

doi:10.3788/gzxb20184702.0212004

装夹自重变形对大口径绝对面形检测的影响

赵思伟¹, 田爱玲¹, 王大森², 刘丙才¹, 朱学亮¹, 刘卫国¹

(1 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, 西安 710021)

(2 中国兵器科学院宁波分院, 浙江 宁波 310022)

摘 要: 针对立式大口径平面干涉仪, 采用结合 Zernike 多项式的三平面互检面形检测方法, 研究参考平面在装夹情况下的自重变形对绝对面形检测结果的影响。运用 ANSYS 有限元分析方法研究了不同参数下的装夹和自重变形情况, 得到了最优的装夹参数为环带宽度 15 mm、平面厚度 90 mm, 此时的变形量峰谷值为 0.023λ ($\lambda = 632.8$ nm)。通过参考平面装夹自重变形对测量结果影响的模拟检测试验和对比分析, 发现参考平面装夹自重变形不仅影响其自身的面形, 而且对未变形大口径平面的绝对面形检测结果也有较大影响, 面形残差峰谷值基本都在 0.011λ , 尤其在高精度干涉测量中该影响不可忽略。研究结果可为高精度测量的变形补偿提供参考。

关键词: 光学检测; 绝对检测; 有限元分析法; 装夹自重变形; 三平面互检

中图分类号: TH741

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)02-0212004-7

Influence of the Clamping and Gravity Deformation on Absolute Test of Large Plane

ZHAO Si-wei¹, TIAN Ai-ling¹, WANG Da-sen², LIU Bing-cai¹, ZHU Xue-liang¹, LIU Wei-guo¹

(1 Shaanxi Province Key Laboratory of Membrane Technology and Optical Test, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

(2 The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo, Zhejiang 310022, China)

Abstract: Aiming at the vertical large plane interferometer, the method of three-flat test with Zernike polynomials was used to study the influence of the clamping and gravity deformation of the large plane on the absolute surface test results. The method of ANSYS finite element analysis was used to simulate the clamping and gravity deformation under different parameters. The clamping parameters of the ring width of 15 mm and the plane thickness of 90 mm are optimized, and the deformation quantity peak-valley value is 0.023λ ($\lambda = 632.8$ nm). The result of simulation experiment and comparative analysis base on the three-flat test with reference plane deformation show that the clamping and gravity deformation of the large reference plane in the vertical large plane interferometer is not only effects on the reference surface shape of the reference plane itself, but also affects the absolute surface shape of the large plane without deformation, and the surface deviation peak-valley value is basically 0.011λ , so the clamping and gravity deformation influence can't be ignored. This study will provide references for future research on deformation compensation.

Key words: Optical testing; Absolute test; Finite element method; Clamping and gravity deformation; Three-flat test

OCIS Codes: 120.6650; 120.3180; 120.4800; 240.0240; 120.4290

0 引言

现代光学技术的发展对光学元件的加工精度提出了更高的要求, 在加工的过程中, 必须对面形进行高精

基金项目: 科技部国际合作项目(No.2015DFA10360)和总装备部项目(No.JCKY2016208A001)资助

第一作者: 赵思伟(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学检测技术。Email: zhaosiwei30@163.com

导师(通讯作者): 田爱玲(1964-), 女, 教授, 博士, 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: 2017-09-04; 录用日期: 2017-10-23

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

度检测.参考表面的绝对校准是非索干涉仪实现高精度检测结果的关键.三平面绝对检测方法^[1-2]作为校正平面的主要方法已被广泛研究,传统的三平面测试只能简单地获得几个不同的线上的面形,将传统的三平面标定方法进行扩展,增加带额外的旋转角度的检测方法,结合 Zernike 多项式面形拟合方法^[3-5]能够较好地对面形进行恢复.

大口径光学元件在立式情况下受装夹力和重力等因素的影响,其表面面形会发生变化,这些变形将直接影响检测结果.因此,在检测大口径高精度平面光学元件时,对参考镜在支撑状态下进行变形分析必不可少,选择合理的支撑方式^[6-8]来缓解大口径参考镜装夹受力变形对检测结果的影响.目前国内外文献多是针对卧式干涉检测系统进行绝对面检测研究,相关的重力变形补偿研究较少^[9].文献[9]研究了 325 mm 口径卧式边框装夹重力变形情况下的三平面互检,检测得到该情况下的变形达到 5 nm,但由于卧式和立式检测系统参考镜受重力方向不同产生的变形量不同,不能等同于立式干涉仪的情况.而立式检测系统中重力变形较为复杂,该方面的研究相对更少^[10-11].文献[10]提出了一种平面侧面胶点支撑方式并进行了变形分析,该侧面胶点支撑方式适用于小口径平面,不适用于重力较大的大口径平面.文献[11]考虑到立式 350 mm 平面在翻转前后的两种变形,在传统三平面互检的基础上分别采用不考虑离焦量的角度旋转法和重力补偿三平面互检方法,通过对比,验证了重力补偿三平面互检方法的可靠性.

本文针对立式大口径平面干涉仪,研究装夹支撑下参考平面重力变形,置于水平台上的待测平面未发生重力变形的情况.采用基于 Zernike 多项式拟合的三平面互检方法^[12-13],对变形前后的三平面互检检测结果进行了对比分析,探究立式情况下参考平面的装夹自重变形对大口径参考平面绝对检测结果的影响.

1 绝对检测原理

基于 Zernike 多项式的三平面检测方法,是在传统三平面互检的基础上,增加一个旋转的组合^[14],即将其中一个平面旋转一个角度,获得四次组合测量数据.其最大特点是:Zernike 多项式系数相互独立,函数绕圆心旋转时多项式数学形式保持不变,为面形运算提供便利.假设三个大平面 K 、 L 、 M 两两组合在干涉仪上进行检测,面形用 $k(x, y)$ 、 $l(x, y)$ 、 $m(x, y)$ 表示,四次检测获得的波面用 $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 、 $C(x, y)$ 和 $D(x, y)$ 表示,四组检测组合如图 1.

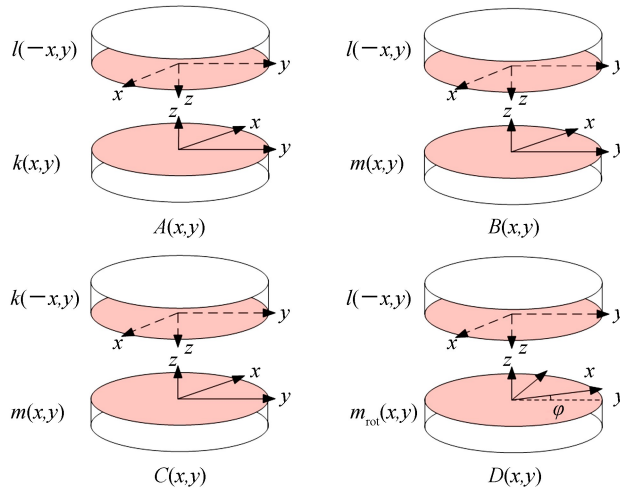


图 1 结合 Zernike 多项式的三平面检测原理

Fig.1 Schematic diagram of the three-flat test with Zernike polynomials

获得旋转后的面形检测方程组为

$$\begin{cases} l(-x, y) + k(x, y) = A(x, y) \\ l(-x, y) + m(x, y) = B(x, y) \\ k(-x, y) + m(x, y) = C(x, y) \\ l(-x, y) + m_{\text{rot}\varphi}(x, y) = D(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $l(-x, y)$ 、 $k(-x, y)$ 是被测 $l(x, y)$ 、 $k(x, y)$ 平面沿 y 轴的翻转, $m_{\text{rot}\varphi}(x, y)$ 是由 $m(x, y)$ 逆时针旋转 φ 角度得到的波面, $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 、 $C(x, y)$ 和 $D(x, y)$ 可直接从干涉仪中读出.对读出数据进行

Zernike 拟合得到其 36 位 Zernike 多项式系数,通过式(1)运算即得到三平面 K 、 L 、 M 的 36 位 Zernike 多项式系数,将多项式系数带入 Zernike 多项式,得到三平面 K 、 L 、 M 的面形。

假设平面在同样的材料、尺寸和装夹支撑的情况下,具有相同的自重变形,其面形可表示为 $w(x, y)$,待测平面置于下部的平台上,受力均匀(这里不考虑其变形),只考虑上部参考面的装夹重力变形,则式(1)可转化为

$$\begin{cases} (-x, y) + w(x, y) + k(x, y) = A'(x, y) \\ l(-x, y) + w(x, y) + m(x, y) = B'(x, y) \\ k(-x, y) + w(x, y) + m(x, y) = C'(x, y) \\ l(-x, y) + w(x, y) + m(x, y)_{rot\varphi} = D'(x, y) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $A'(x, y)$ 、 $B'(x, y)$ 、 $C'(x, y)$ 和 $D'(x, y)$ 是从干涉仪测量获得携带有装夹自重变形的波面,通过对式(2)求解,可得到三平面 K 、 L 、 M 的面形。

2 变形模拟

在实际检测大口径面形时,若忽略变形,检测结果中将含有装夹和自重产生的变形分量,不能准确表征平面的面形,所以必须对其受装夹支撑和重力作用的变形进行仿真分析。

本文主要研究底部多点支撑^[15],可以近似理解为底部环带支撑的方式^[16].采用 ANSYS 有限元分析方法对大平面在垂直支撑情况下进行变形分析.研究的平面参考镜材料为熔石英,其密度为 $2.201 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,杨氏模量为 $7.27 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,泊松比为 0.17.其最大口径为 $\Phi 350 \text{ mm}$,有效口径为 $\Phi 300 \text{ mm}$.图 2 为厚度为 90 mm 平面在 15 mm 宽度的环带下 ANSYS 变形仿真示意图。

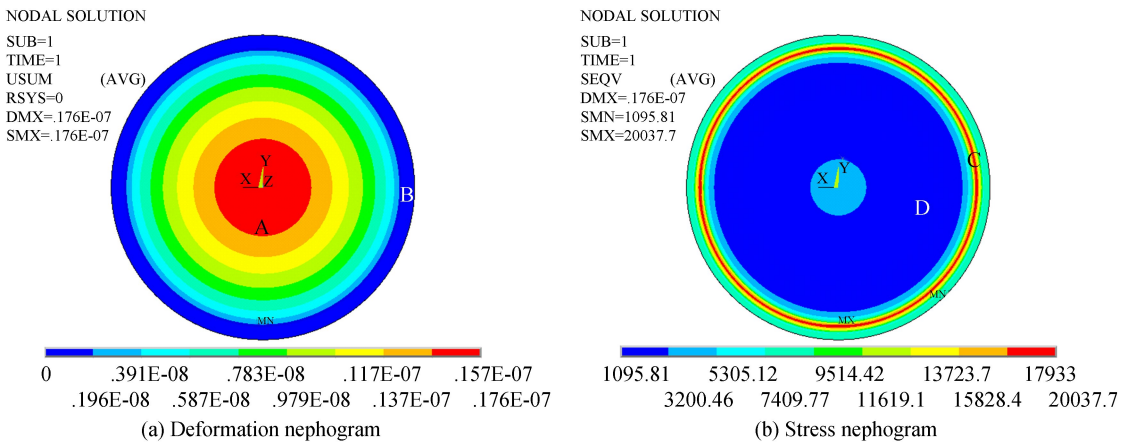


图 2 环带支撑下平面参考镜变形云图和应力图

Fig.2 Deformation nephogram and stress nephogram supported by the ring

图 2(a)为变形云图,中心红色部分(A)变形最大,越往边缘变形逐渐减小,边缘蓝色部分(B)变形最小;图(b)为装夹支撑和重力作用下的应力云图,红色环带处(C)的应力最大,深蓝色部分(D)的应力最小。

厚度为 90 mm 的平面参考镜在不同宽度的环带支撑的情况下,其面形变形和应力也不同,如图 3、4 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。

由图 3 和图 4 可以看出,相同厚度下,随着支撑环带宽度的增加,参考平面重力变形的峰谷值(Peak-Valley, PV)和均方根(Root-Mean-Square, RMS)都逐渐下降, PV 值从 0.035λ 下降到 0.022λ , RMS 值从 0.0089λ 下降到 0.0067λ ,最大应力值也变小,应力从 $29\ 652.4 \text{ Pa}$ 下降到 $16\ 275.2 \text{ Pa}$.所以支撑环带的宽度越宽参考平面的变形越小,参考镜的有效口径为 $\Phi 300 \text{ mm}$,因此支撑环带的宽度最大为 25 mm,而在控制变形量的前提下应保证通光口径尽量大,方便调整。

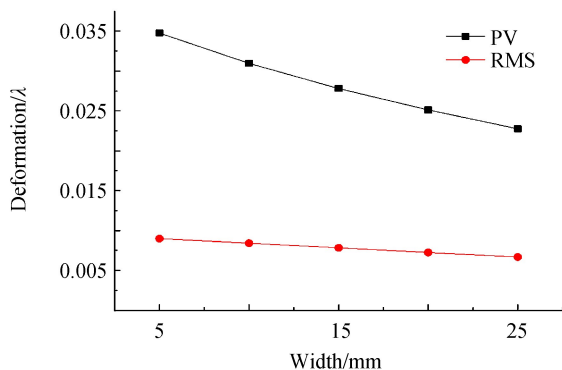


图3 平面参考镜不同环带宽度下的变形 PV、RMS 变化曲线

Fig.3 PV and RMS variation curve under different ring width of reference plane

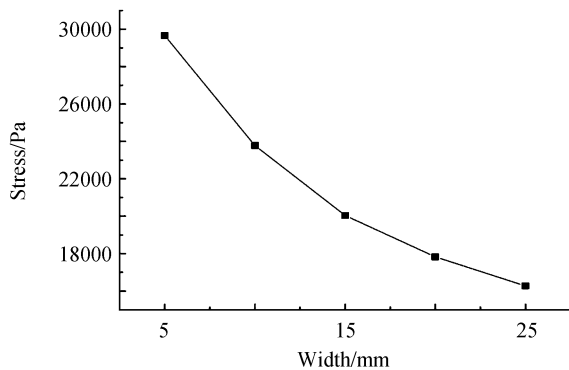


图4 平面参考镜不同环带宽度下的最大应力变化曲线

Fig.4 Maximum stress variation curve under different ring width of reference plane

不同厚度平面参考镜在宽度为 15 mm 的环带支撑的情况下,其面形变形和应力也不同,如图 5、6.

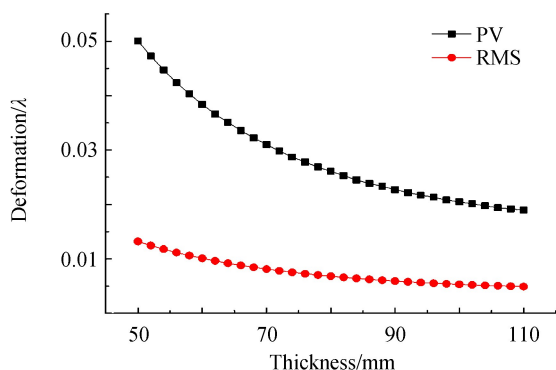


图5 平面参考镜不同厚度下的变形 PV、RMS 变化曲线

Fig.5 PV and RMS variation curve under different thickness of reference plane

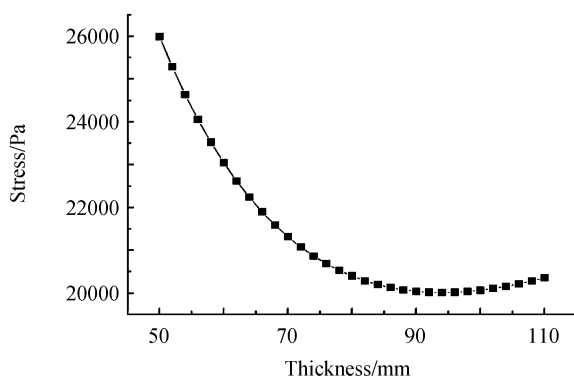


图6 平面参考镜不同厚度下环带支撑的最大应力变化曲线

Fig.6 Maximum stress variation curve under different thickness of reference plane

由图 5 和图 6 可以看出,相同支撑环带宽度下,随着平面厚度的增加,平面重力变形的 PV 值和 RMS 值都逐渐下降,最大应力值也逐渐变化.PV 值从 0.050λ 下降到 0.019λ ,RMS 值从 0.013λ 下降到 0.0049λ .在厚度 90 mm 附近应力最小,厚度超过 90 mm 后最大应力会逐渐增大.平面厚度越厚平面的变形越小,而平面厚度又不能无限加厚;应力过大会产生明显的像散问题^[7],为了减小像散对成像质量的影响,应选择最小应力处的厚度.

从图 3 和图 5 可知,自重作用下面形变形偏差 PV 值和 RMS 值都较大,不可忽略,只能选取合适的支撑方式和厚度缓解其变形.综合考虑,选取厚度为 90 mm 的平面参考镜、支撑环带宽度为 15 mm 的支撑方式.可以得到厚度 90 mm 的平面参考镜在宽度 15 mm 环带支撑下自重变形的面形偏差 PV 为 0.023λ ,RMS 为 0.0059λ .

用 ANSYS 软件分析厚度为 90 mm 的参考平面在宽度为 15 mm 的环带支撑下的变形,将数据导出,用 MATLAB 软件读取,剔除有效口径以外的变形数据.因为原始数据为非矩阵散点数据,利用 Zernike 多项式的方法拟合得到变形的面形数据矩阵,其面形 PV 为 0.023λ ,RMS 为 0.0064λ ,与原始数据的 PV 和 RMS 有较小的偏差,但在允许的误差范围内.该环带支撑下平面参考镜变形结果如图 7,其中, x 轴与 y 轴为平面直径方向上归一化后的坐标轴.

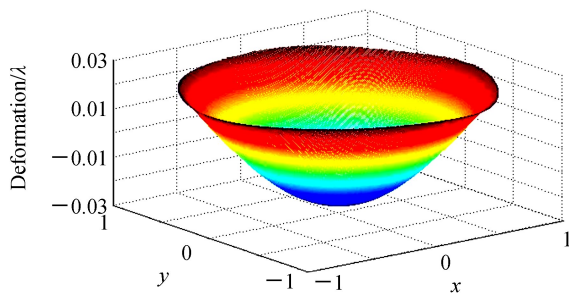


图7 环带支撑下参考面三维变形图

Fig.7 Surface of deformation supported by the ring

3 检测模拟

3.1 方法模拟

首先,用模拟的方法验证结合 Zernike 多项式的三平面检测方法的精度.假设模拟用的三个平面 K 、 L 、 M 的面形公式为

$$K = R - \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)} \quad (3)$$

$$L = (y^2 - (\frac{x}{2})^2) / R \quad (4)$$

$$M = (x^2 + y^2) / R \quad (5)$$

其中, $R = 5 \times 10^8$ mm, 模拟的三个平面的面形波面图如 8, 其面形的 PV 值和 RMS 值如表 1.

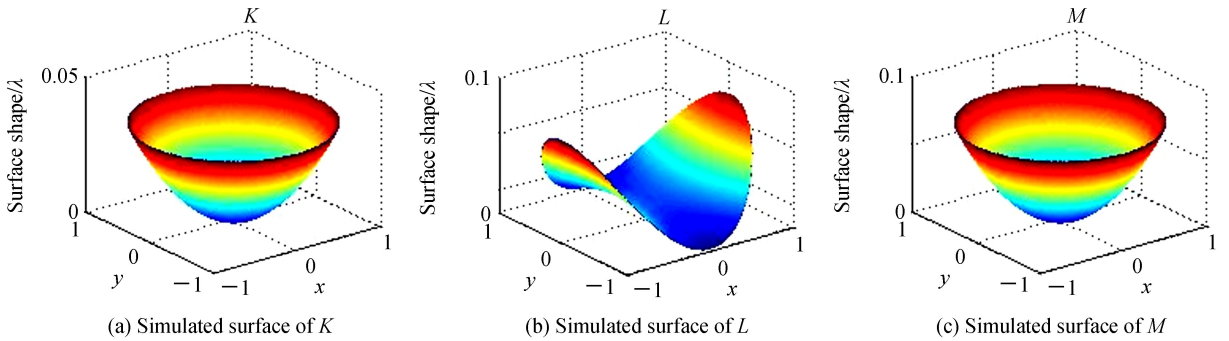


图 8 模拟平面 K 、 L 、 M 的面形

Fig.8 Simulated surface of plane K , L , M

按照式(1)的组合,可由 K 、 L 、 M 面形数据模拟得到 A 、 B 、 C 和 D 的波面数据,并获得 36 位 Zernike 多项式系数.然后,假设 K 、 L 、 M 未知,利用式(1)计算得到三平面 K 、 L 、 M 的前 36 位 Zernike 多项式系数,可拟合得到三平面 K 、 L 、 M 的面形波面,其波面与图 8 中的三个平面波面基本一致,求差获得三个平面的偏差波面、PV 值和 RMS 值如表 1.

表 1 平面 K 、 L 、 M 的面形及残差 ($\lambda = 632.8$ nm)

Table 1 Surface and deviation of plane K , L and M ($\lambda = 632.8$ nm)

		K	L	M
Simulated surface	PV/ λ	0.035	0.041	0.071
	RMS/ λ	0.010	0.021	0.021
Test surface	PV/ λ	0.035	0.041	0.071
	RMS/ λ	0.010	0.021	0.021
Deviation	PV/ λ	1.25×10^{-15}	9.08×10^{-16}	1.02×10^{-15}
	RMS/ λ	2.48×10^{-16}	1.56×10^{-16}	1.78×10^{-16}

由表 1 可见,拟合前后三平面波面残差在 $10^{-15} \lambda$ 量级,所以该绝对面互检方法计算精度很高,其误差主要来源于计算机的取舍误差.

3.2 变形检测模拟

将 ANSYS 仿真模拟得到的装夹支撑和重力作用的变形数据按照式(2)的组合方式,加载到四组参考平面上.为了探究三平面互检中参考平面的自重变形对整个检测结果的影响,在考虑到参考平面的变形后,计算三个平面面形波面时按照不考虑自重变形的式(1)进行波面计算,获得受变形参考平面影响的三个平面的波面数据.探究装夹和自重产生的变形对三个平面面形检测结果的影响.

利用结合 Zernike 拟合三平面互检算法获得三平面的波面以及 PV 值和 RMS 值,如图 9、表 2.

对比图 9 和图 8 可以看出,加入变形之后三平面的面形检测结果有明显的变化,与图 8 中的波面数据相减求差,获得残差波面,其 PV 值和 RMS 值如表 2.

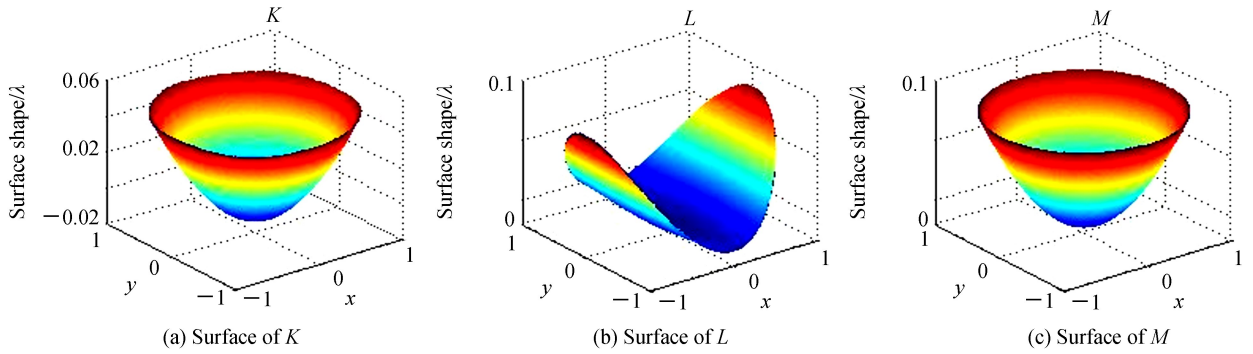


图9 加入变形后计算平面K、L、M的面形

Fig.9 Surface of plane K, L, M after deformation

表2 加入变形后三K、L、M的面形及残差($\lambda=632.8\text{ nm}$)

		K	L	M
Simulated surface	PV/ λ	0.035	0.041	0.071
	RMS/ λ	0.010	0.021	0.021
Test surface after deformation	PV/ λ	0.046	0.088	0.082
	RMS/ λ	0.013	0.021	0.024
Deviation after deformation	PV/ λ	0.011	0.011	0.011
	RMS/ λ	0.0032	0.0032	0.0032

由表2可见,在大平面装夹和自重变形的情况下进行绝对面互检,其检测面形相对于模拟面形的面形偏差较大,由于加入的模拟变形量一致,选用的平面材料大小相同,三个平面面形残差PV基本都在 0.011λ , RMS基本都在 0.0032λ .在测量组合中只有平面K、L作为参考平面,会产生装夹自重变形,而平面M只作为待测平面置于水平台上,未产生形变,但是检测结果都会受到变形的影响.

4 结论

针对大口径参考平面的装夹重力变形的问题,采用有限元分析法和结合Zernike多项式的三平面检测方法进行研究.研究了不同参数下的变形,选取90 mm的平面厚度、15 mm的环带支撑宽度.将该条件下的变形加载到结合Zernike多项式的三平面检测方法中,进行绝对面形检测仿真.对比分析加入变形前后的三平面互检结果,获得变形影响的残差PV基本都在 0.011λ , RMS基本都在 0.0032λ .表明大平面装夹重力变形对整个检测结果都有一定影响,当变形对检测结果影响的要求不高且低于 0.011λ 时,可忽略重力变形对检测结果的影响;当变形对检测结果影响的要求比较高且高于 0.011λ 时,必须考虑重力变形对检测结果的影响.后续将利用立式斐索干涉仪对大口径平面进行面形检测并进行补偿,在面形计算过程中消除自重变形量,减小自重变形对测量结果的影响,以提高大口径平面面形检测精度.

参考文献

- [1] SU Dong-qi. Research on absolute testing of the optical surface figure[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 15-17
苏东奇. 光学面形绝对检测技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 15-17.
- [2] 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.
- [3] XIE Su-long. Research on fitting precision and sampling number of Zernike polynomial fitting surface[J]. *Applied Optics*, 2010, **31**(6): 943-949.
谢苏隆. Zernike多项式拟合曲面中拟合精度与采样点数目研究[J]. 应用光学, 2010, **31**(6): 943-949.
- [4] ZHANG Wei, LIU Jian-feng, LONG Fu-nian, et al. Study on wavefront fitting using Zernike polynomials[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 675-678.
张伟, 刘剑峰, 龙夫年, 等. 基于Zernike多项式进行波面拟合研究[J]. 光学技术, 2005, **31**(5): 675-678.
- [5] FENG Jie, BAI Yu, XING Ting-wen. Fitting accuracy of wavefront using Zernike polynomials [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, **26**(2): 31-34.

- 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.
- [6] YANG Li-juan. Study on the compensation technology of lens deformation caused by gravity[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. 2014
杨丽娟. 透镜重力变形补偿技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
- [7] DING Lin, WANG Tao, YANG Hong-bo, *et al.* Investigation and design for structure of high-precision reference mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(4): 1172-1175.
丁玲, 王涛, 杨洪波, 等. 高精度标准镜支撑结构的研究与设计[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(4): 1172-1175.
- [8] FANG Bing, TIAN Wei, WANG Ru-dong, *et al.* Key technique in supporting of $\Phi 300$ mm aperture reference flat mirror [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 273-279.
方斌, 田伟, 王汝冬, 等. $\Phi 300$ mm 平面标准镜高精度支撑关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 273-279.
- [9] GRIESMANN U, WANG Quan-dou, SOONS J. Three-flat tests including mounting-induced deformations[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(9): 093601.
- [10] KONDO Y, BITOU Y. Evaluation of the deformation value of an optical flat under gravity[J]. *Measurement Science & Technology*, 2014, **25** (6) :064007.
- [11] 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.
- [12] ZHENG Xian-feng. Research on the key technologies of large plane measurement based on the phase-shifting interferometry[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012: 13-23.
郑显锋. 基于相移干涉的大平面测量关键技术研究[D]. 西安:西安工业大学, 2012: 13-23.
- [13] SHUN Wei-hong. Absolute testing of spherical surface with shift-rotation method[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences. 2014: 20-53.
宋伟红. 基于平移旋转的球面绝对检测技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2014: 20-52.
- [14] LIU Huan-huan. Absolute testing of optical plane with N bit rotation measurement[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
刘欢欢. 基于 N 位旋转测量的光学平面绝对检测技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016.
- [15] ZHAO Lei, PENG Hai-feng, YU Xin-feng, *et al.* Lens support structure of multi point equal supporting with wholly radical freedom[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(10): 43-48.
赵磊, 彭海峰, 于新峰, 等. 具有整体径向挠性的光学元件多点均匀支撑结构[J]. 光电工程, 2015, **42**(10): 43-48.
- [16] WU Xu-hua. Study on key techniques of $\phi 300$ mm phase-shifting interferometer [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007: 67-75.
武旭华. $\phi 300$ mm 移相干涉仪的关键技术研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2007: 64-75.
- [17] LIU Zhao-dong. The research of calibration and testing techniques of $\phi 600$ mm near-infrared phase-shifting Fizeau interferometer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011.
刘兆栋. $\phi 600$ mm 近红外相移斐索干涉仪校准及测试技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2011.