



·光学元件激光损伤·

## 强光元件逆向哈特曼在位检测装置 误差敏感因素分析与验证\*

王姗姗<sup>1</sup>, 石 峰<sup>2</sup>, 乔 硕<sup>2</sup>, 徐博文<sup>1</sup>, 郝 群<sup>1,3</sup>, 宋 辞<sup>2</sup>,  
铁贵鹏<sup>2</sup>, 田 野<sup>2</sup>, 翟德德<sup>2</sup>, 彭 星<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081; 2. 国防科技大学 智能科学学院, 长沙 410073; 3. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

**摘 要:** 针对基于强光元件高精度面形在位检测需求, 开展了面形测量误差敏感因素仿真分析, 进行了系统结构误差和温度误差对测量结果的影响研究, 分析各类误差对测量面形误差的具体影响, 设计并搭建在位检测系统, 开展系统温度变化、系统重复性、系统稳定性等测量实验。研究表明: 所建立的逆向哈特曼仿真检测模型可用于平面、球面、非球面、自由曲面等各类型被测面, 各类影响因素对测量结果的影响主要体现在低频误差上, 对高频误差的影响相对较小, 搭建的在位检测系统 6 h 内测量面形误差 PV 值最大不超过 68 nm(约  $\lambda/10$ ), RMS 值最大不超过 15 nm(约  $\lambda/40$ )。

**关键词:** 面形测量; 在位检测; 强光元件; 误差分析; 仿真模型

中图分类号: TH74

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220405

## Error-sensitive factors analysis and verification for optical element in-situ measurement device based on phase measuring deflectometry

Wang Shanshan<sup>1</sup>, Shi Feng<sup>2</sup>, Qiao Shuo<sup>2</sup>, Xu Bowen<sup>1</sup>, Hao Qun<sup>1,3</sup>, Song Ci<sup>2</sup>,  
Tie Guipeng<sup>2</sup>, Tian Ye<sup>2</sup>, Zhai Dede<sup>2</sup>, Peng Xing<sup>2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology,  
School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. College of Intelligence Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Based on optical element's high precision in-situ measurement requirements, this paper carries out the sensitive factor simulation analysis, studies the influence of systematic structural errors and temperature errors on the measurement results, and designs and builds an in-situ measurement device to carry out measurement experiments of system temperature change, system repeatability and system stability. The results show that the simulation detection model can be used for plane/spherical/aspherical/free surface, the influence on the measurement results is mainly reflected in the low frequency error, the high frequency error is relatively small, the maximum PV value of the measurement surface shape error does not exceed 68nm (about  $\lambda/10$ ), and the maximum RMS value does not exceed 15 nm (about  $\lambda/40$ ).

**Key words:** shape measurement, in-situ measurement, optical element, error analysis, simulation model

作为光学系统中的重要组成部分之一, 强光元件在工业、军事以及航空航天等领域有着广泛的应用, 其精确高效的面形测量技术是当前研究热点问题<sup>[1-3]</sup>。面形检测目的是尽可能准确地还原出待测镜的真实面形, 即获取待测镜上每一点的相对位置信息, 从而得知其与理想面形的差距, 以便于在应用中对损伤加以修复或补偿。现有面

\* 收稿日期: 2022-11-30; 修订日期: 2023-05-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2202403-2); 国家自然科学基金项目(62175259)

联系方式: 王姗姗, wshan@bit.edu.cn。

通信作者: 石 峰, shifeng@nudt.edu.cn。

形检测方法中,根据检测方式不同,主要有点线式测量法<sup>[4-6]</sup>和面式测量法<sup>[7-9]</sup>两大类方法。点线式测量是一种传统的检测方法,原理相对简单,发展较为成熟,主要用于元件的前期加工阶段。但由于其需要对待测元件进行全口径的逐点或逐线扫描,测量过程时间较长,其检测效率偏低,难以满足快速在位检测要求。面式测量法中,逆向哈特曼法(PMD)在高精度镜面面形检测领域应用较为广泛<sup>[7,10-12]</sup>。

南洋理工大学的 Huang H B 等人<sup>[13]</sup>对 PMD 法在动态表面测量领域进行了研究,并成功实现了水面动态波纹三维面形的测量,验证了该方法在动态表面测量上的可行性。电子科技大学的 Song L 等人<sup>[14]</sup>首次给出了 PMD 中各结构的解析表达式,分析了系统结构之间相位关系,为进一步研究打下了基础。四川大学阮一郎<sup>[15]</sup>基于 PMD 原理建立逆光线追迹模型,实验测量了有效孔径为 60 mm 的平凸透镜在不同视场下的波前像差,将实验结果和模拟结果进行了对比分析,并且分析了轴外点初级像散和初级彗差随着视场以及入瞳孔径的变化规律。上海科技大学<sup>[8]</sup>研制了基于 PMD 的面形轮廓测量系统,该系统可测量口径为 300 mm、倾斜角度为 $\pm 20^\circ$ 的自由曲面,对倾斜角度达 $\pm 16^\circ$ 的椭球面的测量结果显示,其残余误差的峰谷(PV)值约为 30  $\mu\text{m}$ 。但该系统在测量时会引入重复性很强的低阶 Zernike 拟合误差,在处理测量结果时需要从前 8 项 Zernike 系数进行去除。四川大学和中国科学院光电技术研究所<sup>[16]</sup>利用立体 PMD 对预应力薄镜进行面形测量,针对不同的矫正力对镜面面形的影响,可以实现与三坐标仪相当的测量精度;但其单次测量误差受低阶误差影响较大,需要对待测镜旋转一周后去除低阶误差,因此对调整结构要求较高,需保证在旋转待测镜时不会引入新的误差。总体来看,面式测量法中的逆向哈特曼法直接测量值为面形斜率,对振动、气流等外界环境要求较低,系统结构相对简单,易于进行机床集成,且其测量范围大、灵敏度高,有望用于光学元件在位检测。但目前逆向哈特曼法受到低阶面形误差测量不准确的困扰<sup>[17-18]</sup>,在现有研究中,对面形误差进行 Zernike 拟合后的低阶项采取直接去除,只评价其中高频面形误差与干涉测量的一致性,但本文聚焦的平面镜快速修复应用中,离焦、像散等低频、大振幅面形误差测量却极为关键,不能一去了之。综上所述,在实际检测过程中,受检测环境、检测系统装调、检测装置固有条件等因素影响,检测系统很难在理想条件下进行工作。为此,本文基于逆向哈特曼法,拟进行详细的仿真误差分析,建立仿真分析系统模型,对系统各项定位误差引起的面形误差幅值与种类进行了单因素定量分析,针对检测系统定位中的主要影响因素进行研究,根据实际应用需求,设计搭建在位检测装置,验证该方法的测量精度、重复性与长时稳定性。

## 1 仿真模型

根据实际检测情况,在 Zemax 中搭建光学模型,可通过图 1 所示数据传输过程完成仿真模型的建立,对检测系统中的各影响因素进行分析研究。

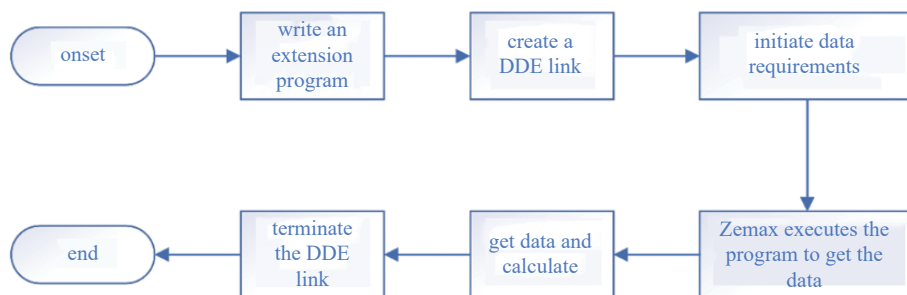


Fig. 1 Data transmission flow chart

图 1 数据传输流程图

利用上述面形仿真模型,以平面镜为例,分析设定初始系统基本参数。为达到在位检测目的,图像发生器尺寸需足够覆盖待测镜表面,探测器有效视场范围需能够接受全部反射光线,同时图像发生器与待测镜之间应留有足够的加工空间。根据实际情况,以口径 430 mm $\times$ 430 mm 的标准平面镜作为待测镜,待测镜反射表面中心为坐标原点建立空间坐标系,反射表面为 XOY 平面,系统关于 YOZ 平面对称,图像发生器距原点 1 140 mm,针孔光阑距原点沿 Z 轴距离 1 075 mm,沿 Y 轴距离 50 mm。在 Zemax 中取待测镜边缘光线进行追迹,如图 2 所示。

对边缘光线坐标进行追迹,获取边缘光线在图像发生器上对应坐标,向上取整得到图像发生器最小尺寸应为 886 mm $\times$ 880 mm;计算探测器对应边缘光线角度,向上取整得到探测器有效视场角大小应大于 19.9 $^\circ$ 。在此基础上,完成仿真检测系统搭建,根据实际探测器分辨率,仿真中光线追迹数量设定为 1 000 $\times$ 1 000 的光线矩阵,以上述系统基本参数为基础分析检测影响因素。

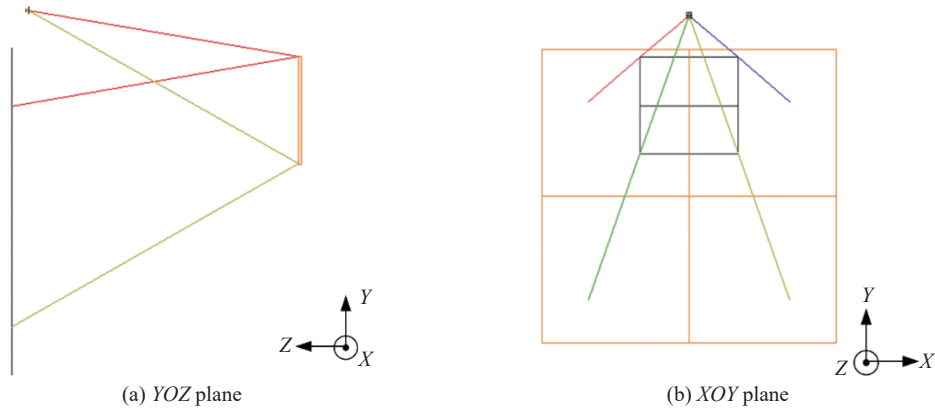


Fig. 2 Edge ray tracing of Zemax  
图2 Zemax 边缘光线追迹图

在实际检测中, 待测镜的表面面型会有所不同, 对应的理想面也会不同。一般情况下, 面型的主要影响因素是二次曲面常数  $k$ , 为研究不同面型对仿真系统的影响, 选取不同二次曲面常数的曲面进行仿真检测。分别取  $k=-2$ 、 $-1$ 、 $0$ 、 $1$ 、 $2$ , 其代表面型包括双曲面、抛物面、平面、球面和椭球面, 通过仿真模型分别计算面形, 再与理论面形相减得到面形误差如图 3 所示。

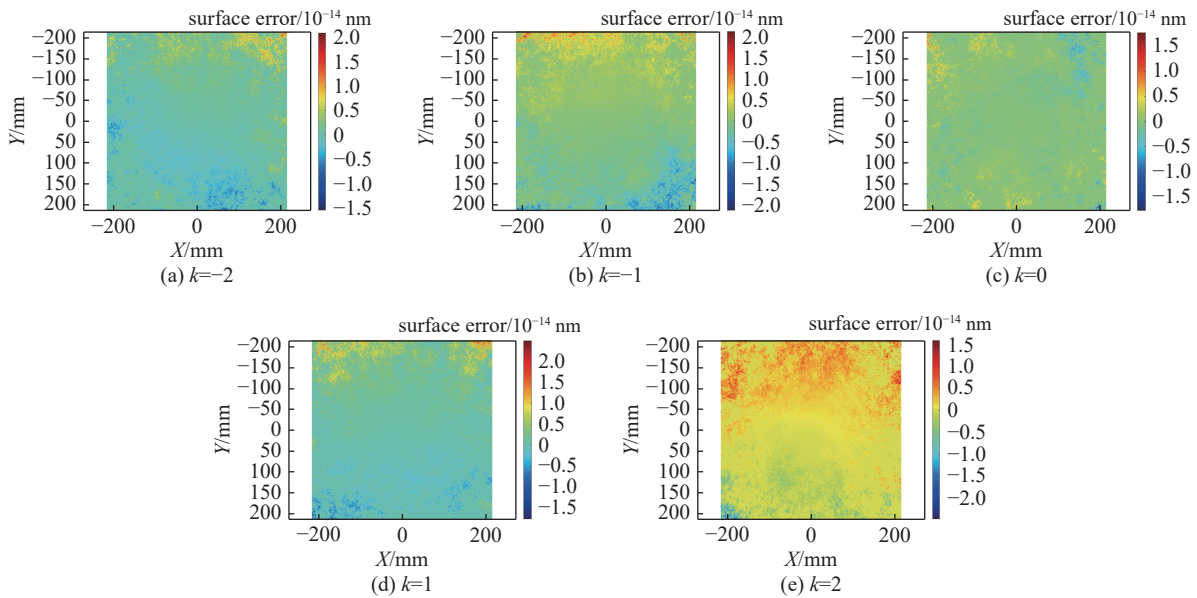


Fig. 3 Different  $k$  values correspond to the measurement surface shape error  
图3 不同  $k$  值对应测量面形误差

对于不同面型对应的面形误差, 计算面形误差大小如图 4 所示。可以看出, 对于不同面型, 仿真模型计算误差均很小, PV 波动在  $1 \times 10^{-8}$  nm 内, RMS 波动在  $1 \times 10^{-9}$  nm 内, 可以认为, 仿真检测系统对不同面型理想检测误差均在可接受范围内, 且波动误差可以忽略不计, 可以说明仿真模型对不同面型均有效。

## 2 分析与讨论

### 2.1 图像发生器定位误差

在检测系统中, 由于安装调整中的不确定性, 图像发生器的实际位置会与检测中的计算位置有一定误差。可将图像发生器的误差分解为沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的偏移, 以  $Z$  方向偏移为例, 如图 5 所示, 当图像发生器位置沿  $Z$  轴正方向产生偏移时, 由于位置误差导致光线计算方向发生偏离,  $\mathbf{n}$  为待测镜表面采样点实际法线方向,  $\mathbf{n}'$  为计算法线方向。

本文主要关注起伏误差, 其形状分布会随引起误差的因素不同而表现出不同的特点, 具有一定随机性, 属于不可预见的误差, 因此将起伏误差分离出来作为需要分析的面形误差。经过去倾斜处理后的面形误差见图 6。对图像发生器沿  $Z$  轴方向偏移  $\pm 0.01$  mm 范围内引起的面形误差进行计算, 可用峰谷值 (PV) 和均方根值 (RMS) 来衡量

面形误差大小,得到偏移量与PV、RMS关系曲线如图7所示。可以看出,面形误差大小随着图像发生器的偏移量增大而增大,且近似呈线性关系,偏移量最大时,PV最大值为152.7 nm,RMS最大值为30.6 nm。这一误差大小与测量允许误差大小相近,因此图像发生器定位精度应不低于0.01 mm。面形误差可通过Zernike系数进行拟合,所以对于面形误差的具体类型,可以通过计算其对应Zernike系数进行分析。当图像发生器沿Z轴正方向偏移0.01 mm时,对去倾斜后得到的面形误差求Zernike系数,取前37项如图8所示,横坐标x表示项数,纵坐标y表示Zernike系数。可以看出,此时面形误差对应为第1、3、4、6、7项,可认为图像发生器沿Z轴偏移引起的面形误差对应像差为平移、Y向倾斜、离焦、0°初级像散和Y轴初级彗差,其中主要为平移、离焦和0°初级像散项。第1项平移项无实际意义,一般不作考虑,后文对平移项也都忽略。因此,图像发生器沿Z轴偏移引起的面形误差对应像差为离焦和0°初级像散项。

综上,按上述方法分别求得图像发生器沿X、Y、Z三个方向偏移所引起的面形误差,见表1。沿Z轴方向偏移所引起的面形误差大于沿X、Y轴方向,在偏移量相近时,沿Z轴方向的偏移是造成检测误差的主要来源。由此可知,检测中图像发生器沿Z轴方向的位置精度对最终检测结果的影响最大。

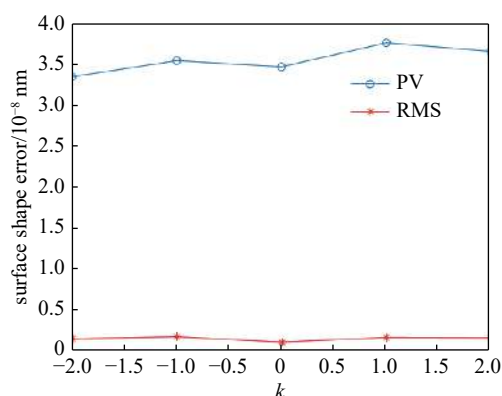


Fig. 4 The surface shape errors corresponding to different  $k$  values

图 4 不同  $k$  值对应面形误差

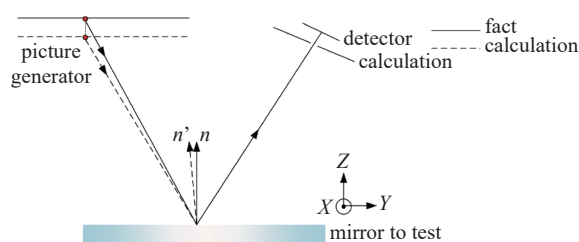
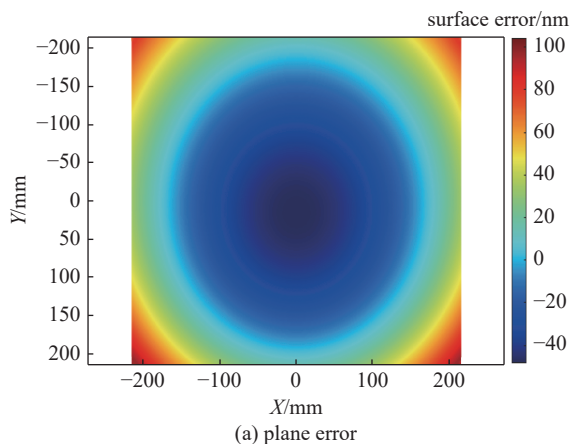
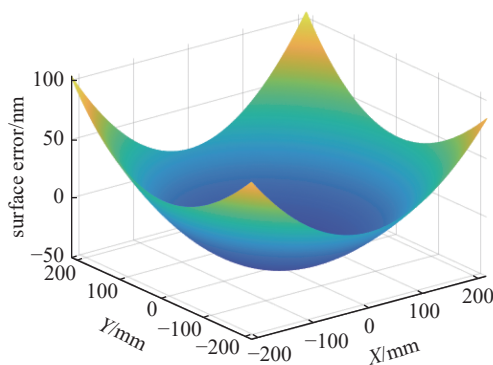


Fig. 5 Schematic diagram of the influence of image generator positioning error along Z axis

图 5 图像发生器沿 Z 轴定位误差影响示意图



(a) plane error



(b) three-dimensional error

Fig. 6 De-skewed surface shape error caused by the image generator offsetting 0.01 mm along the positive direction of Z axis

图 6 图像发生器沿 Z 轴正方向偏移 0.01 mm 引起的去倾斜后面形误差

## 2.2 针孔光阑定位误差

针孔光阑与图像发生器定位方式类似,因此定位精度也在同一量级,对针孔光阑沿Z轴方向偏移正负0.01 mm范围内引起的面形误差大小进行计算,得到偏移量与PV、RMS关系曲线如图9所示。与图像发生器偏移引起的误差类似,针孔光阑偏移所引起的面形误差大小近似与偏移量成正比,偏移量最大时,PV最大值为161.9 nm,RMS最大值为32.4 nm。

当针孔光阑沿Z轴正方向偏移0.01 mm时,对去倾斜后得到的面形误差求Zernike系数,取前37项如图10所示,可以看出,此时面形误差对应第3、4、6、7项,可认为针孔光阑沿Z轴偏移引起的面形误差对应像差为Y向倾斜、离焦、0°初级像散和Y轴初级彗差,其中主要为4、6项。

综上,分别求得针孔光阑沿X、Y、Z三个方向偏移所引起的面形误差,见表2。对比发现,沿Z轴方向偏移所引起的面形误差大于沿X、Y轴方向,在偏移量相近时,沿Z轴方向的偏移是造成检测误差的主要来源。这一结论

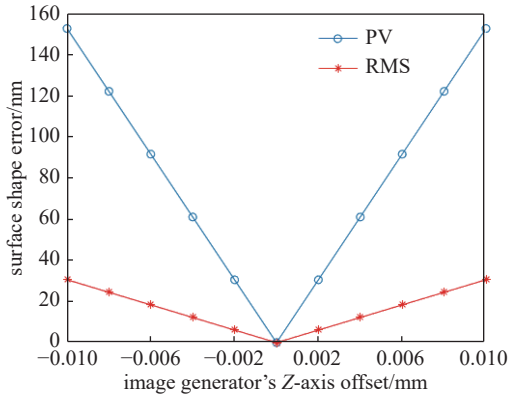


Fig. 7 Surface shape error caused by image generator's offset along the Z axis direction

图 7 沿 Z 轴方向偏移引起的面形误差大小

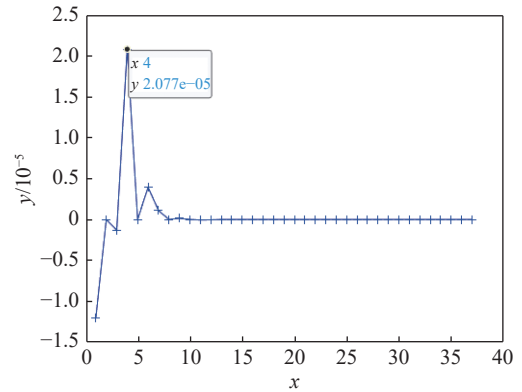


Fig. 8 Zernike coefficients corresponding to surface shape error

图 8 面形误差对应 Zernike 系数

表 1 图像发生器定位误差对测量结果影响

Table 1 Influence of image generator's positioning error on the measurement results

direction	maximum surface shape error/nm		corresponding to Zernike coefficients		
	PV	RMS	number of terms	number of main items	main types
along the X axis	77.2	10.1	2、5、8、15	5	45° primary astigmatism
along the Y axis	88.9	18.1	3、4、6、7、9	4、6	defocusing and 0° primary astigmatism
along the Z axis	152.7	30.6	3、4、6、7	4、6	defocusing and 0° primary astigmatism

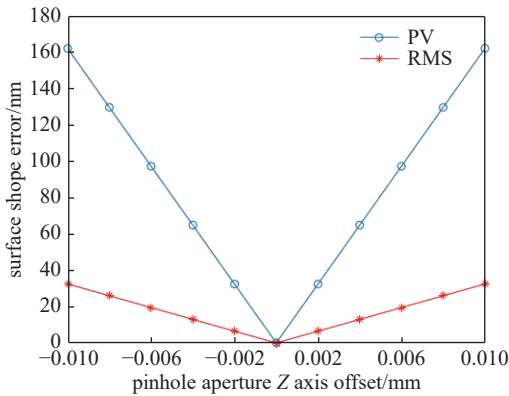


Fig. 9 Size of the surface shape error caused by the offset along the Z axis

图 9 沿 Z 轴方向偏移引起的面形误差大小

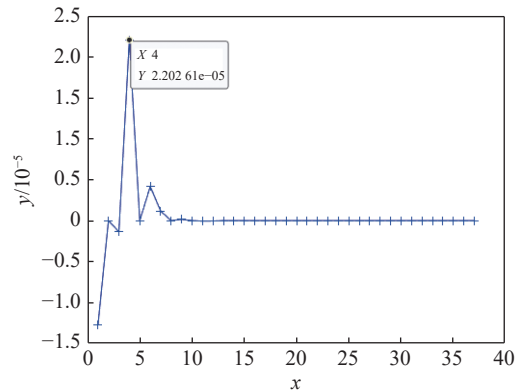


Fig. 10 Zernike coefficients corresponding to surface shape error

图 10 面形误差对应 Zernike 系数

表 2 针孔光阑定位误差对测量结果影响

Table 2 Effect of pinhole diaphragm positioning error on measurement results

direction	maximum surface shape error/nm		corresponding to Zernike coefficients		
	PV	RMS	number of terms	number of main items	main types
along the X axis	81.8	10.8	2、5、8、15	5	45° primary astigmatism
along the Y axis	94.2	19.1	3、4、6、7、9	4、6	defocusing and 0° primary astigmatism
along the Z axis	161.9	32.4	3、4、6、7	4、6	defocusing and 0° primary astigmatism

与图像发生器的位置误差相似, 通过检测原理图可知, 图像发生器与针孔光阑位置相对应, 位置误差对检测结果的影响也应当类似。因此, 通过仿真系统模拟检测的结果可以反映出真实检测时的情况。

### 2.3 镜头畸变误差

探测器的畸变主要来自于光线在镜头中传播时产生的镜头失真, 镜头失真所带来的畸变可以主要分为切向畸变和径向畸变两类。在实际应用中, 由于切向畸变通常可以避免, 而径向畸变中的高阶项通常无法考虑, 使用一阶

径向畸变即可以对图像畸变进行有效分析,因此在模拟检测系统分析中,主要针对一阶径向畸变系数  $k_1$  对测量结果的影响进行分析。

根据径向畸变表达式<sup>[19]</sup>,对探测器像面采样点添加畸变,当  $k_1 > 0$  和  $k_1 < 0$  时的理想点和畸变点分布示意图如图 11 所示。可以看出,当  $k_1 > 0$  时,探测器像面采样点向外扩散,产生枕形畸变;当  $k_1 < 0$  时,探测器像面采样点向内收缩,产生桶形畸变。

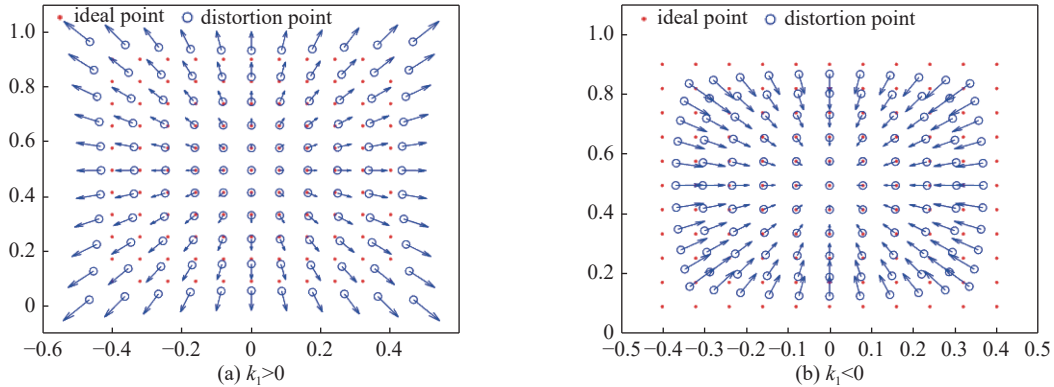


Fig. 11 Schematic diagram of the change of sampling points when  $k_1 > 0$  and  $k_1 < 0$

图 11  $k_1 > 0$  和  $k_1 < 0$  时采样点变化示意图

在实际检测中,首先对  $k_1 > 0$  的情况进行仿真,以  $k_1 = 1 \times 10^{-3}$  为例,在此区间内对探测器像面采样点添加畸变,由添加畸变后的采样点在仿真检测系统中进行追迹,得到各采样点坐标,以此计算  $X$ 、 $Y$  方向斜率。通过斜率直接积分得到面形,再得到去倾斜之后的面形误差如图 12 所示。

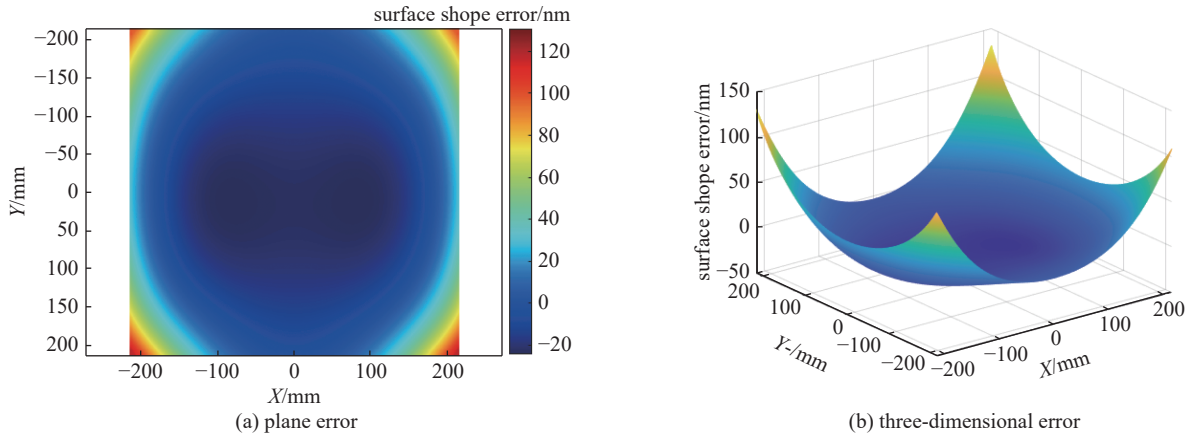


Fig. 12  $k_1 > 0$ , slope and surface shape error caused by detector lens distortion

图 12  $k_1 > 0$  时探测器镜头畸变引起的斜率及面形误差

对于畸变系数在  $1 \times 10^{-3}$  和无畸变之间的情况,计算在此范围内镜头畸变引起的面形误差大小 PV 和 RMS 如图 13 所示。由图可得,镜头畸变引起的面形误差大小与畸变系数  $k_1$  大小近似成正比,  $k_1$  最大时, PV 最大值为 155.3 nm, RMS 最大值为 24.9 nm。对  $k_1 = 1 \times 10^{-3}$  时计算得到的面形误差求 Zernike 系数,取前 37 项如图 14 所示,可以看出,此时面形误差对应的主要为第 3、4、6、11、12、28 项,可认为镜头畸变引起的面形误差主要对应像差为  $Y$  向倾斜、离焦、 $0^\circ$  初级像散和高阶像差,其中主要为第 4、6、11、12 项,即离焦、 $0^\circ$  初级像散和高阶像差。

在此基础上,对  $k_1 < 0$  的情况进行类似处理,发现  $k_1 > 0$  和  $k_1 < 0$  时,镜头畸变引起的面形误差形状相互对称,误差大小几乎相同,因此可认为镜头畸变引起的误差大小与畸变系数  $k_1$  的绝对值近似成正比。具体影响如表 3 所示。

#### 2.4 系统温度变化

在实际检测中,检测系统所处的环境也会对测量结果造成一定的影响,在本文提出的检测系统中,因为单次检测时间较短,并且有支撑固定结构,所以在单次检测中结合上述影响因素分析可以满足检测需要。但在连续检测中,系统各部分的工作温度会随着运行时间和环境而产生变化,而温度的变化往往会对系统定位误差产生影响,本文对图像发生器、探测器、支撑结构 3 种因素进行了研究,具体情况如表 4 所示。可以看出,对于温度变化对面形

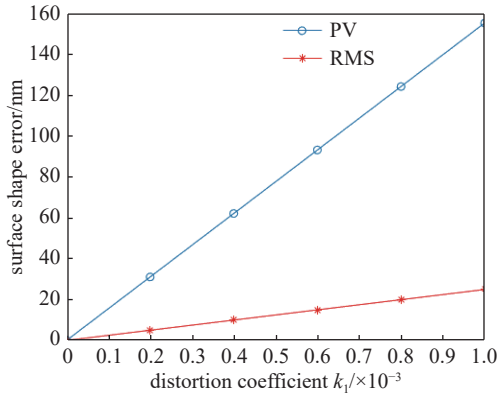


Fig. 13 Surface shape error caused by lens distortion of detector  
图 13 探测器镜头畸变引起的面形误差大小

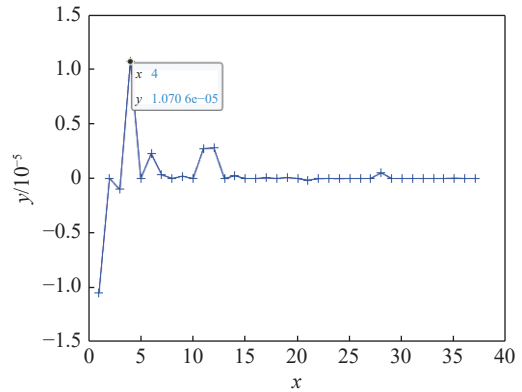


Fig. 14 Zernike coefficients corresponding to surface shape error  
图 14 面形误差对应 Zernike 系数

表 3 探测器镜头畸变对测量结果影响

Table 3 Effect of detector lens distortion on measurement results

influencing factor		maximum surface shape error/nm		corresponding to Zernike coefficients		
		PV	RMS	number of terms	number of main items	main types
detector lens distortion ( $ k_1 =1 \times 10^{-3}$ )	pin-cushion distortion	155.3	24.9	3, 4, 6, 11, 12, 28	4, 6, 11, 12	defocusing, 0° primary astigmatism and higher-order aberrations
	barrel distortion	155.3	24.9	3, 4, 6, 11, 12, 28	4, 6, 11, 12	defocusing, 0° primary astigmatism and higher-order aberrations

表 4 温度变化对测量结果影响

Table 4 Effect of temperature change on measurement results

influencing factor	maximum surface shape error/nm		corresponding to Zernike coefficients		
	PV	RMS	number of terms	number of main items	main types
image generator expansion	416.9	85.3	3, 4, 5, 6, 7	3, 4, 5	defocusing, 45° primary astigmatism, 0° primary astigmatism
detector expansion	99.7	20.4	3, 4, 6, 7	4	focusing out
support structure expansion	4.9	1.0	3, 4, 6, 7, 9	4, 6	defocusing and 0° primary astigmatism

测量结果的影响, 图像发生器和探测器温度变化时的像素膨胀对测量结果影响较为明显, 而支撑结构温度变化时对测量结果影响不大。

### 3 实验验证

#### 3.1 试验台搭建

根据仿真分析, 选用 LCD 屏幕作为图像发生器、CMOS 作为探测器, 结合计算机作为图像处理器, 搭建基于逆向哈特曼原理的在位检测实验验证系统。以实验室现有的一块有效口径为  $\phi 229$  mm 的标准平面镜作为待测镜进行验证实验, 对其有效口径内各点斜率进行测量, 并重构得到面形误差, 以验证系统的各项性能指标。在考虑各结构相对位置关系的情况下, 结合在位检测方式, 为提高测量精度, 同时增加测量系统在加工设备内部工作可行性, 系统采用立式光路结构, LCD 屏幕与探测器横向离轴分置, 逆向哈特曼在位测量系统的基本结构如图 15 所示, 面形检测系统安装在加工机床上。测量系统需同时满足图像发生器倾斜可调、探测器的角度可调、待测镜平移及倾斜可调, 其基本结构主要包括基准平台、支撑与调整结构和图像发生及采

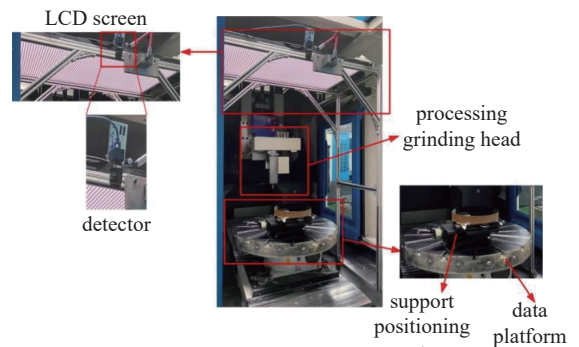


Fig. 15 In-situ detection system structure

图 15 在位检测系统结构

集结构。

### 3.2 在位检测系统实验

#### 3.2.1 系统温度变化实验

针对检测系统结构对测量结果的影响,在系统中进行实验,在实验前用一块标准平面镜对系统进行了标定。在检测系统短时间测量时,系统可以保持较好的稳定性。但在长时间连续测量的情况下,随着温度的变化,系统结构会受到影响,测量结果也会有所波动。通过仿真模型可知,系统各部分温度对测量结果会产生一定影响,因此对检测系统温度的影响进行实验。测量结果随时间变化的曲线见图 16(a)、图 16(b),同时间段温度变化的曲线如图 16(c)。从图 16 可以看出,测试启动后约 2 h 达到热平衡,初始 2 h 范围内,LCD 屏幕、相机外壳的温度均有明显上升,屏幕最下方(发光区)温升高达 13 °C 以上,中间行温升 7 °C 左右;相机外壳温度上升 8 °C 左右,2 h 后各元件温度趋于稳定;测量引起的面形误差随着初始温升也明显增加,并随着各元件温度的稳定而稳定。启动至热平衡过程中,温度变化引起的面形测量误差可达约 1 600 nm (PV)、280 nm (RMS) 量级;元件温度变化引起的面形测量误差以离焦和像散为主,与仿真结果相同;在显示器底边行像元照明的区域,测量得到的面形误差有较为剧烈的变化,这或与该位置温度变化最大及屏幕与外壳间热膨胀系数差异较大相关。

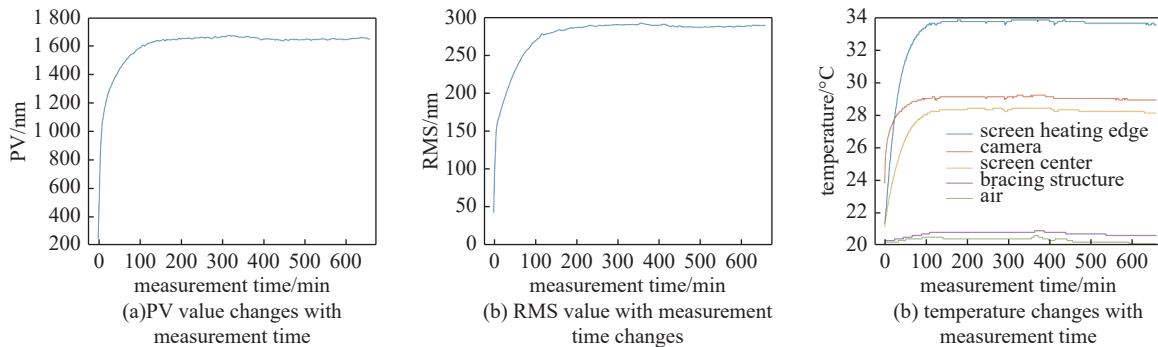


Fig. 16 Change of measurement results with time

图 16 测量结果随时间变化图

因此,要使逆向哈特曼测量系统达到亚波长量级的测量精度,必须在系统达到热平衡状态后进行参数标定,且在该平衡状态下进行测量。此外,温度变化引起的面形测量误差与理论及仿真模型计算得到的结果基本一致,验证了仿真模型的正确性。

#### 3.2.2 系统重复性实验

在系统达到热平衡后,重新对系统进行标定,并对  $\phi 229$  mm 的标准平面镜进行面形检测。用标定后的实验验证系统对该平面镜进行 30 次连续测量,测量得到的面形误差 PV 值和 RMS 值见表 5。对 30 次重复测量的 PV 值取均方根,得到 PV 测量重复性为 9.9 nm,约  $\lambda/60$ ;对 30 次重复测量的 RMS 值取均方根,得到 RMS 测量重复性为 2.2 nm,约  $\lambda/300$ ,完全可以达到平面镜在位测量精度的要求。

#### 3.2.3 系统稳定性实验

为考察系统的长时稳定性,每间隔 3 min 进行一次面形检测,连续测量 6 h,记录下每次测量得到面形误差分布、PV 值和 RMS 值,同时记录测量期间各结构温度变化情况。6 h 共完成测量 120 次,测量结果如图 17 所示。面形误差 PV 值、RMS 值随时间变化的曲线如图 17(a)(b)所示,PV 值最大为 68 nm(约  $\lambda/10$ ),RMS 值最大为 15 nm(约  $\lambda/40$ );测得面形误差的典型分布如图 17(c)所示,以离焦为主,这与温度影响的仿真结果一致;同时间段温度变化的曲线如图 17(d)所示,可以看出在系统达到温度平衡后,各元件的温度波动均在  $\pm 0.6$  °C 以内。

上述实验表明,所搭建的在位检测实验验证系统达到温度平衡后可进行长时间连续稳定的高精度面形测量。目前单次测量时间约为 70 s,测量面形误差 PV 值不超过 68 nm,RMS 值不超过 15 nm,完全满足期望达到的 PV 优于  $\lambda/4$ (即 158 nm),RMS 优于  $\lambda/20$ (即 31 nm)要求,并且测量误差分布特征与仿真分析吻合。

## 4 结 论

本文采用 Matlab 与 Zemax 联合编程,建立了一套可用于平面/球面/非球面/自由曲面等各类型被测面的逆向哈特曼仿真检测模型,以 430 mm $\times$ 430 mm 平面镜为例,对面形测量敏感因素进行分析,得到敏感因素影响大小与具体影响形式。其次,搭建了一套逆向哈特曼在位测量实验验证系统,从系统温度稳定特性、稳态测量重复性及长



表 5 检测系统参数

Table 5 Detection system parameters

measurement serial number	PV/nm	RMS/nm	measurement serial number	PV/nm	RMS/nm
1	19.2	3.1	16	46.6	9.6
2	18.4	2.9	17	46.7	9.6
3	21.7	4.0	18	47.7	10.0
4	28.3	5.4	19	49.3	10.3
5	29.7	4.8	20	44.9	9.3
6	27.7	5.2	21	42.6	8.8
7	33.7	6.6	22	45.5	9.5
8	34.4	6.6	23	43.5	8.7
9	31.3	5.9	24	41.7	7.3
10	34.3	6.6	25	41.3	6.6
11	37.4	7.1	26	50.1	9.0
12	40.5	8.1	27	60.6	10.9
13	44.5	9.3	28	45.7	9.0
14	48.2	10.0	29	37.6	6.3
15	48.1	10.1	30	39.9	7.1

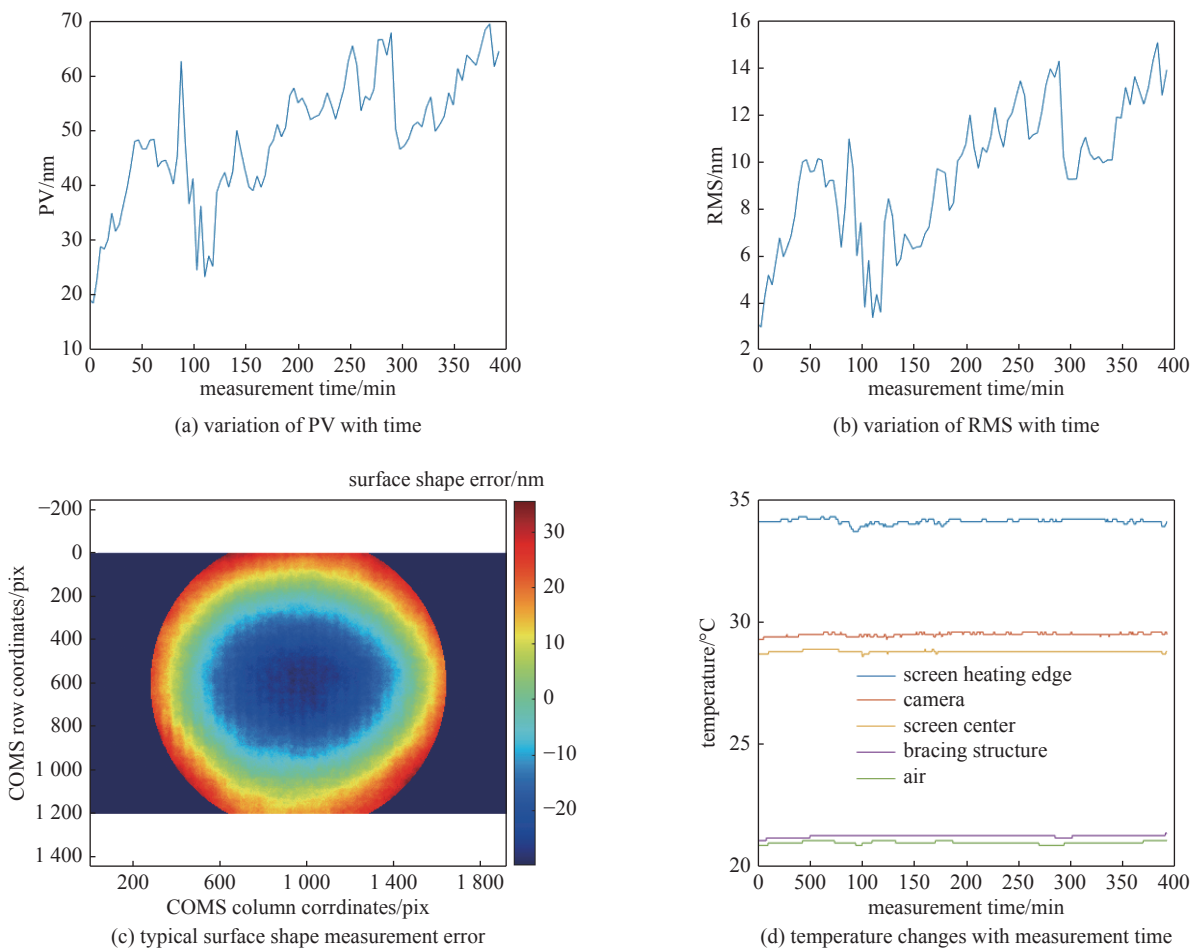


Fig. 17 Measurement results of surface shape error and temperature variation with time

图 17 测量结果和温度随时间变化图

时测量稳定性 3 个方面进行了实验与性能评估。实验数据表明: 所搭建的逆向哈特曼在位测量实验验证系统温度平衡时间约为 2 h; PV 测量重复性为 9.9 nm(约  $\lambda/60$ ), RMS 测量重复性为 2.2 nm(约  $\lambda/300$ ); 系统可进行 6 h 甚至更

长时间的连续、稳定、高精度面形检测, 6 h 内测量面形误差 PV 值最大不超过 68 nm(约  $\lambda/10$ ), RMS 值最大不超过 15 nm(约  $\lambda/40$ )。

#### 参考文献:

- [1] 张梦瑶, 田爱玲, 王大森, 等. 基于逆向优化策略的面形绝对检测平移量研究[J]. *中国激光*, 2022, 49: 1804003. (Zhang Mengyao, Tian Ailing, Wang Dasen, et al. Translation of surface shape absolute testing based on reverse optimization strategy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49: 1804003)
- [2] 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: 200209. (Hou Xi, Zhang Shuai, Hu Xiaochuan, et al. The research progress of surface interferometric measurement with higher accuracy[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47: 200209)
- [3] Ye Meitu, Liang Jin, Li Leigang, et al. Simultaneous measurement of external and internal surface shape and deformation based on photogrammetry and stereo-DIC[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 158: 107179.
- [4] Su Peng, Wang Yuhao, Burge J H, et al. Non-null full field X-ray mirror metrology using SCOTS: a reflection deflectometry approach[J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12393-12406.
- [5] Berger G, Petter J. Non-contact metrology of aspheric surfaces based on MWLI technology[C]//Proceedings of SPIE 8884, Optifab 2013. 2013: 88840V.
- [6] Anderson D S, Burge J H. Swing-arm profilometry of aspherics[C]//Proceedings of SPIE 2536, Optical Manufacturing and Testing. 1995: 169-179.
- [7] Wan Xinjun, Bin Boyi, Xie Shuping, et al. Development of an integrated freeform optics measurement system based on phase measuring deflectometry[C]//Proceedings of SPIE 10847, Optical Precision Manufacturing, Testing, and Applications. 2018: 1084710.
- [8] Guo Chunfeng, Hu Anduo. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirrors with null phase measuring deflectometry[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58: 104102.
- [9] Chaudhuri R, Papa J, Rolland J P. System design of a single-shot reconfigurable null test using a spatial light modulator for freeform metrology[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(8): 2000-2003.
- [10] Fang Fengzhou, Zhang Xiaodong, Weckenmann A, et al. Manufacturing and measurement of freeform optics[J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(2): 823-846.
- [11] Lei Huang, Idir M, Zuo Chao, et al. Comparison of two-dimensional integration methods for shape reconstruction from gradient data[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 64: 1-11.
- [12] Xu Yongjia, Gao Feng, Jiang Xiangqian. Enhancement of measurement accuracy of optical stereo deflectometry based on imaging model analysis[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 111: 1-7.
- [13] Huang Lei, Ng C, Asundi A K. Dynamic 3D measurement for specular reflecting surface with monoscopic fringe reflection deflectometry[C]//Proceedings of the Computational Optical Sensing and Imaging 2011. 2011: CWC3.
- [14] Song Lei, Yue Huimin, Kim H, et al. A study on carrier phase distortion in phase measuring deflectometry with non-telecentric imaging[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24505-24515.
- [15] 阮一郎, 李大海, 余林治, 等. 基于相位测量偏折术的成像透镜轴外点波像差测量[J]. *中国激光*, 2022, 49: 2104003. (Ruan Yilang, Li Dahai, Yu Linzhi, et al. Off-axis point wave aberration testing for imaging lens based on phase measuring deflectometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49: 2104003)
- [16] 陈贞屹, 赵文川, 张启灿, 等. 基于立体相位测量偏折术的预应力薄镜面形检测[J]. *光电工程*, 2020, 47: 190435. (Chen Zhenyi, Zhao Wenchuan, Zhang Qican, et al. Shape measurement of stressed mirror based on stereoscopic phase measuring deflectometry[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47: 190435)
- [17] Su Peng, Khreishi M, Huang Run, et al. Precision aspheric optics testing with SCOTS: a deflectometry approach[C]//Proceedings of SPIE 8788, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII. 2013: 87881E.
- [18] Faber C, Olesch E, Krobot R, et al. Deflectometry challenges interferometry: the competition gets tougher![C]//Proceedings of SPIE 8493, Interferometry XVI: Techniques and Analysis. 2012: 84930R.
- [19] 冯婕, 白瑜, 邢廷文. Zernike多项式波面拟合精度研究[J]. *光电技术应用*, 2011, 26(2): 31-34. (Feng Jie, Bai Yu, Xing Tingwen. Fitting accuracy of wavefront using Zernike polynomials[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(2): 31-34)