

文章编号: 1002-1582(2023)02-0129-09

# 大型光学望远镜次镜调整机构综述

王富国<sup>1\*</sup>, 卢保伟<sup>1,2</sup>, 杨飞<sup>1</sup>

(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:** 对于大型光学望远镜来说, 主次镜之间的相对位姿有着非常严格的要求, 由于主镜质量较大, 因此常常将次镜系统设计为有多个自由度的可调整机构, 其调整效果对望远镜成像有着重要的影响。随着望远镜的口径不断增大, 应用场景的不断发展, 次镜调整机构不止要保证高精度, 还要有高负载, 其设计也越来越具有挑战性。为了寻找大口径望远镜次镜调整机构的可行方案, 针对大型光学望远镜的次镜调整机构的发展需求和不同的应用情况, 对不同的次镜调整机构进行了整理, 分类和对比, 最后对各种次镜调整机构的优势与不足进行了总结, 对大口径望远镜未来的发展进行了展望。

**关 键 词:** 大型光学望远镜; 次镜系统; 调整机构

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标识码: A

DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2023.02.020

## Review on the adjustment mechanism of the secondary mirror of large optical telescope

WANG Fuguo<sup>1\*</sup>, LU Baowei<sup>1,2</sup>, YANG Fei<sup>1</sup>

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

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For large optical telescopes, the relative poses between the primary and secondary mirrors have very strict requirements. Due to the large quality of the primary mirror, the secondary mirror system is often designed as an adjustable mechanism with multiple degrees of freedom. It has an important impact on telescope imaging. As the diameter of the telescope continues to increase and the application scenarios continue to develop, the secondary mirror adjustment mechanism must not only ensure high precision, but also have a high load, and its design is becoming more and more challenging. In order to find a feasible solution for the adjustment mechanism of the secondary mirror of the large-aperture telescope, according to the development needs and different applications of the adjustment mechanism of the secondary mirror of the large-scale optical telescope, the different adjustment mechanisms of the secondary mirror are sorted, classified and compared. The advantages and disadvantages of the secondary mirror adjustment mechanism are summarized, and the future development of large-aperture telescopes is prospected.

**Key words:** large optical telescope; secondary mirror system; adjustment mechanism

收稿日期: 2022-07-23; 收到修改稿日期: 2022-08-31

基金项目: 国家自然科学基金委员会, 国际(地区)合作与交流项目(1211001002)

作者简介: 王富国(1979—), 男, 研究员, 博士, 从事大型望远镜光机系统设计与仿真研究。

卢保伟(1995—), 男, 硕士研究生, 从事大口径望远镜光机结构设计与分析研究。

\* 通讯作者: wfg109@163.com

## 0 引言

大型光学望远镜的重要作用就是用作天文观测,为了观测到更大的宇宙空间,就需要将望远镜的口径进行提高。自从望远镜的诞生并且被伽利略用于天文观测和研究以来,已经经历了四百多年的发展历程,其口径从以前的几厘米发展到如今的几十米,目前世界上单个主镜最大的望远镜口径为 8.4m,如大型双筒望远镜(LBT)<sup>[1,2]</sup>的两个主镜均为 8.4m。美国加州大学和加州理工学院负责研制的 30m 望远镜(TMT)<sup>[3-5]</sup>,欧洲南方天文台的 42m 望远镜(E-ELT)<sup>[6-8]</sup>,由 7 块 8.4m 子镜单元组成的口径达 21m 的望远镜(GMT)<sup>[9,10]</sup>等大口径拼接式望远镜均在研究与筹建中。随着望远镜的发展,它的用途也越来越广泛,如对地外空间的人造卫星等进行普查编目与成像识别,对太空垃圾进行监视等,不再单单用于纯粹的天文观测<sup>[11]</sup>。

望远镜的核心部分为主镜,次镜,部分还有三镜。图 1 是大口径望远镜系统常常采用的同轴主望远镜光学系统,来自宇宙的光线由主镜反射到次镜,然后由次镜反射聚焦于主镜后方一点,最后由接收仪器接收光线。对于次镜系统来说,一方面,在受到自身重量和环境温度等因素的变化影响时,要求次镜能够保持其良好的面型精度;另一方面,在制造、安装、重力、传热和材料性质变化等因素的影响下,会导致主次镜间出现相对的位姿偏移,然后导致光轴倾斜,从而影响整个系统的指向精度和成像品质。因此,需要对主次镜间的相对位姿进行校正,由于主镜质量较大,移动主镜比较困难,而次镜一般较小,所以要求次镜能在多个自由度方向实现调整功能。次镜支撑和调整机构作为望远镜系统的重要组成部分<sup>[12]</sup>,其功能就是支撑和调整次镜的位姿,使次镜相对于主镜保持一个相对范围的位置和姿态,进而保证望远镜系统的正常成像<sup>[13]</sup>。

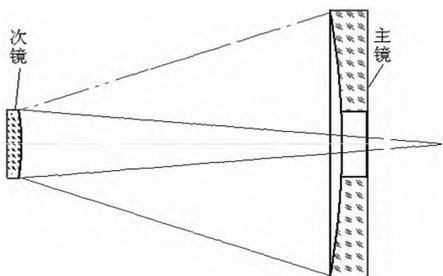


图 1 同轴主望远镜光学系统示意图

本文首先阐述了大型望远镜次镜支撑调整机构,然后介绍了世界上一些望远镜的次镜调整机构,接着对次镜调整机构的结构进行对比分析,最后针

对不同望远镜的应用场景,对次镜调整机构的设计进行总结。本文旨在通过分析不同望远镜的次镜调整机构的结构形式,结合实际情况,对次镜调整机构进行总结,为未来大口径望远镜的次镜调整机构设计提供参考。

## 1 大型望远镜次镜调整机构发展现状

### 1.1 次镜支撑调整机构

次镜机构组件通常包括三个部分:支撑整个次镜系统的桁架和环梁结构,支撑次镜筒的 spider 叶片以及次镜调整机构<sup>[14]</sup>,如图 2 所示。spider 叶片一般根据薄钢带预紧原理设计成方形结构、四翼梁式的环形结构或薄桁架结构,它主要具有结构稳定,加工和装配较为容易,以及中心遮拦较小等优点。spider 叶片结构中比较经典的是中心对称交叉分布的薄板支撑结构,其扭转刚度可以通过叶片的偏移来增加<sup>[15]</sup>。对于重量较大的主焦点式次镜系统<sup>[16]</sup>,为了支撑次镜组件的重量,spider 叶片的每根梁由上下两片叶片组成,并且垂直于镜筒的轴线方向,为了使次镜不偏斜,次镜机构的重心必须正好穿过四根翼梁的中心线。也可以将支撑 spider 叶片的大圆环结构改为八边形或者正方形,与四翼梁的叶片构成三角形结构,此时的叶片可以采用预加载的薄钢带形式。

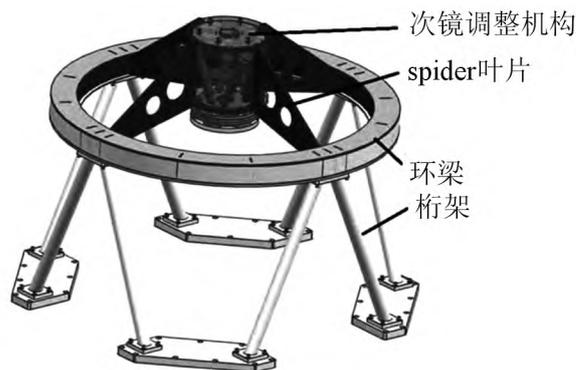


图 2 次镜机构组件

次镜调整机构的功能包括轴向离焦调整、倾斜校正、消除主次镜位置偏差引起的三阶彗差、红外调制技术中次镜快速摆动的斩波(chopping)。因此,次镜的调整机构至少要设计成 3 自由度的系统,甚至有些系统采用 5 自由度或 6 自由度的调整机构。若以光轴方向为 Z 轴方向,与 Z 轴垂直的平面为 XY 平面,则 3 自由度系统可以沿光轴方向移动调节主次镜之间的距离来调整主次镜之间的轴向离焦,绕 XY 方向的偏转来校正主次镜光轴的倾斜引起的像差,如图 3 所示;5 自由度调整机构则在 3 自由度机

构的基础上,增加了 XY 方向上的两个平移,除了可以校正轴向离焦和光轴倾斜引起的像差外,还可以校正主次镜横向偏差引起的像差,如图 4 所示;6 自由度调整机构在 5 自由度机构的基础上增加了绕 Z 轴方向的转动自由度,但由于次镜一般为圆形,故绕 Z 轴的转动自由度一般是不必要的。其中最典型的 6 自由度机构是 6 杆万向平台机构,由 D. Stewart 在 1965 年提出,因此也被称为 Stewart 平台或六足平台。它由移动平台、固定平台和六个伸缩支腿组成,支腿与上下平台通过铰链连接,通过六个支腿的伸缩可以调节移动平台的位置<sup>[17]</sup>。

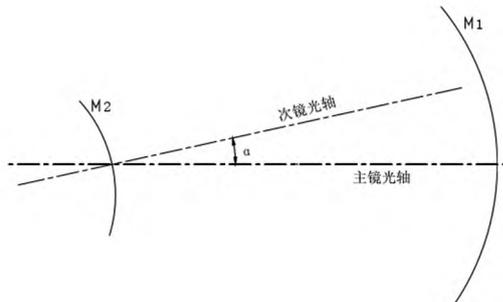


图 3 主次镜光轴倾斜偏差示意图

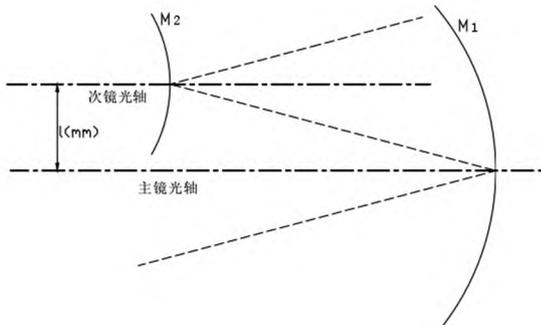


图 4 主次镜横向偏差示意图

### 1.2 国外大口径地基望远镜的次镜调整机构

#### 1.2.1 VST 望远镜

VST 望远镜(VLT Survey Telescope)<sup>[18-20]</sup>是世界上最大的可见光专用巡天望远镜,口径为  $\Phi 2.61\text{m}$ ,采用 R-C 反射式光学系统。其中次镜口径为  $\Phi 938\text{mm}$ ,为了精确地校正主次镜相对位姿之间的误差,保证主次镜间的位置和姿态保持一个范围,VLT 巡天望远镜采用 Stewart 平台对次镜进行 5 个自由度的调整,如图 5 所示。该 Stewart 平台由动平台、静平台和 6 个驱动器组成,其中,动平台与次镜支撑结构连接,静平台通过薄片梁与镜筒连接,采用直流无刷电机驱动,精密丝杠机构传动,采用万向铰链作关节。次镜系统一阶频率为  $17\text{Hz}$ ,二阶频率为  $25.4\text{Hz}$ ,三阶频率为  $71.6\text{Hz}$ 。该 Stewart 平台的 Z 向调焦范围可以达到  $\pm 7\text{mm}$ ,精度  $1\mu\text{m}$ ,X/Y 向移动行程为  $\pm 4\text{mm}$ ,精度为  $\pm 15\mu\text{m}$ ,X/Y 向

转动范围可以达到  $\pm 0.5^\circ$ ,精度  $0.8''$ 。

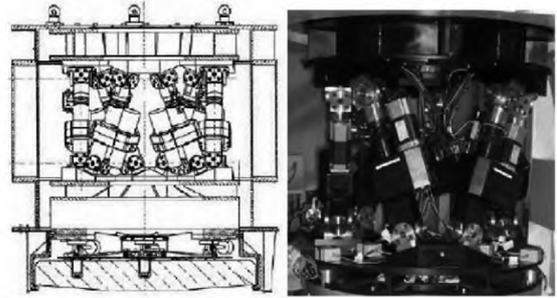


图 5 VLT 巡天望远镜次镜调节装置

#### 1.2.2 LSST 望远镜

LSST(The Large Synoptic Survey Telescope)望远镜<sup>[21-23]</sup>坐落于智利,LSST 的光学系统采用独特紧凑的三反射镜设计,主镜口径达到  $8.4\text{m}$ ,次镜口径  $3.5\text{m}$ ,三镜口径  $5.0\text{m}$ ,具有  $3.5^\circ$ 宽视场,该望远镜的次镜系统质量很大,可达  $4920\text{kg}$ ,因此采用了 72 个作动器在背部对其进行支撑,次镜系统的基频为  $14.93\text{Hz}$ 。LSST 也是采用了 Stewart 并联调整机构对其进行调节,除了它的次镜系统外,还有主镜的硬点定位系统以及相机调整系统等。由于其次镜调整机构不适合采用传统形式的六足机构,因此次镜组件的支撑与调整机构在结构形式上与传统的六足机构构型不同,采用了一种类似于六足机构的六点促动的调整方案,如图 6 所示,利用音圈电机作为驱动,来主动调整次镜组件的位姿,实现次镜的定位调整功能。

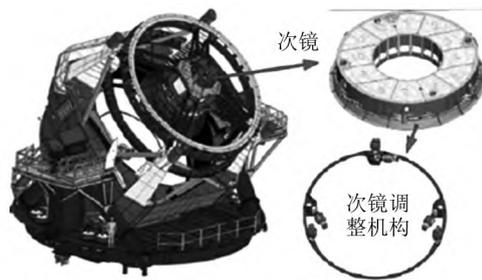


图 6 LSST 望远镜及次镜

LSST 相机的调整机构如图 7,相机安装固定频率约为  $12\text{Hz}$ ,采用 Stewart 并联平台的形式。由于相机部分的重量约为  $3060\text{kg}$ ,支撑调整机构的负载很大,同时对支撑调整机构的尺寸也有很大的限制,因此与其他大型望远镜的次镜调整六足机构不同,它的特点在于调整机构的刚度要求很高,实现了大载荷的位姿调节。它的驱动支杆采用电机驱动,经过谐波齿轮减速器减速后,带动滚珠丝杠运动的传动方案,为了减小了支杆两端的间隙,设计了一种柔性铰链来代替传统的胡克铰链,从而可以提高机构的运动精度,通过直线位移传感器对驱动支杆的长

度变化量进行测量,并设计限位开关进行行程保护。最终,相机的 Z 向调焦精度为  $4\mu\text{m}$ , X、Y 向平动精度为  $20\mu\text{m}$ , X、Y 向转动精度为  $5''$ , Z 向的转动精度为  $4''$ ,能够满足大负载的位姿调整要求。

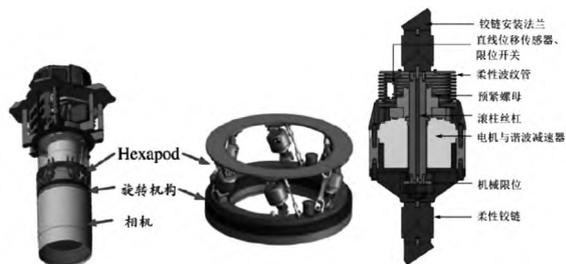


图 7 LSST 相机及 Hexapod 调整机构

### 1.2.3 E-ELT 望远镜

E-ELT<sup>[24,25]</sup>是由欧洲南方天文台(ESO)牵头的一个项目,它的光学解决方案是使用一个 39m 拼接主镜(M1)、一个 4m 凸面次镜(M2)和一个 4m 凹面三镜(M3),次镜组件的第一阶模态为 10Hz。除了对光束反射的要求外,次镜单元还应能够主动修改光学表面的位置和形状,以纠正由制造、集成、重力载荷变化、热致变形和风载荷引起的像差。E-ELT 次镜单元组件结构如图 8 所示。

为了提供镜像对准功能,整个次镜组件通过六个位置执行器相对于结构移动,这些位置执行器分布在修改后的六足几何结构中。选择蜗轮系统作为解决方案,满足  $\pm 30\text{mm}$  冲程、 $100\mu\text{m}$  绝对定位和  $10\mu\text{m}$  分辨率的规范。x 轴和 y 轴的角度精度为  $\pm 7$  弧秒,目标为  $\pm 2$  弧秒,如图 9 所示。

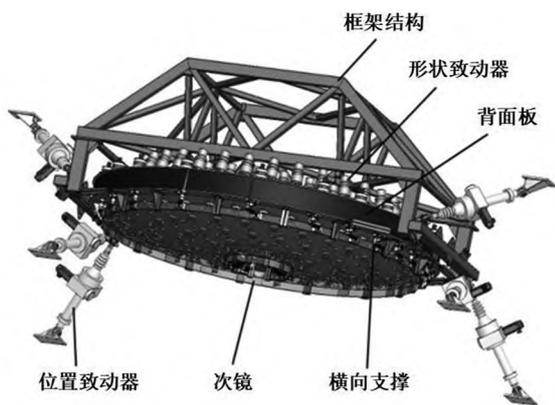


图 8 E-ELT 次镜单元组件



图 9 定位致动器组件 CAD 视图

### 1.2.4 威廉·赫歇尔望远镜(WHT)

威廉·赫歇尔望远镜<sup>[26-28]</sup>是一架口径 4.2m 的近红外反射式望远镜,WEAVE 是威廉·赫歇尔望远镜的下一代宽视场光学光谱设备。为了补偿温度和重力引起的图像退化的影响,整个主焦点校正系统将沿望远镜光轴平移。校正是通过使用一组特制的执行器完成的,被统称为焦点校正系统(FTS),由四个独立控制的焦点校正单元(FTU)、将焦点校正单元连接到中央罐体的八个叶片和承载 WEAVE 仪器的中央罐体组成。每个 FTU 能够提供  $\pm 4\text{mm}$  的最大行程,并提供足够的合力来移动 5 吨重的组件,定位精度为  $\pm 20\mu\text{m}$ ,分辨率为  $5\mu\text{m}$ 。四个 FTU 的协调运动允许光轴上  $\pm 3\text{mm}$  WEAVE 焦距调整,一个轴上  $\pm 0.015^\circ$  倾斜校正。系统的第一频率以 12Hz(扭转)评估,第二频率以 18Hz(平移)评估。WEAVE 主聚焦校正器(PFC)系统由校正器、大气色散补偿器、仪器旋转器和仪器聚焦机构组成,如图 10 所示。

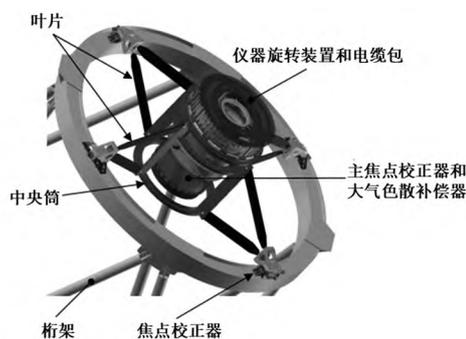


图 10 WEAVE PFC 系统部件示意图

### 1.2.5 ULTRA 项目 1m 望远镜

该项目将碳纤维增强塑料(CFRP)技术用于生产光学管组件(OTA)和天文望远镜设备的镜子。其整个头环、支架和次镜安装组件的质量小于 4kg。次镜通过简单的三点安装在次镜支架上。六支支撑管用于连接上端(头环,蜘蛛叶片和次镜支撑)到 OTA 的 dec-box。这六个支柱的长度可调,并形成六脚控制系统。因此,主镜和次镜之间的调整有 6 个自由度。支柱管使用万向节型安装座安装到头环和 dec-box 基座上,布置如图 11 所示。在 dec-box 端的支柱底部,是通过精密滚珠丝杠安装到 dec-box 万向节。滚珠丝杠组件用于调整支撑管的长度,滚珠丝杠螺母的预紧力消除了这种调整中的侧隙,滚珠丝杠是由纳米运动压电陶瓷马达驱动和控制的,图 12 说明了这种安排。精密长度编码器用于反馈位置与驱动系统的每个支柱,所有的电机,滚珠丝杠和驱动都保持在支柱管的下端。低质量的

顶端组件和光学系统允许使用这种独特的压电驱动的支柱管调整,当没有动力时,这些电机将保持位置,马达只需要在实际进行调整时供电,这最大限度地减少热耗散在附近的 OTA 和光学组件上<sup>[29]</sup>。



图 11 ULTRA 项目 1m 望远镜



图 12 驱动电机安装在支柱底部

### 1.3 我国望远镜次镜调整机构

我国最先进的大型地基光学望远镜是郭守敬望远镜(LAMOST)<sup>[30]</sup>,其口径为 4m,通过应用薄镜面主动光学技术和拼接镜面主动光学技术,使其成为大口径兼大视场望远镜的世界领先水平。对于大型光学望远镜次镜调整机构,西安光机所设计了一种 6-PSS 构型的次镜调整机构<sup>[31]</sup>,可用于微卫星可展开光学望远镜,该望远镜通光口径为 300mm,焦距 3750mm,次镜质量约为 100g。如图 13 所示,该次镜调整机构采用音圈电机驱动,用柔性关节将支腿与动平台和静平台连接,采用钛合金制造,能够承受 1800 倍的重力过载,其一阶频率约为 119Hz。能够实现 $\pm 1\text{mm}$ 的平动, $\pm 2^\circ$ 的转动,平移分辨率小于 $\pm 5\mu\text{m}$ ,转动分辨率小于 $\pm 5\text{arcsec}$ 。中科院国家天文台南京天文光学技术研究所也研制了一款 6-PSS 构型的次镜调整机构<sup>[32]</sup>,负载重 20kg,最大径向尺寸为 300mm,沿 X、Y 方向的平移范围为 $\pm 3\text{mm}$ ,沿 Z 方向的平移范围为 $\pm 6\text{mm}$ (Z 方向为光轴方向),一阶频率为 363.5Hz,如图 14 所示。

中科院长春光机所温正方等针对直径为 315mm 的次镜,采用了二维 XY 移动平台和 3 自由度 Tip/Tilt/Focus 平台串联的方式来实现次镜的 5

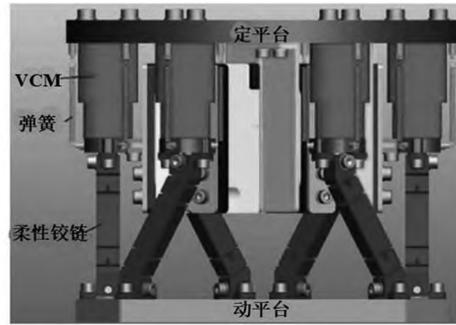


图 13 6-PSS 次镜调整机构模型

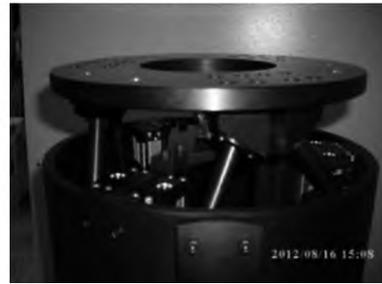


图 14 次镜调整机构样机

自由度调整<sup>[33]</sup>,设计了一套 5 自由度次镜调整机构,其平移和偏转行程分别可以达到毫米级和角分级,平移和偏转精度分别达到微米级和角秒级,一阶频率为 142.5Hz。其中 Z 向移动及绕 X、Y 轴的倾斜调整采用电机驱动,可以实现自动调整,X、Y 向的移动采用两个单向移动的平台相互垂直串联的形式,没有电机驱动,需要手动调整。其三维结构模型如图 15 所示,其中二维 XY 移动平台的功能是实现次镜在 X、Y 方向的横向误差调整,而三维 Tip/Tilt/Focus 平台则是实现次镜轴向离焦以及倾斜的调整。

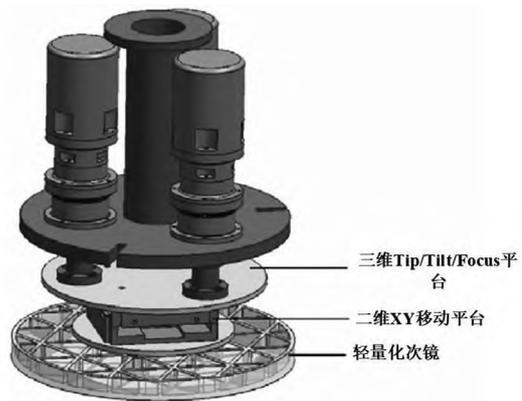


图 15 次镜系统的结构总图

### 1.4 其他望远镜的次镜调整机构

#### 1.4.1 下一代球载大口径亚毫米系列望远镜 (BLAST-TNG)

下一代气球载大口径亚毫米望远镜 (BLAST-TNG)<sup>[34,35]</sup>是一项亚毫米测绘实验,它是一个新的

2.5m 口径的卡塞格林望远镜，一阶频率小于 35Hz。BLAST-TNG 望远镜的设计由三个主要部分组成：主镜，次镜，以及一个光学台。光学台支撑主镜和次镜支柱，并安装在气球的吊舱上。主镜由一个由三个双足架组成的伪运动学架支撑。光学台还支撑着三个长支柱，它们支撑次镜组件。支柱的远端用螺栓固定在一个铝三角形结构上，称为“推板”，它支持次镜和聚焦驱动器。它采用铝制次镜，次镜安装在三个线性驱动器上，这些驱动器可以移动次镜 piston/tip/tilt，以考虑由于望远镜次镜、CFRP 支撑支柱和铝吊臂的热收缩差异而引起的望远镜焦点的变化，次镜组件总成如图 16 所示。

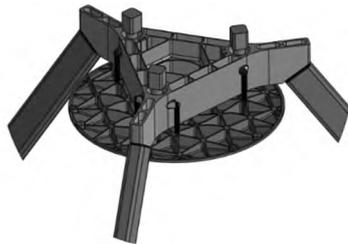


图 16 次镜组件和支撑系统

1.4.2 平流层红外天文观测站(SOFIA)

平流层红外天文观测站(Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy, SOFIA)<sup>[36,37]</sup> 是安装在波音 747SP 飞机的后机身上的一个陀螺稳定 2.5m 净口径望远镜。SOFIA 次镜需要主动控制，以便沿五个自由度对齐和频率高达 20Hz 的快速斩波。次镜的直径为 350mm，次镜机构细分为两个子系统，分别称为倾斜斩波机构(Tilt-Chopping Mechanism, TCM)，主要负责快速倾斜和斩波驱动，以及聚焦中心机构(Focus-Center Mechanism, FCM)，该机构负责聚焦和定心对准，更一般地说，负责次镜位置的所有偏移。通过具有贝塞尔滤波器特性的状态空间控制器，可实现高达 140 Hz 的扩展动态闭环带宽。索菲亚 FCM 由一个 Stewart 平台六足机构组成，能够沿所有 6 个自由度定向移动基座。为了给变速器控制模块留出空间，六足式执行器分为两个执行器组，一个带有三个垂直执行腿，另

一个带有三个水平执行腿，如图 17 所示。

TCM 概念如图 18 所示，TCM 主要包括与次镜支架质心相连的弯曲枢轴，三个执行器系统和反应补偿环。每个执行器系统由一个由直线电机驱动的杠杆组成，该直线电机将运动传输至次镜和反应补偿环。每个杠杆都有三个枢轴，中间的一个安装在底座上，另外两个分别向次镜和反应补偿环传输不耦合的垂直运动，所有的连杆都是由弹性挠曲件构成的。它的 Z 向调整范围为 ±5mm，精度 1μm，X/Y 向调整范围为 ±5mm，精度 4μm，X/Y 偏转范围为 ±0.312°，精度为 2''。

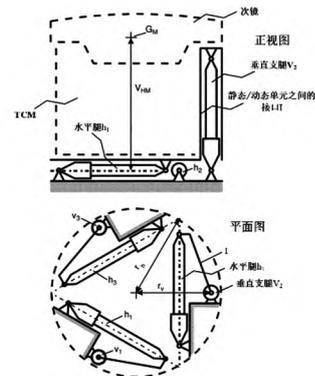


图 17 SOFIA 望远镜具有三个垂直和三个水平支腿的六足机构原理

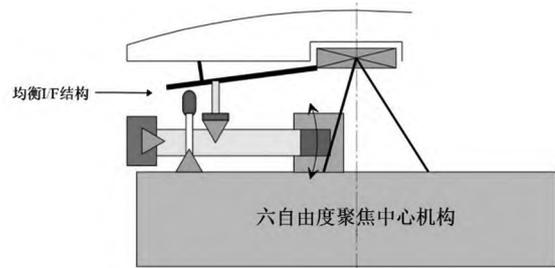


图 18 SOFIA 望远镜变速器控制模块示意图

2 总结与分析

2.1 次镜调整机构参数以及优缺点对比

综合考虑国内外大型光学望远镜的基本情况，对其采用的次镜调整机构的主要参数，即各自由度方向上的行程和精度进行对比，如表 1 所示。

表 1 次镜调整机构主要参数对比

望远镜	口径/m	次镜直径/m	Z 向行程/mm	Z 向精度/μm	X/Y 向行程/mm	X/Y 向精度/μm	偏转行程/°	偏转精度/''
VST	2.61	0.938	±7	1	±4	15	±0.5	0.8
LSST	8.4	3.5	—	4	—	20	—	5
TMT <sup>[38-40]</sup>	30	3.1	—	2	—	7	—	5
WHT	4.2	1.1	±3	20	—	—	±0.015	1.96
SOFIA	2.5	0.35	±5	1	±5	4	±0.312	2
E-ELT	39	4	—	10	—	—	—	7
VISTA <sup>[41-43]</sup>	4.1	1.024	—	1	—	1	—	0.79

上述介绍的几个望远镜的次镜调整机构,它们各有优缺点,适用于不同的工程实际。普通的直流伺服电机在精度和响应速度上较差,在负载和行程上较好,音圈电机在精度和响应速度上较好,但是行程和负载相对来说较小,压电陶瓷的控制带宽很高,精度和响应速度较好,负载也比较大,但行程却较小。滚柱丝杠在摩擦上表现较好,自锁性较差,行程

较大,维护较容易;滑动丝杠在摩擦上表现较差,自锁性较好,行程较大,维护困难。采用柔性铰链相对于普通的万向铰链,具有体积小,无机械摩擦,无间隙,运动灵敏度高的优点,具有较高的精度和稳定性。为了更好的对比望远镜次镜调整机构的优缺点,便于研究人员选择合适的次镜调整机构,将次镜调整机构的优缺点整理如表 2 所示。

表 2 望远镜次镜调整机构的优缺点

望远镜	自由度数	优点	缺点
BLAST-TNG	3	结构紧凑,简单轻便,工作空间大,且动作灵活比较容易控制	可调整自由度少
WHT	3	承载能力大,动作灵活,容易控制	可调整自由度少
中科院长春光机所于夫男 <sup>[44]</sup> 等	5	采用串并联结构结合的方式,调节效率高	结构较为复杂,控制难度较大
VST, TMT, VISTA 等	6	刚度大,结构紧凑,承载能力强,工作空间小,采用并联式机构无累计误差,精度高,动态响应好	结构复杂,较难维护和控制
LSST, E-ELT 等	6	采用修改的六足机构,承载能力极大	结构复杂,较难维护和控制
SOFIA	6	结构紧凑,工作空间小,精度高,具有快速斩波功能	结构复杂

从上述可以看出,由于 Stewart 平台具有刚度大、调整自由度多、位置误差不累计等诸多优点<sup>[45]</sup>,次镜口径在一米以下的地基大口径望远镜通常采用 Stewart 平台进行六个自由度的调整,如 VST, VISTA 等。但是当次镜口径超过 2m 或者次镜组件重量极大时,就需要能够承载极大重量,同时又可以在多个自由度进行调整的机构,如 LSST, E-ELT 等的六点促动机构, WHT 的主焦点校正机构。

特殊用途的望远镜,如空间望远镜,由于外太空的特殊环境,其次镜调整机构需要有极高的稳定性<sup>[46]</sup>;机载望远镜,由于飞机上空间有限,且飞机在飞行中由于气流的干扰,飞机可能会有急速的抖动,因此 SOFIA 望远镜次镜调整机构比较特别,可细分为两个子系统:一个主要负责次镜的快速倾斜调整,另一个主要负责次镜五自由度的位置和姿态调整;气球载望远镜不仅对整体大小有限制,而且要求减小整体重量<sup>[47]</sup>,由于气球载望远镜不能完全回收,所以对于成本也有着很大的限制,因此 BLAST-TNG 采用了三个线性驱动器对次镜的三个自由度进行调整;舰载,车载望远镜则有着极大的空间限制,因此其次镜调整机构也要求有着较小的体积,其机构设计可以参考球载或者机载望远镜。

采用特殊的材料,如 ULTRA 项目 1m 望远镜,采用 CFRP 制造的次镜及其支撑结构,大大降低了望远镜的质量,中国科学院长春光机所张岩等将碳纤维桁架式结构应用于望远镜镜筒,在保证系统刚度的情况下,降低了望远镜的质量<sup>[48]</sup>。如果将这种

特殊材料应用于机载,球载以及车载和舰载光电望远镜,将会大大降低望远镜的重量,提升望远镜的口径,对我国望远镜的发展有着重要意义。

## 2.2 次镜调整机构设计原则

次镜调整机构起着调整次镜位姿的作用,主次镜之间的相对位姿又影响着望远镜的成像质量,因此次镜调整机构对于望远镜系统来说是极为重要的组成部分。

次镜调整机构一般遵循以下几个原则:

- (1) 具有较大的刚度,足够支撑次镜及其支撑结构;
- (2) 能够在多个自由度对次镜进行调整,次镜调整机构至少要有三个调整自由度;
- (3) 具有较大的行程和较高的调整精度;
- (4) 调整结构的整体尺寸应尽量的小,以减少对光线的遮拦;
- (5) 结构应尽量简单且容易控制,反应速度快。

## 3 结 论

随着望远镜口径的不断增大,以及应用场景的增多以及特殊材料的应用,从地基到空间望远镜,再到球载,机载望远镜,或许以后还会有舰载或者车载望远镜的出现,次镜组件作为望远镜的重要组成部分,对次镜调整机构的性能要求也越来越高。设计符合发展要求的次镜调整机构仍具有很大的挑战。随着大口径望远镜的不断发展,应当对望远镜次镜调整机构进行进一步的探索,希望本文可以为我国

未来大口径望远镜次镜调整机构的研究提供一点帮助。

#### 参考文献:

- [1] Kim D, Choi H, Brendel T, et al. Advances in optical engineering for future telescopes[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4(6): 210040—210040.
- [2] Maier E R, Hinz P, D Defrère, et al. Implementing multi-wavelength fringe tracking for the Large Binocular Telescope Interferometer's phase sensor, PHASECam[J]. *Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems*, 2020, 6(3): 1.
- [3] Nelson J, Sanders G H. The status of the Thirty Meter Telescope project[J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 2008, 64: 70121A-1-70121A-198.
- [4] Yang F, Zhang X, Zhao H, et al. Relay optical function and pre-construction results of a Giant Steerable Science Mirror for a thirty meter telescope[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13991.
- [5] Mieda E, Veran J P, Rosensteiner M, et al. Multiconjugate adaptive optics simulator for the Thirty Meter Telescope: Design, implementation, and results[J]. *Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems*, 2018, 4(4): 1.
- [6] Martins C. Fundamental cosmology in the E-ELT era: The status and future role of tests of fundamental coupling stability[J]. *General Relativity & Gravitation*, 2014, 1(47): 1—19.
- [7] Evans C. The European Extremely Large Telescope[J]. *Astronomy & Geophysics*, 2018, 49(4): 422—425.
- [8] Ramsay S, Cirasuolo M, Amico P, et al. Instrumentation for ESO's Extremely Large Telescope[J]. *The Messenger*, 2021, 182: 3—6.
- [9] Jacoby G H, Bernstein R, Bouchez A, et al. Instrumentation progress at the Giant Magellan Telescope project[C]// *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI*. Edinburgh, United Kingdom; SPIE, 2016, 9908: 555—569.
- [10] Lorente N P F, Kuehn K, Lawrence J S, et al. TAIPAN: the AAO's first Starbug positioner and spectrograph (Conference Presentation)[C]// *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII*. Austin, USA; SPIE, 2018, 10702: 107021A.
- [11] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. *中国光学*, 2012, 5(04): 327—336.  
Zhang Jingxu. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(04): 327—336.
- [12] 朱嘉琦, 韩哈斯敖其尔, 张炆, 等. 采用偏置铰链的并联调整机构工作空间分析[J]. *现代制造工程*, 2019(10): 7.  
Zhu Jiaqi, Han Hasiaoqier, Zhang Yang, et al. The working space of parallel adjustment mechanism with offset joints[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2019(10): 7.
- [13] 贺磊. 大口径望远镜次镜调整机构的设计及研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.  
He Lei. Design and research on adjustment mechanism for secondary mirror of large aperture telescope[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [14] 张丽敏, 韩西达, 吕天宇, 等. 大口径望远镜次镜系统的拓扑优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(08): 262—267.  
Zhang Limin, Han Xida, Lv Tianyu, et al. Topological optimization design for SM system of large aperture telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(08): 262—267.
- [15] 赵宏超, 张景旭, 杨飞, 等. 1.2m 望远镜次镜支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2614—2619.  
Zhao Hongchao, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Secondary mirror supporting structure for 1.2 m telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10): 2614—2619.
- [16] 李玉霞, 王帅, 王建立, 等. 地平主焦点式大视场望远镜的双电机消旋系统[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(04): 749—762.  
Li Yuxia, Wang Shuai, Wang Jianli, et al. Dual-motor de-rotator system of prime focus alt-azimuth telescope with large field of view[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(04): 749—762.
- [17] 李治根, 曹小涛, 王栋, 等. 光电望远镜次镜精调 Stewart 机构优化标定方法[J]. *半导体光电*, 2017, 38(03): 451—458.  
Li Zhigen, Cao Xiaotao, Wang Dong, et al. Optimization of calibration method for the secondary mirror fine tuning stewart mechanism of optoelectronic telescope[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(03): 451—458.
- [18] Mancini D, Mancini G, Perrotta F, et al. VST project: mechanical design optimization[C]// *Astronomical Telescopes and Instrumentation*. International Society for Optics and Photonics. Montreal, Canada; SPIE, 2003: 379—388.
- [19] Schipani P, Perrotta F, Molfese C, et al. The VST secondary mirror support system[C]// *Astronomical Telescopes + Instrumentation*. International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2008: 701845-701845—10.
- [20] Schipani P, D'Orsi S, Fierro D, et al. Performance of the VST secondary mirror support system[C]// *Modern Technologies in Space and Ground-based Telescopes and Instrumentation*. SPIE, 2010, 7739: 1102—1110.
- [21] W. Gressler, J. DeVries, E. Hileman, et al. LSST Telescope and Site Status[C]// *Ground-based and Airborne Telescopes V*. SPIE, 2014: 91451A-91451A-11.
- [22] D. R. Neill, W. J. Gressler, J. Sebag. LSST Secondary Mirror Assembly Baseline Design[C]// *Ground-based and Airborne Telescopes IV*, SPIE, 2012: 84440J-84440J-19.
- [23] D. Neill, J. Sebag, W. Gressler, et al. Baseline design and requirements for the LSST hexapod and rotator[C]// *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*. SPIE, 2014: 91512B-91512B-16.
- [24] Cayrel M. E-ELT optomechanics: overview[J]. *Ground-based and airborne telescopes IV*, 2012, 8444: 674—691.
- [25] Sedghi B, Muller M, Koch F, et al. Local effects on E-ELT global performance: two examples for requirement verification[C]// *Integrated Modeling of Complex Optomechanical Systems*. SPIE, 2011, 8336: 237—249.
- [26] Tomás A, Canchado M, Casalta J M, et al. The WEAVE prime focus correction: from design to integration[C]// *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes*

- and Instrumentation III. SPIE, 2018, 10706: 27—35.
- [27] Canchado M, Romero A, Maroto, et al. The WEAVE focus translation system: from design to construction[C]// Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II SPIE, 2016, 9912: 1932—1946.
- [28] Abrams D C, Dee K, Agócs T, et al. The mechanical design for the WEAVE prime focus corrector system[C]// Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V. SPIE, 2014, 9147: 906—923.
- [29] Martin R N, Atad-Ettdedgui E, Antebi J, et al. CFRP composite optical telescope assembly for the 1 m ULTRA project[J]. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6273: 627311.
- [30] 施建荣. LAMOST 望远镜[J]. 科学通报, 2016, 61(12): 1330—1335.  
Shi Jianrong. The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope[J]. Chin Sci Bull, 2016, 61(12): 1330—1335.
- [31] Zhou nan, Li Chuang, Gaowei, et al. A secondary mirror adjustment system with hexapod structure for optical telescope application[C]// 7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Large Mirrors and Telescopes. SPIE, 2014, 92800N—92800N—7.
- [32] ZY Yue, Y Ye and BZ. Gu. Modeling and simulation of a 6-DOF parallel platform for telescope secondary mirror[C]. SPIE Ground-based and Airborne Telescopes V, 91452P—91452P—7.
- [33] 温正方. 大口径望远镜次镜调整机构的技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2010.  
Wen Zhengfang. Research on Adjustment Mechanism for Secondary Mirror of Large-Aperture Telescope[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [34] Lourie N P, Ade P A R, Angile F E, et al. Preflight characterization of the BLAST-TNG receiver and detector arrays[C]// Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX. SPIE, 2018, 10708: 52—66.
- [35] Lourie N P, Angilé F E, Ashton P C, et al. Design and characterization of a balloon-borne diffraction-limited submillimeter telescope platform for BLAST-TNG[C]// Ground-based and Airborne Telescopes VII, SPIE, 2018, 10700: 631—649.
- [36] Becklin E E. Stratospheric observatory for infrared astronomy (SOFIA)[J]. Advances in Space Research, 2005, 36(6): 1087—1090.
- [37] Lorenzo Zago, Pierre Genequand, Joseph Moerschell. Extremely compact secondary mirror unit for the SOFIA telescope capable of 6-degree-of-freedom alignment plus chopping[J]. SPIE, 1998, 13352: 666—674.
- [38] Ford V, Carter C, Delrez C, et al. Jitter studies for the secondary and tertiary mirror systems on the Thirty Meter Telescope[C]// Proceedings of SPIE—Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation. SPIE, 2014, 9151: 91512H.
- [39] Ellerbroek B, Britton M, Dekany R, et al. Adaptive optics for the Thirty Meter Telescope[J]. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 2005, 5903: 20—31.
- [40] 李宪斌. 大口径空间遥感器失调波像差次镜校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.  
Li Xianbin. Research on secondary mirror's correction technology for the misaligned wave aberration of large aperture space remote sensor[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [41] A M Mcpherson, A J Born, J P Emerson, et al. VISTA: status, performance, and lessons[J]. SPIE, 2006, 6267: 1452—1463.
- [42] S Will, E Jim, D Gavin, et al. VISTA: Design, technical overview and performance[J]. Astronomy & Astrophysics, 2015: 1—28.
- [43] Enric Martin Geijo, Joan Manel Casalta, Manuel Canchado, et al. VISTA secondary mirror drive performance and test results[J]. SPIE, 2006, 6273: 3801—3810.
- [44] 于夫男, 王刚, 许博谦, 等. 基于展开式望远镜的次镜调整结构设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(03): 27—31.  
Yu Funan, Wang Gang, Xu Boqian, et al. Design of Five-degree of freedom adjustment mechanism of secondary mirror of deployable telescope[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 37(03): 27—31.
- [45] 曹玉岩, 王建立, 陈涛, 等. 基于 Hexapod 平台的地基大型光学望远镜失调误差主动补偿[J]. 光学精密工程, 2020, 28(11): 2452—2465.  
Cao Yuyan, Wang Jianli, Chen Tao, et al. Active compensation of aberration for large ground-based telescope based on Hexapod platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(11): 2452—2465.
- [46] Glassman T, Levi J, Liepmann T, et al. Alignment of the James Webb Space Telescope optical telescope element[C]// Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. SPIE, 2016, 9904: 1292—1300.
- [47] 刘奉昌, 李威, 赵伟国, 等. 临近空间球载望远镜概述及发展趋势[J]. 激光与红外, 2019, 49(11): 7.  
Liu Fengchang, Li Wei, Zhao Weiguo, et al. Overview and developing trends of balloon-borne telescopes in near-space[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(11): 7.
- [48] 张岩, 陈宝刚, 李洪文, 等. 700mm 光学望远镜结构设计与分析[J]. 光学技术, 2020, 46(04): 385—390.  
Zhang Yan, Chen Baogang, Li Hongwen, et al. Structure design and analysis of 700mm aperture optical telescope[J]. Optical Technique, 2020, 46(04): 385—390.