

# 基于迭代梯度算法的子孔径拼接检测技术研究

郑立功<sup>1</sup> 闫力松<sup>1,2</sup> 王孝坤<sup>1</sup> 薛栋林<sup>1</sup> 胡海翔<sup>1,2</sup> 张学军<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了解决粗大调整误差下大口径光学平面镜的子孔径拼接检测问题, 基于迭代梯度算法, 建立了一套合理的拼接算法和数学模型, 同时编制了拼接程序。结合工程实例, 利用  $\Phi 600\text{mm}$  干涉仪实现了对  $\Phi 800\text{mm}$  平面镜的拼接测量。检测中, 基于靶标对各子孔径实现对准, 拼接所得面形光滑连续无狭缝。实验结果表明, 利用迭代梯度算法可以高精度地完成粗大调整误差下大口径平面镜的拼接检测。

**关键词** 测量; 光学检测; 干涉测量; 子孔径拼接

中图分类号 O439; O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.011202

## Research on Sub-Aperture Stitching Testing Technology Based on Iterative Gradient Algorithm

Zheng Ligong<sup>1</sup> Yan Lisong<sup>1,2</sup> Wang Xiaokun<sup>1</sup> Xue Donglin<sup>1</sup>

Hu Haixiang<sup>1,2</sup> Zhang Xuejun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Chang ch un, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** To accomplish the sub-aperture stitching testing for large aperture flat mirror under considerable adjustment error, we establish a reasonable stitching algorithm and mathematical model based on iterative gradient algorithm. At the same time, relative program is written for stitching. Combined with engineering examples, we measure a  $\Phi 800\text{mm}$  flat mirror with a  $\Phi 600\text{mm}$  interferometer in stitching method. In the measurement, we accomplish the alignment between sub-apertures with targets and the stitching result is smooth. Experimental results show that stitching measurements of large aperture flat mirror could be well down with the this algorithm under considerable adjustment errors.

**Key words** measurement; optical testing; interferometry; sub-aperture stitching

**OCIS codes** 120.3180; 120.6650; 220.4610; 220.4840

## 1 引言

随着科学技术的发展, 大口径光学系统在空间光学、军事、高科技、民用等领域发挥着越来越重要的作用。传统光学检测中, 为了以高精度实现对大口径光学平面镜的检测, 通常需要与检测元件口径相当的大口径干涉仪或者搭建 Ritchey-Common 形式的检验光路<sup>[1]</sup>。而在这些检测方式中, 需要配备与被检镜口径相当的高精度标准镜, 分别包括标准平面镜与标准球面镜。然而这些标准镜的加工过程随其口径的增大变得十分复杂, 加工难度大, 加工周期长。

子孔径拼接检测技术作为一种低成本、高精度的大口径光学检测方式最早在 1982 年由 Arizona 光学中心的 Kim<sup>[2]</sup>提出, 而后众多研究人员对其进行了较为深入的研究, 在国外, 以亚利桑那大学与 QED 公司的研

收稿日期: 2013-08-09; 收到修改稿日期: 2013-09-10; 网络出版日期: 2013-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)、国家 863 计划(O8663NJ090)

作者简介: 郑立功(1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: ligongz@yahoo.com

究最具代表性。其中,亚利桑那大学 Burge 等<sup>[3]</sup>在考虑光学标准镜面形误差的情况下,对 1.6 m 口径光学平面镜完成了拼接检测。QED 公司于 2003 年成功研制出子孔径拼接仪,可以对口径 200 mm 以下光学平面、球面及适度偏离量的非球面镜完成拼接检测,同时近年基于可调零位补偿(VON)技术,利用部分补偿方式对较大偏离量凸非球面光学元件实现了拼接检测<sup>[4]</sup>。国内自 20 世纪 90 年代起也有多家单位对此进行了研究,其中国防科技大学从几何学观点对拼接算法进行了研究,提出了子孔径拼接算法<sup>[5]</sup>;成都光电所对环形子孔径拼接检测进行了理论研究,并提出了相应的环形子孔径拼接算法<sup>[6-8]</sup>。

本文基于迭代运算与梯度运算提出了一套拼接算法,基于靶标标定实现对各子孔径间的位置对准。由于靶标并不能保证高对准精度,结合工程实例,利用  $\phi 600\text{mm}$  干涉仪在粗大调整误差下实现了对  $\phi 800\text{mm}$  平面镜的拼接检测,同时对拼接结果进行了精度分析,验证了该算法的可行性。

## 2 拼接算法数学模型

子孔径拼接是指依据被检镜面的面形参数及干涉仪的技术参数将被检面划分为若干个子区域,对各子区域单独检测,再将检测结果拼接、合并,从而获得整个被检面面形信息的检测方法。

利用子孔径拼接检测大口径平面镜的流程图如图 1 所示。

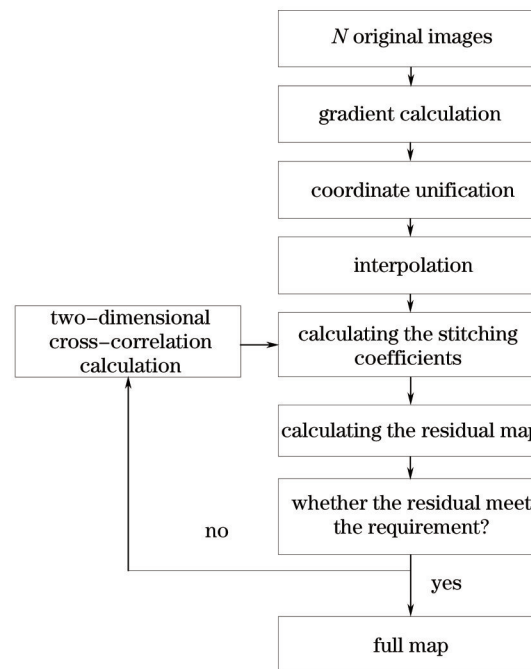


图 1 子孔径拼接检测流程图

Fig.1 Flow chart of sub-aperture stitching testing

拼接检测分三个步骤。

1) 首先依据被检镜面尺寸与干涉仪口径对被检面进行子孔径规划,对每个子孔径采集干涉图,并将采集相位数据换算成梯度数据。其中 X 方向梯度定义如下:

$$\nabla_{zx}(x,y) = [z(x+1,y) - z(x,y)]/2, \quad (1)$$

$\nabla_{zx}(x,y)$  表示对于数据点  $(x,y)$  在 X 方向的梯度值,  $z(x+1,y)$  表示点  $(x+1,y)$  检测相位值,  $z(x,y)$  表示点  $(x,y)$  检测相位值。同理有

$$\nabla_{zy}(x,y) = [z(x,y+1) - z(x,y-1)]/2, \quad (2)$$

式中  $\nabla_{zy}(x,y)$  表示点  $(x,y)$  在 Y 方向的梯度值。

对于点  $(x,y)$ , 在梯度数据中该点取值定义为

$$\nabla_z(x,y) = \frac{\nabla_{zx}(x,y)}{|\nabla_{zx}(x,y)|} [\nabla_{zx}(x,y)]^2 + \frac{\nabla_{zy}(x,y)}{|\nabla_{zy}(x,y)|} [\nabla_{zy}(x,y)]^2. \quad (3)$$

2) 依据靶标位置对各个子孔径进行全口径坐标统一,同时定义全口径坐标系下插值点坐标<sup>[9-11]</sup>。

3) 利用最小二乘拟合对各子孔径调整系数进行求解,假设检测子孔径数目为  $N$ ,则

$$[(\sum_k^{N-1} G_{ik})_i] = [(Q_{ij} - \delta_{ij} \sum_k^{N-1} Q_{ik})_j] [(R_i)_i], \quad (4)$$

式中子矩阵  $G$ 、 $Q$ 、 $R$  的表达式如下<sup>[12,13]</sup>:

$$G_{ij} = \begin{bmatrix} \sum_{i \cap j} x \Delta(\nabla z) \\ \sum_{i \cap j} y \Delta(\nabla z) \\ \sum_{i \cap j} \Delta(\nabla z) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$Q_{ij} = \begin{bmatrix} \sum_{i \cap j} xx & \sum_{i \cap j} xy & \sum_{i \cap j} x \\ \sum_{i \cap j} yx & \sum_{i \cap j} yy & \sum_{i \cap j} y \\ \sum_{i \cap j} x & \sum_{i \cap j} y & n_{ij} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$Q_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$R_i = \begin{bmatrix} p_i \\ a_i \\ b_i \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}, \quad (9)$$

式中  $\Delta(\nabla z) = \nabla z_j(x, y) - \nabla z_i(x, y)$  表示第  $j$  个子孔径检测数据中点  $(x, y)$  梯度数据与第  $i$  个子孔径检测数据中点  $(x, y)$  梯度数据的差;  $p_i, a_i, b_i$  分别表示对于第  $i$  个子孔径待计算的调整系数。

当计算得到每个子孔径各自的调整系数后,将其调整系数叠加到检测数据中,同时对任意两个相邻子孔径在重叠区域内的相位值做差,判断得到的残差图[均方根(RMS)值]是否满足要求。若满足要求,则得到全口径检测数据,若不满足要求,则进行迭代运算

$$\begin{cases} x_1 = x_2 + dx + \Delta x \\ y_1 = y_2 + dy + \Delta y \end{cases}, \quad (10)$$

式中  $(x_1, y_1)$  为点  $(x, y)$  在子孔径 1 内的位置坐标,  $(x_2, y_2)$  为点  $(x, y)$  在子孔径 2 内的位置坐标。理论上在经过靶标对准  $(dx, dy)$  后  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  应描述同一点,然后由于对准精度等因素影响,会存在对准误差  $(\Delta x, \Delta y)$ 。对经过调整系数修正的相邻子孔径梯度数据做互相关运算:

$$W(x, y) = \nabla z_i(x, y) ** \nabla z_j(x, y), \quad (11)$$

式中\*\*表示互相关,则  $W(x, y)$  峰值位置即为  $(\Delta x, \Delta y)$ 。

对经过  $(\Delta x, \Delta y)$  调整后各孔径的梯度数据重新进行最小二乘求解,直到残差满足要求位置,获得全口径检测数据。

### 3 拼接检测实验及结果精度分析

在实际工程中,利用  $\Phi 600\text{mm}$  干涉仪对  $\Phi 800\text{mm}$  平面镜完成了拼接测量。实验装置如图 2 所示,其中调整装置无任何刻度,在粗大调整误差下依靠靶标确定各子孔径相对位置。检测中,利用七个子孔径对被检面实现了全口径覆盖,如图 3 所示。子孔径检测结果如图 4 所示。

基于本文所述拼接算法,对子孔径检测结果进行拼接,拼接结果如图 5 所示。其中面形峰谷(PV)值与 RMS 值分别为  $1.453\lambda$  与  $0.070\lambda$ 。

由图 5 可以看出,拼接结果光滑连续,验证了拼接算法的可靠性与准确性。

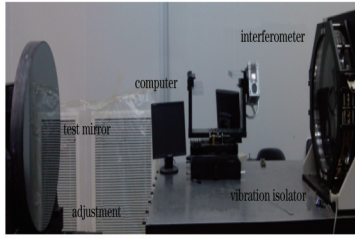


图2 检测装置图

Fig.2 Experimental setup

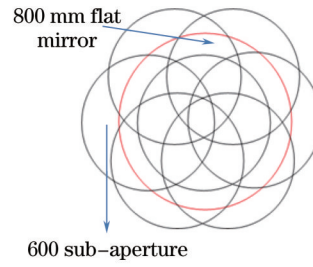


图3 子孔径分布图

Fig.3 Distribution of sub-apertures

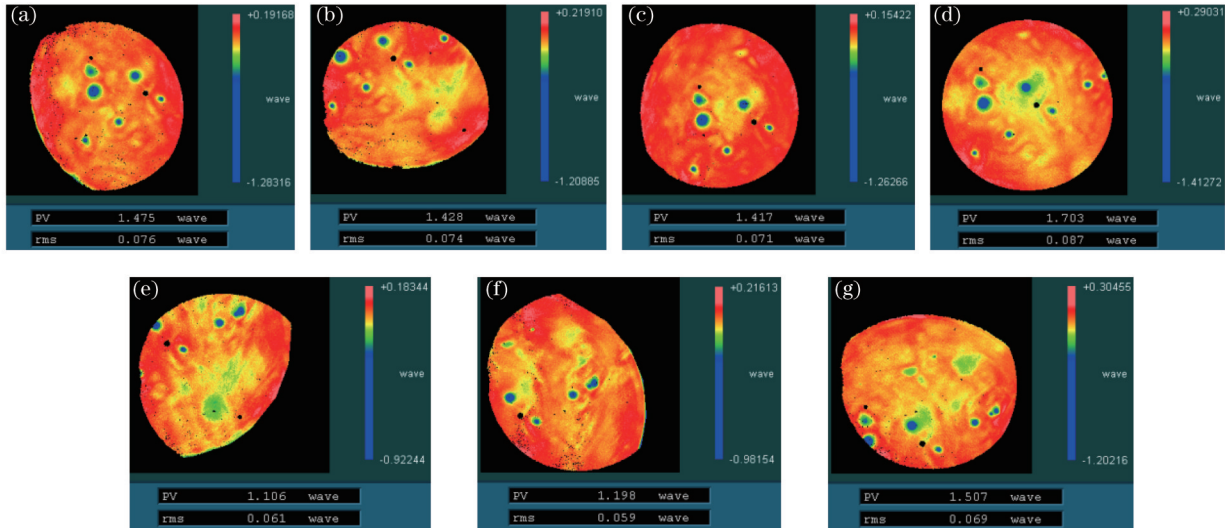


图4 子孔径检测结果

Fig.4 Sub-aperture interference testing results

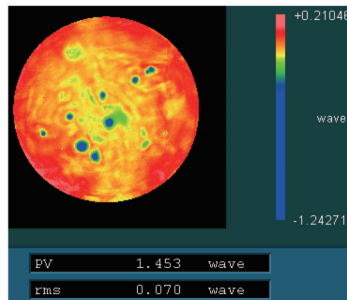


图5 拼接结果

Fig.5 Stitching result

### 4 结 论

基于迭代运算、梯度运算和最小二乘拟合运算,在粗大调整误差下提出了一套合理的拼接算法与数学模型,并在工程上利用  $\Phi 600\text{mm}$  干涉仪实现了对  $\Phi 800\text{mm}$  平面反射镜的拼接测量,拼接结果光滑,无狭缝。该方法具有设备简单、实用性强等诸多优点,为大口径光学镜面的高精度检测提供了一种有效可行的方法。

### 参 考 文 献

1 Li Xinnan, Zhang MingYi. Study on the sub-aperture stitching interferometry for large plano optics optical techni [J]. Optical Technique, 2006, 32(4): 514-517.  
 李新南, 张明意. 大口径光学平面的子孔径拼接检验研究[J]. 光学技术, 2006, 32(4): 514-517.  
 2 C J Kim. Polynomial fit of interferograms [J]. Appl Opt, 1982, 21(24): 4521-4525.

- 3 James H Burge, Chunyu Zhao. Applications of subaperture stitching interferometry for very large mirrors [C]. SPIE, 2012, 8450: 84500X.
- 4 Christopher Supranowitz, Chuck McFee, Paul Murphy. Asphere metrology using variable optical null technology [C]. SPIE, 2012, 8416: 841604.
- 5 Shanyong Chen, Shengyi Li, Yifan Dai, et al.. Iterative algorithm for subaperture stitching test with spherical interferometers [J]. J Opt Soc Am A, 2006, 23(5): 1219–1226.
- 6 Xi Hou, Fan Wu, Li Yang, et al. Experimental study on measurement of aspheric surface shape with complementary annular subaperture interferometric method [J]. Opt Express, 2007, 15(20): 12890–12899.
- 7 Hongyan Xu, Hao Xian, Yudong Zhang. Algorithm and experiment of whole-aperture wavefront reconstruction from annular subaperture Hartmann-Shack gradient data [J]. Opt Express, 2010, 18(13): 13431–13443.
- 8 Xu HongYan, Xian Hao, Zhang Yudong. Algorithm for reconstructing the whole-aperture wavefront from annular subaperture Hartmann-Shack gradient data [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112005.  
徐洪艳, 鲜浩, 张雨东. 利用环形子孔径哈特曼-夏克斜率数据复原全孔径波前相位算法研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112005.
- 9 Pengfei Zhang, Hong Zhao, Xiang Zhou, et al.. Sub-aperture stitching interferometry using stereovision positioning technique [J]. Opt Express, 2010, 18(14): 15216–15222.
- 10 Wang LiHua, Wu ShiBin, Ren Ge, et al.. Location error compensation algorithm for measuring optical system wave front by subaperture stitching [J]. Acta Optia Sinica, 2012, 32(1): 0112003.  
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.
- 11 Wang Cong, Zhang Junwei, Du Li, et al.. Technology progress of grating tiling [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 080501.  
王聪, 张军伟, 杜丽, 等. 光栅拼接技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 080501.
- 12 Masashi O, Katsuyuki O, Jumpei T. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms [J]. Opt. Eng, 1994, 33(2): 608–613.
- 13 Xu XinHua, Wang Qing, Song Bo, et al.. Measurement system of optical homogeneity of large-size optical material based on subaperture stitching technique [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412002.  
徐新华, 王青, 宋波, 等. 基于子孔径拼接技术的大尺寸光学材料均匀性检测系统[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412002.