

## 子孔径拼接检测凸球面技术研究

闫公敬, 张宪忠

(齐齐哈尔大学 应用技术学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161000)

**摘要:** 为了解决大口径凸球面镜高精度检测问题, 建立了子孔径拼接检测数学模型, 模型以全局优化算法及最小二乘拟合算法为基础, 优化得出被检测镜面全口径面形, 并基于该数学模型对一口径  $\phi 120$  mm 凸球面镜完成了拼接检测, 检测中共测量 5 个子孔径。由检测结果可以看出, 拼接面形表面光滑连续, 无拼接痕迹。为了验证拼接精度, 在子孔径检测中另取一用于评价拼接精度的自检验子孔径, 完成了对应子孔径的检测, 并将拼接结果与自检验子孔径检测结果进行了点对点相减, 从而获得残差图, 实验结果表明: 残差图 PV 值为  $0.014\lambda$ , RMS 值为  $0.003\lambda$ , 表明拼接结果的可信性, 验证了算法的可靠性与准确性。

**关键词:** 光学检测; 干涉测量; 子孔径拼接; 凸球面镜

**中图分类号:** O439; O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0517002

## Technology of sub-aperture stitching testing optical convex spherical mirror

Yan Gongjing, Zhang Xianzhong

(Institution of Technology, Qiqihar University, Qiqihar 161000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of large optical convex spherical mirror testing, a stitching model was established, which was based on global optimization algorithm and least-square method. The full aperture map can be achieved with this relative algorithm. At the same time, based on our model, a  $\phi 120$  mm convex spherical mirror was tested. In the testing, five subapertures were tested. It can be seen that the stitching map is smooth and continuous, with no stitching mark. To evaluate the stitching accuracy, a subaperture called self-calibration subaperture was tested. Comparing the stitching map with the self-calibration map point by point, the residual map can be got. It can be seen from the residual map that the PV value is  $0.014\lambda$  and the RMS value is  $0.003\lambda$ , proving the reliability and accuracy of the stitching algorithm.

**Key words:** optical testing; interferometry; sub-aperture stitching; convex spherical mirror

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)

作者简介: 闫公敬(1964-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事光学检测技术方面的研究。Email: yan\_gong\_jing@163.com

## 0 引言

随着科学技术的发展,大口径光学系统在空间遥感中得到越来越广泛的应用,其中比较有代表性的如 TMT(Thirty Meter Telescope Project),其口径达到了 30 m;E-ELT (European Extremely Large Telescope),其主镜直径为 39.3 m,由 798 个六角形小镜片拼接而成。光学元件作为光学系统的核心部件,其面形精度直接影响了光学系统的观测水平。如何对系统中的大口径光学元件完成高精度检测一直是国内外研究的难点与焦点。

大口径球面反射镜作为一类常用的光学元件,其高精度检测通常利用干涉仪出射标准球面波即可直接实现。然而,对于大口径凸球面镜,干涉仪出射的标准球面波很难对其完成全口径覆盖,这时利用子孔径拼接检测技术,可以拓展干涉仪的动态范围与分辨率,从而完成对被测凸球面镜的全口径检测,同时亦可获得被检面形的中高频信息。

子孔径拼接检测最早于 1982 年由 C.J.Kim 提出<sup>[1]</sup>,该阶段主要有两种全口径面形重构算法,即 Thunen-Kwon 算法与同步拟合算法(Simultaneous Fit Method)<sup>[2-3]</sup>,这两种算法均是以 Zernike 多项式拟合为基础,而后在 1986 年 Stuhlinger 提出了 DPM 算法(Discrete Phase Method)<sup>[4]</sup>,该算法中,面形由在各像素点上获得的相位值来描述,这是子孔径拼接检测中一次重大的进步。近年来国外的 QED 公司及 Arizona 光学中心对子孔径拼接技术进行了比较深入的研究,其中 QED 公司研制开发了 SSI(球面子孔径拼接测量仪),其可以对口径 200 mm 内的球面镜及平面镜完成拼接检测,而后再次开发了 ASI(非球面子孔径拼接测量仪),并应用其对偏离量为 1 000λ 的非球面镜完成了拼接检测<sup>[5]</sup>。Arizona 光学中心的苏鹏博士在大口径光学平面镜检测中,针对在检测中标准镜面形误差不可忽略这一问题,提出一种绝对检测的子孔径拼接算法,并将其应用于 1.6 m 口径平面镜的子孔径拼接检测(标准镜口径为 1 m)<sup>[6-7]</sup>。

国内从 20 世纪 90 年代有多家单位对此进行了研究,其国防科技大学的陈善勇博士建立了基于几何方法的拼接模型<sup>[8]</sup>,浙江大学的杨甬英教授等人发展了环形子孔径拼接理论模型<sup>[9]</sup>,中国科学院长

春光学精密机械与物理研究所的王孝坤等研究人员基于全局优化算法分别对环形子孔径拼接及圆形子孔径拼接的基础理论及基本原理进行了分析与研究<sup>[10]</sup>。

文中从最小二乘拟合理论出发,建立了子孔径拼接检测凸球面镜的数学模型,同时对一口径为 φ120 mm 的凸球面镜完成了拼接检测,并将拼接结果与用于精度分析的子孔径检测结果进行对比分析,从而论证拼接精度。

## 1 子孔径拼接数学模型

子孔径拼接作为一种通用的以小检大的检测手段,在大口径光学平面,凸面的检测中有着广泛的应用。干涉检测凸球面镜原理如图 1 所示。

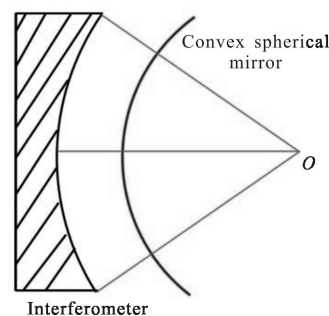


图 1 凸球面镜检测示意图

Fig.1 Testing of convex spherical mirror

其中,点 O 是干涉仪的焦点,亦是球面镜的球心。对于凸球面镜,其口径为 D,顶点曲率半径为 R,检测干涉仪标准镜口径为 D<sub>1</sub>,焦距为 f,F# 记为 F,则:

$$F = \frac{f}{D_1} \quad (1)$$

若

$$\begin{cases} f > R \\ F < \frac{R}{D} \end{cases} \quad (2)$$

则可用该标准镜对被测球面镜直接进行全口径检测,若

$$\begin{cases} f > R \\ F \geq \frac{R}{D} \end{cases} \quad (3)$$

则需要对被检测元件进行拼接检测。

假设检测子孔径数目为 N,以第 N 个子孔径作为基准子孔径,第 i 个子孔径的相位值在基准子孔

径坐标系内可以表示为:

$$\Phi'_i(x,y) = \Phi_i(x,y) + \sum_{k=1}^N a_{ik} f_k(x,y) \quad (4)$$

式中:  $\Phi_i(x,y)$  为第  $i$  个子孔径的检测结果;  $f_k(x,y)$  可以为定义好的任何形式;  $L$  为定义好的调整项系数, 对于球面检测, 其形式如式(5)所示:

$$\begin{cases} f_1(x,y) = x \\ f_2(x,y) = y \\ f_3(x,y) = 1 \\ f_4(x,y) = x^2 + y^2 \end{cases} \quad (5)$$

计算拼接系数时, 需要使目标函数达到最小值, 即:

$$\begin{cases} \text{Function} = \min \\ \text{Function} = \sum_{i=1 \dots N} \sum_{\substack{j=1 \dots N \\ j \neq i}}^{i \cap j} [(\Phi_i(x,y) + \sum_{k=1}^L a_{ik} f_k(x,y)) - (\Phi_j(x,y) + \sum_{k=1}^L a_{jk} f_k(x,y))]^2 \end{cases} \quad (6)$$

公式(6)可以写为线性方程组的形式, 表示为:

$$P = Q \cdot R \quad (7)$$

式中:  $P, Q, R$  可以表示成如下形式。

(1)  $P$  是一个  $(N-1) \times L$  行的向量, 用  $P_{(j-1) \cdot k}$  代表第  $(j-1) \cdot L + k$  行元素,  $j$  代表子孔径的序号, 同时  $k$  代表拼接系数所对应方程的序号, 则

$$\begin{cases} 1 \leq k \leq L \\ 1 \leq j \leq N-1 \end{cases} \quad (8)$$

同时

$$P_{(j-1) \cdot k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \sum_{i \cap j} f_i(x,y) (\Phi_j(x,y) - \Phi_i(x,y)) \quad (9)$$

(2)  $Q$  是一个  $(N-1) \times L$  阶矩阵, 同理用  $Q_{(j-1) \cdot k((l-1) \cdot k')}$  代表第  $((l-1) \cdot L + k')$  行, 第  $l$  列的元素,  $k'$  代表子孔径的序号, 代表拼接系数所对应方程的序号, 则

$$\begin{cases} 1 \leq k' \leq L \\ 1 \leq l \leq N-1 \end{cases} \quad (10)$$

同时

$$Q_{(j-1) \cdot k((l-1) \cdot k')} = \begin{cases} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \sum_{i \cap j} f_j(x,y) \cdot f_i(x,y) & j=l \\ \sum_{j \cap l} f_j(x,y) \cdot f_k(x,y) & j \neq l \end{cases} \quad (11)$$

(3)  $R$  是一个  $(N-1) \times L$  行的向量, 同理用  $R_{(j-1) \cdot k}$  代表第  $(j-1) \cdot L + k$  行元素, 则

$$R_{(j-1) \cdot k} = a_{jk} \quad (12)$$

式中:  $a_{jk}$  是对应于第  $j$  个子孔径方程  $f_k(x,y)$  的拼接系数。

在通过矩阵求解获得各子孔径相对于基准子孔径的调整项系数后, 即可将各子孔径的调整项去掉, 从而获得被检测镜的全口径面形。

## 2 拼接实验与精度分析

为了验证文中所述拼接算法的检测精度, 对一口径  $\varphi 120 \text{ mm}$ , 曲率半径  $332 \text{ mm}$  的凸球面镜进行了拼接检测, 其中检测用标准镜口径为  $150 \text{ mm}$ , 标准镜头  $F\#$  为  $3.5$ 。

检测光路图如图 2 所示。

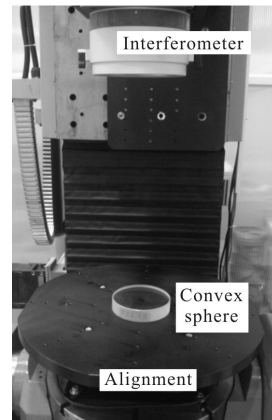


图 2 实验装置图

Fig.2 Experimental setup

针对检测元件参数, 对被检测球面镜进行了子孔径规划, 如图 3 所示。

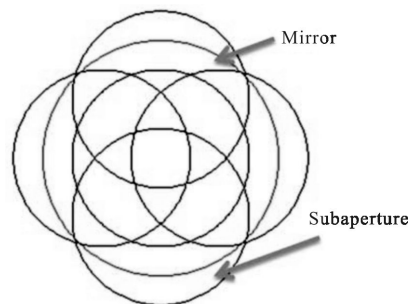


图 3 子孔径规划

Fig.3 Subaperture design

实验中,共规划了五个子孔径,各子孔径检测结果如图 4 所示。

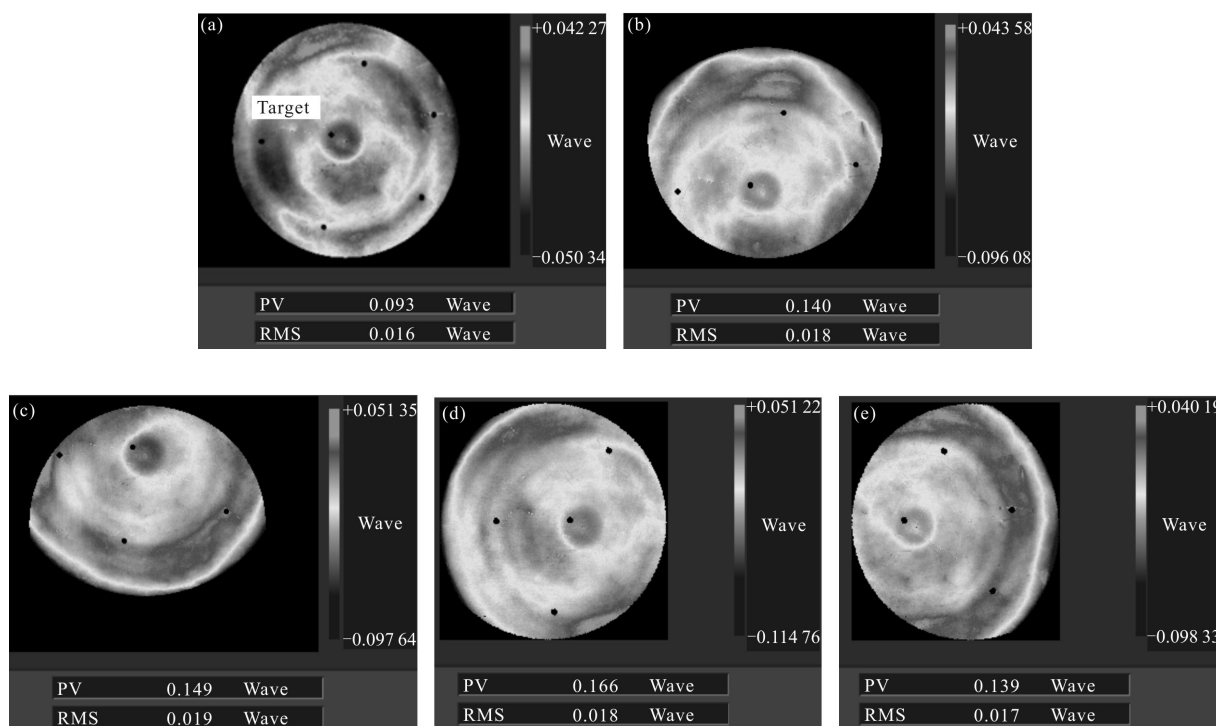


图 4 子孔径检测结果

Fig.4 Subaperture testing maps

基于文中拼接算法,利用靶标完成各子孔径间对准,靶标在检测结果为如图 4 中所示,靶标处无检测数据,其对应拼接结果如图 5 所示。

精度,在子孔径检测时额外随机检测一个子孔径数据,称之为自检验子孔径。该实验中自检验子孔径检测结果如图 6 所示。

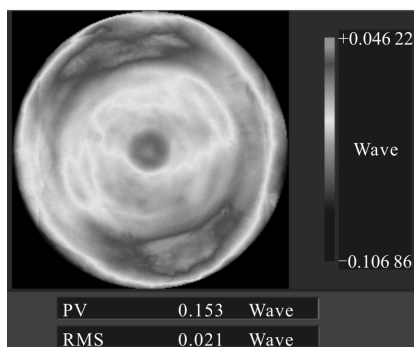


图 5 子孔径拼接结果

Fig.5 Stitching map

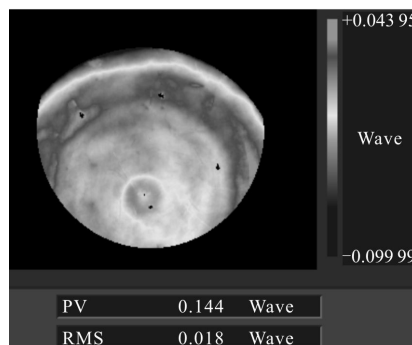


图 6 自检验子孔径检测结果

Fig.6 Subaperture testing map for self-examination

由图 5 可以看出,拼接结果光滑连续,没有拼接痕迹。通常,为了进一步评价拼接精度,将拼接结果与全口径检测结果进行对比分析。然后实际检测中,之所以进行拼接检测,通常是由于无法直接对待测元件完成全口径检测。在这种情况下,为了评价拼接

计算自检验子孔径与拼接结果在自检验子孔径区域内的残差图来评价拼接精度,实验中残差图如图 7 所示。

由图 7 可以看出,残差图的 PV 值为  $0.014\lambda$ ,RMS 值为  $0.003\lambda$ ,验证了拼接结果的精度与可信性。

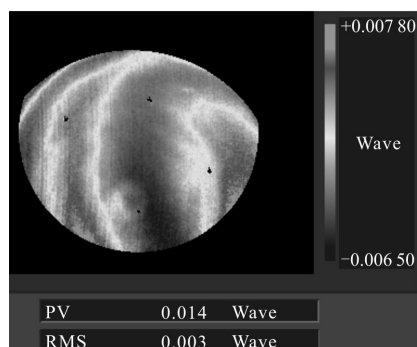


图 7 残差图

Fig.7 Residual map

### 3 结 论

文中提出了基于矩阵变换的子孔径拼接算法, 基于靶标完成了各子孔径间的对准, 同时基于工程实例, 对口径  $\varphi 120\text{ mm}$  的凸球面镜完成了拼接检测, 拼接结果光滑, 无狭缝。为了进一步评价拼接精度, 实际检测中额外检测了自检验子孔径, 由拼接结果与自检验子孔径检测结果的残差图可以看出二者是一致的, 残差图 PV 值为  $0.014\lambda$ , RMS 值为  $0.003\lambda$ , 证明了基于文中所述算法可以很好的完成对于大口径光学球面镜的拼接检测, 为面形的最终收敛提供了检测中的技术保证。

#### 参考文献:

[1] Kim C J. Polynomial fit of interferograms [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(24): 4521-4525

[2] Thunen J G, Kwon O Y. Full aperture testing with subaperture test optics[C]//SPIE, 1982, 351:19-27

[3] Chow W W, Lawrence G N. Method for subaperture testing interferogram reduction [J]. *Opt Lett*, 1983, 8(9): 468-470

[4] Stuhlinger T W. Subaperture optical testing: experimental verification[C]//SPIE, 1986, 656: 118-127

[5] Supranowitz C, Fee C M, Murphy P. Asphere metrology using variable optical null technology[C]//SPIE, 2012, 8416: 841604-1-841604-5.

[6] Su P, Burge J H, Parks R E. Application of maximum likelihood reconstruction of subaperture data for measurement of large flat mirrors [J]. *Appl Opt*, 2010, 49: 21-31.

[7] Peng Su. Absolute measurements of large mirrors [D]. Arizona: The University of Arizona, 2008.

[8] Chen S Y, Li S Y, Dai Y F, et al. Lattice design for subaperture stitching test of a concave paraboloid surface [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(3): 2280-2286.

[9] Shi Tu, Liu Dong, Zhang Lei, et al. Reverse optimization reconstruction method for aspheric testing in a nonnull interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 6 (34): 0612007-1-0612007-8. (in Chinese)  
师途, 刘东, 张磊, 等. 非球面非零位检测的逆向优化面形重构[J]. 光学学报, 2014, 6(34): 0612007-1-0612007-8.

[10] Shi Tu, Yang Yongying, Zhang Lei, et al. Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 26-46. (in Chinese)  
师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术 [J]. 中国光学, 2014, 7(1): 26-46.

[11] Wang Xiaokun, Wang Lihui, Deng Weijie, et al. Measurement of large aspheric mirrors by non-null testing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 3 (19): 520-528. (in Chinese)  
王孝坤, 王丽辉, 邓伟杰, 等. 用非零位补偿法检测大口径非球面反射镜[J]. 光学 精密工程, 2011, 3(19): 520-528.