正确的对焦位置,直至出现清晰的白光干涉条纹。获取局部轮廓的 X、Y、Z 向三维坐标并将测量数据存盘;

4) 周向子孔径测量。按等间距方位角 γ 调整回转转台,使被测件上同一离轴位置不同方位角度的局部轮廓位于干涉显微物镜正下方,且处于正确的对焦位置,直至出现清晰的白光干涉条纹。获取局部轮廓的 X、Y、Z 向三维坐标并将测量数据存盘;

5) 重复步骤 3) 和步骤 4) 直至所有子孔径测量完毕。

所提白光干涉拼接测量方法不局限于本文所讨论的特殊鸥翼型非球面形测量,通过灵活改变测量平台的运动自由度,其还适用于一般非球面(五自由度测量平台)、二元衍射光学元件和 CGH 表面(四自由度测量平台)等回转对称类零件的表面测量。

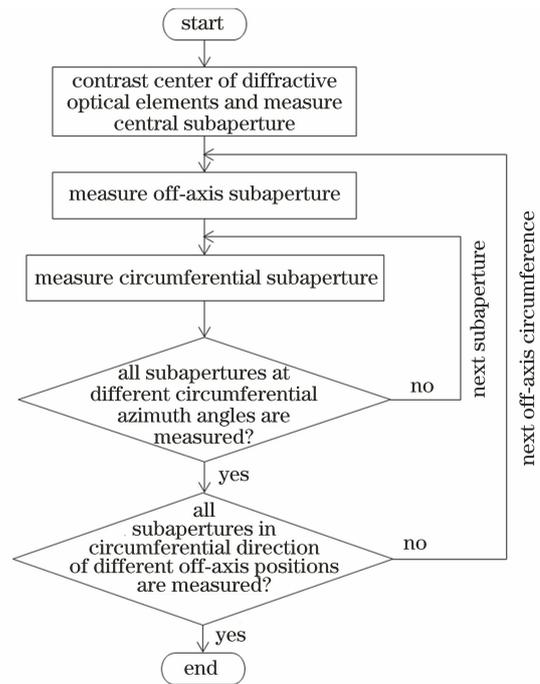


图 6 扫描拼接测量流程图

Fig. 6 Flow chart of scanning stitching measurement

2.4 子孔径拼接

2.3 节中测量得到的子孔径需经过拼接获得全口径面形形貌。子孔径测量数据是在局部坐标系下描述的被测面上一系列离散点的横向(X、Y)和纵向(Z)三维坐标。此外,由于子孔径扫描测量过程中运动误差的影响,故子孔径重叠区域数据并不能直接重合在一起。拼接算法的过程为:1)将相邻子孔径重叠区域测量数据变换到全局坐标系下,使得

数据具有一致性;2)建立最小二乘模型分离运动误差的影响,得到全口径面形^[23]。为避免误差累积效应的影响,通常需要同时考虑所有子孔径重叠区域的数据,即所谓的同步拼接,算法的具体步骤如下。

首先,假设被测件一共有 m 个子孔径,子孔径 t 的测量数据为 $\varphi_t = \{(x_{j,t}, y_{j,t}, z_{j,t})\}, j=1, 2, \dots, N_t$, 子孔径 k 的测量数据为 $\varphi_k = \{(x_{j,k}, y_{j,k}, z_{j,k})\}, j=1, 2, \dots, N_k$, 其中 N_t 和 N_k 为子孔径 t 和孔径 k 的测量总点数。由于环形扫描拼接测量中每个子孔径测量时都需要调整空间位置和姿态,因此每个子孔径测量数据都是在局部坐标系下获得的。需要将所有测量得到的 m 个子孔径测量数据统一到同一个全局坐标系中。全局坐标系建立在鸥翼型非球面的名义模型的顶点上, Z 轴与鸥翼型非球面回转对称轴重合,确定横坐标 $(x_{j,t}, y_{j,t})$ 对应的高度坐标 $(z_{j,t})$, 确定鸥翼型非球面面形子孔径上点的坐标的公式为

$$[x_{j,t}^n \ y_{j,t}^n \ z_{j,t}^n \ 1] = \mathbf{g}_t^{-1} [x_{j,t} \ y_{j,t} \ z_{j,t} \ 1], \quad (9)$$

式中: $(x_{j,t}^n, y_{j,t}^n, z_{j,t}^n)$ 为全局坐标下子孔径 t 的采样点; \mathbf{g}_t 为位姿变换矩阵, 包括子孔径局部坐标系与全局坐标系之间的名义转换参数和误差; $(x_{j,t}, y_{j,t}, z_{j,t})$ 为局部坐标系下子孔径 t 的测量数据。

然后, 在全局坐标系下确定子孔径的重叠对应关系, 进一步计算重叠内偏差。利用名义模型解决重叠点对匹配问题。将子孔径 t 的采样测量点 $(x_{j,t}^n, y_{j,t}^n, z_{j,t}^n)$ 向名义表面投影, 点 $(x_{j,t}^n, y_{j,t}^n, z_{j,t}^n)$ 到名义表面的距离为

$$d_{j,t} = \langle (x_{j,t}^n, y_{j,t}^n, z_{j,t}^n) - \omega_{j,t}, \mathbf{n}_{j,t} \rangle, \quad (10)$$

式中: $\langle (x_{j,t}^n, y_{j,t}^n, z_{j,t}^n) - \omega_{j,t}, \mathbf{n}_{j,t} \rangle$ 为 $(x_{j,t}^n, y_{j,t}^n, z_{j,t}^n) - \omega_{j,t}$ 与 $\mathbf{n}_{j,t}$ 的内积; $\omega_{j,t}$ 为点 $(x_{j,t}^n, y_{j,t}^n, z_{j,t}^n)$ 到名义表面的投影点; $\mathbf{n}_{j,t}$ 为名义表面在 $\omega_{j,t}$ 处的单位法向量。

子孔径 t 在重叠区域中的测量数据记为 $\varphi'_t = \{(x_{j_0,t}, y_{j_0,t}, z_{j_0,t})\}, j_0=1, 2, \dots, N'_0$, 子孔径 k 在重叠区域中测量数据记为 $\varphi'_k = \{(x_{j_0,k}, y_{j_0,k}, z_{j_0,k})\}, j_0=1, 2, \dots, N'_0$, 其中 j_0 对应于重叠点, N'_0 表示子孔径 i 和子孔径 k 的重叠区域中测量点的总数。如图 7 所示, 重叠区在名义表面的投影区域相同, 产生的投影点集为 $\{\omega_{j_0,k}\}$, 在 X - Y 平面上的投影内点集为 $\{p_{j_0,k}\}$ 。由式(9)、(10)可得子孔径 t 与子孔径 k 中的重叠点对到名义表面的有向距离偏差为

$$\Delta d_{j,t} = \langle (x_{j_0,t}^n, y_{j_0,t}^n, z_{j_0,t}^n) - \omega_{j_0,k}, \mathbf{n}_{j_0,k} \rangle - \langle (x_{j_0,t}^n, y_{j_0,t}^n, z_{j_0,t}^n) - \omega_{j_0,k}, \mathbf{n}_{j_0,k} \rangle, \quad (11)$$

式中: $\mathbf{n}_{j_0,k}$ 为名义表面在重叠区投影点 $\omega_{j_0,k}$ 处的法向量; $(x_{j_0,t}^n, y_{j_0,t}^n, z_{j_0,t}^n)$ 为全局坐标下子孔径 k 在重叠区域的测量数据; $(x_{j_0,t}^n, y_{j_0,t}^n, z_{j_0,t}^n)$ 为全局坐标下子孔径 t 在重叠区域的测量数据。

最后, 计算重叠区域中子孔径测量数据的偏差, 根据重叠区域一致原则, 子孔径同步拼接问题可描述为最小二乘模型来进行求解, 即

$$\min F = \sum_{t=1}^{m-1} \sum_{k=t+1}^m \sum_{N'_0} (\Delta d_{j,t})^2 / N_0, \quad (12)$$

式中: $N_0 = \sum_{t=1}^{m-1} \sum_{k=t+1}^m N'_0$ 是两子孔径重叠区域重叠点的总对数; m 为子孔径总数目。由式(12)获得位姿变换矩阵 \mathbf{g}_t 后, 重复后两个步骤, 即计算新的位姿变换矩阵下的重叠区域与求解新的重叠区域下的最小二乘问题, 迭代优化后可得到最优的位姿变换矩阵, 从而将所有的子孔径测量数据正确变换到全局坐标系中, 获得鸥翼型非球面的全口径面形误差。

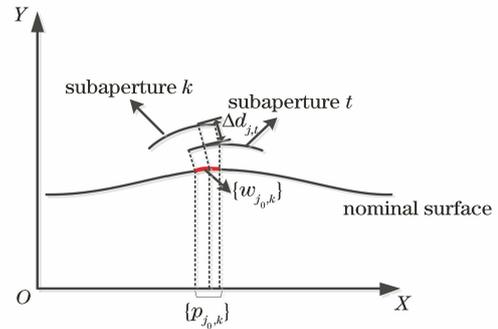


图 7 重叠点对匹配的计算示意图

Fig. 7 Calculation diagram of overlapping point pair matching

3 实验验证与结果讨论

3.1 实验验证

白光干涉拼接测量鸥翼型非球面弯月透镜现场如图 8 所示。采用 $5.5 \times$ 物镜镜头的白光干涉仪 (Zygo NewView 700s), 测量视场为 $1.69 \text{ mm} \times 1.27 \text{ mm}$ 。在环形扫描测量过程中, 中心环、第一环、第二环和第三环与被测件回转对称中心轴的旋转角度 β 分别为 $0^\circ, 4.5^\circ, 8.0^\circ$ 和 8.0° 。每环以非球面顶点为周向旋转中心的等间距方位角 γ 分别为 $0^\circ, 36^\circ, 20^\circ$ 和 12° 。共计测得 59 个子孔径, 测量时间为 9 min 左右。其中, 中心环位置、第一环离轴位置、第二环离轴位置、第三环离轴位置的子孔径测量结果如图 9 所示。图 9(a1)~(d1) 为消除倾斜和俯



图 8 鸥翼型非球面测量现场

Fig. 8 Gull-wing aspheric surface measurement site

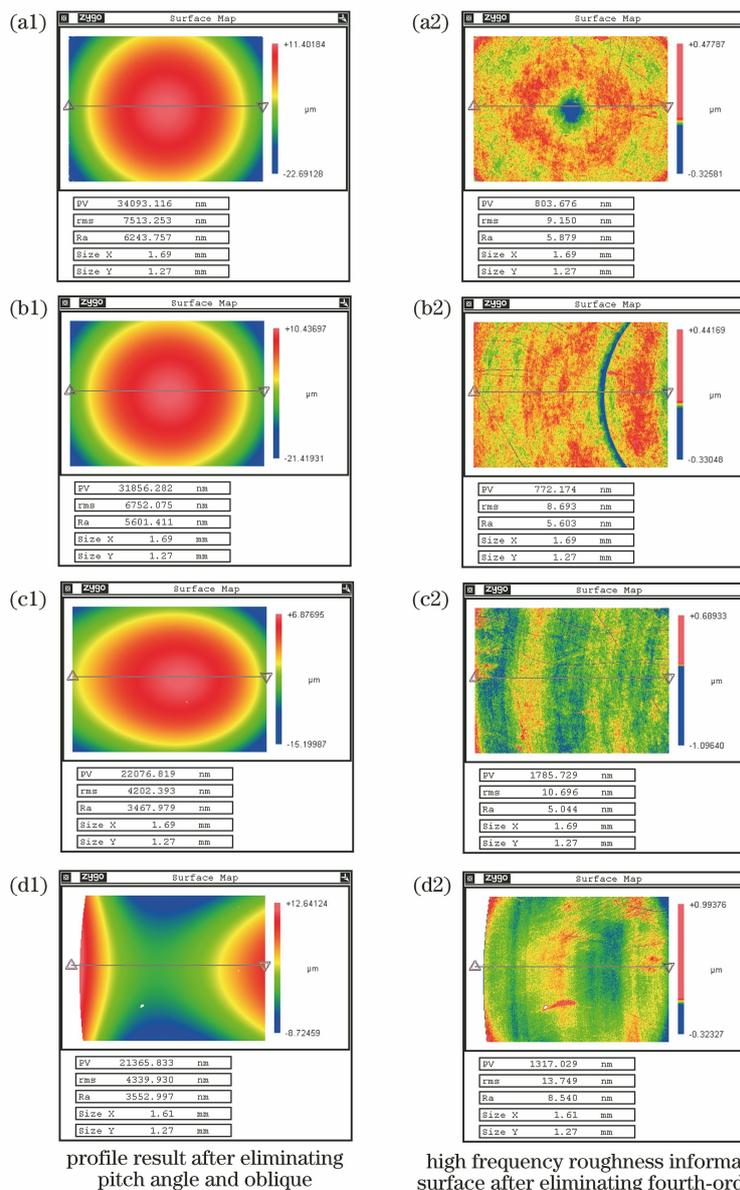


图 9 部分子孔径测量结果。(a1)(a2)中心环子孔径;(b1)(b2)第一环离轴位置子孔径;
(c1)(c2)第二环离轴位置子孔径;(d1)(d2)第三环离轴位置子孔径

Fig. 9 Partial subaperture measurement results. (a1)(a2) Central subaperture; (b1)(b2) first ring off-axis position subaperture; (c1)(c2) second ring off-axis position subaperture; (d1)(d2) third ring off-axis position subaperture

仰影响后的面形结果,图 9(a2)~(d2)为消除四阶项后的表面高频粗糙度信息。

3.2 结果讨论

利用同步子孔径拼接算法对所得的 59 个子孔径测量数据进行拼接,得到的全口径鸥翼型非球面面形误差(相对非球面名义方程的偏差)分布结果如图 10 所示。可以发现,全口径面形误差的均方根(RMS)为 60.2 nm。为验证所提白光干涉环形扫描测量方案和拼接算法的正确性,对被测鸥翼型非球面面形进行了轮廓仪(Taylor Hobson PGI Optics)扫描测量,得到的轮廓扫描测量对比结果如图 11 所示。可以发现,轮廓仪测量结果(RMS 为 79 nm)与全口径面形误差线轮廓结果(RMS 为 101 nm)一致。虽然轮廓仪测量结果有效验证了所提测量方法和拼接算法的正确性,但是轮廓测量的只是鸥翼型面形上的一条轮廓曲线。因此,为进一步验证有效性,设计了 CGH 补偿器进行对比测量。受限于 CGH 无法覆盖此类面形的全口径,故只对中心约 7 mm 直径的圆形区域进行了干涉测量。测量现场和测量结果如图 12(a)、(b)所示。可以发

现,CGH 测量的面形误差的 RMS 为 25.5 nm。对白光干涉拼接测量结果取同一区域进行对比,如图 12(c)所示。可以发现,RMS 结果的误差数值(25.0 nm)和分布几乎与 CGH 测量的结果一致,进一步验证了白光干涉拼接干涉测量鸥翼型非球面面形的精确性和有效性。

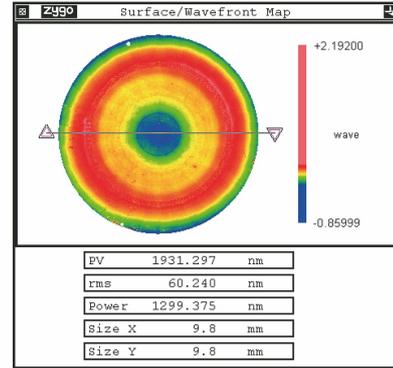


图 10 全口径面形误差结果

Fig. 10 Full aperture profile error result

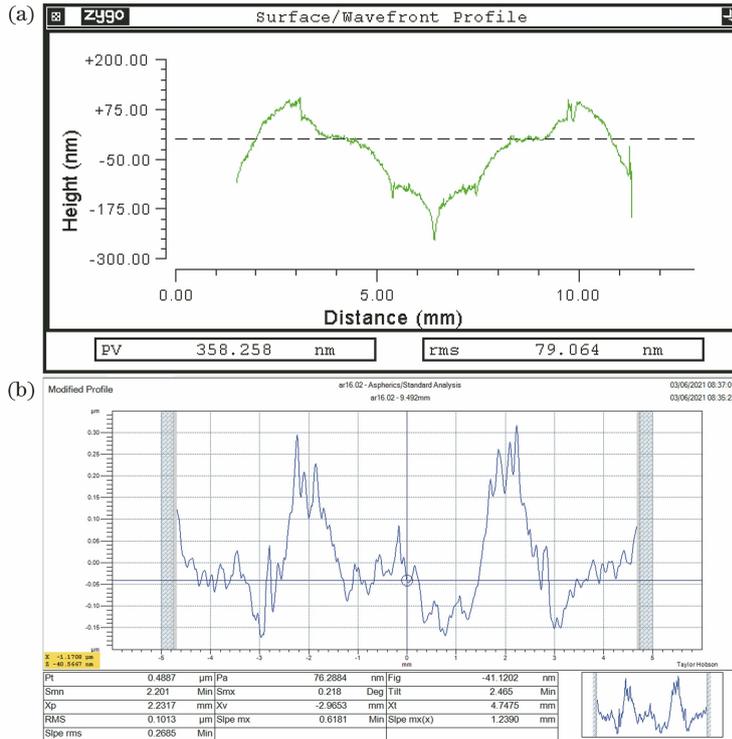


图 11 线轮廓测量结果对比。(a)全口径面形误差线轮廓结果;(b)轮廓仪测量结果

Fig. 11 Comparison of line profile measurement results. (a) profile result of full-aperture profile error line;

(b) measurement result obtained by profiler

4 结 论

小口径光学非球面中诸如鸥翼型高次非球面的特殊面形,因面形方程存在拐点,故其全口径高精度

检测存在挑战。虽然白光干涉显微检测在纵向有着亚纳米量级的高分辨率,但是存在横向测量范围小的缺点。将白光干涉显微测量纵向分辨率高的优势与子孔径拼接“以小拼大”的检测思想相结合,提出

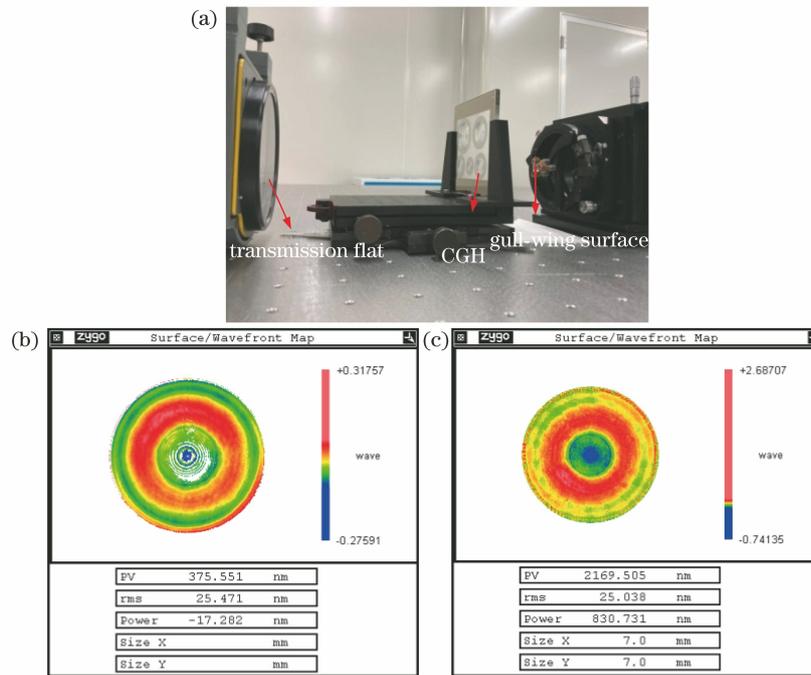


图 12 CGH 补偿器检测对比实验。(a) CGH 补偿器测量现场; (b) CGH 面形检测结果; (c) 同一区域面形检测对比
 Fig. 12 CGH compensator test comparison experiment. (a) CGH compensator test site; (b) CGH profile test result; (c) profile test comparison in same area

了一种白光干涉拼接测量方案。通过对扫描路径进行分析规划,搭建了白光干涉拼接测量平台,完成了 10 mm 级鸥翼型非球面全口径共计 59 个子孔径的高精度检测。利用同步子孔径拼接算法拼接出了全口径面形误差,并开展了利用高精度轮廓仪和 CGH 补偿器对鸥翼型非球面面形进行检测的对比实验。结果表明,所提检测方案的面形误差数值和分布均与高精度轮廓仪和 CGH 补偿器得到的结果吻合,有效验证了所提检测方案的正确性。本研究工作为此类特殊光学非球面的全口径、高精度面形检测提供了新的思路。

参 考 文 献

[1] 周志雄, 周秦源, 任莹晖. 复杂曲面加工技术的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2010, 46(17): 105-113.
 Zhou Z X, Zhou Q Y, Ren Y H. Current research and development trends of complex surface machining technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(17): 105-113.

[2] 王丹艺, 薛常喜, 李闯, 等. 基于微透镜阵列的电子内窥镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0222003.
 Wang D Y, Xue C X, Li C, et al. Design of electronic endoscope optical system based on microlens array[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38

(2): 0222003.

[3] Wang Q F, Cheng D W, Wang Y T, et al. Design, tolerance, and fabrication of an optical see-through head-mounted display with free-form surface elements[J]. Applied Optics, 2013, 52(7): C88-C99.

[4] 李建军, 褚春艳, 卢玮彤, 等. 微透镜阵列的制备与应用研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2100001.
 Li J J, Chu C Y, Lu W T, et al. Development of microlens arrays: from fabrication to photonic applications[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2100001.

[5] 龚峰, 李康森, 闫超. 玻璃精密模压成形的研究进展[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1380-1391.
 Gong F, Li K S, Yan C. Progress on precision glass molding[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(6): 1380-1391.

[6] 史展林, 张磊, 侯俊吉, 等. 快速热循环注塑成型技术发展综述[J]. 精密成形工程, 2017, 9(5): 1-18.
 Shi Z L, Zhang L, Hou J J, et al. Review of rapid heat cycle molding technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(5): 1-18.

[7] 马韬, 余景池, 王钦华. 小口径薄型玻璃透镜精密模压制造[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 87-90.
 Ma T, Yu J C, Wang Q H. Precision glass molding process of small aperture thin lens[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 87-90.

[8] 舒成松, 董浩, 尹韶辉, 等. 高精度微结构玻璃光学

- 元件阵列模压技术研究进展[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1967-1985.
- Shu C S, Dong H, Yin S H, et al. Research progress of high precision micro structure glass optical element array molding technology [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 1967-1985.
- [9] 刘兴国, 霍富荣, 薛常喜. 衍射微透镜注塑成型工艺参数优化及误差补偿[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 052204.
- Liu X G, Huo F R, Xue C X. Parameter optimization and error compensation of diffraction microlens injection molding process [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 052204.
- [10] MacGovern A J, Wyant J C. Computer generated holograms for testing optical elements [J]. Applied Optics, 1971, 10(3): 619-624.
- [11] Garbusi E, Osten W. Analytical of disturbing diffraction orders in in-line computer generated holograms for aspheric testing [J]. Optics Communications, 2010, 283(13): 2651-2656.
- [12] Bergmans R H, Nieuwenkamp H J, Kok G P, et al. Comparison of asphere measurements by tactile and optical metrological instruments [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(10): 105004.
- [13] Widdershoven I, Donker R L, Spaan H M. Realization and calibration of the "Isara 400" ultra-precision CMM [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 311: 012002.
- [14] 郭彤, 胡春光, 陈津平, 等. 垂直扫描白光干涉术用于微机电系统的尺寸表征[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 668-672.
- Guo T, Hu C G, Chen J P, et al. Vertical scanning white-light interferometry for dimensional characterization of microelectromechanical system devices [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 668-672.
- [15] 赵文川, 范斌, 伍凡, 等. 基于相位测量偏折术的非球面法线向量测量[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0612007.
- Zhao W C, Fan B, Wu F, et al. Testing of aspheric surface normal vector based on phase measuring deflectometry [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0612007.
- [16] 王美成, 廖广兰, 史铁林. 小型非球面光学元件测量技术研究[J]. 计测技术, 2007, 27(4): 1-4, 13.
- Wang M C, Liao G L, Shi T L. Research on the measurement of small optical element with aspheric surface [J]. Metrology & Measurement Technology, 2007, 27(4): 1-4, 13.
- [17] 尚明皓, 余飞鸿. 变焦显微三维测量系统的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(16): 1600002.
- Shang M H, Yu F H. Research on microscopic 3D measurement system based on focus variation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(16): 1600002.
- [18] Seo Y B, Joo K N, Ghim Y S, et al. Subaperture stitching wavelength scanning interferometry for 3D surface measurement of complex-shaped optics [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(4): 045201.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Fang F Z, Zeng Z, Zhang X D, et al. Measurement of micro-V-groove dihedral using white light interferometry [J]. Optics Communications, 2016, 359: 297-303.
- [22] Saad A, Jiang Y, Liu Y W, et al. The measurement of the diameter change of a piezoelectric transducer cylinder with the white-light interferometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 56: 169-172.
- [23] Chen W W, Chen S Y, Zhai D D. Coordinate stitching measurement of highly steep freeform surfaces [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(2): 025009.