

多孔径扫描波面恢复技术的精度评定 及影响因素

程维明 林有略 陈明仪

(上海科技大学 应用光学与检测实验室, 上海 201800)

提 要

多孔径扫描波面恢复技术是一项新的高精度大孔径面形检测手段. 本文从建立波面恢复精度的评价标准出发, 结合实测结果进行讨论, 并对影响精度的两个重要因素即拼接模式及拼接区大小进行分析.

关键词 多孔径扫描, 波面恢复, 大孔径面形检测.

1 引 言

多孔径扫描波面恢复技术^[1~3]作为一项新的高精度大孔径面形检测手段正越来越受到重视. 这项技术的基本原理在于用干涉方法分别测量整个大孔径面形的一部分(孔径扫描), 并使各子孔径互相之间稍有重叠, 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、旋转, 并依次把这些子孔径的参考面统一到某一指定的参考面(即拼接), 从而恢复出全孔径波面. 这项技术既保留了干涉测量的高精度, 又免去了使用与全孔径尺寸相同的标准波面, 从而大大降低了成本. 从原理上说, 子孔径的数量并没有限制, 换言之, 可以实现用较小的子孔径测量较大的全孔径. 目前已经实现的实用技术为孔径放大系数(全孔径直径与子孔径直径之比) $K_r = 2.5$, 理论分析表明, 很容易提高到 $K_r = 4$ 或更高.

这项技术的应用涉及到精度评定、影响精度的主要因素分析及提高精度的措施等问题. 本文从建立波面恢复精度的评价标准出发, 结合实测结果进行讨论, 并对影响精度的两个重要因素即拼接模式及拼接区大小进行分析.

2 波面恢复技术的综合误差

波面恢复技术综合误差反映了在整个恢复过程中各项因素(采样、拟合、拼接等)的综合作用. 定义综合误差均方值为

$$W_{rms} = \{[1/(M-1)] \cdot \sum_{m=1}^M (W_{cm} - W_{rm})^2\}^{1/2} \quad (1)$$

式中 W_{cm} 为恢复所得波面第 m 个检测点的波面值, W_{rm} 为被测波面的真值(简称真波面), M 为检测点数. 在实际检测中, 由于真波面值无法得到, 则用平均波面 \bar{W} 代替真波面 W_r , 来考察波面恢复技术的综合误差, 即

$$\Delta W'_{rms} = \{[1/(M-1)] \cdot \sum_{m=1}^M (W_{cm} - \bar{W}_m)^2\}^{1/2} \quad (2)$$

式中 \bar{W}_m 为平均波面的第 m 个检测点的波面值. 众所周知, 任一波面 W 可以用多项式表达^[4]

$$W = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^i C_{ij} \cdot x^{i-j} \cdot y^j \quad (3)$$

式中 k 为多项式阶数, C_{ij} 为多项式系数. 对于同一真波面反复测量所得的 N 个波面 W_1, W_2, \dots, W_N , 定义平均波面 \bar{W} 为

$$\bar{W} = (1/N) \cdot \sum_{n=1}^N W_n = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^i \{[(1/N) \cdot \sum_{n=1}^N C_{ij,n}]\} \cdot x^{i-j} \cdot y^j \quad (4)$$

式中 $C_{ij,n}$ 为第 n 个波面的多项式系数. \bar{W} 的物理意义是用各波面的多项式系数的平均值作为新的多项式系数, 构成平均波面. 为了考察用 $\Delta W'_{rms}$ 评价波面恢复技术精度的稳定度, 定义

$$\bar{\Delta W}_{rms} = (1/N) \cdot \sum_{n=1}^N \Delta W'_{rms,n} \quad (5)$$

$$\sigma_{rms} = \{[1/(N-1)] \cdot \sum_{n=1}^N (\Delta W'_{rms,n} - \bar{\Delta W}_{rms})^2\}^{1/2} \quad (6)$$

式中 $\bar{\Delta W}_{rms}$ 为综合误差平均值, σ_{rms} 为综合误差均方值, $\Delta W'_{rms,n}$ 为第 n 个波面的综合误差. 由 (2) 式定义的综合误差, 具有实际可计算性. 当 N 较大时, 由 (4) 式定义的平均波面 \bar{W} 趋于真波面 W . 由 (6) 式定义的 σ_{rms} 反映了综合误差的置信程度, 而由 (5) 式定义的 $\bar{\Delta W}_{rms}$ 可以作为多孔径扫描波面恢复技术的综合误差. 经这样定义后, 不仅可以知道这项技术的实际精度, 还可以知道其精度的可靠程度.

本文进行了六子孔径拼接的实验, 来考察多孔径扫描波面恢复技术的实际综合误差. 六子孔径布置如图 1 所示. 被检物为一块波差约为 1λ 的光学平晶, 全孔径直径为 150 mm, 所扫描的子孔径直径为 65 mm. 对每个子孔径摄得 4 幅不同参考面的干涉图, 这样就得到了 4 组共 24 幅子孔径干涉图, 图 2 是其中的一组干涉图. 然后对各组干涉图进行采样、拟合、拼接. 由于拼接所得波面为分片函数, 为便于分析, 再经过一次波面拟合, 就得到由 (3) 式表示的全孔径波面表达式. 表 1 给出了这 4 组波面数据, 表中序号 1~4 分别对应 4 组不同的六子孔径波面恢复, W_{rms} 为恢复所得波面的 rms 值, W_{p-v} 为恢复所得波面的峰谷值, $\Delta W'_{rms}$, $\bar{\Delta W}_{rms}$ 和 σ_{rms} 分别由 (2)、(5) 和 (6) 式定义, 为了比较, 表中还给出了平均波面 [\bar{W} 由 (4) 式定义] 的 rms 值和峰谷值.

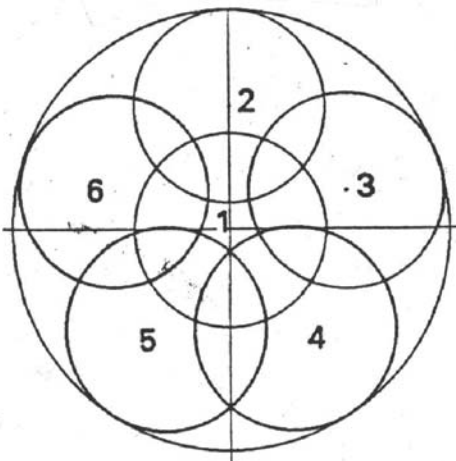


Fig. 1 Arrangement of six subapertures

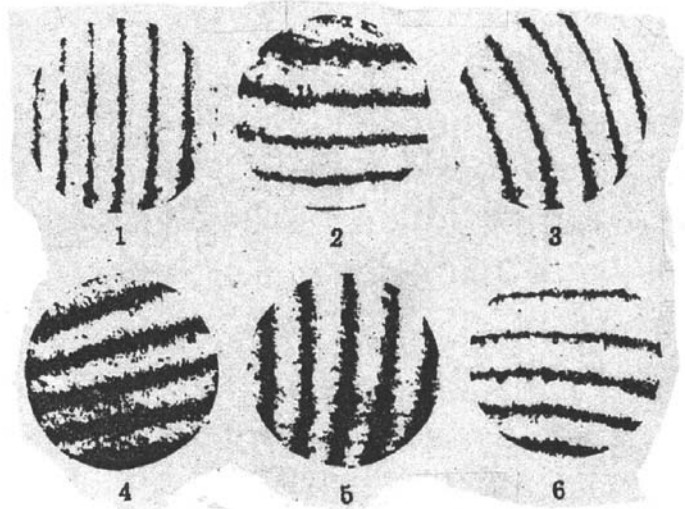


Fig. 2 Interferograms of subapertures

由表 1 所给的数据可知, 多孔径扫描波面恢复技术的综合误差平均值 $\bar{\Delta W}_{rms}$ 约为 $\lambda/50$, 其

离散度(均方差) σ_{rms} 约为 $\lambda/370$, 具有很高的重复精度. 这个综合误差值($\lambda/50$), 与利用全孔径检验的方法所得到的结果($\lambda/60$)^[1~2] 是一致的, 表明用这种方法所定义的综合误差值是反映了多孔径扫描波面恢复技术的实际情况的, 且这种定义方法更为严密. 另一方面, 从以上数值可以看出, 这项技术的精度较 Kwon 及其他方法^[5~6] 有明显提高.

Table 1 Restoration results for six subapertures (Unit: λ)

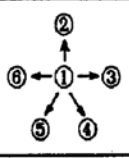

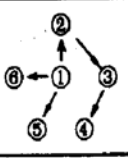


No.	W_{rms}	W_{p-v}	$\Delta W'_{rms}$
1	0.1610	0.7992	0.02132
2	0.1669	0.8013	0.01689
3	0.1608	0.7851	0.02006
4	0.1610	0.7994	0.02330
\bar{W}	0.1596	0.7897	—
$\Delta W'_{rms}$	0.02039 $\approx \lambda/50$		
σ_{rms}	0.00269 $\approx \lambda/370$		

3 拼接模式对综合误差的影响

当两个以上子孔径进行拼接时, 就产生了拼接模式的问题. 所谓拼接模式, 是指有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. 如对于图 1 所示的六子孔径拼接, 其拼接模式有:

- (1) ①→②→③→④→⑤→⑥ 即六个子孔径依次拼接, 称为“串行模式”;
- (2) ①→②, ①→③, ①→④, ①→⑤, ①→⑥ 即外围的五个子孔径向中心子孔径拼接, 称为“并行模式”;
- (3) “混合模式”, 即既有串行拼接又有并行拼接的拼接模式.

Table 2 Influence of connection mode on synthetic error (Unit: λ)

Connection Path					
Max. cnct. times	1	2	3	4	5
$\Delta W'_{rms}$	0.01688	0.02477	0.02767	0.02777	0.03273
Increase	—	1.47	1.64	1.65	1.94

不同的拼接模式有不同的拼接次数. 显然, 随着拼接次数的增加, 误差将逐步积累. 并行模式的拼接相当于单次拼接, 外围各子孔径经一次拼接后具有基本相同的误差, 于是, 所恢复的全孔径波面各处的误差基本一致, 则 $\Delta W'_{rms}$ 能正确反映综合误差. 而采用串行拼接模式则拼接次数大为增加, 拼接路径上离起始(基准)子孔径越远的子孔径, 其误差亦越大, 所恢复的全孔径波面各处的误差不均匀. 混合模式的情况则介于二者之间. 由此可见, 拼接中应尽可能采取并行模式或接近并行模式的混合模式. 六子孔径拼接中不同拼接模式对综合误差的影响见表 2. 由表 2 可知, 若选择不恰当的拼接模式, 则将引起较大的精度损失, 从并行模式到

串行模式, 误差几乎增加一倍.

4 拼接区大小对综合误差的影响

多孔径扫描波面恢复技术中波面拼接的一个重要出发点是: 拼接的两个子孔径之间有一定的重叠区(拼接区), 在拼接区中, 基于两个不同参考面的波面表达 W_1 和 W_2 (参见图 3, 图中 W 轴方向由纸面向外) 实际上是同一波面, 对于拼接区中的任意一点 P , 其在坐标系 1 中的波面值 W_1 和在坐标系 2 中的波面值 W_2 之间存在以下关系^[2]

$$W_1 = \Delta B \cdot x_2 + \Delta C \cdot y_2 + W_2 + \Delta A \quad (7)$$

式中 x_2 和 y_2 为 P 点在坐标系 2 中的值, ΔB 和 ΔC 分别为两坐标系沿 x 轴和 y 轴方向的相对倾斜, ΔA 为两坐标系沿 W 轴方向的相对平移. 理论上说, 只须在拼接区中取任意不在同一直线上的三点, 即可求得 ΔB 、 ΔC 和 ΔA 的准确解. 但由于两个波面 W_1 和 W_2 经拟合后引入拟合误差, 同时还存在着采样误差, 因此, 求 ΔB 、 ΔC 和 ΔA 的最小二乘解比求它们的准确解更有意义. 这就需要在拼接区内取较多的点, 于是产生了拼接区大小的问题.

定义重叠系数 K_c : 若子孔径半径为 r , 两子孔径中心连线上的重叠区域宽度为 d (图 3), 则

$$K_c = d/r \quad (8)$$

显然, $0 < K_c < 2$. 为了分析重叠系数对综合误差的影响而排除其他因素的作用, 我们进行了两个子孔径拼接的计算机模拟, 构造函数波面并加入随机噪声, 然后采样、拟合、拼接. 表 3 给出了重叠系数 K_c 与 ΔW_{rms} 的关系, 图 4 给出了相应的曲线. 可以看出, 总的趋势是 ΔW_{rms} 随 K_c 的增加而减小. 当 $K_c > 0.25$ 时, ΔW_{rms} 变化不大, 略有起伏, 且数值较小, 说明此时拼接是稳定的, 在拼接区内有足够的点可以求得较高精度的 ΔB 、 ΔC 和 ΔA 的最小二乘解. 当 $K_c < 0.25$ 时, 可以较明显地看到综合误差随重叠区域的减小而增加. 当 K_c 进一步减小, 达到 $K_c < 0.1$ 后, 误差急剧增大, 此时由于拼接区很小, ΔB 、 ΔC 和 ΔA 的最小二乘解已丧失精度, 拼接实际上是失败的. 因此在实际使用中, 为获得较高的拼接精度, 应控制 $K_c > 0.25$ 为宜. 在图 1 给出的实例中, 作并行模式拼接时, $K_c \approx 0.7$, 拼接是稳定的.

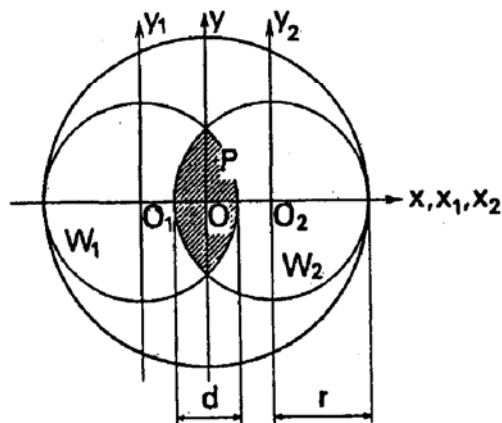


Fig. 3 Arrangement of two subapertures

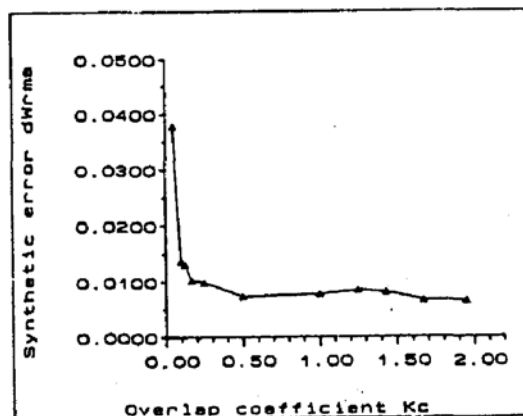


Fig. 4 Curve of the relationship between overlap coefficient and synthetic error

Table 3 Influence of overlap coefficient on synthetic error (Unit: λ)

K_c	0.05	0.10	0.125	0.167	0.25	0.50
ΔW_{rms}	0.03783	0.01368	0.01305	0.01016	0.00977	0.00717
K_c	1.0	1.25	1.43	1.67	1.95	
ΔW_{rms}	0.00765	0.00830	0.00793	0.00649	0.00632	

5 讨 论

多孔径扫描波面恢复技术能在较大孔径的检测范围内达到较高的精度,在孔径放大系数 K_c 达到 2.5 左右时,其综合误差 ΔW_{rms} 为 $\lambda/50$ 左右.这意味着,利用目前常用的直径 150 mm 的干涉仪,可以测量直径 350 mm 左右的光学平面,误差为 $\lambda/50$.在拼接过程中,拼接模式的选择直接影响着综合误差.一般地说,并行模式比串行模式的误差小.要进一步提高孔径放大系数 K_c ,如要求 K_c 达到 4 左右,其拼接模式将更复杂(图 5),但选择原则却是相同的,即尽可能减少拼接次数,如可以选择如图 5 所示的拼接模式,最高拼接次数为 3 次.

另一方面,在孔径放大系数不变的情况下,重叠系数也将影响拼接次数.重叠系数较小,拼接效率就较高,则相应可以减少拼接次数;相反,较大的重叠系数使拼接效率下降,而增加拼接次数.根据实验,选取 $0.4 < K_c < 0.9$ 是比较合适的,可以保证有足够的拼接区大小而又不致使拼接效率下降过多.当精度要求较低时,可选择较小的 K_c 值以提高拼接效率,而精度要求较高时,则选择较大的 K_c 值以保证精度.拟合误差也对综合误差有影响.

拟合误差使测得波面偏离真波面,造成拼接区中式(7)的不准确,而使拼接过程引入误差.图 1 给出的实例,各子孔径的拟合误差为 $\lambda/150$ 左右,在综合误差中占了相当的比例.进一步降低拟合误差,对降低综合误差是有利的.事实上,若完全排除拟合误差的影响,综合误差将大大降低,计算机模拟的结果证明了这一点^[2].改善干涉图的条纹对比度、寻找更合理的拟合模式都将有助于降低拟合误差.

定位误差的影响在于两个方面,其一,影响拟合误差.采用数字图象处理技术来处理干涉图可使这一项影响减小到几乎可以忽略.其二,影响各子孔径之间的相对位置,而使式(7)的精度受到影响,进而影响综合误差.进一步的分析表明,当定位误差为 0.05mm~0.1mm 时,对综合误差的影响与拟合误差($\lambda/150$)对综合误差的影响相当.

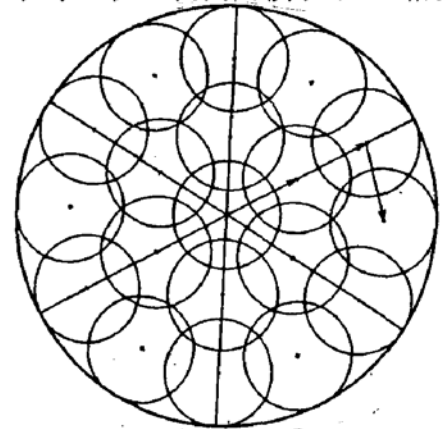


Fig. 5 Arrangement of subapertures with enlarging aperture coefficient $K_c = 4$

参 考 文 献

- [1] Mingyi Chen, Weiming Cheng, Cunwu Wang, Multi-aperture overlap-scanning Technique for large aperture test. *Proc. SPIE*, 1991, 1553, 626~635
- [2] Weiming Cheng, Mingyi Chen, Transformation and connection of subapertures in multi-aperture overlap-scanning Technique for large optics test, accepted by *Optical Engineering*
- [3] 林有略, 陈明仪, 数字波面恢复中的高斯门限法. *光学学报*, 1993, 13(1), 36~41
- [4] [墨西哥]马拉卡拉, (王国强等译), 光学车间检验, 北京, 机械工业出版社, 1988年, 443~460

- [5] J. G. Thunen, O. Y. Kwon, Full aperture testing with subaperture test optics. *Proc. SPIE*, 1982, **351**:1~6
[6] J. E. Nergo, Subaperture optical system testing. *Appl. Opt.*, 1984, **23**:1921~1930

Factors Having influence on the accuracy of multi—aperture overlap—scanning technique (MAOST) and Analysis

CHENG Weiming LIN Youlue CHEN Mingyi

(*Laboratory of Applied Optics and Metrology, Shanghai University of Science and Technology
Shanghai 201800*)

(Received 12 February 1993; revised 19 April 1993)

Abstract

Multi—aperture overlap—scanning technique (MAOST) is a effective means of measuring large aperture wavefront of high precision. Having given the accuracy definition of MAOST, this paper discusses, with experimental tests, two main influential factors, i. e. , the aperture connection mode and overlap coefficient.

Key words multi—aperture overlap scanning, wavefront restoration, large optics test