

光学元件拼接测量中的定位误差校正

刘丁泉^{1,2} 李 明^{1,2} 盛伟繁^{1,2}

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 为了实现大口径反射光学元件表面面形的高精度测量,建立了拼接测量方法,用以得到光学元件表面的面形数据。但拼接测量存在较多误差,其中各局部面形之间的定位误差对拼接误差影响较大,需要通过校正来减少定位误差对拼接误差的影响。首先对被测镜进行局部面形划分,按着一定顺序完成所有局部面形的测量;然后,基于BFGS算法对各子口径面形之间的定位误差进行校正求解,进而得到整体面形数据;最后,使用ZYGO菲索干涉仪搭建了拼接测量设备,对反射镜中120 mm × 20 mm的区域进行测量,将直接拼接方法与位移校正拼接方法获得的面形数据与全口径整体测量获得的面形数据进行了对比,位移校正拼接方法测量面形数据与全口径拼接测量面形数据残差小,结果表明该方法可以有效提高拼接测量精度。

关键词 大口径光学元件,干涉,光学测量,拼接

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.010103

Position error compensation for large-aperture mirror stitching measurement

LIU Dingxiao^{1,2} LI Ming^{1,2} SHENG Weifan^{1,2}

1(Institution of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] In order to realize the high precision measurement of large-aperture mirror, a stitching method is established. The position errors between adjacent surfaces affect the stitching results, so compensation algorithm is needed to solve this problem. [Purpose] This study aims to reduce the effect of position errors in stitching measurement by proposing a global optimization algorithm for position error compensation. [Methods] Firstly, the basic theory of stitching measurement technology is applied to dividing the whole test mirror into several parts, each part of the surface should meet the requirement of a single measurement. Then, based on BFGS algorithm, pixel motion and two-dimensional linear interpolation, a stitching method for compensating position error is established. Finally, a ZYGO Fissor interferometer is employed to construct stitching measurement equipment to measure the 120 mm × 20 mm area in reflector by using stitching measurement method. [Results] Compared with full aperture measurement, the peak-valley (PV) and root mean square (RMS) of the height residual achieved by stitching measurement are 8.7 nm and 0.5 nm, respectively. [Conclusions] The experiment result showed that this optimization method can compensate the position error more effectively than the direct stitching method.

Key words Large aperture mirror, Interferometry, Optic measurement, Stitching

国家自然科学基金青年基金(No.11005123)资助

第一作者: 刘丁泉, 男, 1990年出生, 2013年毕业于北京化工大学, 现为博士研究生, 研究领域为X射线光学技术

通信作者: 盛伟繁, E-mail: shengwf@ihep.ac.cn

收稿日期: 2018-03-04, 修回日期: 2018-07-28

Supported by National Science Foundation for Young Scientist of China (No.11005123)

First author: LIU Dingxiao, male, born in 1990, graduated from Beijing University of Chemical Technology in 2013, doctoral student, focusing on X-ray optical technology

Corresponding author: SHENG Weifan, E-mail: shengwf@ihep.ac.cn

Received date: 2018-03-04, revised date: 2018-07-28

大口径光学元件在同步辐射领域广泛应用, 对大口径光学元件的面形精度要求越来越高, 相应的测量精度要求也越来越高^[1-2]。X射线反射镜主要是全反射, 所以口径或者曲率较大, 因而干涉仪单次测量难以达到测量要求, 需要拼接。拼接测量方法可以很好地解决测量精度与成本间的矛盾, 成为测量大口径光学元件表面面形的一种高精度测量方法。

拼接方法首先由美国亚利桑那大学光学中心的Kim等^[3]在1981年第一次提出。1997年, 法国CILAS的Bray首次将干涉测量和面形拼接方法相结合, 研制出世界上第一台实体拼接干涉仪^[4]。2002年, 美国阿贡国家实验室的Assoufid等^[5]搭建的半自动拼接测量系统对X光学元件表面面形进行测量。在实际测量中, 首先对各子口径面形进行测量, 然后根据各子口径面形之间的相对位置进行拼接, 得到整体面形。各子口径面形之间的定位误差对拼接误差有较大影响, 很多学者对相对位置求解做了相关研究。1998年, Phase Shift Technology公司的Tang^[6]提出了对各子口径面形之间的6个自由度进行补偿实现拼接。2002年, 瑞士吕勒奥理工大学的Sjodahl等^[7]提出使用迭代方法对各子口径面形相对位置进行求解的方法。2003年, 日本大阪大学的Yamauchi等^[8]研制出显微拼接干涉仪(Microstitching Interferometry, MSI), 使用反馈系统来降低误差。2004年, 日本大阪大学的Mimura等^[9]提出了相对角拼接干涉仪(Relative Angle Determinable Stitching Interferometry, RADSI), 在拼接装置中加入一块平面参考镜来计算各局部面形之间的相对角度, 在一定程度上减小了拼接误差。2009年, 哈尔滨工业大学王月珠等^[10]提出了基于标记的Givens变换, 实现了拼接子孔径的精确定位和消除旋转的处理, 降低了环形子孔径直接拼接对导轨的高精度要求。2010年, 西安交通大学的张鹏飞^[11]提出了基于双目视觉的子孔径拼接测量系统, 可以快速给出各个子孔径之间的相对坐标变换。2012年, 光电技术研究院汪利华等^[12]提出了搜索法, 有效校正位移定位误差。2013年, 长春光机所闫力松等^[13]提出了基于三角剖分与最小二乘拟合算法, 实现了面形数据的拼接测量。2015年, 长春光机所张敏等^[14]提出了含定位误差校正项的全局最优优化拼接算法, 相对于一般方法对位移误差有较强的校正效果。

当各子口径面形的定位存在较大误差时, 重叠区域有误差, 计算得到的相对位置也存在误差, 进而会影响拼接精度。当机械导轨精度不高时, 需要对相对位置进行校正。本文在相对位置为6自由度的基础上进行校正, 采用了基于BFGS的优化方法, 辅以像素平移、二维插值, 并且对平面反射镜120 mm × 20 mm的区域进行了测量比较, 结果表明该校正方法可以有效提高拼接精度。

1 校正方法原理

拼接测量过程如下: 首先将待测光学元件表面面形划分为几个局部区域, 然后按一定的顺序进行测量; 最后根据各子口径面形之间的相对位置关系, 通过拼接得到整体面形^[15]。

图1中有A与A'两个局部面形, 且存在重叠部分, A经过坐标系移动可以得到A'。A'与A面形测量数据分别用 $F(x', y')$ 和 $F(x, y)$ 表示, (x, y) 所在坐标系通过移动 (x_0, y_0) 可以得到 (x', y') 。当把这两个局部面形拼接在一起时, 可以将A作为基准, 同时认为这两个局部面形为刚体, 在移动过程中不可避免地会产生平移、倾斜和旋转误差。两个物体之间的相对位置有6个自由度, 引入平移距离 x_0 和 y_0 的移动误差 Δx_0 和 Δy_0 , 在垂直被测镜方向的测量值之差 c , x 和 y 方向的倾斜系数 a 和 b , 以及绕 z 轴的旋转角 θ 。 F 与 F' 两个局部面形数据之间的关系可以用式(1)表示:

$$F(x, y) = F'(x - (x_0 + \Delta x), y - (y_0 + \Delta y)) + ax + by + c + \theta \frac{\partial F'(x', y')}{\partial \theta} \quad (1)$$

理论上, 重叠区域在不同测量中的面形数据应该是相同的。通过相对位置校正, 求取重叠部分测量数据之差的平方值的最小值, 来减少相对位置误差对拼接精度的影响。

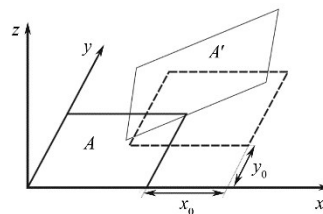


图1 拼接原理图
Fig.1 Principle of stitching

$$\sum \left\{ F(x, y) - \left(\frac{F(x - (x_0 + \Delta x), y - (y_0 + \Delta y)) + ax + by + c}{\theta} \right)^2 \right\} \rightarrow \min \quad (2)$$

实际测量中,本文采用全局优化拼接方法对多个局部面形的拼接^[14-15]。当局部面形个数为 n 时,

第 i 个局部面形和第 j 个局部面形拼接时的拼接误差 σ_{ij} 为:

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\sum \left\{ \frac{F_i(x, y) - (F_j(x - (x + \Delta x_{ij}), y - (y + \Delta y_{ij})) + a_{ij}x + b_{ij}y + c_{ij})}{c_{ij} + \theta_{ij} \frac{\partial F_i(x - (x + \Delta x_{ij}), y - (y + \Delta y_{ij}))}{\partial \theta_{ij}}} \right\}^2} \quad (3)$$

当第 i 和第 j 个局部面形不存在重叠部分时, σ_{ij} 为0。这两个局部面形拼接时,第 i 和第 j 个局部面形的校正系数 P_{ij} 为:

$$P_{ij} = [\Delta x_{ij} \quad \Delta y_{ij} \quad a_{ij} \quad b_{ij} \quad c_{ij} \quad \theta_{ij}]^T \quad (4)$$

则全局拼接误差 σ 为:

$$\sigma = \{[(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{14}^2 + \dots + \sigma_{1n}^2) + (\sigma_{23}^2 + \sigma_{24}^2 + \dots + \sigma_{2n}^2) + \dots + (\sigma_{(n-1)n}^2)]\}^{1/2} \quad (5)$$

则整体面形拼接系数 P 为:

$$P = [P_{12} \quad P_{13} \quad P_{14} \quad \dots \quad P_{1k} \quad P_{23} \quad P_{24} \quad \dots \quad P_{(n-1)n}]^T \quad (6)$$

其中有 $3n(n-1)$ 个系数。为了实现高精度拼接,需要从各子口径面形相对位移位置中找到一个能够实现拼接效果最好,即拼接误差最小的相对位置,完成拼接。通过以上分析可以得到 $\sigma = f(P)$,即为对优化目标函数 $f(P)$ 进行优化,求取拼接误差最小时 P 的数值。拼接是单目标函数的多维最优化问题,BFGS算法具有良好的数值效果和快速收敛性,本文使用BFGS法来进行优化求解。拼接测量最优化步骤如下^[16]:

1)对待测面形进行区域划分,按着一定的顺序进行测量;

2)设置各子口径面形相对位置初始点 P_0 和精度阈值 ε ,令初代海森矩阵 $H_0=I$, I 为单位矩阵;

$$d_0 = -H_0 - 1 \cdot \nabla f(P_0)$$

3)确定搜索方向,且令 $k=0$;

4)利用一维搜索法求步长 t_k ,使得

$$f(P_k + t_k d_k) = \min_{t \geq 0} f(P_k + t_k d_k)$$

令 $P_{k+1} = P_k + t_k d_k$;

5)若 $\|\nabla f(P_{k+1})\| \leq \varepsilon$,即误差极值不再变化,停止迭代,达到拼接相对位置最佳点 P_{k+1} ,否则转第6步;

6)令

$$H_{k+1} = H_k + \frac{S_k(S_k)^T}{(S_k)^T B_k} \left[1 + \frac{(B_k)^T H_k B_k}{(S_k)^T B_k} \right] - \frac{1}{(S_k)^T B_k} [S_k(B_k)^T H_k + H_k B_k (S_k)^T]$$

$$d_k = -H_k - 1 \cdot \nabla f(P_k)$$

其中: $S_k = P_{k+1} - P_k$, $B_k = \nabla f(P_{k+1}) - \nabla f(P_k)$,设置 $k=k+1$,且取,转第4步。

上述流程步骤中, H_k 表示第 k 次迭代时的海森矩阵, P_k 表示第 k 次迭代时整体面形拼接系数, $\nabla f(P_k)$ 表示第 k 次迭代时拼接误差的梯度向量。通过上述步骤最终得到最佳 P 值,即各子口径面形的相对位置参数,然后根据参数实现面形拼接。 P 中的移动误差 Δx 和 Δy 需要按像素级、亚像素级区分,分别进行处理。对于像素级平移误差,采用平移的方法进行校正;而对于亚像素级平移误差,由于移动距离一般不会是整数倍像素数,使用双线性插值方法进行相对位置的校正。

如图2所示,面形数据的双线性插值原理就是分别在 x 和 y 两个坐标系方向上进行线性插值。假设位置校正后认为某重叠对应点应为 M_1 ,其面形数据值为 $g(P)$,但实际应该在 $L(x, y)$ 点,还需要进行 $(x - x_1, y - y_1)$ 的校正,则 P 的数据根据 $M_1 = (x_1, y_1)$ 、 $M_2 = (x_2, y_1)$ 、 $M_3 = (x_1, y_2)$ 、 $M_4 = (x_2, y_2)$ 4个点的值得。

这样校正后的数据值:

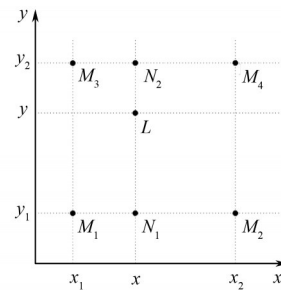


图2 双线性插值示意图
Fig.2 Diagram of bilinear interpolation

$$g(L) \approx \frac{(x_2 - x)(y_2 - y)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} g(M_1) + \frac{(x - x_1)(y_2 - y)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} g(M_2) +$$
$$\frac{(x_2 - x)(y - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} g(M_3) + \frac{(x - x_1)(y - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} g(M_4)$$

(7)

二维线性插值主要是对平移误差中亚像素级的误差进行校正。本文根据最优化后得到的 P 值,对整体面形进行拼接,最终得到整体表面面形数据。

2 仿真模拟与实验验证

如图3所示,使用ZYGO公司15.24 cm菲索干涉仪搭建平面拼接干涉测量装置系统。为了验证本文位移校正方法的可行性,使用菲索干涉仪对反射镜中45 mm × 30 mm的区域进行测量得到整体面形数据,如图4中所示,其峰谷值(Peak-Valley, PV)为58.7 nm,均方根(Root Mean Square, RMS)值为11.9 nm。

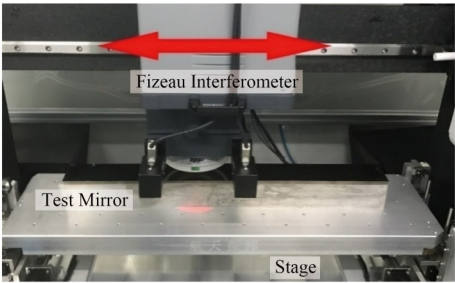


图3 实验装置实物图
Fig.3 Photograph of experimental setup

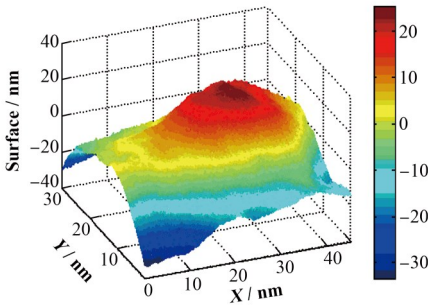


图4 拼接模拟前全口径面形数据
Fig.4 Results of full aperture before stitching

然后,将该块面形分割为两个30 mm × 30 mm的局部子口径,重叠部分区域为50%,然后接着图5所示的两个局部面形进行拼接测量。

随机产生一组相对误差系数,如表1所示,将第二个局部子口径按着初始误差系数相对于第一个局部子口径位置进行相对位置变化。其中第一个局部子口径面形数据如图6所示,PV值为58.7 nm,RMS

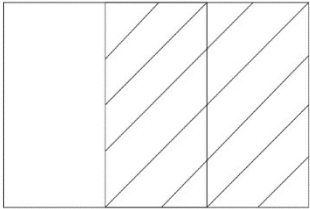


图5 拼接布局图
Fig.5 Distribution of stitching

值为12.2 nm;第二个局部子口径面形数据如图7所示,PV值为51.1 nm,RMS值为11.6 nm。

表1 相对位移误差系数
Table 1 Position error coefficients

系数 Coefficients	初始误差系数 Initial error coefficients	误差补偿系数 Compensation coefficients
Δx	0.014 5	0.014 1
Δy	0.035 3	0.034 1
a	0.008 5	0.008 5
b	0.005 4	0.004 3
c	0.002 7	0.002 7
θ	0.000 1	0.000 1

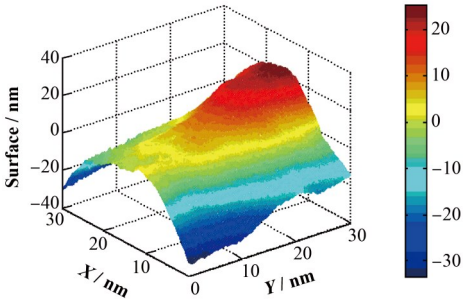


图6 第一个局部子口径面形数据
Fig.6 Results of first sub-aperture

将图6和图7两个局部子口径按着位移误差补偿方法进行拼接可以得到整体拼接面形数据如图8所示,其PV值为58.7 nm,RMS值为11.9 nm。拼接补偿系数如表1所示,通过对比可以得到初始误差系数与误差补偿系数没有太大区别。最后,将原始面形数据与拼接得到的面形数据做差可以得到图9所示,PV值为0.011 6 nm,RMS值为0.000 4 nm。

使用图3中搭建的拼接干涉测量装置系统对长方形反射镜中尺寸为120 mm × 20 mm的区域进行

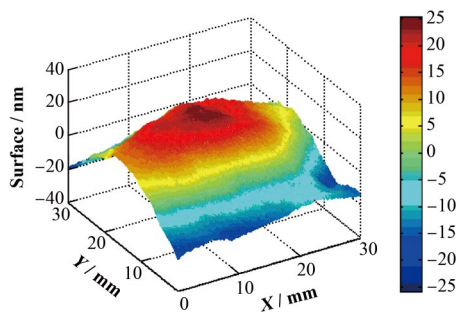


图7 第二个局部子口径面形数据
Fig.7 Results of second sub-aperture

拼接测量。拼接测量中将面形分为5个局域部分,每个局域部分大小是40 mm×20 mm,重叠率是50%,拼接布局图如图10所示。

在实验过程中,首先,使用菲索干涉仪对待测面全口径进行整体测量,测量结果如图11所示,PV值为855.8 nm。然后,使用菲索干涉仪测量待测镜的区域面形,分别使用直接拼接方法和位移校正拼接方法进行拼接,面形为图12和图13,其中直接拼接方法指为基于3自由度,使用最小二乘法求解的拼接测量方法。其中直接拼接方法测量得到面形PV值为851.4 nm,位移校正拼接方法得到的面形PV值为853.5 nm。最后,与全口径整体测量得到的面形数据进行比较,计算残值,图14为直接拼接方法与全口径整体测量得到的面形数据的残差,PV值为20.3 nm,RMS值为1.3 nm;图15为位移校正拼接方法与全口径整体测量得到的面形数据残差,PV值为8.7 nm,RMS值为0.5 nm。对比可以得到,位移校正拼接方法得到拼接结果比直接拼接方法的测量误差小。

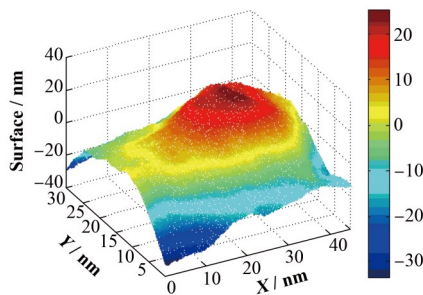


图8 拼接后全口径面形数据
Fig.8 Results of full aperture after stitching

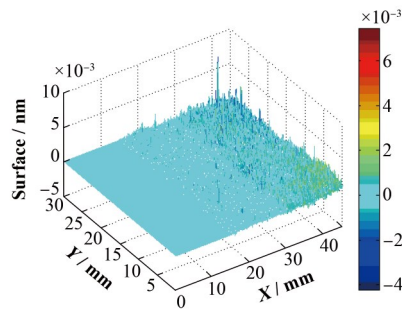


图9 拼接后全口径与原始全口径面形数据残差
Fig.9 Residual results between stitching method and full aperture

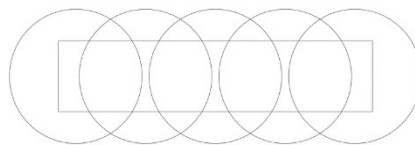


图10 拼接布局图
Fig.10 Distribution of stitching

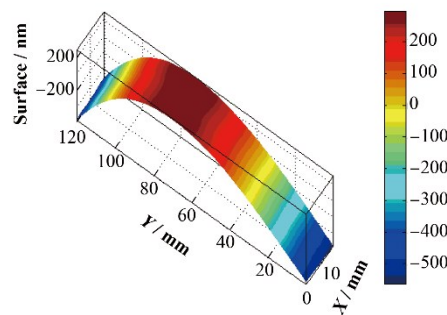


图11 整体测量面形数据
Fig.11 Results of full aperture

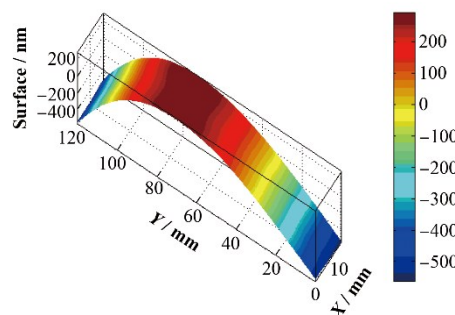


图12 直接拼接方法拼接结果
Fig.12 Stitching results of direct stitching method

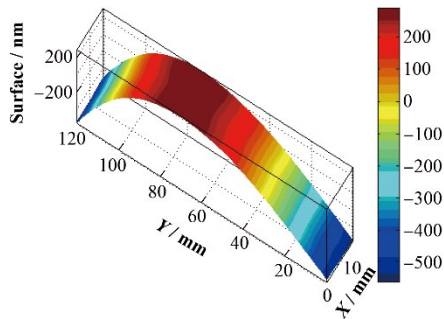


图13 位移校正拼接方法结果
Fig.13 Stitching results of position error compensation method

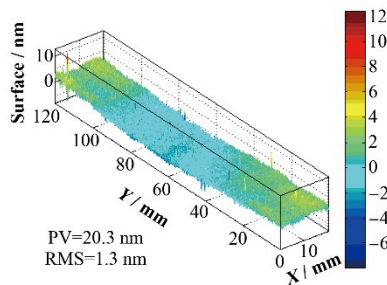


图14 直接拼接方法与全口径整体测量得到的面形数据残差
Fig.14 Residual results between direct stitching method and full aperture

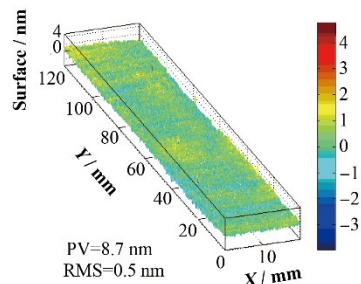


图15 位移校正拼接方法与全口径整体测量得到的面形数据残差
Fig.15 Residual results between position error compensation stitching method and full aperture

3 结语

本文针对拼接测量中各子口径相对位置对拼接误差的影响问题,基于BFGS优化算法,辅以像素移动、二维插值提出了一种相对位移位置校正方法,该方法能够实现对拼接误差即目标函数 $f(P)$ 的优化,得到拼接误差最小时相对位置校正系数 P 的数值。

在本文实验中位移校正拼接方法与全口径整体测量得到的面形数据残差的RMS值为0.5 nm,相对于子口径的绝对测量误差在一个数量级,表明了本

文提出的校正方法满足了拼接要求。

本文仅针对同步辐射领域平面镜反射的测试,但是对于柱面反射镜一维拼接、鞍面镜二维拼接等曲面的拼接测量,还需要考虑转换角度等自由度的误差影响。另外在数据筛选等还有改进空间,例如通过遗传算法实现对数据的筛选,亦或通过小波变化方法实现数据在频域的拼接,实现更高精度的拼接。

参考文献

- 1 Yumoto H, Koyama T, Matsuyama S, *et al.* Stitching interferometry for ellipsoidal X-ray mirrors[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, **87**(5): 6.
- 2 彭川黔, 何玉梅, 王劼. 基于法线追迹原理的新型高精度面形检测系统[J]. 核技术, 2017, **40**(9): 090101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.090101.
PENG Chuanqian, HE Yumei, WANG Jie. A novel high-accuracy deflectometric profiler system based on normal tracing principle[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(9): 090101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.090101.
- 3 Kim C J, Wyant J C. Sub-aperture test of a large flat on a fast aspheric surface[J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, **71**: 1587.
- 4 Bray M. Stitching interferometer for large optics using a standard interferometer, description of an automated system[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1997, **3047**: 911–918.
- 5 Assoufid L, Bray M, Qian J, *et al.* 3-D surface profile measurements of large X-ray synchrotron radiation mirrors using stitching interferometry[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2002, **4782**: 21–28.
- 6 Tang S. Stitching: high-spatial-resolution microsurface measurements over large areas[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1998, **3479**: 43–49.
- 7 Sjudahl M, Bozenko F O. Stitching interferometric measurement data for inspection of large optical components[J]. Optical Engineering, 2002, **41**(2): 403–408.
- 8 Yamauchi K, Yamamura K, Mimura H, *et al.* Microstitching interferometry for X-ray reflective optics, review of scientific instruments[J]. American Institute of Physics, 2003, **74**(5): 2894–2897.
- 9 Mimura H, Yumoto H, Matsuyama S, *et al.* Microstitching interferometry for nano focusing mirror optics[J]. Optical Engineering, 2004, **5533**: 171–180.

- 10 王月珠, 田义, 李洪玉, 等. 环形子孔径拼接干涉检测非球面的建模与实验[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3082–3087.
WANG Yuezhu, TIAN Yi, LI Hongyu, *et al.* Modeling and experiment of testing asphere by annular subaperture stitching interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2009, **29**(11): 3082–3087.
- 11 张鹏飞, 赵宏, 周翔, 等. 采用立体视觉实现子孔径拼接测量的工件定位[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(2): 503–511.
ZHANG Pengfei, ZHAO Hong, ZHOU Xiang, *et al.* Work-piece location in sub-aperture stitching test based on stereo vision[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, **18**(2): 503–511.
- 12 汪利华, 吴时彬, 任戈, 等. 子孔径拼接检测光学系统波前机械定位误差补偿算法[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0112003.
WANG Lihua, WU Shibin, REN Ge, *et al.* Location error compensation algorithm for measuring optical system wave front by sub-aperture stitching[J]. Acta Optica Sinica, 2012, **32**(1): 0112003.
- 13 闫力松, 王孝坤, 罗霄, 等. 采用三角剖分算法的子孔径拼接检测技术[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(7): 1793–1797.
YAN Lisong, WANG Xiaokun, LUO Xiao, *et al.* Sub-aperture stitching testing technology based on triangulation algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, **42**(7): 1793–1797.
- 14 张敏, 隋永新, 杨怀江. 用于子口径拼接干涉系统的机械误差补偿算法[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(4): 934–940.
ZHANG Min, SUI Yongxin, YANG Huaijiang. Mechanical error compensation algorithm for subaperture stitching interferometry[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, **23**(4): 934–940.
- 15 Otsubo M, Katsuyuki O, Jumpei T, *et al.* Measurement of large plane surface shape with interferometric aperture synthesis[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1992, **1720**: 444–447.
- 16 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
CHEN Baolin. Optimization theory and algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.