

一种去除拼接干涉图中累积误差的简单方法

冯晓宇,宗肖颖

(北京空间机电研究所,北京 100190)

摘要: 用子孔径拼接干涉法来检测大口径光学元件和光学系统是一种成本较低的有效手段。但是随着子孔径数目的增加,拼接得到的面形图中存在着很大的累积误差严重影响了拼接的精度,因此如何简单快速地去掉累积误差成为子孔径拼接干涉检测法研究的主要问题之一。文中介绍了一种简单且快速的方法去除拼接中的累积误差。并且对一个大小为 180 mm×80 mm 的平面镜进行了 6 个子孔径拼接检测实验。在实验中,文中提出的方法很好的去除了拼接中的累积误差。

关键词: 累积误差的去除; 子孔径拼接; 干涉测量

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0997-05

A simple method for removing accumulative error in subaperture stitching

Feng Xiaoyu, Zong Xiaoying

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

Abstract: Subaperture stitching interferometry is an effective means for measuring optical surfaces and systems. But the more subapertures are used, the more serious effect the accumulative error in stitching has on the accuracy. So finding a simple and fast way to remove the accumulative error is the key for improving subaperture stitching. An effective and quick method to eliminate the accumulative error in stitching was proposed in this paper. The plane mirror which was 180 mm×80 mm was tested by six subapertures stitching in the experiment. And the method which was proposed in this paper could get rid of the accumulative error in stitching very well.

Key words: removing the accumulative error; subaperture stitching; interferometry

收稿日期:2013-07-13; 修订日期:2013-08-22

作者简介:冯晓宇(1987),女,硕士生,主要从事子孔径拼接检测面形方面的研究。Email:fxiaoyu1688@yahoo.com.cn

导师简介:宗肖颖(1968-),女,研究员,硕士生导师,硕士,主要从事面形检测,相机性能检测及装调等方面的研究。

Email:zongxiaoying@sina.com

0 引言

随着现代光学应用技术的飞速发展,对光学系统性能的要求也日益提高,光学元件朝着大型化,高精度的方向发展,但是大口径平面镜、大口径的凸非球面镜、小 F 数的大口径凸球面镜面形以及大口径光学系统的波像差检测均存在检测难题。子孔径拼接法可以利用小口径干涉仪通过拼接测试的手段来获得大口径光学元件的面形,该方法在大口径光学元件的现场测试中具有优势。自从 1981 年美国 Arizona 大学光学中心的 Kin C. 和 Wyant J. 提出子孔径的概念以来^[1],子孔径拼接检测大口径光学元件的研究成为国内外的研究热点之一^[2-4]。但是随着子孔径数目的增加,累积误差成为主要影响拼接精度的误差。1992 年日本学者 Otsubo 在子孔径拼接中提出了“误差均化”的思想,这使得拼接精度得到了大大的提高^[5]。虽然采用“误差均化”思想就不存在累积误差的问题,但是随着子孔径数目的增加其算法存在复杂度高、计算量大、可扩展性不好等问题。因此如何能快速简单地去除累积误差的影响就显得尤为重要。

1 子孔径拼接的基本原理

首先以两个子孔径的拼接来介绍一下子孔径拼接的基本原理,如图 1 所示^[6]。通过移动被测件或干涉仪使得两者的相对位置分别处于 W_1 和 W_2 ,且两者有重叠区域(图 1 中的阴影部分)。理想状态下如

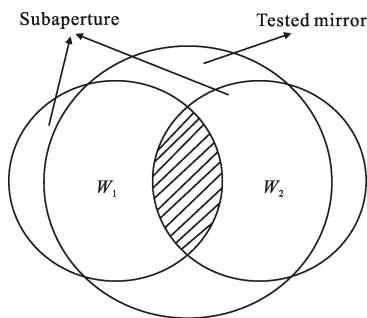


图 1 子孔径拼接的基本原理

Fig.1 Basic principle of subaperture stitching

图 2(a)所示,两次检测得到的重叠区域的面形信息应该是一致的^[7]。但是在实际检测过程中,由于相对移动存在位移误差会导致两子孔径 W_1 和 W_2 间存在平移量和倾斜量如图 2(b)所示,并且由于环境中气流、

振动等的影响,这使得实际两次测得重叠区部分 W_{10} 和 W_{20} 的面形值是不相同的,不考虑环境影响重叠区两次检测结果之间的关系可以表示为公式(1):

$$W_{20}(x, y) = ax + by + c + W_{10}(x, y) \quad (1)$$

式中: (x, y) 表示重叠区中一个像素点的坐标值; a 、 b 分别表示沿 x 、 y 方向的倾斜量; c 是沿光轴(z)方向的平移量。

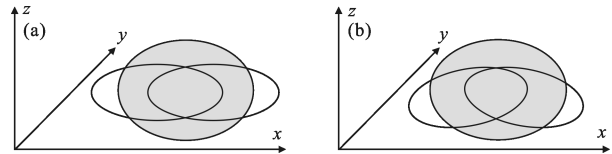


图 2 理想子孔径拼接检测与实际的相比较

Fig.2 Contrast of subaperture stitching interferometry in theory and in fact

这说明两个子孔径并非在同一参考面上,根据重叠区域面形一致的原则在不考虑环境影响的情况下可以找到 a 、 b 、 c 完全满足公式(1),但是由于环境中气流、振动等影响,干涉仪对同一区域两次检测得到的面形图也并非完全相同,无法找到 a 、 b 、 c 完全满足公式(1),那么通过重叠区域 m 个点的相位值采用最小二乘法求得最合适的系数 a 、 b 、 c 如公式(2),将子孔径 1 拟合到子孔径 2 所在的参考面,最后直接进行拼接即可。

$$\sum_{i=1}^m S = \{W_{20}(x_i, y_i) - [ax_i + by_i + c + W_{10}(x_i, y_i)]\}^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

2 拼接中累积误差的去除

随着子孔径数目的增加,拼接得到的累积误差会越来越大。图 3 分别以 3 个子孔径为例进行说

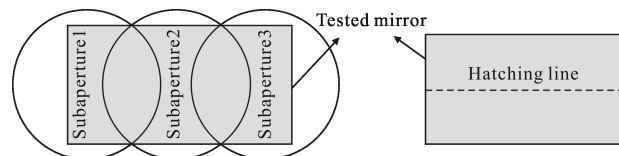


图 3 三个子孔径拼接检测矩形平面镜面形

Fig.3 Rectangle mirror measured by three subapertures stitching interferometry

明,首先对子孔径 1 的相位数据 W_1 去倾斜然后得到 W_1' ,将其作为基准把子孔径 2 的相位数据 W_2 拟合到子孔径 1 所在的平面内进行拼接得到 W_{12} 。如果再

将 W_{12} 直接作为基准与子孔径 3 的相位数据 W_3 直接拼接,一旦子孔径 1 和子孔径 2 拼接存在误差将会累积到下一次拼接并且会影响重叠区匹配的精度,导致拼接精度大大下降。

如图 4 所示,图 4(a)是第一次拼接完成后被测件剖线处的面形图(黑色是未去除累积误差的,灰色是去除累积误差的),图 4(b)是第二次拼接完成后被测件剖线处的面形图。可以看出由于未去除累积误差导致第二次拼接的精度大大下降。

造成累积误差的主要原因有两点:基准中倾斜量的累加、重叠区定位不准确。如图 4(a)可以看出在第一拼接之后若不进行消倾斜处理,被测件剖线处的面形相差不大。但是若在蓝色面形图的基础上进行第二次拼接得到的结果与在红色面形图的基础上进行第二次拼接得到的结果相比较偏差明显增大。这是因为在拼接中,由于被测件表面并非理想中的光滑表面,所以即使在子孔径进行了消倾斜处理后也并不是在理想的水平面上,若以其中一个子孔径为基准进行拼接,那么其存在的倾斜量随着子孔径的数目增加会累积的越来越大(如图 4(b)),并且会影响后面拼接时重叠区定位的准确性,导致精度大大下降。通过上述方法可以很好的去除累积误差,这是因为每次拼接的基准都是一个最接近水平面的平面,因此无论拼接次数的多少,拼接精度都不会有很大的损失。

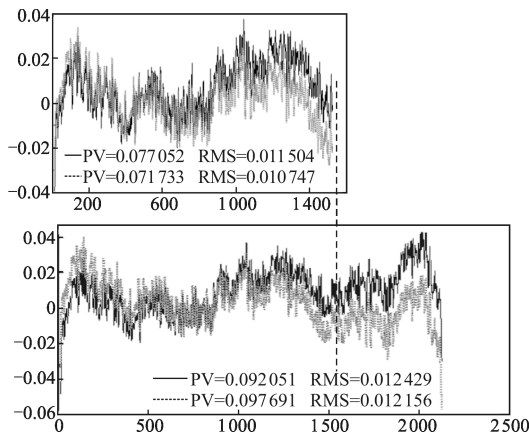


图 4 二次拼接未去除累积误差和去除累积误差的被测件剖线处的面形

Fig.4 Compare of hatching line of 2 times stitching results which removed accumulative error and not

累积误差消除的具体处理过程为:对每次拼接完成后拼接结果进行一次消倾斜处理,这样可以很

好的去除累积误差。根据拼接得到的相位数据 z_i 及其所在的位置 x_i 和 y_i ,利用最小二乘法或者线性回归拟合得到一个平面 $Z=a_0x+a_1y+a_2$,然后将坐标 (x_i, y_i) 下的波面值 z_i 减去拟合得到的平面 Z 即可。

采用最小二乘法拟合平面的原理如下所述。在三维空间中平面方程的一般表达式如下:

$$Ax+By+Cz+D=0 \quad (D \neq 0) \quad (3)$$

变换后: $z=-\frac{A}{C}x-\frac{B}{C}y-\frac{D}{C}$; 令 $-\frac{A}{C}=a_0, -\frac{B}{C}=a_1, -\frac{D}{C}=a_2$, 则有:

$$z=a_0x+a_1y+a_2 \quad (4)$$

根据最小二乘法平面拟合,采用一系列的 $n(n \geq 3)$ 个点坐标 $(x_i, y_i, z_i), (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 来计算拟合平面方程,则要满足下式:

$$S = \sum_{i=1}^n (a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

那么就是要使得 $\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0, (k=0, 1, 2)$ ^[8], 则有:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_0} = \sum_{i=1}^n (2a_0x_i^2 + 2a_1x_iy_i + 2a_2x_i - 2x_iz_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_1} = \sum_{i=1}^n (2a_0x_iy_i + 2a_1y_i^2 + 2a_2y_i - 2y_iz_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_2} = \sum_{i=1}^n (2a_0x_i + 2a_1y_i + 2a_2 - 2z_i) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

化简得到:

$$\begin{cases} a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_iy_i + a_2 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_iz_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_iy_i + a_1 \sum_{i=1}^n y_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n y_iz_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n y_i + na_2 = \sum_{i=1}^n z_i \end{cases} \quad (7)$$

表示成矩阵的形式如下:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_iy_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_iy_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_iz_i \\ \sum_{i=1}^n y_iz_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{令 } \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_iy_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_iy_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix} = \mathbf{A}, \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \mathbf{x}, \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_iz_i \\ \sum_{i=1}^n y_iz_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix} = \mathbf{b}, \text{ 通}$$

过解上述的线性方程组 $Ax=b$ 求得 x 即 a_0, a_1, a_2 ; 最后再减去这个拟合好的平面即可如公式(9):

$$z_i = z_i - Z_i = z_i - a_0 x_i - a_1 y_i - a_2 \quad (9)$$

3 实验与结论

文中采用了一个大小为 180 mm×80 mm 的矩形平面镜进行实验验证, 如图 5~7 所示, 进行了 6 个子孔径拼接来检测这一矩形平面镜, 利用基于 Matlab 编程设计的软件进行了拼接, 拼接结果分别如图 5 所示。然后将利用 Matlab 软件拼接得到的面形数据文件转换为可以利用 Zygo 干涉仪自带面形分析软件 Metropro 打开的格式, 利用 Metropro 加载拼接得到的面形数据如图 6 所示。最后采用 Zygo 干涉仪对这一矩形平面镜进行直接检测得到的面形结果如图 7 所示。

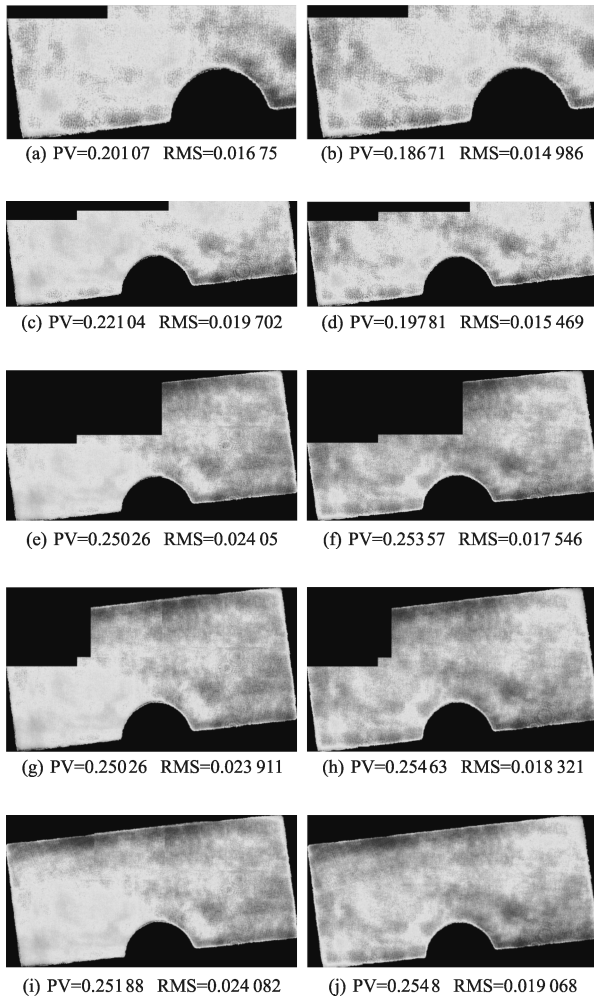


图 5 五次拼接结果对比

Fig.5 Contrast of 5 times stitching results

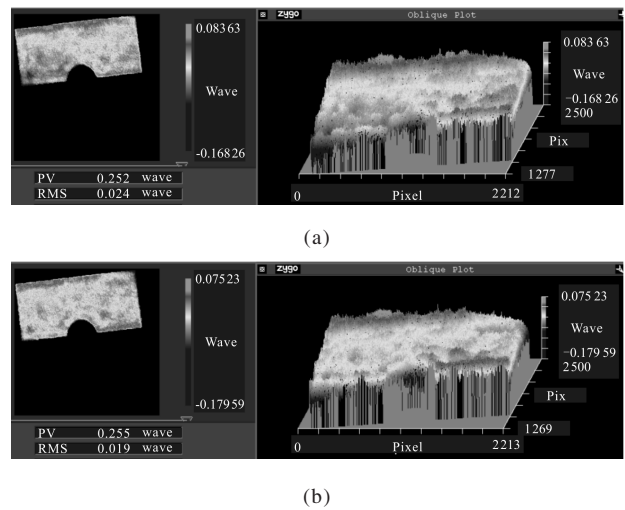


图 6 拼接面形在 Metropro 软件中的显示结果

Fig.6 Stitching result in the Metropro software

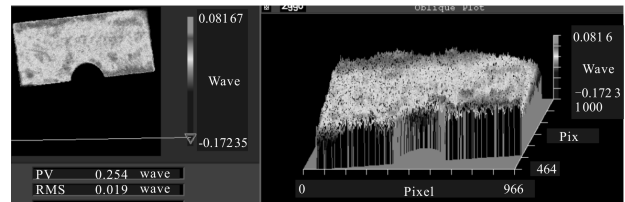


图 7 Zygo 干涉仪直接检测的面形结果

Fig.7 Result tested directly by the Zygo interferometer

图 5 中左边是每次没有进行消倾斜处理得到的拼接结果, 右边是每次都进行消倾斜处理得到的拼接结果。为了方便与 Zygo 干涉仪直接检测的面形结果相比较, 将拼接得到的结果利用 Zygo 干涉仪自带的软件进行加载得到图 6。图 7 是用 Zygo 干涉仪直接检测得到的面形结果。通过图 5~7 可以看出采用这种方法可以很好的去除累积误差。

表 1 对拼接结果和直接检测结果进行了比较。通过比较可以看出没有去累积误差的拼接结果与实

表 1 三种检测结果的比较(单位: 波长)

Tab.1 Three kinds of test results(Unit: wavelength)

	With accumulative error		Removing accumulative error		Direct testing result	
	RMS	PV	RMS	PV	RMS	PV
1	0.01675	0.20107	0.014986	0.18671		
2	0.019702	0.22104	0.015469	0.19781		
3	0.02405	0.25026	0.017546	0.25357	0.019	0.254
4	0.023911	0.25026	0.018321	0.25463		
5	0.024082	0.25188	0.019068	0.2548		
Contrast	0.005082	0.0212	0.000068	0.008		0

际检测的面形结果 RMS 值相差 0.005 082 个波长, PV 值相差 0.021 2 个波长;而通过去除累积误差的拼接结果与实际检测的面形结果 RMS 值相差 0.000 068 个波长, PV 值相差 0.008 个波长。可以看出通过每次拼接后消倾斜可以很好的去除累积误差, 保证拼接的精度, 并且采用这种方法使得算法简单、速度快、可扩展性好, 解决了并行拼接模式(即误差均化拼接)存在的算法复杂、扩展性差等问题。

为了验证此方法的可行性, 实验中对一个 180 mm×80 mm 的矩形平面镜进行了 20 次的 6 个子孔径的拼接检测实验。得到的 20 次子孔径拼接检测结果如表 2 所示。可以看出此方法对消除累积误差有很好的效果, 根据 20 次的子孔径检测结果计算得到的 RMS 值的重复性是 7.615×10^{-5} 个波长, PV 值得重复性是个 $3.618 5 \times 10^{-4}$ 波长。可以看出采用此方法不仅可以保证拼接精度, 而且重复性也很好, 可以满足实际的要求。

表 2 20 次子孔径拼接检测结果的比较(单位: 波长)

Tab.2 20 testing results by subapertures stitching interferometry(Unit: wavelength)

No.	RMS	PV	No.	RMS	PV
1	0.018 902	0.254 63	11	0.018 997	0.254 29
2	0.018 915	0.254 81	12	0.019 081	0.254 31
3	0.018 926	0.254 75	13	0.018 972	0.254 62
4	0.018 999	0.254 35	14	0.018 928	0.254 77
5	0.018 876	0.254 79	15	0.018 907	0.254 74
6	0.018 906	0.254 46	16	0.018 934	0.254 29
7	0.019	0.254 91	17	0.018 921	0.254 18
8	0.018 968	0.254 39	18	0.019 022	0.253 35
9	0.019 137	0.254 93	19	0.019 144	0.254 53
10	0.0189 98	0.254 07	20	0.019 068	0.254 8
Repeatability					
RMS			PV		
7.615×10^{-5}			$3.618 5 \times 10^{-4}$		

4 总结

从以上的实验数据和图形可以看出, 文中提出的方法可以很好地去除了子孔径拼接中的累积误差, 并且此方法简单易编写程序实现不随子孔径数目的变化而变化。

参考文献:

- [1] Kim C, Wyant J. Subaperture test of a large at on a fast aspheric surface[J]. *J Opt Soc Am*, 1981, 71: 1587.
- [2] Micheal Bray. Stitching interferometer for large plano optics using a standard interferometer[C]//SPIE, 1997, 3134: 39-50.
- [3] Hänssel T, Nickel A, Schindler A. Stitching interferometry of aspherical surfaces[C]//SPIE, 2001, 4449: 265-275.
- [4] Cheng Gang, Ge Shirong, Jiang Shilei. The major mirror of stitching technique by extended genetic algorithm [J]. *IEEE*, 2008, 1109: 185-189.
- [5] Otsubo M, Okada K, Tsujiuchi J. Measurement of large plane surface shape with interferometric aperture synthesis [C]//SPIE, 1992, 1720: 444-447.
- [6] Yun Yu, Peng Yong, Tian Xiaoqiang. Test large aperture optical components baesd on subaperture stitching theory[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1831-1834. (in Chinese)
云宇, 彭勇, 田小强. 基于子孔径径拼接原理检测大口径光学元件[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1831-1834.
- [7] Stuhlinger T W. Oprical testing of large telescopes using multiples subapertures [D]. Tucson: University of Arizona, 1984: 22-30.
- [8] Fei Yetai. Error Theory and Data Processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 94-100.
费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 94-100.