

# 大型光学望远镜主镜主动支撑系统研究进展

徐宏<sup>1</sup>, 杨利伟<sup>1,2\*</sup>, 杨会生<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学研究二部, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 主动支撑系统能使大型光学望远镜的主镜具备面形控制及定位的能力, 单体镜面形主动控制技术 & 拼接镜共相位成像技术因而得到了迅速发展。回顾了近年来主动支撑系统及促动器在大型光学望远镜中的应用, 并对其进行了总结, 归纳出了几种常见的主动支撑系统及促动器, 比较了它们的特点, 陈述了主动支撑系统与促动器之间的内在联系。最后对未来应用于望远镜主镜的主动支撑系统及促动器进行了展望。

**关键词** 大型光学望远镜; 主反射镜; 主动支撑系统; 促动器

中图分类号 V447; P111.21

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.100002

## Recent Progress of Active Support System for Large Optical Telescope Primary Mirror

Xu Hong<sup>1</sup>, Yang Liwei<sup>1,2\*</sup>, Yang Huisheng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Space Optics Department II, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The active support system can provide the capacity of surface figure control and positioning for large optical telescope primary mirror, hence the active control technology of monolithic mirror surface figure and co-phasing technique of segmented mirror has been developed rapidly. The applications of active support system and actuator in large optical telescope in recent years are reviewed and summarized. Several common active support systems and actuators are concludes. Their features are compared, and the relationship between active support system and actuator is proposed. The future development of active support system and actuator applied to telescope primary mirror is prospected in the end.

**Key words** large optical telescope; primary mirror; active support system; actuator

**OCIS codes** 000.3110; 110.6770; 230.4040; 220.1080

## 1 引言

近年来,地基和空基光学望远镜的口径越来越大,仅依靠传统的被动支撑系统已无法满足光学系统成像的需求。自20世纪80年代开始,大型望远镜主镜开始采用主动支撑系统,以适应现代天文望远镜对更大口径、更高面形精度、更强环境适应能力的要求。经过几十年的发展,主动支撑系统已经在数十架天文望远镜上得到了应用。作为主动支撑中的位移输出装置,反射镜用精密促动器也在应用中

取得了长足的发展。人们根据不同的使用需求,研制出了多种不同类型的促动器。根据功能不同,可分为精密定位、隔振、面形校正等跟据驱动形式不同;根据驱动形式不同,可分为电动机械式、音圈式、气压式、液压式等。除此之外,为提高分辨率,一些微位移促动器融入了位移缩放机构,例如:齿轮减速器、柔性杠杆及铰链、液压机构等。为提高运动精度,一些微位移促动器融入了导向机构,例如:直线轴承、柔性杠杆导向机构、膜片导向机构等。

国内外多名学者对望远镜主镜主动支撑系统或

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-04-12; 录用日期: 2018-04-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500100)

\* E-mail: 13604415684@126.com

反射镜用促动器进行了研究和总结。邵亮等<sup>[1]</sup>回顾了望远镜拼接镜面主动光学技术中微位移促动器的应用;白清顺等<sup>[2]</sup>阐述了拼接镜面的工作原理及微位移促动器的特点;胡佳宁等<sup>[3]</sup>系统性地总结了地基大口径望远镜主镜的定位系统与支撑系统;Anderson等<sup>[4]</sup>对六角架支撑在大型地基望远镜中的应用进行了总结;朱熠等<sup>[5]</sup>研究了1.23 m SiC主镜的主动支撑系统的校正能力;吴小霞等<sup>[6]</sup>研究了4 m SiC轻量化主镜的主动支撑系统的性能;李宏壮等<sup>[7]</sup>对口径620 mm、厚18 mm的弯月形薄反射镜进行了面形误差的主动校正实验,通过浮动支撑方式保证了在校正过程中镜面空间位置不变;陈新东<sup>[8]</sup>开展了应用在空间相机离轴三反系统的主动变形镜的设计和实验研究。但是关于主动支撑系统与促动器之间内在联系报道较少。本文对国外光学望远镜的主动支撑系统及所用的促动器进行了梳理,并试图找到二者之间的内在联系,为设计人员提供参考。

## 2 大型望远镜主镜主动支撑系统及促动器发展概况

本文以望远镜建成时间为序,对不同大型望远镜主镜的主动支撑系统及促动器发展概况进行了总结。

### 2.1 凯克望远镜

凯克望远镜(Keck Telescope)是世界上现役口径最大的地基望远镜之一,建成于1993年<sup>[9]</sup>。主镜口径为10 m,由36块六边形子镜拼接而成,每块子镜点到点距离为1.8 m,厚度约为75 mm,镜体材料为微晶玻璃(Zerodur)。

每块子镜背部拥有两套复杂的支撑系统,如图1所示,分别为轴向支撑系统和径向支撑系统<sup>[9]</sup>。径向支撑中,6块殷钢材料的镶嵌件粘接在镜体中

心孔的孔壁上,6个镶嵌件通过柔节与径向支撑环连接,进而与径向柱连接。径向柱内有薄片,可实现径向支撑与轴向支撑的解耦。轴向支撑中,36个轴向镶嵌件通过柔性杆与3个Whiffletree结构相连接,进而与促动器的输出轴相连接。单个镜片及Whiffletree结构的总重力大约为4493 N。径向柱及促动器的壳体最终连接在子单元组件上。

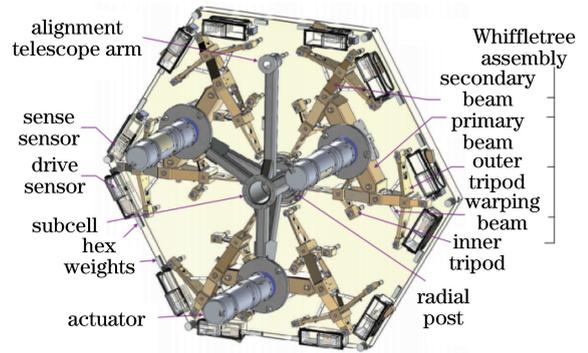


图1 凯克望远镜主镜主动支撑系统

Fig. 1 Active support system of Keck telescope primary mirror

Keck望远镜主镜促动器的作用是调整镜体的平移和倾斜,以实现主镜的共焦和共相。边缘传感器和波前传感器提供反馈信息<sup>[10]</sup>。图2为Keck望远镜的微位移促动器结构示意图,它采用的是液压与电动机械混合式微位移促动器,主要包括电机、编码器、丝杠螺母副、柔性液压缸、预紧弹簧和输出轴。利用直流伺服电机驱动精密滚珠丝杠,进而驱动液压减速机构,液压减速机构再驱动输出轴,从而实现微位移的输出。为了避免液压油泄露以及活塞与缸体之间产生摩擦,液压减速机构采用了特殊的全封闭柔性缸体,但是这种柔性刚体在弹性变形时会产生缩放比非线性的问题。促动器有效行程优于1 mm,绝对重复定位精度约为 $3.8 \mu\text{m}$ (RMS),相对定位精度优于7 nm(RMS)。

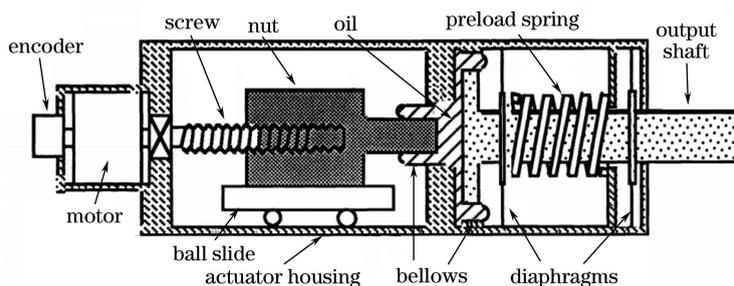


图2 凯克望远镜主镜微位移促动器

Fig. 2 Micro-displacement actuator of Keck telescope primary mirror

### 2.2 双子望远镜

双子望远镜(Gemini Telescope)建成于2000

年,主镜为弯月型单体镜,口径为8.1 m,厚度约为200 mm,材料为Ultra Low Expansion material

(ULE)。

双子望远镜主镜支撑系统分为正交的两部分：轴向支撑和径向支撑(如图3所示)<sup>[11]</sup>。轴向支撑包括为镜体背部提供均匀气压的柔性橡胶密封的气压室和120个支撑装置,并且,每一个装置都由一个液压式气缸和一个气压式力促动器组成。径向支撑系统包括72个液压装置,放置在反射镜侧面。轴向和径向支撑装置都利用液压 Whiffletree 系统来确

定反射镜的位置。随着反射镜的变化,不断调整这些支撑系统,使反射镜产生少量受控的平移和倾斜,保证主镜与望远镜其他光学元件的对准。除了能够补偿温度引起的镜面变形外,主动支撑系统还可以补偿由支撑力的误差、角度误差、径向支撑误差以及气压误差引起的镜面变形。除此之外,主动支撑系统还可以补偿重力导致的次镜刚体位移。长期工作时,限位系统的调整范围为 $\pm 100 \mu\text{m}$ 和 $\pm 15''$ <sup>[12]</sup>。

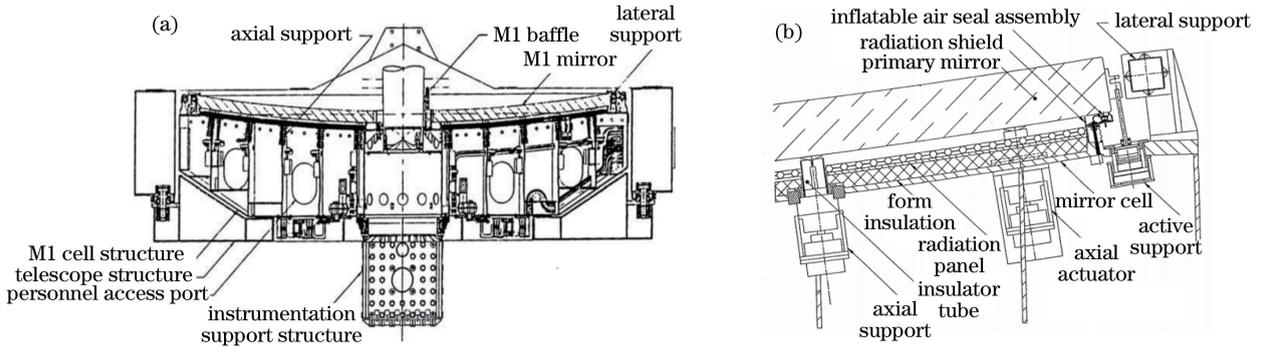


图3 双子望远镜主镜支撑系统。(a)整个支撑系统剖视图;(b)局部支撑系统剖视图

Fig. 3 Support system of Gemini telescope primary mirror. (a) Cross section of overall support system; (b) cross section of partial support system

由于镜体厚度较薄,刚度有限,因此,促动器施力在镜体背部时,会在镜面相应位置产生足印,使得镜面面形变差,这种现象称为“支撑足印效应”。为解决这一问题,设计师在镜体和镜室之间设置了密封的气压室,通气后,气压室承担了镜体重量的80%,120个主动支撑装置仅承担镜体重量的20%。这样就使得“支撑足印效应”的影响大大降低。促动器仅运行在推动模式下,没有与反射镜相连,这样就便于将镜体从镜座中取出<sup>[13]</sup>。

### 2.3 南方天文研究望远镜

南方天文研究望远镜(SOAR Telescope)建成于2003年<sup>[14-16]</sup>。主镜为弯月型单体镜,直径为4.3 m,厚度为100 mm,材料为ULE,质量约为3200 kg。

镜体主动支撑系统由120个力促动器和6个径向支撑组成(如图4,图5所示)<sup>[15]</sup>,这些支撑固定在一个钢制的镜室中。力促动器为主动支撑,用于支撑镜体重量,同时控制镜面面形,径向支撑用于限制镜体的位置。

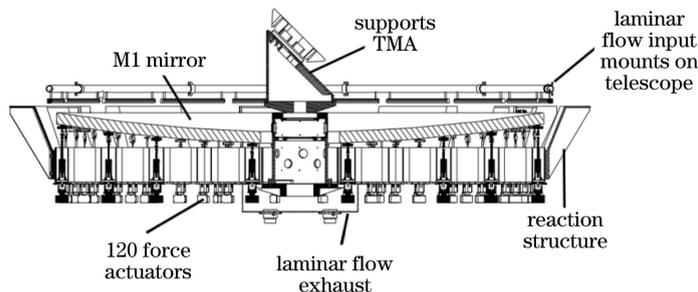


图4 SOAR主镜主动支撑系统

Fig. 4 Active support system of SOAR primary mirror

图6为SOAR主镜采用的电动机械式力促动器<sup>[16]</sup>。步进电机与谐波齿轮组合体与一个80节的丝杠螺母组件相连,丝杠螺母副被施加预紧力,以消除运动副的间隙。测压元件两端分别连接两个杆状柔节,杆状柔节在实现较高的轴向刚度的同时,还可

以对其他自由度解耦。单个促动器刚度为2940 N/mm,最大可提供 $\pm 445 \text{ N}$ 的力,精度可达0.12 N,行程为 $\pm 3 \text{ mm}$ ,可以在 $-25 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间运行。主镜完成光学加工后的面形约为17 nm,安装到主动支撑上之后,主镜面形最终被调整至20 nm,



图 5 装配完成后的 SOAR 主镜

Fig. 5 Primary mirror of SOAR after assembly

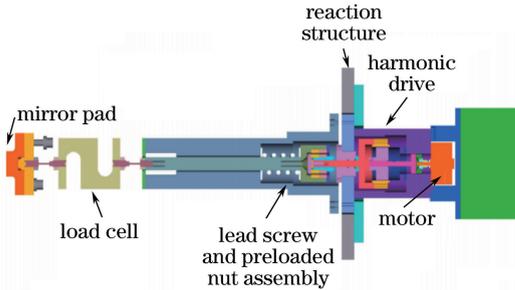


图 6 SOAR 主镜促动器

Fig. 6 Actuator of SOAR primary mirror

优于公差分配的 25 nm。

## 2.4 大型双筒望远镜

大型双筒望远镜(LBT)建成于 2005 年<sup>[17]</sup>。主镜为蜂窝三明治型单体镜,口径为 8.4 m,厚度为 894 mm,材料为硼硅玻璃,质量约为 16 t。

主镜位于主镜室中,镜室包括三个单元模块:支撑系统、定位系统和通风及热监控系统<sup>[18]</sup>。支撑系统最为复杂,主要由 108 个双轴和 52 个单轴气压式力促动器、负载扩张器及静态支撑组成。由于镜体是蜂窝结构,刚度并非无限高,因此当支撑力施加在镜体背部时,会产生支撑足印效应,为降低该效应,支撑点的数量确定为 426 个,而控制镜面形状的力促动器只有 160 个,这导致了支撑点数量大于促动器的数量,于是设计师在促动器与支撑点之间设置了负载扩张器(如图 7 所示),使得局部足印导致的

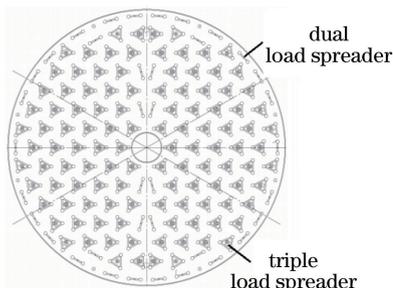


图 7 LBT 主镜负载扩张器分布

Fig. 7 Load spreader distribution of LBT primary mirror

镜面变形低于面形误差指标。当主动支撑运行时,镜体由 160 个促动器支撑。当主动支撑停止运行时,镜体重量则由静态支撑(类似于弹簧)来承担。

气压式力促动器包括以下几个部分:测压元件、球轴承解耦器、柔节、气缸、两个压力换能器和一个促动器控制器(如图 8 所示)。有些促动器是双轴的,它能够产生 3000 N 的轴向力和 2100 N 的径向力,同时仅消耗 700 mW 的功率。球轴承解耦器在实现镜体随着硬点移动的同时,也允许促动器给镜体施加支撑力。测压元件可以测量 4500 N 的力。柔节可以适应镜体运动及促动器相对于镜体的少量失变量。

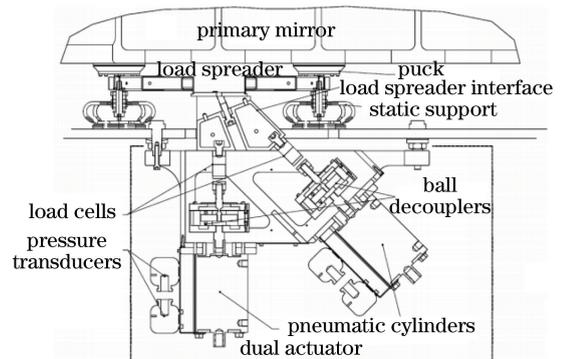


图 8 LBT 主镜双轴促动器

Fig. 8 Dual-axial actuator of LBT primary mirror

镜室的另一单元是定位控制系统,6 个硬点分布在镜体下方,形成一个六角架(如图 9 所示),控制着镜体相对于镜室的位置。图 10 显示了每个硬点的组成。它本质上是一个电动机械式位移促动器,集成了电机、丝杆螺母机构、线性可调差动变压器(LVDT)、测压元件、自主伸缩机构、柔节等元器件。电机与丝杠螺母副实现促动器轴向长度的调整, LVDT 则是为了实现长度调整的闭环控制。测压元件是一个力传感器,可以感知促动器施加到镜体上的力(实际上也是镜体施加到促动器上的力),根据测压元件感知到的力,气压式力促动器施加相应

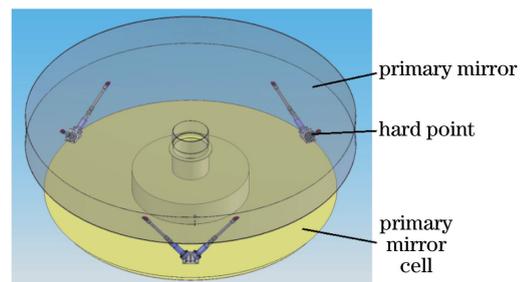


图 9 LBT 主镜硬点分布

Fig. 9 Hard point distribution of LBT primary mirror

的力,使得硬点施加在镜体上的力为零。回路响应 带宽为 5 Hz。

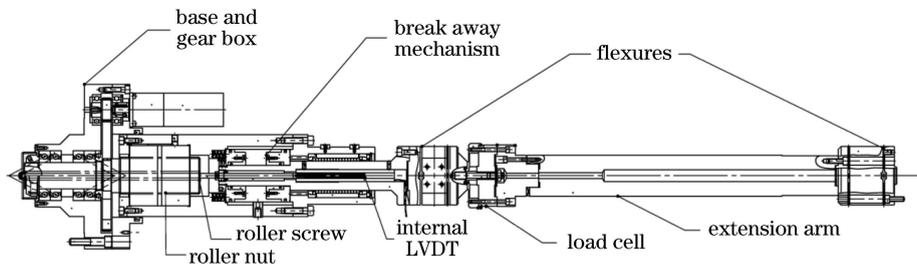


图 10 LBT 主镜硬点促动器

Fig. 10 Hard point actuator of LBT primary mirror

### 2.5 詹姆斯·韦伯太空望远镜

詹姆斯·韦伯太空望远镜(JWST)是美国宇航局和欧洲空间局共同研发的新一代空基天文望远镜,预计 2020 年发射<sup>[19]</sup>。主镜口径约为 6.6 m,由 18 块六边形子镜拼接而成。每一块子镜点到点距离约为 1.5 m,镜体材料为铍,质量为 40 kg。

JWST 主镜在发射阶段折叠起来,入轨后展开,需设置子镜微位移调整系统,以补偿动力学载荷、重力释放以及在轨展开导致的失调量,实现在轨精确对准与共相。简而言之,子镜的微调系统是一个六角架主动支撑系统(如图 11 所示)<sup>[20]</sup>,每一块子镜由六个线性的促动器支撑和控制,以获取 6 个自由度的定位。每 2 个促动器装配成一个促动器组[如图 12(a)所示],3 个促动器组构成一个六足平台。在这个平台中,连接主镜背板的大三角板为固定平台,连接镜体的小三角板为可动平台。除此之外,每一个主镜还有一个中心促动器,用于调整镜面的曲率半径。

JWST 主镜使用的促动器是鲍尔航天技术公司(BATC)专门研制的超低温微位移促动器,能在恶劣的外太空环境中工作。图 12(b)为它所使用的微位移促动器——步进电机驱动的宏/微叠加式位移促动器<sup>[20]</sup>,具有体积小、重量轻、耐低温和真空等优点,主要由微动平台柔性杠杆、齿轮电机、宏/微离合

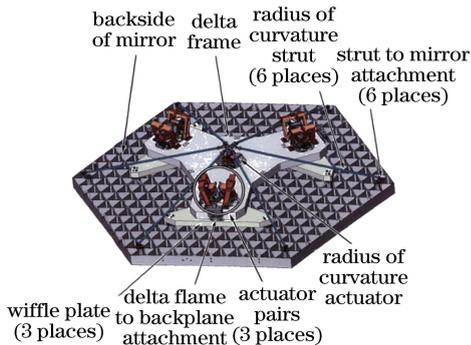


图 11 JWST 主镜组件主动支撑系统

Fig. 11 Active support system of JWST primary mirror

器、宏动驱动轴等部分组成,所有元件直接固定在主支撑上。该促动器的关键部件之一是柔性杠杆位移缩放结构,如图 12(c)所示,该结构可实现 100:1 的减速比。工作时,齿轮电机组件通过一个减速比为 3:1 的齿轮副驱动凸轮轴,凸轮轴再通过偏心轴承驱动微动平台的柔性杠杆位移缩放结构,从而实现子镜共相所需的纳米级定位精度。该促动器的另一关键部件为宏/微离合器,如图 12(d)所示,它包括驱动轴和被驱动轴两部分,面对面的轴端各有一个转盘,转盘上各有一个突出销。这样的设计使得驱动轴和被驱动轴之间有 90% 的空回部分。在空回区,当电机工作时,只有微动平台被驱动,实现精密定位;当 2 个突出销靠紧时,被驱动轴与驱动轴啮合,

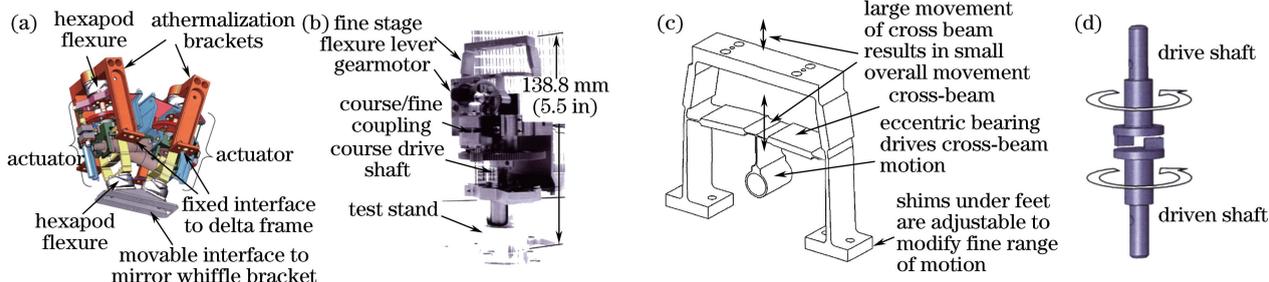


图 12 JWST 主镜促动器。(a)促动器组;(b)促动器;(c)微动平台柔性杠杆;(d)离合器

Fig. 12 Actuator of JWST primary mirror. (a) Actuator pair; (b) actuator; (c) fine stage flexure lever; (d) coupler

微动平台和宏动平台同时被驱动,实现反射镜的粗定位;输出轴反转时,2个突出销分离,此时宏动平台脱离驱动机构,只有微动平台被驱动,实现反射镜的精密定位。所有的轴承与齿轮涂覆固体润滑剂,以保证运动机构能够在 30 K 的低温环境下工作。

经测试,在 30 K 低温真空环境下,此微位移促动器能够稳定输出 7 nm 的步进精度,有效行程为 21 mm<sup>[20]</sup>。

### 2.6 大型综合巡天望远镜

大型综合巡天望远镜(LSST)是美国科学基金会授权建造的地基大视场巡天望远镜,预计 2019 年建成<sup>[21]</sup>。该望远镜主镜、三镜采用一体式设计(如图 13 所示),主镜、三镜均采用蜂窝三明治结构,其中主镜口径为 8.4 m,三镜口径为 5 m,镜坯材料为硼硅玻璃。

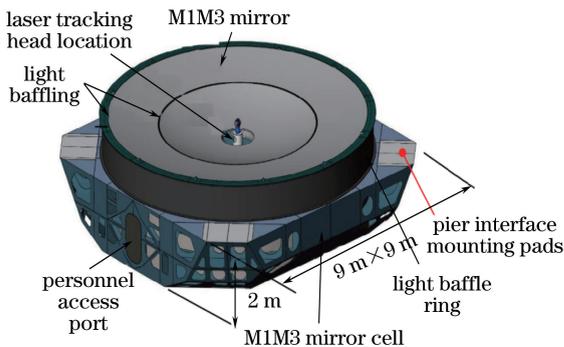


图 13 LSST 主/三镜及镜室

Fig. 13 LSST M1/M3 mirror and mirror cell

主/三镜(M1/M3)拥有与 LBT 相似的支撑系统,主要包括三部分:气压式面形控制力促动器、硬点和静态支撑<sup>[22]</sup>。为使支撑系统导致的面形残差达到最小,主动支撑系统提供一个非静态的浮动支撑,使主/三镜能够“浮”在上面。支撑系统共有 52 个单轴促动器和 104 个双轴促动器(如图 14 所示),所有促动器提供轴向支撑,双轴促动器还能提供径

向支撑。当反射镜光轴水平时,这些径向支撑促动器用来支撑反射镜的重量。在促动器与镜体背部之间有一个负载扩张器(如图 15 所示),用于均分载荷,降低支撑足印效应。硬点有 6 个,用来限制主/三镜相对于镜室的位置。面形控制促动器减压后,主/三镜落在静态支撑上面,镜体的重量将由静态支撑来承担。

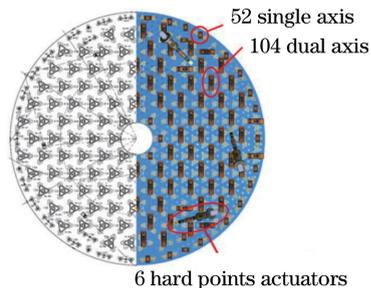


图 14 LSST 主/三镜主动支撑系统

Fig. 14 Active support system of LSST M1/M3 mirror

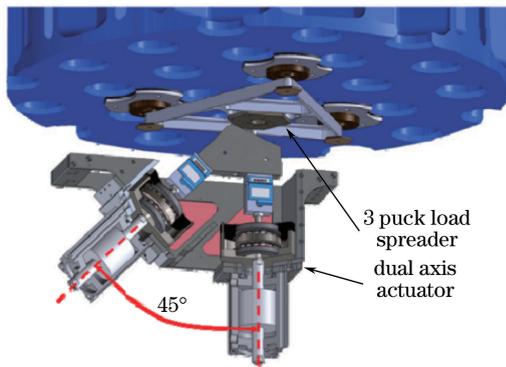


图 15 LSST 主/三镜双轴促动器及负载扩张器

Fig. 15 Dual-axis actuator and load spreader of LSST M1/M3 mirror

与 LBT 一样,LSST 主/三镜也有一套硬点支撑系统<sup>[22-23]</sup>。图 16 为 6 个硬点支撑组成的一个六足平台示意图,结构内部集成了电动机械式微位移促动器,用于控制硬点的长度,从而控制主/三镜相

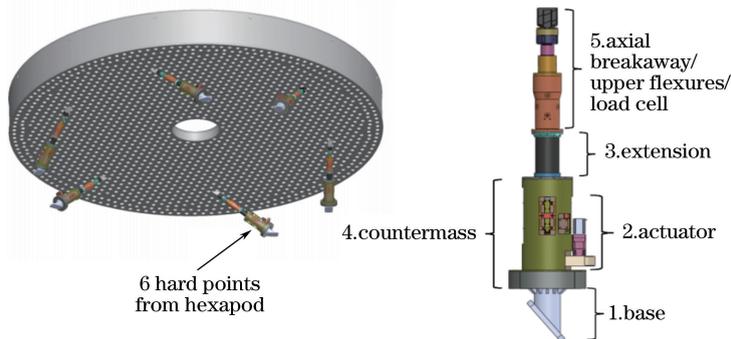


图 16 LSST 主/三镜硬点布局图

Fig. 16 Layout of hard points of LSST M1/M3 mirror

对于镜室的位置。当面形控制促动器被压缩时,镜体重量必须由被动的静态支撑承担,这时硬点需要适应镜体的运动,这个环节由气压式自主伸缩机构来完成。每一个硬点包含一个轴向的测压元件,用于确定主动模式状态下硬点施加在镜体上的力。

望远镜主/三镜支撑系统有两种工作模式:主动模式和静态模式。观测期间,主/三镜处于主动模式下,在此模式下,面形控制促动器支撑着镜体的全部重量,同时对精密面形进行校正,而硬点只用于定位,不承担力和力矩;静态模式下,主/三镜的面形控制促动器和硬点被压缩,主/三镜停靠在静态支撑上。

## 2.7 欧洲超大型望远镜

欧洲超大型望远镜(E-ELT)是由欧洲南方观测站负责研制的大型地基望远镜,用于可见光、近红外和中波红外波段的观测,预计2025年建成<sup>[24-25]</sup>。其主镜口径为39 m,由798块六边形子镜拼接而成,每块子镜点到点距离为1.45 m,厚度为50 mm,材料为微晶玻璃。

E-ELT主镜子镜的支撑系统引入了一些新的设计思想。它主要由以下几部分组成:轴向支撑、径向支撑、可动框架、固定框架和定位促动器(PACT)等(如图17所示)<sup>[26]</sup>。轴向支撑中,27个轴向镶嵌件通过柔性杆与Whiffletree结构相连接(如图18所示)。径向支撑中,6块殷钢材料的镶嵌件粘接在镜体中心孔的孔壁上,6个镶嵌件与带有柔节的径向支撑环连接。轴向支撑与径向支撑均固定在可动框架上。需要注意的是,Whiffletree结构的顶层框架固定在可动框架的下方,这与传统设计不同。固定框架用于将子镜组件连接在主镜室中。需要注意的是,固定框架通过3组柔节与可动框架也连接起来,这样做的目的是为了提高整个子镜组件的刚度。3个PACT的壳体并未直接与固定框架连接,而是与固定框架底部的金属板连接在一起,输出轴则与Whiffletree的顶层三角架连接在一起,可以移动子镜组件,实现平移、扭摆和俯仰3个自由度的调整。

西班牙航空系统公司为ELT主镜的子镜设计了一款宏/微叠加式微位移促动器,用于调整主镜各镜片的位置,该促动器既可实现大行程的位移输出,又可实现纳米级的精确定位<sup>[27]</sup>。宏动部分采用步进电机经过减速器驱动精密丝杠,实现大行程微米级定位;微动部分采用音圈电机,实现纳米级精密定位。宏/微动叠加式微位移促动器有效地避免了宏动部分精度低、微动部分行程小的缺点,可以在较大行程范围内实现纳米级的定位精度。

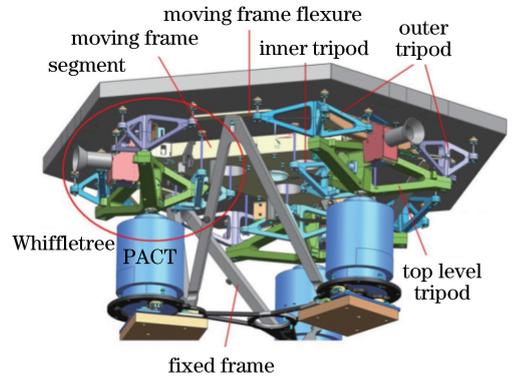


图17 E-ELT主镜子镜的主动支撑系统  
Fig. 17 Active support system for E-ELT segmented primary mirror

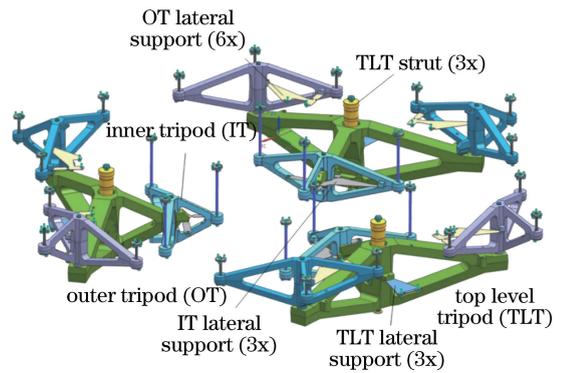


图18 E-ELT主镜子镜 Whiffletree 结构  
Fig. 18 Whiffletree structure for E-ELT segmented primary mirror

宏动平台设计中采用的所有元件均是货架产品,适合大批量生产和装配。图19为PACT结构简图,主要包括无刷电机、丝杠螺母副、音圈电机、输出轴、编码器、板簧等。宏动部分驱动设备是无刷电机,采用开环控制,微动部分的驱动设备是音圈电机,采用闭环控制,编码器位于输出轴中。所有外载荷由安装在宏动平台上2个板簧承担,板簧使得促动器的名义载荷达到了900 N。测试结果表明:该宏/微叠加式促动器可实现的反射镜定位误差优于3 nm。

## 2.8 巨型麦哲伦望远镜

25 m口径的巨型麦哲伦望远镜(GMT)是一个国际联营机构主导研制的大型地基望远镜(如图20所示),用于可见光和红外成像,预计2025年建成<sup>[28-29]</sup>。其主镜由7块直径为8.4 m的反射镜拼接而成,每一块离轴主镜均为蜂窝三明治结构,材料为硼硅玻璃。

每一块主镜背部有一套复杂的主动支撑系统,该系统包含三部分:气压式力促动器、硬点支撑系统、静态支撑(如图21所示)<sup>[30]</sup>。气压式力促动器

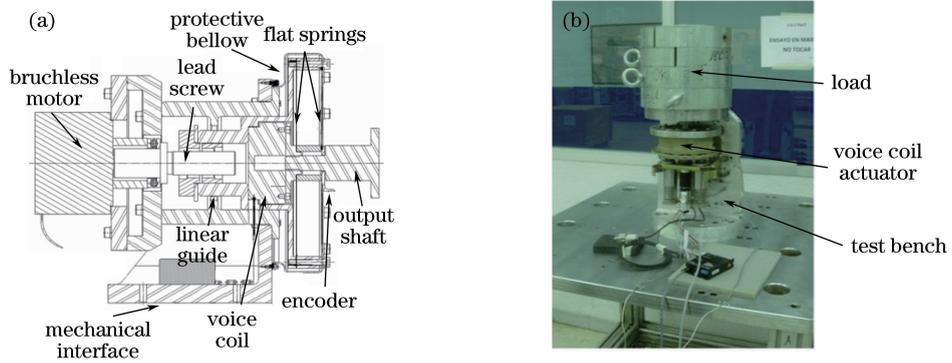


图 19 E-ELT 主镜定位促动器。(a)结构示意图;(b)测试状态

Fig. 19 PACT for E-ELT primary mirror. (a) Layout of mechanical design; (b) testing status

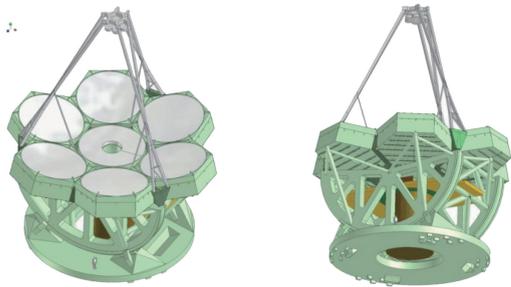


图 20 巨型麦哲伦望远镜主动支撑系统

Fig. 20 Active support system for the GMT

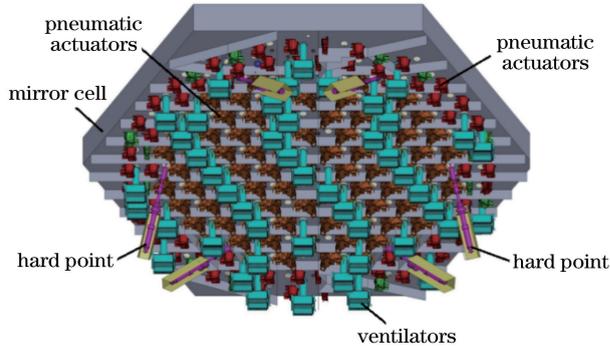


图 21 反射镜背部促动器的位置分布(仰视图)

Fig. 21 Location of actuators on the mirror back surface (upward view)

共 165 个,其中 80 个为单轴促动器,其余均为三轴促动器。促动器一端固定在镜室上表面,另一端固定在负载扩张器上,而负载扩张器则粘接在镜体背部。力促动器为镜体提供轴向和径向支撑力,并控制镜面形;硬点支撑系统为 6 个硬点组成的六足平台,一端固定在镜室上表面,另一端固定在镜面背部,用于实现镜体的定位;促动器仅在主动控制时支撑镜体,其他时间,镜体重量由静态支撑承担。静态支撑主要是由一系列弹簧组成,分布在三点或四点负载扩张器背面。

图 22 为主镜所用的气压驱动的力促动器的结

构示意图,它主要由接头、底部盖板、缸体、气阀、活塞、顶部盖板、活塞杆和测压元件等组成<sup>[30-31]</sup>。气体经气阀进入气缸,气缸推动活塞,实现离轴主镜面形的调整。所有的密封膜片均采用贝洛框架式滚动膜片,该膜片可大大降低活塞和缸体之间的摩擦。每个气缸的质量为 2.1 kg,行程大约为 $\pm 30$  mm,可产生 2700 N 的推力和 1950 N 的拉力;测压元件可以测量的力的范围为 $\pm 2200$  N,精度可达 0.2 N。接头选用的是球关节轴承,可以对镜体相对于主镜室的横向运动进行解耦。

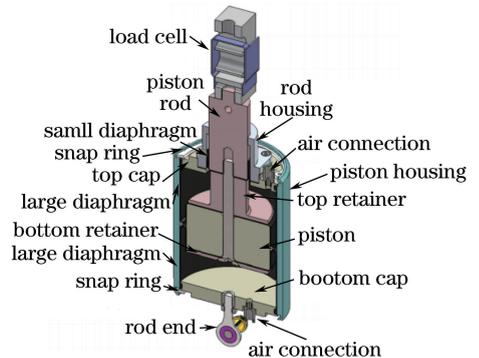


图 22 GMT 主镜气缸促动器剖视图

Fig. 22 Cross-section through the air cylinder actuator of GMT primary mirror

硬点支撑系统由 6 个并联的位移促动器组成,主要起两个作用:一是为主镜提供足够的刚度,降低空气扰动导致的像质退化;二是控制镜体的位置,维持光学系统的对准<sup>[30]</sup>。图 23 为位移促动器结构示意图,采用电动机械式促动方式,主要由配重、驱动机构、丝杠螺母、下部柔节、上部柔节、力限制器、测压元件等组成。驱动机构驱动谐波齿轮,带动丝杠螺母运动,从而实现微位移的调整。位移促动器轴向刚度为  $172 \text{ N}/\mu\text{m}$ ,组合后的六足平台的支撑刚度为  $580 \text{ N}/\mu\text{m}$ ,两端接头采用的是柔性铰链形式,

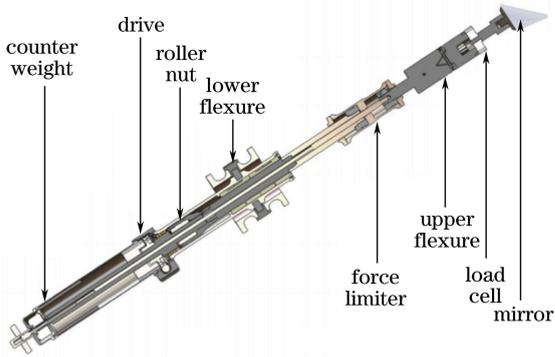


图 23 GMT 主镜硬点促动器剖视图

Fig. 23 Cross-section through the hard point actuator of GMT primary mirror

用于补偿镜体与镜室的相对运动。促动器的位移分辨率优于  $1 \mu\text{m}$ 。

### 2.9 30 m 望远镜

30 m 望远镜 (TMT) 是美国和加拿大多家科研单位合作研制的新一代地基天文望远镜, 用于可见光和红外波段的观测, 预计 2025 年建成<sup>[32]</sup>。其主镜口径为 30 m, 由 492 块六边形镜片拼接而成, 每一块镜片点到点距离为 1.44 m, 厚度仅为 40 mm, 材料为低膨胀玻璃, 质量约为 250 kg。

TMT 主镜的主动支撑系统是基于 Keck 望远镜子镜的设计思想而研发的<sup>[33]</sup>, 并对其做了改进, 以适应 TMT 的需要。它主要由以下几部分组成: 轴向支撑、径向支撑、扭曲促动器、可动框架、定位促动器和固定框架 (如图 24、图 25 所示)<sup>[34-35]</sup>。轴向支撑采用 Whiffletree 结构, 镜背设置了 27 个支撑点, 承担镜体重量。径向支撑采用中心柔性薄板结构, 扭曲促动器为一个基于 Whiffletree 结构的遥控的电动机械式促动器, 用于校正二阶和三阶光学像差, 以提高面形精度。3 个定位促动器的箱体安装在固定框架上, 输出轴安装在可动框架上, 可实现对子镜 3 个自由度 (平移、扭摆和俯仰) 的调整。

TMT 主镜的定位促动器是一个“软促动器”, 主要由两个闭环系统组成: 位移输出系统和卸荷系统 (如图 26 所示)<sup>[36]</sup>。位移输出系统包括音圈电机、输出轴以及位移传感器。音圈电机驱动输出轴, 位置传感器对输出轴的位置进行反馈, 精确控制输出系统。卸荷系统包括杠杆、电机/齿轮减速机构、卸荷弹簧、钢丝绳和驱动线轴等, 其关键部件为两个 5:1 的省力杠杆。杠杆一端通过 C-Flex 柔性轴承固定在壳体上, 另一端通过卸荷弹簧来支撑, 音圈电机输出轴通过 C-Flex 柔性轴承安装在杠杆上。这样,

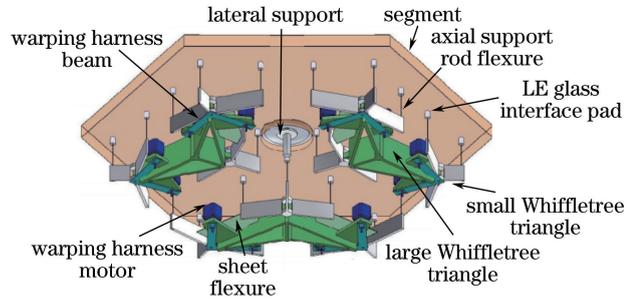


图 24 TMT 主镜轴向和径向支撑系统

Fig. 24 Axial support and lateral support system of TMT segmented primary mirror

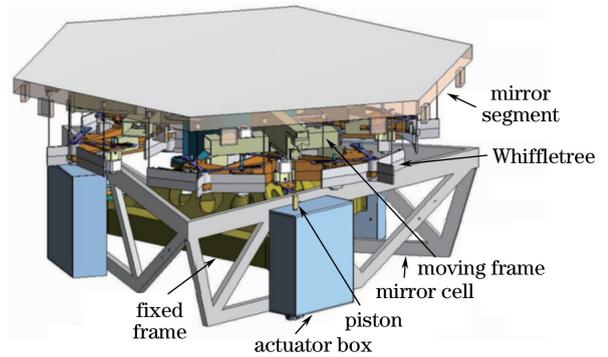


图 25 TMT 主镜主动支撑系统

Fig. 25 Active support system for TMT segmented primary mirror

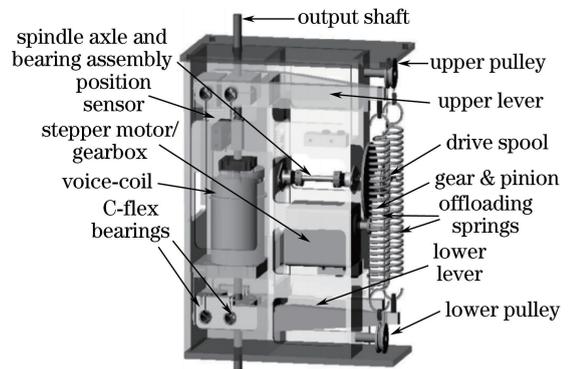


图 26 TMT 主镜定位促动器

Fig. 26 PACT of TMT segmented primary mirror

镜体的重量并不是由音圈电机支撑, 而是由一个与之平行的卸荷弹簧支撑, 这样的设计可以大大降低音圈电机的功耗。每个卸荷弹簧与一根钢丝绳相连, 钢丝绳的另一端缠绕在线轴上, 线轴通过减速机构与辅助电机相连。辅助电机驱动线轴旋转, 调整钢丝绳的长度, 进而调整弹簧长度及卸载力的大小, 使得音圈电机的受力最小。促动器采用 Mercury 位置传感器, 分辨率达到  $1.2 \text{ nm}$ , 稳定性为  $5 \text{ nm}$  (RMS), 有效行程大于  $4.3 \text{ mm}$ 。

## 3 归纳与分析

### 3.1 主镜结构形式

主镜镜体的结构形式有两种:单体镜、拼接镜。早期的望远镜口径较小,主镜多为单体镜。单体镜又分为两种形式:弯月型单体镜和蜂窝三明治型单体镜。弯月型单体镜制备简单,但刚度略低,易受风载荷影响,Subaru<sup>[37]</sup>、Gemini、SOAR、甚大望远镜(VLT)<sup>[38]</sup>、VST等望远镜的主镜均采用弯月型单体镜。蜂窝三明治型单体镜刚度较高,但制备工艺复杂,多面镜望远镜(MMT)<sup>[39]</sup>、LBT、LSST的主镜均采用蜂窝三明治型单体镜。

近20年来,望远镜口径越来越大,现有的镜坯制备技术无法满足使用要求,需要将多片反射镜拼接在一起使用。目前有两种拼接方式:小块镜拼接和大块镜拼接。前者利用几十块甚至几百块1 m量级的子镜拼接在一起,形成望远镜的主镜。优点是单镜的镜坯制备、加工、装配、检测相对容易,缺点是多片共焦、共相成像较为困难。常见的望远镜主镜例如Keck望远镜、南非大型望远镜(SALT)<sup>[40]</sup>、ELT、大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)<sup>[41]</sup>、TMT均采用这种拼接方式;后者是充分利用现有的镜坯制备技术,将几块8 m量级的反射镜拼接在一起,形成望远镜的主镜。优点是共焦、共相成像相对容易,缺点是单镜的镜坯制备、加工、装配、检测相对困难,GMT就是其中的代表。无论哪种方案,对于光机工程师来讲,都是巨大的挑战。

### 3.2 主动支撑系统

主动支撑系统在天文望远镜中应用广泛,且形式多样,但从本质上讲,主动支撑系统的结构与实现形式只有几种。

反射镜的支撑系统必须履行以下几个功能:支撑、定位和主动调整。所谓支撑,指的是支撑系统能够承担反射镜的重量,且能保证镜面面形;所谓定位,指的是支撑系统能够控制镜体的位置和方位;主动调整指的是支撑系统能够改变施加在镜体上力的大小,使得镜面面形达到最优<sup>[10]</sup>。

为实现上述几种功能,人们研发出了几种常见的支撑系统。其中一种称之为非固定支撑,在这种支撑系统中,为了避免反射镜在重力作用下弯曲变形,镜体重量由许多分布在镜体背部的轴向促动器来承担。由于分布的促动器施力是为了支撑镜体重量,而不是定位,因此当望远镜结构发生改变时,镜体面形保持不变。虽然轴向促动器承担了镜体的重

量,但镜体只是“浮”在轴向支撑上,并没有限位。人们通常在支撑系统中加入硬点支撑,以限制镜体位置和方位,而这种硬点通常情况下不承担镜体重量。采用这种支撑方式的望远镜有MMT、Subaru望远镜、Gemini望远镜、VST、LSST<sup>[10,42]</sup>等。

另一种大尺寸反射镜的支撑形式是静定支撑系统,人们使用机械式Whiffletree或液压式Whiffletree结构,把支撑点分散开来,支撑镜体重量。为保证整个支撑结构是静定的(轴向支撑对自由度的约束不超过3个),机械式Whiffletree一般引入柔性铰链,而液压式Whiffletree一般引入液压连接。在这种支撑系统中,单个支撑点是非静定的,但是整个支撑系统的刚度却非常高。这种支撑方式一般用在大口径望远镜主镜1 m量级的子镜上。为了控制镜体的位置,Whiffletree结构的下方还要串联位移促动器。采用静定支撑系统的例子有Keck望远镜、E-ELT、TMT等<sup>[10]</sup>。

还有一种支撑方式就是六角架支撑,当需要调整镜体6个自由度时,采用这种支撑方式。这种支撑用于望远镜不同光学元件时,所需的调整精度是不同的。以JWST为例,主镜子镜及次镜均采用六角架支撑。由于整个主镜镜面的面形精度要求优于25.8 nm<sup>[19]</sup>,这就要求子镜的位移促动器输出优于10 nm<sup>[20]</sup>;而次镜用它是为实现与主镜的对准,公差要求相对较低(mm量级<sup>[43]</sup>),因此对促动器要求也较低。除了JWST的主镜和次镜外,SOAR次镜<sup>[16]</sup>、GMT次镜<sup>[29]</sup>、TMT次镜<sup>[4]</sup>也采用了这种支撑方式。

在众多望远镜的反射镜主动支撑系统中,LAMOST的反射施密特矫正镜(MA)支撑系统是一个特例。该系统既包含了薄镜面的主动变形支撑系统,又囊括了拼接镜面的主动定位支撑系统,这既是它的特色,也是工程实现的难点所在。在科研人员的努力下,该支撑系统在LAMOST上得到了成功应用,可以观测到暗达20.5星等的天体<sup>[44-45]</sup>。

### 3.3 促动器

设计师在进行促动器的选择时,通常会对促动器提出如下要求:精度、行程、尺寸、重量、刚度、承载能力、环境适应性以及成本等。根据不同的支撑系统选择相应的促动器。当然,设计师有时也会开展反向设计,根据现有的促动器选择相应的支撑系统。

对于非固定支撑系统,主动支撑除了支撑镜体重量外,还要控制镜面面形,采用的促动器必须满足如下要求:输出力大、分辨率高、轴向刚度高。液压

或者气压驱动器具有重量轻、体积小、结构较简单、技术成熟、可靠性高、使用寿命长和便于主动控制等特点,广泛应用于非固定支撑系统中。早期的双子望远镜主镜采用液压式促动器,但液压促动器存在泄漏污染等问题。2000年后,气压式促动器被广泛应用于非固定支撑系统中。MMT主镜、双筒望远镜主镜、LSST主镜、GMT主镜均采用气压式促动器<sup>[46]</sup>。

采用静定支撑系统或六角架支撑系统的子镜,需要用位移促动器来实现镜体的精密定位。促动器必须满足如下要求:行程大、分辨率高、轴向刚度高、保持力大、结构紧凑,甚至还需要有宏/微叠加驱动。仍以JWST为例,它对主镜促动器的调整要求为:精调行程 $>7\ \mu\text{m}$ ,精调步长 $<10\ \text{nm}$ ,粗调行程 $>20\ \text{mm}$ ,粗调步长 $<1\ \mu\text{m}$ <sup>[20]</sup>。电动机机械式促动器技术成熟、易于控制,而音圈式促动器具有分辨率高、体积小、控制方便等优点。这两种促动器被广泛应用于拼接镜的位移调整。

在静定系统中,为避免与支撑系统发生干涉,位移促动器一般都是安装在支撑系统下方,因此位移促动器在调整镜体的同时,也调整了支撑系统,这种布局使得促动器负载较大。为了减轻促动器的负载,设计师会在促动器中加入卸荷装置,由卸荷装置来承担镜体重量。

另外,在静定系统中,部分望远镜的主镜采用了扭曲促动器,以期对镜面面形进行小幅调整,对这类促动器的要求是:体积小、重量轻和结构简单。因此一般都选用技术成熟的电动机机械式促动器。

## 4 结 论

对望远镜的主镜、支撑系统及所用的促动器进行了梳理:纵向上,按照时间顺序介绍了几架著名的望远镜;横向上,对各望远镜所用的主镜、支撑系统及促动器进行了总结与对比,陈述了支撑系统与促动器之间的联系。未来的望远镜将朝着更大口径、更高分辨率的方向发展,来满足天文观测的需求。小块镜拼接是未来望远镜主镜的发展方向。在小块镜主动支撑方面,地基望远镜将会参照ELT、TMT等项目的工程经验,子镜采用静定支撑系统,并对该系统做出一些改进。而空基望远镜将会参照JWST的经验,子镜更多地采用六角架支撑系统。随着新材料驱动元件以及柔性机构的使用,促动器的分辨率、行程、负载等方面的技术指标将得到提升。行走压电陶瓷促动器<sup>[47]</sup>和磁致伸缩材料<sup>[48]</sup>将是精密促

动器的重要发展方向,如能与卸荷装置配合使用,可以极大地拓宽这种促动器的应用领域。

## 参 考 文 献

- [1] Shao L, Yang D H, Chen K X, *et al.* Review of mechanical structure of micro-displacement actuator for optical astronomical telescope [J]. *Progress in Astronomy*, 2009, 27(1): 70-79.  
邵亮, 杨德华, 陈昆新, 等. 光学天文望远镜用微位移驱动器机构研究综述 [J]. *天文学进展*, 2009, 27(1): 70-79.
- [2] Bai Q S, Wang Q, Zhang Q C, *et al.* High-precision micro-displacement actuator and its application in polar astronomical telescope [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2016, 46(7): 697-705.  
白清顺, 王群, 张庆春, 等. 高精度微位移促动器及其在极地天文望远镜中的应用 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46(7): 697-705.
- [3] Hu J N, Dong J H, Zhou P W. Review on active support system of large ground-based telescope primary mirror [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(1): 5-12.  
胡佳宁, 董吉洪, 周平伟. 地基大口径望远镜主镜主动支撑系统综述 [J]. *激光与红外*, 2017, 47(1): 5-12.
- [4] Anderson E H, Cash M F, Janzen P C, *et al.* Precision, range, bandwidth and other tradeoffs in hexapods with application to large ground based telescopes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6273: 62731F.
- [5] Zhu Y, Chen T, Wang J L, *et al.* Active correction of 1.23 m SiC mirror using bending mode [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10): 2551-2563.  
朱熠, 陈涛, 王建立, 等. 1.23 m SiC 主镜的本征模式主动光学校正 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2551-2563.
- [6] Wu X X, Li J F, Song S M, *et al.* Active support system for 4 m SiC lightweight primary mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2451-2457.  
吴小霞, 李剑锋, 宋淑梅, 等. 4 m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2451-2457.
- [7] Li H Z, Zhang Z D, Wang J L, *et al.* Active surface-profile correction of 620 mm thin-mirror based on flotation support [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511001.

- 李宏壮, 张振铎, 王建立, 等. 基于浮动支撑的 620 mm薄反射镜面形主动校正[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0511001.
- [8] Chen X D. Testing of a 9-points deformable mirror and its application in space camera system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1023001.  
陈新东. 9点促动变形镜性能测试及在空间相机中的应用研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1023001.
- [9] McBride D, Hudek J S, Pantelev S. Repairing stress induced cracks in the Keck primary mirror segments[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8444: 844421.
- [10] Meng J D, Franck J, Gabor G, *et al.* Position actuators for the primary mirror of the W. M. Keck telescope [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1236: 1018-1022.
- [11] Stepp L M, Huang E, Cho M K. Gemini primary mirror support system [J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2199: 223-238.
- [12] Huang E. Gemini primary mirror cell design [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 2871: 291-300.
- [13] Stepp L. Conceptual design of the primary mirror cell assembly[EB/OL]. (1993-11) [2018-04-10]. <http://www.gemini.edu/documentation/webdocs/rpt/rpt-o-g0025.pdf>.
- [14] Krabbendam V L, Ruthven G P, Bennett V P, *et al.* Active optical system design for 4.2 m SOAR telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4003: 122-135.
- [15] Neufeld C, Bennett V, Sarnik A, *et al.* Development of an active optical system for the SOAR telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5489: 1052-1060.
- [16] Neufeld C, Zolcinski-Couet M C, Keane M, *et al.* The active primary mirror assembly for the SOAR telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5489: 870-880.
- [17] Yoder P R, Jr. Opto-mechanical system design[M]. 3rd ed. Bellingham: CRC Press, 2006: 455.
- [18] Ashby D S, Kern J, Hill J M, *et al.* The large binocular telescope primary mirror support control system description and current performance results [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7018: 70184C.
- [19] Hadaway J B, Chaney D M, Carey L B. The optical metrology system for cryogenic testing of the JWST primary mirror segments[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8126: 81260P.
- [20] Warden R M. Cryogenic Nano-Actuator for JWST [C]//Proceedings of the 3dh Aerospace Mechanisms Symposium, Hampton: Langley Research Center 2006: 239-252.
- [21] Krabbendam V L, Sweeney D. The large synoptic survey telescope preliminary design overview [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7733: 77330D.
- [22] Neill D, Hileman E. LSST telescope primary/tertiary mirror cell assembly [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7733:77332Q.
- [23] DeVries J, Neill D, Hileman E. LSST telescope primary / tertiary mirror hardpoints[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7739: 77391J.
- [24] Westerhoff T, Hartemann P, Jedamzik R, *et al.* Performance of industrial scale production of ZERODUR mirrors with diameter of 1.5 m proves readiness for the ELT M1 segments[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8444: 844437.
- [25] Tamai R, Cirusuolo M, González J C, *et al.* The E-ELT program status[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9906: 99060W.
- [26] Nijenhuis J, Heijmans J, Breeje R D, *et al.* Designing the primary mirror support for the E-ELT [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9906: 990616.
- [27] Jiménez A, Morante E, Viera T, *et al.* Design of a prototype position actuator for the primary mirror segments of the European extremely large telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7733: 773354.
- [28] Gunnels S, Davison W, Cuerden B, *et al.* The giant Magellan telescope ( GMT ) structure [ J ]. Proceedings of SPIE, 2004, 5495: 168-179.
- [29] Shectman S, Johns M. GMT overview [ J ]. Proceedings of SPIE, 2010, 7733: 77331Y.
- [30] Hull C, Gunnels S, Johns M, *et al.* Giant Magellan telescope primary mirror cells [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7733: 773327.
- [31] Hull Charlie. GMT primary mirror support [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9145: 91451H.
- [32] Haruna M, Kim I, Fukushima K, *et al.* Force control technology of segment mirror exchange robot for thirty meter telescope (TMT)[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9906: 99062Z.
- [33] Nelson J, Sanders G H. TMT status report [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6267: 626728.
- [34] Ponslet E, Blanco D, Cho M, *et al.* Development of the primary mirror segment support assemblies for the thirty meter telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6273: 627319.
- [35] Thompson P M, MacMynowski D G, Sirota M J. Control analysis of the TMT primary segment assembly [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7012:

- 70121N.
- [36] Lorell K R, Aubrun J N, Clappier R R, *et al.* Design of a prototype primary mirror segment positioning actuator for the thirty meter telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6267: 62672T.
- [37] Iye M, Kodaira K. Primary mirror support system for the SUBARU telescope[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2199: 762-772.
- [38] Knohl E D. VLT primary support system [J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2199: 271-283.
- [39] Martin H M, Callahan S P, Cuerden B, *et al.* Active supports and force optimization for the MMT primary mirror[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3352: 412-423.
- [40] Blanco D R, Pentland G, Winrow E G, *et al.* SALT mirror mount: a high performance, low cost mount for segmented mirrors [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4840: 527-532.
- [41] Cui X Q. Preparing first light of LAMOST [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7012: 701204.
- [42] Gray P M, Hill J M, Davison W B, *et al.* Support of large borosilicate honeycomb mirrors[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2199: 691-702.
- [43] Barto A, Acton D S, Finley P, *et al.* Actuator usage and fault tolerance of the James Webb space telescope optical element mirror actuators [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8442: 84422I.
- [44] Cui X Q, Su D, Li G P, *et al.* Experiment system of LAMOST active optics [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5489: 974-985.
- [45] Su D Q, Wang Y N. The tracking motion of the large sky area multi-object fibre spectroscopic telescope (LAMOST) [J]. Acta Astrophysica Sinica, 1997, 17(3): 315-322.  
苏定强, 王亚楠. 大天区面积多目标光纤光谱望远镜 (LAMOST) 的跟踪运动 [J]. 天体物理学报, 1997, 17(3): 315-322.
- [46] Tang J L, Zhang J, Wang S B, *et al.* Pneumatic force actuator for telescope primary mirror support [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0623005.  
唐金龙, 张俊, 王少白, 等. 望远镜主镜气压力驱动器设计 [J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0623005.
- [47] Marth H, Lula B. Development of a compact, high load PZT-ceramic long-travel linear actuator with picometer resolution for active optical alignment applications [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6273: 62731K.
- [48] Saleem A, Ghodsi M, Mesbah M, *et al.* Model identification of terfenol-D magnetostrictive actuator for precise positioning control [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9799: 97992J.