

文章编号 1004-924X(2013)03-0652-12

## 中频波面的旋转平移法干涉绝对检验

袁 群, 高志山\*, 张聪阳, 成金龙, 朱 波

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**基于 Zernike 多项式拟合的传统干涉绝对检验方法由于平滑了波面和丢失了中频成分,仅可以实现面形误差的绝对检验。本文提出利用旋转平移法来实现中频波面的干涉绝对检验。将被测波面分解成旋转对称成分和旋转非对称成分,通过  $N$  次旋转被测件,求解波面中的旋转非对称成分;通过平移被测件实现伪剪切,求解波面中的旋转对称成分。与传统绝对检验方法相比,该方法既能够恢复整个波面,又不需要对整个波面进行 Zernike 多项式拟合;由于仅对旋转对称成分用偶次多项式进行提取,提升了计算速度,降低了拟合误差,保留了中频成分,数值仿真显示其比传统方法优越,测量精度可达到 1 nm rms。在 ZYGO 干涉仪上完成了平面元件的干涉绝对检验测量。采用改变伪剪切比和更换标准镜两种方案,分别实现了实验数据的自比对;将测试结果与经典三面互检法得到的水平和垂直方向的一维轮廓数据进行对比,验证了旋转平移法的准确性。

**关键词:**干涉术;绝对检验;波纹度;旋转;平移

**中图分类号:**O436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132103.0652

## Absolute interferometric testing of mid-spatial frequency wavefront by rotation and displacement technique

YUAN Qun, GAO Zhi-shan\*, ZHANG Cong-yang, CHENG Jin-long, ZHU Bo

(*Institute of Electrical Engineering & Photoelectric Technology,  
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: zhishgao@mail.njust.edu.cn*

**Abstract:** Traditional absolute interferometric testing methods are all based on Zernike's polynomial fitting of tested wavefront, where the wavefront is smoothed and the mid-frequency element is lost, so they can only get the real figure of test optics. This paper adopts the rotation and displacement technique to the absolute interferometric testing of mid-frequency wavefront. The real wavefront of the test optic is separated into a rotationally symmetric component and a rotationally asymmetric component. The rotationally asymmetric component is determined by rotating the test optics for  $N$  times, while the rotationally symmetric component is determined by the pseudo shearing data through displacing the test optics. As compared with traditional absolute interferometric testing methods, there is no need to fit the wavefront of test optics with Zernike's polynomials and can preserve whole wavefront with the proposed method. Because the rotationally symmetric component is retrieved using the even polynomials, the computation speed is enhanced and the fitting error is reduced with the mid-frequency element retained. The numerical simulation shows that the proposed method has much superi-

收稿日期:2012-11-05;修订日期:2012-12-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60977008);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20103219110014);中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室基金资助项目(No. 2008DP173445)

ority than the traditional method and can achieve the nanometer accuracy. An experimental measurement for a flat surface is carried on with a ZYGO interferometer. The self-comparison of the experimental data is implemented by changing the pseudo shearing ratio and substituting the standard lens and the experimental data is also compared with the horizontal and vertical profiles derived from three-flat testing. Obtained results prove the accuracy of the rotation and displacement technique.

**Key words:** interferometry; absolute testing; waviness; rotation; displacement

## 1 引言

光刻系统、惯性约束核聚变等系统对光学元件波面误差的检测提出了很高的要求。如美国国家点火装置(NIF)要求准确获取光学元件表面轮廓的高、中、低各频率误差成分;而极紫外光刻投影系统要求元件的波面误差测量准确度达到纳米甚至亚纳米级,同时期望准确反映各频段的波面误差信息。干涉测量可用来评价光学元件的表面质量,口径为数十毫米以上的干涉波面分布主要是光学表面的中频(波纹度)和低频(面形)信息<sup>[1-2]</sup>。传统的光学干涉测量受限于参考面的精度,一般的商用干涉仪标准镜精度为 $\lambda/20$  PV,若要获得更高的测量精度,只能通过绝对检验的方法消除参考面误差的影响来获得被测件的表面误差真值。

Schulz 和 Schwider<sup>[3-4]</sup>在1967年最早提出了三面互检法,求解直径方向上的一维轮廓分布,但若获取多个直径方向上的轮廓分布,需增加较多次的旋转测量。Fritz<sup>[5]</sup>在此基础上利用 Zernike 多项式函数形式的旋转不变性,使用3块平晶通过4次测量求解得到整个波面的拟合数据。Ai 和 Wyant<sup>[6]</sup>在1992年提出了奇偶函数法,通过6次测量求解表面绝对误差。2001年,Freishclad<sup>[7]</sup>提出了旋转剪切法,利用傅里叶变换处理剪切波面来复原表面绝对误差。徐晨等<sup>[8]</sup>采用两平晶法完成三面互检,但需事先测量被测平晶的折射率均匀性。现有的基于经典三面互检法<sup>[1-2]</sup>衍生出的能够恢复出整个波面数据的绝对检验方法<sup>[5-10]</sup>都是基于 Zernike 多项式拟合,平滑了波面,丢失了中频信息。而即便采用81项 Zernike 多项式<sup>[11]</sup>也无法精确地表征光学表面误差分布,实现波纹度误差的准确测量,不能满足纳米级高精度的波面误差测量要求。经典三面互检法虽未对波面进行 Zernike 多项式拟合,能够获取面形和波纹度误差分布,但仅能求解直径方向上的一维轮廓。2002年日本 Nikon 公司<sup>[12-13]</sup>采

用旋转平移法在点衍射干涉仪上实现了球面元件的绝对检验,标定了干涉仪系统误差,测量准确度达到0.17 nm rms。2011年宋伟红等<sup>[14]</sup>对旋转平移法的球面测量进行了数值仿真分析,但被测件原始波面数据还是以 Zernike 多项式表征的。本文以平面元件为检测实例,用旋转平移法实现了中频波面的干涉绝对检验。以干涉仪实测结果为原始波面,通过数值仿真比对了旋转平移法与 Fritz<sup>[5]</sup>所提的 Zernike 多项式法的波面复原误差,分析了旋转平移法的绝对检验精度;构建了简易十字叉丝线机构辅助旋转调整,在 ZYGO 干涉仪上完成了基于旋转平移法的平面干涉绝对检验实验研究。

## 2 旋转平移法

### 2.1 算法原理

干涉测量得到的测试结果由系统误差和被测波面组成。对于具有参考面的干涉测量,系统误差主要是指参考面的波面误差。 $W(x, y), V(x, y), T(x, y)$ 分别表示被测波面,系统误差和干涉测试结果,其中 $(x, y)$ 表示探测器靶面上的坐标分布,则:

$$T(x, y) = W(x, y) + V(x, y). \quad (1)$$

将被测波面 $W(x, y)$ 分解成旋转对称成分 $W^s(x, y)$ 和旋转非对称成分 $W^{as}(x, y)$ :

$$W(x, y) = W^s(x, y) + W^{as}(x, y). \quad (2)$$

为了将被测波面 $W(x, y)$ 从干涉测试结果 $T(x, y)$ 中分离出来,首先通过旋转法求解被测波面中的旋转非对称成分 $W^{as}(x, y)$ <sup>[12-13]</sup>。将被测件进行 $N$ 次旋转,每次旋转角度为:

$$\varphi_n = 360^\circ \times (n-1)/N, (n = 1, 2, \dots, N). \quad (3)$$

以4次旋转测试求解平面元件波面误差为例,4次旋转的角度分别为 $0, 90, 180$ 和 $270^\circ$ ,

$$T_\varphi(x, y) = W_\varphi(x, y) + V(x, y) \\ (\varphi = 0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ). \quad (4)$$

4次旋转测试的平均数据结果中包含被测波

面中的旋转对称成分  $W^s(x, y)$

$$\overline{T(x, y)} =$$

$$\frac{T_{0^\circ}(x, y) + T_{90^\circ}(x, y) + T_{180^\circ}(x, y) + T_{270^\circ}(x, y)}{4} =$$

$$W^s(x, y) + W^{4k\theta}(x, y) + V(x, y), \quad (5)$$

式中:  $W^{4k\theta}(x, y)$  表示被测波面中的  $90^\circ$  旋转对称成分,  $(k=1, 2, \dots)$ 。

用式(4)减去式(5), 即用单次测量的结果减去平均数据结果, 则:

$$T_\varphi(x, y) - \overline{T(x, y)} = W_\varphi^{as}(x, y) - W_\varphi^{4k\theta}(x, y). \quad (6)$$

如果被测波面中  $90^\circ$  旋转对称成分  $W^{4k\theta}(x, y)$  足够小, 就可以得到被测波面中的旋转非对称成分  $W^{as}(x, y)$ 。对于加工到较高精度的平面或球面元件, 其波面误差中的  $4k\theta$  项相对于整个波面误差可以忽略。文中所述, 4 次旋转已可达到纳米级(rms)的测量精度(见 3.2 节)。若要进一步提高测量精度, 可以增加旋转的次数  $N$ , 如采用 6 次旋转, 这样虽然增加了测量的次数, 但是使得残余误差是波面误差中的更高阶项, 其所占比例更小。

第二步是通过平移求解被测波面中的旋转对称成分  $W^s(x, y)$ <sup>[12-13]</sup>。假设被测平面沿  $x$  方向平移, 平移量为  $t$ ,  $W_\varphi(x-t, y)$ ,  $T_{\varphi,t}(x, y)$  分别表示旋转和平移以后的被测波面和干涉测试结果。

$$T_{\varphi,t}(x, y) = W_\varphi(x-t, y) + V(x, y). \quad (7)$$

通过将某角度下平移前后的两次测量结果  $T_\varphi(x, y)$  和  $T_{\varphi,t}(x, y)$  相减, 即可消去系统误差  $V(x, y)$ , 并得到被测波面中旋转对称项的有限差分方程:

$$T_\varphi(x, y) - T_{\varphi,t}(x, y) = W_\varphi(x, y) - W_\varphi(x-t, y) = W^s(x, y) - W^s(x-t, y) + W^{as}(x, y) - W^{as}(x-t, y). \quad (8)$$

等式左边的 2 项为测试结果, 等式右边的后 2 项可根据式(6)求得。被测波面中的旋转对称

成分  $W^s(x, y)$  可以由旋转对称的多项式表征:

$$W^s(x, y) = c_0 + c_1\rho^2 + c_2\rho^4 + c_3\rho^6 + \dots + c_m\rho^{2m} + \dots, \quad (9)$$

式中:  $\rho^2 = x^2 + y^2$ ,  $c_m$  为各项系数。与用 Zernike 多项式对整个波面进行拟合相比, 该多项式仅对旋转对称成分进行拟合, 大大降低了拟合误差, 保留了中频成分, 并且计算量远小于 Zernike 多项式的拟合方法(见 3.1 节)。结合式(8)和(9), 旋转对称项的系数  $c_m$  可以通过最小二乘拟合从有限差分方程求解得到。

在求解得到旋转非对称成分  $W^{as}(x, y)$  和旋转对称成分  $W^s(x, y)$  以后, 可获取被测波面的绝对分布  $W(x, y)$ , 根据式(1), 即可从测试结果  $T(x, y)$  中分离出系统误差  $V(x, y)$ 。

## 2.2 测试流程

上文所述旋转平移法实现干涉绝对检验虽以平面元件测试为例, 但该方法对平面元件和球面元件的干涉绝对检验具有通用性。不同的是旋转平移法检测平面元件时的平移是沿水平方向, 而检测球面时是沿弧向<sup>[12-13]</sup>。以斐索干涉仪测量平面元件描述基于旋转平移法的干涉绝对检验的测试流程。

图 1 所示为斐索干涉仪测量平面时的绝对检验示意图。保持标准镜 TF 不动, 4 次旋转测量为被测平面 RF 绕其中心轴分别旋转  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  和  $270^\circ$ , 1 次平移测量为被测平面 RF 沿  $x$  轴方向平移  $t$ 。被测平面 RF 在  $0^\circ$  位置平移前后的 2 组数据形成伪剪切, 如图 2 所示。实线圆域内的数据为  $0^\circ$  位置被测平面 RF 全口径内的测试数据  $T_0$ ; 被测平面 RF 平移  $t$  以后, 干涉仪只能测量部分口径内的波面数据, 而干涉仪给出的数据结果一般为圆域, 所以阴影部分为平移后的测试数据  $T_{0,t}$ , 即阴影部分表示伪剪切区域。

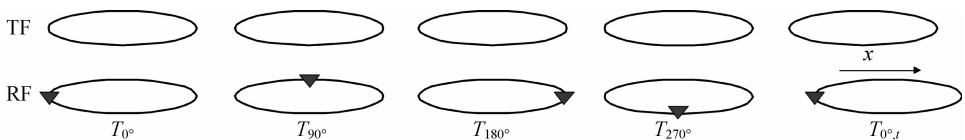


图 1 旋转平移法实现平面干涉绝对检验的流程

Fig. 1 Scheme for interferometric absolute testing of flat surface with rotation and displacement technique

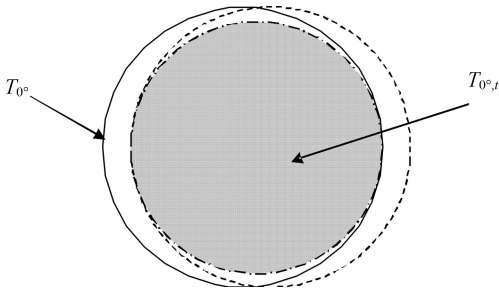


图 2 平面干涉绝对检验的伪剪切区域

Fig. 2 Pseudo shearing area for interferometric absolute testing of flat surface

### 3 算法原理误差数值仿真

为了比对旋转平移法相对于基于 Zernike 多项式拟合的绝对检验算法的优越性,求解旋转平移法的绝对检验精度,从波面拟合和绝对检验两个方面出发,采用 ZYGO 干涉仪实测的 3 组波面作为原始数据进行数值仿真。分析了旋转平移法中两种算法原理性误差和对旋转对称波面采用偶次多项式拟合的拟合误差的大小,并以旋转平移法和 Fritz<sup>[5]</sup>所提的 Zernike 多项式法为例,比对各自的绝对检验求解波面的复原误差,其流程如图 3 所示。

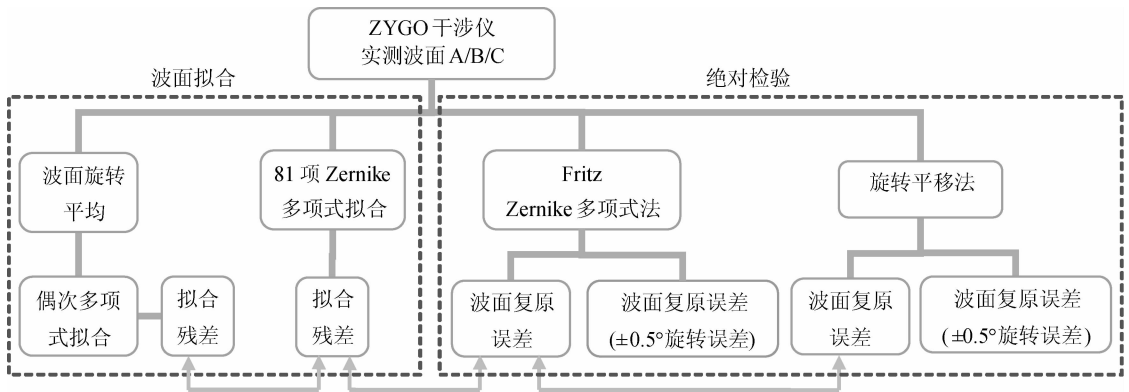


图 3 干涉波面数据的数值模拟与分析流程

Fig. 3 Process of numerical simulation and analysis for interferometric wavefront data

#### 3.1 波面拟合误差

旋转平移法与传统绝对检验方法相比的一个显著优点是在能够复原整个波面误差的同时,不需要对整个波面进行 Zernike 多项式拟合,而只是对波面中的旋转对称成分用偶次多项式拟合。为了分析旋转平移法的优越性,对波面直接进行了处理,用 Zernike 多项式对整个波面和高阶偶次多项式对波面中的旋转对称成分进行拟合,求解了拟合误差。

##### 3.1.1 81 项 Zernike 多项式拟合误差

表 1 所示为用 81 项 Zernike 多项式直接对整个波面进行拟合的结果,图示波面分布颜色对应 colorbar 刻度中的表征数值。第一行中作为原始数据的 ZYGO 干涉仪实测的 3 组波面 PV 值均优于  $\lambda/20$ , rms 值均优于  $\lambda/100$ 。波面 A 中的中频成分较多,波面 B 和 C 较平滑,且波面 A 的 rms 值最小,波面 C 的 rms 值最大。第二行为用 81 项 Zernike 多项式对上述 3 个波面进行拟合后获得的波面分布,波面分布较平滑。第三行为波面的拟合

误差,波面 A 的拟合残差最大,波面 C 的拟合残差最小。由拟合结果可见,即便采用了高阶的 81 项 Zernike 多项式,也不能完整地表示波面分布,仅能获取波面中的低频面形,而丢失了中频波纹度信息,且拟合残差的大小与波面中的中频成分所占比例有关。

##### 3.1.2 旋转平移法中旋转对称成分拟合误差

旋转平移法复原波面时,旋转非对称成分如式(6)所示,可通过简单的加减运算获取,而旋转对称成分如式(9)所示,需通过高阶偶次多项式拟合求解。因此,偶次多项式的拟合误差是旋转平移法的算法原理误差之一。为了分析该拟合误差的量级,首先需分离出原始波面 A/B/C 中的旋转对称成分,如式(5)所示,通过对波面的  $N$  次旋转平均,可获得波面中的旋转对称成分和  $Nk\theta$  项。为了去除  $Nk\theta$  项的影响,对原始波面 A/B/C 进行了 360 次旋转,每次间隔  $1^\circ$ 。由于波面数据分辨率只有  $200 \times 200$ , 360 次旋转平均可以使  $Nk\theta$  项小到可以忽略不计,从而获取了旋转对称成分。对旋转对称成分用

最高 38 阶,共 20 项偶次多项式拟合,表 2 中列出了偶次多项式拟合旋转对称成分的误差。

比较表 1 和表 2,用偶次多项式拟合波面中旋转对称成分的拟合残差仅为用 81 项 Zernike 多项式拟合整个波面的拟合残差的 1/5 左右,最大的拟

合残差仅为 0.3 nm rms ( $0.00047\lambda$ )。此外,Zernike 多项式法绝对检验需要对 4 个波面进行 Zernike 多项式拟合,而旋转平移法仅需对 1 个波面用 20 项偶次多项式进行拟合,所以旋转平移法的计算速度远快于传统绝对检验算法。

表 1 81 项 Zernike 多项式拟合被测波面

Tab. 1 Fitting of wavefronts of test optics with Zernike polynomials with 81 terms

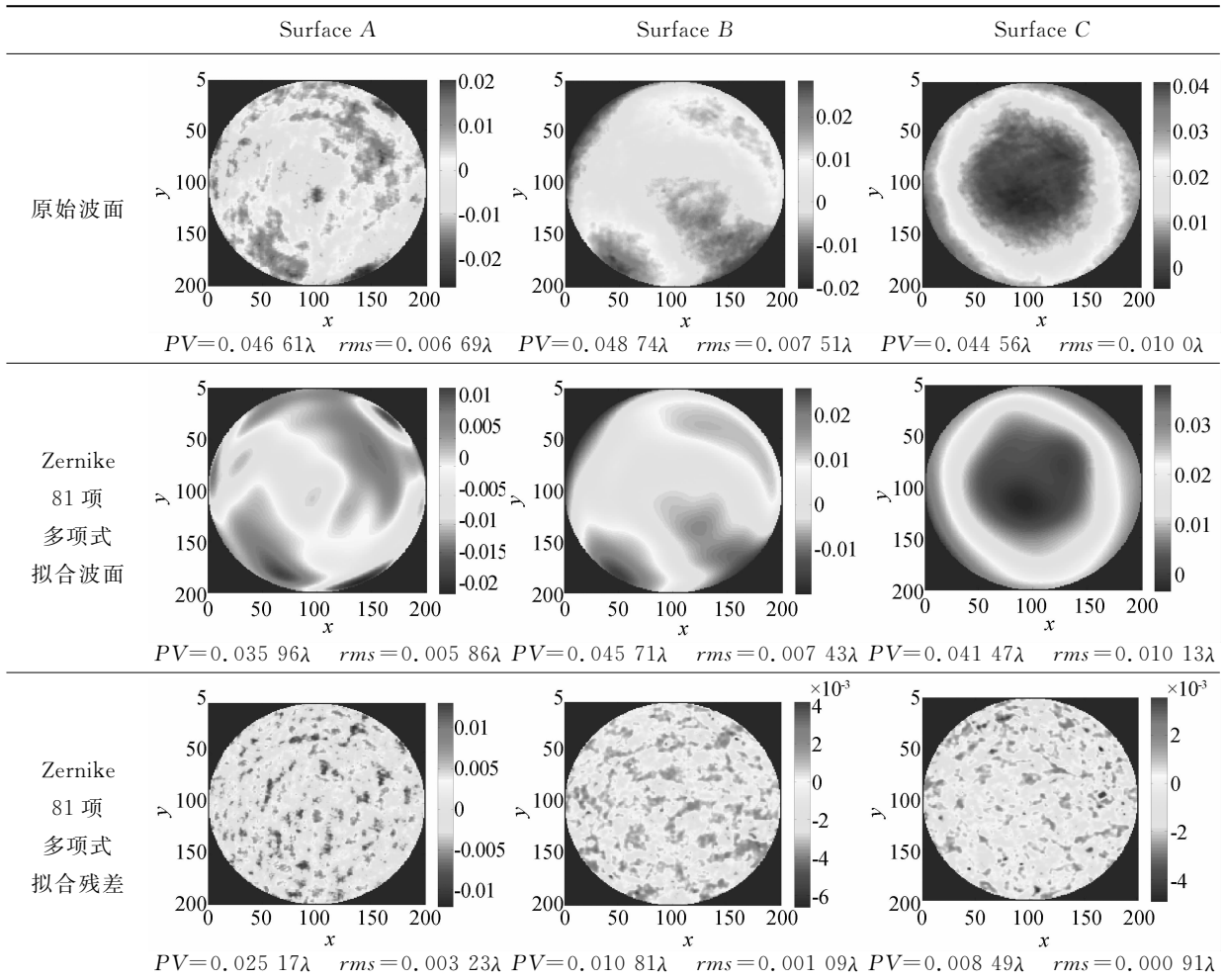
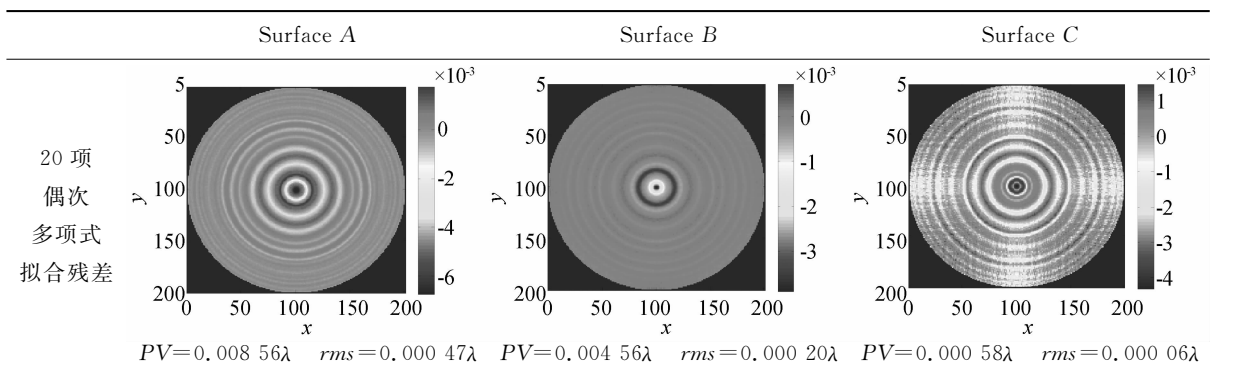


表 2 偶次多项式拟合旋转对称成分的误差

Tab. 2 Fitting errors of symmetric components of wavefronts with even polynomials



### 3.2 绝对检验仿真

以表 1 中所示 3 组波面 A、B、C 为原始数据,分别采用旋转平移法(采用 4 次旋转)和 Fritz 提出的 Zernike 多项式法两种绝对检验算法复原波面,求解复原波面分布和复原误差分布。仿真过程中以理想干涉测量条件为基准,即不引入如移相误差、探测器非线性响应、环境振动、温度变化等可能影响干涉测试准确度的因素,仅引入了旋转过程中的旋转角度误差,分析其带来的影响。

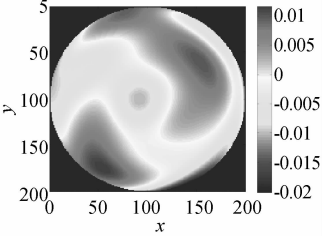
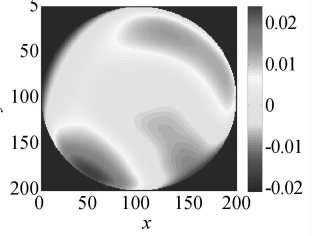
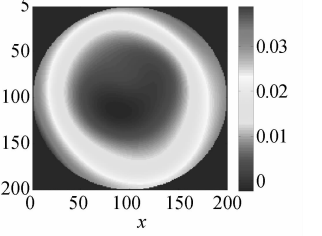
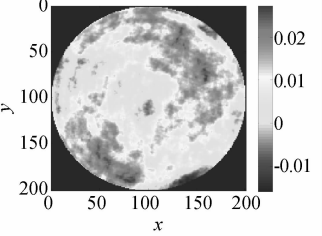
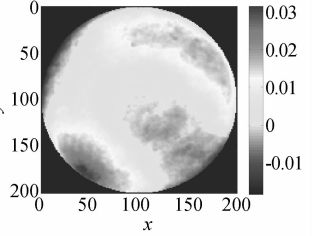
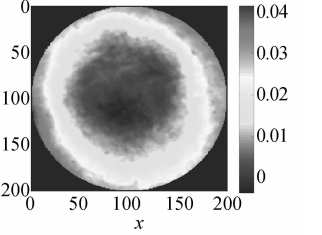
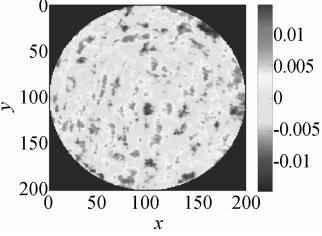
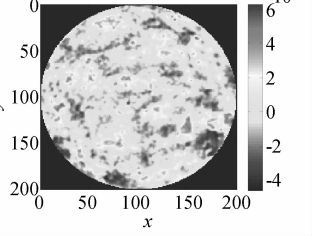
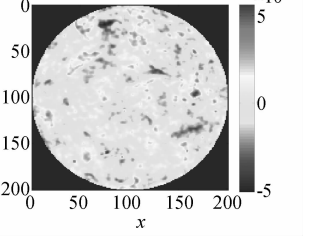
表 3 所示的仿真结果中,Zernike 多项式法求解得到的波面较平滑,仅得到原始波面中的面形分布,求解误差中主要是中频成分。比较表 1 和表 3 的结果,Zernike 多项式法绝对检验求解的波面与采用 Zernike 81 项多项式直接对原始波面拟合得

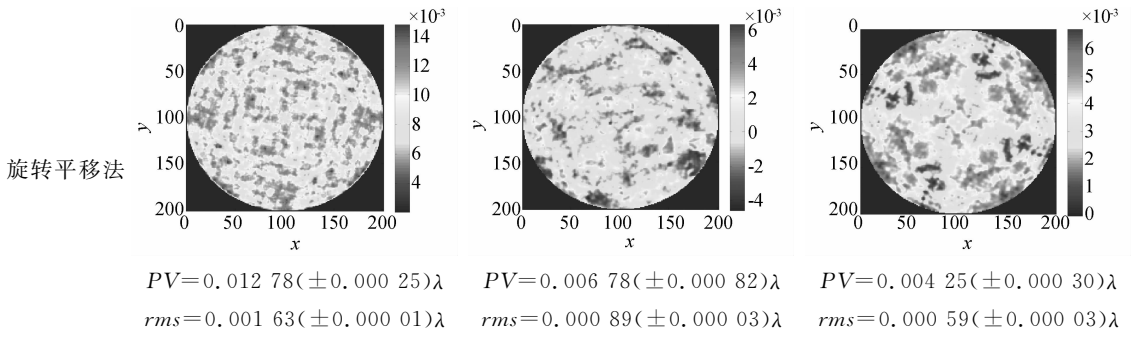
到的结果基本一致,但求解误差略大于拟合残差,这是因为在实现绝对检验过程中对于被测波面进行旋转处理后再次拟合时引入了误差。

旋转平移法求解得到的波面中很好地保留了中频波面成分,其原因是波面中旋转非对称成分仅通过加减运算获取并完全保留,而旋转对称成分通过偶次多项式拟合求解的拟合误差较小。旋转平移法求解误差中包含了对旋转对称成分的拟合残差和  $4k\theta$  成分。求解误差中主要能观察到的是  $4k\theta$  形式,这也是旋转平移法绝对检验的另一种算法原理性误差。表 2 中偶次多项式拟合残差仅为表 3 中旋转平移法求解误差的 1/4 甚至更小,因此可认为  $4k\theta$  成分是旋转平移法绝对检验的主要误差源。

表 3 干涉绝对检验复原被测波面

Tab. 3 Retrieval of wavefronts of test optics using absolute interferometric testing

	Surface A	Surface B	Surface C
Fritz Zernike 多项式法			
	$PV=0.031\ 56(\pm 0.000\ 05)\lambda$ $rms=0.005\ 47(\pm 0.000\ 03)\lambda$	$PV=0.045\ 04(\pm 0.000\ 10)\lambda$ $rms=0.007\ 38(\pm 0.000\ 01)\lambda$	$PV=0.041\ 02(\pm 0.000\ 20)\lambda$ $rms=0.010\ 12(\pm 0.000\ 01)\lambda$
波面 复原 结果			
	$PV=0.043\ 50(\pm 0.000\ 45)\lambda$ $rms=0.006\ 52(\pm 0.000\ 01)\lambda$	$PV=0.049\ 15(\pm 0.000\ 73)\lambda$ $rms=0.007\ 42(\pm 0.000\ 01)\lambda$	$PV=0.044\ 88(\pm 0.000\ 10)\lambda$ $rms=0.010\ 06(\pm 0.000\ 01)\lambda$
波面 复原 误差			
	$PV=0.028\ 81(\pm 0.000\ 11)\lambda$ $rms=0.003\ 81(\pm 0.000\ 00)\lambda$	$PV=0.010\ 72(\pm 0.000\ 11)\lambda$ $rms=0.001\ 36(\pm 0.000\ 01)\lambda$	$PV=0.010\ 74(\pm 0.000\ 08)\lambda$ $rms=0.001\ 09(\pm 0.000\ 01)\lambda$



比对两种绝对检验方法的求解误差,对于波面 A,即便其中  $4k\theta$  成分相对较大使得旋转平移法求解的波面误差较大,但也仅为 Zernike 多项式法求解误差的 1/2。旋转平移法对 3 组波面 rms 值优于  $\lambda/100$  的被测件恢复误差优于 rms 值 1 nm (3 组中最大值 0.001 5 $\lambda$ )。若检测波面质量更好的被测件,由于其波面误差中  $4k\theta$  成分更小,所以旋转平移法的检测精度将得到进一步提高。表 3 数据结果中括号内的数值表示的是在引入  $\pm 0.5^\circ$  旋转误差时复原波面值或求解误差值的最大变化量,其中 rms 值变化量均小于 0.03 nm (0.000 05 $\lambda$ ),可以忽略不计。

### 3.3 数值模拟总结

结合波面拟合和绝对检验的仿真结果可得到如下结论:(1)旋转平移法绝对检验能够获得面形和波纹度分布;(2)Fritz 所提 Zernike 多项式法绝对检验的误差主要源于拟合波面的误差,只能获得面形分布;(3)旋转平移法求解误差小于 Zernike 多项式法求解误差;(4)旋转平移法的误差主要源于波面中的  $4k\theta$  成分,偶次多项式拟合波面旋转对称成分的拟合残差较小;(5)旋转角度误差对绝对检验方法的影响可以忽略;(6)旋转平移法绝对检验精度可达 1 nm rms 量级。

## 4 实验及分析

### 4.1 辅助对准

在工作波长  $\lambda$  为 632.8 nm,测量重复性优于 0.000 5 $\lambda$  rms 的 ZYGO GPI-XP 干涉仪上进行平面旋转平移法干涉绝对检验实验研究,采用 3 块口径为 100 mm、表面质量 PV 值优于  $\lambda/10$  的平晶作为标准镜或被测件。旋转机构的旋转误差小于  $\pm 0.5^\circ$ ,平移导轨的平移误差小于 0.2 mm。CCD 对

被测件的采集分辨率为 0.48 (mm/pixel),导轨的平移误差可保证被测件的定位偏差在 1 个像素以内。实验室温度 20  $^\circ\text{C}$ ,恒温 48 h,干涉仪放置在气浮隔振平台上。干涉测量时尽可能缩短干涉腔长,并对干涉腔加罩子以减小气流扰动影响,并选择在夜间进行试验测量。

为了保证干涉系统的光轴中心与被测平面 RF 的旋转轴中心匹配,消除旋转偏心误差,测试中采用简易的十字叉丝机构辅助调整,其原理如图 4(a)所示。首先将十字叉丝标志装套在标准镜 TF 和被测平面 RF 上,其机构如图 4(b)所示。标准镜 TF 上的十字叉丝中心仅作为被测件的旋转中心轴的定位基准,无需将其调整到与标准镜 TF 几何中心严格重合。调整被测平面 RF 的方位,使其在 0, 90, 180 和 270 $^\circ$  4 个位置旋转时,不调整俯仰与倾斜即可满足干涉图上条纹仅为 0~2

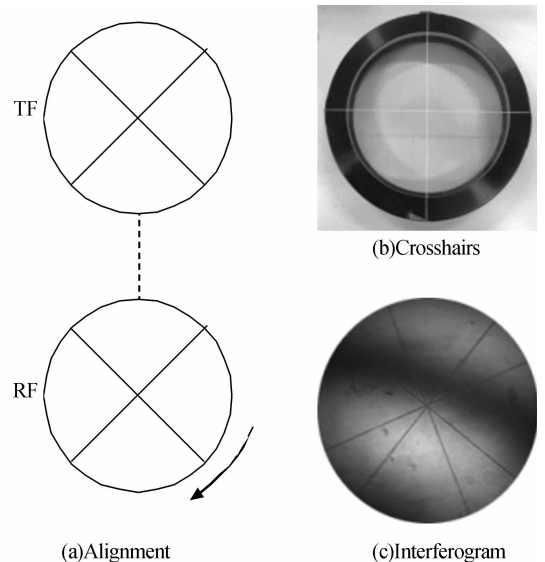


图 4 十字叉丝确定 TF 和 RF 的中心

Fig. 4 Determination of center for TF and RF with fiducially crosshairs

根;然后调整被测平面 RF 的中心高度与水平方位,以及装夹其上的十字叉丝机构,使得对应该 4 个位置时,被测平面 RF 上十字叉丝的交点始终与标准镜 TF 上十字叉丝的交点重合,从而保证旋转轴与光轴的匹配,对应的干涉图如图 4(c) 所示。以十字叉丝中心为圆心,编辑 MASK,然后将十字叉丝机构取下,4 个位置干涉测试时均采用同一个 MASK。

4.2 实测数据

首先采用平晶 A 作为标准镜,平晶 B 作为被测件,以 4 次旋转 3 次平移实现实验测量,平移量满足伪剪切比分别为 0.1,0.2 和 0.3。图 5 列出伪剪切比为 0.1 时的数据结果,5(a)和(b)分别给出了 4 次旋转测量和平移测量的数据结果,为了抑制边缘效应,边缘裁剪 5 个像素。5(c)表示 4 次旋转测量平均后的波面分布,与 5(a)中  $T_0$  波面数据相减,即可获得被测波面分布中的旋转非对称成分  $W^{as}$ ,如 5(d)所示。结合 5(b)图中平移测试结果,利用式(8),即可求解得到 5(e)所示被测波面分布中的旋转对称成分  $W^s$ 。采用旋转平移法获得的被测波面绝对分布如 5(f)所示, $PV=0.042\ 89\lambda$ , $rms=$

$0.007\ 04\lambda$ ;系统误差如 5(g)所示, $PV=0.086\ 34\lambda$ , $rms=0.018\ 84\lambda$ 。

图 5(f)中求解的波面绝对分布是未经 Zernike 多项式拟合的结果,为了分析采用 Zernike 多项式拟合的绝对检验方法<sup>[5-10]</sup>拟合时所引入的波面平滑误差的大小,对图 5(f)中求解得到的平晶 B 的波面绝对分布进行 Zernike 多项式拟合,拟合误差结果见表 4。Zernike 多项式由 36 项提高到 81 项,但拟合的残余误差也仅仅从  $0.002\ 12\lambda\ rms$  提高到  $0.001\ 89\lambda\ rms$ 。由此可见,传统绝对检验算法仅能获取面形分布绝对误差,而采用旋转平移法完成绝对检验避免波面平滑误差保证中频波面,从而获取波纹度绝对误差是十分必要的。

4.3 伪剪切比的影响

图 6 列出了伪剪切比为 0.1,0.2,0.3 的 3 种情况下的被测波面和系统误差的 PV 值和 rms 值,与横向剪切干涉恢复波面的精度与剪切比有关不同,旋转平移法求解得到的波面分布在不同伪剪切比下均保持一致,波面 PV 值的最大偏差为  $0.003\ 60\lambda$ ,波面 rms 值的最大偏差为  $0.000\ 53\lambda$ ,由此证明了旋转平移法实现平面干涉绝对检验的可靠性。

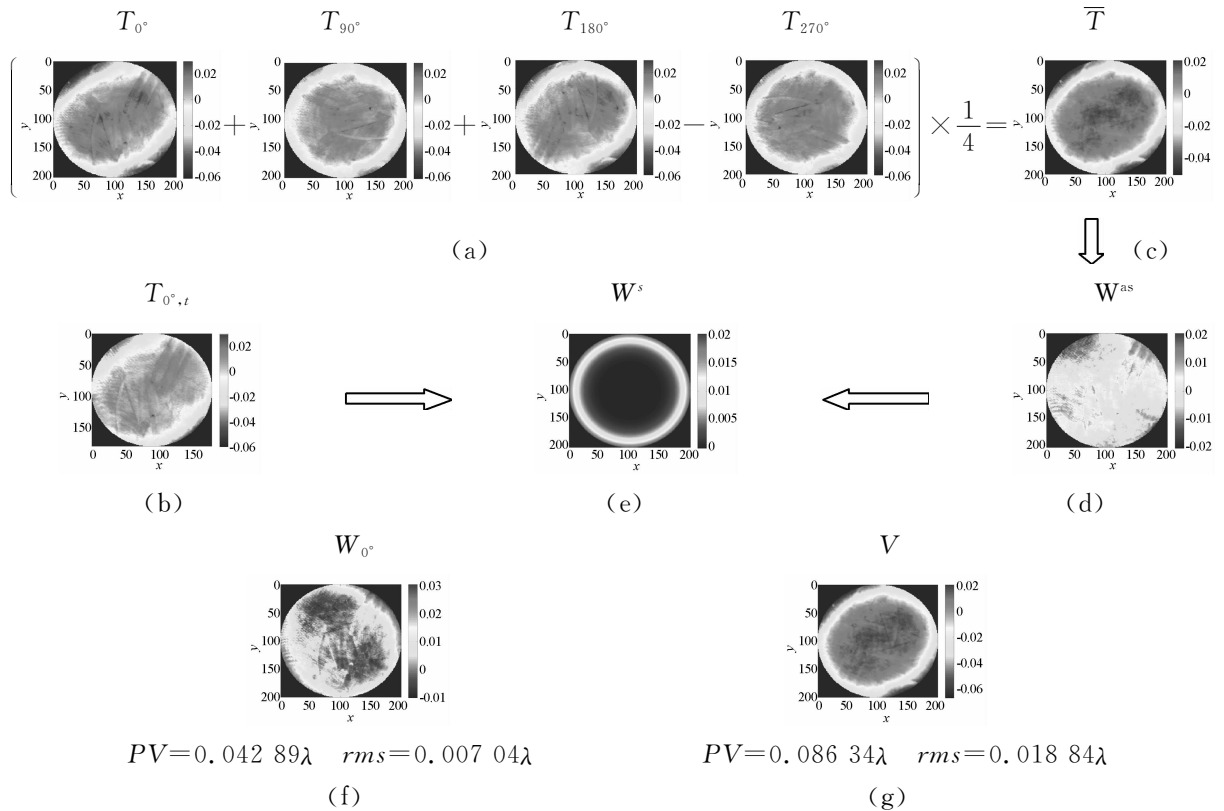
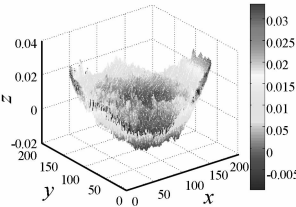
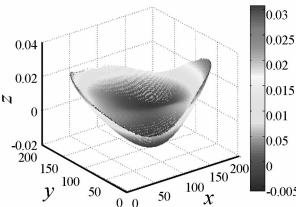
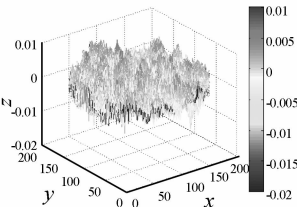
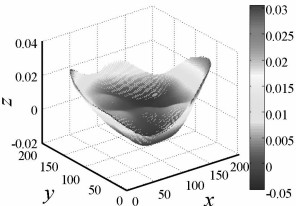
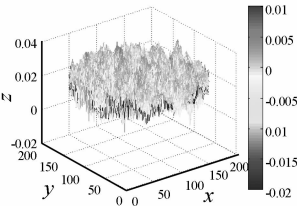


图 5 平面干涉绝对检验的实验结果 I (平晶 A+平晶 B)

Fig. 5 Experimental results I for interferometric absolute testing of flat surface (Flat A+ Flat B)

表 4 Zernike 多项式拟合实验结果波面

Tab. 4 Fitting of wavefronts of experiment results with Zernike polynomials

被测波面	Zernike 多项式拟合波面	Zernike 多项式拟合残差
 $PV=0.04289\lambda$ $rms=0.00704\lambda$	36 项  $PV=0.03599\lambda$ $rms=0.006715\lambda$	36 项  $PV=0.02298\lambda$ $rms=0.00212\lambda$
	81 项  $PV=0.03516\lambda$ $rms=0.00678\lambda$	81 项  $PV=0.02311\lambda$ $rms=0.00189\lambda$

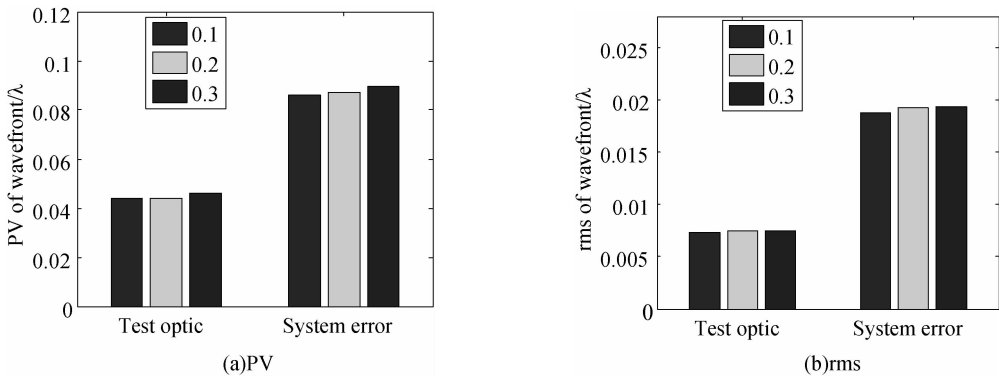


图 6 不同伪剪切比下的波面数据 (a) PV (b) rms

Fig. 6 Wavefront data with different pseudo shearing ratios (a) PV and (b) rms

### 4.4 测试数据自比对

仍采用平晶 B 作为被测件, 更换平晶 C 作为标准镜, 采用旋转平移法完成绝对检验测量, 测量结果如图 7 所示。7(a) 所示为被测波面绝对分布,  $PV=0.04649\lambda, rms=0.00757\lambda$ ; 7(b) 所示为系统误差,  $PV=0.06368\lambda, rms=0.01402\lambda$ 。由于两次测试中标准镜不同, 所以图 5(g) 所示系统误差  $V'$  与图 7(b) 所示系统误差  $V'$  波面分布不一致, 但图 5(f) 所示被测波面  $W_0'$  与图 7(a) 所示被测波面  $W_0'$  波面分布基本一致, 波面 PV 值的偏差为  $0.00331\lambda$ , 波面 rms 值的偏差  $0.00056\lambda$  造成两次测量波面数据 PV 值和 rms 值的微小偏差的原

因主要是干涉仪的测量重复性误差。

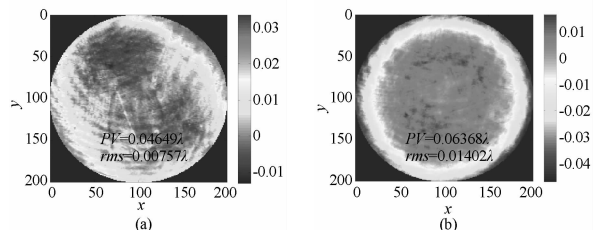


图 7 平面干涉绝对检验的实验结果 II (平晶 C+平晶 B)  
Fig. 7 Experimental results II for interferometric absolute testing of flat surfaces (Flat C+ Flat B)

### 4.5 经典三面互检法测试数据校准

上述的实验分析均是由旋转平移法获取的实

验数据进行自比对,为了验证旋转平移法获取的平面干涉绝对检验数据的准确性,将数据结果与经典三面互检法获取的被测件水平方向和垂直方向的一维轮廓进行比对。经典三面互检法虽然只能求解直径方向上的一维轮廓,但未采用 Zernike 多项式波面拟合,包含了面形和波纹度信息,所以其给出的数据可认为是校准数据。图 8 所示为采用旋转平移法(左列)和经典三面互检法(右列)获得的一维轮廓分布,水平和垂直两方向的分布曲线基本一致,PV 值偏差优于  $0.005 \lambda$ ,rms 值偏差优于  $0.001 \lambda$ 。

#### 4.6 实验数据总结

通过 2.2 节中绝对检验的数值仿真结果可知,

旋转平移法干涉绝对检验误差主要源于原始波面中的  $4k\theta$  成分,数值仿真结果中求解误差最大仅为  $1 \text{ nm rms}$  ( $0.0015 \lambda$ )。实际测量时还受到干涉仪测量重复性的影响。通过旋转平移法数据自比对和与经典三面互检法求解得到的一维轮廓数据比对,旋转平移法实现平面干涉绝对检验的准确度优于  $0.001 \lambda \text{ rms}$ 。因此,可以认为通过选择夜间实验和控制实验环境等手段,旋转平移法实现了纳米级(rms)高精度的干涉绝对检验。若提高干涉仪重复性以及采用更小的旋转角度,可进一步提高测量精度。

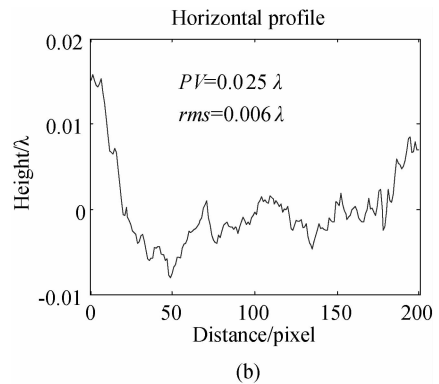
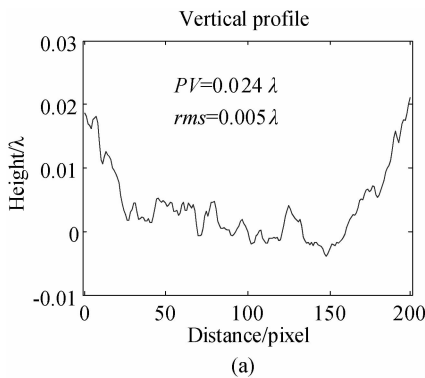
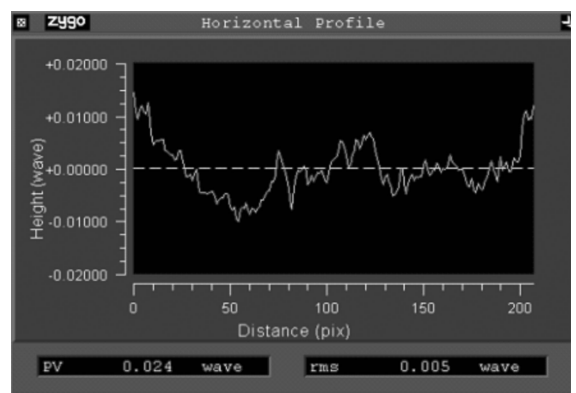
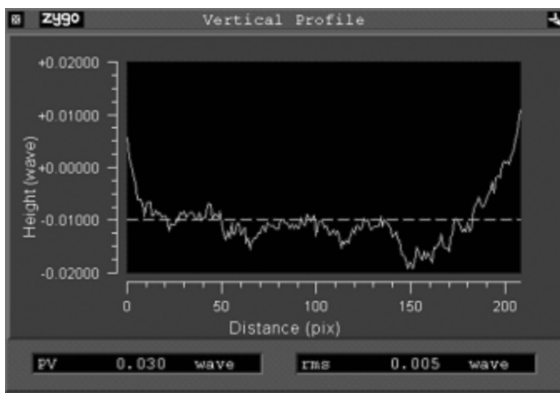


图 8 被测件水平和垂直方向轮廓数据比对

Fig. 8 Comparison of horizontal and vertical profiles of test optic

## 5 结论

经典三面互检法仅能求解直径方向上的一维轮廓分布,而现有的能够复原整个波面的干涉绝对检验算法需对整个波面进行 Zernike 多项式拟合,平滑了波面,丢失了中频成分,仅能获取面形分布。针对上述缺点,本文将旋转平移法应用到平面元件

的干涉绝对检验,波面中旋转非对称成分由  $N$  次旋转测量数据直接通过加减运算获取,旋转对称成分由 1 次平移实现伪剪切测量数据通过偶次多项式拟合求解。旋转平移法求解使得波面拟合误差降低到传统方法的  $1/5$ ,提升了计算速度,保留了中频波纹度信息。通过数值仿真,证明了旋转平移法相对于传统绝对检验方法的能够实现中频波面绝对检验的优越性和其优于  $0.0015 \lambda \text{ rms}$  的测量

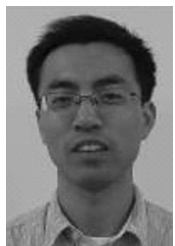
精度。在 ZYGO 干涉仪上完成了平面元件的干涉绝对检验实验,实现了保留波面数据中的中频成分的干涉绝对检验。通过改变伪剪切比和更换标准镜两种方案分别实现了旋转平移法的干涉绝对检验数据自比对,验证了该方法的可靠性;并与经典

三面互检法得到的水平和垂直方向的一维轮廓数据比对,验证了该方法的准确性,其测量准确度优于  $0.001\lambda$  rms。旋转平移法可实现  $1\text{ nm rms}$  高精度的中频波面绝对检验,并可为干涉仪系统误差的标定提供有效手段。

## 参考文献:

- [1] DECK L, EVANS C. High performance Fizeau and scanning white-light interferometers for mid-spatial frequency optical testing of free-form optics [J]. *SPIE*, 2005, 5921: 59210A.
- [2] FREISCHLAD K. Interferometer for optical waviness and figure testing [J]. *SPIE*, 1997, 3098: 53-61.
- [3] SCHULZ G, SCHWIDER J. Precise measurement of planeness [J]. *Appl. Opt.*, 1967, 6(6): 1077-1084.
- [4] SCHULZ G, SCHWIDER J, HILLER C, *et al.*. Establishing an optical flatness standard [J]. *Appl. Opt.*, 1971, 10(4): 929-934.
- [5] FRITZ B S. Absolute calibration of an optical flat [J]. *Opt. Eng.*, 1984, 23(4): 379-383.
- [6] AI C, WYANT J C. Absolute testing of flatness decomposed to even and odd functions [J]. *SPIE*, 1992, 1776: 73-83.
- [7] KLAUS R, FREISCHLAD. Absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear [J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(10): 1637-1648.
- [8] XU CH, CHEN L, YIN J Y. Method for absolute flatness measurement of optical surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(13): 2536-2541.
- [9] GRIESMANN U. Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(23): 5856-5865.
- [10] 徐洋,唐锋,王向朝,等. 平面面形绝对检验技术测量误差分析 [J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1008009.
- XU Y, TANG F, WANG X ZH, *et al.*. Measurement error analysis of absolute flatness [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(10): 1008009. (in Chinese)
- [11] MALACARA. *Optical Shop Testing* [M]. 3rd ed. Canada: John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007: 538.
- [12] OTAKI K, YAMAMOTO T, FUKUDA Y, *et al.*. Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, 20(1): 295-300.
- [13] OTAKI K, OTA K, NISHIYAMA I, *et al.*. Development of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography: design, fabrication, and evaluation [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, 20(6): 2449-2457.
- [14] 宋伟红,伍凡,侯溪,等. 基于平移旋转的球面绝对检验检测技术仿真分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(12): 3229-3234.
- SONG W H, WU F, HOU X, *et al.*. Simulation analysis on absolute testing of spherical surfaces with shift-rotation method [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3229-3234. (in Chinese)

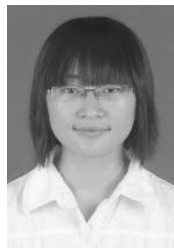
## 作者简介:



袁 群(1986—),男,江苏扬州人,博士研究生,2008年于南京理工大学获得学士学位,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: karmen86913@126.com



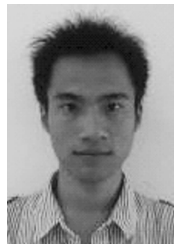
高志山(1966—),男,江苏淮安人,教授,博士生导师,1992年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,2000年于南京理工大学获得博士学位,主要从事光学设计、光干涉测量与视光学方面的研究。E-mail: zhishgao@mail.njust.edu.cn



**张聪阳**(1988—),女,河南安阳人,硕士研究生,2011年于南京理工大学获得学士学位,主要从事光干涉测量与仪器化方面的研究。E-mail: qingyang1019@126.com



**朱 波**(1988—),男,江苏扬州人,硕士研究生,2011年于南京理工大学获得学士学位,主要从事光干涉测量与仪器化方面的研究。E-mail: zhubobo0965@126.com



**成金龙**(1989—),男,江苏盐城人,博士研究生,2011年于南京理工大学获得学士学位,主要从事双波长光干涉测量方面的研究。E-mail: chengjinlong.happy@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)