文章编号: 1002-1582(2006)04-0514-04

大口径光学平面的子孔径拼接检验研究

李新南¹, 张明意^{1,2}

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,南京 210042; 2. 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘 要:研究了检测大口径光学平面的子孔径拼接法。通过采用最小二乘法对相邻两个子孔径重叠区域的数据进 行分析,获得了子孔径之间的拼接参量,得到了被检验镜面的整体面形信息。编制了拼接检验的计算程序,并完成了原 理性实验。采用一台口径为100mm的移相干涉仪检测了两个样品,给出了拼接检测与全口径检测的对比结果。样品的 口径分别为100mm和91mm。对比检测结果表明,拼接检测与直接检测两种方法的 RMS 之差小于5nm。

关键 词:大口径光学平面;子孔径拼接;光学检测 中图分类号:TH706 文献标识码:A

Study on the sub-aperture stitching interferometry for large plano-optics LI Xin-nan¹, ZHANG Ming-yi^{1,2}

(1. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical

Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

(2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract : The principle of stitching interferometry for large plano-optics is analyzed. The wave-front data in the overlapping area are analyzed by using the algorithm of the least-square method. Stitching parameters between adjacent sub-aperture are calculated. Then the surface shape under testing is calculated. Furthermore, a practical program for stitching interferometry is compiled and related experiments are carried out. To examine the feasibility of stitching interferometry, a phase-shift interferometer of 100mm in capacity is utilized and the surface error of two samples are tested. One is 100mm in diameter and the other is 91mm in diameter. The results are measured in stitching interferometry and in direct measurement respectively. Maximum deviation in RMS between two methods is 51mm.

Key words : large plano-optics ; stitching interferometry ; optical test

1 引 言

检验高精度大口径光学平面通常需要配备大口 径的平面干涉仪或搭设 Ritchey-Common 形式的检 验光路。目前国际上适应这种用途的平面干涉仪的 最大口径为 1m,Ritchey-Common 形式的检验光路 最大可以检测口径为 1.8m 的平面镜。在这些检测 装置中配备有与被检验平面镜口径相当的高精度标 准镜,包括标准平面和标准球面。这些标准镜面的 加工过程随着其口径的增大变得十分复杂,工艺要 求也十分严格,涉及到镜坯材料、镜面支撑、镜面加 工设备和镜面检测设备等,不但制作难度大,而且成 本高,加工周期长。

为了寻求一种降低成本的检测手段,国外在20 世纪80年代就开展了采用子孔径拼接方法检测大 口径镜面的研究,即采用一台口径比被检验镜口径 小的干涉仪依次测量被检验镜的不同局部,然后对 各个子孔径的检测数据进行处理后获得全口径的测 量数据。国内自 20 世纪 90 年代以来也有多家单位 对此进行了研究。所以对这种方法的原理分析已经 比较成熟。真正具有实用价值的实验是在采用了高 精度的移相干涉仪以后,如法国 Cilas 的 Michael Bray 采用 Zygo 干涉仪进行了 60 次以上的子口镜 拼接,测量了 400mm ×560mm 的平面镜,获得了 25nm(P-V)和 5nm(RMS)的重复精度。

采用子孔径拼接的干涉检测方法可以以较低的 成本实现大口径光学平面的检测,这对于天文光学 领域的应用研究具有十分重要的意义。本文通过实 验验证了使用小孔径干涉仪进行大口径光学元件检 测的可行性。

2 子孔径拼接的理论依据

子孔径拼接的基本原理可以简单的用图 1 来说 明,即利用小孔径高分辨移相干涉仪分别测量大口 径面形的一部分,并使各子孔径相互之间稍有重叠。 从理论上来讲,在重叠区域内通过两次检测得到的

^{*} 收稿日期: 2005-05-24; 收到修改稿日期: 2005-08-16 **E mail:** ymzhang @niaot.ac.cn

作者简介:李新南(1963-),男,江苏省人,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所研究员,主要从事大型镜面研磨技术的研究。

波面值应该是一样的,即通过两次检测得到的波面 数据应位于同一个面,但在实际检测过程中,因移动 导致的倾斜、位移等误差会使在两次检测同一区域 时得到的波面值不同,也就是说两个面并不重合。 对两个相邻的子孔径而言,根据在各自重叠区内的 数据可以推算出它们之间的相对平移及倾斜等。根 据子孔径之间的相互关系把所测得的这些子孔径的 波面值统一到同一个面,即统一到系统坐标系里,从 而可恢复整个全孔径波面。定义整个大口径光学元 件所在的坐标系 *XOY* 为系统坐标系,*X*1*O*1*Y*1 为 在子孔径1 内测得的由波面值定义的子孔径坐标 系,*X*2*O*2*Y*2 为在子孔径 2 内测得的由波面值定义 的子孔径坐标系。

 W_1, W_2 分别表示干涉仪在大口径光学元件上 进行两次检测测得的子孔径波面值,分别是在 $X_1O_1Y_1$ 和 $X_2O_2Y_2$ 坐标系下的坐标值, X, Y为在 子孔径内测得的波面值在系统坐标系 XOY下的位 置坐标。 W_{01}, W_{02} 为在系统坐标系 XOY下大口径 光学元件对应于子孔径 1 和子孔径 2 的波面值。由 于子孔径 1 和子孔径 2 在检测时存在着不同的倾 斜、平移和离焦,所以有

$$W_{1}(X, Y) = P_{1} + K_{X1}X + K_{Y1}Y + D_{1}(X^{2} + Y^{2}) + W_{01}(X, Y)$$

$$W_{2}(X, Y) = P_{2} + K_{X2}X + K_{Y2}Y + D_{2}(X^{2} + Y^{2}) + W_{02}(X, Y)$$
(1)

式中: P_1 和 P_2 为平移系数; K_{x1} 和 K_{x2} 为 X方向的 倾斜系数; K_{y1} 和 K_{y2} 为 Y方向的倾斜系数; D_1 和 D_2 为离焦系数。

从理论上来讲, W_1 和 W_2 的重叠区应 该具有相同的相位信息,对数字式干涉仪来 说,即在是重叠区内和 在相同系统坐标(X,



Y) 下应该具有相同

际测量中由于仪器的移动会带来倾斜、平移等误差, 因此定义拼接因子为

$$P = P_{1} - P_{2}$$

$$K_{X} = K_{X1} - K_{X2}$$

$$K_{Y} = K_{Y1} - K_{Y2}$$

$$D = D_{1} - D_{2}$$
(2)

式中: P 为轴向平移系数; K_X 和 K_Y 分别为 X 和 Y 方向的倾斜系数; D 为离焦系数。下面以图 1 为例介

绍两个孔径的拼接。以 W_1 的中心为系统坐标原点 对 W_1 和 W_2 两个子孔径进行拼接,其基本装置示意 图如图 2 所示。



 $Z_2 = Z_1 + P + K_X X + K_Y Y + D(X^2 + Y^2)$ (3) 式(3)中有四个未知数,从理论上讲,在重叠区内选 取不在同一直线上的四个坐标点就可以利用最小二 乘法计算出 P, K_X, K_Y 和D的值,但为了减小误差, 希望尽可能多地选取重叠区内的点进行最小二乘法 计算,通过优化以得到 P, K_x, K_y 和D的值。拼接因 子一经确定,两个子孔径之间的相对平移、倾斜和离 焦就随之确定下来了,所以可以对 W_2 内的所有点 的 Z_2 值进行消平移、消倾斜和消离焦,从而可把 W_1 和 W_2 内的所有的点转换到统一的坐标系下,这样 就可完成 W_1 和 W_2 的拼接,可得到由子孔径1和子 孔径2 覆盖的镜面相位信息。同样也可以采用更多 口径参与拼接来完成更大平面光学元件的检测。

3 数学方法及优化

3.1 重叠区域的定位

重叠区域的定位问题是影响拼接精度的主要误 差来源。在被检测元件与干涉仪作相对移动时会产 生一定的误差,使得两次子孔径的检测结果并不位 于同一个面。但可以利用精密的定位仪器使这种误 差控制在干涉仪的空间分辨率以下,这样的话,重叠 区域的确定就不会引入很大的误差。

如果定位仪器所达到的精度低于干涉仪的空间 分辨率,则可采取特征点的定位方法。因为重叠区 域在两次子孔径检测过程中各被检测了一次,所以 两次的检测应该具有相似的相位信息。在第一个子 孔径中,相位值显著的区域在另一个子孔径中其相 位值具有同样显著的特征,也就是说在仪器的初定 位前提下可以再利用镜面的特征区域进行精确定 位。

3.2 拼接系数的求解

如前所述,拼接拟合的计算是采用最小二乘法 来实现的。由于拼接公式(3)中存在四个未知数,即 *P*, *K*_X, *K*_Y和 *D*。从理论上讲,只要知道不在同一直 线上的四个点就可以解得四个未知数。假设以第一 个子孔径所在的面作为基准面,那么有 $K_{x}X_{1} + K_{y}Y_{1} + P + D(X^{2} + Y^{2}) = Z_{21} - Z_{11}$

$$K_{X}X_{1} + K_{Y}Y_{1} + P + D(X_{1}^{2} + Y_{1}^{2}) = Z_{22} - Z_{12}$$

$$K_{X}X_{3} + K_{Y}Y_{3} + P + D(X_{3}^{2} + Y_{3}^{2}) = Z_{23} - Z_{13}$$

$$K_{X}X_{4} + K_{Y}Y_{4} + P + D(X_{4}^{2} + Y_{4}^{2}) = Z_{24} - Z_{14}$$

$$(4)$$

式中: *P* 为轴向平移系数; *K*_x 和 *K*_y 分别为 *x* 和 *y* 方向的倾斜系数; *D* 为离焦系数。选取不在同一直线上的四个点。*Z*₂₁, *Z*₂₂, *Z*₂₃ 和 *Z*₂₄ 分别是子孔径 2 中相应 *x*, *y* 下的四点波面值; *Z*₁₁, *Z*₁₂, *Z*₁₃ 和 *Z*₁₄ 分别是子孔径 1 中相应 *x*, *y* 下的四点波面值。在实际运算中,为了提高精度,应该采用更多的观察点加入运算。最小二乘法就是要求得 *K*_x, *K*_y, *P* 和 *D* 的最佳拟合值,使得等式两端最为接近。这样便求得了拼接因子。通过拼接因子把子孔径 2 中的所有数据统一到与子孔径 1 相同的坐标系下,实现子孔径 1 和子孔径 2 的拼接。依次类推,最后就可覆盖整个大口径光学元件,可完成整个大口径光学元件的检测。

4 拼接原则对误差的影响

4.1 重叠区域的大小对误差的影响

在拼接检测中,重叠区域的大小直接影响到拼 接的精度。如果重叠区域过小,则由最小二乘法解 得的拼接参数就会丧失精度,由拼接所得到的波面 信息就不够准确。重叠区域越大,可以参加计算的 拼接因子的采样点就越多,由计算得到的拼接因子 的精度就越高。所以在实验阶段尽量采用大重叠区 域,以便完成拼接。据有关资料介绍,重叠区域的面 积应该不小于干涉仪全口径面积的1/4,只有这样 才能保证最小二乘法解得的拼接参数的精度,从而 保证拼接精度。若重叠区域大于1/4,则其面积的 大小对拼接精度没有太大的影响,拼接是稳定的。

4.2 拼接模式对误差的影响

当对两个以上的 子孔径进行拼接时,存 在着拼接模式的问题。 所谓拼接模式,是指当 对两个以上子孔径进 行拼接时,各子孔径的 拼接顺序和拼接路径。 有以下几种拼接模式 (以五个子孔径拼接为 例,图 3):



图 3 子孔径分布图

(1) 串行模式:1 2 3 4 5,即五个子孔径

(2)并行模式:1 2,1 3,1 4,1 5,即外围 的四个子孔径向中心的子孔径拼接,称为并行模式。

不同的拼接模式对拼接精度有不同的影响。串 行模式随着拼接次数的增加,误差会逐步累计,导致 误差增大。对并行模式来说,每次拼接的误差基本 一致,恢复出的全孔径波面误差也基本一致。相比 较而言,并行模式在控制拼接精度方面比串行模式 更好。

如果要检测的元件过大,就不能只采取并行模式,需采取接近并行模式的混合模式。但应该考虑 综合优化的问题。

5 实验及结果

依次拼接,称为串行模式。

根据以上对子孔径拼接理论的研究与分析,作 者对其进行了初步的实验,并设计了用于拼接的应 用程序。目的是用来验证拼接理论的正确和可行 性。

实验过程采用了一台口径为 100mm 的移相式 数字干涉仪(WYKO),被测试的两个平面镜样品口 径分别为 100mm 和 91mm。这两个样品可以利用 干涉仪直接测量整个面形。实验中,采用干涉仪对 样品进行了四次测量,每次测量样品的一个局部,相 邻两次测量区域之间有一定的重叠部分,子孔径分 布如图 4 所示。对子孔径的测量结果进行拼接可得 到全口径的面形情况,并与直接测量的结果进行了 对比。



图 4 实验子孔径分布图

被检测样品夹持在一个二维移动台上, *X* 和 *Y* 方向的移动精度均为 0.01mm,优于干涉仪的空间 分辨率。取所检测的镜面中心为系统坐标原点,移 动台的 *X* 和 *Y* 方向的量程均为 25mm 。根据移动 台量程范围以及被检元件的口径尺寸,将被检镜面 沿 *X* 和 *Y* 方向分别左右上下移动 10mm,作四次子 孔径检测,得到了覆盖整个被检镜面的检测数据。 相邻两个子孔径的重叠区域大于 80%,保证了由最 小二乘法解得的拼接系数精度。

对子孔径进行编号(图4),以子孔径1所在的

面作为基准面,按照上述分析方法对四个子口径的 检测结果进行拼接。通过把四个子孔径的检测结果 值统一到一个面上,得到了全口径的镜面恢复。计 算所得的拼接系数如表1和表2所示。

	100mm 口径样品			
	子孔径 2 相 对子孔径 1	子孔径 3 相 对子孔径 1	子孔径4相 对子孔径1	
K _X	0.00407273077922	- 0.00832998324436	0.00006384944536	
Ky	- 0.05888753047624	0.06164724189027	0.00005834740737	
Р	12.93958357321582	- 13.67189759154200	- 0.00757011940690	
D	0.00000013997236	0.00000011770266	- 0.0000013801834	

表 1 100mm 口径样品的拼接系数

表 2	91mm	口径的样品拼接系数
-L\ -	/ 1 IIIIII	

	91mm 口径样品			
	子孔径2相 对子孔径1	子孔径 3 相 对子孔径 1	子孔径4相 对子孔径1	
K _X	- 0.00522998354141	- 0.00759897689734	- 0.01253380285828	
Ky	- 0.00940777290432	0.00956383305580	- 0.00834874714551	
P	3.46379281971666	- 0.90389360284236	3.80807928987979	
D	- 0.0000034632518	- 0.00000091767232	- 0.0000036442854	

对检测元件进行一次全口径的测量。将拼接检验的结果与全口径一次检验的结果进行比对。图 5 ~图 8 给出了拼接检测结果和直接测量结果的波面 图,表 3 列出了对应的波面误差的峰谷值和均方值。

由图 5~图 8 以及表 3 中的数据可以看出,子 孔径拼接检测与全口径一次检测的相位分布情况基 本相同。91mm 口径样品的全口径结果与拼接结果 的 RMS 之差小于 5nm,两个结果的 P-V 值之差小 于 47nm。100mm 口径样品的全口径结果与拼接结 果的 RMS 之差小于 1nm,两个结果的 P-V 值之差 小于 7nm。由此证明了拼接检测结果的可靠性。



图 5 100mm 口径样品 的全口径检测结果 图 6 100mm 口径样品 的拼接检测结果

(上接第 513 页)

参考文献:

- Flores EL, Rezende EN, Carrijo GA, et al. An algorithm to recognize isolated, overlapped and connected handwritten numerical characters[A]. IEEE proceedings of the third australian and new zealand conference on intelligent information systems[C]. 1995.
- [2] Hui Su, Bin Zhao, Feng Ma, et al. Segmentation and recognition of unconstrained numerals on Chinese bank-check[J]. IEEE Transactions on system, man and cybernetics, 1996,3(14-17): 2227 – 2231.



图 7 91mm 口径样品	图 8 91mm 口径样品
的全口径检测结果	的拼接检测结果

表 3	样品拼接检测结果与全口径检测结果比对

	100mm 口径样品		91mm 口径样品	
方式	全口径结果	拼接结果	全口径结果	拼接结果
RMS/ nm	8.859	8.226	73.443	78.282
P-V/nm	63.280	69.608	461.96	508.20

6 结 论

本文对采用子孔径拼接检测大口径光学元件的 方法进行了原理性的分析,编制了拼接检验的计算 程序,并完成了原理性实验,验证了利用小口径干涉 仪检测大口径光学元件的可行性。与传统检测方法 相比,子孔径拼接检测方法具有周期短、花费少和分 辨率高的特点,对今后大口径光学元件的检测,尤其 是对下一代大口径光学望远镜的发展具有重要意 义。下一步将继续完善子孔径拼接检验方法的程 序,并将用于正在研制的大天区面积多目标光纤光 谱天文望远镜(LAMOST)中的口径为1m的拼接子 镜的检测。

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] 程维明,林有略,陈明仪. 多孔径扫描波面恢复技术的精度评定 及影响因素[J]. 光学学报,1993,13(8):711—716.
- [3] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [4] 白剑,程上彝.子孔径检测及拼接的目标函数分析法[J].光学 仪器,1997,19(4-5):36-39.
- [6] Michael Bray. Stitching interferometry : side effects and PSD[J]. Proceedings of SPIE, 1999,3782.
- [7] Lahsen Assoufid, Michael Bray, Jun Qian, et al. 3-D surface profile measurements of large x-ray synchrotron radiation mirrors using stitching interferometry [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4782: 21-28.
- [8] Wyant J C, Schmit J. Large field of view, high spatial resolution, surface measurements [J]. International Journal of Machine Tools Manufacturers, 1998, 38: 691.
- [3] Suen C Y, Lam L, Guillevic. Bank check processing system[J]. International Journal of Imaging System and Technogogy, 1996, 7 (4):392-403.
- [4] Impedovo S, Wang P S, Bunke H. Automatic bankcheck processing [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1997.
- [5] 陈鲤江,翟宏琛,张铁群.基于色彩局域旋转搜索的区域融合 方法及应用[J].光电子激光,2004,15(12):1483—1487.
- [6] Ballard D H, Brown C M. Computer Vision [M]. Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.