文章编号:1001-5078(2017)01-0005-08

·综述与评论·

地基大口径望远镜主镜主动支撑系统综述

胡佳宁^{1,2},董吉洪¹,周平伟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. 中国科学院大学,北京100049)

摘 要:主动支撑技术作为地基大口径望远镜建造的核心技术,直接影响望远镜的观测能力, 一直以来备受关注。文章系统性地总结了地基大口径望远镜主镜的定位系统和支撑系统。定 位系统包括三点硬点定位、六杆硬点定位;支撑系统包括采用不同促动器结构的轴向支撑系统 及采用"竖直推-拉"、"斜向推-拉"和"推-拉-剪"形式的径向支撑系统。文章还结合了 国外采用主动支撑结构的大口径望远镜,对其主动支撑技术进行了详细介绍和总结分析,希望 为大口径望远镜主镜主动支撑设计提供一定的经验参考。

关键词:大口径望远镜;主镜;主动光学;主动支撑

中图分类号:TH743 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.01.001

Review on active support system of large ground-based telescope primary mirror

HU Jia-ning^{1,2}, DONG Ji-hong¹, ZHOU Ping-wei¹

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Active support is a core technology of large ground-based telescope, which directly affect its observation capability, so it has attracted much attention all the time. The positioning system and support system of large groundbased telescope were summarized systematically. The positioning system contains three hard points and six hard points; The support system includes axial support with different types of actuators and radial support with different forms which contains "vertical push-pull support", "slant push-pull" and "push-pull-shear". The active support technologies of some foreign typical large telescopes are introduced and analyzed, which may provide a certain reference for active support design.

Key words: large telescope; primary mirror; active optics; active support

1 引 言

随着人类对宇宙的不断探索,对望远镜的成像质量和分辨率要求越来越高,望远镜的口径也随之增大,传统支撑方式造价高,结构复杂,已难以满足要求。并且有研究表明当主镜径厚比超过6~10的范围时,望远镜重量和造价将随着口径呈三次方增长^[1]。

20世纪70年代,一种实时检测并校正像差的 主动光学技术被提出。主动光学技术的出现使得大 口径望远镜的建造成为可能。主动支撑技术作为主 动光学的关键技术,已成为天文强国必须掌握的关 键技术之一。自1989年第一台采用主动支撑技术 的大口径望远镜 NTT(New Technology Telescope)由 欧洲南方天文台(ESO)研制并投入使用后,各国纷

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60507003)资助。

作者简介:胡佳宁(1991 -),女,硕士研究生,主要从事主动光学面形调整等方面的研究。E-mail:tranquilityhjn@163.com **通讯作者:**董吉洪(1972 -),男,学士,研究员,硕士生导师,主要从事机电一体化设计,空间光学遥感器光机总体设计方 面的研究。E-mail:dongjihong2002@ sohu.com

纷投入对主动支撑技术的研究和大口径望远镜的研制。ESO的8m甚大望远镜VLT(Very Large Telescope),美国的8m双子望远镜Gemini、8.4m大双筒望远镜LBT(The Advanced Electro Optical System),日本的8.2m昴星团望远镜SUBARU等均配置了主动支撑系统。

主动支撑是相对于被动支撑而言,主动支撑除 了具有被动支撑的支撑能力外,其最大的特点是能 够进行面形校正。大口径望远镜的主动支撑系统包 括主镜定位系统和支撑系统,支撑系统又包括轴向 支撑系统和径向支撑系统。主镜定位系统根据实现 方式的不同可以分为三点定位和六杆硬点定位,三 点定位又可以根据硬点的虚实分为虚拟硬点和固定 硬点;轴向支撑系统根据促动器的类型可以分为机 电式、杠杆式、气压式以及液压并联机电式支撑系 统;对于大口径望远镜主镜径向支撑一般采用"竖 直推 – 拉"、"斜向推 – 拉"和"推 – 拉 – 剪"的支撑 形式。

本文系统总结了地基大口径望远镜主镜定位和 支撑系统的结构与实现形式,并结合典型大口径望 远镜采用的主动支撑技术进行了详细介绍和总结分 析,希望能够为大口径望远镜主镜主动支撑的设计 提供参考。

2 定位系统

天文望远镜对像质的要求很高,需要一套合理的 定位系统来约束主镜 6 个自由度并保持主镜面形。 主镜在镜室中的定位需满足运动学原理,对于大口径 望远镜一般采用轴向三点+径向支撑定位和六杆定 位。由于这些定位点的刚度相对于支撑要大,一般把 这些定位点称为"硬点"^[2]。硬点的刚度较大,且与 主镜室之间刚性连接,所以主镜的谐振频率很大程度 上决定于硬点的刚度。在主动光学系统中,硬点不仅 用于主镜定位,还可以将主镜力和力矩的反馈给控制 系统,从而对主镜的面形调整起指导作用^[3]。

2.1 轴向三点+径向支撑定位

轴向3个硬点可以约束轴向RX,RY和TZ 三个 自由度,3个硬点一般呈120°对称分布,另外的三个 自由度由径向的硬点进行约束。对于不同的支撑系 统硬点的实现方式也有所不同,硬点的实现方式一 般有两种,一种是选取三个固定点作为硬点,这种实 现方式的硬点是真实存在的;一种是采用虚拟硬点 的方式,这种定位方式多见于液压 whiffle-tree 的轴 向支撑结构中,其将主镜沿圆周等分为顶角为120° 的扇形区域,每个区域内的液压支撑相互连接,这种 支撑方式,虽然没有固定的支撑点,但是每个区域内 的支撑力处于平衡状态,相当于三个虚拟硬点。选 取固定点作为硬点的支撑方式主要为机械式 whiffle-tree、杠杆平衡重支撑方式和机电式力促动器支 撑方式^[4],常见支撑形式的硬点分布如图 1 所示。 径向支撑的定位形式,除了采用径向三个硬点的方 式,还可采用具有柔性的切向拉杆、A-Frame 等形式 约束自由度。由于径向支撑定位对于轴向定位只起 辅助作用,本小节将重点论述轴向定位,对于径向定 位请参考其他文献。



Fig. 1 Types of axial hard points for normal support system 2.1.1 虚拟硬点

采用液压 whiffle-tree 形式时,这种支撑方式结构简单,可调节性高,但是对于密封性的要求较高。 经典的大口径主动光学望远镜 VLT,GEMINI 等都 采用液压 whiffle-tree 的支撑方式^[5-6]。

甚大望远镜 VLT 是 ESO 建造于智利大型光学 望远镜,由四台有效口径 8 m 的望远镜组成,四台望 远镜可以单独工作,也可以组合使用。VLT 主镜由 微晶玻璃制成,内孔直径 1000 mm,厚度 175 mm,焦 比 1.8,重 23 t。VLT 轴向支撑系统采用液压 wiffletree 结构,将背部 150 个轴向支撑分成三组,每组促 动器互相连接,形成三个虚拟硬点,VLT 支撑分布如 图 2 所示。



Fig. 2 Support system of VLT

2.1.2 固定点硬点

固定硬点定位简单,已建成的 NTT, VLT 的巡天 望远镜 VST 等均采用固定硬点的定位方式^[7-8]。

VST 主镜采用超低膨胀玻璃制成,呈弯月形,口径 2.6 m,厚 140 mm,中心孔口径 60 cm。VST 主镜轴向采用 81 个机电式力促动器支撑,3 个呈 120°对称的硬点定位,径向采用 3 个切向拉杆约束 RZ、TX和 TY 三个自由度,背部支撑分布如图 3 所示。轴向的 3 个硬点均配置有微控制器和力传感器,以检测硬点受力指导控制系统进行面形调整。硬点没有力控制能力,但是可以进行主镜位置控制,硬点高度可以根据主镜位置进行调节,并作为反馈信息反馈给控制系统。

2.2 六杆硬点定位

六杆硬点定位由六杆平台发展而来,通过六个 硬点限制主镜的六个自由度。六杆硬点主要有两个 作用,一是用于定位:由于主镜需要对被观测物进行 瞄准或者调整主镜指向以满足光学系统需求,所以 需要硬点通过调节自身长度以满足主镜不同的位置 需求;二是用于检测风载以及其他附加载荷,反馈主 镜受力:理论上,硬点只用于定位,不承受力和力矩, 主镜支撑力等于主镜重力,但是实际运行过程中,由 于风载或者其他附加载荷的干扰,硬点所受合力、合 力矩并不为零。这就要求硬点有足够的刚度承受干 扰载荷,在硬点的设计时也需要在硬点处配置力传 感器检测硬点受力反馈给控制系统指导促动器进行 面形调整。六杆硬点定位原理较三点定位简单,已 建成的大口径望远镜有许多应用这种方式进行定 位,如LSST、LBT等。



图 3 VST 支撑及硬点分布

Fig. 3 Support system and hard points of VLT 大型综合巡天望远镜 LSST(The Large Synoptic Survey Telescope)由三个镜片组成,主镜口径8.4 m。 主镜由硼硅玻璃制成,厚度44 mm。LSST 通过背部 6 个硬点进行定位,约束镜体的6 个自由度^[9]。同 时通过背部的156 个气压式力促动器进行承重和面 形校正,其中52 个为单轴促动器,104 个为双轴促 动器,硬点分布如图4 所示。



图4 LSST 硬点分布 Fig. 4 Support system and hard points of LSST LSST 六个硬点像一个巨大的六足机构控制着 主镜相对于镜室的位置,因此硬点定位机构必须有

足够的行程和分辨率以确定主镜位置。同时六杆硬 点机构需要限制主镜六个自由度方向上的动态载 荷,其轴向刚度在120 N/μm以上^[10]。图5为LSST 硬点机构的结构组成图,其中基座用于连接主镜室; 位移促动器用于输出直线位移,控制硬点的长度;加 长臂用于连接促动器与分离装置;平衡重用以平衡 质量以免产生极大的局部应力;分离装置用于限制 轴向载荷,进行过载保护;柔性结构用于释放非轴向 载荷;力传感器用于反馈硬点支撑力。LSST 主镜的 6个硬点只起定位作用,不承受重力,力传感器读取 硬点的受力作为上一级控制环的反馈输入,以调节 所有力促动器的输出力使硬点受力最小。



图 5 LSST 硬点机构

Fig. 5 Structure of hard points of VLT

除LSST外,多镜面望远镜 MMT、大双筒望远镜 LBT 也采用了六杆硬点定位方式^[11-12],同时,这三 种望远镜的径向支撑也都采用"斜向推 - 拉"的方 式,即径向支撑分布于主镜背部,使用双轴促动器实 现径向支撑。与三点定位不同,轴向的六杆硬点已 经对主镜的六个自由度进行了合理的约束,采用其 他径向支撑方式,若自由度不能完全释放,易产生过 约束,因此只需要双轴促动器产生径向支撑力。另 外,上述三个望远镜主镜均采用六边形轻量化格,刚 度较小,侧支撑分布在边缘易对筋造成破坏。

相比于三点定位,一方面六杆硬点定位在定位 精度、刚度、抗干扰能力方面都有较明显优势,另一 方面,随着望远镜口径的增大,蜂窝镜的优势也越来 越明显,六杆硬点分布于主镜背部,不易对筋造成破 坏,因此更为适用。

3 支撑系统

主动光学支撑系统主要包括轴向支撑系统和径 向支撑系统。轴向支撑系统主要用于承担主镜重力 和进行主镜面形校正,是主动支撑系统重要组成部 分。主镜的径向支撑即径向支撑的主要作用是限制 主镜的径向位移,并在主镜处于不同的俯仰位置时 分担主镜重力。

3.1 轴向支撑

采用主动光学的大口径望远镜的轴向支撑系统 结构各异,根据采用的促动器类型大致可以 分为^[13]:

(1)采用机电式力促动器主动支撑系统,主要采用电机+丝杠结构;

(2)采用气压式促动器支撑系统;

(3)采用杠杆式促动器支撑系统;

(4)液压并联机电式力促动气支撑系统另有一种促动器采用压电陶瓷材料,虽然刚度大,精度高,但是由于其行程一般较小并不适用于大口径望远镜。3.1.1 机电式力促动器

机电式力促动器多为步进电机 +滚珠丝杠的结构,这种支撑系统结构简单,精度高,影响刚度的主要原因为丝杠螺母刚度和电机连接机构的刚度。但是受机械惯性和驱动电机的影响,工作频率一般不高。南方天体物理研究望远镜 SOAR 主镜口径4.2 m,厚100 mm,重3200 kg^[14]。主镜背部支撑采用120 个机电式力促动器,由步进电机、滚珠丝杠组成,与精确的力传感器和控制器形成闭环控制,控制频率在10 Hz 以上,主镜校正之后的面形误差 RMS在32 nm 内。

3.1.2 气体力促动器

力促动器具有结构简单、经济以及精度高频率 高并且力传递效率高,且动力源为单一气泵,可独立 放置于镜室之外,但是难以克服高发热和低行程的 缺点^[15]。多镜面望远镜 MMT 主镜直径 6.5 m,采 用硼硅玻璃制成,背部采用蜂窝结构。MMT 主动支 撑系统由 104 个气压式力促动器组成,其中 58 个为 双轴促动器^[16]。力促动器的装配仿照 whiffle-tree 结构,大部分通过两脚或三脚的力分散器将主动力 传递到镜体,促动器分布方式如图 6 所示。促动器 由压力调节器、双向气缸、力解耦结构和力传感器等 组成,每个促动器最大可以提供±3200 N 的支撑 力,但为了防止主镜承受过高的压力,限制促动器力 输出范围为±2700 N。MMT 校正之后的面形误差 为26 nm。

3.1.3 杠杆式力促动器

杠杆式力促动器配重块产生的浮力与镜面高 度角成正弦关系,所以这种促动器一般不需要附 加的调节机构。但是需要考虑配重块对主镜系统 的影响,杠杆式促动器的误差主要来源于摩擦 力^[17]。昴星团望远镜 SUBARU 主镜口径 8.2m, 径厚比 41:1^[18]。SUBARU 背部采用 264 个主动 支撑机构,其中 3 个为硬点用于控制刚体位移, 261 个用于主动面形校正,SUBARU 促动器采用杠 杆式结构,动力来源为伺服直流电机,其结构如图 7 所示。SUBARU 主镜经校正之后的镜面 RMS 可 以达到 65 nm。



图 6 MMT 支撑分布 Fig. 6 Supports system of MMT





3.1.4 液压并联机电式力促动器

VLT 背部采用液压并联机电式力促动器,采用 150 个支撑系统,每个轴向支撑由一个液压支撑和 一个机电式促动器并联而成。液压支撑用于承担主 镜重力,促动器用于主镜面形调整。主被动支撑叠 以9+15+21+27+36+42^[19]的方式分布在6个同 心圆环上,如图2所示。VLT 主镜经校正之后的面 形达到20 nm。

3.2 径向支撑

3.2.1 "竖直推-拉"的支撑方式

程景全在《天文望远镜原理和设计》一书中总 结了三种典型的边缘径向支撑的结构形式:余弦推 拉、水银带支撑、竖直推拉支撑,三种支撑受力如图 8 所示^[20]。G. Schwesinger 将大尺寸、圆形、光轴水 平放置的反射镜"理想"安装定义为反射镜四周受 到的径向力使反射镜处于平衡状态。采用这种安装 方式径向力是极角 θ 余弦的函数,随着极角 θ 的大 小而变化,这种支撑方式被称之为径向余弦推拉支 撑。当主镜采用这种安装形式时,支撑引起X方向 的应力为: $\sigma_x = k_b \cos\theta \sin\theta$

一种近似于"理想"安装的方法是将反射镜浮 动在一个环形的、充满水银的管子内,并且水银管放 置在反射镜侧面和刚性的圆柱筒壁之间,这种支撑 方式成为径向水银带支撑。采用水银带支撑方式 时,主镜边缘的支撑力与 (1 + $\cos\theta$) 成比例,因此 引起 X 方向的应力为: $\sigma_x = k_a(1 + \cos\theta)\sin\theta$

另一种更为理想的安装方式"竖直推 - 拉" 这种支撑方式只在 y 方向存在力,因此在 x 方向 上的合力为 0。这三种支撑在 y 方向上的合力均 为主镜重力,且支撑力一般通过镜体质心面,对 于大口径望远镜主镜来说,"竖直推 - 拉"的支撑 方式应用的较为广泛。由 ESO 研制的新技术望 远镜 NTT 采用的径向支撑方式即为竖直推拉方 式。NTT 的径向支撑分布在重心平面,支撑力沿 主镜边缘等间隔分布,50% 的重力由径向力承 担,另外 50% 由切向力承担,以此有效地获得最 小的波前相差^[7]。



3.2.2 "斜向推-拉"的支撑方式

"斜向推-拉"的支撑方式一般应用于大口径 蜂窝镜,这是因为蜂窝镜的筋一般较薄,将径向支 撑分布于主镜边缘可能会引起筋的破坏,因此将 其分布于主镜背部。这种支撑方式将径向支撑分 布于主镜背部,往往采用双轴促动器,图9为MMT 所采用的双轴促动器结构图。这种促动器一轴沿 光轴方向,一轴与其呈45°。当光轴水平时,不同 方向的促动器施加推拉力用于承担主镜重力,但 是由于径向支撑没有分布于重心平面因此会在轴 向产生附加力矩,此时可以通过轴向促动器输出 力进行平衡,因此这种径向支撑方式是通过双向 促动器共同完成。



图 9 MMT 双轴促动器 Fig. 9 Dual actuator of MMT

MMT采用"斜向推-拉"的径向支撑方式。为 了减少印透效应,MMT 促动器均通过力扩散器与主 镜连接。MMT 径向支撑采用分布在底部的 58 个双 轴促动器,其结构均为一轴与光轴平行,一轴与光轴 成 45°,这样设计能保证促动器的输出合力可以沿 任意方向。当镜子处于水平状态时,径向支撑通过 推拉力克服镜子重力,虽然此时径向支撑产生的合 力矩将使主镜发生反转和变形,但是轴向促动器可 以输出主动力对其进行平衡。

3.2.3 "推-拉-剪"的支撑方式

竖直推拉的方式虽然在 *X* 方向上的受力为零, 但对于弯月形镜面来说,由于径向支撑力很难通过 镜子质心,若其与质心之间的距离为 *z*,则采用"竖 直推 - 拉"方式带来的附加弯矩大小即为 *G_z*,从而 使主镜产生较大的倾斜变形,并且随着俯仰角的增 大,这种弯矩对主镜面形的影响也会随之增大^[20]。 为了解决这一问题,在 VLT 的径向支撑形式上 G. Schwesinger 又提出了一种"推 - 拉 - 剪"的支撑 方式,其受力方式如图 10 所示。



Fig. 10 Push-pull-shear support

这种支撑方式在主镜内外边缘分别施加轴向 力以抵消附加弯矩,使径向支撑力通过主镜质心, 这样便可以阻止主镜的倾斜。光轴水平时,外边 缘顶点的径向支撑力可以分解为沿径向的 F_r 、沿 切向 F_i 和沿轴向 F_a ,则边缘任意一点i的径向支 撑力可以分解为径向 $F_{ir} = F_r \sin \theta_i$ 、切向 $F_{ia} =$ $F_i \sin \theta_i$ 和轴向 $F_{ia} = F_a \sin \theta_i$,其中 θ_i 为支撑点i与 圆心连线和主镜 X 轴之间的夹角,如图 11 所示。 研究表明, F_r 和 F_i 之间存在一个最佳比例以使主 镜面形达到最优。



图 11 推 - 拉 - 剪支撑力示意图 Fig. 11 Forces of push-pull-shear support

引入参数β,使:

$$\beta = \frac{F_i}{F_i + F_r}$$

设支撑点 *i* 处的轴向支撑力为 *F_{ia}*,由主镜力平 衡和力矩平衡:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N} (F_i \sin^2 \theta_i + F_r \sin \theta_i \cos \theta_i) = G \\ \sum_{i=1}^{N} (F_a R \sin^2 \theta_i) = Gz \end{cases}$$

其中,N为径向支撑点的个数,由上述三个方程,可在支撑优化时,将优化变量由以往的 F_r 、 F_t 和 F_a 转化为 β ,因此,"推 – 拉 – 剪"的支撑方式简化了对径向支撑的设计过程^[21]。

自这种径向支撑方式问世以来,许多大口径望远镜均采用这种方法。VLT采用 64 个径向支撑点分布在主镜边缘的内外两侧,主镜 75% 的重力由切向力承担,25% 的由径向力承担。径向支撑还产生与方位角余弦呈函数关系的轴向力,以平衡由于径向支撑不通过重心平面而产生的力矩。VLT 的径向支撑采用支撑力相同间隔不同的布置方式,这是因为若采用等间隔分布高度轴附近的支撑力将是水平轴的 3 倍,支撑力的分布及其不均匀。其径向支撑分布如图 2 所示。

对于大口径主镜来说,大都采用"斜向推-拉" 和"推-拉-剪"的支撑形式。"斜向推-拉"适用 于边缘轻量化筋较薄的主镜,常与六杆硬点配合使 用避免主镜的过定位;"推-拉-剪"更适用于弯月 形主镜,能够有效地解决径向支撑不通过主镜质心 所带来的附加弯矩的问题,而且设计过程简单,只需 要考虑单一设计变量β。

4 应用总结与分析

主动支撑方式的选择需考虑多方面的因素,表 1为部分采用主动支撑的大口径望远镜的相关 参数。

表1 采用主动支撑的大口径望远镜

Tab. 1	Large	rapture	mirror	with	active	support
1 a. 1	Large	Tapture	minior	WILLI	active	support

型号	口径/m	材料	定位系统	轴向支撑系统	径向支撑系统
NTT	3.5	微晶	固定三点	杠杆式	竖直推 – 拉
VST	2.6	ULE	固定三点	机电式	推-拉-剪
VISTA	3.9	ULE	固定三点	气压式	推-拉-剪
MMT	6.5	硼硅	六杆硬点	气压式	斜向推 – 拉
LBT	8.4	硼硅	六杆硬点	气压式	斜向推 – 拉
LSST	8.4	硼硅	六杆硬点	气压式	斜向推 – 拉
GEMINI	8	ULE	虚拟硬点	气压式	推-拉-剪
VLT	8	微晶	虚拟硬点	液压并联机电式	推-拉-剪
AEOS	3. 67	微晶	虚拟硬点	液压并联机电式	推-拉-剪

从上述分析可以看出,4 m 以上望远镜采用的 定位系统一般为虚拟硬点定位或六杆硬点定位。 虚拟硬点支撑多采用液压缸与步进电机并联组成 的支撑系统,其中液压缸用于输出抵消主镜重力 的作用力,步进电机用于输出面形校正所需的作 用力;六杆硬点定位的主镜多与气动力促动器一 同使用。4 m 以上望远镜,虽然部分主镜已进行轻 量化,但是主镜质量依旧处于几吨甚至几十吨数 量级,所需支撑力及校正力较小口径主镜大得多。 液压支撑系统功率大,能够承受主镜较大重力,将 液压缸互相连通在主镜背部形成三个虚拟硬点, 既能够对主镜进行定位又便于控制。由于液压支 撑抵消重力,从而对促动器力行程的要求降低,机 电式力促动器能够满足行程需求。若单独使用液 压支撑,无法满足校正的精度要求,机电式力促动 器输出精度高,弥补了这一缺陷。因此以往的设 计中,地基4m以上口径的望远镜采用虚拟硬点、 液压并联机电式力促动器的主动支撑方式较为常 见。近年来,随着主镜轻量化率的提高,主镜边缘 厚度不断减小,主镜支撑时需考虑轻量化筋的强 度问题。六杆硬点定位系统定位机构完全分布与 于主镜背部,有效地保证了筋不受破坏,故六杆硬 点定位的应用也越来越多。六杆硬点定位在精

度、抗干扰能力方面较虚拟硬点定位也有一定优势。气压式力促动器成本低廉,力行程大,传递效率为上述四种促动器中最高,校正频率也在10 Hz 以上,能够在承受大口径主镜被动支撑力的同时 对面形误差进行校正。采用六杆硬点定位、气压 式力促动器的主动支撑系统在地基4 m 以上口径 的望远镜的应用也较为常见。

口径小于4m的望远镜的主动支撑设计较为简 单,常采用固定三点定位,由于其所需面形校正力较 小,从精度的角度考虑,机电式力促动器较为适用。

现代大口径望远镜主镜镜面多为弯月形,径向 支撑很难通过质心,推-拉-剪的径向支撑方式更 符合支撑需求,有利于维持良好的镜面面形。斜向 推拉的径向支撑方式更适用于主镜边缘筋较薄的蜂 窝镜,与六杆定位系统一起使用既能够满足支撑需 求,又能够避免主镜过约束。

综上所述,主动支撑系统的设计需综合考虑口 径、轻量化方式、主镜质量、校正力需求等多方面 因素。

5 结 论

自主动光学技术的出现,主动支撑技术作为主 动光学的关键技术,已成功地运用于大口径望远镜 的建造,成为天文强国必须掌握的关键技术之一。 本文论述了主动支撑系统的组成,并系统性总结了 定位系统,轴向支撑系统与径向支撑系统的实现形 式,同时详细介绍了已建成望远镜中极具代表性的 主动支撑技术,最后文章对主动支撑技术的应用进 行了总结分析,对于开展大口径望远镜主镜主动支 撑系统设计具有十分重要的参考价值。

参考文献:

- Gerard T van Belle. The scaling relationship between telescope cost and aperture size for very large telescopes[J].
 SPIE, 2004, 5489:563.
- [2] Meeks R L, Ashby D, et al. Super hardpoints for the large binocular telescope [C]. SPIE, 2011, 7733:1-13.
- [3] PENG Yao, ZHANG Jingxu, YANG Fei, et al. Hardpoint location technique of large mirror based on active optics.
 [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(2):139 144. (in Chinese)
 彭尧,张景旭,杨飞,等. 基于主动光学的大口径反射
 镜硬点定位技术[J].激光与红外, 2016, 46(2): 139 144.
- [4] FAN Lei, YANG Hongbo, ZHANG Jingxu, et al. Hardpoints defining structure for large aperture primary mirror

[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3367 - 3371. (in Chinese)

范磊,杨洪波,张景旭,等.大口径反射镜轴向硬点定位[J].红外与激光工程,2012,41(12):3367-3371.

- [5] Thierry Hovsepian, Jean-Marc Michelin, Stephano Stanghellini. Design and tests of the VLT Ml mirror passive and active supporting system [J]. SPIE, 1998, 3352: 424-435.
- [6] Larry Stepp, Eugene Huang. Gemini primary mirror support system[J]. SPIE, 1994, 2199:223 - 238.
- [7] M Tarenghi, R N Wilson. The ESO NTT (New Technology Telescope): The first active optics telescope [J]. SPIE, 1989,1114:302-313.
- [8] Pietro Schipani, Massimo Capaccioli, Sergio D' Orsietal. The VST active primary mirror support system[J]. SPIE, 2010,7739:31.
- [9] Brian Cuerden, Jacques Sebag, Scott Mathews, et al. LSST primary, secondary and tertiary mirror support systems [J]. SPIE, 2004, 4595:474 - 488.
- [10] Joe DeVries, Douglas Neill, Ed Hileman. LSST Telescope Primary / Tertiary Mirror Hardpoints [J]. SPIE, 2010, 7739:1j.
- [11] H M Martin, B Cuerden, L R Dettmann, et al. Active optics and force optimization for the first 8.4 m LBT mirror
 [J], SPIE, 2004, 5489:826 837.
- [12] Joseph Antebi, Donald O Dusenberry, Atis A. Liepins. Conversion of the MMT to a 6.5m telescope-The optics support structure[J]. SPIE, 1990, 1303;148 - 161.
- [13] WU Xiaoxia, LI Jianfeng, SONG Shumei, et al. Active support system for 4m SiC lightweight primary mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9):2451 2457. (in Chinese)

吴小霞,李剑锋,宋淑梅,等.4mSiC 轻量化主镜的主动 支撑系统[J]. 光学 精密工程,2014,22(9): 2451-2457.

- [14] Conrad Neufeld, Victor Bennett, Andrea Sarnik, et al. Development of an active optical system for the SOAR telescope[J]. SPIE, 2004, 5489:1052 - 1060.
- [15] YU Zhengyang,LI Guoping. Pneumatic force actuator design for active optics[J]. Hydraulic and Pneumatic,2011, 9:80-85. (in Chinese)
 余正洋,李国平. 用于主动光学的气体力促动器设计
 [J].液压与气动,2011,9:80-85.
- [16] H M Martin, S P Callahan, B Cuerden, et al. 1998 Active support and optimization for the MMT primary mirror[J]. 1998, SPIE, 3352:412-423.
- [17] ZHANG Limin, ZHANG Bin, YANG Fei. Design and test of force actuator in active optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1):38 43. (in Chinese)
 张丽敏,张斌,杨飞. 主动光学系统力促动器的设计和 测试[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(1):38 43.
- [18] Iye M, Kodaira K. Primary mirror support system for the SUBARU telescope [C]. Symposium on Astronomical Telescopes & Instrumentation for the 21st Century. International Society for Optics and Photonics, 1994:762 – 772.
- [19] M Schneermann, X Cui, D Enard, et al. ESO VLT III; the support system of the primary mirrors [J]. SPIE, 1990, 1236:920-928.
- [20] CHEN Fulin. Research on active support of 620mm thin meniscus mirror[D]. Changchun: Changchun institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2012. (in Chinese)
 陈夫林. 620mm 弯月形薄镜主动支撑研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- [21] DAI Xiaolin, XIAN Hao, TANG Jinlong, et al. Designing of lateral support system for an 8 m active thin mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6):622004. (in Chinese) 戴晓霖,鲜浩,唐金龙,等.8 m 能动薄主镜侧支撑设计 [J]. 光学学报, 2015, 35(6):622004.