

极轴式望远镜主镜支撑设计

范李立^{1,2}, 张景旭¹, 姜皓³, 杨飞¹, 吴小霞¹, 王富国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;
3. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 极轴式望远镜主镜的面形精度受极轴和赤纬轴复合运动的影响, 针对其复杂的运动方式, 以 $\Phi 700$ mm 主镜为例, 设计了一套满足其各种工况要求的轴向及径向支撑结构。运用有限元分析软件 MSC.Patran/Nastran 对其在水平和竖直放置的极限工况进行了分析, 计算出主镜水平状态下的镜面变形误差 PV 值为 19.33 nm, RMS 值为 4.47 nm; 竖直状态下当极角 θ 为 0° 时, 镜面变形误差 PV 值为 16.19 nm, RMS 值为 1.26 nm, 当极角 θ 为 30° 时, 镜面变形误差 PV 值为 13.33 nm, RMS 值为 1.19 nm。分析结果满足设计指标所要求的 $RMS < \lambda/20$, $PV < \lambda/4$ ($\lambda=632.8$ nm), 证实了该支撑方案可行。

关键词: 极轴式望远镜; 主镜; 支撑; 有限元法

中图分类号: TH122; TH743 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2011)03-0476-04

Design of the primary mirror support of equatorial telescope

Fan Lili^{1,2}, Zhang Jingxu¹, Jiang Hao³, Yang Fei¹, Wu Xiaoxia¹, Wang Fuguo¹

- (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;
3. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The primary mirror surface deformation of equatorial telescope is affected by the composite motion of polar axis and declination axis. According to the complicated mode of motion, the axial and radial supports on $\Phi 700$ mm primary mirror were designed to meet any load cases. Some utmost load cases were analyzed with the finite element analysis software MSC.Patran/Nastran when the mirror was level and vertical. As a result, when the mirror is level, the surface deformation error PV value is 19.33 nm, RMS value is 4.47 nm; when the mirror is vertical, as the polar angle θ is 0° , the surface deformation error PV value is 16.19 nm, RMS value is 1.26 nm, as the polar angle θ is 30° , the surface deformation error PV value is 13.33 nm, RMS value is 1.19 nm. The results satisfy all the precision requirements $RMS < \lambda/20$, $PV < \lambda/4$ ($\lambda=632.8$ nm), and it proves that the support way is feasible.

Key words: equatorial telescope; primary mirror; support; finite element method

收稿日期: 2010-07-15; 修订日期: 2010-08-05

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2009AA808020)

作者简介: 范李立(1985-), 女, 硕士生, 主要研究方向为极轴式望远镜主镜支撑结构设计。Email: mousezxc@yahoo.cn

导师简介: 张景旭(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为大型光电经纬仪结构设计。Email: zhangjx@ciomp.ac.cn

0 引言

主镜作为望远镜主光学系统中的关键元件,其面形精度直接决定了望远镜的成像质量^[1]。为保持主镜的面形精度,使其免受自重的影响或将影响降低到可接受的限度,设计一套合理的主镜支撑结构是至关重要的。由于极轴式望远镜运动方式复杂,主镜的面形精度受极轴和赤纬轴复合运动的影响,这就要求主镜的支撑结构必须满足在各种不同姿态、温度、跟踪速度、跟踪加速度的条件下,有效保证光学元件面形精度、主镜和主镜室相互位置关系。

文中以 $\Phi 700$ mm 的极轴式主镜为研究对象,对其轴向和径向支撑进行详细设计,采用有限元法对主镜水平和竖直放置的极限工况进行分析,计算其镜面变形误差。

1 极轴式望远镜

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;另一根与极轴相互垂直,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。绕极轴和赤纬轴旋转可以使望远镜指向不同的时角和赤纬的天区,极轴做与地球自转速度一致的恒速来跟踪天体,在其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^[2]。由于其独特的观测优势,广泛应用于天文领域。

2 主镜参数

该主镜材料为微晶玻璃,外径为 $\Phi 700$ mm,中心孔直径为 $\Phi 196$ mm,边缘厚为 105 mm,镜面曲率半径为 1 977.5 mm,经计算主镜的质量为 71.6 kg,见表 1。

表 1 Zerodur 材料属性参数

Tab.1 Zerodur attribute parameters

Density $\rho/t \cdot \text{mm}^{-3}$	Elastic ratio E/MPa	Poisson's ratio μ
2.53E-9	91 000	0.24

3 主镜支撑方案

主镜支撑结构主要包括:轴向支撑、径向支撑及中心定位组件,此外,还有前压紧和防转结构。文中主要

对轴向和径向支撑进行研究。

3.1 轴向支撑

主镜轴向支撑结构设计是基于三点定一平面的原理。主要形式有两种:无定向支撑及镜体浮动支撑。无定向支撑主要采用无定向三角板支撑系统,通常被称作 Whiffle-tree 结构;浮动支撑主要采用杠杆平衡重系统、气压支撑系统和液压支撑系统。该主镜轴向支撑采用的是 Whiffle-tree 结构^[2-5]。

3.1.1 支撑点数的确定

主镜轴向支撑最少支撑点数的判定准则^[3]为:

$$N = \left(\frac{0.375D^2}{t} \right) \left(\frac{\rho}{E\delta} \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中: D 为主镜直径; E 为材料弹性模量; δ 为允许的镜面变形误差 RMS 值; ρ 为材料密度; t 为镜子厚度。

根据主镜参数,理论计算出其轴向支撑点数最少为 4。根据 Whiffle-tree 结构的特点,轴向支撑点一般按 9_3^6 、 18_6^{12} 、 27_9^{18} 等方式来布局,故该主镜轴向支撑采用如图 1 所示的 9_3^6 支撑布局方式。

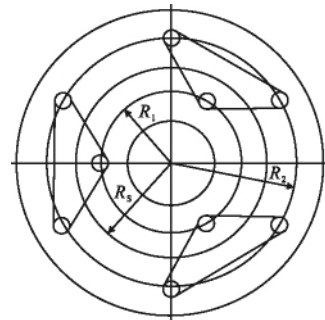


图 1 轴向支撑示意图

Fig.1 Sketch of axial supports

3.1.2 支撑半径的确定

对于如图 1 所示的 9_3^6 支撑点布局方式,其支撑圈半径可根据如下经验公式^[3]确定:

$$\text{基础平衡圈半径 } R_0 = (\sqrt{3}/6)D = 0.28868D \quad (2)$$

$$\text{内圈半径 } R_1 = (\sqrt{6}/12)D = 0.20412D \quad (3)$$

$$\text{外圈半径 } R_2 = (\sqrt{6}/6)D = 0.40825D \quad (4)$$

$$\text{三角板中心圆半径 } R_3 = 0.30374D \quad (5)$$

式中: D 为主镜直径,经计算得 $R_0 = 202.076$ mm, $R_1 = 142.884$ mm, $R_2 = 285.775$ mm, $R_3 = 212.618$ mm。

以上公式是基于等厚平板实心镜体,实际上曲面

镜的重量沿半径分布呈非线性变化,文中运用 ANSYS 优化分析模块对支撑半径进行优化^[6-7],可得:
 $R_1=162.030\ 0\ \text{mm}$, $R_2=285.482\ 5\ \text{mm}$, $R_5=218.839\ 1\ \text{mm}$ 。
 实际工程中取整为 $R_1=162\ \text{mm}$, $R_2=285.5\ \text{mm}$, $R_5=218.8\ \text{mm}$ 。9 个支撑垫直径均为 $\Phi 40\ \text{mm}$ 。

3.1.3 有限元分析结果

借助于有限元分析软件 MSC.Patran,在主镜水平放置时对其 9 个轴向支撑位置进行约束,分析其在自重作用下的镜面变形情况,计算出其镜面变形误差 PV 值为 $19.33\ \text{nm}$,RMS 值为 $4.47\ \text{nm}$ 。其镜面变形云图如图 2 所示。

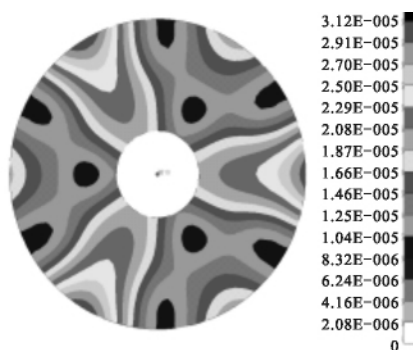


图 2 轴向支撑引起的镜面变形云图(单位:mm)

Fig.2 Mirror deformation nephogram caused by axial supports (unit: mm)

3.2 径向支撑

主镜径向支撑的基本原则是合力作用线要通过主镜重心,以免对主镜产生额外扭矩,且径向支撑力在主镜转向任何角度下都要能平衡其重量^[8]。

对于不同型式的望远镜,其轴向支撑方式相近,而径向支撑却不同。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。

径向支撑具有定位和非定位两种,常用支撑形式有推拉支撑、水银带支撑、吊带支撑、V 形支撑等。

推拉支撑为离散点加力方式,有径向余弦推拉支撑和竖直均匀承重支撑等^[2]。该主镜采用径向等间距余弦推拉支撑^[3-4]形式,如图 3 所示, θ 为主镜绕自身光轴转动的角度,叫做极角^[3],径向力 F 是极角 θ 的余弦函数,在垂直中心线的底端径向力最大。

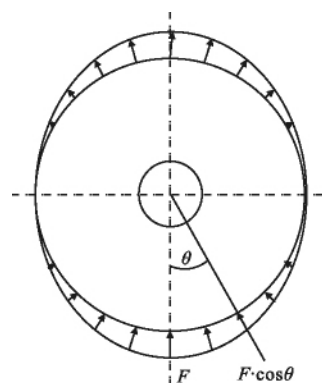


图 3 径向余弦推拉支撑力分布图

Fig.3 Distribution map of the push-and-pull radial force as cosine

该径向支撑在结构上选用 6 个杠杆平衡重机构沿主镜外圆周均匀分布,其优点是在主镜处于不同的工作位置时,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,支撑力可以通过调节重锤的质量或杠杆力臂而改变。

3.2.1 径向支撑力的计算

选取任意工况对径向支撑力进行受力分析,如图 4 所示,当主镜与竖直方向夹角为 α 时,其重力 G 沿主

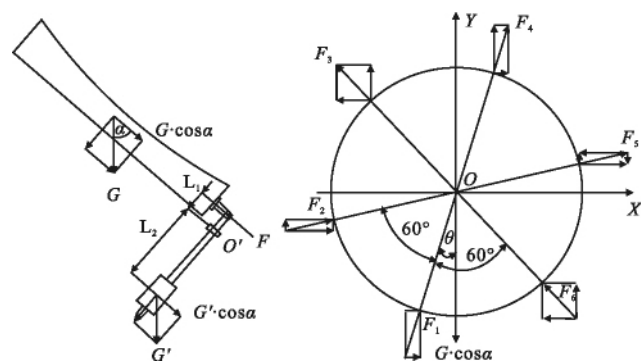


图 4 径向支撑受力分析图

Fig.4 Analysis diagram of the radial force

镜径向的分量为 $G \cdot \cos \alpha$ 。当极角为 θ 时,令最大径向力为 F ,则:

$$\begin{cases} F_1=F_4=F \cdot \cos \theta \\ F_2=F_5=F \cdot \cos (\theta+60^\circ) \\ F_3=F_6=F \cdot \cos (60^\circ-\theta) \end{cases} \quad (6)$$

由力的平衡可得 $\sum F_x=0, \sum F_y=0$,即:

$$\begin{cases} F_{1x}+F_{2x}+F_{3x}+F_{4x}+F_{5x}+F_{6x}=0 \\ F_{1y}+F_{2y}+F_{3y}+F_{4y}+F_{5y}+F_{6y}-G \cdot \cos \alpha=0 \end{cases} \quad (7)$$

整理可得: $F=1/3G \cdot \cos\alpha$, 则各个支撑力的大小为:

$$\begin{cases} F_1=F_4=1/3G \cdot \cos\alpha \cdot \cos\theta \\ F_2=F_5=1/3G \cdot \cos\alpha \cdot \cos(\theta+60^\circ) \\ F_3=F_6=1/3G \cdot \cos\alpha \cdot \cos(60^\circ-\theta) \end{cases}$$

工作时, $\alpha \in [0, 180^\circ]$, $\theta \in [0, 360^\circ]$ 。

3.2.2 重锤的确定

现对径向支撑力 F_1 进行讨论, 如图 4 所示, 令重锤重力为 G' , 则重锤沿主镜径向的最大分力为 $G' \cdot \cos\alpha$, 沿 F_1 方向的分力 G'_1 为 $G' \cdot \cos\alpha \cdot \cos\theta$ 。 $G'=1/18G$, 重锤质量为 3.98 kg。

3.2.3 有限元分析结果

在主镜竖直放置即光轴水平的状态下, 选取两个极限工况, 借助于有限元分析软件 MSC.Patran, 分析其镜面变形情况^[9]。

主镜在轴向和径向支撑共同作用下, 当 F_1 指向 Y 轴正向即 $\theta=0^\circ$ 时, 计算出其镜面变形误差 PV 值为 16.19 nm, RMS 值为 1.26 nm, 镜面变形云图如图 5 所示。

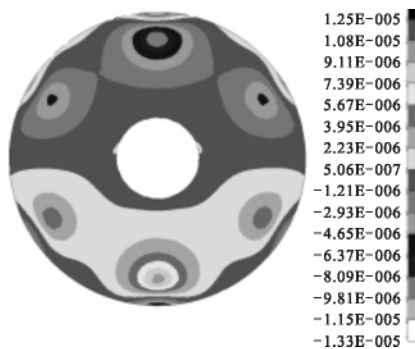


图 5 $\theta=0^\circ$ 时镜面变形云图(单位: mm)

Fig.5 Mirror deformation nephogram as θ is 0° (unit: mm)

当 F_2 指向 X 轴正向即 θ 为 30° 时, 计算出其镜面变形误差 PV 值为 13.33 nm, RMS 值为 1.19 nm, 镜面变形云图如图 6 所示。

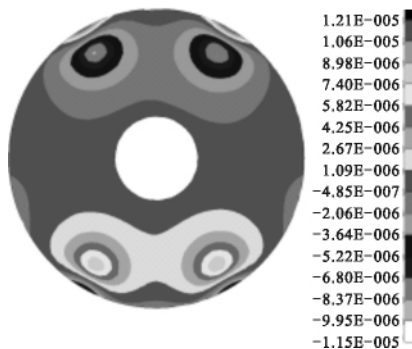


图 6 $\theta=30^\circ$ 时镜面变形云图(单位: mm)

Fig.6 Mirror deformation nephogram as θ is 30° (unit: mm)

4 结 论

该主镜轴向支撑采用 Whiffle-tree 结构, 支撑垫组合形式为 9_6^3 , 优化确定其支撑圈半径 $R_1=162$ mm, $R_2=285.5$ mm, $R_3=218.8$ mm。当主镜水平放置时其镜面变形误差 PV 值为 19.33 nm, RMS 值为 4.47 nm, 满足设计指标所要求的 $RMS < \lambda/20$, $PV < \lambda/4$ ($\lambda=632.8$ nm)。

该主镜径向支撑选用了径向等间距余弦推拉支撑形式, 6 个杠杆平衡重机构沿主镜外圆周均匀分布。在主镜竖直放置即光轴水平的状态下, 选取了两个极限工况分析其镜面变形情况, 主镜在轴向和径向支撑共同作用下, 当极角 θ 为 0° 时, 其镜面变形误差 PV 值为 16.19 nm, RMS 值为 1.26 nm; 当极角 θ 为 30° 时, 其镜面变形误差 PV 值为 13.33 nm, RMS 值为 1.19 nm, 均满足设计指标要求, 证明了该支撑方案可行。

参考文献:

- [1] Yi Ming, Wang Xiao, Wang Long. Status quo and trend of American army of electro-optic countermeasure technology and equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 601-607. (in Chinese)
- [2] Cheng Jingquan. Principles of Astronomical Telescope Design [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003: 61-68, 84-93. (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. Light-weight 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] Myung K C. Optimization strategy of axial and lateral supports for large primary mirrors[C]//SPIE, 1994, 2119: 841-851.
- [9] Zeng Chunmei, Guo Peiji, Yu Jingchi. Demonstration and analysis on correction of 0.5 m ultra-thin mirror with active supports[J]. *Opt Precision Engineering*, 2010, 18(3): 570-578. (in Chinese)