

文章编号 1004-924X(2016)11-2721-09

大口径主镜位置的实时检测

李剑锋*, 吴小霞, 李玉霞, 刘昌华

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电探测部, 吉林 长春 130033)

摘要: 由于望远镜主镜位置的调整与主镜位置的实时监测相关, 本文设计了基于位移传感器的主镜位置监测系统。重点考虑镜室重力变形的影响, 利用解析几何方法得到了解算主镜位置的算法。以实验室的 1.2 m SiC 主镜作为试验镜进行了主镜位置实时监测试验。在主镜绕支撑架做俯仰转动时, 通过布置在主镜背部和侧向的 6 个位移传感器, 实时采集测量数据, 并利用有限元方法计算镜室的变形; 最后将镜室变形作为系统差和传感器测量值代入解算算法, 得到主镜沿 X、Y、Z 三向平移、绕 X、Y 轴转动角度及主镜半径随温度变化值。测试结果显示: 该试验主镜的支撑系统中的轴向支撑刚度远大于侧向支撑刚度。当镜室转动 45° 时, 主镜的 Z 向平移变化只有 20 μm , 而 X 向平移和 Y 向平移分别为 146 μm 和 100 μm 。试验结果验证了提出的实时监测方法和监测系统的准确性, 为大口径主镜实时位置校正提供了依据。

关键词: 望远镜; 主镜; 位置解算算法; 主镜位置; 在线检测

中图分类号: TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162411.2721

On line measurement of position for large primary mirror

LI Jian-feng*, WU Xiao-xia, LI Yu-xia, LIU Chang-hua

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: ljfengli@126.com

Abstract: When the primary mirror position of a telescope is adjusted, its position should be measured in real time. This paper proposes an on line measuring system for the primary mirror position based on position sensors. By taking the deformation of a mirror cell into account, a algorithm to solve the primary mirror position was obtained by using the space analytic geometry method. A 1.23 m SiC mirror in our lab was used to complete the online measuring experiment for the primary mirror position. The measuring data were collected in real time by using 6 position sensors fixed at the back and later of the mirror when the mirror was turning around the rotation axis. The cell deformation was also analyzed by using finite element method. Finally, the measuring values by the sensors and the cell deformation value were taken as the system's difference to introduce the algorithm to obtain the X\Y\Z displacements, rotation angles around X\Y axis and the extension of mirror radius caused by temperature changing. Experimental results indicate that the stiffness of axial supporting mechanism is much larger than that of the lateral one. When the rotation angle of mirror is 45°, the mirror displacement in Z direction is about 20 μm , and that in X and Z directions are 146 μm and 100 μm , respectively. The accuracy of this method is verified by the test results, which provides a

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-17.

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所重大创新项目专项基金资助项目 (No. Y3C122E130)

reference for the correction of primary mirror positions in telescopes.

Key words: telescope; primary mirror; position resolving algorithm; position of primary mirror; on line measurement

1 引言

望远镜的主次镜对准误差会影响望远镜后端光路,导致望远镜的像点偏移,严重影响望远镜的成像质量。而主次镜的相对位置主要受以下几个因素的影响:(1)次镜桁架的弯沉变形,望远镜转动时,次镜桁架的重力变形导致次镜的位置改变;(2)主镜支撑的弹性变形,主镜支撑的刚度并不是无限大,因此主镜支撑的弹性变形也会随着俯仰角改变而发生变化;(3)镜室的变形,镜室负责承受支撑组件和主镜的重量,俯仰角运动同样也会导致镜室的重力变形改变^[1]。其中第一项因素的影响,一般采用 Stewart 平台作为次镜的支撑,来实时调整次镜的位置^[2-5]。或者通过将次镜桁架采用 Serrurier 桁架设计^[6],使次镜桁架和镜室的重力变形一致。对于第二和第三项因素,小口径望远镜主镜和镜室变形较小,一般采用次镜补偿^[7]。而对于大口径望远镜,尤其是具有库德系统的望远镜,除了使用次镜补偿外,还利用液压系统^[8-10]或类似 Stewart 六杆机构形成硬点^[11-13]来对主镜的位置进行实时调整。

望远镜主镜位置的实时调整是建立在对主镜位置的实时监测的基础上的,国外的大型望远镜往往设置位移传感器测量主镜相对镜室的移动来解算主镜的位置偏移,从而为主镜的位置校正提供依据。欧南台的 VST 望远镜利用 5 个位移传感器测试主镜的位置,并解算出主镜的 5 个自由度^[14]。美国军方 3.67 m AEOS 望远镜采用 4 个位移传感器来检测主镜的 4 个自由度(Z 向平移、Y 向平移和绕 X、Y 轴转角)^[10,15]。美国 8 m GEMINI 望远镜则解算出主镜 6 个自由度,作为对主镜进行位置控制的依据^[4]。以上文献都只是讨论了测量主镜相对镜室位置的方法,并未详细设计主镜位置自由度的解算算法。由于之前缺乏需求牵引,国内对于大口径主镜位置检测研究开展较少。课题组前期发表的论文^[16-18]中提出利用 6 个传感器测量主镜的 5 个自由度和主镜膨胀的方法,并推导出主镜位置解算的公式,利用该公式在气浮平台上进行了验证测试。但文献^[16]中

提出的主镜位置解算算法并没有考虑镜室变形的影响。

为了更精确地监测出主镜位置变化,本文考虑了镜室变形的影响,设计了基于 6 个位移传感器的位置监测系统,并以 1.23 m SiC 主镜为监测目标搭建了测试系统。然后利用有限元方法分析了镜室在不同俯仰角情况下的变形,并从空间解析几何的角度考虑镜室变形,建立了更为精确的主镜位置解算公式。最后将得到传感器测试值和镜室变形量代入公式,得到主镜位置的变化曲线。

2 主镜测量系统设计

图 1 所示为搭建的主镜位置检测系统,主镜为实验室的 1.23 m SiC 镜,通过轴向和侧向支撑安装在镜室上,镜室安装在支架上,而镜室可以绕支架的旋转轴转动来模拟望远镜的俯仰运动。测量主镜和镜室相对运动的 6 个位移传感器^[19-20]分为 2 组,一组 3 个安装在主镜的背面,另一组 3 个安装在主镜的侧面,具体的安装位置在图 2 中给出。另外在镜室转动轴上安装了电位计,用于测量镜室绕轴转动的角度。测试时,通过转动镜室,同时利用 6 个传感器记录转动过程中主镜相对镜室的移动量,并用有限元分析镜室的变形改变量作为系统误差,将传感器测得值和镜室的变形量代入解算公式,解算出主镜的 5 个自由度和主镜的径向膨胀,其中 5 个自由度包括: X、Y、Z 向 3 个平移和绕 X、Y 轴转角。最终得到主镜的位置随测试时间的变化曲线。

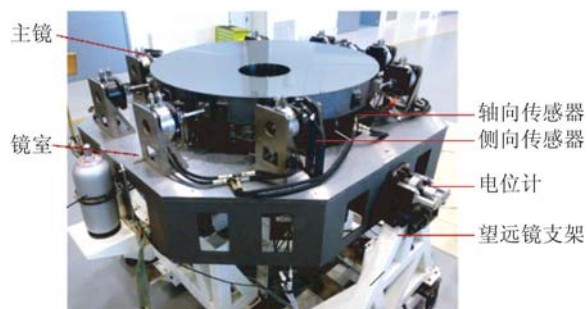


图 1 测试平台

Fig. 1 Experiment system

监测系统中使用的传感器为绝对式 (Linear Variable Differential Transformer, LVDT),属于直线位移传感器,具有精确的绝对零点位置,在断电并重新上电后可再次获取主镜的绝对位置。所选的 LVDT 线性度 0.1%,电子量程为 $-2.5 \sim 2.5 \text{ mm}$,灵敏度为 4.5 V/mm 。LVDT 所用的数据采集卡具有 4 路 24 bit 的模拟输入通道,输入量程为 $\pm 10 \text{ V}$,采样率设定为 $5\,000 \text{ Hz}$ 。电位计采集值为电压值,电压值和角度的换算关系为 2.5 V 对应 90° ,默认初始角度为 0 。供电电源负责提供 3 路 24 V 直流电压给直线位移传感器供电,PC 负责将采集后数据进行处理。

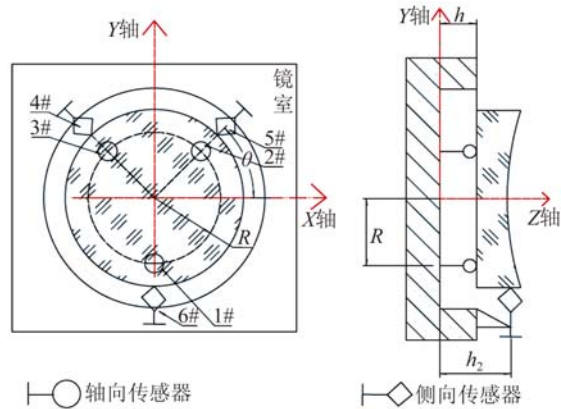


图 2 主镜位置测量传感器布置
Fig. 2 Fixed position of sensors

3 镜室变形分析

主镜通过支撑机构安装在镜室上,镜室受到的作用力除了自身重力外还有支撑机构和主镜的重力作用,因此镜室也会存在变形,当镜室随着旋转轴转动时,镜室受到的作用力发生变化,因此镜室的变形也会发生变化。分析镜室变形时,利用 Hypermesh 软件对测试用的镜室进行建模,将镜室承担的主镜和主镜支撑简化为作用力作用在主镜上,其他附属设备也都简化为作用力作用于镜室模型,并对镜室的俯仰轴轴头位置建立 MPC 单元,对主镜进行位移约束,最后形成的有限元模型如图 3 所示。然后利用 Nastran 软件对模型进行有限元分析,分析得到水平和竖直两种状态下镜室的变形,如图 4 所示。然后将测量传感器安装位置处的变形量提取出来,如表 1 所示。

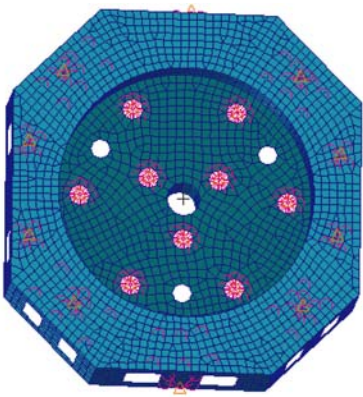


图 3 镜室的有限元模型
Fig. 3 FEM model of mirror cell

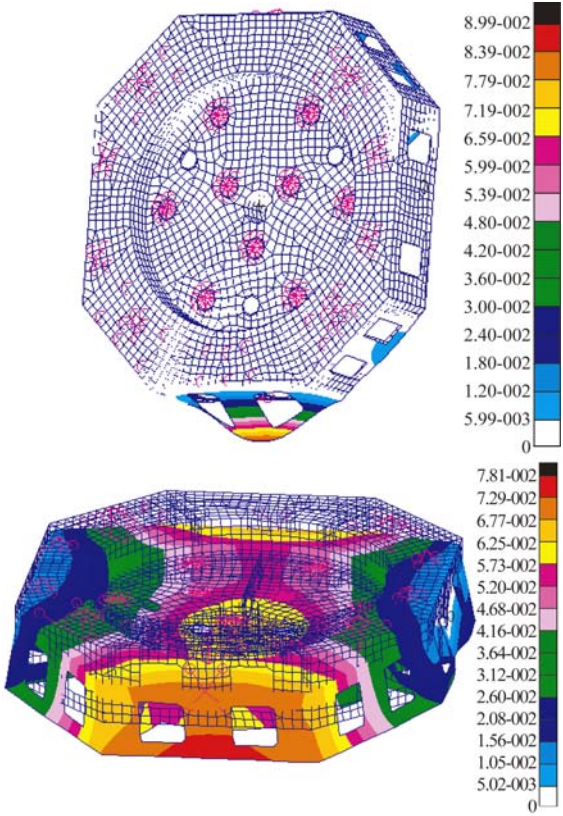


图 4 镜室变形计算结果
Fig. 4 Analysis results of mirror cell

从表 1 中可以看到,6 个传感器的安装位置处分别有 X、Y 和 Z 向 3 个位移值,不同的传感器位移值不同,同一个传感器不同方向的位移值也不同,计算时应该取数值较大的位移值作为系统误差进行主镜位置解算,表中红字和蓝字部分为位移值较大的变形量(彩图见期刊电子版)。这些量将作为系统误差代入解算算法中解算主镜位置自由度。为了表示这些量,用 α 、 β 和 γ 分别表示

X、Y 和 Z 向变形量,用数字小标表示第几个传感器。例如 $\gamma_1 = -0.050\ 42\ \text{mm}$ 表示 1 号传感器的 Z 向变形量为 $-0.050\ 42\ \text{mm}$ 。

表 1 传感器安装位置处镜室变形量

Tab. 1 Deformation of cell at the sensor fixed position (mm)

传感器 标号	俯仰角 0°			俯仰角 90°		
	X(α)	Y(β)	Z(γ)	X(α)	Y(β)	Z(γ)
1#	-0.000 441	0.000 05	-0.050 42	0.000 065	-0.003 35	-0.000 71
2#	-0.000 142	0.000 442	-0.059 23	-8.40E-05	-0.003 54	0.000 853
3#	0.000 149	0.000 039	-0.051 49	0.000 026	-0.003 5	-0.000 65
4#	-0.005 964	0.000 88	-0.019 95	-0.000 34	-0.002 76	0.000 977
5#	0.005 623	0.000 963	-0.019 8	0.000 383	-0.002 34	0.000 392
6#	-0.000 003	-0.008 67	-0.064 64	-0.000 14	-0.003 4	0.000 132

4 位置解算方法

在文献[1]中,提出一种主镜位置测量方法,推导出了主镜位置解算的公式,并利用该公式进行了验证测试,但主镜位置解算公式只适用于测量基准面不发生变形的情形,例如文中使用的气浮光学平台。而实际使用中,主镜位置测量用的位移传感器多安装在镜室上,而镜室要承担主镜及主镜支撑系统的重量,因此主镜室会产生变形,

变形量还会随着望远镜俯仰角的变化而改变,此时如果还利用文献[1]中提出的方法,就会产生误差。为了更准确的主镜位置,将传感器安装位置处的镜室变形作为系统误差来解算主镜位置。

4.1 轴向 3 个位移传感器

轴向探针位置由探针基点和尖点的坐标来描述,尖点始终和主镜接触,而基点和镜室固结,基点和尖点之间的 Z 向坐标差为探针测得值,其中 1 号探针尖点的坐标为: $A_1 = \{0, -R, h\}$ 。1 号探针基点坐标为: $A_{1j} = \{0, -R, 0\}$ 。在镜室转动前,1 号探针的测得值为: $\Delta h_1 = h$ 。

当镜室转动后,主镜发生旋转 $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$ 和平移 $\{d_1, d_2, d_3\}$,各点的原始坐标先和旋转矩阵 T 相乘,再和平移矢量相加即得转换后坐标,其中 T 为:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_3 & \theta_2 \\ \theta_3 & 1 & -\theta_1 \\ -\theta_2 & \theta_1 & 1 \end{bmatrix},$$

则原 1 号探针尖点坐标变换为:

$$\begin{bmatrix} d + h\theta_2 - (-R + \beta_1)\theta_3 \\ -R + d_2 + \beta_1 - h\theta_1 \\ h + d_3 + (-R + \beta_1)\theta_1 \end{bmatrix},$$

同理可求得 2 号 和 3 号点坐标,而该 3 点构成平面 P_1 方程为:

$$\begin{aligned} & (x - d_1 - h\theta_2 + (-R + \beta_1)\theta_3) \left(-\frac{3}{2}\sqrt{3}R^2\theta_2 + \sqrt{3}R\beta_1\theta_2 - \frac{1}{2}\sqrt{3}R\beta_2\theta_2 - \frac{3}{2}\sqrt{3}R\beta_3\theta_2 - \frac{3}{2}\sqrt{3}R^2\theta_1\theta_3 + \right. \\ & \left. \sqrt{3}R\beta_1\theta_1\theta_3 - \frac{1}{2}\sqrt{3}R\beta_2\theta_1\theta_3 - \frac{1}{2}\sqrt{3}R\beta_3\theta_1\theta_3 \right) + (R + y - d_2 - \beta_1 - h\theta_1) \left(\frac{3}{2}\sqrt{3}R^2\theta_1 - \sqrt{3}R\beta_1\theta_1 + \frac{1}{2}\sqrt{3}R\beta_2\theta_1 + \right. \\ & \left. \frac{1}{2}\sqrt{3}R\beta_3\theta_1 - \frac{3}{2}\sqrt{3}R^2\theta_2\theta_3 + \sqrt{3}R\beta_1\theta_2\theta_3 - \frac{1}{2}\sqrt{3}R\beta_2\theta_2\theta_3 - \frac{1}{2}\sqrt{3}R\beta_3\theta_2\theta_3 \right) + \\ & (z - d_3 - h + (-R + \beta_1)\theta_1) \left(-\frac{3}{2}\sqrt{3}R^2 + \sqrt{3}R\beta_1 - \frac{1}{2}\sqrt{3}R\beta_2 - \right. \\ & \left. \frac{1}{2}\sqrt{3}R\beta_3 - \frac{3}{2}\sqrt{3}R^2\theta_3^2 + \sqrt{3}R\beta_1\theta_1\theta_3 - \frac{1}{2}\sqrt{3}R\beta_2\theta_3^2 - \frac{1}{2}\sqrt{3}R\beta_3\theta_3^2 \right) = 0. \end{aligned}$$

对上述方程化简得到:

$$\frac{3}{2}\sqrt{3}hR(R + \beta_2 + \beta_3 - 2\beta_1) - \frac{3}{2}\sqrt{3}hRz(R + \beta_2 + \beta_3 - 2\beta_1) + \frac{3}{2}\sqrt{3}R^2d_3 + \frac{3}{2}\sqrt{3}R^2y\theta_1 - \frac{3}{2}\sqrt{3}R^2x\theta_2 = 0. \quad (1)$$

而 1 号探针转动后基点坐标为: $A_{1j} = \{0, -R + \beta_1, \gamma_1\}$,则为 1 号探针所在直线方程为:

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = -R + \beta_1^T \end{cases} \quad (2)$$

该直线与平面 P_1 的交点为 1 号探针新的尖点坐标,因此求解方程得到: $z = h + \frac{-R^2\theta_1 + Rd_3 + R\beta_1^T\theta_1}{R + \beta_2 + \beta_3 - 2\beta_1}$,则主镜转动后,1 号探针测

得值: $\Delta h_1^T = h + \frac{-R^2 \theta_1 + R d_3 + R \beta_1^T \theta_1}{R + \beta_2 + \beta_3 - 2\beta_1} + \gamma_1^T$, 则转

动过程中 1# 探针测量值变化为:

$$\Delta Z_1 = \frac{R d_3 - R^2 \theta_1}{R + \beta_2 + \beta_3 - 2\beta_1} + \gamma_1^T - \gamma_1, \quad (3)$$

同理的 2# 和 3# 探针测量值变化量为:

$$\begin{cases} d_3 = -\frac{R+\omega}{R} \left\{ \frac{(\Delta Z_1 + \Delta Z_2 + \Delta Z_3)}{3} - \frac{\Delta \gamma_1 + \Delta \gamma_2 + \Delta \gamma_3}{3} \right\} \\ \theta_1 = -\frac{R+\omega}{R} \left\{ \frac{(2\Delta Z_1 - \Delta Z_2 - \Delta Z_3) - (2\Delta \gamma_1 - \Delta \gamma_2 - \Delta \gamma_3)}{3R} \right\}, \\ \theta_2 = -\frac{R+\omega}{R} \left\{ \frac{(\Delta Z_2 - \Delta Z_3) + (\Delta \gamma_2 - \Delta \gamma_3)}{\sqrt{3}R} \right\} \end{cases}$$

其中: $\Delta \gamma_1 = \gamma_1^T - \gamma_1$; $\Delta \gamma_2 = \gamma_2^T - \gamma_2$; $\Delta \gamma_3 = \gamma_3^T - \gamma_3$; $\omega = \beta_2 + \beta_3 - 2\beta_1$; 因为 ω 相对于 R 为相对小量, 所以 $\frac{(R+\omega)}{R} \approx 1$, 则上式可以进一步化简:

$$d_3 = \frac{(\Delta Z_1 + \Delta Z_2 + \Delta Z_3)}{3} - \frac{\Delta \gamma_1 + \Delta \gamma_2 + \Delta \gamma_3}{3}, \quad (6)$$

$$\theta_1 = \frac{(2\Delta Z_1 - \Delta Z_2 - \Delta Z_3) - (2\Delta \gamma_1 - \Delta \gamma_2 - \Delta \gamma_3)}{3R}, \quad (7)$$

$$\theta_2 = \frac{(\Delta Z_2 - \Delta Z_3) + (\Delta \gamma_2 - \Delta \gamma_3)}{\sqrt{3}R}. \quad (8)$$

4.2 侧向 3 个位移传感器

侧向探针位置由 3 个点来描述, 探针基点、拐点和尖点, 尖点始终和主镜接触, 而基点和镜室固定连接, 拐点是连接基点和尖点的连接点, 拐点和尖点

$$\Delta Z_2 = \frac{R(2d_3 + R\theta_1 - \sqrt{3}R\theta_2)}{2(R + \beta_2 + \beta_3 - 2\beta_1)} + \gamma_2^T - \gamma_2, \quad (4)$$

$$\Delta Z_3 = \frac{R(2d_3 + R\theta_1 + R\theta_2)}{2(R + \beta_2 + \beta_3 - 2\beta_1)} + \gamma_3^T - \gamma_3. \quad (5)$$

反向求解方程(3)~(5)得:

的之间距离为探针测得值, 其中探针拐点的坐标为: $K_4 = \{\cos \theta \cdot (R_0 + L_4) + \alpha_4, \sin \theta \cdot (R_0 + L_4) + \beta_4, h_2 + \gamma_4\}$, 而 4# 探针对应的监测平面 P_4 的基点坐标为: $A_4 = \{\cos \theta R_0, \sin \theta R_0, h_2\}$, 而 4# 探针的尖点和 P_4 平面的基点相同, 则尖点和拐点之间距离为探针测得长度, 即为:

$$Length4 = L_4 + \cos \theta \alpha_4 + \sin \theta \beta_4. \quad (11)$$

镜室转动后, 4# 探针拐点位置不变, 而 4# 探针对应的监测平面 P_4 方程发生变化, 原来监测平面 P_4 方程的基点坐标在经过旋转和平移后变为:

$$\begin{cases} d_1 + \cos \theta \alpha R_0 + h_2 \theta_2 - \sin \theta \alpha R_0 \theta_3 \\ d_2 + \sin \theta \alpha R_0 + h_2 \theta_1 - \cos \theta \alpha R_0 \theta_3 \\ d_3 + \sin \theta \alpha R_0 + h_2 - \cos \theta \alpha R_0 \theta_2 \end{cases}$$

其中: α 为主镜半径膨胀系数, 则 P_4 平面方程变为:

$$\begin{aligned} & -x \cos \theta \alpha R_0 - y \sin \theta \alpha R_0 + \cos \theta \alpha d_1 R_0 + \sin \theta \alpha d_1 R_0 + k^2 R_0^2 - \\ & z \sin \theta \alpha R_0 \theta_1 + x \cos \theta \alpha R_0 \theta_2 - y \cos \theta \alpha R_0 \theta_3 + x \sin \theta \alpha R_0 \theta_3 = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

而 4# 探针所在的方程为:

$$\begin{cases} y - \sin \theta (R_0 + L_4) - \beta_4^T = \tan \theta (x - \cos \theta (R_0 + L_4) - \alpha_4^T) \\ h_2 + \gamma_4^T = z \end{cases}. \quad (13)$$

求解方程(12)和(13), 得:

$$\begin{cases} x = \cos \theta (-\cos \theta d_1 - \sin \theta d_2 + L_4 - \Delta R_0 + \sin \theta h_2 \theta_1 - \cos \theta h_2 \theta_2 + \sin \theta \beta_4^T + \cos \theta \alpha_4^T) \\ y = -\sin \theta (\cos \theta d_1 + \sin \theta d_2 - L_4 + \Delta R_0 - \sin \theta h_2 \theta_1 + \cos \theta h_2 \theta_2 - \sin \theta \beta_4^T - \cos \theta \alpha_4^T) \end{cases}$$

其中: $\Delta R_0 = \alpha R_0 - R_0$, 则 4# 探针在镜室转动后测得的距离为:

$$Length4^T = -\cos \theta d_1 - \sin \theta d_2 + L_4 - \Delta R_0 + \sin \theta h_2 \theta_1 - \cos \theta h_2 \theta_2 + \sin \theta \beta_4^T + \cos \theta \alpha_4^T, \quad (14)$$

则 4# 探针测得距离变化为:

$$\Delta Z_4 = -\cos \theta d_1 - \sin \theta d_2 - \Delta R_0 + \sin \theta h_2 \theta_1 - \cos \theta h_2 \theta_2 + \sin \theta \Delta \beta_4 + \cos \theta \Delta \alpha_4. \quad (15)$$

同理得:

$$\Delta Z_5 = \cos \theta d_1 - \sin \theta d_2 - \Delta R_0 + \sin \theta h_2 \theta_1 + \cos \theta h_2 \theta_2 + \sin \theta \Delta \beta_5 - \cos \theta \Delta \alpha_5, \quad (16)$$

$$\Delta Z_6 = d_2 - \Delta R_0 - h_2 \theta_1 - \Delta \beta_6, \quad (17) \quad \Delta \beta_1 = \beta_5^T - \beta_5, \Delta \beta_6 = \beta_6^T - \beta_6, \text{ 则求解方程(15)~}$$

其中: $\Delta \alpha_1 = \alpha_1^T - \alpha_1, \Delta \alpha_5 = \alpha_5^T - \alpha_5, \Delta \beta_1 = \beta_1^T - \beta_1$, (17)得:

$$d_1 = \frac{\cos \theta (\Delta \alpha_4 + \Delta \alpha_5) + \sin \theta (\Delta \beta_4 - \Delta \beta_5)}{2 \cos \theta} - \frac{\Delta Z_4 - \Delta Z_5}{2 \cos \theta} - h_2 \theta_2, \quad (18)$$

$$d_2 = h_2 \theta_1 + \Delta R_0 + \Delta Z_6 + \Delta \beta_6, \quad (19)$$

$$\Delta R_0 = -\frac{\Delta Z_4 + \Delta Z_5 + 2 \sin \theta \Delta Z_6 - \cos \theta (\Delta \alpha_4 - \Delta \alpha_5) - \sin \theta (\Delta \beta_4 + \Delta \beta_5 - 2 \Delta \beta_6)}{2(1 + \sin \theta)}, \quad (20)$$

则当 q 为 30° 时, 则式(18)和式(20)可化为:

$$d_1 = \frac{3(\Delta \alpha_4 + \Delta \alpha_5) + \sqrt{3}(\Delta \beta_4 - \Delta \beta_5)}{6} - \frac{\sqrt{3}}{3}(\Delta Z_4 - \Delta Z_5) - h_2 \theta_2, \quad (21)$$

$$\Delta R_0 = \frac{1}{6}(\Delta \beta_4 + \Delta \beta_5 - 2 \Delta \beta_6) + \frac{\sqrt{3}}{6}(\Delta \alpha_4 - \Delta \alpha_5) - \frac{\Delta Z_4 + \Delta Z_5 + \Delta Z_6}{3}. \quad (22)$$

5 结果和分析

测试系统首先利用 6 个 LVDT 测出主镜相对镜室的移动量, 然后再利用计算算法解算得到主镜的相对镜室的位置变化。测试时主镜和主镜室绕旋转轴转动一定角度, 转动角度通过电位计测得, 图 5 左给出了测试时间内主镜的转动角度, 在测试时间内主镜最大转角为 45° 。图 5 右给出了 1~6 号 LVDT 测得的位移值, 从图中可以看到, 测得值随着测试时间逐渐增大, 即随着主镜转角的增大而增大, 说明主镜的位置和镜室的相对位置偏离随着转角增大, 其中 5 号传感器测得值变化最大达到了 $180 \mu\text{m}$ 。1~6 号传感器测得值也各不相同, 侧向的 4~6 号传感器测得值相对轴向的 1~3 号传感器测得值要大得多, 可以认为主镜的轴向 3 自由度位移值比侧向的要小, 但还需要通过解算才能准确得到数值。

5.1 LVDT 测量结果

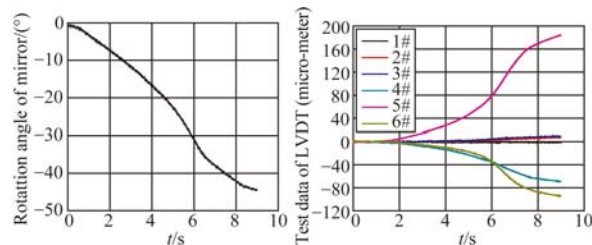


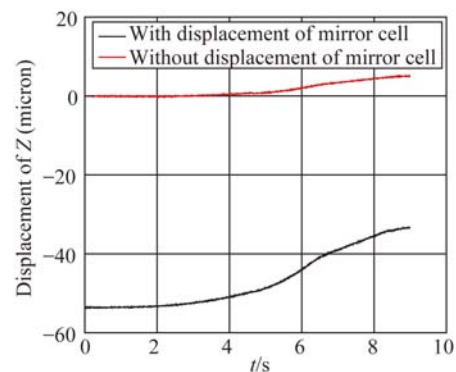
图 5 1~6 号 LVDT 测得数据

Fig. 5 Measure results of 6 sensors

5.2 镜室变形对解算结果影响

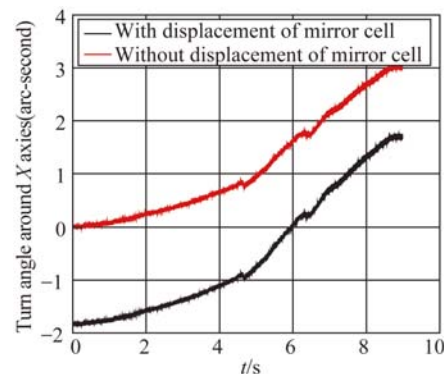
利用 LVDT 测得值对主镜位置进行解算时, 如果不考虑镜室的变形影响, 也可以解算得到主

镜的位置变化, 但其结果会和考虑镜室变形时有较大出入。图 6 中给出 2 张对比图 6(a) 和 6(b), 两图分别给出主镜的 Z 向平移和绕 X 轴转角, 在使用不同解算方法下得到的曲线。两种方法得到的位置解算曲线变化趋势一致, 都随着转角增大而增大。但用两种方法解算方法得到的曲线却有较大不同。



(a) 主镜沿 Z 向位移

(a) Displacement along Z direction



(b) 主镜绕 X 轴转角

(b) Rotation angle around X axes

图 6 不同解算方法计算得到主镜位置变化曲线

Fig. 6 Results curves resolved using different algorithm

首先两种方法的解算方法的曲线起点位置不同,即转角为零时,主镜的自由度值不同。不考虑镜室变形时,主镜的自由度在初始时都为零,而考虑镜室变形后则不同。这一情况可以理解为,主镜的位置存在一个理想位置,即不考虑主镜支撑和镜室变形时主镜的位置。而实际情况是主镜支撑和镜室都会变形,主镜位置总是和理想位置有一定差别。不考虑镜室变形的算法,只是将传感器测得的变化来解算主镜位置,初始阶段,认为传感器测得值为零,所以使用该种算法得到主镜自由度解算值必然为零。而如果考虑镜室变形时,虽然促动器测试值为零,但镜室的变形不为零,因此利用该算法解算的主镜位置自由度不为零。第二种方法明显更合理,因为初始状态主镜实际和理想位置之间也肯定有差别,所以主镜自由度不为零。而第一种算法是默认初始状态主镜处于理想位置,这显然不合理。

比较同一位置解算自由度,两种方法得到的解算曲线的改变值也不同。例如主镜的 Z 向平移,不考虑镜室变形时,主镜的 Z 向平移从 $0\ \mu\text{m}$ 变为 $10\ \mu\text{m}$,改变为 $10\ \mu\text{m}$ 。而考虑镜室变形时,主镜的 Z 向平移从 $-53\ \mu\text{m}$ 变为 $-33\ \mu\text{m}$,改变量为 $20\ \mu\text{m}$ 。两种方法解算的得到的 Z 向平移变化量相差一倍。如果要通过次镜修正离焦,即主次镜间距时,修正量也会相差 $10\ \mu\text{m}$ 。

从以上分析可知,考虑镜室变形的解算方法更合理,且两种方法确实会增大较大的解算误差,因此解算时应该考虑镜室的变形影响。

5.2 主镜位置解算结果

将 LVDT 的测量值和第 3 节计算得到的镜室变形一起代入之前推导得到的算法,就求得了主镜的 5 个位移自由度和半径膨胀量。图 7 所示为主镜 X、Y 和 Z 向位移及主镜的半径变化。图 8 所示为主镜绕 X 和 Y 轴转角随测试时间的变化曲线。从图中可以看到主镜的位置改变随着转角的增大而增大。比较轴向(Z 向平移,绕 X 和 Y 轴转角)和侧向(X 和 Y 向平移)的位置改变量,可以看到轴向的自由度位移较小。轴向 Z 向平移最大改变量 $20\ \mu\text{m}$,而侧向 X 和 Y 平移改变量都大于 $100\ \mu\text{m}$ 。因此可以认为主镜的轴向制成

刚度要大于侧向支撑刚度。其中主镜沿 X 轴方向的平移从初始的 $20\ \mu\text{m}$ 变化为 $160\ \mu\text{m}$,变化 $140\ \mu\text{m}$ 时最大,这说明主镜侧向 X 向的限制刚度最弱。

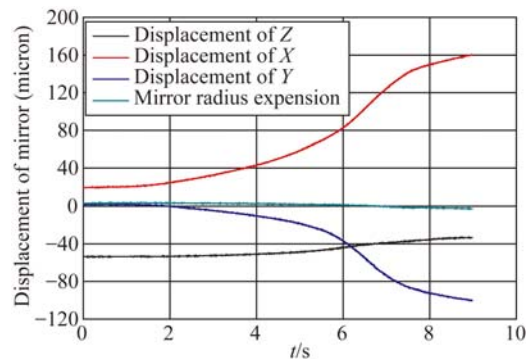


图 7 主镜沿 X、Y 和 Z 向平移量及半径长度变化曲线
Fig. 7 Resolving curves of displacement along X、Y、Z direction and expansion of mirror radius

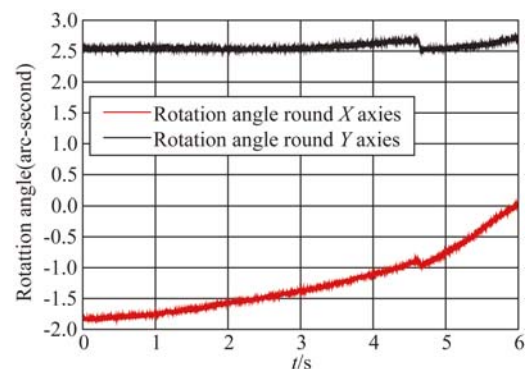


图 8 主镜绕 X 和 Y 轴转角变化曲线
Fig. 8 Curves of rotation angles around X and Y axes

主镜的半径随着温度改变会发生长度变化,而在测试的 10 s 时间内,主镜温度不会发生剧烈变化,因此测得的主镜半径长度改变应该很小,而测试结果也证明确实如此。但仍然测得主镜半径随着转角增大而变化,这是由于测试使用的传感器存在的误差造成的。

在图 8 中可以看到在 4.8 s 时,绕 X 和 Y 轴的转角曲线同时发生了一段折线,这是由于测试时,主镜被意外碰到导致测试曲线出现折线,但并不影响曲线的发展趋势。

主镜位置的解算误差主要由两点组成,一是位移传感器测量的误差,主要是由传感器本身的

非线性、零点漂移等造成的误差;二是传感器安装位置误差,传感器安装位置不可能绝对准确,因此解算公式输入的传感器位置并不是传感器的真实位置,这也会带来一定的解算误差。这两项误差中,传感器的测量误差,可以通过选用更高精度传感器,改进采集电路等方法解决,而传感器的安装位置误差,则可以利用激光跟踪仪对传感器的安装位置进行精确测量来解决。

6 结 论

本文设计了基于移传感器的主镜位置监测系统,并设计了考虑镜室变形的主镜位置解算算法,利用实验室的 1.2 m SiC 主镜搭建了测试平台,利用安装在 6 个 LVDT 测量主镜和镜室之间的位置变化,并利用有限元方法解算得到的镜室变

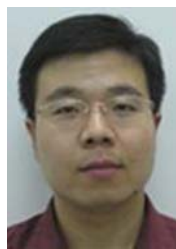
形,最后将镜室变形作为系统误差和 LVDT 测量值一起加入到算法中解算主镜位置自由度。通过测试结果发现:主镜相对于镜室的位置变化,随俯仰转角的增大而增大;考虑镜室变形的算法比不考虑镜室变形要合理,考虑镜室变形后得到主镜初始自由度不为零,且两种算法解算得到的位置自由度改变量也不同。主镜位置解算的结果表明,轴向支撑系统控制的 3 个自由度:Z 向平移、绕 X 轴转动和绕 Y 轴转动,相对于侧向支撑系统控制的自由度:X 向平移和 Y 向平移要小很多。主镜的 Z 向平移变化只有 20 μm ,而 X 向平移和 Y 向平移分别为 146 μm 和 100 μm 。这都表明测试用主镜的侧向支撑刚度相对于轴向要低。以上测试结果表明该测试系统确实可行,算法合理,可以实现对主镜位置的实时检测,从而为大型望远镜主镜位置监测和校正提供了有益参考。

参考文献:

- [1] 程景全. 天文望远镜[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 李振伟, 杨文波, 张楠. 水平式光电望远镜静态指向误差的修正[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 263-269.
LI ZH W, YANG W B, ZHANG N. Static pointing error of level mounting optoelectronic telescope [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 263-269. (in Chinese)
- [3] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technology of large aperture ground-based telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [4] 明名, 吕天宇, 吴小霞, 等. 大气色散对 4 m 望远镜成像分辨力的影响与校正[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 814-822.
MING M, LV T Y, WU X X, *et al.*. Influence of atmospheric dispersion on image resolution of 4 m telescope and correction method [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 814-822. (in Chinese)
- [5] 王建立, 刘欣悦. 智能光学的概念及发展[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 437-448.
WANG J L, LIU X Y. Concept and development of smart optics [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 437-448. (in Chinese)
- [6] PAUL R, YODER J R. *Opto-Mechanical Systems Design (third edition)* [M]. Taylor & Francis Group CRC Press, 2006.
- [7] DEVRIES J, DOUGLAS N, HIKEMAN E. Lsst telescope primary/tertiary mirror hardpoints [J]. *SPIE*, 2010, 7739: 77391J-1-12.
- [8] LARRY S, EUGENE H. Gemini primary mirror support system [J]. *SPIE*, 1994, 2199: 223-238.
- [9] STEFANO S, LEGRAND P, BATY A, *et al.*. Design and construction of the VLT primary mirror cell [J]. *SPIE*, 1997, 2871: 314-325.
- [10] SCOTT S W, GREENWALD D, TAPIA S. 3. 7-meter active primary mirror [J]. *ESOC*, 1994, 48: 457-462.
- [11] DAVID S A, JONATHAN K, JOHN M H, *et al.*. The large binocular telescope primary mirror support control system description and current performance results [J]. *SPIE*, 2008, 7018: 70184C-1-12.
- [12] CHARLIE H, STEVE G, MATT J, *et al.*. Giant magellan telescope primary mirror cells [J]. *SPIE*, 2010, 7733: 773327-1-12.
- [13] GRAY P M, HILL J M, DAVISON W B. Support of large borosilicate honeycomb mirrors [J]. *SPIE*, 1994, 2199: 691-702.
- [14] SCHIPANI O, ORSI S D, FERRANINA L, *et al.*

- al.. Active optics primary mirror support system for the 2.6 m VST telescope[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(8):1234-1241.
- [15] JAMES E K, GREENWALD D. AEOS 3.67 m telescope primary mirror active control system [J]. *SPIE*, 1998, 3352:400-411.
- [16] 李玉霞,刘昌华,王建立,等. 大型望远镜主镜位姿解算与检测系统设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(5):766-774.
- LI Y X, LIU CH H, WANG J L, *et al.*. Design of large telescope primary mirror position resolving and monitoring system [J]. *Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(5):766-774. (in Chinese)
- [17] 吴小霞,李剑锋,宋淑梅,等. 4 m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2451-2457.
- WU X X, LI J F, SONG SH M, *et al.*. Active support system for 4 m SiC light weight primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2451-2457. (in Chinese)
- [18] 邵亮,吴小霞,陈宝钢,等. SiC 轻量化主镜的被动支撑系统 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1380-1386.
- SHAO L, WU X X, CHEN B G, *et al.*. Passive support system of light-weight SiC primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 1380-1386. (in Chinese)
- [19] 王显军. 大型望远镜测角系统误差的修正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9):2446-2451.
- WANG X J. Correction of angle measuring errors for large telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9):2446-2451. (in Chinese)
- [20] 葛川,张德福,李鹏志,等. 电容式位移传感器的线性度标定与不确定度评定[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9):2546-2552.
- GE CH, ZHANG D F, LI P ZH, *et al.*. Linear calibration and uncertainty evaluation for capacitance displacement sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 22(9):2546-2552. (in Chinese)

作者简介:



李剑锋(1982—),男,河北石家庄人,博士,副研究员,2004 年于大连理工大学获得学士学位,2009 年于中国科技大学获得博士学位,主要从精密光机结构设计研究。E-mail: ljfengli@126.com



吴小霞(1981—),女,江苏盐城人,博士,副研究员,2003 年于吉林大学获得学士学位,2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为大口径反射镜主动支撑系统设计和系统仿真分析。E-mail: wu-xiaoxia@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)