

文章编号: 0253-2239(2005)07-965-5

## 大口径天文薄镜面磨制试验\*

崔向群 李新南 张振超 夏自立 李焯平 王 佑

(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:** 介绍了采用薄镜面主动支撑技术来加工大口径天文薄镜面的试验情况。试验镜为一弯月型球面反射镜, 直径为  $\phi 1035$  mm, 镜面曲率半径为 3220 mm, 径厚比约为 40:1。在磨制过程中, 有 55 个分离支撑点支撑在镜子背面。支撑点的位置与支撑力的大小通过有限元分析计算确定, 其中 3 个为固定支撑点, 另外 52 个为主动支撑点。每个支撑点位置设置了力促动器, 调节力促动器加力的大小, 可以主动改正镜面的低频误差。加工后最后达到的面形精度:  $\lambda = 632.8$  nm, 面形误差 (RMS) 小于等于  $\lambda/21.5$ , 局部高频误差 (RMS) 小于等于  $\lambda/23$ 。试验证明所采用的方法适合于大口径天文薄镜面的加工。

**关键词:** 应用光学; 天文大口径薄镜面; 光学加工与检测; 主动支撑; 力促动器

中图分类号: P111 文献标识码: A

## Tentative Fabrication Test for Large Aperture Thin Astronomical Mirror

Cui Xiangqun Li Xinnan Zhang Zhenchao Xia Zili Li Yeping Wang You

(Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories,  
The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)

**Abstract:** A tentative fabrication test for thin astronomical mirror has been done. In the test, the active support system is used. The mirror is a meniscus spherical mirror and its parameters are as follows: the diameter is  $\phi 1035$  mm, radius of curvature is 3220 mm, and aspect ratio is close to 40. During the processing, the mirror was supported by 55 supporting points in its back surface. The positions of supporting points and the magnitude of supporting force supplied by force actuators were analyzed by using finite element analysis software. In all of 55 supporting points, 3 points are fixed and the rest are active support which is linked with force actuator. The low-frequency error on the mirror can be corrected when the forces of actuators were adjusted. Finally root mean square (RMS) of surface accuracy error is less than  $0.0465\lambda$ , RMS of high-frequency error is less than  $0.0435\lambda$ . It is demonstrated that the technique is suited for fabrication of astronomical thin mirror.

**Key words:** applied optics; astronomical large aperture thin mirror; optical manufacturing and testing; active support; force actuator

### 1 引 言

20 世纪 90 年代以来, 大口径薄镜面在天文望远镜中被广泛应用, 直接推动了大型天文望远镜技术的发展, 并建成了多架 8 m 级单个镜面的新技术大型望远镜。目前世界上在建和已经建成的 8 m 级单个镜面主镜的大型望远镜中, 只有美国国立光学天文台的 LBT 望远镜  $\phi 8.4$  m 主镜采用了蜂窝结构, 其他望远镜无一例外地采用了薄镜面主镜, 径厚

比均超过了 40:1。国内正在研制的 4 m 级大天区面积多目标光纤光谱望远镜 (LAMOST) 也采用了对角线长 1.1 m 的正六边形薄镜面作为拼接子镜<sup>[1]</sup>。薄镜面系统镜面单位面积的重量轻, 有利于减小整个望远镜系统的机械传动装置和电控系统的复杂程度, 因此, 它的应用有着十分积极的意义。薄镜面最新的应用领域为空间望远镜计划, 相比之下, 这种应用场合下的技术要求更高, 包括镜子、支撑结

\* 国家自然科学基金 (19633020) 重点资助课题。

作者简介: 崔向群 (1951~), 女, 山东博兴人, 研究员, 主要从事天文望远镜、主动光学技术、天文镜面技术等的工作。

E-mail: xcui@niaot.ac.cn

收稿日期: 2004-05-31; 收到修改稿日期: 2004-11-24

构和促动器在内,目前镜面系统单位面积的重量只有  $13 \text{ kg/m}^2$ <sup>[2]</sup>。从加工角度来讲,薄镜面磨制的主要难点是:镜面薄、自身的刚度差,磨制过程中容易产生高频误差。本工作磨制了一块  $1 \text{ m}$  级的薄球面镜,针对大口径薄镜面的特点,磨制过程中镜面支撑采用分离式主动支撑,支撑点位置设置了力促动器来调节力的大小,可以改正镜面的低频误差。整个工艺过程模拟了大口径薄镜面的加工程序,为今后加工更大口径的薄镜面积累了经验。

## 2 镜子成形

镜子外形为弯月形,外径约  $\phi 1050 \text{ mm}$ ,镜面和镜背面的矢高都大于  $40 \text{ mm}$ ,为了达到  $26 \text{ mm}$  中心厚度,从一块  $75 \text{ mm}$  厚的 K9 玻璃镜坯材料,通过机械铣磨的方法得到最后所要求的镜子形状,正反两面成形阶段工作量都很大。镜子的成型也还有另外的途径,如将薄玻璃平板加热软化,使其与预先作好的模具相吻合,冷却到常温后得到所需的弯月形镜坯材料,但该方法一方面需要额外增加材料试验成本,另一方面这种加工方法成型后镜坯材料的理化性能指标变化情况也没有实验数据。经权衡,采用了比较传统的方法。实际镜坯材料的外形尺寸选为  $\phi 1050 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 。从镜坯来料到镜子成形的步骤如图 1 所示。

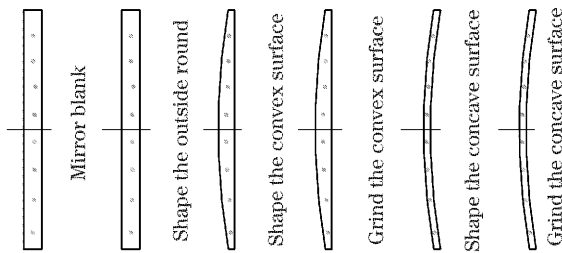


图 1 镜子外形成形过程

Fig. 1 The procedure of fabricating the mirror

镜子的凹面和凸面进行粗磨和细磨时,采用了  $\phi 300 \text{ mm}$  左右的磨具,磨具由电机驱动作主动旋转。在抛光阶段,同样采用了小工具抛光。整个加工过程中采用小口径磨具,主要目的是为了避免镜面受磨具重压在支撑处产生局部变形,同时,通过试验探索更大口径的大型天文镜面的磨制方法。

## 3 镜子的支撑

镜子成形后,外圆直径为  $\phi 1035 \text{ mm}$ ,弯月形前后表面成为近似同心球面,中心厚度为  $26 \text{ mm}$ 。镜

面曲率半径为  $3220 \text{ mm}$ 。镜子的径厚比约为  $40:1$ 。镜子采用分离点浮动支撑形式,支撑点的位置与支撑力的大小由有限元分析计算确定。经优化后,镜子背面总共设置了 55 个支撑点,其中 3 个为固定支撑点,另外 52 个点采用了主动支撑,支撑力的大小可以由力促动器调整。支撑点位置分布在 5 个环带上,支撑环半径分别为:  $0 \text{ mm}$ ,  $111 \text{ mm}$ ,  $231 \text{ mm}$ ,  $365 \text{ mm}$ ,  $484 \text{ mm}$ ,每一个环带的支撑点数目依次为:  $1, 6, 12, 18, 18$ ,三个固定支撑点位于从中心向外数第四环上。在 55 个支撑点的支撑下,重力变形引起镜面的最大表面变形量(PV)为  $16 \text{ nm}$ ,均方根值(RMS)为  $3 \text{ nm}$ 。

力促动器的机械结构采用组合弹簧式的推拉力式结构,用步进电机控制弹簧的伸缩量,实现加力或减力的需求,其加力的设计范围为  $\pm 30 \text{ N}$ 。计算机控制步进电机所走的步数对应控制加力的大小,每个力促动器的加力精度预先用高精度  $100 \text{ N}$  的力传感器作标定,计算机控制标定的精度达到了万分之五,均方根值小于等于  $50 \text{ mN}$ 。力促动器的外观形状如图 2 所示。图 3 为镜子与支撑的相对位置关系示意图。

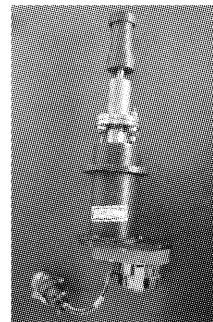


图 2 力促动器外形

Fig. 2 Figure of force actuator

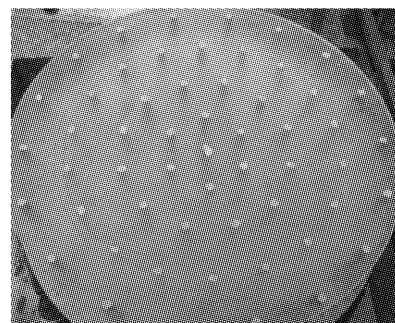


图 3 超薄镜面及其主动支撑

Fig. 3 Thin mirror and its active support system

## 4 镜面抛光与检测

根据 Preston 的假设,研磨过程中镜面材料的

去除量的大小主要取决于磨具对镜面的加工压力和两者之间的相对运动速度,对于磨具与镜面接触范围内某点 $(x, y)$ ,在单位时间内材料的去除量 $\Delta h(x, y)$ 可以表达为

$$\Delta h(x, y) = kP(x, y)v(x, y),$$

其中 $P(x, y)$ 为磨具对镜面的加工压力, $v(x, y)$ 为磨具对镜面的相对移动速度, $k$ 为与加工环境和条件有关的常量。

镜面连同其支撑一起固定在一个 1.2 m 磨镜机的工作台上,工作台转速可调。在镜面抛光过程中,镜子随工作台作转动,抛光工具则在镜面上沿着镜面的径向作移动,同时抛光工具又被另一个电机带动作旋转运动,两者的相对关系如图 4 所示。图中 $\omega_1$ 为镜子的转动角速度, $\omega_2$ 为磨具的转动角速度,磨具沿径向的移动速度为 $v_x$ 。

由于抛光工具直径比镜面尺寸小很多,需要按照预定的路径在镜面上运动才能达到抛光整个镜面的目的。特定的抛光工具具有特定的材料磨削能力,镜面上某一点的材料去除量同时又与抛光工具在该点的停留时间长短有关。假定镜面上材料去除量分布函数为 $E(x, y)$ ,抛光工具的工作函数为 $R(x, y)$ ,停留时间函数为 $D(x, y)$ ,则材料去除量

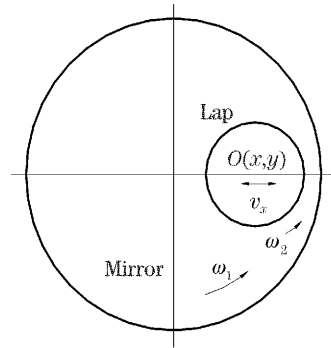


图 4 镜子和抛光磨具的相对位置示意图

Fig. 4 The relationship between mirror and lap  
 $E(x, y)$ 等于抛光工具工作函数 $R(x, y)$ 与其停留时间函数 $D(x, y)$ 的二维卷积:

$$E(x, y) = R(x, y) * D(x, y)$$

为方便加工与检测,镜面的加工状态和检测状态完全一致,镜面朝上方,光轴沿铅垂方向。检验装置设置在镜子的正上方,检测仪器可以用刀口阴影仪、夏克-哈特曼波面检测仪,也可以用干涉仪。检验完毕,不需要改变镜子的姿态就能直接进入镜面的下一步加工。图 5 分别给出了夏克-哈特曼波面检测仪和干涉仪两种情况下的光路配置。

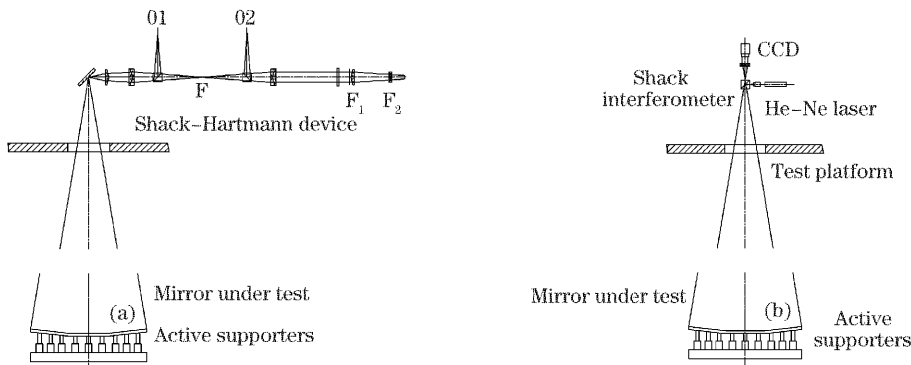


图 5 夏克-哈特曼(a)和夏克干涉仪(b)检验镜面示意图

Fig. 5 The schem of Shack-Hartmann (a) and Shack-interference (b) test

图 5(a)的检测光路里,所用的夏克-哈特曼波面检测仪最合适的检测光束口径为 1:9 左右,而被检验镜球心处的孔径 $D/R$ ( $D$ 为镜面有效口径, $R$ 为镜面曲率半径)为 1:3,需要设置一组转换透镜,将来自球面的光束口径转换到 1:9。同时使用一块平面镜将光轴折转了 $90^\circ$ ,使夏克-哈特曼波面检测仪光轴呈水平状态。图 5(b)所示的光路直接采用了一台夏克干涉仪,最大可检测的光束口径为 1:2,其位置就在被检验球面镜的球心附近。相对而言,

辅助部件少,误差来源少,结构紧凑。

## 5 镜面主动校正、修琢和加工结果

镜面作主动校正<sup>[3]</sup>时,首先用夏克干涉仪获取干涉图,对干涉图进行处理,获取与此相对应的波面信息。波面被表达成扩展的多项式形式:

$$W = \sum_{n=0}^k a_{mn} x^n y^m,$$

其中  $(m + n) \leq k, k$  为多项式最高项次。

根据实际波面形状,求出在波面的  $m$  个采样点位置的波面  $W(W_1, W_2, \dots, W_m)$ 。假设此情况下,波面  $W(W_1, W_2, \dots, W_m)$  是由  $n$  个力促动器作用下的结果,力促动器的力为  $F(F_1, F_2, \dots, F_n)$ ,根据弹性力学力与变形关系的线性原理,可以得到加力大小与波面的关系如下:

$$\begin{aligned}
 W_1 &= \frac{\partial W_1}{\partial F_1} F_1 + \frac{\partial W_1}{\partial F_2} F_2 + \frac{\partial W_1}{\partial F_3} F_3 + \dots + \\
 &\quad \frac{\partial W_1}{\partial F_{n-1}} F_{n-1} + \frac{\partial W_1}{\partial F_n} F_n, \\
 W_2 &= \frac{\partial W_2}{\partial F_1} F_1 + \frac{\partial W_2}{\partial F_2} F_2 + \frac{\partial W_2}{\partial F_3} F_3 + \dots + \\
 &\quad \frac{\partial W_2}{\partial F_{n-1}} F_{n-1} + \frac{\partial W_2}{\partial F_n} F_n, \\
 &\quad \dots \dots \dots \\
 W_m &= \frac{\partial W_m}{\partial F_1} F_1 + \frac{\partial W_m}{\partial F_2} F_2 + \frac{\partial W_m}{\partial F_3} F_3 + \dots + \\
 &\quad \frac{\partial W_m}{\partial F_{n-1}} F_{n-1} + \frac{\partial W_m}{\partial F_n} F_n,
 \end{aligned}$$

上式记为  $W=CF$ 。其中  $C$  为刚度矩阵,代表给每一个力促动器加 1 单位的力时,波面上  $m$  个取样点处波面变化量。该刚度矩阵通过有限元计算得到。

为了改正已知波面,利用刚度矩阵求得产生相反波面的改正力,加到要校正的镜子上。对要求产生的波象差  $W$ ,力促动器的加力的最小二乘法解为

$$F = (C^T C)^{-1} C^T W.$$

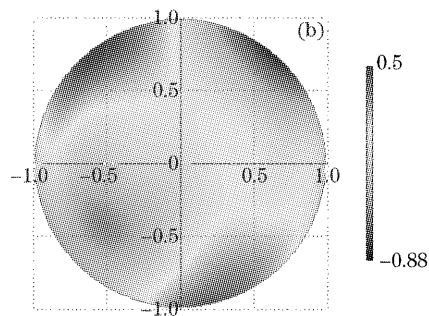
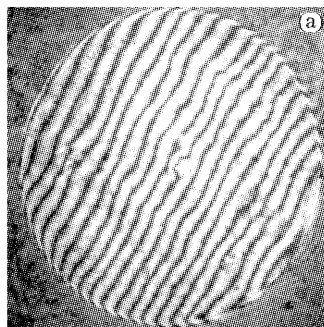


图 7 校正低频误差前的干涉条纹及波面形状

Fig. 7 The interferogram and wave-front figure before correcting low-frequency errors

将镜面低频成分从实测得到的波面中分离出来,镜面低频误差为  $0.54\lambda$ ,均方根值为  $0.096\lambda$ 。该结果表明,波面的低频成分占了很大的比例,故决定用主动支撑来改正低频误差。校正波面低频成分所需要的力非常小,按照理论计算,52 个力促动器的加力范围在  $+1.102\text{ N}$  到  $-1.316\text{ N}$  之间,均方值

考虑测试误差等因素,采用阻尼最小二乘法来求解力的大小,对应的阻尼最小二乘解为

$$F = (C^T C + PI)^{-1} C^T W,$$

式中  $P$  为阻尼因子,  $I$  为单位矩阵。

实测的波面误差为镜面误差的两倍。将波面误差分解成低频误差和高频误差,分别指波面表达式中低次项和高次项相对应的成分,低频部分用主动支撑校正,将校正低频误差后残留下来的误差称为局部高频误差。局部高频部分只能通过修琢过程消除。图 6 给出了镜面高频误差的修正过程与结果。

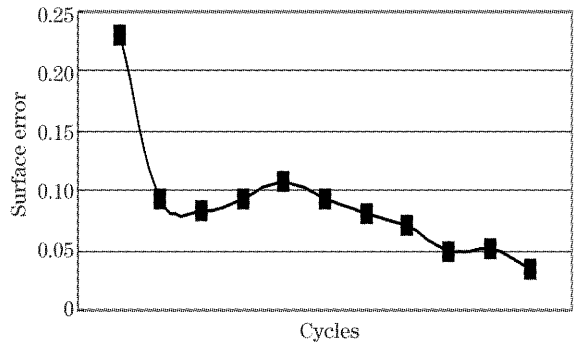


图 6 镜面高频误差修正过程与结果

Fig. 6 High-frequency error versus figuring cycles

图 7(a)给出了修改高频误差后的干涉图:镜面误差为  $0.588\lambda$ ,均方根值为  $0.102\lambda$ ,镜面局部高频误差为  $0.302\lambda$ ,均方根值为  $0.035\lambda$ 。对应波面的形状如图 7(b)所示。

值为  $0.624\text{ N}$ 。实际加力改正低频后实测的结果为:镜面误差为  $0.346\lambda$ ,均方根值为  $0.0465\lambda$ ,镜面局部高频误差均方根值为  $0.0435\lambda$ 。校正低频误差后的干涉条纹见图 8(a)所示,对应波面的面形误差如图 8(b)所示。

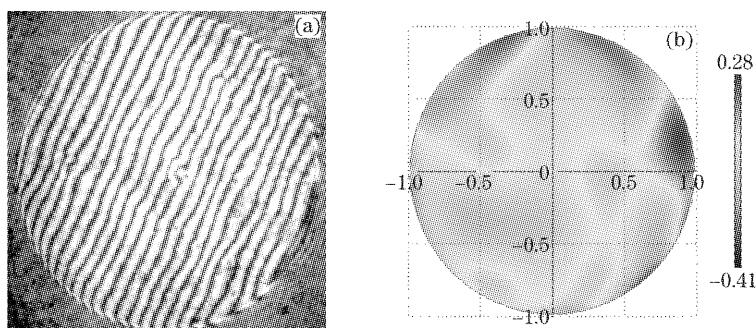


图 8 校正低频误差后的干涉条纹及波面形状

Fig. 8 The interferogram and wave-front figure after correcting low-frequency errors

## 6 结 论

用 55 个分离支撑形式的支撑点作为 1 m 级薄镜面加工过程中的底支撑,对镜面作了磨制试验,达到了预期的效果。镜面的面形精度达到了  $\lambda/21.5$ ,局部高频误差达到  $\lambda/23$ 。

经过该 1 m 级薄镜面的磨制过程,初步掌握了大口径天文望远镜的超薄主镜的磨制要点,为今后开展更大口径的超薄镜面的研制工作打下了良好的基础。

## 参 考 文 献

- 1 Shou-guan Wang, Ding-qiang Su, Yaoquan Chu *et al.*. Special configuration of a very large schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(25): 5155~5161
- 2 J. Burge, S. Perigne, R. Angel *et al.*. NGST mirror system demonstrator from the University of Arizona[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4451**: 27~38
- 3 Su Ding-qiang, Jiang Shengtao, Zou Weiyao *et al.*. Experiment system of thin-mirror active optics[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2199**: 609~621