

## 国外大型地基望远镜主镜支撑综述

王富国, 吴小霞, 邵 亮, 李剑锋

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

**摘 要:**对于大型地基望远镜来说,主镜支撑是关键技术之一,主镜支撑效果直接影响望远镜的观测能力,文章详细介绍了目前国际上具有代表性的一些望远镜主镜的底支撑和侧支撑方法和结构等,总结了主镜支撑的几个原则,期望对我们从事大口径望远镜的研制提供一些借鉴意义。

**关键词:**大型望远镜;主镜;支撑

**中图分类号:**TH851 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.001

## Review of foreign ground-based telescope primary mirror support

WANG Fu-guo, WU Xiao-xia, SHAO Liang, Li Jian-feng

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

**Abstract:** The primary mirror support is a key technology for the large ground-based telescope. The primary mirror support directly affect telescope's direction accuracy and detection distance. This paper introduces some currently existing international representative telescopes' primary mirror axial support and lateral support structure. Key points and some principles for primary mirror support design are summarized. That would offer some references for our large telescope development.

**Key words:** large telescope; primary mirror; support

### 1 引 言

随着现代天文学和军事技术的不断发展,人们希望建造更大口径的望远镜。1960年苏联建成了当时世界上最大的6 m望远镜,这一望远镜的地平式装置使得新的更大的望远镜成为可能。1979年一台新型的多镜面望远镜(MMT)在美国建成。1988年美国在空间轨道上建成了一架2.4 m的哈勃空间望远镜,主镜背部有24个力驱动器(actuators)可以使主镜面形发生变化以改善其成像质量。1992年一台新型的拼接镜面的10 m凯克(Keck)望远镜建成,其主镜由36块尺寸为1.8 m的正六边形的子镜面组成,这台望远镜的建成是现代望远镜制造史上的又一个里程碑。1997年主镜直径为10 m的半固定式的拼接球面望远镜(HET)建成。1998年第二台凯克(Keck II)望远镜建成。1999年口径为8.2 m的日本昴星团(Subaru)望远镜和口径为

8 m的双子座(Gemini)北方望远镜建成。同时包括由四台口径为8 m的欧洲甚大望远镜(VLT)的单元也逐渐建成。双子座南方望远镜以及由两块8.4 m主镜组成的大型双筒望远镜(LBT)也已经建成。而由亚利桑那大学光学中心承担的由7块8.4 m子镜单元组成的口径达21 m的望远镜(GMT)也正在建造中。目前30 m口径的GSMT拼接镜面望远镜的方案正在计划之中,雄心勃勃的100 m口径的光学望远镜的方案正在形成<sup>[1]</sup>。

一个显著的事实是随着望远镜口径的增大,如何保证望远镜主镜的面形精度成为一个首要问题,对主镜的支撑提出了更高的要求,主镜的支撑系统包括两个组成部分,分别是承受主镜质量的轴向分

**作者简介:**王富国(1979-),男,博士,助理研究员,主要从事大口径望远镜主镜支撑设计与分析。E-mail:wfg109@163.com

**收稿日期:**2011-07-18;**修订日期:**2011-08-18

量和径向分量的轴向支撑和径向支撑,其中轴向支撑是镜面变形的主要原因,为了更好地保证主镜的面形,人们采用促动器实时地改善主镜面形,这就是主动光学技术,主动光学技术的出现和应用使望远镜的设计思想有了重大飞跃。本文主要阐述了国外部分具有代表性的大型望远镜的主镜支撑及其结构。

## 2 主镜支撑原则

在镜筒指向天顶位置时,底支撑承担了主镜的全部质量,对面型精度的保持起主要作用;在镜筒指向水平位置时,侧支撑承担了主镜的大部分或全部质量,对面型精度的保持起主要作用;在中间位置时,底支撑和侧支撑共同起作用。主镜加工状态通常都是平放,即底支撑承担全部质量的状态,但检测(4 m 以上通常立式检测)特别是在使用时,通常是光轴水平状态。所以,主镜支撑结构设计要兼顾这两种状态,通过 CAE 详细分析找出最佳的支撑方案<sup>[2]</sup>。

主镜支撑一般遵循一下四个原则<sup>[3]</sup>:

(a)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 6 个自由度;

(b)主镜在任何状态受力要平衡,满足力及力矩约束方程;

(c)主镜支撑的作用就是保持镜面面形精度并通过支撑恢复到或接近加工检测时的面形精度,支撑要体现自由应力条件,相当于漂浮在液体里;

(d)主镜支撑在使用状态、加工状态及检测状态下要尽可能保持一致。

## 3 底支撑

主镜的底支撑分为被动支撑和主动支撑,被动支撑主要包括两种支撑方法:镜体浮动支撑及无定向支撑。浮动支撑主要采用平衡配重杠杆系统、气动支撑系统及油压支撑系统。无定向支撑主要采用无定向三角板支撑系统(通常叫做 Whiffle tree 结构)。在现代大望远镜设计上,主镜底支撑主要采用 Whiffle tree 结构。

对于小于 300 mm 口径的主镜一般采用三点支撑就可以了,对于更大口径主镜简单的三点支撑是不能满足面型精度要求的。1970 年, Hall 给出了最少支撑点数的判定准则:

$$N = \left( \frac{1.5r^2}{t} \right) \left( \frac{\rho}{E\delta} \right)^{0.5}$$

其中,  $r$  为主镜半径;  $E$  为材料弹性模量;  $\delta$  为允许的面形精度;  $\rho$  为材料密度。

## 3.1 先进电光系统 AEOS(the advanced electro optical system)的底支撑

AEOS 望远镜安装在毛伊岛的空军基地,主要获取低轨卫星的高分辨率图像,是目前最新最大的卫星跟踪望远镜<sup>[4-5]</sup>。主镜直径 3.67 m, 径厚比 23:1, 系统总重 120 t。该望远镜同时采用了 941 个制动单元的自适应光学技术,以补偿因大气扰动引起的空间目标图像畸变。

AEOS 的主镜采用背部 84 点支撑,在 6 个同心圆放置了  $4 + 8 + 12 + 16 + 20 + 24 = 84$  个支撑点,组成一个  $x, y$  轴均对称的结构,图 1 为支撑点的分布图。支撑环分成两种类型,内环和外环比中间的承受较小的支撑力,这种布置能获得较好的支撑性能,并且制造也比较合理。控制系统指挥主镜上的 84 个力驱动器、主镜的 4 个自由度、次镜的 5 个自由度。84 个驱动器和次镜的 3 个平移自由度用来矫正系统的波前,液压系统通过增加或者减少流体控制主镜相对于镜子支撑结构的 4 个自由度,伺服系统通过安装在镜子上的位置传感器驱动主缸控制镜子的位置到  $1/4 \mu\text{m}$ , 镜子沿俯仰轴的位置和光轴的旋转是被动控制的。主动校正后的面形误差为 44 nm。

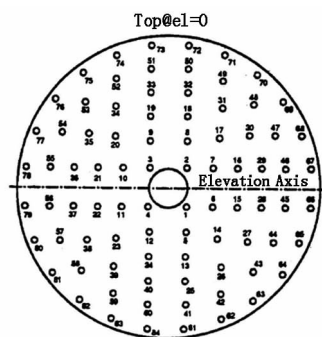


图1 AEOS 支撑点布局图

Fig. 1 AEOS support point plot

## 3.2 欧南台甚大望远镜 VLT(very large telescope)的底支撑

ESO VLT 是欧洲南方天文台研制的口径达到 8.2 m 的望远镜<sup>[6-8]</sup>,其主镜是一块薄弯月形镜,外直径为 8200 mm,内孔直径为 1000 mm,厚度为 75 mm,焦比为 1.8。主镜有独立的轴向和径向支撑结构。主镜的背面有 150 个轴向支撑,在主镜内外边缘有 64 个侧支撑点,VLT 主镜支撑结构是力驱动而不是位移驱动,在外边缘的轴向支撑系统和侧支撑系统的驱动器是严格区分的,比如,应用在背部的力在径向没有分力。经过促动器校正后的镜面面形 RMS 值达到 20 nm,主镜在轴向位移的精度由硬点

确定,在理想负载情况下,比如,外力或驱动的误差将会在光轴的两个垂直轴上产生力(偶),将由这些硬点传递。对于8 m 主镜这种应力是很大的,仅由三个硬点确定是不安全的。因此,被动系统应用液压系统,支撑点连成三组,每组点通过连通器相连。如图2所示,这种结构产生三个虚拟硬点,在每组中应力被均分。被动支撑应力随顶角余弦变化而变化。

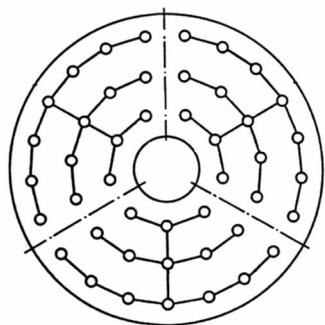


图2 被动支撑系统示意图

Fig.2 passive support system plot

主动力是独立于那些被动力的,主动系统是在第二级叠加在被动系统上的。可以通过数学证明,在被动系统中,值为零的主动力(偶)在正交于光轴的平面上的两个正交轴的分力为零。这点在校正主动力在振动情况下引起的弹性变形特别有用。

### 3.3 MMT(mutiple mirror telescope)望远镜的底支撑

MMT 主镜采用 f/1.25 硼硅酸盐蜂窝镜,主镜直径6.5 m,由 Steward Observatory Mirror Laboratory (SOML)制作<sup>[9-12]</sup>。

MMT 的支撑采用主动支撑技术,使用104个力促动器输出主动力,同时使用6个硬点固定主镜位置,MMT 的轴向支撑由力分散器(load spreader)、力促动器和静态支撑组成。借鉴 whiffle tree 结构,将一个主动力促动器连接在一种三角架结构上再连接在主镜镜面上,这样主动力被分为三分均匀支撑在主镜上,就可以使用数量较少的主动支撑力达到较好的效果,这种结构被称为“力分散器”。

MMT 使用的力分散器整体由钢制的框架和钢垫组成,钢垫和框架之间由具有挠性的杆链接。钢垫和主镜是通过一层2 mm 的硅橡胶粘结。框架下方有用于连接力促动器的接口。而在每个钢垫下方对应位置 MMT 设计了静态支撑,用来应对突发事件,例如当支撑失效时,静态支撑可以用来完成主动支撑的任务。

需要说明的是 MMT 中使用的 load spreader 也不都采用三脚架形式来分配主动力,除了三脚架结

构外还有两脚和单独的两种情况。之所以分不同种类是为了和镜子的结构形式相适应。所以出现不同形式的力分散器。MMT 中一共使用三脚架68个,两脚架24个,单点支撑12个,具体的结构如图3所示。

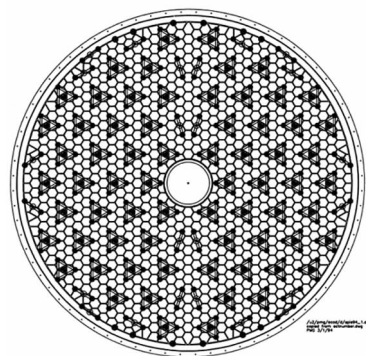


图3 MMT 中 load spreader 分布图

Fig.3 MMT load spreader plot

### 3.4 ATST 先进技术太阳望远镜的底支撑

先进技术太阳望远镜主镜是口径为4.24 m,镜厚为75 mm 的离轴抛物面实心弯月镜<sup>[13]</sup>,其材料康宁 ULE 玻璃作为主镜基线研究的材料为光学玻璃或玻璃陶瓷材料。其基线支撑系统由固定在主镜背部的120个轴向支撑点及固定在镜体边缘的24个侧向支撑点组成,具有主动光学能力。

轴向支撑系统的优化获得光学表面 RMS 值为22 nm(PV 值为109 nm)。优化后的轴向支撑系统结构位分布在五个同心的支撑圈上的120个轴向支撑点。优化后的轴向支撑力分为两组,靠中心支撑内圈上的支撑力为125 N,其他支撑圈上的支撑力为210 N。

## 4 侧支撑

主镜侧支撑基本原则是侧支撑力作用线要通过主镜重心,这样不会因侧支撑力对主镜产生额外的弯矩附加载荷,且侧支撑力在任何主镜倾角下都要能平衡主镜质量。侧支撑形式因主镜口径及应用形式的不同有很多种,一般采用以下几种形式:

在主镜中心支撑,适用于小口径主镜;

在主镜背后的三点支撑,支撑点构成的平面通过主镜重心,这样的支撑点既是底支撑又是侧支撑;

在主镜中心孔内边缘支撑+主镜外边缘支撑,各支撑点的合力通过主镜重心;

在主镜背面底支撑多个支撑点处同时有侧支撑,各侧支撑点的合力通过主镜重心;

仅在主镜外边缘支撑,支撑合力通过主镜重心,逐渐演化发展成主镜上下推拉侧支撑形式。

G. Schwesinger 对边缘侧支撑进行了深入的研究,包括径向等间距侧支撑;侧向均匀承重支撑;外边缘等角间距不同方向侧支撑力分布;外边缘不等角间距不同方向侧支撑力分布。

具体的侧支撑结构主要包括机械式侧支撑和液压或气压侧支撑形式等。

#### 4.1 先进电光系统 AEOS 的侧支撑

开始的时候侧支撑类似于 NTT, SOFIA, NOAO, 在这些设计中,侧支撑在镜面的背面承载,以补偿力矩驱动器在调整前镜面变形时带来的影响。但是最终决定采用 G. Schwesinger 为 ESO 的 VLT 提出来的边缘支撑系统。在这个设计中,侧支撑的向量在边缘的中心,用来消除背部支撑局部补偿的需要,在 AEOS 工作的时候,边缘的液压支撑力都是共面的<sup>[4-5]</sup>。

因为 AEOS 采用地平式结构,主镜有一个重力的对称轴,两个相切的臂顶端和底端提供被动约束。镜子的质量有 96 个液压支撑承载的,作用在镜子边缘的力的方向和大小由每一个地方的一对杠杆机构调整。

#### 4.2 VLT 甚大望远镜的侧支撑

VLT 侧支撑的原理与 NTT 中的侧支撑原理是相同的。这些侧支撑统一的分布在边缘的里侧和外侧,共 64 个侧支撑点,推力和拉力在垂直方向上相同,在顶角的正弦方向不同。因此,一半的质量由径向力来支撑,另一半由切向力来支撑,这样的支撑系统只有在对称旋转时产生异常。与 NTT 支撑的不同之处是在主镜重力的中心平面无法使用侧支撑。这些力由液压产生使得侧向支撑放在了主镜的中心孔处。所有的推力和拉力以及确定的装置由液压相关联,所以定义一个或多个虚的侧向定位点<sup>[6-8]</sup>。

这里有两种选择来预防主镜在侧向和径向的运动:

- 如果所有的支撑都与液压相关联,那么定义一个虚的侧向定位点,在主镜上部 and 下部应该放置一个点来完成弯曲成形。这可以预防主镜的旋转和在高度轴方向的运动。在高度轴垂直方向的定位由虚的侧向定位点来提供。

- 通过定义两个虚侧向定位点可以使左侧和右侧的径向支撑相关联。这能防止主镜的旋转。附加的点可以防止主镜在方位轴方向的运动。

如果只有轴向支撑来校正由侧支撑产生的误差,主动驱动器的许用力的范围要足够宽,减少外边缘弯曲度的比较好的方法是使用轴向力来加在由侧

支撑产生的侧向力上。这由侧向力在倾斜方向的力来完成。

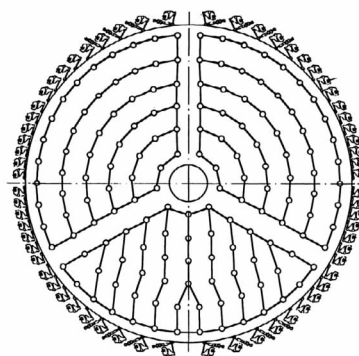


图4 VLT的支撑系统

Fig. 4 VLT support system

#### 4.3 MMT(multiple mirror telescope)望远镜的侧支撑

MMT 中侧支撑是和轴向支撑一体化考虑,即侧向支撑也安装在主镜底部,而并没有想传统的侧支撑一样安装在镜子侧面。这是因为蜂窝镜的筋一般不厚,如果侧支撑至于侧面有可能会造成筋的破坏,因此将侧支撑也至于刚度最大的镜子底部,采用与轴向支撑相同的主动动力促动器,只是力方向与主镜成  $45^\circ$ 。在实际使用中,当镜子转为水平方向时,不同方向的侧支撑施加推拉力来克服镜子重力,而此时的轴向促动力并不为零,因为 MMT 的侧向支撑不通过重心平面,因此侧支撑力会产生一个引起主镜反转的力矩,这个力矩需要轴向促动器产生拉力来克服。因此 MMT 的侧支撑是通过轴向和侧向力促动器协同合作完成<sup>[9-12]</sup>。

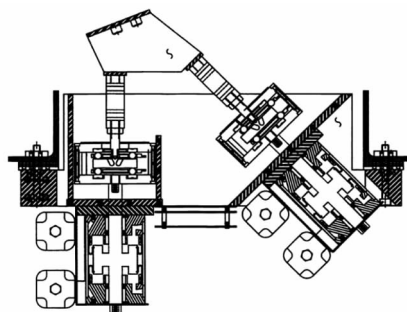


图5 MMT双轴促动器

Fig. 5 MMT double axial actuator

#### 4.4 SOFIA 望远镜的侧支撑

SOFIA 望远镜安装在波音 747SP 一个支撑板上,具有一个装有中心空气轴承的哑铃状的装备,光学镜筒一端装有直径为 2.7 m 的反射镜,另一端装有仪器组合作为配重<sup>[14-17]</sup>。

其侧向支撑是由分布在主镜外圆周上的并连接到望远镜结构上的三个固定装置所组成。这些柔性

的结构形状就像字母“A”,故被叫做为“A frame”。如图6中有限元分析模型所示,每个A frame 双脚架都是一根弯曲的不锈钢杆,为了能在4个位置提供万向接头弯曲,在每个双脚架中都设计有柔性装置。这些不锈钢的A frame 复杂结构末端通过螺钉连接到殷钢材料做成的衬垫上,而殷钢衬垫则是粘接在主镜外圆周的加强筋上的,这是为了方便镀膜以及其他重要的操作时的拆卸。每个A frame 结构的顶点则固定在由德国MAN公司制造的主镜室上,在与主镜侧面相切的方向上,每一根双脚架都是刚性的。

A frame 结构的几何形状使得主镜在这种侧支撑装置下允许沿光轴方向产生微小的位移,而并不会产生太多的附加边缘弯矩。这对于望远镜工作时结构硬件会出现的高温漂移具有很重要的意义。另外,主镜室上的三个侧支撑连接点通过这种A型结构转化为玻璃结构上的6个侧支撑点,这样大大减小了重力在主镜平面内的分量所引起的主镜光学表面整体变形和局部变形。同时,内部应力也会减小一半,这就相当于提高了主镜的强度。

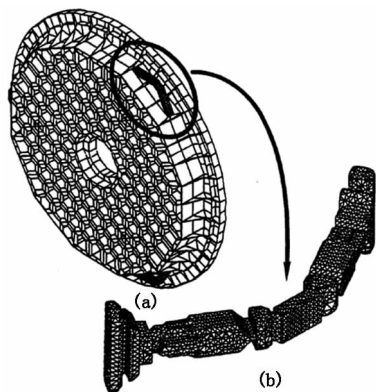


图6 SOFIA 支撑结构有限元模型

Fig.6 SOFIA support structure FEM

#### 4.5 VISTA(visible and infrared survey telescope)望远镜的侧支撑

VISTA 望远镜作为 VLT 望远镜可见和红外搜索望远镜,口径达到了4 m,但是其弯月薄镜的厚度仅为170 mm。侧向支撑系统包括了24个气压促动器和3个切向定位装置。其中24个促动器采用的是开环气压线性力促动器。设计中所使用的气缸是现成的产品,封闭在铝圆筒中,扮演着滚动体隔膜的角色。封闭活塞驱动由线性轴承支撑的输出轴。考虑到摩擦因素,在推拉支撑中都选用了单向气缸(通过气压只能拉伸)。双向作用气缸(可以在压力下收回)因为在输出轴和外壳之间有密封件,所以

其内在的摩擦力会大些。因为推拉支撑接受到的是相同的压力要求,因此这两种装置需要具有相同的压力作用面。为了在推拉支撑中都能采用相同的气缸,在推力作用装置中拉伸作用机构设置在主镜安装端和镜室安装端之间,而拉力作用机构中则设置在两个安装端之外<sup>[18]</sup>。

侧向的3个定位机构采用的是图7和图8所示的静态线性连杆装置,该装置可以调整主镜在 $x-y$ 平面内的位置。每个连杆定位装置的两端都是双面弹性环节,一端与主镜垫相连接,另一端与主镜室相连接。由图中可见,该侧向定位机构是一个串联装置,主要部件有作用力限制器,力传感器,长度调节器以及两个弹性元件。



图7 VISTA 侧向支撑中推力作用机构

Fig.7 VISTA lateral support push mechanism

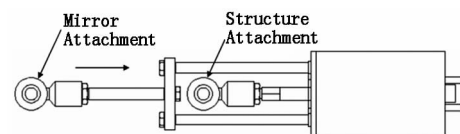


图8 VISTA 侧向支撑中拉力作用机构

Fig.8 VISTA lateral support pull mechanism

#### 4.6 SOAR 望远镜的侧支撑

SOAR 是一台4 m级的红外光学望远镜,侧支撑形式如下的形式:被动六杆机构通过无应力钢连接到主镜室上,另一端通过钢垫连接到主镜上,切向杆的长度是通过套筒螺母调节的,每个杆的末端都有双轴柔性环节以减小弯矩和力传递到杆的轴向上,每个杆的末端都夹紧在圆柱形基座上以减小在杆的安装中的锁紧力和弯矩<sup>[19-20]</sup>。



图9 SOAR 的侧支撑结构图

Fig.9 SOAR lateral support plot

六个被动切向连接杆成 $60^\circ$ 均布在主镜外边缘上,并成逆时针方向排布,这样可以减少主镜室与主镜之间热膨胀不同带来的影响。将这六个杆的作用力标识为 $F1 \sim F6$ ,如图10所示。当主镜指向天顶

时,这些杆均不承担镜重。当主镜指向水平时, $F1$ 在最上面,重力加速度为 $-Y$ 方向, $F2, F3, F5$ 和 $F6$ 均承担一定的重力载荷。连接杆 $F1$ 和 $F4$ 则要求具有稳定性,并抵消地震载荷。

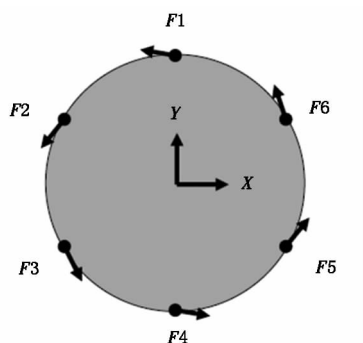


图 10 SOAR 侧支撑受力示意图

Fig. 10 SOAR lateral support force diagram

这种支撑系统就像两组相反的动力学支撑共同作用。每组由三个等间距分布的切向杆组成。第一组包含 $F1, F3$ 和 $F5$ 三个连接杆,第二组则是由 $F2, F4$ 和 $F6$ 组成。两组独立作用,这就会带来具有可重复性的,但是却是不可改正的、比较大的波前像散误差。然而,两组支撑相反,这就使得波前像散误差项的符号相反,相互抵消。这里的相互抵消是建立在假设两组支撑所产生的横向载荷始终维持相等的前提下的。因为该横向支撑系统是被动的,两组像散的平衡并不是强迫的,而是通过合适的开环波前误差就可以建立的。

#### 4.7 ATST 望远镜的侧支撑

ATST 主镜侧向支撑的设计概念与 Gemini 8 m 望远镜主镜的侧向支撑方案相似。ATST 对侧支撑进行了优化设计<sup>[21]</sup>,基于下面的设计约束对侧向支撑进行了优化:

- (1) 无侧向力组状态;
- (2) 重力侧向自平衡状态;
- (3) 主动力最小应用状态。

该项研究中,在镜面光学变形计算时,不考虑由支撑脚和连接部件额外增加的质量。在光轴水平位,重力引起的面形误差已经优化到最小的面形精度。优化后的侧向支撑方法可使镜面 RMS 值为 15 nm,  $P-V$  值为 164 nm,基于侧向 24 点的最大轴向力为 2.8 N。这 24 个侧向支撑点等间隔分布在镜体外缘,固定于主镜的中面位置上。

#### 5 总结

主镜作为大型望远镜的核心部件,其支撑效果所达到的面型精度一直是科学家研究的热点,文章详细总结了目前国际上具有代表性的几个望远镜主

镜支撑的设计方法、设计理念以及结构方面所体现的设计思想。由于主镜的造价昂贵,要求对主镜的支撑一次达到设计效果,除了在前期进行充分的分析模拟之外,需要对国际上先进望远镜的主镜支撑进行分析、理解、消化和吸收,希望这篇文章能为大型望远镜的研制提供一点帮助。

#### 参考文献:

- [1] Wang Fu Guo. Research on the key technology of the thin mirror active optics [D]. Chang Chun: Chun Chun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)  
王富国. 薄镜面主动光学关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2009.
- [2] Cui Yong Peng, He Xin, Zhang Kai. Characteristic analysis of reflector's material used by space camera [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(4): 418 - 421. (in Chinese)  
崔永鹏, 何欣, 张凯. 某空间用主反射镜的设计 [J]. 激光与红外, 2010, 40(4): 418 - 421.
- [3] Cheng Jing Quan. Astronomical telescope principle and design [M]. Beijing: China Sciences and Technology Publishing, 2003. (in Chinese)  
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.
- [4] Don H Kill Patrick, James W Mayo. Comparison of shipping, handling and shock instrumentation results for two 3.5 m class primary mirrors [J]. SPIE, 1998, 3352: 158 - 171.
- [5] James E Kimbrell, David Greenwald. AEOS 3.67 m telescope primary mirror active control system [J]. SPIE, 1998, 3352: 400 - 411.
- [6] Ernst Dieter Knohl. VLT primary support system [J]. SPIE, 1994, 2199: 271 - 283.
- [7] P Dierickx, D Enard, F Merkle, et al. The 8.2 meter primary mirror of the VLT [J]. SPIE, 1990, 1271: 266 - 274.
- [8] Thierry Hovsepian, Jeanmarc Michelin, Stephano Stanghellini. Design and tests of the VLT M1 mirror passive and active supporting system [J]. SPIE, 1998, 3352: 424 - 435.
- [9] H M Martin, et al. Active supports and force optimization for the MMT primary mirror [J]. SPIE, 1998, 3352: 412 - 423.
- [10] S C West, et al. Toward first light for the 6.5 m MMT telescope [J]. SPIE, 1996, 2871: 38 - 48.
- [11] P M Gray, J M Hill & W B Davison. Support of large bo-

- rosilicate honeycomb mirror [J]. SPIE, 1994, 2199: 691 – 702.
- [12] Joseph Antebi, Donald O. Dusenberry, Atis A Liepins. Conversion of the MMT to a 6.5 m telescope the optics support structure [J]. SPIE, 1990, 1303: 148 – 161.
- [13] Myung K Cho, Ronald S Price, Il K Moon. Optimization of the ATST primary mirror support system [J]. SPIE, 2006, 6273: 62731E – 1 – 62731E – 12.
- [14] Herman Bittner, et al. SOFIA primary mirror assembly: structural properties and optical performance [J]. SPIE, 2003, 4857: 266 – 273.
- [15] Hans-J Meier. Support of thin meniscus primary for SOFIA [J]. SPIE, 1990, 1340: 153 – 164.
- [16] Roland GEYL, et al. Progress on SOFIA primary mirror [J]. SPIE, 2000, 4014: 320 – 325.
- [17] Peter A Jones, David F House, Victor L Genberg. A passive mirror concept for SOFIA [J]. SPIE, 1995, 2478: 188 – 194.
- [18] J P Emerson. VISTA-Project status of the visible and infrared survey telescope for astronomy [J]. SPIE, 2001, 232: 339 – 342.
- [19] Douglas R Neill, Victor Krabbendam, John Andrew. Active tangent link system for transverse support of large thin meniscus mirrors [J]. SPIE, 2007, 6665: 66650F – 1 – 66650F – 12.
- [20] Robert Q Fugate. The starfire optical range 3.5 m adaptive optical telescope [J]. SPIE, 2003, 4837: 934 – 943.
- [21] J Oschmann, N Dalrymple, M Warner, et al. Advanced technology solar telescope: A progress report [J]. SPIE, 2004, 5171: 160 – 170.