

# 子孔径变换与多孔径扫描拼接技术

程维明 陈明仪

(上海科技大学 应用光学与检测实验室, 上海 201800)

**摘要** 多孔径扫描拼接技术是检测高精度大孔径平面面形的有效手段。利用子孔径变换实现多孔径扫描拼接, 具有精度高, 可靠性好, 数据处理简单的特点。本文给出了数学模型, 并分析了实测结果。

**关键词:** 多孔径; 扫描拼接; 大孔径面形检测

## 1 引言

随着科学技术的发展, 对高精度的大型平面的检测提出了越来越高的要求。如对于光学表面, 要求能检测  $\Phi 500\text{mm}$ ,  $\Phi 1000\text{mm}$  甚至更大的平面; 对于非光学表面, 要求能检测尺寸为  $2\text{m} \times 3\text{m}$ , 平面度为  $3 \sim 5\mu\text{m}$  的超大型平面。

通常采用干涉法对这类高精度面形进行检测, 而斐索型和泰曼-格林型干涉仪在检测时要求有一块与被检件尺寸相同的标准平面, 这在检测大型、超大型平面时实际上是不可能的。

1982年, C. J. Kim 提出了用子孔径 (subaperture) 的方法检测大型光学表面<sup>[1]</sup>。随后, R. A. Williams, O. Y. Kwon 以及 G. N. Lawrence 等人进一步研究了这种方法, 并提出用于检测大型天文望远镜的透镜和反射镜<sup>[2]~[5]</sup>。

但是这些子孔径技术用于检测大型、超大型平面时遇到了一些具体的困难, 如各子孔径标准平面安装时的相对倾斜和平移对测量精度有较大影响, 又如当涉及数以百计的子孔径时, 计算量大得令人却步。

最近在上海科技大学应用光学与检测实验室发展成功的多孔径扫描拼接技术则解决了这些问题<sup>[6]</sup>。利用这项技术, 每次仅检测整个孔径的一部分 (子孔径), 并使各子孔径间互相稍有重叠, 然后将多次检测结果拼接起来, 得到全孔径的面形。

一幅干涉图, 经采样、拟合等数值化处理后, 其波面  $W(x, y)$  可以用一多项式表达<sup>[7]</sup>

$$W(x, y) = A + B_x + C_y + W_o(x, y) \quad (1)$$

式中,  $A$  为常数项, 表示被测波面与标准波面间的平移;  $B$  和  $C$  分别表示被测面沿  $x$  方向和  $y$  方向相对于标准波面的倾斜;  $W_o(x, y)$  为消除安装误差后的实际波面。此外, 各子孔径的标准波面之间也存在着相对平移和倾斜, 拼接的关键所在就是要求出这些标准波面之间的

相对平移和倾斜，以获得统一参考面的全孔径图。最后消除该参考面与被测表面之间的平移和倾斜，就可以得到被测表面的全孔径面形等值线图或三维面形图。

## 2 子孔径坐标变换

在数学上，子孔径拼接可以用坐标变换来表示。设子孔径 1 和子孔径 2 的波面可以表示为

$$W_1 = W_1(x_1, y_1) \quad (2-a)$$

$$W_2 = W_2(x_2, y_2) \quad (2-b)$$

如图 1 所示，把子孔径 2 的坐标系变换到子孔径 1 的坐标系中，则子孔径 1 和子孔径 2 均在统一的坐标系下表示，完成了由子孔径 2 向子孔径 1 的拼接过程。这也可以推广到多个子孔径的拼接情况，即把这些子孔径统一到某一坐标系下表示。

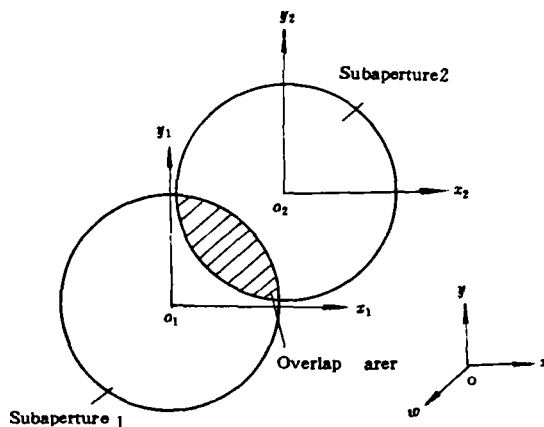


Fig. 1 Principle of subaperture overlap-scanning

用齐次坐标可以简洁明了地表示这种变换。齐次坐标用一个  $n+1$  维分量的向量表示一个  $n$  维分量的向量，向量中多余的分量的作用如同一个附加坐标。

对于子孔径 1 的坐标系  $(x_1, y_1, W_1)$  和子孔径 2 的坐标系  $(x_2, y_2, W_2)$ ，存在着如下关系：

$$(x_1, y_1, W_1, 1) = (x_2, y_2, W_2, 1) \cdot T \quad (3)$$

式中， $T$  为变换矩阵：

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & 0 \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & 0 \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & 0 \\ p_x & p_y & p_w & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中  $t_{ij}$  ( $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$ ) 表示旋转、错移、变比等形式的变换， $p_x$ 、 $p_y$ 、 $p_w$  分别表示沿  $x$ 、 $y$ 、 $w$  轴的平移变换。

考虑到在实际拼接中，坐标系之间不可能发生错移和变比变换，而相对旋转的转角是很小的（不超过几秒），并且一般总是取  $x_1$  轴与  $x_2$  轴平行， $y_1$  轴与  $y_2$  轴平行，再考虑到  $(x$

$y)_{max} \gg W_{max}$ ，则可以对变换矩阵  $T$  作一些近似，得

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta B & 0 \\ 0 & 1 & \Delta C & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ p_x & p_y & \Delta A & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中， $\Delta B$  和  $\Delta C$  分别为两坐标系之间沿  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的相对倾斜， $\Delta A$  为两坐标系之间沿  $W$  轴方向的相对平移。而  $p_x$  和  $p_y$  仍分别表示坐标系之间沿  $x$  轴和  $y$  轴方向的相对平移，这通常是已知的。

为了求变换矩阵  $T$ ，利用子孔径间的重叠区——拼接区（图1）。因为在拼接区中，分别由两个坐标系表示的波面实际上是同一波面，拼接区中的任意一点（拼接点）都满足式（3）给出的变换式。此时， $(x_1, y_1, W_1)$  是该点在坐标系1中的坐标值， $(x_2, y_2, W_2)$  是该点在坐标系2中的坐标值，在求得各子孔径的表达式后，这些坐标值都是已知的。对于第  $k$  个拼接点，有

$$W_{1k} = \Delta B \cdot x_{2k} + \Delta C \cdot y_{2k} + W_{2k} + \Delta A \quad (6)$$

求出矩阵  $T$  后，就可以求出子孔径2中的任意一点在坐标系  $(x_1, y_1, W_1)$  下的坐标值，也就是完成了子孔径2向子孔径1的拼接。整个计算非常简单，计算量也不大，易于实现实时处理。

### 3 子孔径拼接

已经发展了一套可供实用的波面拟合、拼接以及数据和图形处理实验系统（图2）。利用现有的直径90mm的激光平面干涉仪检测直径为150mm、平面度为两个光圈左右的光学平面。

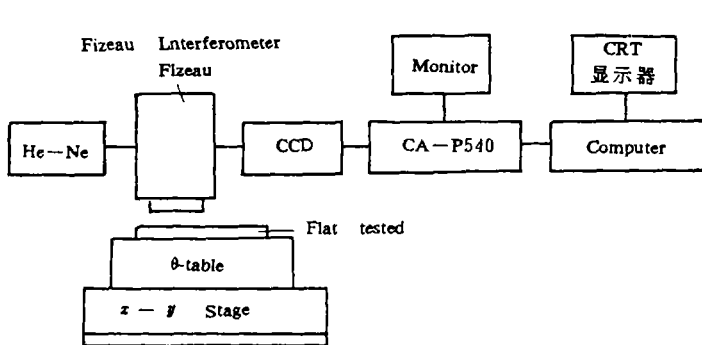


Fig. 2 Layout of the experimental setup

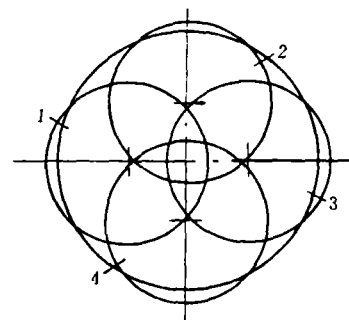


Fig. 3 Arrangement of subapertures of four-subaperture overlap-scanning

为了使子孔径尽可能多地覆盖全孔径,采用4个子孔径的扫描拼接,其布置如图3。对每个子孔径拍摄干涉图,由于各子孔径的标准平面之间存在着相对倾斜和平移,它们的干涉条纹宽度及方向各不相同。用本实验系统进行扫描拼接后,可得拼接波面等值线图如图4所示,等值线间隔为0.2光栅(0.1λ)。为了进行比较,再对该直径150mm 的光学平面作全孔径检验。在斐索(Fizeau)干涉仪上拍摄全孔径干涉图,经采样、拟合、去倾斜和去平移等处理后,得波面等值线图(图5)。可以看出,它与图4给出的经拼接测量所得到的波面等值线图是非常接近的。表1给出了用拼接方法得到的全孔径波面(图4)与用大口径干涉仪拟合得到的全孔径波面(图5)的波面参数。由表1知,在全孔径范围内,拼接波面与拟合波面  $W_{rms}$  的差值为0.002λ,  $W_{rms}$  的差值为0.016λ。

表1 拼接波面与拟合波面参数

	$W_{p-p}$ 波面峰谷值	$W_{rms}$ 波面均方值	$W_{av}$ 波面平均值
拼接波面 $W_s$	1.150	0.241	0.204
拟合波面 $W_f$	1.148	0.226	0.188
差 值	0.002	0.016	0.016

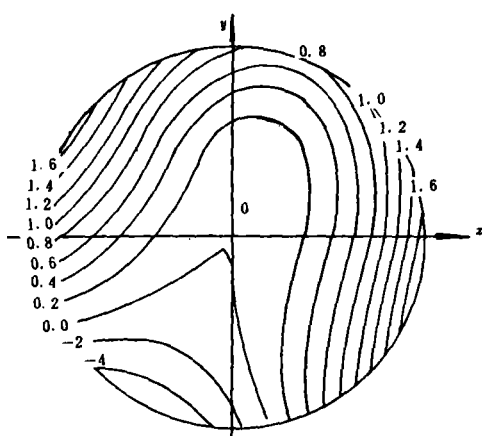


Fig. 4 Contour map of synthesized wavefront  
[Interval of contours:  $0.2 \times (\lambda/2)$ ]

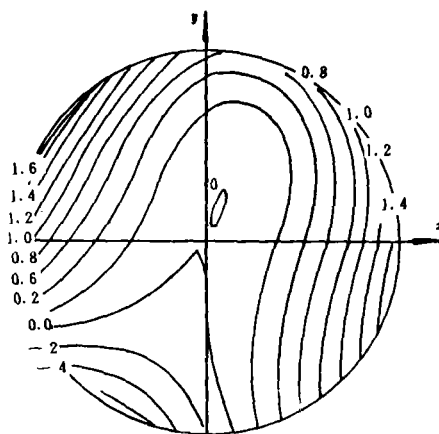


Fig. 5 Contour map of monolithic wavefront  
[Interval of contours:  $0.2 \times (\lambda/2)$ ]

## 4 结 论

多孔径扫描拼接技术精度高,方法简单易行,具有较高的可靠性,数据处理较为简单,易实现测量过程中的实时数据处理。

多孔径扫描拼接技术在解决大孔径、超大孔径的表面面形测量中显示了强大的生命力,它

可以给出被测表面上任意一点的面形数值,从而为大型高精度表面的加工、测量提供了有效手段。在本文给出的四子孔径拼接示例中,孔径放大系数(全孔径与子孔径直径之比)为1.7。在对子孔径布置作了变动之后,已实现孔径放大系数达2.5<sup>[6]</sup>。研究表明,只要合理布置子孔径,该系数还可以进一步提高。

多孔径扫描技术还可以用于大孔径表面的精密调整以及球面面形的精密测量。

多孔径扫描拼接的综合精度在很大程度上取决于波面的拟合精度和子孔径中心的定位精度。利用数字图像处理方法对于干涉图进行自动采样并采用较精密定位装置(定位精度0.1mm左右)可以使拼接的综合精度大幅度提高。深入的分析讨论及研究结果将另文发表。

#### 参 考 文 献

- [1] C. J. King, Polynomial fit of interferograms, Ph. D. Dissertation, University of Arizona, 1982
- [2] J. G. Thunen & O. Y. Kwon, Proc. SPIE, 1982, Vol. 351-05, 1-7
- [3] T. Stuhlinger, Proc. SPIE, 1984, Vol. 440, 91-98
- [4] S. C. Jenson, Applied Optics, 1984, Vol. 23, No. 5, 740-745
- [5] R. A. Williams & O. Y. Kwon, J. O. S. A. /A, 1987, Vol. 4, No. 10, 1855-1860
- [6] Mingyi Chen & Weiming Cheng, Proc. SPIE, 1991, Vol. 1553, 626-635
- [7] [墨西哥] 马拉可拉,《光学车间检验》,王国强等译,机械工业出版社,北京,1988年,443-460

### Transformation of Subapertures in Multi-Aperture Overlap-Scanning Technique

Cheng Weiming, Chen Mingyi

*(Lab. of Applied Optics and Metrology, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai)*

#### Abstract

Multi-aperture overlap-scanning technique (MAOST) a means to measure high precision, lager aperture flat. With transformation of subapertures, MAOST is precise, reliable and easy to process data. In this paper, the mathematical model and test results are discussed in detail.

Key words: Multi-aperture, Overlap-scanning, Large optics test