

doi:10.3788/gzxb20174609.0912008

基于 Zernike 多项式拟合三平面互检的误差分析

高飞^a, 李晋惠^{a,b}, 田爱玲^c, 刘丙才^c, 李世杰^c, 岳鑫^c

(西安工业大学 a 理学院; b 计算机科学与工程学院; c 光电工程学院, 西安 710021)

摘 要: 基于 Zernike 多项式拟合三平面互检法, 在理论上对光轴偏离、旋转角度以及有效面积对不同面型精度平面的测量误差进行了分析, 并分别进行了实验验证. 研究表明, 旋转角度误差和有效面积对测量影响不敏感, 可适当降低标定旋转角度成本; 而光轴偏离对测量精度影响明显, 在高精度面型绝对检测中应对其进行严格校准.

关键词: 光学检测; 绝对检测; 干涉法; Zernike 多项式; 测量误差; 计算仿真

中图分类号: TH744.3; O436.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2017)09-0912008-8

Error Margin Analysis of Three-flat Test Based on Zernike Polynomials Fitting

GAO Fei^a, LI Jin-hui^{a,b}, TIAN Ai-ling^c, LIU Bing-cai^c, LI Shi-jie^c, YUE Xin^c

(a School of Science, Xi'an Technological University; b School of Computer Science and Engineering; c School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Based on Zernike polynomials fitting, the measurement errors posed by optical axis deviation, rotation angle and active area on different types of high-precision surface were analyzed and the experimental verifications were conducted respectively. The results show that the measurement is not sensitive to the rotation angle and active area, the cost of calibrated rotation angle can therefore be reduced, while the impact of optical axis deviation on measurement precision is rather significant, which should be strictly adjusted before the test on high-precision surface.

Key words: Optical testing; Absolute test; Interferometry; Zernike polynomials; Measurement error; Computer simulation

OCIS Codes: 120.6660; 120.3180; 120.4800

0 引言

高精度光学系统对光学元件的精度有较为苛刻的要求^[1-2]. 其中, 光学元件面形误差的均方根 (Root Mean Square, RMS) 值需要达到纳米量级. 光学元件检测是光学元件加工精度的评价标准, 针对高精度的光学元件制造必须建立与之相匹配的高精度检测技术^[3-5]. 高精度光学平面面型的检测一般采用干涉检测方法, 可分为相对检测法和绝对检测法. 相对检测法主要是以标准平面作为参考面, 通过分析与被测面产生的干涉图像从而得到被测面形的误差信息^[6-7]. 由于在检测中参考面面形被代入检测结果, 故检测精度受到参考面面形精度影响较大. 现有商用干涉仪所配置标准镜头峰谷值 (Peak to Valley, PV) 通常为 $\lambda/20$, 对于更高精度的检测要求, 则需要提高参考面的面型精度, 这增加了检测和加工的成本, 也一定程度上制约了面型检测技术的发展^[8-9]. 绝对检测法是通过旋转或翻转将参考面与被测面的位置进行相对变化, 分离参考面和被测面的面型误差, 消除参考面误差的影响, 从而得到被测面面型误差^[10-12], 检测精度可满足现有高精度光学元件检测需求. 目前较为成熟的绝对检测方法有三平面互检法、奇偶函数法以及平移旋转法^[13-15]等.

传统三平面互检法已被应用于商用干涉仪的分析软件中. 但是, 因为该方法无法直接获取光学平面整体

基金项目: 科技部国际合作专项 (No.2015DFA10360) 资助

第一作者: 高飞 (1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学检测技术. Email: gfgf_861031@163.com

导 师: 李晋惠 (1962—), 女, 教授, 硕士, 主要研究方向为光学检测及图像处理. Email: 715319152@qq.com

通讯作者: 田爱玲 (1964—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光学检测及光电测量技术. Email: ailintian@xatu.edu.cn

收稿日期: 2017-03-28; **录用日期:** 2017-06-12

<http://www.photon.ac.cn>

面型,故检测结果不具备完整参考性.为此,通过引入 Zernike 多项式进行平面波前拟合或增加检测次数等改进方法可以获得光学平面的整体面型.基于 Zernike 多项式拟合三平面互检法作为平面面型绝对检测的主要途径,一般认为其检测误差主要来源是空气扰动^[16]、人为操作和检测仪器精度^[17]等因素,但其影响分析也只是针对检测平面进行简单的误差计算,操作及仪器精度影响的规律性尚不明晰.相比而言,奇偶函数法和平移旋转法已有较为系统的误差规律分析,能够较好地提高两种方法的检测精度^[18].本文基于 Zernike 多项式拟合的三平面互检法,分析了光轴偏离误差、旋转角度误差、干涉波前面型面积截取比对同一面型精度和不同面型精度平面的测量误差影响,研究其影响分布规律.

1 检测原理

基于 Zernike 多项式拟合的三平面互检法^[19]将传统三平面互检法中两块标准平面进行 180° 旋转后的相对检测,改为由标准平面与被测平面进行特定角度旋转后的相对检测,由此组成新的四组相对检测.设参考平面为 k, l , 被测平面为 m , 则由多项式拟合的三平面互检法如图 1.

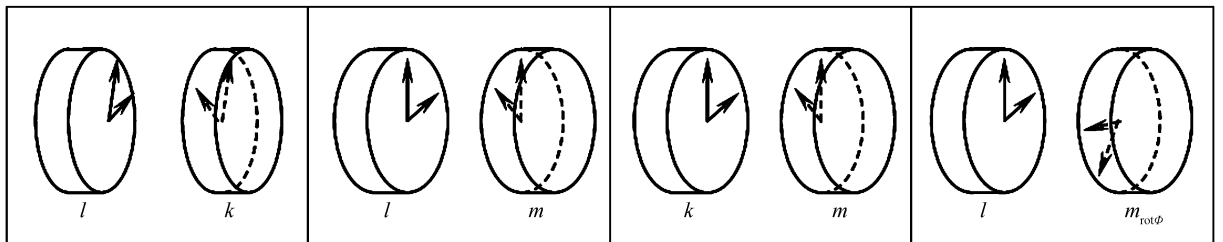


图 1 Zernike 多项式拟合三平面互检法示意图

Fig.1 Schematic diagram method of three-flat testing based on Zernike polynomials fitting

四次相对检测波前 D, E, F 和 G 分别表示为

$$\begin{cases} D(x, y) = l(-x, y) + k(x, y) \\ E(x, y) = l(-x, y) + m(x, y) \\ F(x, y) = l(-x, y) + m_{\text{rot}\phi}(x, y) \\ G(x, y) = k(-x, y) + m(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $m_{\text{rot}\phi}$ 表示对平面 m 进行逆时针旋转 ϕ 角度, x 的负号表示平面绕 y 轴进行一次翻转.由于 Zernike 多项式在单位圆上正交,且各项系数相互独立,可以较为全面完整地拟合平面波前面型.利用最小二乘法和 Zernike 多项式可将四次相对检测波前面型分解为具有正交性的基函数,并按照 Zernike 多项式中各项基函数的奇偶特性进行分类计算,最终分别得到三个光学平面的绝对面型信息.

2 检测绝对面型误差分析

2.1 光轴偏离误差的影响

为了得到被测平面的整体面型,标准平面口径需要大于被测平面.由式(1)可知,当采用 Zernike 前 36 项多项式进行平面拟合时,平面 l, k 为干涉仪标准平面,平面 m 为被测平面.在光轴偏离的情况下,需要分别对标准平面和被测平面建立笛卡尔直角坐标系 (x, y) 和 (x', y') , 如图 2, 对于 x 轴的偏离记为 Δa , 对于 y 轴的偏离记为 Δb .

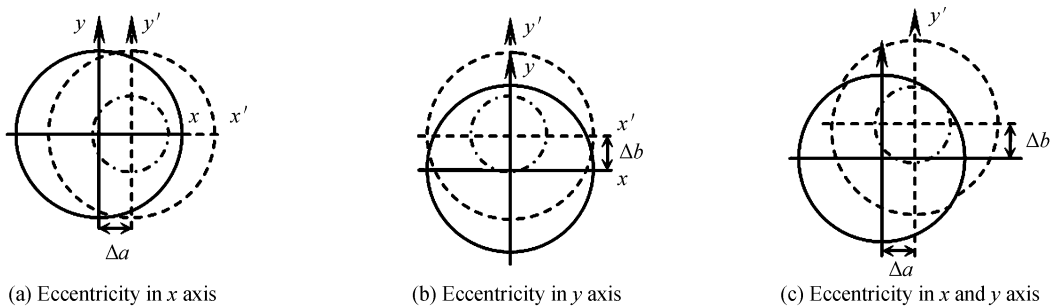


图 2 平面光轴偏离

Fig.2 Eccentricity of axis

由图 2 可知,在存在光轴偏离的情况下,两个标准平面干涉检测会造成部分数据缺失,而标准平面与被测平面干涉检测时会造成整体干涉面型发生畸变.这两类情况均会引入测量误差.存在光轴偏离的检测公式可表示为

$$\begin{cases} D(x, y) = l(-x, y) + k((x' - \Delta a), (y' - \Delta b)) \\ E(x, y) = l(-x, y) + m((x' - \Delta a), (y' - \Delta b)) \\ F(x, y) = l(-x, y) + m_{\text{rot}\varphi}((x' - \Delta a), (y' - \Delta b)) \\ G(x, y) = k(-x, y) + m((x' - \Delta a), (y' - \Delta b)) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,在四组检测过程中,由于夹装被测平面的夹具相对参考平面位置固定,故光轴偏离对于四组检测均造成误差影响.采用两块面型 PV 值为 $\lambda/20$ 的参考平面,分别取被测平面面型 PV 值为 $\lambda/5$ 、 $\lambda/20$ 、 $\lambda/50$ 和 $\lambda/100$,当光轴偏离位移以 1 像素为步长逐渐增大时,对还原的被测面型与原始被测面型残差值进行计算.其残差 RMS 值和 PV 值分布如图 3.

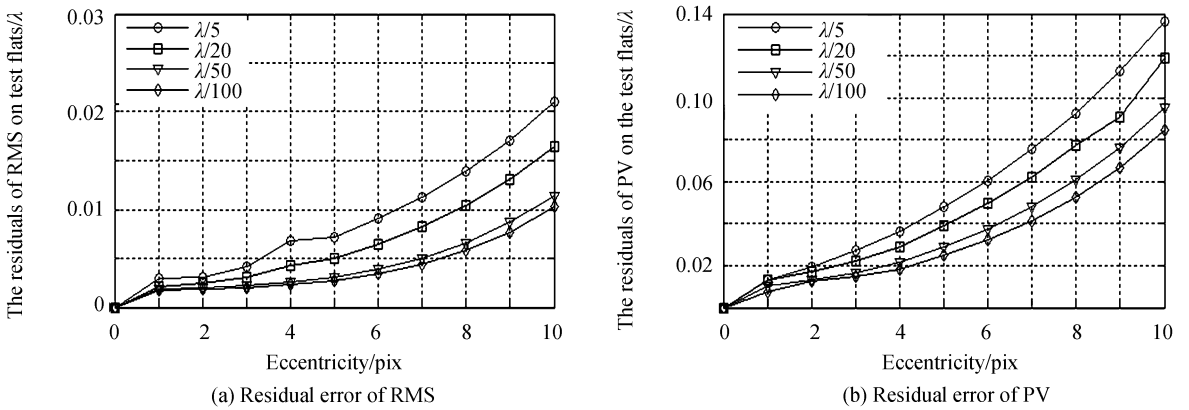


图 3 光轴偏离对不同平面测量误差的影响

Fig.3 Impact of eccentricity on different flats measurement error

由图 3 可知,光轴偏离在 6 像素以内造成被测平面残差 RMS 值误差控制在 $10^{-3}\lambda$ 以内,相应的 PV 值误差控制在 0.06λ 以内.最终当光轴偏离为 10 像素时,各类被测平面的残差 RMS 值误差均上升至 $10^{-2}\lambda$ 量级.通过计算得出,被测平面残差 RMS 值和 PV 值的分布曲线随着光轴偏离的增大,斜率也逐渐增大,对于被测平面检测而言,光轴偏离越多,其检测结果受其影响越严重.最后,当被测平面面型精度较高时,光轴偏离引起的测量误差绝对值较小,但相对偏差较大,即影响较大;而面型精度较差的被测平面由光轴偏离引起的测量误差的相对偏差较小,即影响较小.

此外,口径为 4 英寸的两个标准平面干涉波前图像在 CCD 上直径为 429 个像素,可认为单位像素长约为 0.24mm.检测中用电控台控制光轴偏离量的大小,并以像素数作为偏离量的计数单位时,对光轴偏离小于单位像素内不同面型精度平面的测量误差进行计算,如图 4.

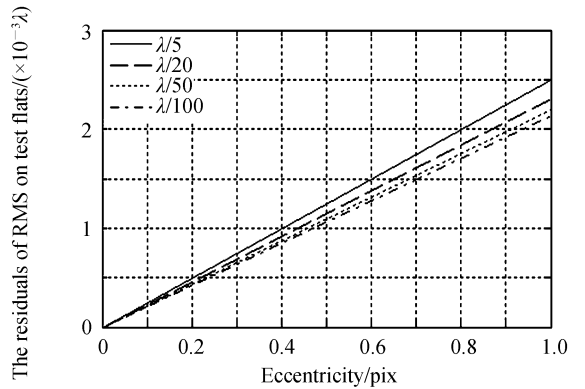


图 4 不同被测面型 RMS 值随光轴标定偏离变化曲线
Fig.4 Curve graph of the RMS from the different measured surface changed with optical axis deviation

由图 4 可见,当光轴偏离 0.6 像素时所造成的被测平面面型残差 RMS 值最大为 0.0015λ ,而单位像素长为 0.24 mm,故应将电控台在单位像素内的光轴偏离控制在 0.144 mm 以内.

2.2 旋转角度偏离误差的影响

在利用改进的三平面互检法进行绝对检测时,需要对被测平面 m 进行一次旋转.但在检测中被测面旋转 Φ 角的实际度数与理论计算时所设定的度数存在偏离,故旋转角度偏离误差是指在偏离下对检测所造成

的影响.设 $m_{\text{rot } \Delta\Phi}(x, y)$ 表示旋转角度偏离所造成的误差影响,则式(1)中的相对检测波前 F 可表示为

$$F(x, y) = l(-x, y) + m_{\text{rot } (\phi + \Delta\phi)}(x, y) \quad (3)$$

由式(3)可知,标准平面与被测平面在一个笛卡尔直角坐标系下光轴重合,故旋转角度误差并不会影响整体干涉面型的完整性.采用两块面型 PV 值为 $\lambda/20$ 的参考平面,分别取被测平面面型 PV 值为 $\lambda/5$ 、 $\lambda/20$ 、 $\lambda/50$ 和 $\lambda/100$,设定旋转角 Φ 为逆时针旋转 20° ,以 1° 为角度步进,对旋转角度偏离从 0° 至 10° 范围内还原被测面型与原始被测面型进行残差计算,如图 5.

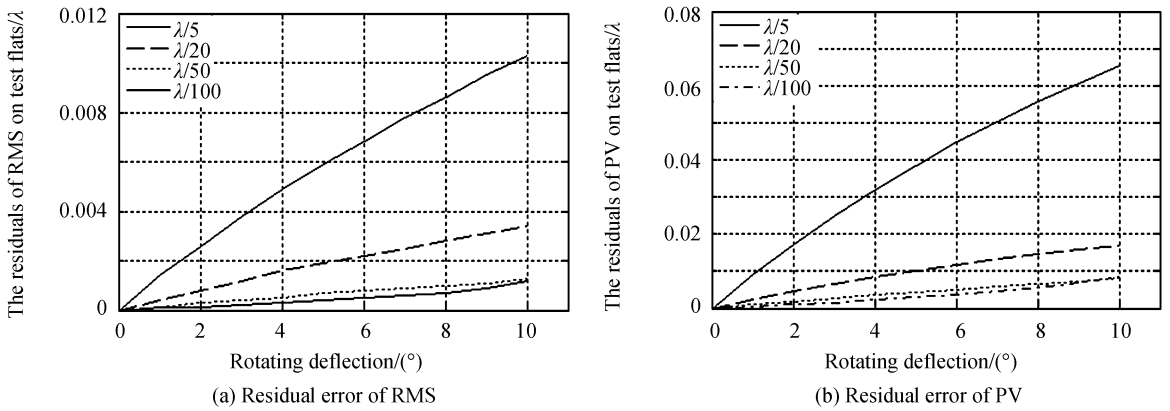


图 5 旋转角度对不同平面测量误差的影响

Fig.5 Impact of rotating on different flats measurement error

由图 5 可知,设定旋转角度与实际旋转角度偏离越小,对被测平面绝对检测所造成的误差影响越小.在旋转角度偏离小于 2° 范围内,被测平面残差 RMS 值和 PV 值分别小于 $2.6 \times 10^{-3}\lambda$ 和 $1.8 \times 10^{-2}\lambda$.若检测常用带有刻度转盘光学调整架的最小分度值为 1° ,以检测面型精度最低 $\lambda/5$ 为标准,则角度偏离对于被测平面的绝对检测所构成的 RMS 值和 PV 值误差影响分别在 $1.6 \times 10^{-3}\lambda$ 和 $1.0 \times 10^{-2}\lambda$ 以内.其次,被测平面面型精度越高,旋转角度误差对测量精度的相对影响越大.

此外,同样需要对最小分度值以内的偏离影响进行分析,即以 0.1° 为步长,计算不同面型精度平面的测量误差,如图 6.

对于实验检测中使用的高精度光学转台而言,其最小分度值为 1° ,所引入的旋转角度误差小于 0.5° .由图 4 可知,偏离角度在 0.5° 时对被测平面 RMS 值的计算误差最大为 $6 \times 10^{-4}\lambda$,故不会对检测结果造成直接影响,且能够满足高精度检测要求.

2.3 相对检测波前有效面积截取比的影响

在实际测量中,为了消除被测平面的边缘噪声对干涉波前的影响,需要对干涉波前进行面积截取.定义面积截取比为以干涉平面中心光轴为圆心的有效面积与干涉图整体圆面积之比.则当面积截取比由 100% 逐步减小时,表示所选取的有效计算面积在逐步缩小.目前常用的商用干涉仪在检测中已将截取面积比作为一项可调整参数,在 Zygo 干涉仪上其默认截取面积比为 95%,且有专门的选项进行比例修改.但有时分析设定的经验阈值 95% 无法完全排除边缘噪点,如图 7.

在图 7 中, W_{max} 和 W_{min} 分别表示平面波前中的最大值和最小值.边缘噪点随着面积截取比设定值的降低而减少,但是当面积截取比为 95% 时仍存在边缘噪点.当面积截取比为 91% 时,其后的波前最大值不再变化,可认为边缘噪点已被完全消除.带有噪点的平面干涉图通过 Zernike 多项式拟合并按照绝对检测方法所得到的平面绝对面型将含有误差.故分析不同面积截取比对检测结果的影响.

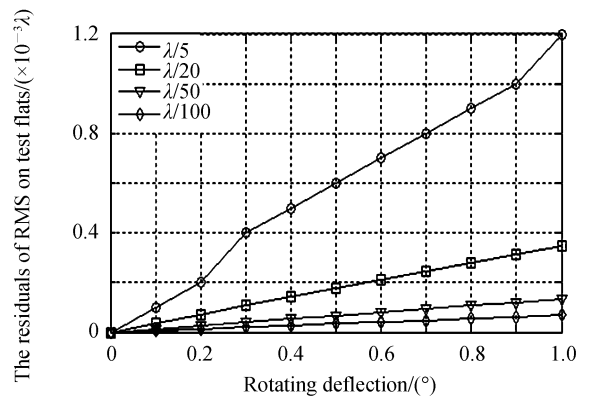


图 6 不同被测面型 RMS 值随角度偏离变化曲线图

Fig.6 Curve graph of the RMS from the measured surface changed with rotation angle deviation

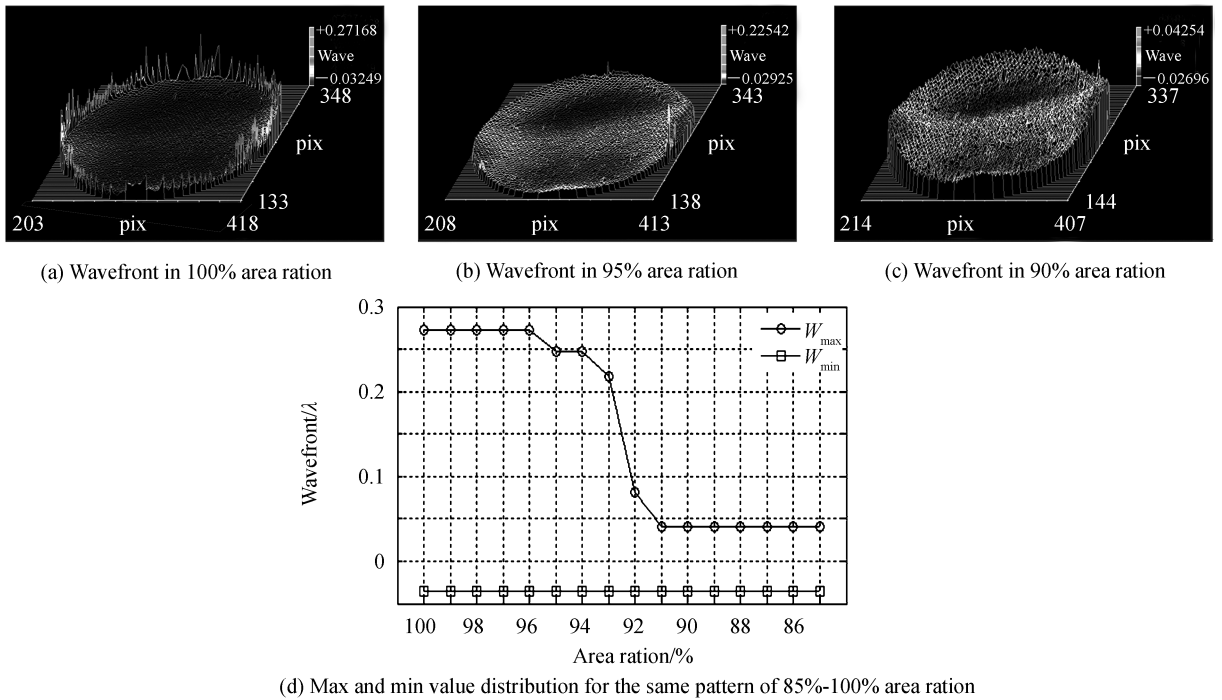


图 7 不同截取面积比与波前关系

Fig.7 Relation between different area ration and wavefront

利用含有边缘噪点的检测波前进行计算分析,其中参与绝对检测的两个标准平面 PV 值均为 $\lambda/20$,被测平面的 PV 值分别为 $\lambda/5$ 和 $\lambda/20$,其波前残差为原始平面波前与还原平面波前之差.通过计算在截取面积比由 100%降低为 85%过程中被测平面波前残差的 PV 值和 RMS 值,可以得到边缘噪点对绝对检测结果的误差影响,如图 8.

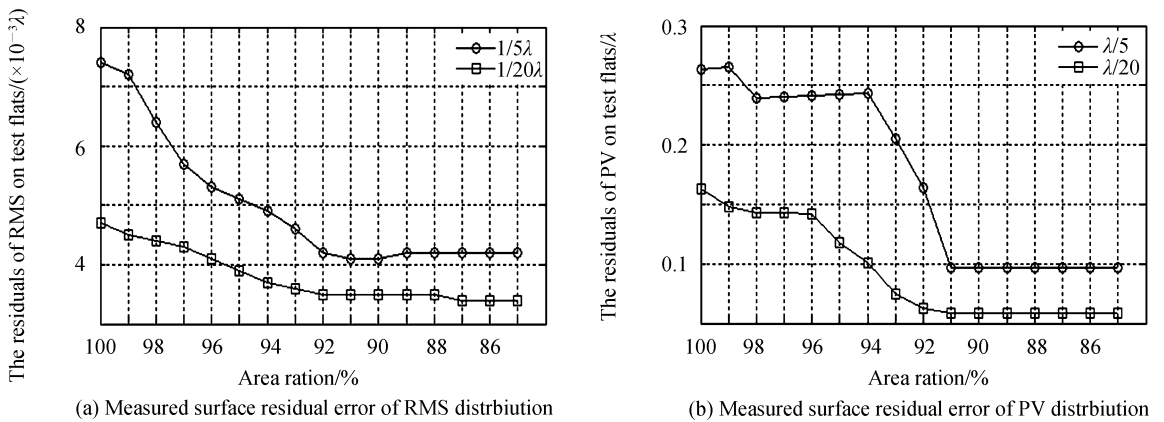


图 8 边缘噪点对不同被测平面波前计算的影响

Fig.8 Influence of edge noise on wavefront calculation of different measured surface

由图 8 可见,由于平面波前 PV 值相比 RMS 值对最值更加敏感,故当残差的 PV 值从截取面积比小于 91%稳定后 RMS 值也趋于平稳.当截取面积比为 91%时,被测平面的边缘噪点已被排除,且在排除边缘噪点后,原始被测平面波前与还原波前较为一致.其次,被测面型精度越高,由于面积截取比设定所造成边缘噪声对检测结果的影响越小,但相对检测结果影响越大.其中,当截取面积比自 95%至 91%时, $\lambda/5$ 平面的残差 PV 值和 RMS 值误差分别降低了 0.1449λ 和 $1 \times 10^{-3}\lambda$,而 $\lambda/20$ 平面的残差 PV 值和 RMS 值误差分别降低了 0.0588λ 和 $4 \times 10^{-4}\lambda$.需要强调的是,消除边缘噪声的面积截取比应根据不同平面面型频率分布进行选取.但由分析可见,面积截取比在 95%~91%之间对于光学平面的绝对检测误差影响较小,不构成直接影响.

3 实验验证

为了验证仿真分析的准确性,采用 Zygo 干涉仪进行实际检测.其光源采用波长为 632.8 nm 的 He-Ne

激光器,RMS 值检测重复性为 $\lambda/100\ 00$ 量级,同时配装口径 4 英寸的两块 PV 值为 $\lambda/20$ 标准平面,在控温、避震环境下对面型 PV 值为 $\lambda/5$ 和 $\lambda/20$ 的两块被测平面进行检测,如图 9 及图 10.此外,要求每项检测结果由 16 次重复检测数据的平均值计算得出,以保证检测数据的稳定性.

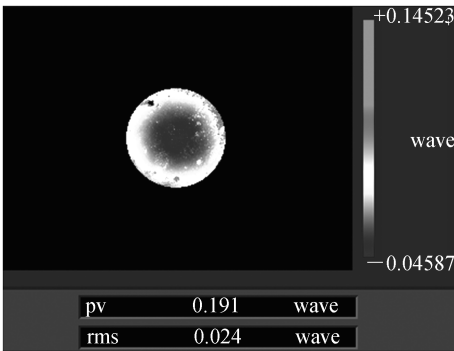


图 9 PV 值为 $\lambda/5$ 的被测平面面型

Fig.9 Measured surface when PV is $\lambda/5$

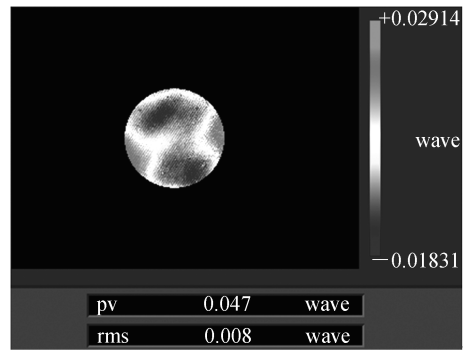
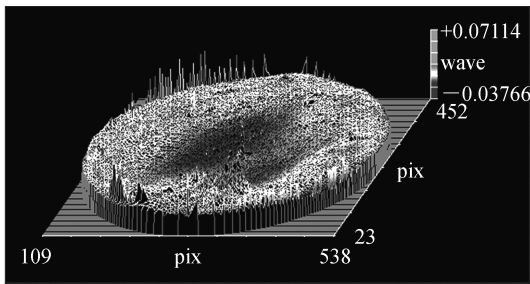


图 10 PV 值为 $\lambda/20$ 的被测平面面型

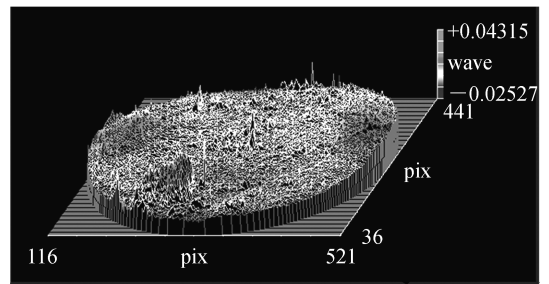
Fig.10 Measured surface when PV is $\lambda/20$

3.1 光轴偏离误差

对夹装被测平面的光学调整架相对于垂直光轴方向进行移动以实现光轴的偏离,以像素作为位移单位,可利用口径相同标准平面干涉波前图像的面积直径来标定位移量,如图 11.



(a) Wavefront when the optical axis overlap

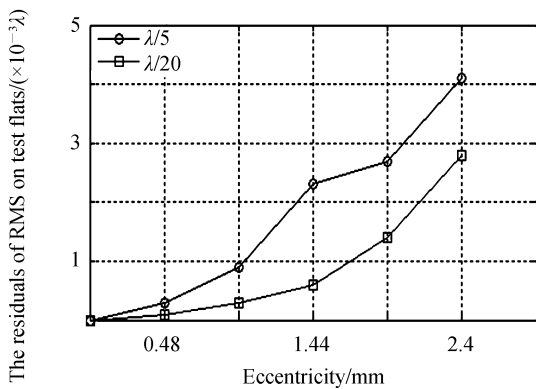


(b) Wavefront when the optical axis deviation

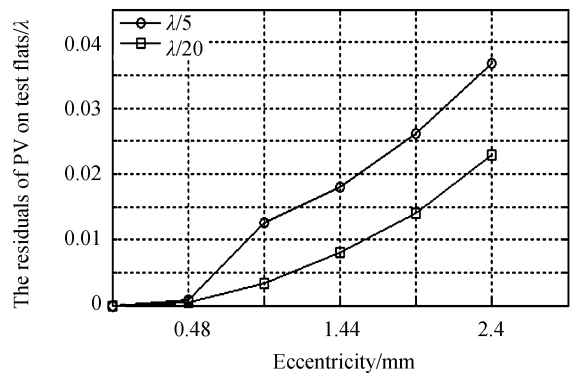
图 11 利用标准平面波前直径标定位移量

Fig.11 Using standard flats wavefront demarcate the displacement amount

当发生光轴偏离时,实际干涉图中干涉区域由圆形变为梭形,通过设定 95% 的面积截取比可去除梭形边缘,从而在分析计算时干涉图仍为圆形,故圆形 x 轴和 y 轴方向直径均缩短.以 2 像素为步长,设定光轴偏离 2、4、6、8、10 像素时对两块光学平面进行干涉波前检测,则其实际偏离位移分别为 0.48 mm、0.96 mm、1.44 mm、1.92 mm、2.4 mm.将各检测计算所得被测平面的绝对检测结果与光轴重合时所得结果进行残差比较,其结果如图 12.



(a) RMS of the different flats measured surface residual



(b) PV of the different flats measured surface residual

图 12 光轴偏离对不同平面检测结果的影响

Fig.12 Influence of the optical axis deviation on different flats

由图 12 可见,被测平面的残差 PV 值和 RMS 值随着光轴偏离位移的增大而变大,且光轴偏离的误差影响与被测平面精度呈反比.当光轴偏离 2.4 mm 时,被测平面残差的 RMS 值分别为 0.0041λ 和 0.0028λ ,均已无法满足高精度检测要求.通过计算,当被测平面残差 RMS 值为 $1 \times 10^{-3}\lambda$ 时,光轴偏离分别为 1.03 mm 和 1.69 mm,此时对应约为 4 和 7 个像素.

3.2 旋转角度偏离误差

在进行光轴校准后,分别将两块被测平面夹装至最小分度值为 1° 的光学调整架上.通过理论分析,角度偏离在 1° 内对于检测影响较小,故以 2° 为步长,分别在旋转角度偏离 2° 、 4° 、 6° 、 8° 、 10° 时进行干涉波前检测.并利用在 0° 偏离下还原的被测平面绝对面型与存在各角度偏离下所得绝对面型进行残差值计算,其结果如图 13.

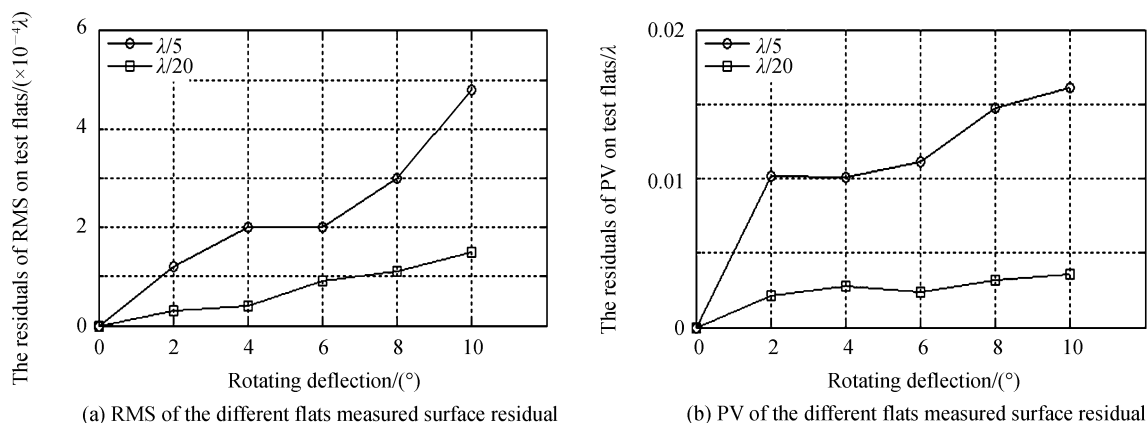


图 13 旋转角度偏离对不同平面检测结果的影响

Fig.13 Influence of the rotation deviation on different flats

由图 13 可见,被测平面绝对检测误差随着旋转角度偏离值增大而增大.以被测面型精度 PV 值为 $\lambda/5$ 为标准,当旋转角度偏离小于 10° 时,残差的 RMS 值和 PV 值分别小于 $4.8 \times 10^{-4}\lambda$ 和 $1.6 \times 10^{-2}\lambda$.其次,在同一偏离角度下,PV 值为 $\lambda/5$ 平面的残差值均大于 $\lambda/20$ 平面的残差值.最后,偏离 2° 至 10° 时,两块被测平面在同一偏离角度下的 PV 值差值由 0.0081λ 上升至 0.0125λ ,且 RMS 值差值由 $0.09 \times 10^{-3}\lambda$ 上升至 $0.33 \times 10^{-3}\lambda$,这说明不同面型精度的平面对于角度偏离误差的敏感性也不同,角度偏离对于 $\lambda/20$ 的平面所造成的影响相比 $\lambda/5$ 的平面更大.

4 结论

针对基于 Zernike 前 36 项多项式拟合三平面互检法,通过构建不同面型精度的检测平面,分别分析了光轴偏离、旋转角度偏离及面积截取等因素对检测结果的影响,并设计了对比试验验证了分析结果.首先,光轴偏离和旋转角度偏离越大,对于检测结果的影响越大;其次,被测平面面型精度越高,光轴偏离与旋转角度偏离对其影响绝对值越小,但相对影响越大.为了保证高精度检测,应将光轴偏离量控制在 0.144 mm (0.6 像素)以内,并选用最小分度值为 1° 的转台对旋转角度进行标定;最后,被测平面的绝对面型精度与面积截取比呈反比关系.对于面型精度大于 $\lambda/5$ 的平面而言,采用 95% 的检测波前图像面积截取比对被测平面的面型还原的误差影响大于 $1.0 \times 10^{-3}\lambda$,可通过设置更低的面积截取比,从而降低边缘噪声对检测结果的影响.此外,在试验检测中存在环境温度、空气扰动等因素的综合影响,导致试验检测所得面型残差与理论分析所得面型残差存在差异,后续将会对此进一步研究.

参考文献

- [1] LIU Yong-ming, XIE Jun, TIAN Wei, *et al.* Inverse modeling of mirror surface figure based on finite element contact analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8):0812001.
刘永明,谢军,田伟,等.基于有限元的面形反演模型[J].光子学报,2014, **43**(8):0812001.
- [2] DAI Lei, SUI Yong-xin, WU Di. Precision of measuring system of radius of curvature using laser interference method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(8):2221-2225.
代雷,隋永新,吴迪.基于激光干涉法的曲率半径精密检测系统[J].红外与激光工程,2013, **42**(8):2221-2225.
- [3] VANNONIM. Absolute flatness measurement using oblique incidence setup and an iterative algorithm [J]. *Optics*

- Express, 2014, **22**(3): 3538-3546.
- [4] SU Dong-qi, TIAN Wei, MIAO Er-long, *et al.* Absolute three-flat test in vertical direction with gravity deformation compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1112003.
苏东奇, 田伟, 苗二龙, 等, 基于重力补偿的立式三平板绝对检测[J]. 光子学报, 2015, **44**(11): 1112003.
- [5] E Ke-wei, LI Da-hai, ZHANG Chen, *et al.* Four-step shear method for the absolute measurement of a flat surface based on phase measuring deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(30): 8419-8425.
- [6] SONG Wei-hong, HOU Xi, WU Fan, *et al.* Simple and rapid data-reduction method with pixel-level spatial frequency of shift-rotation method[J]. *Applied Optics*, 2013, **24**(52): 5974-5978.
- [7] HAN Dong-song, HE Xin, WEI Zhong-hui, *et al.* Error correction of interferometer detection with high-accuracy rotation method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1291-1303.
韩冬松, 何昕, 魏仲慧, 等, 应用高精度旋转法的干涉仪检测误差校正[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(5): 1291-1303.
- [8] MIAO Er-long, ZHANG Jian, GU Yong-qiang, *et al.* Measurement error analysis of high precision fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. *Chinese Journal of 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.
- [9] GRIESMANN U. Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(23): 5856-5865.
- [10] CHEN Xu, YUAN Wen-quan, FENG Yu-tao, *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, 袁文权, 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.
- [11] FUJIMOTO I, TAKATSUJI T, NISHIMURA K, *et al.* Autonomous calibration method of the reference flat surface of an interferometer without using a standard flat surface[J]. *Applied Optics*, 2012, **55**(30): 8419-8425.
- [12] ZHU Shuo. Study on technology for large optic flat mirror testing[D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2014.
朱硕. 大口径光学平面镜面形检测技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [13] SONG Wei-hong, WU Fan, HOU Xi, *et al.* Absolute measurement of flats with the method of shift-rotation[J]. *Optical Review*, 2013, **20**(5): 374-377.
- [14] TIAN Ai-ling, ZHENG Xian-feng, LIU Bing-cai, *et al.* Absolute measurement of 3D Surface[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2012, **32**(6): 431-436.
田爱玲, 郑显锋, 刘丙才, 等, 三维面型的绝对测量[J]. 西安工业大学学报, 2012, **32**(6): 431-436.
- [15] SCHREINER R, SCHWIDER J, LINDLEIN N, *et al.* Absolute testing of the reference surface of a Fizeau interferometer through even/odd decompositions[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(32): 6134-6141.
- [16] YUMOTO H, MATSUYAMA S, MIMURA H, *et al.* Absolute calibration of optical flats using the three-flat test by considering the relative humidity change[J]. *Nuclear Inst & Methods in Physics Research A*, 2013, **710**(3): 2-6.
- [17] CHATTERJEE S, KUMAR Y P. Measurement of the surface form error of a spherical surface with a wedge phase shifting Fizeau interferometer[J]. *Journal of Optics*, 2013, **42**(2): 122-127.
- [18] XU Yang, TANG Feng, WANG Xiang-chao, *et al.* Measurement error analysis of absolute flatness test[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(10): 1008009.
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.
- [19] FRITZ B S. Absolute calibration of an optical flat[J]. *Optical Engineering*, 1984, **23**(4): 379-383.