

文章编号 1004-924X(2010)01-0075-08

球面拼接镜的相对曲率半径测量

林旭东^{1,2}, 陈涛¹, 明名¹, 王建立¹, 陈宝刚¹, 董磊¹
(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了实现对拼接镜子镜之间相对曲率半径的精确测量, 提高各子镜曲率半径的匹配精度, 提出了一种使用 Shack-Hartmann 传感器和高精度球径仪测量球面子镜相对曲率半径的新方法, 并建立了一个实验系统。该方法首先使用共焦调整方法使各子镜共焦, 用 S-H 传感器测量子镜的轴向离焦量, 轴向调整压电陶瓷促动器, 使由传感器测得的离焦量接近于 0; 最后, 再对子镜进行一次共焦调整之后, 使用高精度球径仪来测量各子镜之间的相对曲率半径差。实验采用的拼接镜由 3 块对边长 300 mm 的正六边形子镜组成, 子镜为球面, 设计曲率半径为 2 000 mm。分析测试结果表明, 该方法测得的球面拼接子镜的相对曲率半径精度约为 1 μm , 该方法表明适用于大型球面拼接镜面望远镜各子镜相对曲率半径的检测。

关键词: 天文望远镜; 拼接镜; 相对曲率半径; Shack-Hartmann 传感器; 球径仪

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A

Measurement of relative curvature radius for spherical segmented mirrors

LIN Xu-dong^{1,2}, CHEN Tao¹, MING Ming¹, WANG Jian-li¹, CHEN Bao-gang¹, DONG Lei¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: With the aim to measure the relative curvature radius between the two segments in spherical segmented mirrors and to improve the matching accuracy of segments, a new method utilizing a Shack-Hartmann sensor and a high precision spherometer to measure the relative radius of each spherical segment is presented and an experiment system is also setup. The method firstly uses a co-focus technique to co-focus each segment; then uses the S-H sensor to measure the defocus in the optical axis direction and employs a PZT actuator behind the segments to make the defocus near zero. After the same co-focus process is undertaken again, the relative radius of each segment can be measured by the high precision spherometer. In the experiment, the segmented mirror consists of three spherical hexagonal segments with an opposite side of 300 mm and a curvature radius of 2 000 mm. The analysis and experiment indicate that the precision of the method is about 1 μm , which shows that the method is

收稿日期: 2009-02-24; 修订日期: 2009-05-19.

基金项目: 中国科学院三期创新工程基金资助项目

suitable for the measurement of relative curvature radius of large spherical segmented mirrors.

Key words: astronomical telescope; segmented mirror; relative radius of curvature; Shack-Hartmann sensor; spherometer

1 引言

随着天文和航天科学的发展,科学家们迫切需要更大口径的天文望远镜来观测更遥远、更暗、更小的星体或飞行器。下一代大型地基和空基望远镜的尺寸都有很大增加,但由于毛坯材料、制造、运输和(或)发射火箭的限制,这些大望远镜的主镜不可能是一块整镜,而采用由小块的子镜拼接成大尺寸主镜的解决方案被认为是最有前景的一种选择^[1]。目前,地基大口径望远镜采用拼接形式的有美国的 Keck I、II 望远镜^[2]、HET (Hobby-Eberly Telescope) 望远镜^[3]、南非的 SALT (Southern African Large Telescope) 望远镜^[4]和西班牙的 GTC (Gran Telescopio Canarias) 望远镜^[5],这些望远镜的主镜口径都在 10 m 左右;正在建造的空基望远镜 JWST (James Webb Space Telescope)^[6]主镜也是采用 18 块子镜拼接的形式,主镜口径达 6.5 m。

为了使各拼接子镜能够拼成一个连续的曲面,要求各子镜的曲率半径完全匹配,这是因为各子镜的曲率半径误差会对望远镜系统性能产生很大的影响,一般要求子镜之间的曲率半径差在几十微米之内。曲率半径误差的匹配对光学加工提出了很高的要求,因此,使用传统的方法测量子镜之间的相对曲率半径差很难达到高的精度。文献[7]中介绍了一种方法,测量相对曲率半径差可以达到 10 μm 的精度。

本文分析了子镜之间的曲率半径偏差对系统的影响,提出了一种利用 Shack-Hartmann 传感器和高精度球径仪测量子镜之间的相对曲率半径偏差的方法,测量精度可达到 1 μm。本文还构建了一个实验系统,用该方法对 3 块设计曲率半径为 2 000 mm 的球面拼接子镜的曲率半径差进行了测量。

2 曲率半径误差对系统性能的影响

对于单块的光学主镜,一定范围之内的曲率

半径误差影响不大,因为它主要会造成离焦误差,这可以通过移动系统中的其它部件(如焦面仪器)来去除影响。

对于拼接主镜,如果只是要求各子镜之间共焦(如作光谱测量),就是将各个子镜球心对准,消除子镜之间相互倾斜引起的各种像差,那么子镜之间的相对曲率半径公差是可以放宽的,如 LAMOST 的球面镜 MB,曲率半径为 40 m,各子镜和标准参考曲率半径的偏差为 ±1.5 mm。

如果要求拼接子镜之间实现共相位,即实现拼接后的镜面能够达到等口径的单镜面成像分辨率,那么理论上就要求子镜之间的曲率半径相同。文献[7]中用斯特涅尔比 (Strehl ratio) 作为评价标准,分析了子镜的曲率半径误差对斯特涅尔比的影响。文献[8]中分析了子镜之间的曲率半径差对系统成像质量造成的影响,并提出了一种补偿方法。

本文以子镜之间的共相位为目的,以 3 块球面拼接镜为对象,分析了子镜之间的相对曲率半径差对系统分辨率的影响,从实际加工能力考虑给出了曲率半径公差指标。

采用 3 块正六边形球面实验镜,子镜对边距为 300 mm,曲率半径标准值为 2 000 mm,表面面形精度 < 20 nm (RMS), PV 值 < 150 nm,拼接形式如图 1 所示。

对于单块拼接子镜,其衍射极限分辨率为:

$$\epsilon = 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \times \frac{0.635 \times 10^{-3}}{346.42} = 0.46'' \quad (1)$$

3 块子镜拼接成的主镜的理论衍射极限分辨率为:

$$\epsilon = 1.22 \frac{\lambda}{D_{\text{total}}} = 1.22 \times \frac{0.635 \times 10^{-3}}{634.3} \approx 0.252'' \quad (2)$$

此时的 D_{total} 为主镜上面间隔最长的两点之间的距离,其光路图如图 1 所示。

下面利用 ZEMAX 来模拟并验证存在曲率半径偏差情况下的系统分辨率差别。

若子镜之间完全共焦、共相,且各子镜曲率半

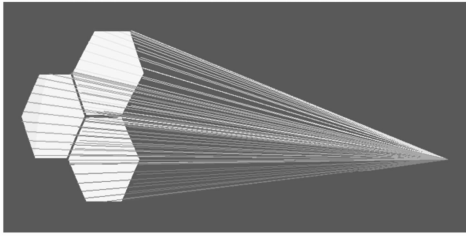


图 1 3 块子镜拼接的三维光路图

Fig. 1 Three dimensional layout of three segmented mirror

径偏差为 0 时,系统成像受衍射极限限制,其衍射极限点扩散函数的 FWHM 值为 $2.4 \mu\text{m RMS}$,对应分辨率为 $0.248''$,斯特涅尔比为 1.0,系统的点扩散函数分别如图 2、图 3 所示。

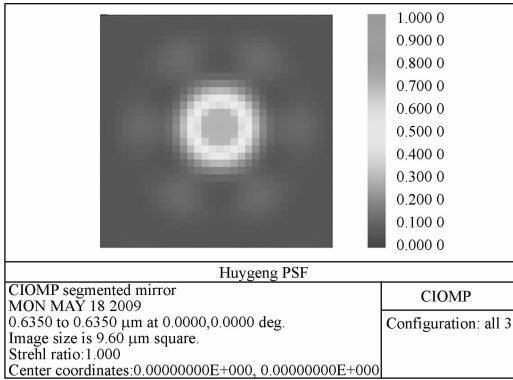


图 2 理想拼接系统点扩散函数

Fig. 2 PSF of idea segmented system

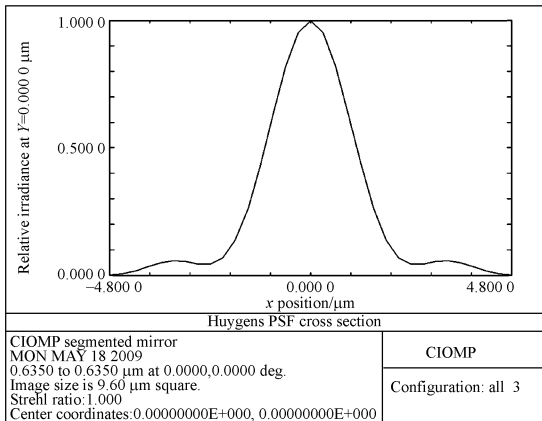


图 3 理想拼接系统点扩散函数截面图

Fig. 3 PSF cross section of idea segmented system

当各子镜的曲率半径偏差最大值为 $\pm 10 \mu\text{m}$ 时,系统在倾斜共焦、共相的情况下,其点扩散函

数的 FWHM 值为 $2.6 \mu\text{m RMS}$,对应分辨率为 $0.268''$,斯特涅尔比为 0.95,与衍射极限分辨率接近。系统点扩散函数如图 4、图 5 所示。可见, $\pm 10 \mu\text{m}$ 的曲率半径偏差对系统的分辨率影响不大。

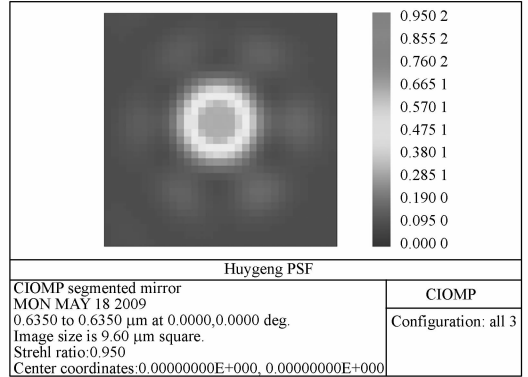


图 4 最大曲率半径偏差为 $\pm 10 \mu\text{m}$ 时的系统点扩散函数

Fig. 4 System PSF with relative curvature radius error of $\pm 10 \mu\text{m}$

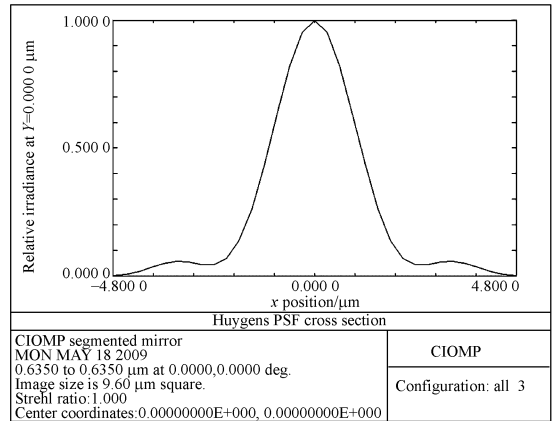


图 5 最大曲率半径偏差为 $\pm 10 \mu\text{m}$ 时点扩散函数截面图

Fig. 5 System PSF cross section with relative curvature radius error of $\pm 10 \mu\text{m}$

当各子镜的曲率半径偏差最大值为 $\pm 20 \mu\text{m}$ 时,系统在倾斜共焦、共相的情况下,其点扩散函数的 FWHM 值为 $3.0 \mu\text{m RMS}$,对应分辨率为 $0.309''$,斯特涅尔比为 0.85,与衍射极限分辨率接近。系统点扩散函数如图 6、图 7 所示。可见, $\pm 20 \mu\text{m}$ 的曲率半径偏差对系统的分辨率稍微有一点影响,但从系统斯特涅尔比来看,依然是可以接受的。

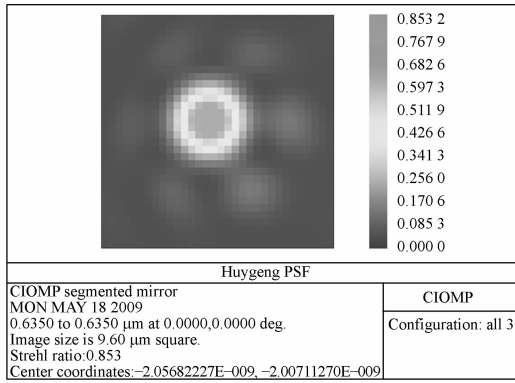


图 6 最大曲率半径偏差为 $\pm 20 \mu\text{m}$ 时的系统点扩散函数

Fig. 6 System PSF with relative curvature radius error of $\pm 20 \mu\text{m}$

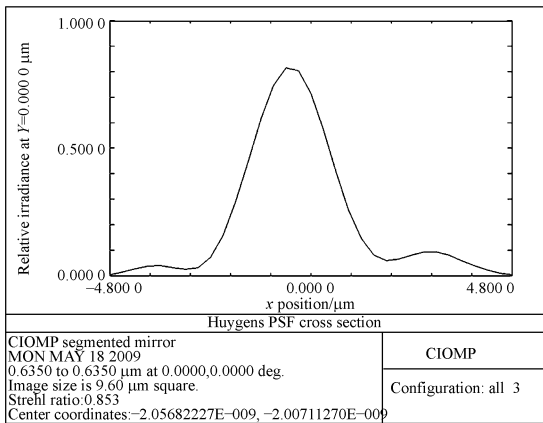


图 7 最大曲率半径偏差为 $\pm 20 \mu\text{m}$ 时的系统点扩散函数截面图

Fig. 7 System PSF cross section with relative curvature radius error of $\pm 20 \mu\text{m}$

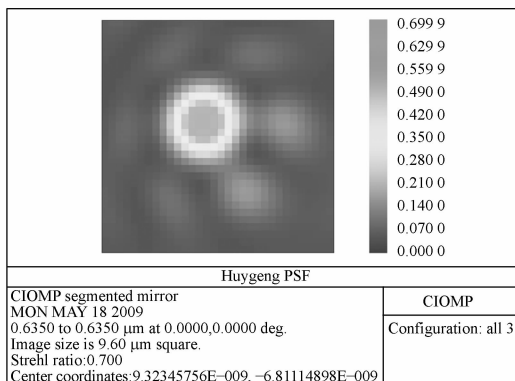


图 8 最大曲率半径偏差为 $\pm 30 \mu\text{m}$ 时的系统点扩散函数

Fig. 8 System PSF with relative curvature radius error of $\pm 30 \mu\text{m}$

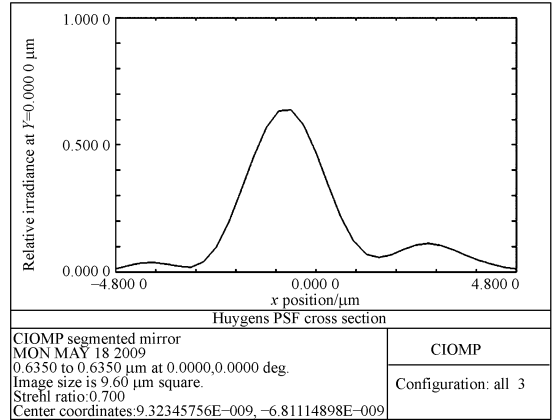


图 9 最大曲率半径偏差为 $\pm 30 \mu\text{m}$ 时的系统点扩散函数截面图

Fig. 9 System PSF cross section with relative curvature radius error of $\pm 30 \mu\text{m}$

当各子镜的曲率半径偏差最大值为 $\pm 30 \mu\text{m}$ 时,系统在倾斜共焦、共相的情况下,其点扩散函数的 FWHM 值为 $3.6 \mu\text{m}$ RMS,对应分辨率为 $0.371''$,斯特涅尔比为 0.7 ,低于衍射极限分辨率。系统点扩散函数如图 8、图 9 所示。所以, $\pm 30 \mu\text{m}$ 的曲率半径偏差对系统的分辨率有较大影响,此时的系统斯特涅尔比已经不能接受了。

从上面的分析可以看出,为了使拼接后的系统达到等效口径望远镜的分辨率,应该要求本文提出的实验镜,各子镜之间的相对曲率半径偏差 $\leq \pm 20 \mu\text{m}$ 。

而在曲率半径偏差为 $\Delta R = \pm 20 \mu\text{m}$ 的条件下,各拼接子镜相对于标准镜的表面面形误差为:

$$\delta = \frac{d^2}{2} \times \Delta C = \frac{d^2}{2} \times \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} \right) = \frac{\left(\frac{346.41}{2} \right)^2}{2} \times \left(\frac{1}{2000} - \frac{1}{2000 + \Delta R} \right) = 75 \text{ nm}, \quad (3)$$

其中, d 为单块子镜的半径, R_0 为标准曲率半径。

对于 $\lambda = 635 \text{ nm}$ 的波长来说,该面形误差带来的波像差为:

$$w = 2 \times \delta = 150 \text{ nm} = \frac{\lambda}{4.23}. \quad (4)$$

也能够满足瑞利准则波像差 $OPD \leq \lambda/4$ 的要求。

以文献[7]的评判标准,这时系统的斯特涅尔比为 0.815 。

因此,所设定的曲率半径偏差标准 $\Delta R \leq \pm$

20 μm 是合理可行的。

3 测量方法的原理

为了对子镜之间的相对曲率半径进行测量,可先使各子镜倾斜共焦,再用 S-H 传感器测量各子镜的轴向离焦量,并用高精度微位移促动器调整各子镜,使子镜的轴向离焦量为 0,最后使用高精度测微仪测量出相邻 2 块子镜之间的高度差,即为 2 块子镜之间的相对曲率半径偏差。

3.1 S-H 传感器轴向离焦测量的原理

S-H 传感器轴向离焦测量的原理如图 10 所示,从点光源发出的光束经过准直透镜 1、分光镜、准直透镜 2 到达被测镜,光线从被测镜反射回来后经准直透镜 2 和分光镜到达 S-H 传感器。图中实线所示的被测镜为没有离焦的情况,即其反射回来的像点与从点光源出来,经准直透镜 2 的会聚点精确重合,把这时被测镜的位置定为参考位置,入射到 S-H 传感器的光波面定为参考波面,S-H 子孔径在 CCD 上产生的像点位置为参考点。当镜子相对参考位置有轴向离焦时(如图中虚线所示),入射到 S-H 传感器的光线就会发散(或会聚),S-H 子孔径产生的像点相对参考点就产生偏移。通过计算该偏移量,用 Zernike 多项式对当前波面进行拟合,就可以得到这时镜子相对参考位置的轴向离焦大小及方向。

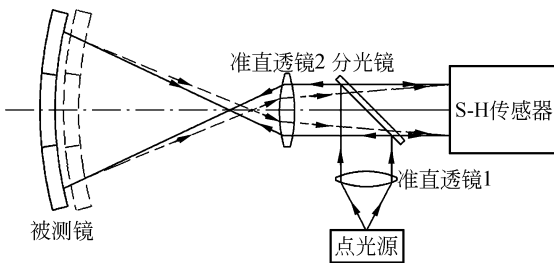


图 10 S-H 传感器轴向离焦测量原理图

Fig. 10 Principles of on-axis defocus measurement of S-H sensor

子孔径在 CCD 上产生的像点偏移情况如图 11 所示,图中圆内斜线一端的十字丝表示的是当前像点的位置,斜线的另一端为参考点位置,斜线的长短和方向表示的是当前点相对参考点的偏移大小和方向,由该偏移量即可算出实际波面相对参考波面的离焦情况^[9]。

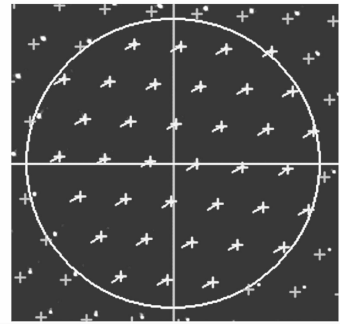


图 11 CCD 上的像点偏移图

Fig. 11 Focal spots tilted on CCD

3.2 各子镜之间相对曲率半径测量的原理

对于拼接镜情况,S-H 子孔径位于被测镜的出瞳面上,对应于各个子镜,分别取如图 12 所示的圆内的多个子孔径,用于子孔径产生的像点进行相对于参考的波前测量。实验中,取子孔径数为 36 的圆,这对于完全共焦测量是足够的。

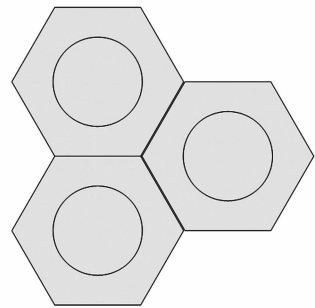


图 12 位于被测镜出瞳处的 S-H 子孔径的选择

Fig. 12 Selection of S-H lenslets on exit pupil of tested mirrors

先用倾斜共焦调整方法,使各子镜之间的相互倾斜很小(优于 $0.02''$);接着再调整各子镜的轴向位置,使由 S-H 测量得到的轴向离焦量很小,近似为 0,这时就可以确定各个子镜完全共焦,该原理亦能从图 6 中看出。用这种方法测得轴向离焦精度优于 0.1λ RMS。

经过精确共焦之后的子镜之间只有相互的曲率半径偏差造成的高度差,如图 13 所示。如果能够测量出这个高度差,即可知各子镜之间的相对曲率半径偏差。

使用一个长度测量精度优于 $1\mu\text{m}$ 的测微头做成的球径仪,如图 13 所示,来测量曲率半径偏差 ΔR 。球径仪的 3 个球形固定点确定 1 个球面,

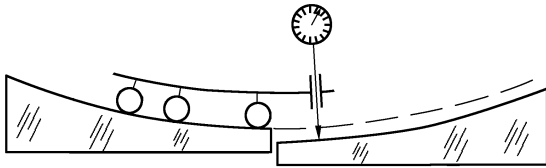


图 13 精确共焦后的拼接镜和球径仪

Fig. 13 Segmented mirrors after fine co-focus and spherometer

先把球径仪的测微头与 3 个固定点都放在 1 块子镜上面,为了提高测量的精度,应使测微头靠近子镜的边缘处,记录这时测微头的读数;然后移动球径仪,使 3 个定点仍在原来的子镜上面,使测微头置于相邻的子镜上面,同样也应使测微头位于子镜边缘,然后记录这时测微头的读数,两次读数之差即为两块子镜的相对曲率半径偏差。依次测量,就可以得到所有子镜之间的相对曲率半径偏差。

4 对 3 块球面拼接子镜的测量

4.1 系统组成

图 14 为实验系统的照片,图 15 所示为光学系统排布图。子镜的拼接方式从图 15 中可以看出,被测镜为 3 块正六边形的球面镜,各子镜的标准曲率半径为 2 000 mm,对边距离为 300 mm,子镜的中心厚为 30 mm。其中 1 号子镜作为参考子镜,在实验开始时做手动调整,2、3 号子镜背面各安装有 3 套微位移平台,既实现了与 1 号子镜的共焦调整,又可做轴向离焦调整。



图 14 实验系统的照片

Fig. 14 Photograph of experiment system

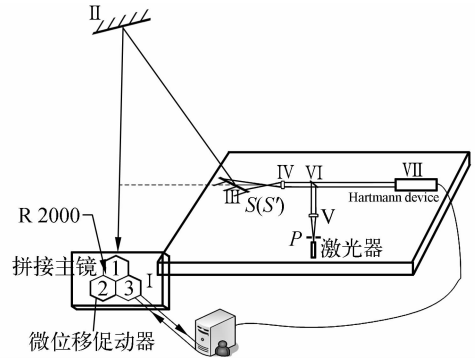


图 15 实验系统的光学排列图

Fig. 15 Optical layout of experimental system

图 15 中镜子 II、III 为平面反射镜,IV、V 为两块同样型号的准直透镜,VI 为分光镜,VII 为 S-H 传感器。由针孔对激光束进行滤波形成点光源 P 经过透镜 IV、V 和分光镜成像在透镜 IV 的焦点 S 处,可以把 S 看为被测拼接镜的点光源。从 S 发出的球面波经平面反射镜 II、III 到达拼接镜之后,反射回来在 S 附近形成像点 S' 并经过透镜 IV、分光镜 VI 进入 S-H 传感器。

S-H 传感器的通光口径为 12.5 mm,子孔径阵列为 32×32 的正六边形排列,CCD 分辨率为 $1\ 032 \times 1\ 032$,单个像素尺寸为 $6.45\ \mu\text{m}$;倾斜测量的最大范围为 $\pm 0.02\ \text{rad}$,灵敏度为 $3.7\ \mu\text{rad}$;可测的最大波面曲率半径为 1.7 km;测量的重复性为 $\lambda/60\ \text{RMS}$ 。

离焦及倾斜调整用的微位移平台^[10]为两级调整机构,其中第一级为直流电机驱动的平台,可以实现 25 mm 行程、微米级的粗调整;第二级为压电陶瓷促动器,可实现 $60\ \mu\text{m}$ 行程、1 nm 精度的调整。

4.2 实际测量及精度分析

首先采用共焦调整方法使 3 块子镜共焦,即 3 块子镜的相互倾斜很小,接着用 S-H 传感器分别测量 3 块子镜的轴向离焦量,并用促动器进行调整。为了减小由于促动器的行进方向与主光轴(点光源与 3 块子镜整体的中心的连线)不垂直引起的子镜之间的相互倾斜的改变,再进行一次共焦调整是有必要的。

为了保证共焦的精度,在共焦调整时应该尽量保持光路中气流的平稳。如果气流抖动不可避免,可以采用对 S-H 传感器图像多帧取平均的方法来降低影响。

在确定子镜之间只剩下沿垂直于镜面方向的高度差之后,就可以使用前面所述的球径仪对高度差进行测量了。

相对曲率半径测量的误差来源主要有两个方面:S-H 传感器轴向离焦量测量的误差及球径仪的测微头没有沿曲率半径方向测量造成的误差。

可以测得 S-H 传感器对离焦测量的精度为 0.1λ RMS,对整体精度的影响很小,可以不计。

球径仪的测微头没有沿曲率半径方向测量的示意图如图 16 所示, ΔR 为实际的曲率半径偏差,为实测值,两者关系为:

$$\Delta R \approx \Delta l \times \cos \theta. \quad (5)$$

其中, θ 为曲率半径方向和实际测量方向的夹角。可见为了减小该夹角造成的影响,测量应尽量在主光轴附近进行,这时 ΔR 近似等于 Δl 。

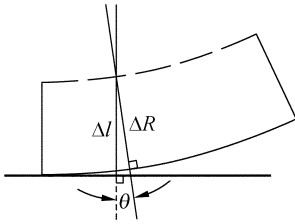


图 16 球径仪测量误差示意图

Fig. 16 Measured error of spherometer

从上面的分析可以知道,影响系统测量精度的主要因素是球径仪测微头的测量精度,由于本实验所用的测微头的精度优于 $1\ \mu\text{m}$,所以可以确定本文方法所测量的子镜之间的相对曲率半径偏差的精度约为 $1\ \mu\text{m}$ 。

5 结 论

为了方便拼接镜子镜的加工、研制,本文提出了一种测量球面子镜之间的相对曲率半径偏差的方法。首先分析了子镜之间的曲率半径偏差对系统分辨率的影响,针对提出的实验镜给出了曲率半径的加工公差;然后,给出了一种利用 S-H 传感器和高精度球径仪相结合的方法对子镜之间的曲率半径偏差进行测量。此外,还构建了一个实验系统对 3 块实验镜之间的曲率半径偏差进行了测量,测量、分析结果表明,本文所用方法的精度约为 $1\ \mu\text{m}$,较传统的直接使用球径仪测量,由公式间接得到曲率半径,再计算偏差的方法有了很大的改进。

然而,本文只是对球面子镜之间的相对曲率半径偏差的测量展开了工作,而对于非球面子镜之间的曲率半径偏差的测量有待于进一步的学习、研究。

参考文献:

[1] MAST T S, NELSON J E. Figure control for a fully segmented telescope mirror [J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21(14): 2631-2641.

[2] GARRY A C, JERRY E N, TERRY S M. Segment alignment for the Keck telescope primary mirror [J]. *SPIE*, 1986, 628: 466-470.

[3] COBOS F J. The Hobby-Eberly telescope low resolution spectrograph: optical design [J]. *SPIE*, 1998, 3355: 424-432.

[4] AREK S, DARRAGH O, JIAN S, *et al.*. The optical design of the Southern African Large Telescope [J]. *SPIE*, 2003, 4837: 564-575.

[5] JAVIER C F, JUAN C G, HARESH M C, *et al.*. Development of a test rig for the active control of a segmented mirror support system [J]. *SPIE*, 1995, 2871: 343-351.

[6] JOSEPH M H. Optical modeling activities for NASA's James Webb Space Telescope (JWST): III. wave front aberrations due to alignment and figure compensation [J]. *SPIE*, 2007, 6675: 1-11.

[7] DAVE B, BURGE J H. Radius of curvature metrology for segmented mirrors [J]. *SPIE*, 2000, 4093: 58-67.

[8] CHENG D W, WANG Y T, TALHA M M, *et al.*. Effect of radius mismatch on performance of segmented telescopic systems [J]. *SPIE*, 2007,

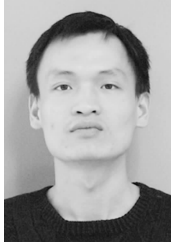
6834:1Y1-1Y11.

- [9] SOUTHWELL W H. Wave-front estimation from wave-front slope measurements[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980,70:998-1006.
- [10] 杨德华, 戚永军, 朱振东, 等. 光学拼接镜面微位移主动调节机构的设计和实测[J]. *光学精密工程*,

2005,13(2):191-197.

YANG D H, QI Y J, ZHU ZH D, *et al.*. Design and test of the active micro-motion mechanism for optical mirror segment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2):191-197. (in Chinese)

作者简介:



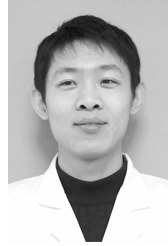
林旭东(1982—),男,福建莆田人,博士研究生,主要从事主动光学技术的研究。E-mail:linxudong_82@126.com



明 名(1983—),男,湖南临澧人,2007年于大连理工大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计、检测以及装调方面的研究。E-mail: mingm1118@yahoo.com.cn



董 磊(1982—),男,山东济宁人,2007年于山东大学获得硕士学位,主要从事波动光学和激光应用的研究。E-mail: postgradu@yahoo.com.cn



陈宝刚(1982—),男,河北景县人,研究实习员,2008年于合肥工业大学获得硕士学位,主要从事光学仪器结构设计方面的研究。E-mail: cbg0813@163.com



王建立(1971—),男,山东曲阜人,工学博士,研究员,博士生导师,2002年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn

导师简介:



陈 涛(1965—),男,内蒙古赤峰人,工学博士,博士生导师,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电精密跟踪测量技术的研究。E-mail: chent@ciomp.ac.cn