

文章编号: 1003-501X(2009)01-0107-07

# 大口径望远镜主镜支撑优化分析

王 洋<sup>1, 2</sup>, 张景旭<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 大口径望远镜主镜的面形精度是影响望远镜成像质量的关键因素之一。光电系统中主镜轴向支撑点位置, 对面形精度起着非常重要的作用, 主镜支撑点位置合理与否, 在一定程度上影响着光学系统的成像质量。本文对大口径望远镜主镜的轴向支撑和径向支撑技术进行了详细地研究, 利用有限元软件 ANSYS 建立了主镜的参数化模型, 对不同口径主镜的轴向支撑点数目和位置进行了优化, 从而给出了最佳支撑点的位置。优化分析结果表明了, 主镜的面形精度满足系统的精度要求, 并且轴向支撑对镜面的面形影响较大。

**关键词:** 大口径望远镜; 主镜支撑; 支撑结构; 主镜结构; 主镜变形

中图分类号: TH703.3, TH751

文献标志码: A

## Optimization and Analysis for the Support of the Large Aperture Telescope Primary Mirror

WANG Yang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jing-xu<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033,

China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The surface figure precision of the primary mirror in a large aperture telescope is a key factor influencing the imaging quality. In the opto-electronic system, the axis support point's position of the primary mirror is important for the mirror surface figure error. Whether the axis supports points position is appropriate will affect image quality in some degree. We research the axis support and radius support techniques of a large-aperture telescope primary mirror in detail. With finite element method software ANSYS, the primary mirror parameter model is built. We introduce how to decide the number of the different aperture mirror axis support points. The position of the different aperture mirror axis support points is optimized and the best position of support point is provided. The optimized analysis results indicate that the mirror surface figure error is satisfied. The surface figure is mostly influenced by the axial support system.

**Key words:** large aperture telescope; support of primary mirror; support structure; structure of primary mirror; deformation of primary mirror

## 0 引言

大口径望远镜主要用于观察战场、研究地形、侦察目标、空间实时监控、空间目标成像、探测、识别及定轨等等。随着光学技术的不断发展, 人们对光电系统的口径要求越来越大。因为光学口径越大, 系统集光能力和分辨能力就越强。由于大口径望远镜主镜口径的不断增大, 其重量也要随之加大, 自重、热变形、环境等问题将对主镜镜面的面形精度产生影响。在光电系统中, 望远镜的主镜是非常重要的部件<sup>[1]</sup>。主镜支撑点的位置对面形精度起着非常重要的作用, 其表面精度和支撑点位置的合理与否将直接影响光学

收稿日期: 2008-06-27; 收到修改稿日期: 2008-09-05

作者简介: 王洋(1980-), 女(汉族), 吉林长春人。博士, 主要研究方向是大口径望远镜主镜支撑技术。E-mail: wangyang800507@126.com。

系统的成像质量。而影响表面精度的因素除了镜面的加工误差外,镜面的自身重力和支撑系统也将产生附加的镜面误差。因此必须合理的设计主镜的支撑方案,优化主镜支撑点的位置,以达到理想的镜面变形。支撑点位置是支撑系统中一个重要的组成部分,它的分布直接影响面形精度。传统的设计方法是根据质心的位置大致确定支撑点的位置,然后采用插值的方法逐一验证,直到达到理想的精度要求,这种方法不但费时费力,而且很可能得到的是局部最小值而不是最优值,而采用优化分析的方法可以在整个设计空间上搜索最优值,从而得到了大口径望远镜主镜的理想面形精度。主镜支撑是大口径望远镜的关键技术,是个系统工程,它涵盖了大量的新技术,新方法。为了提高地平式望远镜空间目标监视、成像的分辨率以及对遥远星体的观测,我们从以下几个方面对主镜支撑技术进行优化分析。

## 1 镜面支撑系统和镜面精度的关系

由于大口径望远镜必须指向不同的方位和高度,所以镜面自身重力的方向将不断变化,这更给望远镜镜面的支撑增加了困难。镜面的支撑系统包括两个组成部分,它们分别承受主镜镜面重量的轴向和径向的分量。这两个组成部分就是镜面的轴向支撑和径向支撑。轴向支撑是镜面表面变形的主要原因,正确的镜面轴向支撑设计是相当困难和繁杂的任务。

### 1.1 镜面的轴向支撑

镜面的直径和厚度之比简称径厚比( $d/t$ ),镜面的径厚比越小,镜面的重量越大,同时镜面的成本也越高。传统的镜面的径厚比为 6~8,由于造价的原因,现代的望远镜的径厚比将越来越大。当镜面的径厚比较大时,镜面的支撑问题符合经典的薄板理论<sup>[2]</sup>,因此可以应用这一理论对镜面的变形情况进行详细研究。镜面在重力下的变形的近似规律可以用镜面误差、镜面直径和厚度的关系来表述,称为镜面误差的比例规律<sup>[3]</sup>。根据这一规律如果镜面的形状相同,支撑条件相同,则镜面表面的变形与镜面直径的四次方成正比,与其厚度的平方成反比。这就是说如果已经知道某一镜面的表面变形误差,则可以推算出不同直径、不同厚度的其他镜面在相同的支撑条件下的变形误差。

通过主镜支撑的薄板理论,我们可以更精确地研究镜面在不同轴向支撑条件下的变形情况。在自重作用下的表面均方根变形均可表示为:  $\delta_{rms} = \gamma_N \frac{q}{D} \left( \frac{A}{N} \right)^2$ , 其中  $N$  是支撑点数,  $A$  是薄板的面积,  $q$  是载荷,  $D$  是抗弯刚度,  $\gamma_N$  是表示支撑好坏即支撑效率的常数。如图 1 所示,为三种最基本的阵列。

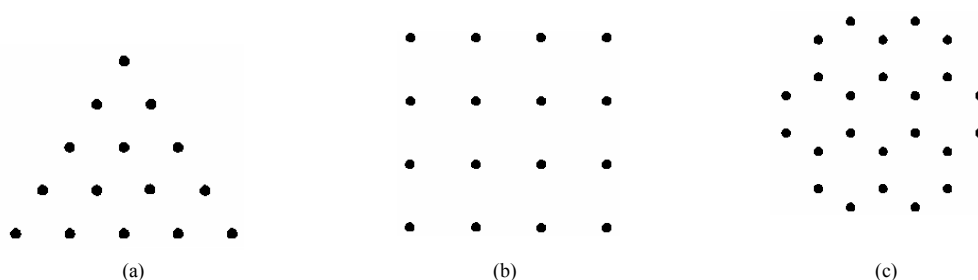


图 1 三种最基本的阵列。(a) 三角形; (b) 四边形; (c) 六边形点阵

Fig.1 Three kinds of basic arrays (a) Triangle; (b) quadrangle; (c) hexagon point array

它们分别是三角形点阵、正方形点阵和六边形点阵。求解这三种阵列支撑情况下的支撑效率常数  $\gamma_N$ , 可采用线性叠加的方法, 这三个常数的值分别为(Nelson, 1982):  $\gamma_{\text{triangular}} = 1.19 \times 10^{-3}$ ,  $\gamma_{\text{square}} = 1.33 \times 10^{-3}$ ,  $\gamma_{\text{hexagonal}} = 2.36 \times 10^{-3}$ 。这三种支撑下的最大变形分别为  $4.95 \times 10^{-3}$ ,  $5.80 \times 10^{-3}$ ,  $9.70 \times 10^{-3}$ 。很明显, 三角形阵列支撑是效率最高的支撑点布置形式, 因此  $\gamma_{\text{triangular}}$  则作为我们具体讨论镜面轴向支撑效率的一个标准。

相对来说一环数个支撑点是最简单的情况。这时需要优化的参数只有两个, 一个是支撑点所在的相对半径, 另一个是支撑点数。当只有一个点支撑时, 支撑半径无需优化。当支撑点数增加时, 则支撑点的半径就需要优化。当支撑点数目增至 6 时, 其表面变形已经十分接近一环连续支撑的情况, 而继续增加一环

之中的支撑点数, 表面均方根误差仅仅略有降低, 而每一支撑点的支撑效率则大为降低。处于最佳支撑半径下圆板表面的均方根误差仅仅为连续环外边缘支撑条件下的 1/25。当圆板在两环支撑条件下, 它的表面变形与圆板的材料有关, 取材料的泊松比  $\nu=0.25$ 。比较完整的三角形点格的结构可以由 12 个支撑点组成, 这种结构的表面变形很小, 而且每个支撑点的支撑效率也大为提高。当  $N=18$  时, 支撑效率又大大改善。以后随着支撑点数的增加,  $\gamma_N$  则不断接近于  $\gamma_{\text{triangular}}$ 。不过由于支撑点数的增加, 优化的参数就会增多, 因此必须对支撑结构进行优化。

对于大型薄镜面, 支撑点的数目  $N$  与平均支撑面积成反比, 同时仅参考镜面的厚度  $t$ , 即有:

$$\delta_{\text{rms}} \sim \frac{1}{(tN)^2}。因此可通过增大支撑点数或增大镜面厚度来改善镜面的变形情况。$$

## 1.2 镜面的径向支撑

径向支撑所引起的最大镜面变形发生在望远镜指向地平方向的时候。这时镜面的重力载荷和支撑力同处在垂直于镜面轴线的方向上<sup>[4]</sup>。在这一镜面位置上影响镜面形状的表面变形主要仍时  $Z$  方向上的变形分量。由于镜面重力和支撑力的相互作用, 镜体将产生泊松比效应, 进而产生镜面的应变分量  $\varepsilon_z$ :

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y)$$

其中:  $E$  是镜面材料的弹性模量,  $\nu$  是泊松比,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  分别是在  $X$  和  $Y$  方向上的应力, 图 2 所示为几种径向支撑方式<sup>[5]</sup>。

图 2(a) 水银带支撑

$$\sigma_y = -k_a(1 - \cos\theta)\sin\theta;$$

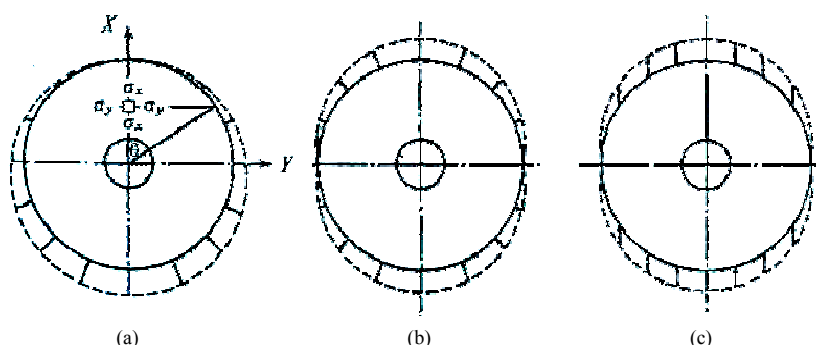


图 2 几种径向支撑方式

Fig.2 Several radial support forms

图 2(b) 余弦推力支撑

$$\sigma_y = k_b \cos\theta \sin\theta;$$

图 2(c) 竖直方向推拉支撑

$$\sigma_y = 0。$$

其中:  $\theta$  为极角,  $k_a$ 、 $k_b$  是正常数

## 2 主镜轴向支撑的分析及优化

轴向重力是主镜支撑系统设计必须考虑的主要负载, 因此需要很多等距分布在若干支撑环圆周上的支撑点, 最优化支撑系统的计算条件是在所有支撑点支撑相同比例反射镜重量。根据所要达到的面形精度, 对于口径为  $\phi 1230$  mm 的主镜轴向支撑初步决定在 2 个同心圆放置 18 个支撑点, 组成一个  $x$ 、 $z$  轴均对称的结构, 如图 3 所示。为便于进行有限元分析, 对模型进行了适当的简化, 对光学表面的曲面方程的部分曲面用圆弧进行了拟和, 确定的拟和圆半径为 3 658.5 mm。背部采用点支撑, 支撑点全约束。重力加速度为  $9.81 \text{ m/s}^2$ , 取主镜水平放置状态。

优化数学模型如下<sup>[6]</sup>:

$$\min f = f(a, b) \quad \begin{cases} a_{\min} \leq a \leq a_{\max} \\ b_{\min} \leq b \leq b_{\max} \\ \sigma_{\max} \leq [\sigma] \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $a, b$  为设计变量,  $\sigma_{\max}$  为最大应力,  $[\sigma]$  为镜体材料的安全应力。通过罚函数法将约束方程(1)转化为无约束方程:

$$F(x, p_k) = f + \gamma (\sum_{i=1}^n A(a_i) + \sum_{i=1}^n B(b_i) + \sum_{i=1}^n \sigma(\sigma_i)) \quad (2)$$

其中:  $\gamma$  为罚因子,  $\sum_{i=1}^n A(a_i)$ 、 $\sum_{i=1}^n B(b_i)$  和  $\sum_{i=1}^n \sigma(\sigma_i)$  为惩罚项, 通过序列无约束极小化法求方程(2)的最优解。对内外圈两个支撑半径同时作为设计变量, 利用了 ANSYS 进行优化分析, 可得出图(3)优化后  $a, b$  支撑圈为:  $a = 272.7 \text{ mm}$ ;  $b = 517 \text{ mm}$ 。如图 4 所示。

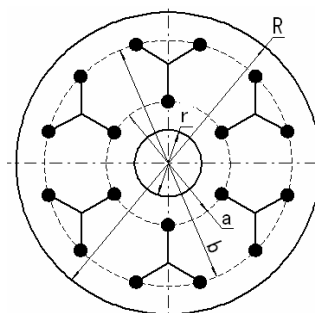
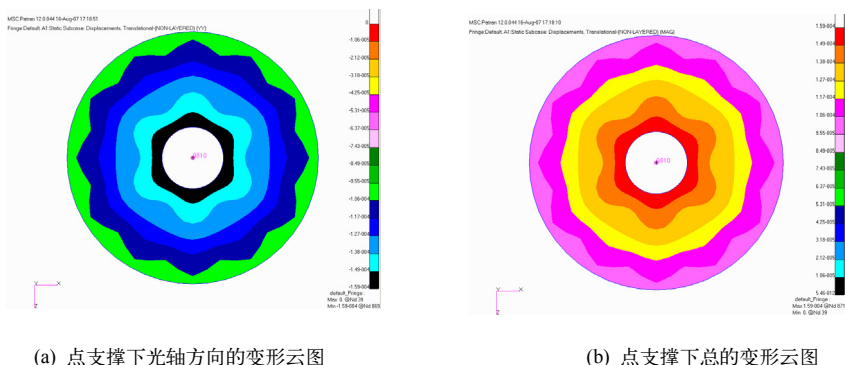


图 3 支撑点分布图

Fig.3 Support point array sketch



(a) 点支撑下光轴方向的变形云图

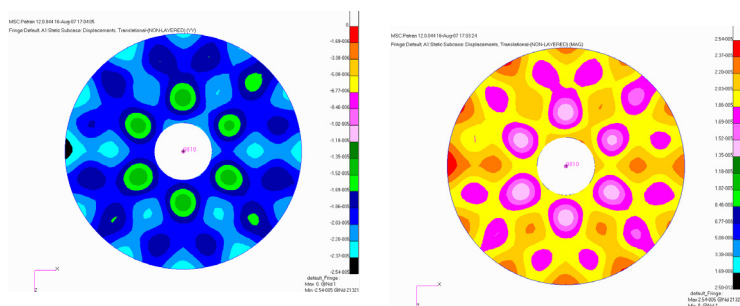
(b) 点支撑下总的变形云图

(a) Deformation nephogram at the point support along the optical axis (b) Total deformation nephogram at the point support

图 4 点支撑变形云图

Fig.4 Deformation nephogram at point support

主镜采用点支撑, 最大变形为  $169 \text{ nm}$ , 最小变形为  $11.3 \text{ nm}$ 。光学表面的  $PV = 15.67 \text{ nm}$ ,  $RMS = 3.94 \text{ nm}$ 。主镜采用支撑垫支撑, 让每个支撑垫的直径为  $80 \text{ mm}$ , 最大变形为  $25.4 \text{ nm}$ , 计算得到的面形值:  $PV = 8.91 \text{ nm}$ ,  $RMS = 1.79 \text{ nm}$ 。如图 5 所示。



(a) 支撑垫支撑下光轴方向的变形云图

(b) 支撑垫支撑下总的变形云图

(a) Deformation nephogram at support pad along the optical axis (b) Total deformation nephogram at support pad

图 5 支撑垫变形云图

Fig.5 Deformation nephogram at support pad

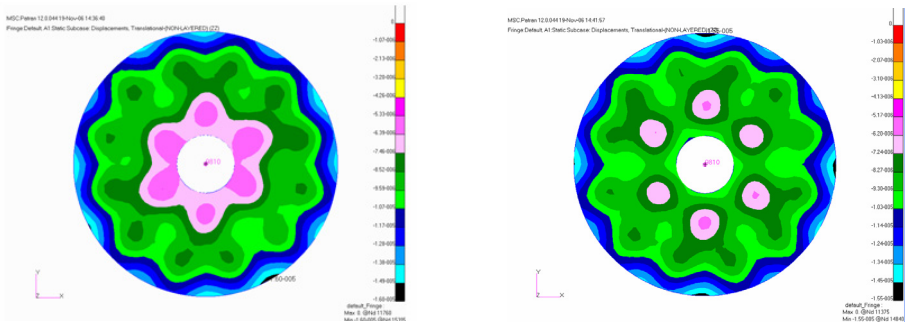
对不同口径的球面主镜采用十八点支撑形式, 利用有限元分析软件 ANSYS 建立主镜有限元模型, 模型采用 solid Tet10 单元<sup>[7]</sup>, 取镜面在水平状态下受重力作用为分析的工况条件, 优化分析结果见表 1。

在传统经验设计中, 对镜子按体积(面积)比例近似划分, 来模拟镜子质量的划分, 从而找出分块镜子的质心作为支撑点<sup>[8]</sup>, 利用该方法对表 1 中的  $R = 500 \text{ mm}$ , 中心厚为  $100 \text{ mm}$  的球面镜的支撑位置计算的结

果为： $a=219.08\text{ mm}$ ； $b=410.11\text{ mm}$ 。利用有限元软件 Patran 分析在重力作用下的变形，其中光轴方向位移变形云图如图 6 所示，利用面形处理程序计算面形精度为  $PV=2.860\ 117\times 10^{-5}\text{ mm}$ ， $RMS=4.994\ 898\times 10^{-6}\text{ mm}$ 。PV 和 RMS 均较表一中的优化结果要大，显然，优化结果具有更好的支撑性能。

表 1 十八点支撑  
Table 1 Eighteen points supporting

Primary mirror parameter					$a$	$b$	$(a-r)/(R-r)$	$(b-r)/(R-r)$	$PV(\times 10^{-5})$	$RMS(\times 10^{-6})$
$R=500$	Central thickness =100	Central hole $r=11$	Curvature =3 100	=	204.23	407.16	0.242	0.762	2.57	4.77
$R=500$	Central thickness =120	Central hole $r=11$	Curvature =3 100	=	210.98	408.62	0.249	0.763	2.36	4.68
$R=600$	Central thickness =120	Central hole $r=12$	Curvature =3 600	=	236.16	486.24	0.242	0.763	2.72	4.82
$R=600$	Central thickness =130	Central hole $r=13$	Curvature =3 600	=	244.81	489.13	0.244	0.764	2.52	4.73



(a) 优化设计变形云图  
(a) Optimization deformation nephogram  
(b) 经验设计变形云图  
(b) Traditional design deformation nephogram

图 6 变形云图对比

Fig.6 Deformation nephogram contrast

根据分析结果云图对比可知：以经验方法计算出的支撑位置，存在着局部变形大和应力集中现象。以优化方法计算出的支撑位置，轴向力稳定、均匀，镜面的变形趋势较好，镜面变形和镜面应力均小于传统经验设计方法，优化结果的镜面面形精度比传统方法的结果提高了 12%，这对光学系统成像质量的提高具有重要意义。

3 主镜侧支撑采用的方式

主镜侧向支撑方法常采用边缘支撑方式，用杠杆机构配重衡。侧支撑力的合力通过主镜重心，具有定位和非定位两种应用。常用支撑形式：推拉支撑、水银袋支撑、吊带支撑、v 形支撑及点支撑等。定心中轴承受很小或不承受载荷。

主镜侧支撑的几种方法如下：

- 1) 在镜坯中心处支撑；
- 2) 在主镜背后的三点支撑，支撑点构成的平面通过镜坯的重心。支撑点既是轴向支撑也是侧向支撑；
- 3) 在主镜中间孔内边缘支撑加上主镜外边缘上的支撑，各支撑点侧支撑力的合力通过主镜的重心；
- 4) 在主镜背面轴向多个支撑点处同时也有侧支撑。各侧支撑力的合力通过主镜重心；
- 5) 在主镜外边缘支撑，支撑合力通过主镜重心。

根据 Schwesinger 的研究比较以下几种外边缘侧支撑的方法<sup>[10]</sup>：

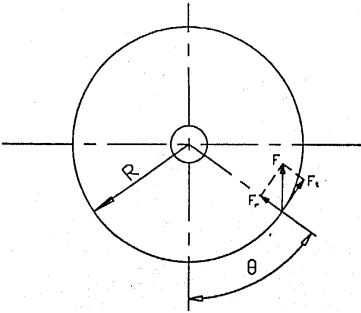


图 7 径向等间距支撑

Fig.7 Equal space support at radial direction

(a) 径向等间距侧支撑, 如图 7 所示。即每个点在外边缘上的分布是等角间距分布, 且每个支撑点的支撑力的方向(垂直向上)也相同。

$$F = \frac{\pi \gamma h R^2}{2\pi R} = \frac{1}{2} \gamma h R$$

$$F_r = -F \cos \theta = -\frac{1}{2} \gamma h R \cos \theta$$

$$F_t = F \sin \theta = \frac{1}{2} \gamma h R \sin \theta$$

(b) 侧向均匀承重支撑

这种支撑点是不等间距分布的, 但每个支撑点承受相同的重量, 如图 8 所示。

$$F = \gamma h R \cos^2 \theta$$

$$F_r = -F \cos \theta = -\frac{1}{4} \gamma h R (3 \cos \theta + \cos 3\theta)$$

$$F_t = F \sin \theta = \frac{1}{4} \gamma h R (\sin \theta + \sin 3\theta)$$

(c) 外边缘等角间距, 不同方向侧支撑力分布

采用这种方法的优点是主镜的变形为最小, 可以基本不用轴向的主动支撑改正侧支撑残留的主镜镜面变形。如图 9 所示。

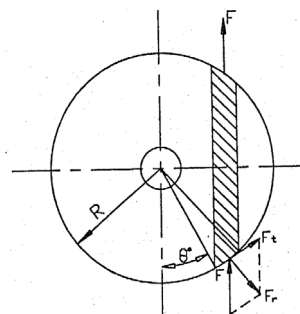


图 8 侧向均匀承重支撑

Fig.8 Equal bearing support at lateral direction

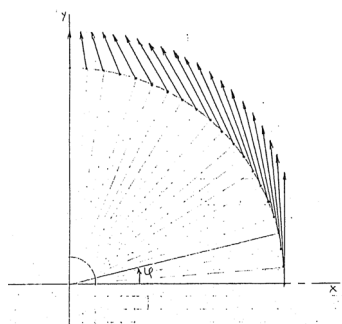


图 9 外边缘等角间距, 不同方向侧支撑力分布

Fig.9 Lateral support force distribution of the outer edge equal angle space at different direction

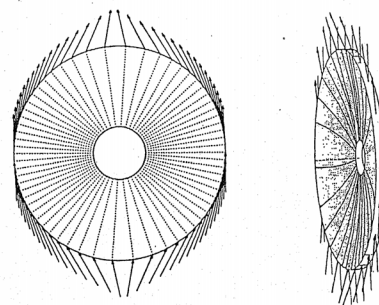


图 10 外边缘不等角间距, 不同方向侧支撑力分布

Fig.10 Lateral support force distribution of the outer edge vary angle space at different direction

(d) 外边缘不等角间距, 不同方向侧支撑力分布(见图 10)

在传统经验设计中, 主镜的侧支撑一般采用推拉支撑形式, 并且应满足:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0 \\ \sum M_x = 0, \sum M_y = 0, \sum M_z = 0 \end{cases}$$

根据主镜的口径、重量以及厚度, 主镜的侧支撑决定采用侧向均匀承重方式, 这种支撑结构可以通过杠杆重锤的机械形式实现。

## 4 主镜支撑原则

1) 主镜自由状态有 6 个自由度, 主镜支撑要在不过定位状态下完全约束这 6 个自由度;

2) 主镜在任何状态受力要平衡, 满足约束方程:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0 \\ \sum M_x = 0, \sum M_y = 0, \sum M_z = 0 \end{cases}$$

3) 主镜作为光学系统基础, 镜面面形精度要有效保证, 通过支撑恢复到或接近加工检测时的面形精度。

## 5 总 结

本文主要对主镜支撑位置进行优化设作用下的变形和应力分布, 可以较快的找到最佳支撑点的位置, 且优化结果的镜面面形精度比传统方法的精度高。同时还着重分析了主镜光轴指向和主镜面形精度的关系, 分析结果证明当望远镜指向地平时的面形变形小于指向天顶时的面形变形, 这说明侧支撑满足安全性和稳定性的前提下, 侧支撑对镜面变形精度的影响较小, 影响主镜面形精度的主要是轴向支撑, 所以设计重点应是轴向支撑系统。

### 参考文献:

- [1] 马品仲. 大型天文望远镜设计和研究 [J]. 应用光学, 1994, **15**(3): 6-11.  
MA Pin-zhong. Design and study on the large astronomical telescope [J]. **Applied Optics**, 1994, **15**(3): 6-11.
- [2] 程景全. 天文望远镜原理和设计 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.  
CHENG Jing-quan. **Astronomical telescope theory and design** [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003.
- [3] 杨延生, 吴清文, 张洪, 等. 大口径反射镜支撑结构分析 [J]. 光学 精密工程, 2001, **9**(增刊): 29-32.  
YANG Yan-sheng, WU Qing-wen, ZHANG Hong, *et al.* Analysis of flexible supporting structure for heavy-caliber mirrors[J]. **Optics and Precision Engineering**, 2001, **9**(Supp): 29-32.
- [4] 胡企千. 大型光学镜子的结构、支承及重力变形计算方法 [J]. 光学机械, 1983, **17**(6): 29-44.  
HU Qi-qian. The structure, support and gravity deformation calculating method of the large optical mirror[J]. **Optics Mechanism**, 1983, **17**(6): 29-44.
- [5] 王永, 蒋筱如. 1.2 米地平式望远镜主镜的支承装置 [J]. 云南天文台台刊, 1991(4): 35-39.  
WANG Yong, JIANG Xiao-ru. Mounting system of the primary mirror of the 1.2m Alt-Az telescope [J]. **Publications of Yunnan Observatory**, 1991(4): 35-39.
- [6] 李福, 阮萍, 赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究 [J]. 光子学报, 2005, **34**(2): 272-275.  
LI Fu, RUAN Ping, ZHAO Bao-chang. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load [J]. **Acta Photonica Sinica**, 2005, **34**(2): 272-275.
- [7] MYUNG K C, RONALD S, PRICE X, *et al.* Optimization of the ATST primary mirror support system [J]. **SPIE**, 2006, **6273**: 63731E.
- [8] LUC A. Optimized axial support topologies for thin telescope mirrors [J]. **Optical Engineering** (S0091-3286), 1995, **34**(2): 567-574.
- [9] MYUNG K C. Optimization strategy of axial and lateral supports for large primary mirrors [J]. **SPIE**, 1994, **2199**: 841-851.
- [10] 苏定强, 崔向群. 主动光学——新一代大望远镜的关键技术 [J]. 天文学进展, 1999, **17**(1): 2-14.  
SU Ding-qiang, CUI Xiang-qun. Active optics——key technology of the new generation telescope [J]. **Progress in Astronomy**, 1999, **17**(1): 2-14.