

基于非理想标准镜的子孔径拼接干涉检测技术研究

闫力松^{1,2}, 王孝坤¹, 罗霄¹, 曾雪峰^{1,2}, 郑立功¹, 张学军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在大口径光学镜面的检测中, 随着参考镜尺寸的增加, 加工精度的制约, 重力变形, 温度, 环境等因素的影响使得参考镜在检测中已经不能作为理想平面镜。文中基于最大似然估计(ML)算法, Zernike 多项式拟合对利用非理想平面镜作为参考镜的子孔径拼接检测建立了一套合理的拼接算法和数学模型。并结合工程实例, 完成了对 2.5 m×3.5 m 椭圆形平面镜的模拟拼接实验, 拼接前后全口径面形误差分布是一致的, 其 PV 值和 RMS 值的偏差分别为 0.022λ 与 0.001 3λ。全口径相位分布的 PV 值与 RMS 值的相对误差分别为 2.81% 与 0.81%。实验结果表明: 利用 ML 拼接算法可以高精度地完成对参考镜为非理想平面的大口径平面镜的拼接检测。

关键词: 光学检测; 干涉测量; 子孔径拼接; 最大似然估计; Zernike 多项式拟合

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0178-06

Sub-aperture stitching interferometry based on non-ideal standard mirror

Yan Lisong^{1,2}, Wang Xiaokun¹, Luo Xiao¹, Zeng Xuefeng^{1,2}, Zheng Ligong¹, Zhang Xuejun¹

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To the testing of large-diameter optical mirror, with the increase in the size of the reference mirror, it can't be treated as an ideal plane mirror because of the constraints of the machining accuracy, gravity deformation, temperature, environment impact. Based on the maximum likelihood estimation, Zernike polynomials fitting, a reasonable stitching algorithms and mathematical models was established for non-ideal standard lens sub-aperture stitching. Stitching experiment was accomplished on the computer with a 2.5 m×3.5 m oval plane mirror as an engineering example. The full-aperture surface error distribution after stitching was consistent with the original. PV and RMS deviation were 0.022λ and 0.001 3λ. The full aperture phase distribution of the PV value and the RMS value of relative error was 2.81% and 0.81% respectively. The experimental results show that: large-diameter plane mirror can be tested with non-ideal reference mirror in high precision using the ML algorithm.

Key words: optical testing; interferometry; sub-aperture stitching; maximum likelihood estimation; Zernike polynomials fitting

收稿日期: 2013-05-11; 修订日期: 2013-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(61036015); 国家高技术研究发展计划(O8663NJ090)

作者简介: 闫力松(1988-), 男, 博士生, 主要从事光学检测技术方面的研究。Email: yanlisong@yahoo.cn

导师简介: 张学军(1968-), 男, 博士生导师, 主要从事光学加工检测方面的研究。Email: Zhangxj@ciomp.ac.cn

0 引言

在军事、民用等领域,大口径光学系统发挥着越来越重要的作用。在传统的检测方法中,检测大口径平面镜通常需要与其口径大小相当的标准平面参考镜^[1],但是这些标准镜面的加工过程随着其口径的增大变得十分复杂,工艺要求也十分严格,涉及到镜坯材料、镜面支撑、镜面加工设备和镜面检测设备等,不但制作难度大,而且成本高,加工周期长。

子孔径拼接是一种通用的检测大口径平面的技术,它起源于 20 世纪 80 年代,最早用一系列较小的光学平面镜阵代替较大的参考平面,实现了对大型光学系统的检测^[2]。在 20 世纪 90 年代初,研究人员借鉴子孔径测试技术,提出了子孔径拼接技术,实现了对大口径光学平面的检测。在国外,美国 Arizona 光学中心与 QED 公司对子孔径拼接进行了较深入的研究,其中 Arizona 光学中心对 1.6 m 平面镜完成了拼接测量^[3]。美国 QED 技术公司研制成功了 551 自动拼接干涉仪,能够高精度检测口径 200 mm 以内的平面、球面、适当偏离度的非球面。国内国防科技大学,哈尔滨工业大学,中国科学院成都光电技术研究所等单位都对中小口径光学平面的子孔径拼接检测进行了一定的研究,其中中国科学院光电技术研究所利用口径为 100 mm 的小口径 Zygo 干涉仪对口径为 200 mm 的平面镜完成了拼接验证实验^[4]。

随着光学镜面尺寸的增大,若不增大参考镜的尺寸,则需增加对光学镜面的测量次数,测量误差增大。若要在测量时保证一定的测量次数,则需要增大参考镜的尺寸,而随着参考镜尺寸的增大,加工精度,重力变形,温度,环境的影响等都制约了参考镜的面形精度,使得在检测中参考镜已经不能作为理想平面镜。文中对于利用非理想平面镜作为参考镜进行大口径光学平面的拼接测量建立了一种合理的拼接算法和数学模型,并对 TMT 3 镜进行了计算机模拟拼接检测,验证了该算法的可行性。

1 拼接检测的数学模型和算法描述

子孔径拼接的基本原理即利用小口径高分辨率的干涉仪分别测量大口径光学面形的一部分,通过相应的子孔径拼接算法,对所得到的各子孔径面形

数据进行处理,得到待侧面形的全口径相位数据,从而对大口径光学镜面进行拼接检测。

利用子孔径拼接检测大口径平面镜的流程图如图 1 所示。

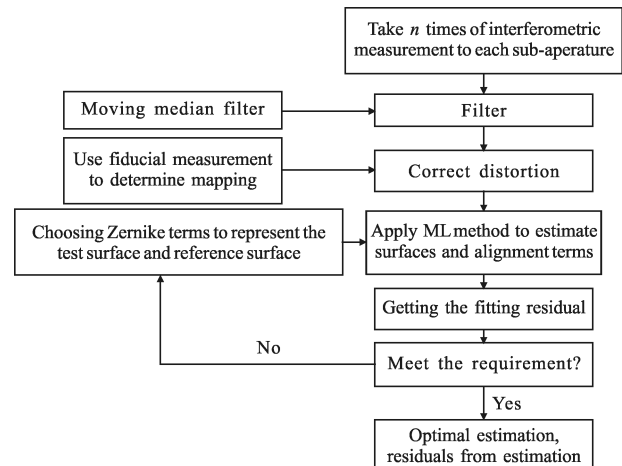


图 1 子孔径拼接检测流程图

Fig.1 Flow chart of sub-aperture stitching testing

拼接检测分 3 个步骤。

(1) 首先根据待测平面镜尺寸选取合适的干涉仪与相应的标准镜,并决定子孔径的数目与大小。通过计算机精确控制,移动,旋转,摆动干涉仪或被检测平面,完成对每个子孔径的相位信息的采集。由于检测中存在随机测量误差,其属于偶然误差,因此可以采用多次测量每个子孔径相位的平均值作为检测结果。测量结果中的误差与测量次数关系^[5]如公式(1)所示:

$$\sigma = 1 / \sqrt{\sqrt{n}} \quad (1)$$

测量时一般取 $n=7\sim 10$ 即可。

(2) 对干涉仪测量面形进行滤波与畸变校正处理。滤波中采用中值滤波法,利用 20×20 像素的中值滤波器对干涉仪测得数据进行滤波^[6]。采用多项式拟合的方式对测量面形进行畸变校正处理,拟合项取到 3 阶项即可^[7]。

(3) 将经过(1)与(2)步骤处理过的相位数据带入 ML 算法中。算法描述如下:

在大口径光学平面的拼接检测中,随着参考镜尺寸的增大,由于重力影响以及加工精度的限制,参考镜不能被当作标准平面镜。利用正交化的 Zernike 多项式^[8]来分别描述参考镜与被检镜^[7]。对于第 i 个子孔径的第 j 个相位数据,用 D_{ij} 表示:

$$D_{ij}=D_{ij}^{\alpha}+\text{residuals}=a_{i1}Z_1(\rho_a, \theta_a+\phi_{ai})+a_{i2}Z_2(\rho_a, \theta_a+\phi_{ai})+a_{i3}Z_3(\rho_a, \theta_a+\phi_{ai})+a_{i4}Z_4(\rho_a, \theta_a+\phi_{ai})-\sum_{j=5}^{mr} a_{ij}Z_j(\rho_a, \theta_a+\phi_{ai})+\sum_{j=5}^{mt} a_{ij}Z_j(\rho_a, \theta_a+\phi_{bi})+\text{residuals} \quad (2)$$

式中: D_{ij}^{α} 表示面形中可以被 Zernike 多项式表示的部分; $a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}$ 分别代表第 i 个子孔径的平移、倾斜、离焦系数; a_{ij}, a_{ij} 分别代表参考面与被检面的像差系数; Z 代表正交化的 Zernike 多项式; mr, mt 分别代表利用 $5-mr$ 阶正交化 Zernike 多项式表征参考镜面形, $5-mt$ 阶正交化 Zernike 多项式表征被检镜面形; ϕ_{ai}, ϕ_{bi} 分别表示参考镜与被检镜各自的旋转角度。

利用最大似然估计^[3,9]得到多项式系数, 则多项式系数满足条件为:

$$S=\sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=1}^{v_i} (D_{ij}-D_{ij}^{\alpha})^2=\min \quad (3)$$

式中: $(N+1)$ 代表有 $N+1$ 个子孔径测量; v_i 代表第 i 个子孔径的相位数据个数。

对 S 求极值:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_{i1}}=0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_{i2}}=0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_{i3}}=0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_{i4}}=0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_{ij}}=0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_{mj}}=0 \end{cases} \quad (4)$$

将结果写成矩阵形式

$$P=QR \quad (5)$$

其中:

$$R=[a_{01}, a_{02}, a_{03}, a_{04}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, \dots, a_{N1}, a_{N2}, a_{N3}, a_{N4}, \dots, a_{i5}, a_{i6}, \dots, a_{im}, a_{i5}, a_{i6}, \dots, a_{im}]' \quad (6)$$

$$P=[\sum_0 \phi_0 Z_1, \sum_0 \phi_0 Z_2, \sum_0 \phi_0 Z_3, \sum_1 \phi_0 Z_4, \sum_1 \phi_1 Z_1,$$

$$\sum_1 \phi_1 Z_2, \sum_1 \phi_1 Z_3, \sum_1 \phi_1 Z_4, \dots, \sum_N \phi_N Z_1, \sum_N \phi_N Z_2,$$

$$\sum_N \phi_N Z_3, \sum_N \phi_N Z_4, \dots, \sum_{i=0}^N \phi_i Z_5, \dots, \sum_{i=0}^N \phi_i Z_m, \sum_{i=0}^N \phi_i Z_{r5},$$

$$\sum_{i=0}^N \phi_i Z_{r6}, \dots, \sum_{i=0}^N \phi_i Z_{rm}]' \quad (7)$$

Q 是 $[(mr+mt-8)+4(N+1)]$ 阶的方阵。其中

$$Q_{ij}=Q_{ji} \quad (8)$$

$$Q_{i(4i-3:4i, 4i-3:4i)}=\begin{bmatrix} \sum_i Z_1^2 & \sum_i Z_2 Z_1 & \sum_i Z_1 Z_3 & \sum_i Z_1 Z_4 \\ \sum_i Z_1 Z_2 & \sum_i Z_2^2 & \sum_i Z_1 Z_3 & \sum_i Z_2 Z_4 \\ \sum_i Z_1 Z_3 & \sum_i Z_1 Z_3 & \sum_i Z_3^2 & \sum_i Z_3 Z_4 \\ \sum_i Z_1 Z_4 & \sum_i Z_2 Z_3 & \sum_i Z_3 Z_4 & \sum_i Z_4^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Q_{ij}(4i-3:4i, 4j-3:4j)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$i=1:N+1$

$$Q(4(N+1)+j, :)=\left[\sum_0 Z_1 Z_{j+4}, \sum_0 Z_2 Z_{j+4}, \sum_0 Z_3 Z_{j+4}, \sum_0 Z_4 Z_{j+4}, \dots, \sum_N Z_1 Z_{j+4}, \sum_N Z_2 Z_{j+4}, \sum_N Z_3 Z_{j+4}, \sum_N Z_4 Z_{j+4}, \dots, \sum_N Z_5 Z_{j+4}, \sum_N Z_6 Z_{j+4}, \dots, \sum_N Z_m Z_{j+4}, \sum_{i=0}^N Z_{r5} Z_{j+4}, \sum_{i=0}^N Z_{r6} Z_{j+4}, \dots, \sum_{i=0}^N Z_m Z_{j+4} \right] \quad (11)$$

$j=1:(mt+mr-8)$

通过求解矩阵 $P=Q \cdot R$, 求得矩阵 R , 利用 $a_{i5}-a_{im}$ 即可拟合出被检测镜的面形, 利用 $a_{i5}-a_{im}$ 即可拟合出参考镜的面形, 在拼接中, 通过选择足够多的项数进行面形拟合, 通过 $S=\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^v (D_{ij}-D_{ij}^{\alpha})$ 的数值来确定拼接是否满足要求, 当 S 的值小于要求值时, 拼接完成, 如果 S 值不满足要求, 则重新选择多项式(描述参考镜与被检测镜)来进行拼接, 直到 S 值满足要求为止。

2 计算机模拟拼接实验

TMT(thirty-meter telescope)是由美国加州大学和加州理工学院负责研制的新一代地基巨型光学-红外天文观测设备, 集光口径为 30 m。其聚光能力为 Keck 望远镜的 9 倍, 分辨能力为 Hubble 的 12 倍, TMT 将把望远镜灵敏度和空间分辨率等技术指标提高到前所未有的程度, 其强大的洞察宇宙的能力必将引发天文学研究的飞跃发展, 在揭示暗物质和

暗能量的本质、探测宇宙第一代天体、理解黑洞的形成与生长、探测地外行星等前沿科学领域做出重大突破性发现。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所作为 TMT 管理团队的国际合作伙伴负责该项目 3 镜的制造。TMT 三镜是一块 2.5 m×3.5 m 的椭圆形平面镜,利用 ML 算法对 TMT 三镜(M3)进行模拟拼接检测。检测装置如图 2 所示(1:干涉仪 2:离轴抛物面 3:参考镜 4:待测平面镜 M3)。

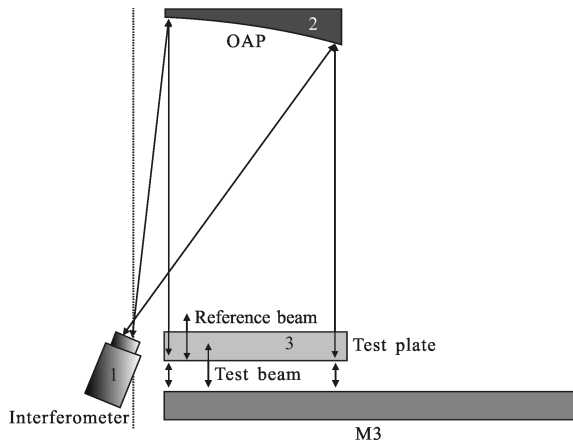


图 2 平面镜子孔径的非索检测

Fig.2 Sub-aperture Fizeau test of the plane mirror

在非索检测中,参考光为经参考镜下表面反射光,待测光为经 M3 镜上表面反射光,两束光在干涉仪中形成干涉条纹,完成对平面镜中一待测子孔径的检测^[7]。

模拟中,三镜面形如图 3 所示。

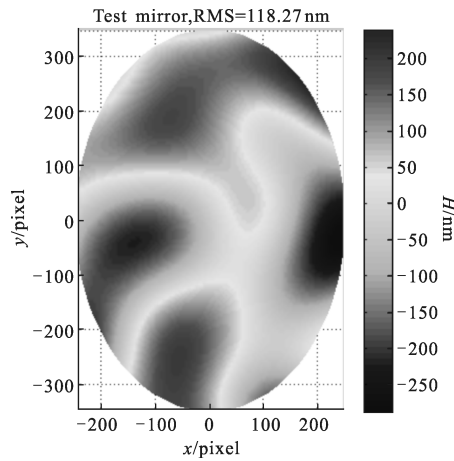


图 3 M3 面形

Fig.3 Surface of M3

其面形 PV 值与 RMS 值分别为 626.37 nm 与 118.27 nm。对待测镜面进行 Zernike 正交化处理^[6],

将其平移,倾斜,离焦去掉,得到面形如图 4 所示。其面形 PV 值与 RMS 值分别为 504.05 nm 与 104.37 nm。利用直径为 1.5 m 平面镜作为参考镜对其进行拼接检测,参考镜面形如图 5 所示。其面形 PV 值与 RMS 值分别为 379.68 nm 与 51.70 nm。

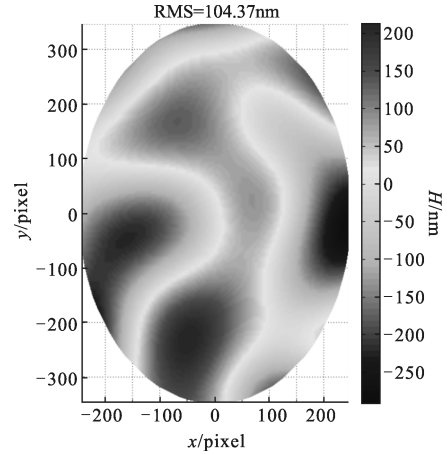


图 4 M3 去掉平移/X 方向倾斜/Y 方向倾斜/离焦后面形

Fig.4 Surface without piston/tilt/power of M3

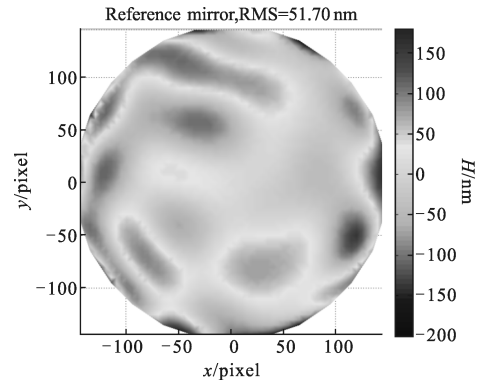


图 5 参考镜面形

Fig.5 Reference mirror

在模拟拼接中,子孔径规划如图 6 所示。利用 9

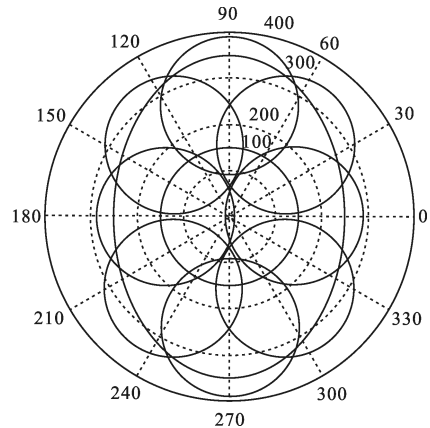


图 6 M3 测量子孔径规划

Fig.6 Sub-aperture distribution to M3

个子孔径对 M3 完成拼接测量, 在每个子孔径测量中, 参考镜绕自身旋转 4 次, 每次旋转 90° , 考虑实际调整精度与噪声影响, M3 检测装置如图 7 所示。

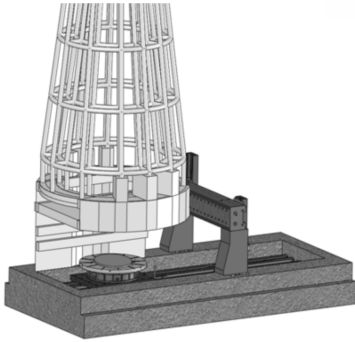


图 7 M3 检测装置

Fig.7 Test equipment of M3

被检测镜可以由导轨沿径向移动, 移动精度为 $10 \mu\text{m}/\text{m}$, 倾斜误差为 $0.5''$, 被检镜绕自身旋转时, 旋转精度为 $10''$, 机械跳变为 $10 \mu\text{m}$ 。每幅干涉图在检测时有 RMS 值为 $0.5\sim 0.6 \text{ nm}$ 的随机噪声影响。

利用上述算法对 M3 进行模拟拼接, 拼接结果如图 8 所示。

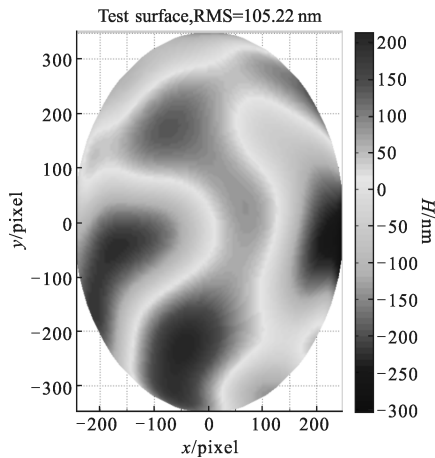


图 8 M3 拼接检测结果

Fig.8 Stitching result of M3

其中拼接结果的 PV 值与 RMS 值分别为 518.25 nm 与 105.22 nm 。

拼接结果得到的面形是对实际面形去掉离焦后的面形。面形离焦的大小由五棱镜检测获得^[8], 而后叠加到拼接所得面形中。重构的全孔径相位与输入的全孔径相位的 PV 值与 RMS 值偏差分别为:

$$\Delta_{pv} = pv' - pv = 518.25 - 504.05 = 0.022\lambda \quad (11)$$

$$\Delta_{rms} = rms' - rms = 105.22 - 104.37 = 0.0013\lambda \quad (12)$$

相位分布 PV 值与 RMS 值的相对偏差分别为:

$$\Delta_{R(pv)} = \frac{\Delta_{pv}}{pv} \times 100\% = 2.81\% \quad (13)$$

$$\Delta_{R(rms)} = \frac{\Delta_{rms}}{rms} \times 100\% = 0.81\% \quad (14)$$

为了进一步评价该模型的可行性, 求得重构的全孔径相位与全孔径相位残差 ΔW 的分布如图 9 所示。

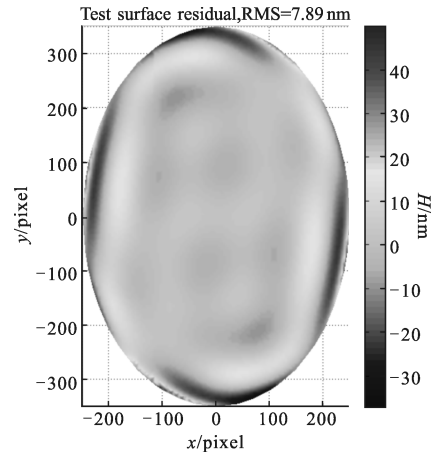


图 9 M3 全孔径残差图

Fig.9 Residual distribution of M3

其 PV 与 RMS 值分别为:

$$\Delta W_{(pv)} = \Delta W_{\max} - \Delta W_{\min} = 0.13\lambda \quad (15)$$

$$\Delta W_{(rms)} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta W_i - \overline{\Delta W})^2 \right]^{1/2} = 0.012\lambda \quad (16)$$

由以上分析可得, 拼接前后全孔径面形分布的偏差很小, 说明该算法是可行的。

3 结论

文中针对在大口径光学平面检测中, 参考镜不能作为理想平面镜的问题, 提出了一套合理的数学模型与拼接算法, 有效解决了对于非理想参考镜的拼接检测问题。不同于利用重叠区域最小二乘拟合^[10]求取拼接系数的拼接算法, 该算法无需重叠区域, 这在很大程度上减少了子孔径测量次数, 提高了拼接效率。利用 ML 算法对 TMT3 镜完成了模拟拼接检测, 从计算机仿真结果可以看出, 拼接前后全孔径相位分布的 PV 值与 RMS 值分别为 0.13λ 与 0.012λ , 说明该算法是切实可信的。由于在拼接中采用了 Zernike 多项式拟合的方式描述被检镜, 在干涉检测中获得的被检镜的一些高频信息被平滑掉, 这是算

法的不足之处,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Xu Qinglan, Wu Fan, Wu Shibin, et al. Super smooth surfacing fabrication for lightweight silicon carbide plan mirror [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2004, 31(9): 22–25. (in Chinese)
徐青兰, 伍凡, 吴时彬, 等. 轻质碳化硅平面反射镜超光滑表面加工[J]. 光电工程, 2004, 31(9): 22–25.
- [2] Chow W W, George N L. A method for sub-aperture testing interferogram reduction[J]. *Optics Letters*, 1983, 8(9): 468–470.
- [3] Peng Su. Absolute measurements of large mirrors [D]. Arozina: The University Of Arizona, 2008.
- [4] Wang Lihua, Wu Shibin, Hou Xi, et al. Measurement of flat wavefront by sub-aperture stitching interferometry [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2009, 36(6): 126–130. (in Chinese)
汪利华, 吴时彬, 侯溪, 等. 子孔径拼接干涉检测大口径平面波前[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 126–130.
- [5] Wang Xiaokun. Research on the technique for testing of aspheric surfaces by sub-aperture stitching interferometry [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, 2008. (in Chinese)
王孝坤. 子孔径拼接干涉检测非球面技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2008.
- [6] Mikael Sjudahl, Bozenko F. Oreb. Stitching interferometric measurement data for inspection of large optical components [J]. *Opt Eng*, 2001, 41(2): 403–408.
- [7] Zhao Chunyu, Robert A Sprowl. Figure measurement of a large optical flat with a Fizeau interferometer and stitching technique[C]//SPIE, 2006, 6293: 1–9.
- [8] Dai Guangming. Nonrecursive determination of orthonormal polynomials with matrix formulation[J] *Optics Letters*, 2007, 32(1): 74–76.
- [9] Peng Su, Jim Burge. Maximum likelihood estimation as a general method of combining sub-aperture data for interferometric testing[C]//SPIE, 2006, 6342: 1–6
- [10] Wang Xiaokun, Zhang Xuejun. Preliminary study on the test of asphere using sub-aperture stitching method [J]. *Optical Technology*, 2006, 32(5): 673–681. (in Chinese)
王孝坤, 张学军. 子孔径拼接检测非球面的初步研究[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 673–681.