

# 平面面形绝对检验技术测量误差分析

徐洋<sup>1,2</sup> 唐锋<sup>1</sup> 王向朝<sup>1,2</sup> 徐静浩<sup>1</sup> 范李立<sup>1</sup> 程欣<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 绝对检验消除了参考面面形误差对干涉测量精度的制约, 可实现纳米精度的面形测量。对现有主要平面面形绝对检验技术进行了总结比较, 运用泽尼克多项式前36项构建被测平面, 对边缘噪声、平面原始精度、旋转角度与偏心误差等因素对典型平面面形绝对检验技术测量精度的影响进行了模拟分析。绝对检验对被测平面原始精度、干涉图分辨率和旋转角度误差并不敏感, 对边缘噪声和旋转偏心误差敏感。实际测量中, 旋转轴心对准误差应小于2 pixel, 测量中心面积比取95%左右。

**关键词** 测量; 干涉测量; 绝对检验; 奇偶函数法; 旋转对称法; 镜面对称法

**中图分类号** TH744.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1008009

## Measurement Error Analysis of Absolute Flatness Test

Xu Yang<sup>1,2</sup> Tang Feng<sup>1</sup> Wang Xiangzhao<sup>1,2</sup> Xu Jinghao<sup>1</sup> Fan Lili<sup>1</sup> Cheng Xin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Absolute test eliminates the errors of reference flats which limit the accuracy of interference measurement, so that the figure of optical surface can be measured with nanometer accuracy. We give a brief review and comparison of several mainstream absolute flatness test methods. And then the impacts of edge noise, figure grades of the flats under test, rotation angle error and rotation eccentricity, etc. on the measurement error of absolute test are analyzed respectively. The first 36 Zernike polynomial terms are used to construct the virtual flats under test. It is found that the measurement error is not sensitive to figure grades of the flats, resolution of interferogram and rotation angle error. However, it is sensitive to edge noise and rotation eccentricity. In an absolute test system, it is recommended that the alignment error of rotation axis is less than 2 pixel, and the ratio of central area is about 95%.

**Key words** measurement; interferometry; absolute test; odd-even function method; rotation symmetry method; mirror symmetry method

**OCIS codes** 120.3180; 260.0260

## 1 引言

面形测量方法分为相对检验和绝对检验。相对检验将被测面面形相对于参考面面形的偏差作为检测结果, 参考面的面形误差叠加入测量结果中, 测量精度受到参考面面形精度制约。在精密测量领域, 一般认为检测精度需达到被测量的1/3~1/5甚至更高, 当面形检测精度要求高于 $\lambda/30$ 峰谷(PV)值时, PV值 $\lambda/100$ 的标准参考面已经不能满足测量

精度要求, 需要更高精度的参考面。参考面的高面形精度要求致使光学检测与光学制造互为前提, 增加了检测与制造的成本, 制约了光学加工与检测技术的发展, 这就提出了光学元件的绝对检验需求。绝对检验是消除了参考面面形误差和干涉仪系统误差的影响, 得到被测面面形绝对值的测量。绝对检验测量不受参考面面形精度的制约, 检测精度可达到纳米量级<sup>[1]</sup>, 基本能满足现代光学制造的高精度

收稿日期: 2011-06-02; 收到修改稿日期: 2011-06-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60938003)资助课题。

作者简介: 徐洋(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学干涉测量技术方面的研究。E-mail: xuyang\_Frank@163.com

导师简介: 唐锋(1979—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事信息光电子技术方面的研究。

E-mail: tangfeng@siom.ac.cn(通信联系人)

面形检测需求。

平面光学元件在高端光刻光学系统、天文望远镜、惯性约束核聚变等系统中有着广泛的应用,这些系统都对平面光学元件的面形参数提出了很高的要求,特别是在高端投影光刻技术领域,平面光学元件的面形误差需达到几纳米的均方根(RMS)值,达到该量级精度的面形检测只能通过绝对检验技术实现。本文对现有主要平面面形绝对检验技术进行总结比较,对边缘噪声、平面原始精度、旋转角度与偏心误差等因素对典型平面面形绝对检验技术测量精度的影响进行理论仿真分析。

## 2 平面面形绝对检验技术简述

1893年 Rayleigh<sup>[2]</sup>提出采用液体平面作为标准参考平面进行面形测量。当液面的口径为100 mm时,液面面形误差可以达到PV值 $\lambda/3000$ ( $\lambda=632.8$  nm)。但液面面形易受干扰,振动、边缘毛细作用、蒸发、静电荷分子引力以及液体自身的不均匀性都会使液面面形发生变化,影响测量精度。Schulz等<sup>[3,4]</sup>在1967年和1971年提出并发展了传统的三平面互检法,可以计算出平面沿径向轴线上

的绝对面形分布,但在检测全口径绝对面形分布时,需要增加较多的测量次数。1984年 Keenan<sup>[5]</sup>提出了一种伪剪切干涉测量技术,通过两平面在互相垂直的方向平移相减再累加得到平面的绝对面形。1984年 Fritz<sup>[6]</sup>在传统三平面互检法的基础上提出了泽尼克多项式拟合法,利用泽尼克多项式的性质将平面面形分解为一系列正交基函数,求出这些基函数的系数,拟合被检平面的绝对面形。1992年 Ai等<sup>[7,8]</sup>在传统三平面互检法的基础上提出了奇偶函数法,将平面面形分解成偶-偶、奇-奇、偶-奇、奇-偶4个函数分量,分别求出其中每一分量,最后相加得到平面绝对面形。1996年 Evans等<sup>[9]</sup>提出N次旋转消除系统旋转不对称误差的测量法,可以消除系统的旋转不对称误差。2001年 Freischlad<sup>[10]</sup>提出了旋转剪切的方法。同年 Küchel<sup>[11]</sup>提出将面形分成旋转对称和旋转不对称两部分,通过9次测量完成三平面面形的绝对检验。2006~2007年 Griesmann等<sup>[12,13]</sup>提出了镜面对称法,将面形分成镜面对称和镜面不对称两部分,通过6次测量完成三平面面形绝对检验,使得测量步骤更为简单。2006年 Schulz等<sup>[14]</sup>提出可追踪多传感器测量法,

表1 典型平面面形绝对检验方法流程

Table 1 Process of several mainstream absolute flatness test methods

	Formulas	Number of measurements	Number of axis alignments	Rotation number
Three-flat method	$M_1 = A(-x, y) + B(x, y)$ $M_2 = A(-x, y) + C(x, y)$ $M_3 = B(-x, y) + C(x, y)$ $M_4 = B(x, -y) + C(x, y)$	4	3	1
Zernike polynomial method	$M_1 = A(-x, y) + B(x, y)$ $M_2 = A(-x, y) + C(x, y)$ $M_3 = A_\varphi(-x, y) + B(x, y)$ $M_4 = C(-x, y) + B(x, y)$	4	3	2
Odd-even function method	$M_1 = A(x, y) + B(-x, y)$ $M_2 = A^{180} + B(-x, y)$ $M_3 = A^{90} + B(-x, y)$ $M_4 = A^{45} + B(-x, y)$ $M_5 = A(x, y) + C(-x, y)$ $M_6 = B(x, y) + C(-x, y)$	6	3	3
Rotation symmetry method	$M_1 = A(x, y) + B^R(-x, y)$ $M_2 = A(x, y) + B(-x, y)$ $M_3 = A(x, y) + B(x, -y)$ $\vdots$	9 (3 measurements after 1 axis alignment)	3	3N+3 (N is the rotation number in one rotation measurement)
Mirror symmetry method	$M_1 = A(x, y) + B(-x, y)$ $M_2 = A^R(x, y) + B(-x, y)$ $\vdots$	6 (2 measurements after 1 axis alignment)	3	3N (N is the rotation number in one rotation measurement)

进行大口径高精度平面面形绝对检验。国内北京理工大学、南京理工大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、浙江大学等单位在面形绝对检验方面也进行了大量研究工作<sup>[15~20]</sup>。表1对典型绝对检验技术的面形计算方法和测量流程复杂度进行了总结比较。

### 3 平面面形绝对检验技术误差

在进行绝对检验时,需要选择合适的绝对检验方法,进行合理的误差分配。本文对典型绝对检验技术能够达到的理论精度和影响检测精度的各种因素进行了模拟分析,以实现平面面形绝对检验系统的优化配置。由于泽尼克拟合合法检测精度受拟合算法影响,而且奇偶函数法理论测量精度高于36项泽尼克多项式拟合方法,因此仅对奇偶函数法(Odd-Even)、旋转对称法(Rot Sym)、镜面对称法(Mir Sym)3种方法进行分析。模拟分析中,采用泽尼克多项式前36项构建原始平面A、B、C,就边缘噪声、干涉图分辨率、平面原始精度、平面权重、旋转角度误差、旋转偏心误差对测量误差的影响进行分析。

#### 3.1 边缘噪声以及干涉图分辨率的影响

绝对检验技术由于存在多次旋转组合测量,测量数据点越靠近干涉图边缘,测量误差越大,在此称之为边缘噪声。设被测区域为圆形,定义中心面积比为以绝对检验旋转轴为中心的部分圆形被测区域占全部被测区域的比例。图1为采用不同中心面积比区域为有效测量数据时,3种绝对检验技术的理论测量误差。模拟分析中3块平板面形PV值为 $\lambda/20$ ,干涉图分辨率为 $300\text{ pixel}\times 300\text{ pixel}$ 。

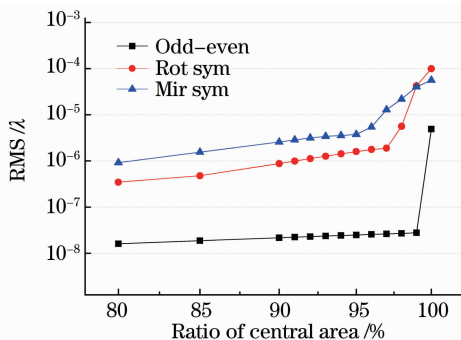


图1 边缘噪声对测量误差的影响

Fig. 1 Impact of edge noise on measurement error

可见,为了提高绝对检验的测量精度,可以选取合适的中心区域进行测量,如选取95%中心面积时,测量误差RMS值可达到 $\lambda/10^5$ (旋转对称法、镜面对称法)甚至 $\lambda/10^7$ (奇偶函数法),同时又不至于

丢失过多的平面信息。后面的仿真分析均选取平面95%中心面积进行模拟。

通过分析,边缘噪声主要是由绝对检验计算中的旋转插值误差引起的,提高干涉图分辨率能够降低边缘噪声的影响。图2为采用旋转对称法时,不同干涉图分辨率、不同中心面积比情况下测量误差的变化情况。在相同中心面积比条件下,干涉图分辨率越高,测量误差越小;当检测精度要求相同时,通过提高干涉图分辨率,可以提高能够达到的中心面积比。但是,即使干涉图分辨率下降到 $200\text{ pixel}\times 200\text{ pixel}$ ,95%中心面积比测量误差RMS值也小于 $\lambda/10000$ ,而高精度干涉仪系统的测量重复性也仅能达到RMS值 $\lambda/10000$ ,在实际绝对检验过程中,干涉图分辨率对测量误差的贡献远小于干涉仪的测试重复性,可以认为测量误差对干涉图分辨率不敏感。

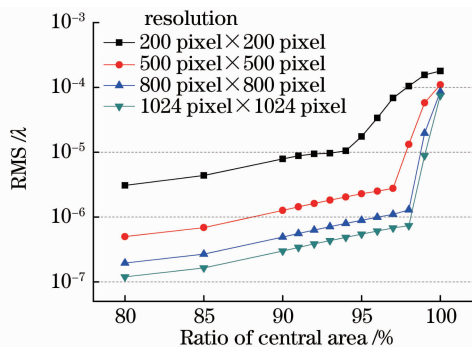


图2 干涉图分辨率对测量误差的影响(旋转对称法)

Fig. 2 Impact of resolution of interferogram on measurement error (Rot sym)

#### 3.2 平面面形原始精度的影响

为了分析绝对检验技术是否会对不同面形精度等级的被测平面具有不同的测量误差,对不同面形精度等级的被测平面进行了模拟分析。为了保证平面选取的普遍性,首先对3种方法中各项泽尼克系数的权重做单独分析,分别取单项泽尼克系数为 $1\lambda$ ,其他项系数为0,分析结果如图3所示。

由图3可见,3种绝对检验方法对单项泽尼克像差的检测误差是不同的,如奇偶函数法对Z18( $\rho^4 \sin 4\theta$ )、Z29 $[(6\rho^2 - 5)\rho^4 \sin 4\theta]$ 的测量误差较大,对其他像差的误差可认为由舍入误差引起;旋转对称法和镜面对称法对各个像差的测量误差较奇偶函数法大,并有2个数量级左右的波动,特别是对于球差较其他像差敏感。

选择泽尼克多项式前36项中3种绝对检验方法测量误差较大的项拟合测试面形,分别使平面面形PV值在 $\lambda/40\sim\lambda/4$ 之间取值,3种测量方法的测

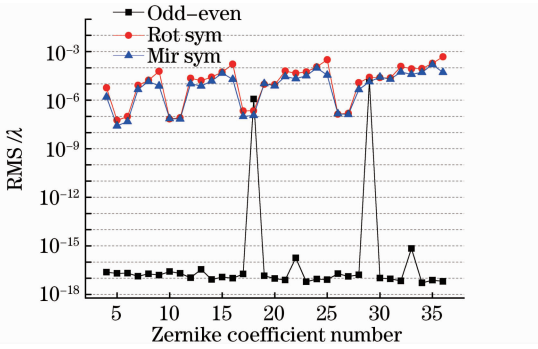


图 3 3 种测量方法中泽尼克系数的权重  
Fig. 3 Weights of Zernike coefficients in three measurements

量误差如图 4 所示。3 种绝对检验方法的测量误差随平面原始精度的提高而减小，奇偶函数法的测量误差最小，RMS 值基本小于  $\lambda/10^7$ ，旋转对称法测量误差居中，RMS 值小于  $\lambda/10^6$ ，镜面对称法测量误差 RMS 值小于  $\lambda/10^5$ 。3 种绝对检验方法的理论测量误差至少比干涉仪系统的测量重复性低 1 个数量级，因此可以认为平面面形原始精度不影响绝对检验能够实现的测量精度。

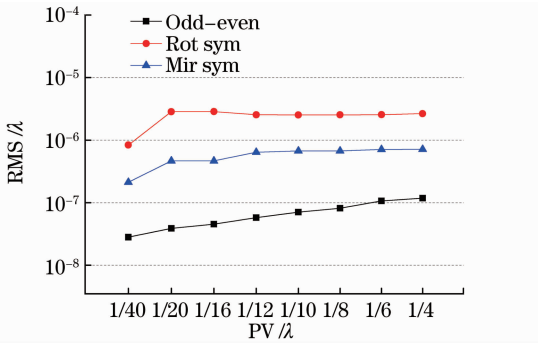


图 4 原始精度对测量误差的影响

Fig. 4 Impact of original resolution on measurement error

### 3.3 平面权重的影响

平面权重是指测量中被测三平面的测量顺序，也就是每块平面在测试方法中的权重可能不同，导致测量结果出现差异。采用三块平面面形分布不同的平面进行测试，PV 值分别为  $\lambda/40$ 、 $\lambda/20$ 、 $\lambda/10$  级别，检验测试顺序对测量精度的影响。

模拟结果显示，奇偶函数法、旋转对称法、镜面对称法三平面的权重相同，改变其顺序，测量结果仍然保持一致。

但是，在镜面对称法中，最终选择的计算式有两种表达形式<sup>[12]</sup>：

$$\begin{bmatrix} W_A \\ W_B \\ W_C \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \times \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_1^e & W_3^e & W_5^e & W_1^o & W_2^o & W_3^o & W_4^o & W_5^o & W_6^o \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

或者

$$\begin{bmatrix} W_A \\ W_B \\ W_C \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & -2 \\ 1 & 1 & -1 & -2 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & -2 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_1^e & W_3^e & W_5^e & W_2^o & W_4^o & W_6^o \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

经过推导发现(2)式会导致平面权重不同，即

$$\begin{aligned} W_6^o &= (W_6 - W_6^e)/2 = \\ &= [C^R + A^e - (C^R + A^e)^x]/2 = \\ &= (C^R + A^e - C^R - A)/2 = (A^e - A)/2. \end{aligned} \quad (3)$$

最后一步运算中要用到有限次旋转  $C$  平面叠加取平均来代替  $C^R$ ，即

$$C(r, \theta)^R \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C\left(r, \frac{2\pi k}{N}\right). \quad (4)$$

这样最终导致  $A$  平面的测量精度受到  $C$  平面的原始精度影响。同样地， $B$  平面的测量精度受到  $A$  平面的原始精度影响， $C$  平面的测量精度受到  $B$  平面的原始精度影响。因此在计算中，推荐使用前者，以保持平面权重的对等性。

### 3.4 旋转角度误差的影响

在实际测量过程中，实际旋转角度会与理论旋转角度有一定的随机差异，即旋转角度误差。奇偶函数法需要对平面进行 3 次旋转测量，旋转对称法和镜面对称法中都需要对测量平面进行  $N$  次旋转平均测量来得到旋转对称量，因此旋转角度误差的不同可能导致不同的测量结果。采用三块平面面形 PV 值为  $\lambda/20$  的平面对旋转角度误差的影响进行模拟分析，如图 5 所示。图 5 分析数据中，实际旋转角度为在理论旋转角上叠加一个标准差为旋转角度误差的正态随机误差，旋转对称法和镜面对称法的旋转平均次数  $N$  取 10，所有数据均为 20 次测量后的平均值。

三个平面的测量误差均随着旋转角误差的增大而增大。旋转角度误差在  $1^\circ$  以内时，3 种方法平面的测量误差 RMS 值均小于  $\lambda/10000$ 。对精密转台系统，达到  $1^\circ$  以内的定位精度是比较容易的，因此 3

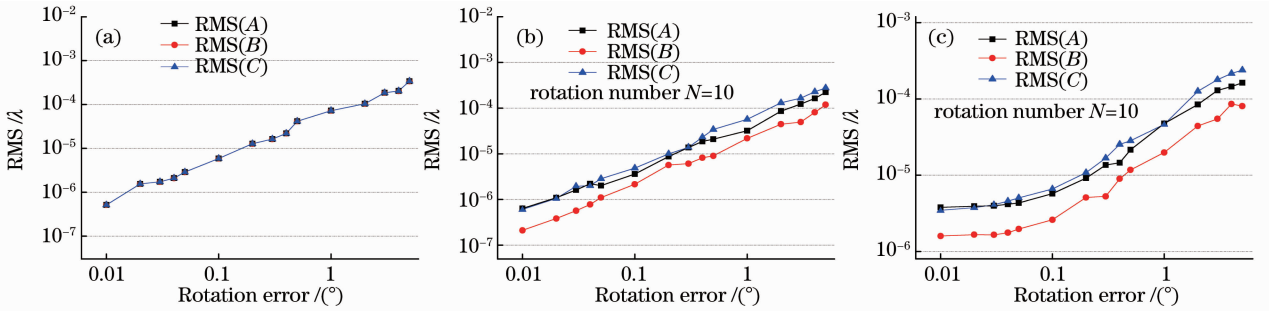


图5 旋转角误差对测量误差的影响。(a)奇偶函数法;(b)旋转对称法;(c)镜面对称法

Fig. 5 Impact of rotation error on measurement error. (a) Odd-even function; (b) rotation symmetry; (c) mirror symmetry

种绝对检验技术对旋转角度误差不敏感,绝对检验系统可以适当降低旋转台对角度定位精度的要求,降低测量系统成本。

### 3.5 旋转偏心误差的影响

旋转偏心是指平面旋转中心轴与光学系统光轴存在横向偏移。图6为干涉图直径为600 pixel,分别存在 $x$ 方向、 $y$ 方向及 $x$ 与 $y$ 方向等量偏心情况下,对3种绝对检验方法的测量误差进行模拟分析的结果。

3种绝对检验技术对旋转偏心误差都很敏感,当发生1 pixel的旋转偏心误差时,测量误差上升1~2个数量级;当旋转偏心继续增大时,奇偶函数法对旋转偏心误差的容忍度最好,旋转对称法其次,镜面对称法再次。对于旋转对称法和镜面对称法,当发生2 pixel以上的旋转偏心时,绝对检验误差RMS值大于 $\lambda/10000$ ,成为重要的系统误差源。因此,进行绝对检验时,必须进行精确的光轴对准。

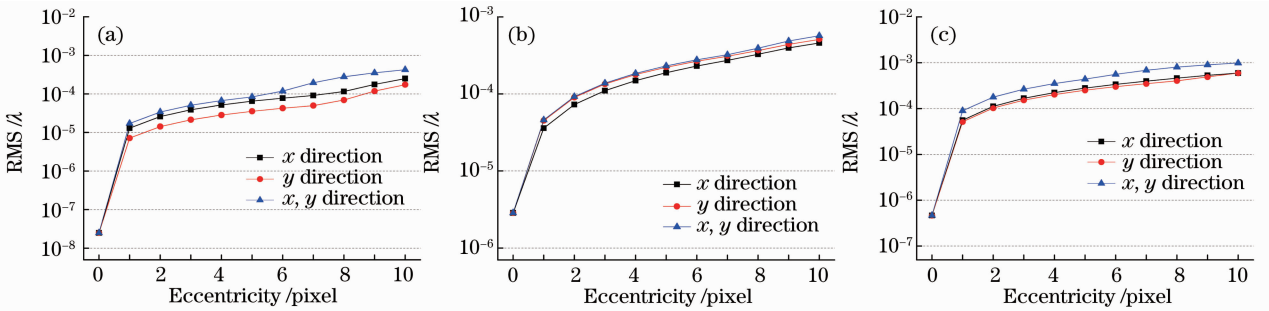


图6 旋转偏心对测量误差的影响。(a)奇偶函数法;(b)旋转对称法;(c)镜面对称法

Fig. 6 Impact of rotation eccentricity on measurement error. (a) Odd-even function; (b) rotation symmetry; (c) mirror symmetry

### 3.6 综合误差分析

以上误差源产生的绝对检验误差彼此独立,它们的综合效应所形成的综合误差 $U_{\text{RMS}}$ 可表示为

$$U_{\text{RMS}} = \left( \sum_i U_{i,\text{RMS}}^2 \right)^{1/2} = \left( U_{1,\text{RMS}}^2 + U_{2,\text{RMS}}^2 + U_{3,\text{RMS}}^2 + U_{4,\text{RMS}}^2 + U_{5,\text{RMS}}^2 \right)^{1/2}, \quad (5)$$

式中 $U_{i,\text{RMS}}$  ( $i=1\sim 5$ )分别为边缘噪声、干涉图分辨

率、平面原始精度、旋转角度误差、旋转偏心误差因素导致的绝对检验误差。取干涉图中心面积比95%,干涉图分辨率 $300 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$ ,平面原始精度 $\lambda/20$ ,旋转角度误差 $0.05^\circ$ ,旋转偏心2 pixel,得到的综合误差如表2所示。

表2 综合误差分析

Table 2 Composition error analysis

	$U_{1,\text{RMS}}/\lambda$	$U_{2,\text{RMS}}/\lambda$	$U_{3,\text{RMS}}/\lambda$	$U_{4,\text{RMS}}/\lambda$	$U_{5,\text{RMS}}/\lambda$	$U_{\text{RMS}}/\lambda$
Odd-even	$4.9296 \times 10^{-6}$	$2.4838 \times 10^{-8}$	$3.8711 \times 10^{-8}$	$2.871 \times 10^{-6}$	$3.3994 \times 10^{-5}$	$3.4469 \times 10^{-5}$
Rot sym	$1.0012 \times 10^{-4}$	$1.5904 \times 10^{-6}$	$2.8542 \times 10^{-6}$	$2.0184 \times 10^{-6}$	$9.2222 \times 10^{-5}$	$1.3618 \times 10^{-4}$
Mir sym	$3.0269 \times 10^{-5}$	$3.7716 \times 10^{-6}$	$4.6501 \times 10^{-7}$	$4.316 \times 10^{-6}$	$1.7775 \times 10^{-4}$	$1.8040 \times 10^{-4}$

旋转偏心误差对综合误差的影响最大,决定了综合误差的数量级。3种测量方法中奇偶函数法的

综合误差最小,旋转对称法和镜面对称法的综合误差接近;3种方法的综合误差基本可以达到 $\lambda/10000$

级别,与干涉仪系统能够达到的最高测量重复性相当。因此,限制检测精度的最终决定性因素是干涉仪的测试重复性。

## 4 结 论

对典型平面面形绝对检验方法进行了总结比较,运用泽尼克多项式前 36 项构建原始待检平面,分别就边缘噪声、干涉图分辨率、平面原始精度、平面权重、旋转角度误差和旋转偏心误差对测量误差的影响进行了模拟分析。理论上,绝对检验技术能够实现 RMS 值  $\lambda/10000$  以上的检测精度,而目前干涉仪系统的测量重复性最高也只能达到 RMS 值  $\lambda/10000$ 。因此,采用理想的绝对检验技术时,限制检测精度的最终决定性因素仍是干涉仪的测试重复性本身。此外,绝对检验技术对边缘噪声以及旋转偏心误差敏感,在进行绝对检验时,需要进行严格的旋转轴心对准,对准精度需控制在 2 pixel 以内;选取合适的中心面积比,如 95% 中心面积比进行测量,可以显著减少边缘噪声的影响。绝对检验技术对干涉图分辨率以及旋转角度误差不敏感,在研制绝对检验测量系统时可以适当降低对以上影响因素的要求,降低系统成本。

## 参 考 文 献

- 1 M. Vannoni, G. Molesini. Liquid mirror as planarity standard; a simplified experimental approach [C]. *SPIE*, 2005, **5856**: 536~543
- 2 L. Rayleigh. Interference bands and their applications [J]. *Nature*, 1893, **48**(1235): 212~214
- 3 G. Schulz, J. Schwider. Precise measurement of plainness[J]. *Appl. Opt.*, 1967, **6**(6): 1077~1084
- 4 G. Schulz, J. Schwider, C. Hiller *et al.*. Establishing an optical flatness standard[J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(4): 929~934
- 5 P. B. Keenan. Pseudo-shear interferometry[C]. *SPIE*, 1984, **123**: 2~9
- 6 B. S. Fritz. Absolute calibration of an optical flat[J]. *Opt.*

- Eng.*, 1984, **23**(4): 379~383
- 7 C. Ai, J. C. Wyant. Absolute testing of flats decomposed to even and odd function[C]. *SPIE*, 1992, **1776**: 73~83
- 8 C. Ai, J. C. Wyant. Absolute testing of flats by using even and odd function[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(25): 4698~4705
- 9 Chris J. Evans, Robert N. Kestner. Test optics error removal [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(7): 1015~1021
- 10 Klaus R. Freischlad. Absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(10): 1637~1648
- 11 Michael F. Küchel. A new approach to solve the three flat problem[J]. *Optik*, 2001, **112**(9): 381~391
- 12 Ulf Griesmann. Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(23): 5856~5865
- 13 Ulf Griesmann, Quandou Wang, Johannes Soons. Three-flat tests including mounting-induced deformations[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(9): 093601
- 14 Michael Schulz, Clemens Elster. Traceable multiple sensor system for measuring curved surface profiles with high accuracy and high lateral resolution[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(6): 060503
- 15 Chen Lingfeng, Sha Dingguo. Evaluation of the sphericity measurement uncertainty for the fiber point diffraction interferometer[C]. *SPIE*, 2007, **6834**: 68342N
- 16 Chen Xu, Lei Chen, Jiayi Yin. Method for absolute flatness measurement of optical surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(13): 2536~2541
- 17 Liu Xiaomei. Absolute Measurement of Optical Flat [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2004  
刘晓梅. 光学平面的绝对检测[D]. 南京: 南京理工大学, 2004
- 18 Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongqiang *et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2029~2034  
苗二龙, 张 健, 谷勇强 等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2029~2034
- 19 Chen Xu, Yuan Wenquan, Feng Yutao *et al.*. Study of the error of the reference lens in absolute spherical testing and the thermal deformation model establishment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0212002  
陈 旭, 袁文全, 冯玉涛 等. 绝对检验参考镜误差分析与热变形模型建立[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0212002
- 20 Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao *et al.*. Analysis and correction of retrace error for nonnull aspheric testing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 688~696  
刘 东, 杨甬英, 田 超 等. 非球面非零位检测中的回程误差分析与校正[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 688~696