

文章编号 1004-924X(2023)11-1581-12

## 计算全息补偿检测自由曲面的高精度位姿测量

李雯研<sup>1,2</sup>, 程强<sup>1,2</sup>, 曾雪峰<sup>1,2\*</sup>, 李福坤<sup>1,2</sup>, 薛栋林<sup>1,2\*</sup>, 张学军<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为实现自由曲面的定位与位姿高精度测量,提出了“光学-机械”基准定位法,建立了位姿测量模型,并对该方法的定位误差和基准选择展开研究。根据三坐标测量机与计算全息提出了“光学-机械”基准定位法。然后,采用球形安装的回射器(Sphere Mounted Retroreflector, SMR)、猫眼、基准球作为基准,基于波像差理论与视差效应分别建立了3种基准的位姿测量模型,得到了位置误差与基准区域波前像差的函数关系,并对3种位姿测量模型进行对比。最后,对3种基准位姿测量方法进行仿真及实验验证,实测结果与模型的残差结果均小于 $0.05\lambda$ ,相对误差均小于2.43%,验证了模型的准确性。实验结果表明,当检测距离为1000 mm时,猫眼法的轴向定位误差为24  $\mu\text{m}$ ;基准球法的轴向定位误差为50  $\mu\text{m}$ ;SMR靶球法的轴向定位误差为16  $\mu\text{m}$ ,X,Y方向的定位误差为1  $\mu\text{m}$ ,滚转角定位误差为3.26"。SMR靶球法的定位误差最小、检测动态范围最大且检测光学元件的自由度最多,更适用于自由曲面的高精度位姿检测。

**关键词:**光学检测;光学面形位姿测量;“光学-机械”基准定位法;计算全息;定位误差

中图分类号:O439 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20233111.1581

## High-precise posture measurement for measuring freeform surface with computer generated hologram compensation

LI Wenyan<sup>1,2</sup>, CHENG Qiang<sup>1,2</sup>, ZENG Xuefeng<sup>1,2\*</sup>, LI Fukun<sup>1,2</sup>, XUE Donglin<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Xuejun<sup>1,2</sup>

(1. 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)

\* Corresponding author, E-mail: zengxf@ciomp.ac.cn; xuedl@ciomp.ac.cn

**Abstract:** To realize the high-precision position measurement of freeform surfaces, this paper proposes an optic-mechanical reference positioning method that employs a position measurement model. First, an optical-mechanical reference positioning method based on a coordinate measuring machine and computer-generated holography is proposed. Then, using a spherical mounted retroreflector (SMR) target ball, cat eye, and reference ball as the benchmarks, three benchmark position measurement models are established on the basis of wave aberration theory and parallax effect. The functional relationship between the position error and the wavefront aberration in the reference area is obtained, and the three position measurement mod-

收稿日期:2023-01-11;修订日期:2023-02-14.

基金项目:吉林省卓越创新团队(No. 20210509067RQ);国家自然科学基金资助项目(No. 61975201, No. 62075218, No. 12003034);国家重大科研仪器研制项目(No. 62127901);中科院青促会项目(No. 2020224, (No. 2022213))

els are compared and analyzed. Finally, the three benchmark position measurement methods are simulated and validated via experiments. The residual difference between the measurement results and the model is below  $0.05\lambda$ , and the relative error is below 2.43%, confirming the accuracy of the model. The experimental results indicate that the axial positioning error of the cat-eye method is  $24\ \mu\text{m}$  when the measurement distance is 1 000 mm. The axial positioning error of the reference-ball method is  $50\ \mu\text{m}$ . The SMR target ball positioning error is  $16\ \mu\text{m}$  in the axial direction,  $1\ \mu\text{m}$  in the  $X$  and  $Y$  directions, and  $3.26''$  in clocking. The SMR target ball method has the minimum positioning error, maximum measurement dynamic range, and maximum degree of freedom in detecting optical elements; therefore, it is more suitable for high-precision pose measurement of freeform surfaces.

**Key words:** optical testing; optical surface posture measurement; computer generated holography; optico-mechanical reference positioning method; positioning error

## 1 引言

计算全息(Computer Generated Hologram, CGH)补偿检测具有高精度、非接触测量等优点,可实现非球面、自由曲面等光学面形补偿检测<sup>[1-2]</sup>。在CGH补偿检测过程中,待测光学元件的精准定位是保证光学面形高精度检测的重要前提。传统的CGH补偿检测定位方法是通过基准区域在待检镜面处投射的多个十字线,使用目视观察或者CCD辅助判断来指导检测过程中待检镜的位置调整<sup>[3]</sup>。然而,通过CCD辅助元件定位,需要考虑CCD位置及它与待检镜的相对位置关系等问题,并且通过目视观察判断待检镜位置只能作为粗定位基准,无法实现快速高精度定位。

随着光学系统逐渐向自由曲面设计方向发展,光学面形已难以用统一的数学表达式来描述,这种高复杂性、非旋转对称性等特性<sup>[4-5]</sup>加大了CGH检测过程中待测件的定位难度。传统的投射十字线定位方法无法精准检测自由曲面的空间位置,导致检测面形信息不准确,甚至影响整个光学系统性能。因此,研制一种自由曲面的高精度位姿测量方法,对于光学自由曲面的加工、测量及装调有着重大意义<sup>[6-7]</sup>。

猫眼法常用于测量待检镜的曲率半径,也可用于光学元件的轴向对准过程<sup>[8-9]</sup>。美国亚利桑那大学Burge等<sup>[10-11]</sup>多次采用基准球法辅助搭建干涉补偿检测光路,发现该基准方式不适用于长检测距离,而后提出了SMR靶球法<sup>[12-14]</sup>,实现了

长检测距离、自由曲面的快速定位。然而,上述3种基准法多用于指导光学面形的定位过程,目前缺乏完善的位姿测量模型,尚不能实现光学元件位姿的高精度测量。

本文主要研究了CGH补偿检测自由曲面的高精度位姿测量方法,提出了“光学-机械”基准定位法。基于波像差理论与视差效应,分别研究了SMR靶球、猫眼和基准球3种基准,建立了3种基准的位姿测量模型,定量分析该方法的定位误差以及元件位置误差与基准区域波前像差的关系,实现了自由曲面等复杂曲面的高精度位姿测量。通过仿真设计与实验验证对比分析3种基准,为光学元件选择定位基准提供了依据。

## 2 原理

### 2.1 “光学-机械”基准定位法

“光学-机械”基准是指在光学元件的光学检测与机械加工过程中,使用同一基准元件辅助光学元件的定位过程,其特点是既可以作为加工过程的机械基准,也可以作为干涉检测过程的光学基准。“光学-机械”基准定位法的流程如图1所示,首先将基准元件与光学元件固定;通过三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)获取基准元件与光学元件的相对位置关系,实现待测件的机械位置定位;然后,根据CMM测量的位置参数设计CGH的主区域与基准区域;最后在光学面形检测过程中,将CGH基准区域调整至对准状态,完成光学元件的精准定

位,进而统一元件的光学位置与机械位置。CGH 补偿检测光路示意图如图 2 所示。

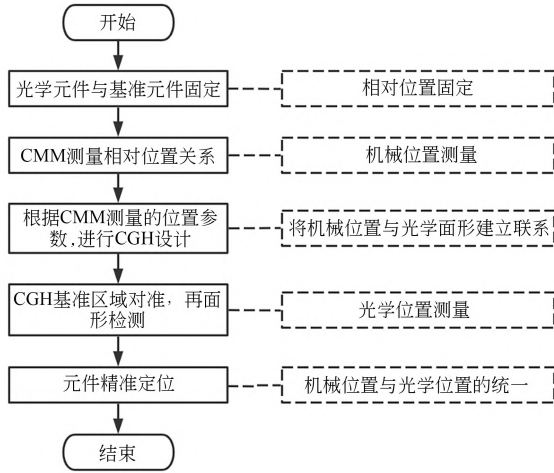


图 1 “光学-机械”基准定位法流程

Fig. 1 Flow chart of optic-mechanical reference positioning method

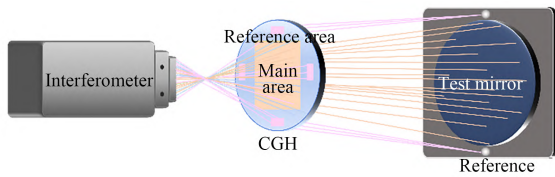


图 2 “光学-机械”基准检测光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of testing optical path of optic-mechanical reference

“光学-机械”基准定位法的误差主要来源于 CMM 测量误差、CGH 误差和光学基准定位误差。三坐标测量仪的测量误差为  $0.9 \mu\text{m} + L/350$ ,对测量元件的尺寸限制为  $900 \text{ mm} \times 1\ 200 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ ,根据元件尺寸很容易得到其测量误差。根据具体的 CGH 设计和制造过程可以合

成 CGH 误差,CGH 误差一般小于  $10 \text{ nm}$ 。但基准元件在光学检测过程中的定位误差目前尚不能准确地得出。因此,本文主要研究了基准元件在光学检测过程中的定位误差。

“光学-机械”基准定位法目前常用的基准有 SMR 靶球、猫眼和基准球。这里分别进行了这 3 种基准的位姿测量模型推导、仿真设计及实验验证,对比分析了 3 种基准的位姿定位误差及适用场景。

### 2.2 计算全息补偿检测的位姿测量模型

首先,研究了 SMR 靶球作为基准的位姿测量模型。SMR 靶球法原理是基于 CGH 形成的柱面波在 SMR 靶球顶点处会聚成焦线,然后反射经过 CGH,最终形成干涉,通过干涉条纹状态判断位置误差,其检测原理如图 3 所示。

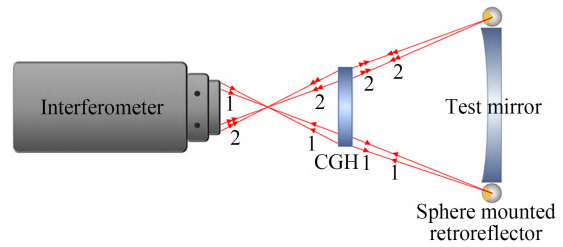


图 3 SMR 靶球法检测原理

Fig. 3 Schematic diagram of SMR target ball measurement

SMR 靶球内部的反射结构是角反射镜,空间上沿任意方向入射的光线经反射,出射光线均与入射光线平行<sup>[15]</sup>,其原理与实物如图 4(a)和 4(b)所示。当焦线刚好在 SMR 靶球顶点时,反射的柱面波与入射的柱面波无偏移,此时产生平行直条纹。如果入射焦线与 SMR 靶球顶点存在

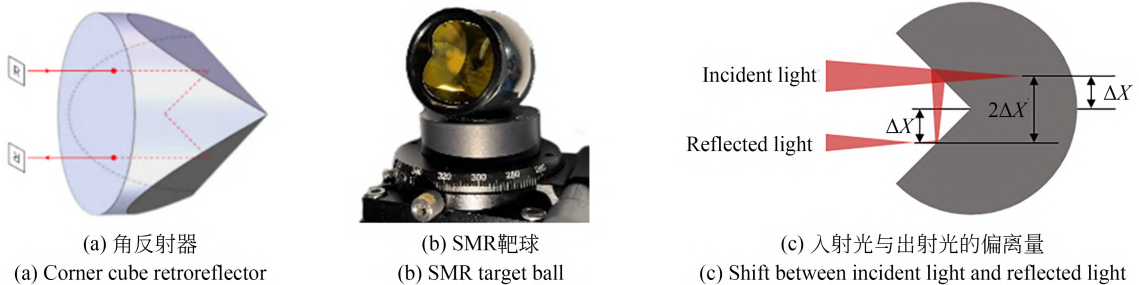


图 4 SMR 靶球实物与原理

Fig. 4 SMR target object and schematic diagram

偏移,定义偏移量为 $(\Delta x, \Delta z)$ ,则出射光相对于 SMR 靶球顶点的偏移量为 $(-\Delta x, -\Delta z)$ 。图 4(c)是入射光与出射光形成的平面与 SMR 靶球的截面,表示入射光与出射光的偏离量。

SMR 靶球法的横向位置误差为:

$$\Delta X = \frac{N\lambda l}{2d}, \quad (1)$$

其中: $N$ 为基准区域的条纹数量, $\lambda$ 为波长, $l$ 为检测距离, $d$ 为 CGH 中基准区域口径。

本文基于视差效应,结合轴向检测原理图 5 可得:

$$\frac{D}{l} = \frac{2\Delta X}{\epsilon_z}, \quad (2)$$

其中: $D$ 为两基准区域的距离, $\epsilon_z$ 为轴向位置误差。

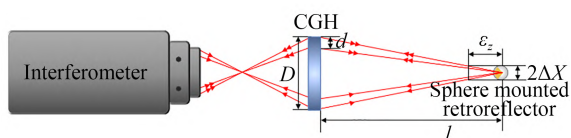


图 5 轴向检测原理

Fig. 5 Schematic diagram of axial measurement

将式(1)带入式(2),推导出轴向位置误差 $\epsilon_z$ ,如下:

$$\epsilon_z = \frac{N\lambda}{dD} l^2. \quad (3)$$

通过在光学元件两侧放置两个 SMR 靶球,可以实现光学元件滚转角度的检测,原理如图 6 所示。经推导得出,待检光学元件的滚转角度 $\theta$ 与基准区域条纹数量 $N$ 的关系如下:

$$\tan \theta = \frac{\Delta X}{K/2} = \frac{N\lambda l}{dK}, \quad (4)$$

其中 $K$ 为两 SMR 靶球间的距离。由于 $\theta$ 较小,可认为 $\theta$ 近似等于 $\tan \theta$ ,则滚转角度误差如下:

$$\theta = \frac{N\lambda l}{dK}. \quad (5)$$

由此建立了 SMR 靶球法的条纹数量 $N$ 与光学元件空间位姿( $X, Y, Z$ 方向平移以及 clocking)误差的数学模型,该方法的位姿定位误差与检测距离、CGH 基准区域大小及位置有关。检测距离越短,位姿测量误差越小,其中轴向定位误差与检测距离的平方成正比,横向定位误差与检测距离成正比;CGH 基准区域越大或者两基准区域间距越大,位姿定位误差越小,其中轴向定位

误差与基准区域大小及其间距均成反比,横向定位误差仅与基准区域大小成反比。

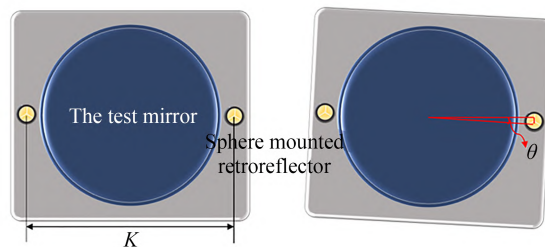


图 6 存在滚转误差检测原理

Fig. 6 Schematic diagram of clocking error measurement

然后,本文研究了猫眼、基准球作为基准的位姿测量模型。猫眼法无需引入基准,其原理是经过 CGH 基准区域的入射光在待测镜上汇聚为猫眼点,但猫眼法不受横向位置影响,仅与轴向位置有关,因此猫眼法仅能用于测量光学元件的轴向位置。基准球法原理是经过 CGH 基准区域的入射光垂直会聚在基准球上,因此基准球法可用于测量光学元件的横向与轴向位置。

CGH 基准区域如图 7 所示,该区域的波前像差 $\Delta W$ 为最高点与最低点差值的 2 倍,将 $A, B$ 两点坐标代入波像差的理论离焦公式,可得:

$$\Delta W(x, y) = \epsilon_z \frac{(x^2 + y^2)}{2l^2}. \quad (6)$$

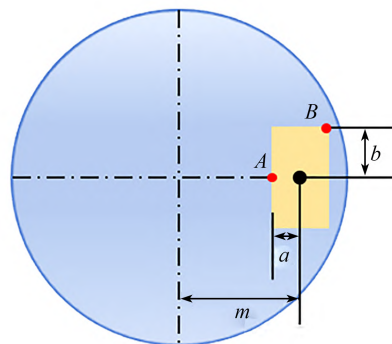


图 7 CGH 基准区域示意图

Fig. 7 Schematic of CGH reference area

经过化简,得出猫眼法及基准球法的轴向位置误差 $\epsilon_z$ :

$$\epsilon_z = \frac{\Delta W}{b^2 + 4ma} l^2. \quad (7)$$

基准球法的横向位置误差为:

$$\Delta X = \frac{\Delta W R}{2a} l, \quad (8)$$

式中:CGH基准区域 $a$ 和基准球半径 $R$ 的数值近似相等。基准球法的横向位置误差公式可简化为:

$$\Delta X = \frac{\Delta W}{2} l. \quad (9)$$

由于检测距离 $l$ 通常在米级,横向位置误差 $\Delta X$ 在微米量级,分析可知基准球法的横向定位误差较大,远大于SMR靶球法的横向定位误差。

对3种基准的位姿测量模型进行对比分析,发现其轴向定位误差皆与检测距离的平方成正比,与CGH的基准区域大小成反比,而 $N\lambda$ 与波前像差 $\Delta W$ 近似相等,可得三者的轴向定位误差基本一致。因此,在选用基准过程中,若仅需要测量轴向位置,3种基准方法都适用,猫眼法无需引入基准为最优选择;若需检测横向位置,可选用SMR靶球法或基准球法,但基准球法的横向检测灵敏度较差,SMR靶球法为最优选择;若需检测滚转误差,只能使用SMR靶球法。

### 3 仿真分析

为验证上述光学元件位姿测量模型的正确性,结合具体实例进行了仿真设计,具体参数如表1所示。

#### 3.1 三种基准定位法的仿真设计

对上述“光学-机械”基准定位法进行仿真分

表1 光学元件位姿测量仿真设计的具体参数

Tab.1 Specific parameters of simulation design for posture measurement of optical elements

物理量	具体参数
波长	$\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$
检测距离	$l=1\ 000\ \text{mm}$
SMR靶球基准区域口径	$d=40\ \text{mm}$
SMR靶球基准区域距离	$D=100\ \text{mm}$
两SMR靶球距离	$K=100\ \text{mm}$
猫眼与基准球基准区域大小	$a=20\ \text{mm}$ $b=10\ \text{mm}$
猫眼与基准球基准区域中心位置	$m=50\ \text{mm}$
基准球半径	$R=19.05\ \text{mm}$

析,3种基准法的光路结构参数设置基本相同,仅有入射波前和基准结构不同。其中,猫眼法与基准球法的入射波前皆是球面波,SMR靶球法的入射波前为柱面波。由于SMR靶球法是焦线会聚在角锥顶点处,需使用非序列模式进行光线追迹,因此其光路结构需采用混合模式进行仿真设计。分别对上述3个光路采用阻尼最小二乘法(Damped Least Squares, DLS)进行局部优化,结果如图8所示。

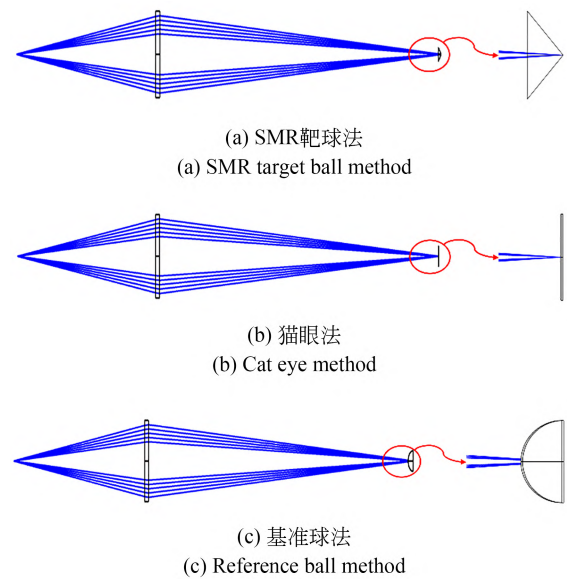


图8 不同位姿测量方法的仿真光路

Fig.8 Simulation optical path of different posture measurement methods

#### 3.2 位姿测量模型的仿真实验

根据“光学-机械”基准定位法的位姿测量模型可知,基准定位精度与检测距离、CGH基准区域口径等物理量有关,结合上述仿真设计进行检测距离为1 000 mm、基准区域口径为40 mm的仿真实验。如图9所示,SMR靶球法对准是平行直条纹;当存在轴向位置误差时,干涉条纹呈相对或相反方向的“V”形条纹。理论上,仅有基准对准状态下呈平行直条纹状态,当存在轴向位置误差时,干涉条纹会逐渐产生角度直至呈现“V”。位置误差较小时,干涉条纹产生角度较小难以判断,通过仿真得到当 $N$ 取0.1时,干涉条纹有明显角度,代入式(3)得出SMR靶球法的轴向定位误差为 $15.8\ \mu\text{m}$ 。同理,当存在横向位置误差时,干涉条纹呈向左或

向右的“V”条纹,仿真干涉条纹如图 10 所示, SMR 靶球法的横向定位误差为  $0.8 \mu\text{m}$ 。当存

在滚转角度误差时,SMR 靶球法的滚转角度误差为  $3.26''$ 。

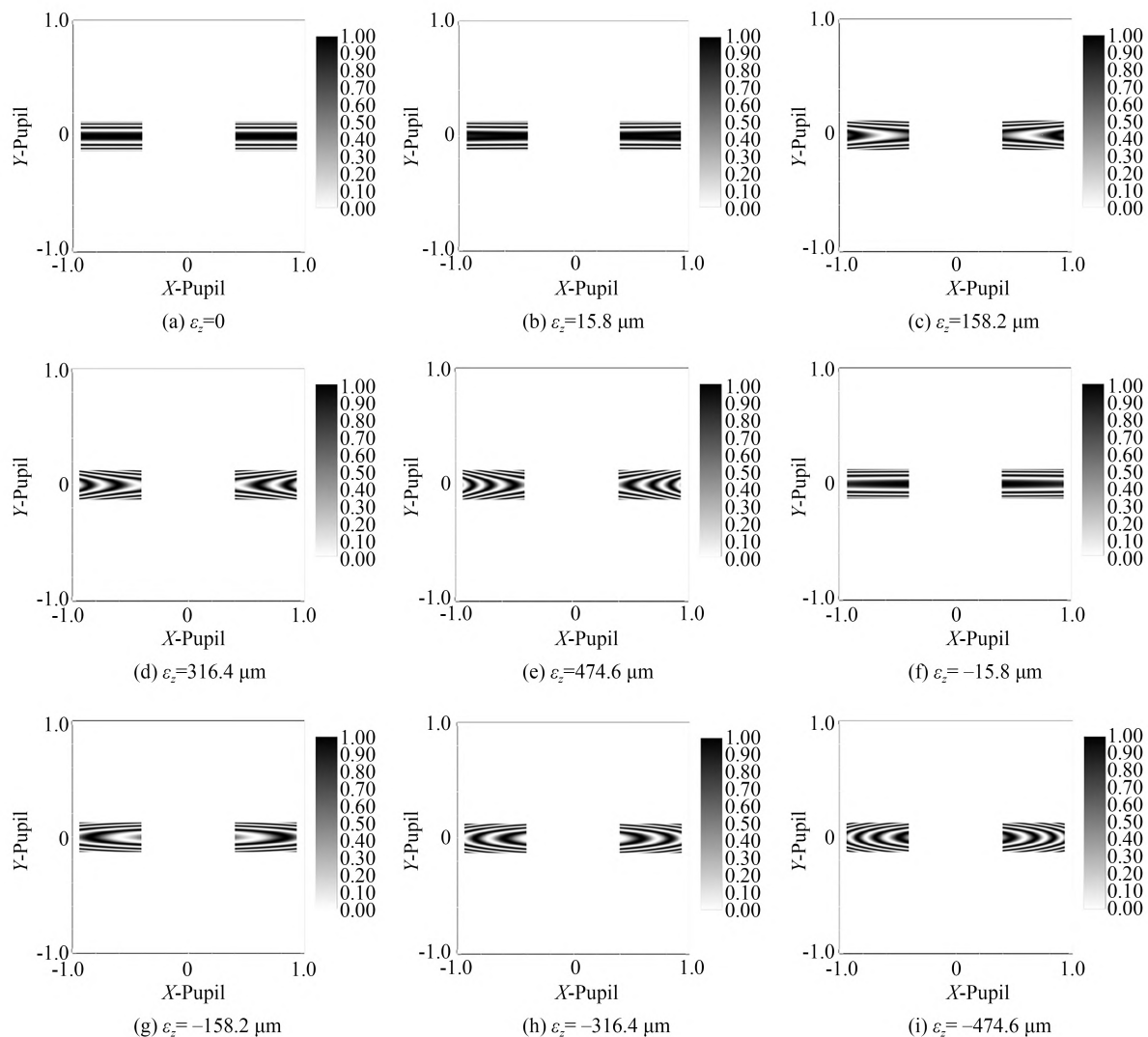


图 9 SMR 靶球法的轴向位置仿真

Fig. 9 Simulation of axial position of SMR target ball

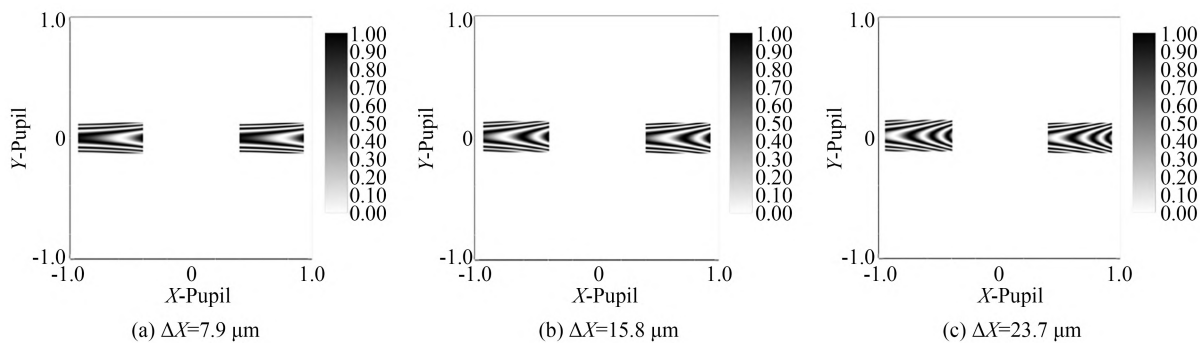


图 10 SMR 靶球法的横向位置仿真

Fig. 10 Simulation of lateral position of SMR target ball

如图 11(a)所示,猫眼法与基准球法对准时  $PV=0$ ,如图 11(b)所示,对准理论上仅有零条纹。在实际检测过程中,若位置误差较小,干涉条纹接近零条纹难以判断,仿真得到  $PV$  为  $0.15\lambda$  时,干涉条纹明显不是零条纹,如图 11(c)所示。因此,猫眼法与基准球法的轴向定位误差为  $23.5\ \mu\text{m}$ 。

理论上,基准球法可进行横向位置误差测量。由于基准球半径  $R$  较小,曲率半径较大,当

存在横向位置误差时,垂直球面的入射光会偏折较大角度返回干涉仪。随着位置误差的逐渐增大,经过 CGH 基准区域返回干涉仪的出射光越来越少,进而影响其横向检测的动态范围。针对半径为  $19.05\ \text{mm}$  的基准球,通过仿真得到当横向定位误差为  $350\ \mu\text{m}$  时,出射光几乎无法返回干涉仪,仿真结果如图 12 所示。横向检测的动态范围较小,在实际光学元件调整定位过程中不适用。

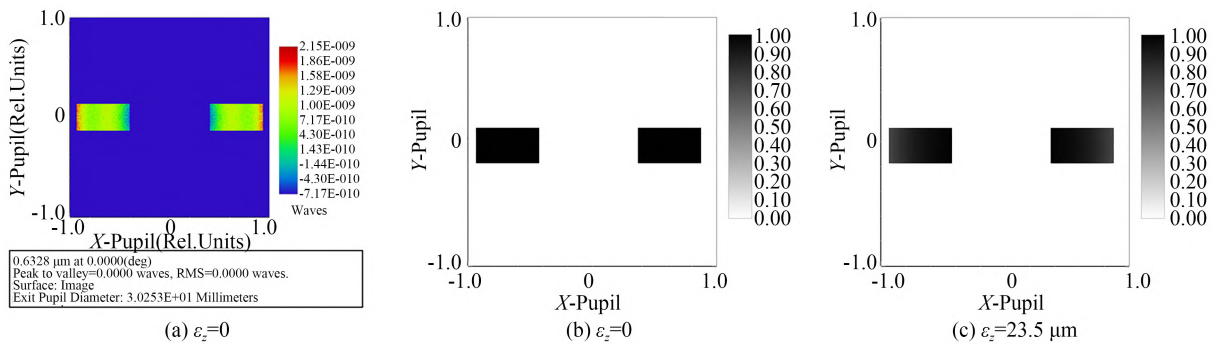


图 11 猫眼法、基准球法的轴向位置仿真

Fig. 11 Axial position simulation of cat eye and reference ball methods

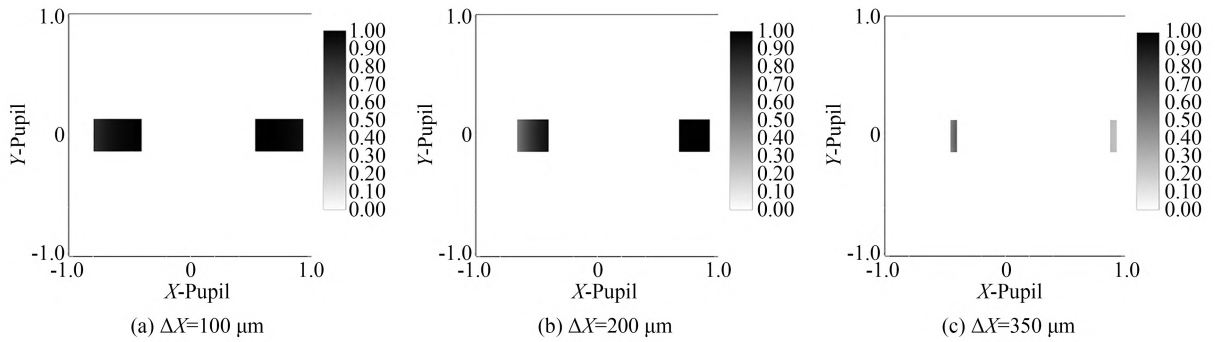


图 12 基准球法的横向位置仿真

Fig. 12 Lateral position simulation of reference ball method

将 3 种“光学-机械”基准定位法的位姿误差测量模型的仿真结果与理论模型进行对比,拟合曲线如图 13 所示。在轴向位置误差小于  $3\ 000\ \mu\text{m}$  时,SMR 靶球法的相对误差小于  $2\%$ ,猫眼法的相对误差小于  $1.5\%$ ,基准球法的相对误差小于  $7\%$ 。其中,基准球法受基准球曲率半径的影响较大,随着轴向位置误差的增大,其相对误差增大。受仿真软件采样限制,3 种方法的仿真结果与理论模型均存在偏差。因此,进一步通过实验验证了理论模型的正确性。

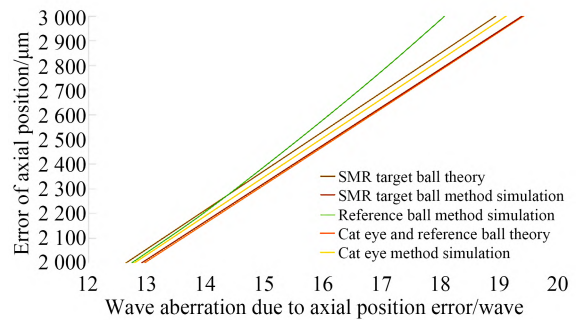


图 13 理论仿真拟合曲线

Fig. 13 Theoretical simulation fitting curves

当检测距离为 1 000 mm 时,3 种基准法的位姿测量误差如表 2 所示。3 种基准法都可进行轴

向位置测量,当检测距离不同时,轴向定位误差如表 3 所示。

表 2 位姿测量误差

Tab. 2 Error of posture measurement

方 法	轴向位置测量误差	横向位置测量误差	Clocking 测量误差
SMR 靶球法	$\epsilon_z=15.8 \mu\text{m}$	$\Delta X=0.8 \mu\text{m}$	$\theta=3.26''$
猫眼法	$\epsilon_z=23.5 \mu\text{m}$	无	无
基准球法	$\epsilon_z=23.5 \mu\text{m}$	无	无

表 3 不同检测距离的轴向定位误差

Tab. 3 Axial positioning errors at different detection distances ( $\mu\text{m}$ )

方 法	$l/\text{mm}$		
	1 000	2 000	3 000
SMR 靶球法	15.8	63.2	142.2
猫眼法	23.5	94	211.5
基准球法	23.5	94	211.5

### 3.3 CGH 设计

CGH 一般分为 3 个区域<sup>[16-17]</sup>:主区域即检测区域,用于检测待测镜的面形;对准区域用于干涉仪和 CGH 之间的对准;基准区域用于 CGH 和被检镜之间的对准。设计 CGH 时,检测光路应优化到波像差最小,其衍射图样条纹密度应满足现有的 CGH 加工工艺制作条件。为更好地对比分析 3 种基准方式,本实验所用的 CGH 仅有对准区域与 3 种基准法的基准区域,布局设计如图 14 所示。CGH 的 1,2,3,4 区域均为 SMR 靶球法的基准区域,进行横向、轴向及滚转位姿误差测量的验证实验;CGH 的 5 区域为猫眼法的基准区域,进行轴向位姿误差测量的验证实验;CGH 的 6 区域为基准球法的基准区域,进行横向、轴向位姿误差测量的验证实验;CGH 的 7 区域为干涉仪与 CGH 的对准区域,实现干涉仪与 CGH 对准的功能。对于实际进行光学面形检测的 CGH,选取一种基准即可,故 CGH 的主区域、基准区域及对准区域可以合理安排。

CGH 基准区域光路如图 15 所示,分别对不同的基准区域进行 CGH 设计,CGH 衍射面均设

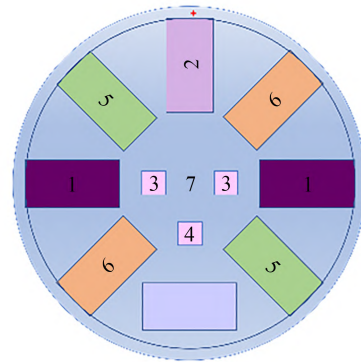


图 14 CGH 布局设计示意图

Fig. 14 CGH layout design schematic

置成为 Zernike Fringe Phase,主衍射级次设为 +1 级,选用 Zernike 的前 37 项为变量优化 CGH 衍射图样,使得波前像差最小,此时的 Zernike 系数为 CGH 的设计参数。基准区域优化后所得的 PV 值小于  $0.000 1\lambda$ ,设计残差非常小,可以忽略。

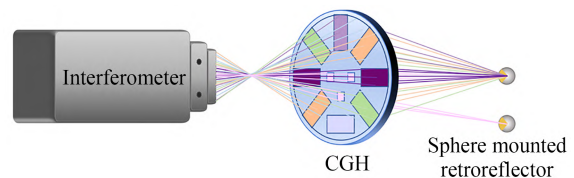


图 15 CGH 补偿检测光路示意图

Fig. 15 Optical path of CGH compensation detection

## 4 实 验

为更好地验证“光学-机械”基准定位法的位姿误差测量模型的正确性,以及对比 3 种基准的定位精度,设计了 3 种不同基准的检测实验光路,



如图 16 所示。首先,利用 CGH 对准区域将 CGH 与干涉仪对准,再调整基准元件,使得基准区域为平行直条纹或零条纹,此时为对准状态。再通



图 16 干涉补偿检测光路

Fig. 16 Optical path of interference compensation testing

过调整快速检测平台  $x, y, z$  轴的平移引入位置误差,对不同位置进行检测,实验结果如图 17~图 18 所示。基准球法的位姿测量精度受基准球面形精度的影响较大,本次实验所用的基准球是激光跟踪仪靶球球面,检测区域的面形精度 PV 为  $0.322\lambda$ ,检测结果如图 18(c) 所示。经计算,轴向定位误差为  $49.7 \mu\text{m}$ ,即定位误差比理论推导的  $23.5 \mu\text{m}$  增大了一倍。因此,要想得到基准球法的轴向位置测量误差理论值,需采用面形精度 PV 优于  $1/20\lambda$  的基准球。

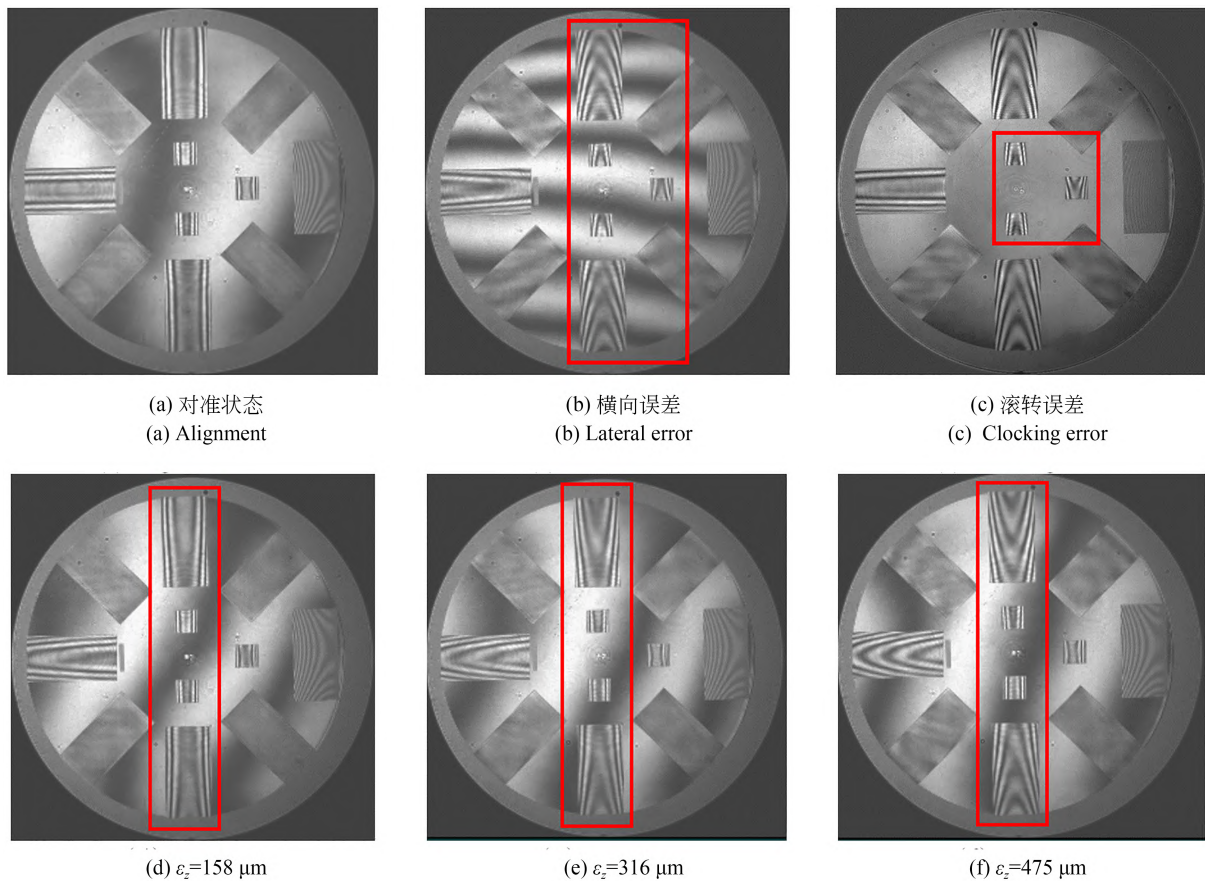


图 17 SMR 靶球法检测结果

Fig. 17 SMR target ball testing results

采用 3 种基准法分别测量了 20 个不同位置的波前变化,进行了 3 次重复性实验,计算得出 3 种基准法的重复性误差均小于 3%,表明该测量方法具有较好的重复性。将实验结果与理论模型进行对比,轴向位置误差实测结果与理论模型的残差分布如图 19 所示,残差结果均小于  $0.05\lambda$ 。理论模型结果与实测结果对比得到:

SMR 靶球法的相对误差小于 1.27%,猫眼法的相对误差小于 2.43%,基准球法的相对误差小于 2.06%,由此说明,本文建立的位姿测量模型的准确性。将基准区域的检测结果代入位姿测量模型解算得到光学元件的位置误差,从而实现光学元件的高精度位姿测量。

通过理论模型、仿真和实验对 3 种基准法进

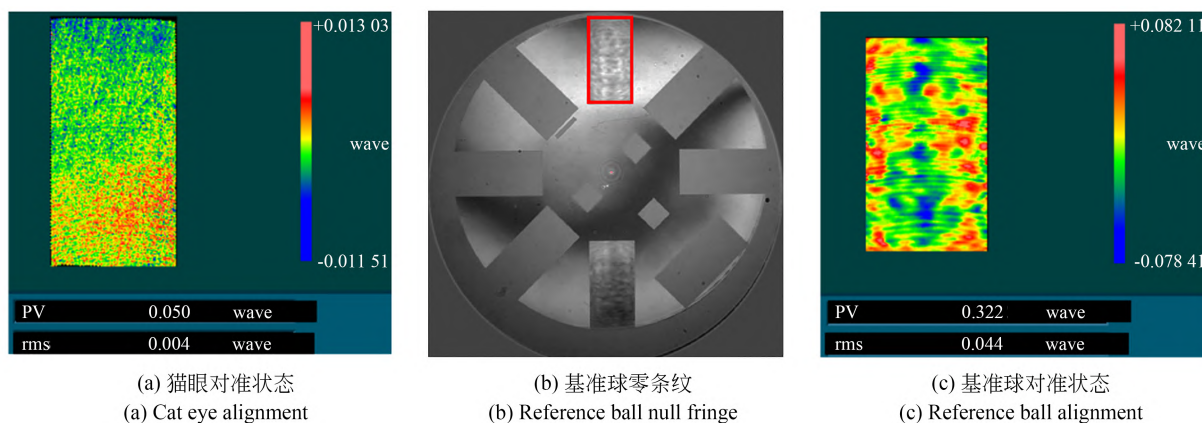


图 18 猫眼法和基准球法的检测结果

Fig. 18 Test results of cat eye and reference ball methods

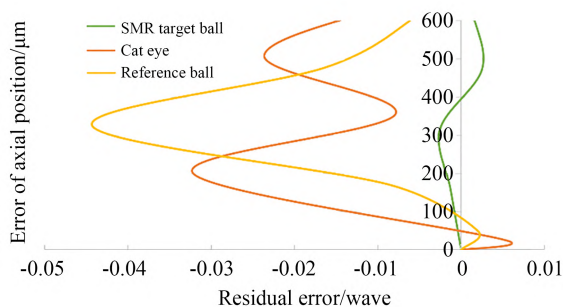


图 19 残差分布

Fig. 19 Residual distribution

行对比分析,基准球法仅适用于检距较短的光学元件的轴向位置误差检测;猫眼法虽不需外引基准但仅可检测轴向位置误差;SMR靶球法可检测横向、轴向及滚转误差。其中,SMR靶球法的轴向位置测量误差最小。当测量误差为 $\Delta Z$ 时,猫眼法的测量误差为 $1.5\Delta Z$ ,基准球法的测量误差为 $3\Delta Z$ 。

因此,SMR靶球法不仅可以进行多自由度位姿检测,测量误差小、动态检测范围大,还具有调整方向的指向性等优点,更适用于自由曲面等复杂曲面光学元件的高精度位姿检测。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG X J, HU H X, WANG X K, *et al.* Challenges and strategies in high-accuracy manufacturing of the world's largest SiC aspheric mirror [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 310.

## 5 结 论

本文基于计算全息补偿检测提出了“光学-机械”基准定位法,结合波像差理论与视差效应建立了SMR靶球、猫眼、基准球3种基准的位姿误差测量模型,获得了光学元件位姿误差与波前像差的函数关系。通过仿真与实验对3种基准的位姿测量模型进行验证,实测结果与模型的残差结果均小于 $0.05\lambda$ ,相对误差均小于 $2.43\%$ ,由此验证了位姿测量模型的准确性。当检测距离为 $1\ 000\ \text{mm}$ 时,猫眼法的轴向定位误差为 $24\ \mu\text{m}$ ;基准球法的轴向定位误差为 $50\ \mu\text{m}$ ;SMR靶球法的轴向定位误差为 $16\ \mu\text{m}$ , $X$ , $Y$ 方向的定位误差为 $1\ \mu\text{m}$ ,滚转角度定位误差为 $3.26''$ 。因此,本文建立的光学元件位姿误差测量模型实现了光学元件高精度位姿误差测量,其中SMR靶球法可以实现自由曲面多自由度的位姿测量。“光学-机械”基准定位法实现了光学元件机械位置与光学位置统一,为后续多面共体元件的形位协同检测奠定了基础。

- [2] 蔡志华,王孝坤,胡海翔,等. 计算全息法标定单光楔补偿检测系统误差[J]. *中国光学*, 2022, 15(1):90-100.
- CAI Z H, WANG X K, HU H X, *et al.* Calibration of single optical wedge compensation test sys-

- tem error by computer generation hologram[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2022, 15(1): 90-100. (in Chinese)
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] 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 shape detection methods [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0112001. (in Chinese)
- [5] 张磊, 吴金灵, 刘仁虎, 等. 光学自由曲面自适应干涉检测研究新进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 227-244.  
ZHANG L, WU J L, LIU R H, *et al.* Research advances in adaptive interferometry for optical freeform surfaces[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2021, 14(2): 227-244. (in Chinese)
- [6] ZEHNDER R, BURGE J H, ZHAO C Y. Use of computer generated holograms for alignment of complex null correctors[C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 6273, Optomechanical Technologies for Astronomy, Orlando, Florida, USA. 2006, 6273: 880-887.*
- [7] BEVERAGE J, BURGE J H, BLANCHARD J, *et al.* Interferometric metrology for the TMT primary mirror segments: design and analysis[C]. *Optical Design and Fabrication 2019 (Freeform, OFT). Washington, DC. Washington, D. C.: OSA, 2019: OM3A. 5.*
- [8] 李彦宏, 杨帅, 唐顺, 等. 后置分光瞳激光差动共焦曲率半径测量[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(10): 2287-2295.  
LI Y H, YANG SH, TANG SH, *et al.* Detecting divided aperture laser differential confocal radius measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(10): 2287-2295. (in Chinese)
- [9] ZHANG X, HU H X, XUE D L, *et al.* Wavefront optical spacing of freeform surfaces and its measurement using CGH interferometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 161: 107350.
- [10] ZHAO C Y. Computer-generated hologram for optical testing: a review[C]. *SPIE Optical Engineering + Applications. Proc SPIE 11813, Tribute to James C Wyant: the Extraordinaire in Optical Metrology and Optics Education, San Diego, California, USA. 2021, 11813: 142-150.*
- [11] ZEHNDER R. *Use of Computer Generated Holograms for Optical Alignment*[M]. The University of Arizona, 2011.
- [12] COYLE L E, BURGE J H, DUBIN M. Locating computer generated holograms in 3D using precision aligned SMRs[C]. *Classical Optics 2014. Kohala Coast, Hawaii. Washington, D. C.: OSA, 2014: OTh1B. 2.*
- [13] STEELE T, AMENT S D V, BEVERAGE J, *et al.* Computer generated hologram (CGH) education kit for hands-on learning of optical metrology for complex optics and systems[C]. *SPIE Optical Engineering + Applications. Proc SPIE 12213, Optics Education and Outreach VII, San Diego, California, USA. 2022, 12213: 149-157.*
- [14] BURGE J H. Efficient and accurate alignment methods for interferometric metrology using computer generated holograms [C]. *Workshop Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms*, 2021.
- [15] 单小琴, 韩志刚, 朱日宏. 基于波长移相剪切干涉的准直波前重构技术[J]. *应用光学*, 2020, 41(1): 67-73.  
SHAN X Q, HAN ZH G, ZHU R H. Collimated wavefront reconstruction based on wavelength phase-shifting shear interferometry [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 67-73. (in Chinese)
- [16] YOSHIKAWA N, ITOH M, YATAGAI T. Binary computer-generated holograms for security applications from a synthetic double-exposure method by electron-beam lithography [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(18): 1483.
- [17] 谢念. 基于计算全息光学元件的非球面检测技术应用研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机

械研究所.

XIE N. *Application of Aspheric Surface Detection Technology Based on Computer Holographic Opti-*

*cal Elements* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)

**作者简介:**



李雯研(1997—),女,吉林长春人,硕士研究生,2020年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学检测方面的研究。E-mail:lwy\_978@163.com

**通讯作者:**



薛栋林(1979—),男,江苏靖江人,研究员,博士生导师,主要从事光学检测和空间光学系统设计等方面的研究。E-mail:xuedl@ciomp.ac.cn

**通讯作者:**



曾雪峰(1987—),男,江西抚州人,博士,副研究员,2009年于南京理工大学获得学士学位,2014年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail:zengxf@ciomp.ac.cn