

基于逆向优化策略的面形绝对检测平移量研究

张梦瑶¹, 田爱玲^{1*}, 王大森², 朱学亮¹, 刘丙才¹, 王红军¹¹西安工业大学光电工程学院陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021;²中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 310022

摘要 本文针对共轭平移差分方法中的关键参数进行研究,提出了一种基于逆向优化策略的平移量最优解确定方法。首先对差分逼近精度及信噪比进行研究,建立噪声条件下的平移量与面形重建误差模型;然后将被测面形估计值和随机噪声引起的面形偏差作为变量,利用差分 Zernike 算法求解面形重建容许误差下的最佳平移量区间;最后采用商用干涉仪对标准镜进行不同平移量下的面形绝对检测对比实验。实验结果表明:平移量的取值会直接影响面形测量精度,在最佳平移量区间内进行面形绝对检测所得结果与传统三面互检方法所得结果基本吻合,证明了所提方法可以有效提高平面光学元件的面形测量精度。

关键词 测量;绝对检测;共轭平移差分;干涉测量;Zernike 波面重建

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1804003

1 引言

随着精密光学制造技术的快速发展,高精度光学元件在国家重大科学工程、军事武器系统和航天航空等领域得到了广泛应用,其面形精度通常要求达到纳米水平,这对光学元件面形检测提出了新的挑战^[1-3]。干涉法是常用的面形检测技术^[4],其测量精度一般在 $1/20$ 波长左右,波长 λ 的值为 632.8 nm。限制该方法测量精度的主要因素是被测镜相对于参考镜的面形差。为提高干涉测量精度,可采用绝对检测技术剔除参考镜面形误差的影响,获得被测镜的绝对面形^[5-7]。

目前,平面光学元件面形的绝对检测法主要有三面互检法^[8-9]、平移旋转法^[10-11]和平移差分法。平移差分法具有测量周期短和无需反复装调的特点,可以降低测量对环境稳定性的要求,减小位置匹配误差的影响,在绝对检测技术中得到了广泛应用。1983 年,Keenan^[12]首次提出了平移差分法;2007 年,Morin 等^[13]基于此方法完成了测量重复性均方根(RMS)值为 1 nm 的高精度光学元件面形测量;2014 年,Bloemhof^[14]对该方法进行拓展,利用 hudgin 斜率复原算法对差分面形进行重建,重建出的被测面峰谷值(PV 值)可达 $\lambda/100$;2015 年,蔡慧娟^[15]在平移差分方法的基础上提出了共轭平移差分法,并通过对比实验证明了共轭平移差分法的高重复性及高精度测量优势。共轭平移差分法可以得到被测面的面形绝对值。平移量是该方法中的关键参数,对其进行优化后可以

进一步提高面形的测量精度。2015 年,Huang 等^[16]出于最大限度利用干涉仪空间分辨率的考虑,以探测器的单像素为平移量进行实验,结果发现所用方法与三面互检法相比测量结果偏差的峰谷值(PV 值)优于 $\lambda/100$;2016 年,Gladysheva 等^[17]以空间频率范围作为平移量的选定函数,在低频段对 600 mm 口径被测镜进行测量,结果显示,在 0.2~4.8 mm 平移量区间可以保证面形重建误差优于 5%;2020 年,张锐^[18]通过仿真研究了平移量取值对系统动态范围、相对灵敏度的影响,得出了大平移量有助于提高系统灵敏度但会降低系统测量动态范围的结论。

面形测量过程中不可避免地存在系统误差^[19]和随机误差^[20-22],其中,系统误差因具有重复性和单向性可以通过系统校准消除,而随机误差因不可预测且无规律通常忽略不计。在高精度面形测量中,为了提高干涉法测量的科学性和置信度,由随机噪声引起的测量偏差不能忽略。为了抑制随机噪声的影响从而提高面形重建精度,本团队提出了基于逆向优化策略的面形绝对检测平移量确定方法,并对该方法进行了仿真分析和实验验证。

2 基本原理

2.1 共轭平移差分法的面形绝对检测原理

基于菲索干涉系统对两块平面镜进行面形绝对检测,测试过程中参考镜的位置固定不变,被测镜沿参考镜的正交方向分别共轭平移 s ^[16],测量过程如图 1 所示。

收稿日期: 2021-12-07; 修回日期: 2021-12-30; 录用日期: 2022-01-28

基金项目: 国防科工局基础科研(JSZL2018411C001)

通信作者: *ailintian@xatu.edu.cn

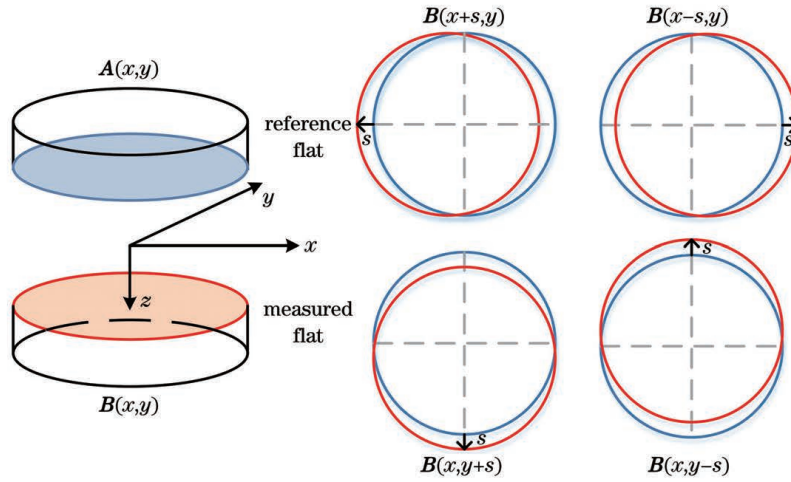


图 1 共轭平移差分法测量原理示意图

Fig. 1 Schematic of measurement principle of conjugate translation difference method

设参考镜面形为 $A(x, y)$, 被测镜面形为 $B(x, y)$, 测量得到的干涉波面为 $W(x, y)$, 则 4 组干涉测量结果为

$$\begin{cases} W_1(x, y) = A(x, y) + B(x + s, y) \\ W_2(x, y) = A(x, y) + B(x - s, y) \\ W_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y + s) \\ W_4(x, y) = A(x, y) + B(x, y - s) \end{cases} \quad (1)$$

将被测镜同方向上的共轭位置数据相减, 并除以 2 倍平移量后, 即可得到被测面在两正交方向上的绝对梯度面形值, 此时参考镜面形误差已被消除。

$$\begin{cases} \Delta W_x(x, y) = \frac{W_1(x, y) - W_2(x, y)}{2s} = \frac{B(x + s, y) - B(x - s, y)}{2s} \\ \Delta W_y(x, y) = \frac{W_3(x, y) - W_4(x, y)}{2s} = \frac{B(x, y + s) - B(x, y - s)}{2s} \end{cases}, \quad (2)$$

由式(2)可知, 在平移量 s 足够小的情况下, 被测面的梯度数据逼近其微分面形。对梯度数据采用差分 Zernike 复原算法进行计算即可重建出被测镜的绝对面形值。

差分 Zernike 复原算法首先假设被测波前可以用一组基函数拟合得到, 然后通过差分波前数据求解被测波前的基函数系数, 再进行拟合就可得到被测波前。被测波前的 Zernike 多项式可以表示为

$$W(x, y) = \sum_{k=1}^n c_k z_k(x, y), \quad (3)$$

式中: (x, y) 表示归一化的笛卡儿坐标; c_k 为第 k 项 Zernike 多项式的系数; $z_k(x, y)$ 为第 k 项正交化的 Zernike 多项式。则差分波前 $\Delta W_x(x, y)$ 和 $\Delta W_y(x, y)$ 可以表示为

$$\begin{cases} \Delta W_x(x, y) = \sum_{k=1}^n c_k z_k^x(x, y) \\ \Delta W_y(x, y) = \sum_{k=1}^n c_k z_k^y(x, y) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $z_k^x(x, y)$ 和 $z_k^y(x, y)$ 分别表示 x 方向和 y 方向上差分 Zernike 多项式的基函数, 可分别通过对

$z_k(x, y)$ 的自变量 x 和 y 求偏导获得。

式(4)合并可写作

$$\Delta W = \Delta Z C, \quad (5)$$

式中: ΔW 为差分面形; ΔZ 为差分 Zernike 多项式的基函数; C 为差分 Zernike 多项式的系数。

因正交函数求偏导后并不会改变正交特性, 所以差分 Zernike 多项式在圆域内同样保持正交性。用最小二乘法可求得系数

$$C = (\Delta Z^T \Delta Z)^{-1} \Delta Z^T \cdot \Delta W. \quad (6)$$

由于差分波前的差分 Zernike 多项式系数同被测波前的 Zernike 多项式系数相同, 因此将通过式(6)求出的系数代入式(3), 即可求得被测面的面形。

2.2 基于逆向优化策略的面形绝对检测平移量确定

为保证实验中同样满足高精度绝对检测的要求, 在仿真计算中加入噪声更具实际意义。下面以 x 方向上的共轭平移来说明平移量的选取对抑制噪声和测量误差的影响。假设在理想的波面数据中叠加服从高斯分布的白噪声 η , 以模拟实际测量过程中由环境因素或探测器电子噪声等引入的随机噪声, 则被测面在 x 方向共轭平移 s 后, 可得

$$\begin{cases} W_1^\eta(x, y) = A(x, y) + B(x + s, y) + \eta(x, y, t_1) \\ W_2^\eta(x, y) = A(x, y) + B(x - s, y) + \eta(x, y, t_2) \end{cases}, \quad (7)$$

因此 x 方向上的梯度数据可表示为

$$\Delta W_x^\eta(x, y) = \frac{W_1^\eta(x, y) - W_2^\eta(x, y)}{2s} = \frac{B(x + s, y) - B(x - s, y)}{2s} + \frac{\eta(x, y, t)}{2s}. \quad (8)$$

对式(8)进行泰勒展开,得

$$\frac{\partial B(x, y)}{\partial x} \approx \frac{B(x + s, y) - B(x - s, y)}{2s} = \Delta W_x^\eta(x, y) - \frac{\eta(x, y, t)}{2s}. \quad (9)$$

由式(9)可知,当平移量 s 增大时,噪声项 $\frac{\eta(x, y, t)}{2s}$ 将得到有效抑制,测量信噪比 $\frac{\Delta W_x(x, y)}{\frac{\eta(x, y, t)}{2s}}$ 提高,继而面形重建精度提高。

根据差分逼近精度和信噪比,建立平移量与面形重建误差模型,即

$$\begin{aligned} E_B(x, y) = B_\eta(x, y) - B(x, y) = \int_0^a \left[\Delta W_x(x, y) + \frac{\eta(x, y, t)}{2s} \right] dx - B(x, y) = \\ B'(x, y) - B(x, y) + \frac{a}{2s} \eta, \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $E_B(x, y)$ 为被测面的面形误差; $B_\eta(x, y)$ 为含有噪声时被测面的重建面形; $B'(x, y)$ 为不含噪声时理想被测面的重建面形; $B(x, y)$ 为被测面的初始面形; a 为被测面的口径。

基于均方误差最小原则,在面形容许误差下求解的平移量即为最佳平移区间。由式(10)可知,最佳平移区间还与随机噪声、被测面面形相关。

3 仿真计算分析

3.1 理想条件下平移量的仿真分析

对平移量变化引起的面形重建误差进行仿真分析。用任意给出的前 36 项 Zernike 系数构建被测面和参考面的初始波面,所建波面如图 2 所示。初始参

考面面形误差的 PV 值为 12.70 nm, RMS 值为 2.11 nm; 初始被测面面形误差的 PV 值为 31.72 nm, RMS 值为 4.90 nm。初始面和被测面的口径均为 100 mm, 采样点数均为 500×500 。

在不同的平移量下进行共轭平移差分面形绝对检测计算,可得面形测量误差的 PV 值和 RMS 值,如图 3 所示。

由图 3 可知,平移量与面形测量误差呈正比关系,平移量越大,面形测量误差越大。因此,仅从差分逼近的角度考虑平移量对面形重建结果的影响时,若平移量为单采样点对应的空间尺寸,则重建结果最佳,此时面形重建误差的 PV 值为 1.27×10^{-3} nm, RMS 值为 2.75×10^{-4} nm。

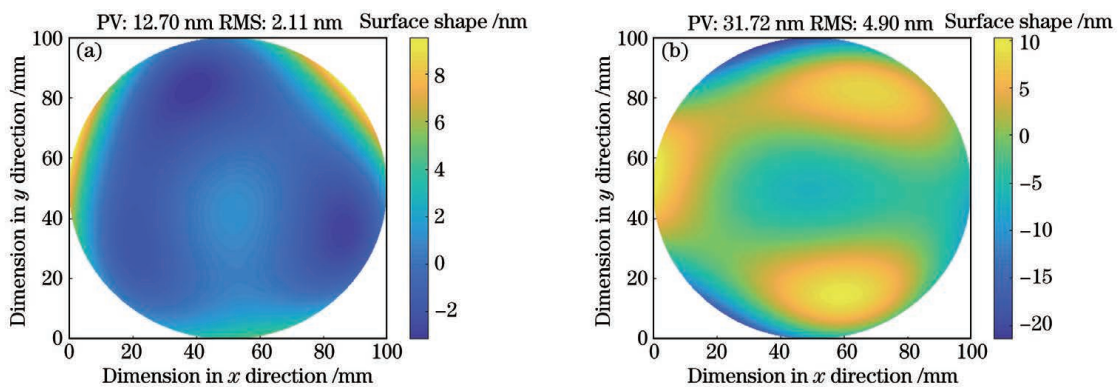


图 2 初始参考面与被测面的面形图。(a) 参考面的面形; (b) 被测面的面形

Fig. 2 Surface shape of initial reference surface and measured surface. (a) Reference surface shape; (b) measured surface shape

3.2 随机噪声对最佳平移量的影响

假定噪声 $\eta \sim N(\mu, \sigma)$, 在不同随机噪声的干扰下,对图 2 所示的仿真面形进行平移量与面形重建误差计算。因随机噪声无规律性,单次运算结果不代表模型精度,因此对测量结果进行 50 次循环平均,被测面面形重建误差如图 4 所示。图中 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5$

服从均值为 0, 标准差分别为 2、4、6、8、10 nm 的高斯分布。

由图 4 可知:当平移量较小时,噪声对测量结果的干扰较大,即信噪比过低,导致面形重建精度较差;随着平移量增加,噪声得到有效抑制,面形重建误差减小;但随着平移量继续增大,面形重建误差又因差分逼

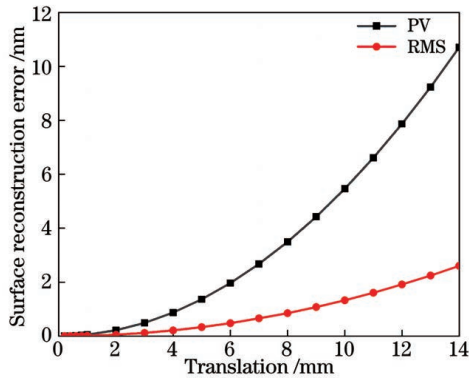


图 3 不同平移量下的重建面形误差图

Fig. 3 Reconstructed surface shape error diagram under different translation

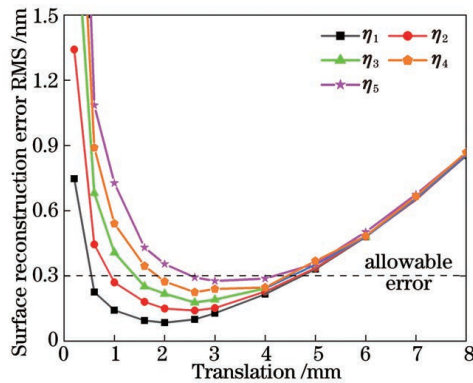


图 4 不同噪声下平移量与面形重建误差的关系图

Fig. 4 Relationship between translation and surface reconstruction error under different noise

近精度变差而增大。在被测镜精度为 $\lambda/20$ 且面形重建误差 RMS 值小于 0.3 nm 的要求下,各测量环境下对应的最佳平移区间如表 1 所示。由表 1 可知,随机噪声越大,最佳平移区间越窄。

表 1 不同随机噪声干扰下的最佳平移区间

Table 1 Optimal translation interval under interference with different random noise values

Random noise RMS /nm	Optimal translation interval /mm
$\eta_1 \sim N(0,2)$	0.6-4.8
$\eta_2 \sim N(0,4)$	1-4.8
$\eta_3 \sim N(0,6)$	1.4-4.6
$\eta_4 \sim N(0,8)$	1.8-4.4
$\eta_5 \sim N(0,10)$	2.6-4.2

3.3 初始面形分布对最佳平移量的影响

光学元件表面通常具有不同的形貌分布特征。为比较不同被测镜在进行绝对检测时平移量对面形重建误差的影响,采用 Zernike 多项式分别生成具有不同形貌分布特征的初始面形,如图 5 所示。其中 B_1 、 B_2 是面形误差 PV 值均为 $\lambda/20$ 但面形分布不同的 B 组被测面, C_1 、 C_2 是面形误差 PV 值均为 $\lambda/40$ 但面形分布不同的 C 组被测面。

当随机噪声服从均值 μ 为 0、标准差 σ 为 2 nm 的高斯分布时,各组被测面在不同平移量下经 50 次测量平均后的重建面形误差如图 6 所示。在面形重建误差

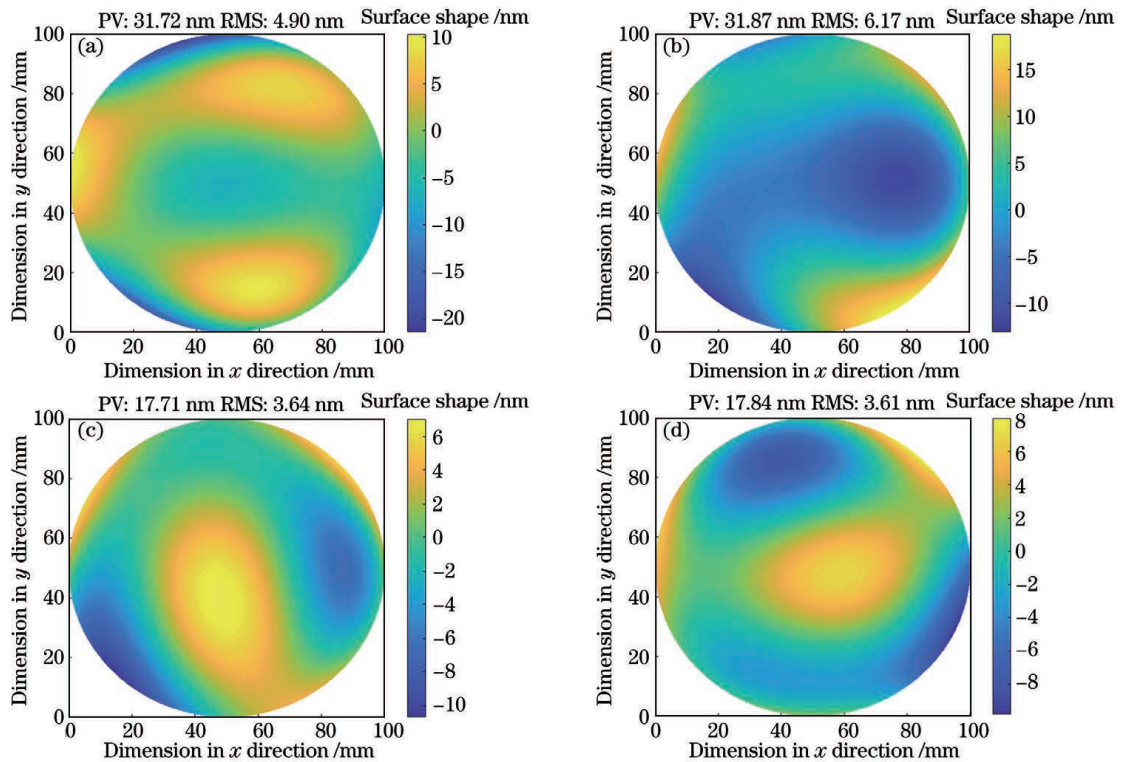


图 5 被测镜面形分布图。(a) B_1 面形; (b) B_2 面形; (c) C_1 面形; (d) C_2 面形

Fig. 5 Distributions of measured mirrors surface shape. (a) B_1 surface shape; (b) B_2 surface shape; (c) C_1 surface shape; (d) C_2 surface shape

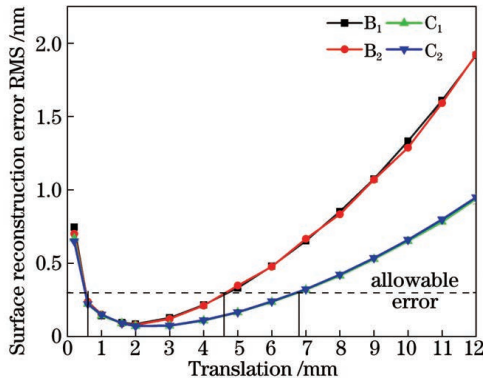


图 6 面形精度不同时平移量对测量误差的影响

Fig. 6 Influence of translation on measurement error when surface accuracy is different

表 2 不同面形误差被测镜对应的最佳平移区间

Table 2 The best translation interval corresponding to measured mirror with different surface shape errors

Surface shape error of measured surface (PV value)	$\lambda/20$	$\lambda/40$	$\lambda/60$	$\lambda/80$	$\lambda/100$
Optimal translation interval/mm	0.6~4.6	0.6~6.8	0.6~8.2	0.6~9.2	0.6~9.6

4 实验结果与讨论

4.1 随机噪声引起的面形偏差值估计

为了验证基于逆向平移量优化算法的有效性,选用 ZYGO-Verifire PE 菲索型移相干涉仪配合高精度

RMS 值小于 0.3 nm 的要求下,B 组被测面的最佳平移区间为 0.6~4.6 mm,C 组被测面的最佳平移区间为 0.6~6.8 mm。可见,在同一噪声影响下,被测面的面形精度越高,最佳平移区间越宽,初始面形分布不影响最佳的平移量取值范围。

在随机噪声 $\eta \sim N(0, 2)$ 、面形重建误差 RMS 值小于 0.3 nm 的要求下,不同面形误差的被测镜对应的最佳平移区间如表 2 所示。可以看出,被测面面形误差 PV 值为 $\lambda/20$ 的被测镜对应的最佳平移区间包含于 PV 值优于 $\lambda/20$ 的被测镜对应的最佳平移区间内。因此,0.6~4.6 mm 是被测面面形误差 PV 值优于 $\lambda/20$ 的 100 mm 口径平面光学元件的通用最佳平移区间。

位移台对平面光学元件进行面形测量。首先对被测面面形与随机噪声进行估计,被测镜选用 ZYGO 标准镜,其面形参数如图 7 所示,面形偏差的 PV 值为 0.028λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),即 17.72 nm,RMS 值为 0.006λ ,即 3.80 nm。

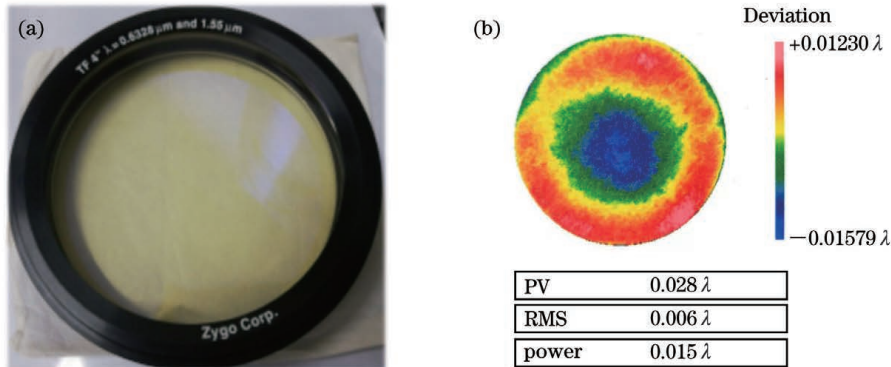


图 7 标准镜面形参数。(a)ZYGO 标准镜实物;(b)标准镜面形参数

Fig. 7 Standard mirror shape parameters. (a) ZYGO standard mirror; (b) standard mirror shape parameters

以连续两次测量结果的差值对由随机噪声引起的面形偏差 $\eta(x, y, t)$ 进行估计,图 8 为测量过程中气

流扰动、环境振动等因素引起的面形偏差。

进行 12 组重复性测量,由表 3 可知,噪声引起的面形偏差服从均值 μ 为 0、标准差 σ 为 2 nm 的随机分布。

表 3 随机噪声引起的面形偏差

Table 3 Surface shape deviation caused by random noise

Measurement group	Standard deviation /nm
1	1.92
2	2.10
3	2.28
4	2.53
5	2.01

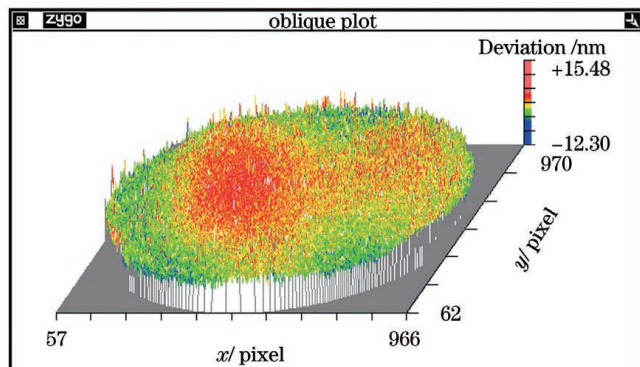


图 8 随机噪声引起的面形偏差图

Fig. 8 Surface shape deviation caused by random noise

(续表)

Measurement group	Standard deviation /nm
6	2.40
7	1.86
8	2.22
9	1.75
10	1.63
11	2.16
12	2.23
Average value	2.09

4.2 不同平移量下的面形绝对检测结果

在噪声服从均值 μ 为 0、标准差 σ 为 2 nm 的随机分布以及被测镜面形误差 PV 值为 $\lambda/40$ 的条件下,由图 6 可得最佳平移区间为 0.6~6.8 mm。以 2 mm 平移量为例,进行共轭平移差分面形绝对检测。图 9 所示为沿 x 方向和 y 方向平移后得到的干涉波面图。

对采集到的 4 组干涉波面进行同方向上的共轭差分,并基于差分 Zernike 算法对波面进行重建。考虑到有效通光孔径的影响,在测量及重建时去除边缘 5% 的测量数据。图 10(a) 为 2 mm 平移量下拟合后的被测面面形图,面形 PV 值为 26.49 nm, RMS 值为 5.99 nm。其他平移量下的面形测量结果如图 10(b)~(d) 所示。

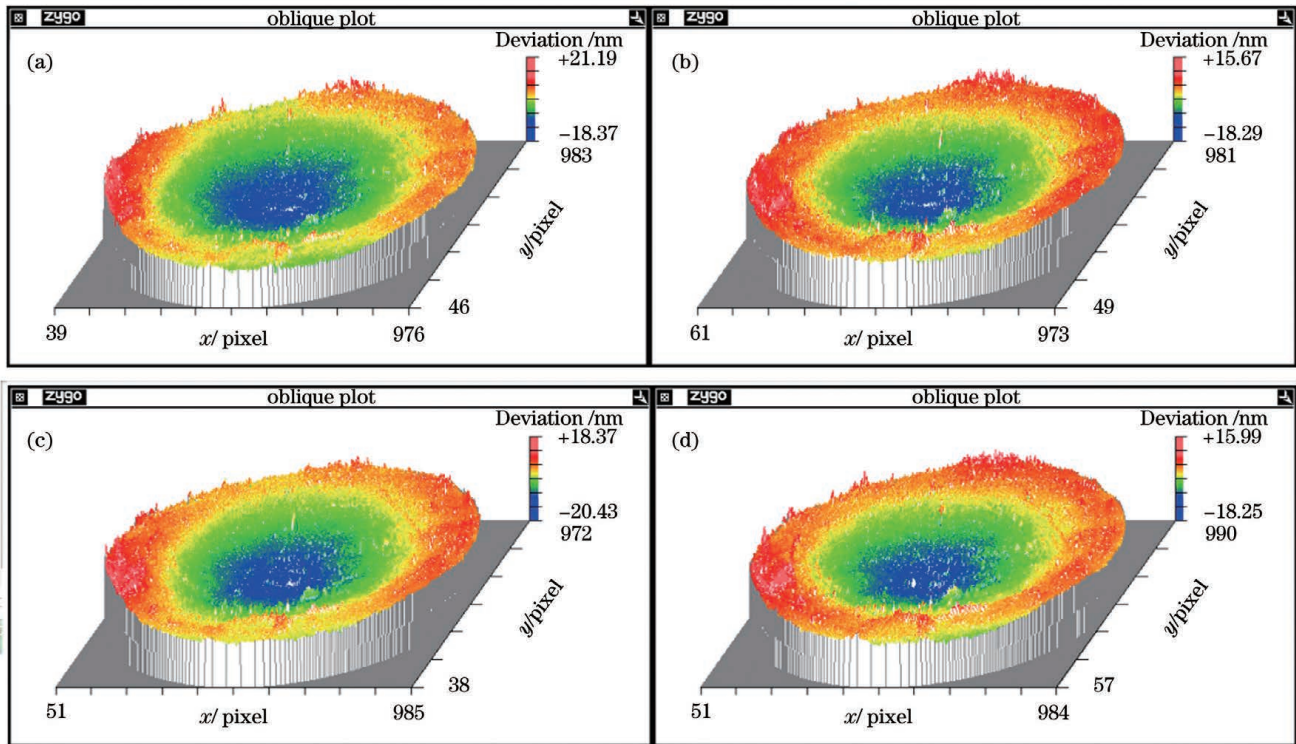


图 9 x 和 y 方向各平移 2 mm 后的干涉波面图。(a) $-x$ 方向;(b) $+x$ 方向;(c) $-y$ 方向;(d) $+y$ 方向

Fig. 9 Interference wavefront diagrams after 2 mm translation in x and y directions, respectively. (a) $-x$ direction; (b) $+x$ direction; (c) $-y$ direction; (d) $+y$ direction

4.3 实验结果分析

为了比较不同平移量下产生的面形重建误差,使用 Metro Pro 软件的三面互检功能进行对比实验。虽然三面互检法只能得到单一方向的轮廓线,但其不存在原理误差,是面形绝对检测对比分析的理想方法。图 11 为不同平移量下共轭平移差分法与三面互检法获得的轮廓线对比结果。

对图 11 进行分析后可知,不同平移量下共轭平移差分法与三面互检法得到的轮廓线基本一致,三面互检法得到的轮廓线数据包含了所有的频段信息,而共轭平移差分法重建出的是中低频形貌数据。两种方法得到的轮廓线相减之后的结果只包含高频数据的误差累积。表 4 为两方法求得的残余轮廓线的 PV_{20} 值和

RMS 值。

表 4 不同平移量下两方法的残余误差

Table 4 Residual error of two methods under different translation

Translation/mm	Residual contour error /nm	
	PV_{20}	RMS
0.2	12.07	2.25
2	7.84	1.19
6	8.29	1.36
10	10.78	2.26

由表 4 可知:在采用共轭平移差分法进行面形绝对检测时,平移量选取不当会严重影响面形测量结果,

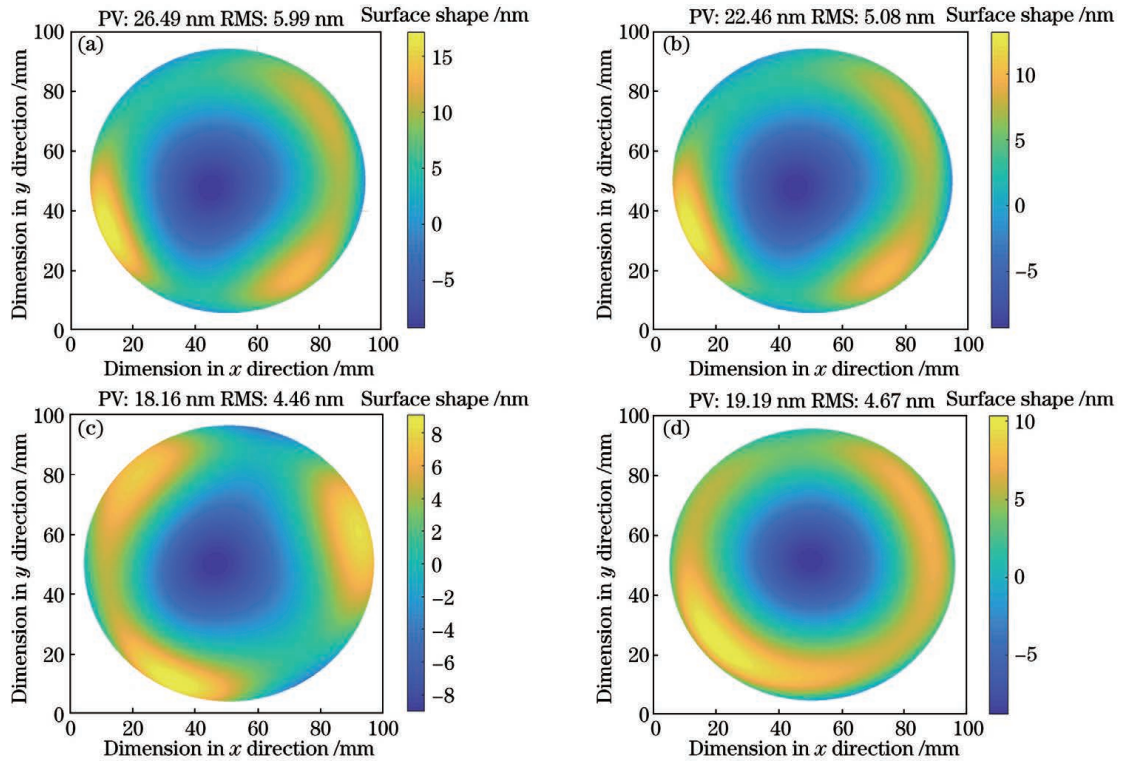


图 10 各平移量下被测面重建面形图。(a) $s=2$ mm;(b) $s=6$ mm;(c) $s=0.2$ mm;(d) $s=10$ mm

Fig. 10 Reconstructed surface shape of measured surface under each translation. (a) $s=2$ mm; (b) $s=6$ mm; (c) $s=0.2$ mm; (d) $s=10$ mm

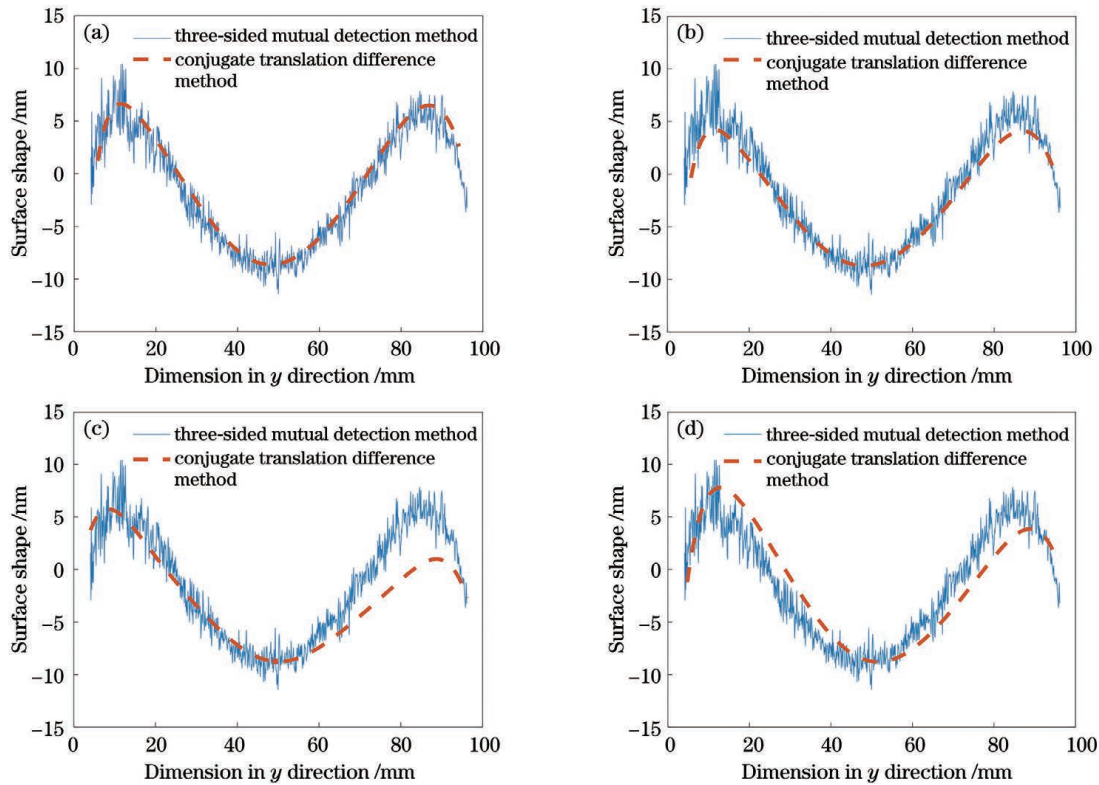


图 11 不同平移量下共轭平移差分法和三面互检法面形截面线实验结果对比。(a) $s=2$ mm;(b) $s=6$ mm;(c) $s=0.2$ mm;(d) $s=10$ mm

Fig. 11 Comparison of experimental section line between conjugate translation difference method and three-sided mutual detection method under different translation quantities. (a) $s=2$ mm; (b) $s=6$ mm; (c) $s=0.2$ mm; (d) $s=10$ mm

只有在最佳平移区间内获得的面形才能与三面互检结果吻合得较好;当平移量为 2 mm 时,两种方法得到的面形偏差的 PV_{20} 值为 7.84 nm, RMS 值为 1.19 nm,说明本文所提方法具有较高的测量精度。

5 结 论

根据精密光学检测行业对平面光学元件测量高效率、高精度的需求,本文在共轭平移差分面形绝对检测方法的基础上,提出了一种基于逆向优化策略的平移量选取方法。对不同噪声和初始面形精度条件下的平移量与面形重建误差进行仿真分析,结果表明:随机噪声越大,最佳平移区间越窄;最佳平移量与被测镜面形精度成正比。这为不同被测镜选取合适的平移量提供了理论指导。在此基础上,本团队进行了最佳平移区间的平面光学元件面形测量实验,并将所得数据与三面互检法所得数据进行对比,结果显示,两种方法的数据基本吻合,当平移量为 2 mm 时,面形偏差的 PV_{20} 值为 7.84 nm, RMS 值为 1.19 nm。对比结果验证了逆向平移量优化方法的有效性,该方法可进一步提高平面光学元件的面形测量精度。

参 考 文 献

- [1] Dörband B, Seitz G. Interferometric testing of optical surfaces at its current limit[J]. *Optik*, 2001, 112(9): 392-398.
- [2] 杨力. 现代光学制造工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009. Yang L. Modern optical manufacturing engineering [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] 侯溪, 张帅, 胡小川, 等. 超高精度面形干涉检测技术进展[J]. *光电工程*, 2020, 47(8): 18-30. Hou X, Zhang S, Hu X C, et al. The research progress of surface interferometric measurement with higher accuracy[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 18-30.
- [4] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1504001. Tan Y D, Xu X, Zhang S L. Precision measurement and applications of laser interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1504001.
- [5] Evans C J, Hocken R J, Estler W T. Self-calibration: reversal, redundancy, error separation, and 'absolute testing' [J]. *CIRP Annals*, 1996, 45(2): 617-634.
- [6] Zhu X L, Nie F M, Liu B C, et al. Multiposition rotation interference absolute measurement method for high-precision optical component surfaces[J]. *International Journal of Optics*, 2021, 2021: 6621939.
- [7] Yan L S, Li F Z, Wang X K, et al. Method for absolute measurement of flat surface[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(33): 10584-10590.
- [8] 徐晨, 陈磊. 光学平面绝对检验方法的研究[J]. *光学技术*, 2006, 32(5): 775-778. Xu C, Chen L. Absolute flatness measurement of optical surfaces[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 775-778.
- [9] Zhou Y, Liu S J, Lu Q, et al. *In situ* absolute surface metrology for a 600 mm aperture interferometer[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 129: 106054.
- [10] 张艳微, 苏东奇, 隋永新, 等. 基于旋转平均补偿算法的旋转非对称面形绝对检测[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0708007. Zhang Y W, Su D Q, Sui Y X, et al. Absolute testing of rotationally asymmetric surface deviation with the method of rotation-averaging and compensation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): 0708007.
- [11] 沈帆帆, 田爱玲, 王大森, 等. 旋转平移法平面绝对检测的偏心误差修正[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1912001. Shen F F, Tian A L, Wang D S, et al. Correction of eccentricity error in absolute flat surface testing by shift-rotation method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1912001.
- [12] Keenan P B. Pseudo-shear interferometry [J]. *Proceedings of SPIE*, 1983, 0429: 2-7.
- [13] Morin F, Bouillet S. Absolute interferometric measurement of flatness: application of different methods to test a 600 mm diameter reference flat [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6616: 66164G.
- [14] Bloemhof E E. Absolute surface metrology with a phase-shifting interferometer for incommensurate transverse spatial shifts[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(5): 792-797.
- [15] 蔡慧娟. 基于共轭差分法的光学平面面形绝对测量的关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 34-45. Cai H J. Study of key technologies of absolute measurement of optical plane shape based on conjugate difference method [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015: 34-45.
- [16] Huang Y, Ma J, Zhu R H, et al. Absolute measurement of optical flat surface shape based on the conjugate differential method[J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 29687-29697.
- [17] Gladysheva Y V, Zhivotovskii I V, Denisov D G, et al. A profile-recovery algorithm for a high-accuracy optical flat [J]. *Measurement Techniques*, 2016, 59(2): 142-148.
- [18] 张锐. 基于随机编码混合光栅横向剪切干涉的波前检测技术关键参数与应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 45-47. Zhang R. Research on key parameters and application of wavefront metrology based on the randomly encoded hybrid grating lateral shearing interferometry [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 45-47.
- [19] 李靓, 田爱玲, 王大森, 等. 基于多项式拟合背景光的随机两步相移算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 1112008. Li J, Tian A L, Wang D S, et al. A random two-step phase shift algorithm based on polynomial fitting background light [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1112008.
- [20] 王汝冬, 田伟, 王平, 等. 振动对面形测量误差的影响分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112001. Wang R D, Tian W, Wang P, et al. Analysis of vibration effect to surface figure measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112001.
- [21] 文刚, 苏东奇, 苏志德, 等. 基于数值模拟的高精度波长移相干涉仪随机误差分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1008003. Wen G, Su D Q, Su Z D, et al. Analysis of random errors in high precision wavelength phase shifting interferometers by numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(10): 1008003.
- [22] 卢文倩, 李建欣, 段明亮, 等. 基于倾斜相位的抗振动干涉面形测量[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0212005. Lu W Q, Li J X, Duan M L, et al. Anti-vibration interferometric shape measurement based on tilt phase [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0212005.

Translation of Surface Shape Absolute Testing Based on Reverse Optimization Strategy

Zhang Mengyao¹, Tian Ailing^{1*}, Wang Dasen², Zhu Xueliang¹, Liu Bingcai¹, Wang Hongjun¹

¹ Shaanxi Province Key Laboratory of Membrane Technology and Optical Test, School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;

² Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Sciences, Ningbo 310022, Zhejiang, China

Abstract

Objective The processing precision of optical elements is increasing as current optical technology advances, as does the requirement for detection accuracy. To improve the surface shape measurement accuracy of interferometry, it is necessary to remove the influence of systematic errors including reference surface errors in the test process and obtain the absolute surface shape of the surface to be evaluated, which is the absolute testing technology of optical surface shape. The three-sided mutual detection technique, translation rotation method, and conjugate translation difference method are now the most regularly used absolute testing methods for the surface shape of planar optical components. The conjugate translation difference method is widely employed in absolute testing technology because of its short assessment cycle and no need for repeated adjustment. Translation, as a critical parameter in the conjugate translation difference approach, has a direct impact on the accuracy of surface form recognition. The traditional translation value is generally given by experience or the space size corresponding to a pixel of the detector, resulting in the measurement accuracy not reaching the optimal. In this research, the translation selection functions are the difference approximation accuracy and signal-to-noise ratio. We anticipate that the proposed approach may precisely measure the surface shape of planar optical components and enhance the scientificity and credibility of interferometry.

Methods In this research, Gaussian white noise was added to the calculation of the absolute testing principle of conjugate translation difference surface shape to simulate the random noise introduced by environmental factors or CCD detector electronic noise in the actual measurement process. First, the error model of translation and surface reconstruction under noise was constructed by examining the accuracy and signal-to-noise ratio of differential approximation; subsequently, taking the estimated surface shape of the evaluated surface and the surface shape deviation caused by random noise as a single variable, the optimal translation interval under the allowable error of surface reconstruction was solved by utilizing the differential Zernike algorithm, and the influence of the size of random noise and the distribution of the original measured surface on the optimal translation interval was simulated and analyzed; Finally, the commercial interferometer was utilized to perform four sets of surface absolute testing experiments on the standard mirror at various translation. The measurement results were compared with the traditional three-sided mutual detection method to assess the surface measurement correctness before and after the optimization of translation.

Results and Discussions The value of translation affects the accuracy of the differential approximation and the signal-to-noise ratio of the interferogram and then affects the final surface reconstruction result. According to the research on the surface shape measurement error induced by translation, under ideal conditions, the translation is precisely proportional to the surface shape measurement error. The larger the translation is, the larger is the surface shape measurement error (Fig. 3); in the situation of random noise interference, the ideal translation interval varies depending on the measuring environment. The larger the surface shape deviation caused by random noise, the narrower the optimal translation interval (Table 1). According to the research on the optimal translation of the original surface distribution, the broader the best translation interval is under the impact of the same noise, the greater the accuracy of the measured surface is; The surface shape distribution does not affect the value range of the optimal translation (Fig. 6). The comparison results of the conjugate translation difference method's surface profile and the three-sided mutual inspection method's surface profile under different translation show that only the surface shape results obtained under the optimal translation interval are consistent with the three-sided mutual inspection results, and the RMS value of the two surface shape deviation is 1.19 nm (Table 3).

Conclusions Based on the inverse optimization strategy, taking the differential approximation accuracy and signal-to-noise ratio as the selected functions of the translation, we establish the translation and surface reconstruction error model under noise conditions, and study the translation and surface reconstruction error under different noise levels and initial surface error, providing theoretical guidance for selecting the appropriate translation for the tested 100 mm diameter mirror. The simulation of surface shape error under different translation shows that when the translation is small, the

noise has great interference on the measurement results, that is, the signal-to-noise ratio is too low, resulting in poor surface shape reconstruction accuracy; as translation grows, the noise is efficiently suppressed, and the surface reconstruction error decreases; nevertheless, as translation increases, the surface reconstruction error increases due to the low precision of differential approximation. After the translation is optimized and determined by the random noise, initial surface shape accuracy and measurement allowable error in the actual measurement, the conjugate translation difference surface shape absolute testing technology has higher accuracy and the measurement accuracy deviation is 1.19 nm. The results of the experiments reveal that the inverse translation optimization approach improves the surface shape measurement accuracy of planar optical components. The study content fits the needs of the precision optical testing industry for fast measurement cycles and high optical element measurement accuracy.

Key words measurement; absolute testing; conjugate translation difference; interferometry; Zernike wavefront reconstruction