

# 大口径镜面的多孔径拼接技术

白 剑 程上彝 杨国光

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘 要** 提出了完成大口径镜面的多孔径拼接技术, 即利用实时相位探测技术实现尺寸小、精度高的子孔径镜面之间的位相合成, 从而获得性能优越的大口径镜面。然后对多孔径拼接技术原理进行了较为详细的数学描述, 并完成了原理性实验, 最后获得了实验结果。

**关键词** 子孔径, 波面位相。

## 1 引 言

光学系统口径尺寸的增大既可提高空间分辨率又能增大信号能量, 因此大口径镜面是地面天文, 空间天文以及其它监测系统等领域所迫切需要的。但是大口径镜面的加工制造必将带来毛坯加工、抛光、镀膜、面形检测及控制等一系列复杂问题, 难以实现达到衍射极限性能的大型光学系统。而采用子孔径模式, 用多反射镜组合构成大型镜面是当前大口径光学系统的发展方向, 其中的关键在于如何实现多反射镜间的组合。国外提出光程差检测方法来实现子孔径间的位相合成<sup>[1]</sup>, 这种方法的缺点在于仅能获得位移量, 而本文提出多孔径拼接技术, 即利用实时相位探测技术可以实现多孔径的拼接, 拼接精度主要由子孔径加工精度和相位探测技术的灵敏度和精度决定, 由于加工尺寸小的子孔径可获得高精度, 因此, 用这种新方法可避免结构庞大而复杂的工艺设备就能获得面形精度优于  $\lambda/2$ 、甚至  $\lambda/5$  的大尺寸镜面。

## 2 多孔径拼接技术

多孔径拼接技术的基本原理是利用实时相位探测技术精确地确定待拼接的各子孔径的相应调整量, 从而正确地指导调整, 最终实现多孔径的拼接。

设多孔径数目为  $N$ , 该多孔径系统可组成一球面, 其半径为  $R$ , 每个子孔径的调整量用倾斜量  $K_{xi}$ 、 $K_{yi}$  及轴向位移  $S_i$  表示, 如图 1 所示。

拼接过程分粗调及精调两步:

1) 粗调——把待拼接的多孔径系统放入干涉测量系统中, 粗调各子孔径位置, 直至出现干涉条纹为止。

2) 精调——利用相位探测技术可获得与粗调干涉图相对应的波面位相数据  $W(x, y)$ , 若以理想拼接位置与光轴的交点为原点建立坐标系, 则它可表示为

$$W(x, y) = W_0(x, y) + \sum_{i=1}^N [P_i + K_{xi}x + K_{yi}y + D_i(x^2 + y^2)] l_i(x, y) \quad (1)$$

式中,  $W_0(x, y)$  为理想的拼接波面位相;  $P_i$ 、 $K_{xi}$ 、 $K_{yi}$ 、 $D_i$  分别为各子孔径的平移、倾斜及离焦;  $l_i(x, y)$  为当点  $(x, y)$  位于第  $i$  个子孔径时取值为 1, 否则为 0。

当第  $i$  个子孔径仅由于轴向位移而偏离理想拼接位置时, 可由图 2 表示, 若  $R$  为多孔径系统的半径, 则可用圆弧  $A$  表示子孔径所在的理想拼接位置, 圆弧  $B$  表示子孔径因轴向位移  $S_i$  的偏离所到达的位置, 圆弧  $C$  则以  $O$  为圆心,  $R + S_i$  为半径, 由  $O$  出发的射线交三段圆弧于  $Q$ 、 $T$ 、 $P$  三点, 易知  $\overline{QT}$  即表示由此所引起的波面误差  $\Delta W_i(x, y)$ 。

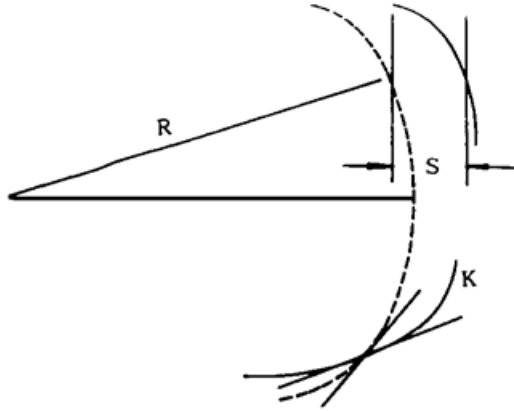


Fig. 1 Schematic diagram of subaperture alignment

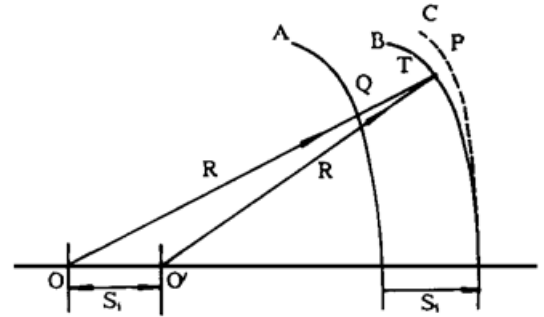


Fig. 2 Diagram of aberration wavefront caused by  $S_i$

当  $x^2 + y^2 \ll R^2$ ,  $S_i \ll R$  时, 可证明

$$\overline{TP} = (S_i/2R^2)(x^2 + y^2) \quad (2)$$

$$\text{故} \quad \Delta W_i(x, y) = \overline{QP} - \overline{NP} = S_i - (S_i/2R^2)(x^2 + y^2) \quad (3)$$

由于相位探测技术中必须对各子孔径分别连续化, 它们各存在波长整数倍的差异<sup>[2]</sup>, 故实际探测得到的波面误差  $\Delta W_i(x, y)$  为

$$\Delta W_i(x, y) = \Delta W_i(x, y) + m_i\lambda = (S_i + m_i\lambda) - (S_i/2R^2)(x^2 + y^2), \quad (m_i \text{ 为整数}) \quad (4)$$

由上式可知, 轴向位移引起的波面误差分为平移和离焦两部分, 且平移系数  $P_i$  和离焦系数  $D_i$  与轴向位移  $S_i$  直接有关, 它们的关系为

$$P_i = S_i + m_i\lambda \quad (5)$$

$$D_i = -S_i/2R^2 \quad (6)$$

实际的精调过程为固定任一子孔径, 依次实现其余各子孔径与之拼接。把孔径标号, 固定第一号子孔径, 令

$$\begin{aligned} \Delta K_{xi} &= k_{xi} - K_{x1}, & \Delta K_{yi} &= K_{yi} - K_{y1}, \\ \Delta S_i &= S_i - S_1, & \Delta m_i &= m_i - m_1, \end{aligned} \quad (i = 2, \dots, N) \quad (7)$$

确定  $\Delta K_{xi}$ 、 $\Delta K_{yi}$ 、 $\Delta S_i$ 、 $\Delta m_i$  ( $i = 2, \dots, N$ ) 即可精确地确定其余各子孔径的调整量。令

$$\begin{aligned} P' &= S_1 + m_1\lambda, & K'_x &= K_{x1} \\ K'_y &= K_{y1}, & D' &= -S_1/2R^2 \end{aligned} \quad (8)$$

整理上述各式, 得

$$\begin{aligned} W(x, y) &= W_0(x, y) + P' + K'_x x + K'_y y + D'(x^2 + y^2) \\ &+ \sum_{i=2}^N [\Delta S_i + \Delta m_i\lambda + \Delta K_{xi}x + \Delta K_{yi}y - \frac{\Delta S_i}{2R^2}(x^2 + y^2)] l_i(x, y) \end{aligned} \quad (9)$$

利用最小二乘法可确定  $P'$ 、 $K'_x$ 、 $K'_y$ 、 $D'$  及  $\Delta S_i$ 、 $\Delta m_i$ 、 $\Delta K_{xi}$ 、 $\Delta K_{yi}$  ( $i = 2, \dots, N$ ) 即精确地获

得第 2 个至第  $N$  个子孔径的调整量。

上述过程编程实现，若采样点数为  $M \times M$  的阵列，则经反复调整，当

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \sum_{i=2}^N (\Delta S_i + \Delta m_i \lambda + \Delta K_{xi} x_{mn} + \Delta K_{yi} y_{mn} - (\Delta S_i / 2R^2) (x_{mn}^2 + y_{mn}^2))^2 l_i(x_{mn}, y_{mn})$$

趋于 0 时，调整与拼接完成。

### 3 实验装置及结果

作为原理性试验，用六块扇形的小镜面拼接完成了口径为  $\Phi 150 \text{ mm}$  的镜面，其尺寸大小如图 3 所示。利用菲索干涉系统及动态条纹扫描技术<sup>[3]</sup>可实现六块子孔径镜面的调整及位相探测。图 4 为完成镜面拼接的干涉测量系统，其中  $\text{Len}_1$  为相对口径与拼接镜面相匹配的齐明镜组，其反射面作为参考面。

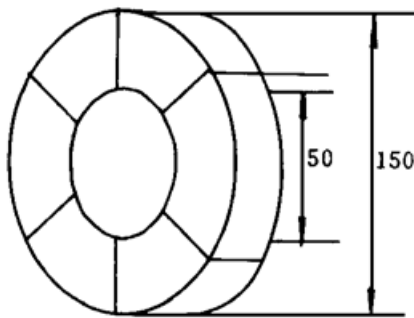


Fig. 3 Dimension of segmented mirrors

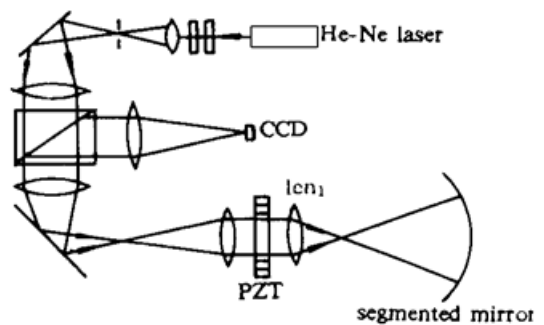


Fig. 4 Fizeau interferometer for alignment

图 5 为实现实时相位探测的技术原理图，由 PZT 驱动参考镜面可实现位相调制，由高分辨率 CCD (512×512) 及图像接口卡可完成干涉图的实时采集。在微机软件的控制下，十秒钟内即可完成来自六个子孔径的相位数据的探测，利用子孔径拼接软件即可判断拼接的程度，以便作相应的调整。在每块镜面的背后都有相应的精密调整机构，可实现倾斜及轴向移动。在实验中，首先把待拼接的六块镜面放入干涉测量系统中，在齐明镜组会聚点处找到来自子孔径镜面的六个反射点，使它们大小都与该会聚点相同，且都与之重合，即实现共焦。此时可在监视器上获得干涉条纹，利用实时相位探测技术及子孔径拼接技术可继续进行精确调整，直至实现位相合成。图 6 为所获得的六孔径相位合成的干涉图，由于合成后的镜面为非球面，故该干涉图为非球面与球面的比较结果，由于拼接后的镜面形成一圆环，故干涉图中间为一圆孔，又由于干涉系统中有四根支架，从而导致干涉图中有四个缺口。

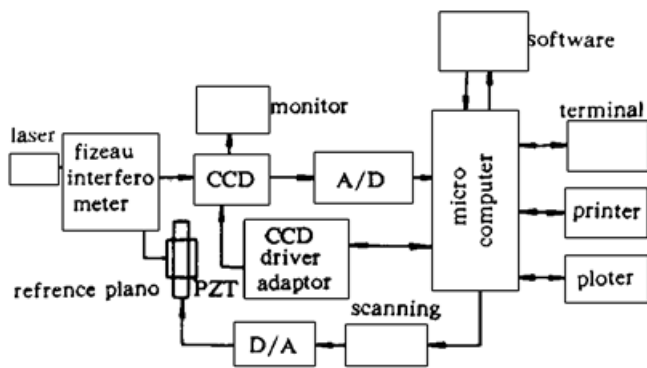
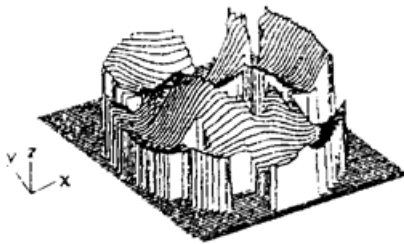


Fig. 5 Principle diagram of wavefront sampling

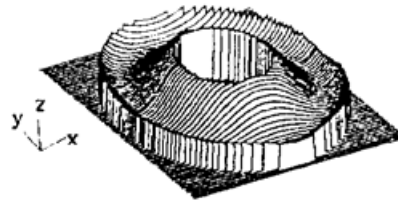


Fig. 6 Fringe pattern of aligned segmented mirrors

图 7 为与图 6 对应的波差立体透视图, 图 8 为理想非球面与球面比较的理论波差透视图, 比较图 7 和图 8 并用波面相减程序, 得到了实现位相合成后的立体透视图, 如图 9 所示, 从图中的  $E_m$  值可知, 面形精度已达  $\lambda/4$ 。实验结果表明, 虽然整个调整过程较为复杂, 时间较长, 但由此可获得较高精度的面形。如何用微机实现自动调整则是今后的努力方向。



PTS=7548 RMS=0.399  
PV=1.944  $E_m=1.051$



PTS=9640 RMS=0.399  
PV=1.784  $E_m=0.564$



PTS=7317 RMS=0.087  
PV=0.425  $E_m=0.230$

Fig. 7 Isometric view of aligned segmented mirrors corresponding to Fig. 5

Fig. 8 Isometric view of theoretical aligned segmented aspherical mirrors compared to a sphere

Fig. 9 Isometric view of aligned segmented mirrors we obtained

**结 论** 本文提出的多孔径拼接技术是利用位相探测技术实现子孔径的位相合成, 它可避免复杂的加工便可获得面形优越的大口径镜面, 为大口径光学系统的制造及加工提供了一条途径。

### 参 考 文 献

- [1] Janet S. Fender, Richard A. Carreras, Demonstration of an optically phased telescope array. *Opt. Engng.*, 1988, **27**(9) : 706~ 711
- [2] 白 剑, 刘 承, 杨国光等, 带分割遮拦干涉图的计算机分析. *光学学报*, 1996, **16**(1) : 111~ 116
- [3] J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher *et al.*, Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surface and lenses. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(11) : 2693~ 2703

## Subaperture Alignment Technique for Large Aperture Mirrors

Bai Jian      Chen Shangyi      Yang Guoguang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 12 January 1997; revised 5 March 1997)

**Abstract** The subaperture alignment technique for large aperture mirrors is presented. Wavefront sampling technique is employed to achieve the coherent combination of segmented mirrors, which have much smaller aperture but with higher surface quality. Hence larger aperture mirror with good performance can be obtained in this way. The mathematic descriptions of subaperture alignment technique are given. A demonstration experiment was done and the results were obtained.

**Key words** subaperture, wavefront.