

## 极轴式望远镜主镜支撑结构对镜面变形的影响

范李立<sup>1,2</sup>, 张景旭<sup>1</sup>, 杨飞<sup>1</sup>, 吴小霞<sup>1</sup>, 孙敬伟<sup>1,2</sup>, 王槐<sup>1</sup>, 明名<sup>1</sup>

(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 100049)

**摘要:** 根据极轴式望远镜的工作特点, 以口径为 700 mm 的极轴式望远镜主镜室系统为例, 确定了一套主镜支撑方案。借助于有限元分析软件 MSC.Patran 详细地建立了系统的有限元模型, 选取多种工况, 分析了系统在自重作用下的镜面变形情况, 绘制了镜面变形误差 PV 值和 RMS 值的变化曲线。结果表明: 镜面变形主要受  $\alpha$  角的影响, 随着  $\alpha$  的增大而减小, 径向支撑效果优于轴向支撑效果, 镜面变形误差满足设计指标要求。在主镜室系统竖直放置时, 利用 Zygo 干涉仪测得带支撑结构的镜面变形误差 RMS 值为 28.48 nm, 表明主镜在该支撑结构作用下的面形接近于加工检测时的状态, 同时也验证了有限元模型的准确性。

**关键词:** 极轴式望远镜; 主镜支撑; 有限元分析; 面形

**中图分类号:** TH743 ; TH122      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2012)01-0173-05

## Impact of the supports of primary mirror in equatorial telescope on its surface deformation

Fan Lili<sup>1,2</sup>, Zhang Jingxu<sup>1</sup>, Yang Fei<sup>1</sup>, Wu Xiaoxia<sup>1</sup>, Sun Jingwei<sup>1,2</sup>, Wang Huai<sup>1</sup>, Ming Ming<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** According to the working characteristics of equatorial telescope, the supports scheme on 700 mm primary mirror were designed. The finite element model of the system was established by the software MSC. Patran. The surface deformation under gravity was analyzed in different load cases. The curves of surface deformation errors PV and RMS were plotted. As a result, the surface deformation is influenced mostly by angle  $\alpha$ , and it decreases when the angle  $\alpha$  rises. The effect of the radial support is better than the axial support. The surface deformation errors can satisfy the precision requirements. When the system is perpendicular, the test result of RMS is 28.48 nm by Zygo interferometer, which shows that the surface shape with the supports is close to the test state. It validates that the finite element model is accurate.

**Key words:** equatorial telescope; primary mirror supports; finite element analysis; surface shape

收稿日期: 2011-05-21; 修订日期: 2011-06-18

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2009AA808020)

作者简介: 范李立(1985-), 女, 硕士生, 主要从事极轴式望远镜主镜支撑结构设计方面的研究。Email: mousezxc@yahoo.cn

导师简介: 张景旭(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大型光电经纬仪结构设计方面的研究。Email: zhangjx@ciomp.ac.cn

## 0 引言

极轴式也叫赤道式,为补偿地球的自转,其一根传动轴与地球的自转轴平行,叫做赤经轴或极轴;另一根与其相互垂直,称为赤纬轴。极轴的转动是目标经度的变化,赤纬轴的转动是目标纬度的变化。在极轴式望远镜的视场上,星体位置没有相对转动,在观测条件最好的天顶位置没有跟踪盲区<sup>[1]</sup>。

主镜室系统是望远镜最为关键的部件之一,主镜的面形精度直接决定了望远镜的成像质量,而由于极轴式望远镜的运动方式较为特殊,这就对主镜的支撑结构提出了更高的要求。为了保证其结构的刚度和稳定性,特别是主镜的面形精度,在设计阶段就要根据望远镜的技术要求及影响因素进行分析和综合考虑<sup>[2]</sup>。

文中以口径为 700mm 的极轴式望远镜主镜室系统为例,根据其工作特点确定了一套主镜支撑方案,借助于有限元分析软件 MSC.Patran,详细地建立主镜室系统的有限元模型,分析了支撑系统综合作用对主镜面形的影响,绘制出其镜面变形误差 PV 值和 RMS 值的变化曲线,并与面形检测结果进行了对比。

## 1 主镜室系统的组成

主镜室系统主要包括:主镜、轴向支撑、径向支撑、芯轴、底板、前压紧和防转组件,其几何模型如图 1 所示。



图1 主镜室系统几何模型

Fig.1 Geometry model of primary mirror cell system

该主镜为平凹单拱结构形式,其材料为微晶玻璃(Zerodur),外径为 700mm,中心孔直径为 196mm,中心厚为 75.55mm,镜面双曲面曲率半径为 1977.5mm,

质量为 71.6kg。

主镜支撑示意图如图 2 所示。其轴向支撑设计是基于三点定一平面的原理,采用无定向三角板支撑系统,即 Whiffle-tree 结构。优化确定其支撑垫组合形式为  $9_3^6$ ,支撑半径为:内圈半径  $R_1=162\text{mm}$ ,外圈半径  $R_2=285.5\text{mm}$ <sup>[3-9]</sup>。

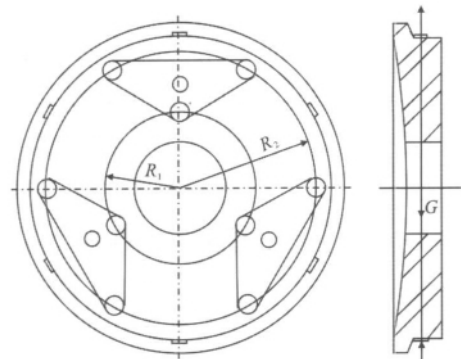


图2 轴向和径向支撑示意图

Fig.2 Sketch of axial and radial supports

对于不同形式的望远镜,其径向支撑不同。作为地平式系统,其主镜的面形精度只受绕水平轴的俯仰运动的影响,与方位轴的转动不相关,而极轴式望远镜的主光学系统在跟踪目标过程中既要绕极轴转动,又要绕赤纬轴转动,主镜的面形精度受两轴复合运动的影响,径向支撑力的变化复杂。该主镜径向支撑力选用竖直向上均匀承重推拉支撑形式<sup>[3-4]</sup>,且每个侧支撑力  $F_n=1/6G$ ,合力作用线通过主镜重心,以免对主镜产生额外扭矩<sup>[10]</sup>。结构上选用沿主镜外圆均匀分布的 6 点杠杆平衡重机构,在主镜处于不同工作位置时,各浮动点的支撑力自动适应重力方向的相对变化而同步变化,方向始终与重力相反,支撑力可以通过调节重锤的质量或杠杆力臂而改变。

采用 Whiffle-tree 和杠杆平衡重两种浮动支撑组合方式的优点是:仅将主镜室变形中的平移和倾斜分量传递到主镜上;只引起主镜的平移和倾斜刚体位移,并不影响成像质量;只引起指向准确度误差<sup>[6]</sup>。

## 2 有限元分析

### 2.1 有限元模型的建立

针对该主镜室系统各部件的结构特点及其连接关系,详细地建立了主镜室系统的有限元模型,如图 3 所示。

整个系统在建模过程中使用直角坐标系,其中,主镜底面指向主镜表面为 Z 向,沿镜面地面平行 X 向, Y 轴按右手定则确定。

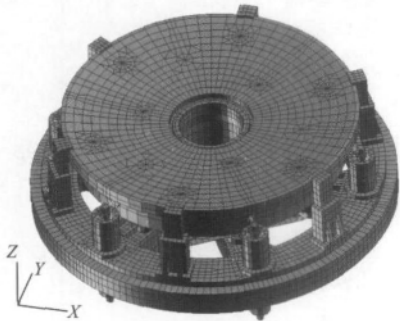


图 3 主镜室系统有限元模型

Fig.3 Finite element model of primary mirror cell system

该系统轴向支撑三角板为薄板结构,采用板壳单元划分网格以提高计算精度;轴向支撑杆简化成杆单元、径向支撑杆简化成梁单元;万向球头用多点约束 MPC 代替,其余部件均采用实体单元建模。

建模过程中对轴承的模拟是较难实现的。在静力学分析中,可以用三维球体、三维空间杆单元和三维间隙元即弹簧元来模拟实际结构<sup>[11-12]</sup>。该径向支撑采用杠杆平衡重机构,其杠杆支点为调心球轴承,用三维空间杆单元对轴承滚动体进行简化。

主镜室中关键结构的材料属性参数如表 1 所示。

表 1 材料属性参数

Tab.1 Parameters of materials attribute

Material	Density $\rho/t \cdot \text{mm}^{-3}$	Elastic ratio/MPa	Poisson's ratio $\mu$	Key structure
Zerodur	2.53E-9	91 000	0.24	Primary mirror
4J32	8.10E-9	141 000	0.25	Axial and radial support pad; Mandrel unit
40 Cr	7.82E-9	211 000	0.28	Axial and radial support bar
HT 200	7.90E-9	135 000	0.25	Axial support triangle, plate, front compacting
GCr15	7.78E-9	212 000	0.29	Mechanical bearing

2.2 工况的确定

为了模拟望远镜运动的各种工况,引入  $\alpha$ (见图 4(a))和  $\theta$ (见图 4(b))两个角度,如图 4 所示。

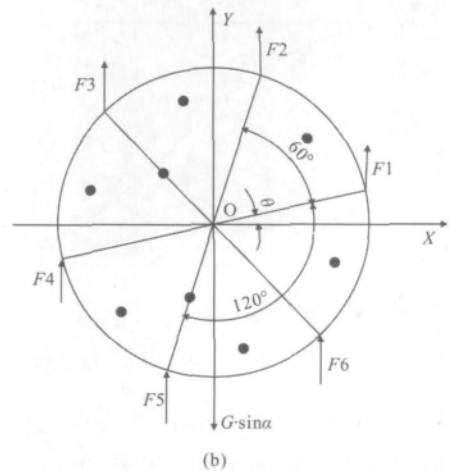
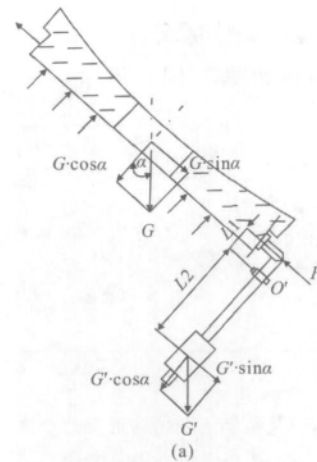


图 4 支撑力分布图

Fig.4 Distribution map of the support forces

$\alpha$  为主镜光轴和重力之间的夹角,即赤纬轴转动的角度,实际工作时, $\alpha$  在  $[-90^\circ, 90^\circ]$  范围内变化,由于结构对称,分析时只要取  $\alpha \in [0^\circ, 90^\circ]$  即可。极角<sup>[3]</sup> $\theta$  为主镜绕自身光轴旋转的角度,即极轴转动的角度, $\theta$  可以在  $[0^\circ, 360^\circ]$  范围内变化,考虑到轴向支撑是  $120^\circ$  对称,径向支撑是  $60^\circ$  对称,分析时取  $\theta \in [0^\circ, 60^\circ]$  即可。其中,当  $\alpha=0^\circ$  时,光轴指向天顶,轴向支撑起主要作用;当  $\alpha=90^\circ$  时,光轴水平,径向支撑起主要作用。

极轴式望远镜的主光学系统在跟踪目标的过程中既要绕极轴转动,又要绕赤纬轴转动,体现在此分析模型中就是  $\theta$  和  $\alpha$  在各自的工作范围内变化。

2.3 分析结果

借助于有限元分析软件 MSC.Patran,对底板外缘和镜筒连接部位进行全约束,分别计算  $\theta$  为  $0^\circ, 30^\circ,$

60°三种情况下,  $\alpha$  在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 变化时, 主镜室系统在自重作用下的镜面变形情况, 所得镜面变形误差 PV 值和 RMS 值曲线如图 5、图 6 所示。

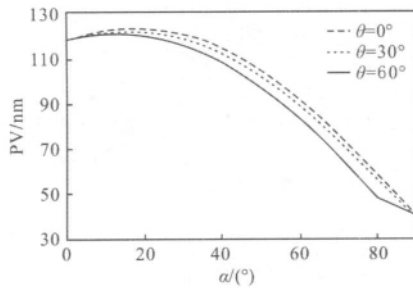


图 5 PV 值随光轴指向的变化曲线

Fig.5 Curve of PV with optical axis direction

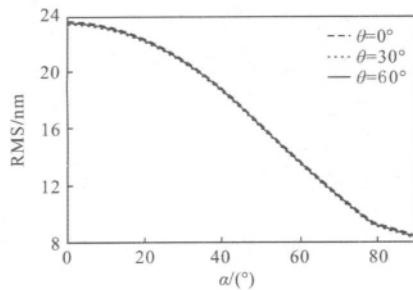


图 6 RMS 值随光轴指向的变化曲线

Fig.6 Curve of RMS with optical axis direction

从图 5、图 6 可以看出: 镜面变形误差的 PV 值和 RMS 值的大小主要受  $\alpha$  角的影响, 但随  $\theta$  的变化甚微。PV 值和 RMS 值整体变化趋势一致, 随着  $\alpha$  值的增大, 二者随之减小, 即光轴指向水平比指向天顶时形好, 可见, 该设计径向支撑比轴向支撑作用效果好。

由分析结果可见, 当  $\alpha=0^\circ, \theta=0^\circ$  时, 镜面变形误差 PV 值为 118.12 nm, RMS 值为 23.45 nm, 其镜面变形云图如图 7 所示, 主镜室系统变形云图如图 8 所示; 当  $\alpha=90^\circ, \theta=0^\circ$  时, PV 值为 40.11 nm, RMS 值为 8.28 nm, 镜面变形云图如图 9 所示。

由图 7 可知, 在光轴指向天顶时镜面最大变形出现在主镜内径附近, 主要原因如下: (1) 分析时对底板外缘和镜筒连接部位进行了全约束, 在自重作用下底板中心变形较大, 通过支撑杆带动三角板有微量下沉, 顺延到主镜上其镜面中部变形较大; (2) 由图 8 可知, 当光轴指向天顶时, 轴向支撑承担了主镜的全部重量, 系统最大变形出现在轴向支撑三角板边缘处, 由于该三角板相对其他部件较薄, 有

待改善, 对主镜镜面变形有一定影响; (3) 芯轴套和主镜用胶粘结, 导致主镜中心质量稍大。

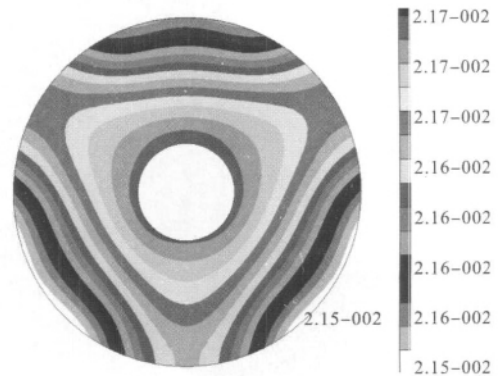


图 7  $\alpha=0^\circ, \theta=0^\circ$  时主镜变形云图

Fig.7 Deformation nephogram as  $\alpha$  is  $0^\circ$  and  $\theta$  is  $0^\circ$  of primary mirror

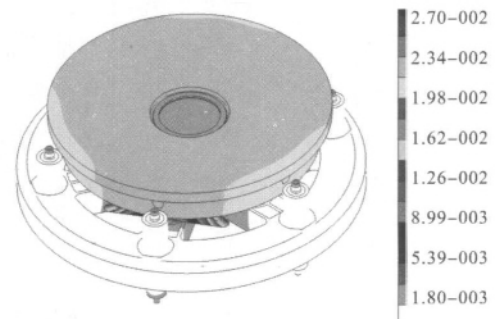


图 8  $\alpha=0^\circ, \theta=0^\circ$  时主镜室系统变形云图

Fig.8 Deformation nephogram as  $\alpha$  is  $0^\circ$  and  $\theta$  is  $0^\circ$  of primary mirror system

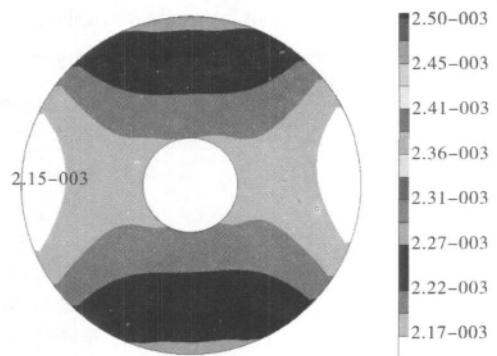


图 9  $\alpha=90^\circ, \theta=0^\circ$  时主镜变形云图

Fig.9 Deformation nephogram as  $\alpha$  is  $90^\circ$  and  $\theta$  is  $0^\circ$  of primary mirror

### 3 面形检测结果

当主镜室系统竖直放置( $\alpha=90^\circ$ )时, 利用 Zygo

干涉仪对主镜进行了实际检测,当 $\theta=0^\circ$ 时,测得带支撑结构的主镜镜面变形误差 RMS 值为 28.48 nm,干涉图如图 10 所示。

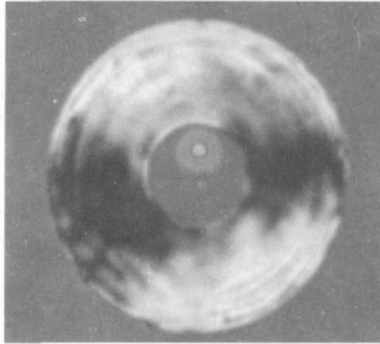


图 10  $\theta=0^\circ$ ,  $\alpha=90^\circ$ 时的干涉图

Fig.10 Interferogram as  $\theta$  is  $0^\circ$  and  $\alpha$  is  $90^\circ$

该结果与理论分析 RMS 值 8.28 nm 相差较大,主要是因为理论分析是基于一块完美的镜子,即只计算了支撑结构对镜面变形产生的影响;而实际上该主镜在磨制完未装配到主镜室系统之前已经存在一定的面形误差,其 RMS 值为 18.98 nm,与在镜室结构支撑作用下的镜面检测结果较接近。

由于检测条件所限,只能对光轴水平时进行检测,光轴指向天顶时的镜面变形误差无法推算。

## 4 结论

根据极轴式望远镜的工作特点,轴向支撑采用 9 形式的 Whiffle-tree 结构,径向支撑采用竖直均匀承重形式的 6 点杠杆平衡重机构。

镜面变形误差 PV 值和 RMS 值的大小主要受  $\alpha$  角的影响,但随  $\theta$  的变化甚微,随着  $\alpha$  的增大,PV 值和 RMS 值随之减小。光轴指向水平比指向天顶时镜面变形小,该设计径向支撑比轴向支撑作用效果佳。

当  $\alpha=0^\circ$ , $\theta=0^\circ$ 时,镜面变形误差 PV 值为 118.12 nm, RMS 值为 23.45 nm; 当  $\alpha=90^\circ$ , $\theta=0^\circ$ 时,PV 值为 40.11 nm,RMS 值为 8.28 nm,满足设计指标所要求的  $RMS < \lambda/20$ ,  $PV < \lambda/4$  ( $\lambda=632.8$  nm)。

当  $\alpha=90^\circ$ , $\theta=0^\circ$ 时,利用 Zygo 干涉仪测得主镜在镜室结构支撑作用下的镜面变形误差 RMS 值为 28.48 nm,而主镜在磨制完未装配到主镜室系统中

之前的镜面变形误差 RMS 值为 18.98 nm,可见,主镜在该支撑结构作用下的镜面面形精度接近加工检测时的状态,同时也验证了有限元模型的准确性。

## 参考文献:

- [1] Cheng Jingquan. Principles of astronomical Telescope Design [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003: 61-68, 84-93. (in Chinese)
- [2] Zhang Linbo, Ren Ge, Chen Hongbin. Finite element analysis for the large-aperture telescope[J]. *Optical Technique*, 2007, 29(5): 565-567. (in Chinese)
- [3] Yoder J R, Paul R. Opto-Mechanical Systems Design [M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 1993: 407-470.
- [4] Bely P Y. The Design and Construction of Large Optical Telescopes[M]. New York: Springer-Verlag, Inc, 2003: 219-223.
- [5] Wang Fuguo, Yang Hongbo, Zhao Wenxing, et al. Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror [J]. *Opt Precision Engineering*, 2009, 17(1): 85-91. (in Chinese)
- [6] Wu Xiaoxia, Yang Hongbo, Zhang Jingxu, et al. Optimal design of support system for the large aperture sphere mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1): 129-132. (in Chinese)
- [7] Wang Fuguo, Yang Hongbo, Yang Fei, et al. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 877-880. (in Chinese)
- [8] Tan Fanjiao, Qiao Yanfeng, Li Yaobin, et al. New technology for lightweight large primary mirror of theodolite [J]. *Opt Precision Engineering*, 2008, 16(1): 22-28. (in Chinese)
- [9] Yan Yong, Jin Guang, Yang Hongbo. Lightweight structural design of space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 97-102. (in Chinese)
- [10] Myung K C. Optimization strategy of axial and lateral supports for large primary mirrors[C]//SPIE, 1994, 2119: 841-851.
- [11] Wang Jun, Lu E, Wang Jiaqi. A study on the simplifying method of ball bearing in structural analysis[J]. *Opt Precision Engineering*, 1999, 7(2): 110-115. (in Chinese)
- [12] Yang Dehua, Gu Bozhong, Cui Xiangqun. Stiffness calculation and application of self-aligning ball bearing [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2003, 22(S): 114-117. (in Chinese)