

子孔径拼接法检测大口径光学镜面的精度分析

杨晓洪 高必烈

(中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

摘 要 讨论了在用子孔径拼接法检测大口径光学镜面时的精度问题,并分别从理论上和实验中对拼接检验的精度做了定量分析。分别用平面消差、在非圆域内的 Zernike 多项式系数拟合和在圆域内的 Zernike 多项式系数拟合等三种方法对检测得到的波面面形数据进行数据处理。通过对这三种方法计算结果的分析,发现利用平面消差法拟合波面数据能更好地保存原始波面信息,且拟合误差较小。最后通过对实验数据的分析和处理验证了平面消差法拟合得到的波面更接近原始波面,拼接效果较好。

关键词 子孔径拼接法;平面消差;Zernike 多项式拟合;精度分析

中图分类号 TN247 文献标识码 A

随着天文望远镜向着大口径、快焦比、高精度方向的迅速发展,对天文光学镜面检测技术的要求也越来越高。由于大型平面干涉仪的制造周期长,成本高,所以利用一般的全口径进行检验的方法已经不能满足对大平面镜检测的发展需要。为适应大口径镜面面形测试的需求,必然要发展子孔径拼接检测技术,用于对大型天文光学镜面进行高精度检测。本文简要介绍了子孔径拼接的基本原理,着重分析了在用子孔径拼接法检测大口径光学镜面时的精度问题,并分别从理论和实验中对拼接检验的精度做了定量分析。

1 子孔径拼接原理

子孔径拼接的基本原理是利用小口径干涉仪,用干涉方法分多次分别检测大口径光学镜面的各个部位(每一部位就是一个子孔径),使这些子孔径几乎完全覆盖整个大光学镜面,且两相邻子孔径之间都有重叠区域。然后从重叠区域提取出相邻子孔径的参考面之间的相对平移和旋转的信息,并依次将这些子孔径的参考面拼接到同一个参考面上来,从而恢复出全口径波面的完整面形。本文在子孔径拼接原理的基础上,通过确立基准定点的方法将多幅子孔径检测数据统一到全口径归一化坐标系下,并将其进行拼接,最后通过数据拟合重建连续波面,

恢复全口径波面图像。

子孔径拼接检测基本原理如图1所示。图中 W_1 , W_2 分别表示干涉仪在大口径光学元件上检测所得的波前相位数据。从理论上来说,两次检测的重叠部分(阴影区)无论是在 W_1 还是在 W_2 中都具有共同的波面信息,因此可以用它作为基准来衡量各次检测之间的差异,以确定出各子孔径区域的相对倾斜和轴向位移。

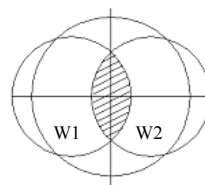


图1 子孔径拼接示意图

Fig.1 Sketch map of the stitching interferometer

2 波面拟合方法

为了分析子孔径检验在拼接时所带来的误差,必然要对每次子孔径检测获得的波面面形进行数据处理。通常来说,在对波面面形进行数据处理的时候,常用到的方法是平面消差和 Zernike 多项式拟合这两种方法。下面就对这两种拟合方法进行讨论。

平面消差法就是利用最小二乘法将面形数据拟合到一个最佳拟合平面,即要找到拟合平面的系数,

使波面相位数据与拟合平面的残差为最小。利用最小二乘法来拟合平面简单明了，且编写程序容易，计算速度快。

然而对于大口径平面来说，大多存在像散、球差或者彗差。由于 Zernike 多项式和光学设计中惯用的 Seidel 像差系数是相关联的，所以检验时常会选用 Zernike 多项式来进行拟合。因为 Zernike 多项式是在单位圆上正交的，而被测系统一般是圆形光瞳，经归一化即为单位圆，所以利用 Zernike 多项式拟合圆域的相位数据是比较理想的。然而对于本文采用的子孔径拼接检测法来说，每次子孔径检测所得到的干涉条纹图都不是圆域的，在这种情况下对相位数据进行 Zernike 拟合的话，必然会造成由权重不同所带来的误差。因而，本文提出将非圆域的波面相位数据填充到圆域，再进行多项式拟合。这样能使 Zernike 多项式拟合时的权重趋于相等，以减小拟合误差。

3 理论模拟

为分析子孔径拼接检验精度，本文模拟了一个理想平面，如图 2 所示（单位圆波面面形，单位：），并对该平面做了计算机理论模拟实验。下文将分别利用平面消差、非圆域内的 Zernike 多项式拟合和圆域内的 Zernike 多项式拟合等三种方法对理论模拟的波面面形数据进行分析 and 处理。

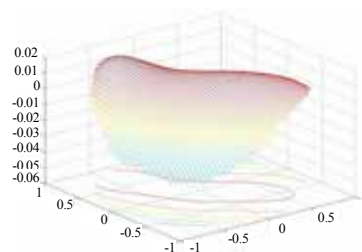


图2 理想平面

Fig.2 Ideal plane

在该理论模拟实验中，每一步的数据处理都是基于完全理想化情况下的，也就是说实验中子孔径检测的干涉波面完全等同于全口径原始波面，三个基准点的定位完全等同于全口径波面的三基准点。即模拟实验几乎完全忽略了检测误差、基准点定位误差、子孔径移位、旋转、倾斜的误差，在近乎完全理想化的情况下计算的，它的误差主要来源于计算机计算精度的误差。

图 3（平面消差）、图 5（非圆域内的 Zernike 拟合）、图 7（圆域内的 Zernike 拟合）分别是用这三种方法拟合拼接检测得到的面形数据图，将它们和图 2 所示的原始理想面形相比较，分别得到了如图 4（平面消差）、图 6（非圆域内的 Zernike 拟合）、图 8（圆域内的 Zernike 拟合）所示的三个精度误差图。

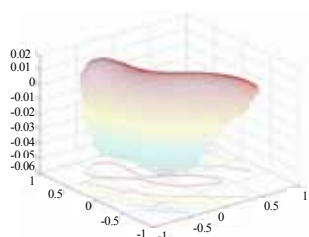


图3 平面消差

Fig.3 Error elimination of plane

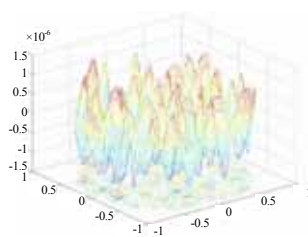


图4 平面消差误差

Fig.4 Error of plane elimination

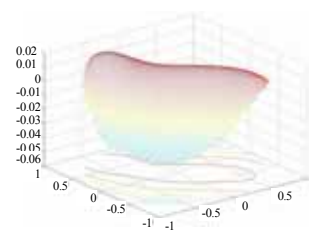


图5 非圆域的泽尼克拟合

Fig.5 Zernike fitting in non-circular area

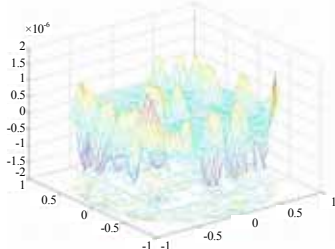


图6 非圆域泽尼克拟合误差
Fig.6 Error of Zernike fitting in non-circular area

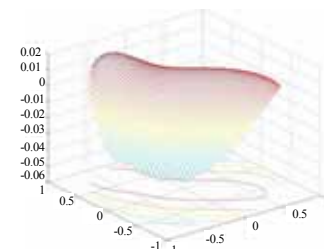


图7 圆域的泽尼克拟合

Fig.7 Zernike fitting in circular area

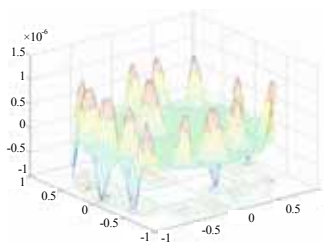


图8 圆域泽尼克拟合误差
Fig.8 Error of Zernike fitting in circular area

经过计算得出以上三种方法拼接拟合的峰谷值、均方根值分别为：

$$\begin{aligned} PV &= 0.981\,000 \times 10^{-6}, 4.000\,000 \times 10^{-6}, 2.000\,000 \times 10^{-6}; \\ RMS &= 3.241\,779 \times 10^{-7}, 4.597\,352 \times 10^{-7}, 3.024\,610 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

由图中可以看出,用非圆域内的 Zernike 多项式拟合的误差是最大的。这是由于子孔径检测的部分圆域权重不等造成的,跟理论分析的结果是一致的。

4 实验与结果

为验证理论模拟实验的结论,对一个 $\Phi 530\text{ mm}$ 的球面镜用静态条纹干涉法做了拼接实验。首先对球面镜做了全口径检验,检验得到的干涉条纹如图 9 所示,图中三点为基准定位点。然后再利用小口径干涉仪对球面镜进行分块检验,检验结果如图 10 所示。

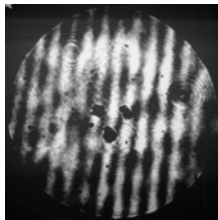


图 9 全口径检验

Fig.9 Full aperture testing

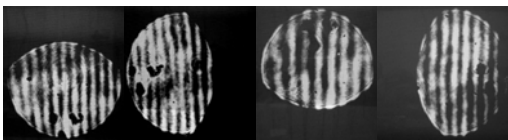


图 10 子口径检验

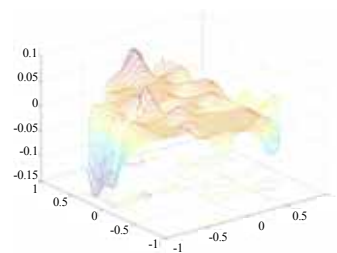
Fig.10 Sub-aperture testing

由于利用子孔径检测所得的干涉图相互之间都存在共同检测的区域,它们的重叠区域所涵盖的信息应当是一致的。因此,在每个子孔径检测都能覆盖到的区域内选取三点做为基准定位点,通过比较每个干涉图数据中的三点之间的相对坐标,就能确定出每次子孔径检测的相对位置的变化量,以及 X 方向和 Y 方向的倾斜量,光轴方向的平移量。经过三点定位、旋转、拼接、消倾斜,最后得出拼接后的波面面形。

在本课题的子孔径拼接法中,所要解决的问题是将每个子孔径检测先进行波面拟合,得到三个定位点的相位值,从而确定每个子孔径之间的相对位置。因此三个定位点的精度直接关系到整个拼接结

果的精度,而这三个定位点的误差关键在于用何种方法拟合的误差最小,而本课题的误差也就主要来源这个误差。

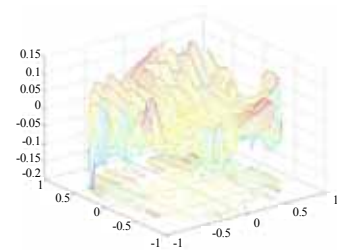
图 11 为用平面消差拟合的全口径波前面形,图 13 为用 Zernike 多项式拟合的全口径波前面形。图 12 和图 14 分别为用平面消差和用 Zernike 多项式拟合的子孔径拼接检测的波面面形。图 15 为波面复原的干涉条纹图。



$$PV=0.218\,913\,1 \quad RMS=0.034\,189\,87$$

图 11 平面消差拟合的全口径波面

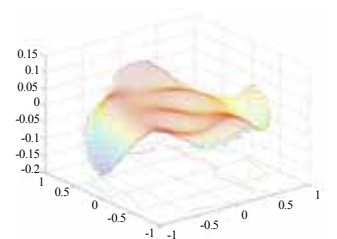
Fig.11 Full aperture wavefront of plane fitting



$$PV=0.334\,581\,24 \quad RMS=0.055\,406\,56$$

图 12 平面消差拟合的子孔径拼接波面

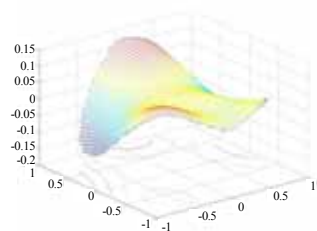
Fig.12 Sub-aperture stitching wavefront of plane fitting



$$PV=0.243\,947\,22 \quad RMS=0.033\,079\,21$$

图 13 泽尼克系数拟合的全口径波面

Fig.13 Full aperture wavefront of Zernike fitting



PV=0.239 041 26 RMS=0.044 596 49

图 14 泽尼克系数拟合的子孔径拼接波面

Fig.14 Sub-aperture stitching wavefront of Zernike fitting



图 15 波面复原干涉图

Fig.15 Wavefront recovering interferogram

由峰谷值和均方根值可以看出, 实验中用的两种方法拟合波面效果相近, 但由图 11~15 可以看出用平面消差拟合的平面更接近于原平面。这是由于利用平面消差进行拟合时, 并没有改变原始波面的面形, 而利用 Zernike 多项式拟合时, 计算得到了一组 Zernike 多项式系数, 用它们计算出一组新的连续的相位值, 却或多或少地改变了原始的相位值。

5 误差分析

本文中的子孔径拼接检验的误差主要源于三个

基准点的误差。而对于本文主要讨论的三种相位拟合方法来说, 它们各自带来的误差又是各不相同的。对于平面消差来说, 最大的误差来自确定三基准点的相位值带来的误差, 要减少此误差就必须依靠检测时人为的提高精度。对于非圆域内的 Zernike 多项式拟合来说, 它的主要误差主要来自非圆域的权重不等, 由上面的实验也可知道此误差比较大。对于圆域内的 Zernike 多项式拟合来说, 它的误差主要来自将非圆域的相位数据填充到圆域内所带来的误差, 此误差相对来说较小。

6 结 论

本文分别从理论和实验两方面对拼接检验的精度做了定量分析。通过对几种拟合方法的讨论, 发现在利用基准点定位的方法进行子孔径拼接检验时, 用平面消差法拟合误差较小, 且拟合平面更接近于原平面, 拼接效果较好。这为今后利用子孔径拼接法检测大口径光学镜面的波面拟合做了铺垫。

参考文献

- [1] 张蓉竹, 杨春林, 许乔, 等. 使用子孔径拼接法检测大口径光学元件[J]. 光学技术, 2001, 27(6): 516~517
- [2] WANG Qing, CHEN Jin-bang. New technique for testing large optical flat[C]. SPIE, 1993, 389~397
- [3] Michael Bray. Stitching interferometer for large plano optics using a standard interferometer[C]. SPIE, 1997, 3134: 39~50
- [4] Chen Ming-yi, Chen Wei-ming, Wang Cun-wu, *et al.* Multi-aperture overlap-scanning technique for large aperture test[C]. SPIE, 1991, 1553: 626~635
- [5] Bray M. Stitching interferometry and absolute surface shape metrology: Similarities[C]. SPIE, 2001, 4451: 375~383

Accuracy Analysis of Stitching Testing for Large Aperture Flat Mirror

YANG Xiao-hong GAO Bi-lie

(National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract This paper discusses the accuracy problem of testing a large aperture flat mirror by using stitching interferometry, and analyses the stitching accuracy in theory and experiment. This paper calculates all sub-aperture testing phasic data by three methods such as: plane fitting, Zernike fitting in a circular area and Zernike fitting in a non-circular area. By analysing the results obtained by these three methods, it is discovered that the plane fitting method can reserve the original phasic data best. At last, this conclusion is validated by analysing and disposing the experimental data.

Key words stitching interferometry; plane fitting; Zernike polynomials fit; accuracy analysis