

激光与光电子学进展

拼接式望远镜主镜主动支撑技术综述

吴松航^{1,2*}, 董吉洪^{1**}, 徐抒岩¹, 许博谦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 拼接式望远镜由于主镜加工难度低、运载方便和制造成本低等特点已成为未来大口径望远镜的重要发展方向之一。主动支撑技术的成功应用为拼接式望远镜共焦共相调节提供了充足的保障。针对拼接式望远镜主镜主动支撑系统, 本文首先简述了其所涉及的主要技术, 之后对具体应用实例进行归纳与分析, 最后为拼接式望远镜主镜支撑系统的设计提出建议, 对未来拼接式望远镜支撑技术的发展具有一定的参考意义。

关键词 光学器件; 拼接式望远镜; 主动支撑; 促动器

中图分类号 TN214

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0300006

Overview of Active Support Technology for Main Mirror of Segmented Telescopes

Wu Songhang^{1,2*}, Dong Jihong^{1**}, Xu Shuyan¹, Xu Boqian¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Segmented telescopes are among the expected future directions of large-diameter telescopes owing to the low difficulty of their processing technology, convenient carrying, and low manufacturing cost. The active support technology provides an important guarantee for the confocal and cophase adjustment of segmented telescopes. This study briefly summarizes the main technologies of the active support system for the main mirror of a segmented telescope and then summarizes and analyzes specific application examples. Finally, it provides design suggestions for the main mirror support system of a segmented telescope. It will provide a valuable reference for the future development of the segmented telescope support technology.

Key words optical devices; segmented telescope; active support; actuator

OCIS codes 230.4040; 220.4880; 350.6090

1 引言

随着对望远镜像质和分辨率需求的不断提高, 望远镜口径也随之不断增大, 而整体式大口径望远镜受制于镜体加工工艺、支撑结构和制造成本等,

难以满足未来的需求。以美国国家航空航天局 (NASA) 的哈勃望远镜为例, 其主镜是直径为 2.4 m、面密度为 180 kg/m² 的圆形反射镜, 仅望远镜整体的加工费用就已超过 11 亿美元。针对大口径反射镜加工中的诸多难点, 加利福尼亚大学开展

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-05-26; 录用日期: 2020-07-01

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFE020500)

*E-mail: wusonghang1994@163.com; **E-mail: dongjihong2002@sohu.com

了拼接式反射镜的相关研究工作^[1],之后这种设计理念逐渐被应用在众多大口径望远镜中。

主动支撑技术相对于被动支撑,其最大特点是在在镜面面形和镜体自由度上进行校正。自 20 世纪 80 年代以来,主动支撑技术已经被成功应用于数十架望远镜中,以满足其对面形精度和环境适应性的要求。拼接式望远镜主动支撑与整体式望远镜主动支撑在支撑特点和支撑方式上有所区别,拼接式望远镜首先要保障拼接镜在共焦共相上的可调性,然后才会考虑工作环境的影响。国内外多名学者已经对大口径望远镜主镜支撑技术和拼接式望远镜技术的发展进行了总结,如:徐宏等^[2]对大型光学望远镜主动支撑采用的技术进行了总结;胡佳宁等^[3]阐述了地基整体式望远镜的主要特点;李旭鹏等^[4]总结了拼接式望远镜在天基方面的主要应用;白清顺等^[5]对拼接式望远镜中促动器的应用特点进行了总结。但目前对主动支撑技术在拼接式望远镜中的应用进行归纳的文献报道较少。

针对拼接式望远镜主镜的主动支撑技术,本文首先对定位系统和支撑系统中采用的主要技术进行介绍;之后结合具体案例,对天基和地基拼接式望远镜中应用的主动支撑方案进行归纳与总结,以期为之后的拼接式望远镜主镜主动支撑设计提供参考。

2 主要技术

2.1 主动定位技术

主动定位是通过在主镜背部的定位点施加位

移,从而调节主镜自由度的一种方式。这种定位点一般与镜室刚性连接,刚度较大,也被称为“硬点”^[6]。有的硬点直接作用于主镜背部,有的则为采用 whiffle-tree 支撑方式的虚拟硬点,无论哪种方式,其定位原理与 D. Stewart 提出的 Stewart 平台机构类似^[7]。一般的拼接式望远镜主镜主要对三个自由度误差(tilt、tip、piston)进行校正,在需求精度较高的特殊场合也会对全自由度进行校正。图 1 为全自由度 Stewart 平台简图^[8]。

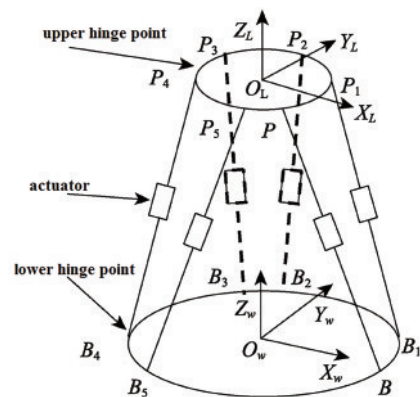


图 1 全自由度调控的 Stewart 平台机构简图^[8]

Fig. 1 Stewart platform with full freedom control^[8]

基座平台上方的每一根支杆都可以在其工作方向上自由伸缩,共同协调运动平台在全自由度上运动。对主镜自由度调节的过程相当于由运动平台的位置参数求解每根支杆输出量的运动学反解过程^[9]。设运动平台绕 x 、 y 、 z 轴的转角分别为 α 、 β 、 γ , 原点 O_L 的平移量为 (x_p, y_p, z_p) , 则运动平台的变换矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \gamma \sin \alpha \sin \beta - \sin \gamma \cos \alpha & \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & x_p \\ \cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \sin \beta \sin \gamma \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha & y_p \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

即运动平台的上铰点 P_0 经上述运动后的位置 P_i 为

$$P_i = TP_0, \quad (2)$$

式中: P_i 为 P_i 点的位置矢量; P_0 为 P_0 点的位置矢量。

根据矢量关系,运动平台上铰点 P_i 在运动平台 O_L 坐标系中的位置矢量 P_i 与中心点 O_L 在基座平台 O_w 坐标系中的位置矢量 O_L 满足

$$P_i + O_L = B_i + l_i n_i, \quad (3)$$

式中: B_i 为下铰点 B_i 在基座平台 O_w 坐标系中的矢

量位置; l_i 为下铰点 B_i 到上铰点 P_i 的杆向距离; n_i 为下铰点到上铰点沿支杆的单位矢量。由(2)、(3)式可得每根杆长为

$$l_i = \sqrt{(P_i + O_L - B_i)^T (P_i + O_L - B_i)}. \quad (4)$$

虽然 Stewart 平台的运动范围较小(一般小于 60°),但其运动精度高,没有串联机构的误差累积放大;而且,该平台的承载能力强,载荷一直被多个促动器共同分担。此外,该平台的动力源在运动平台下方减少了运动负载。Stewart 平台的这些优点被

广泛应用在拼接式望远镜主镜的主动定位系统中^[8]。

2.2 主动支撑技术

主动支撑是通过促动器直接作用于镜面代替轴向支撑杆施加校正力,实时校正镜面面形的一种方式。拼接式望远镜主镜的支撑系统需要具有一定的调节自由度,同时也需要保持高谐振频率。整体式望远镜主镜支撑系统一般采用促动点阵列的方式,这种方式虽然具有较高的局部自由度,但由于其镜体较薄且“漂浮”在支撑系统之上,故支撑系统的谐振频率普遍受限。以 2 m 级 SiC 反射镜主动支撑系统为例,其谐振频率在 17 Hz 左右^[10]。低谐振频率使得支撑系统更易受外界环境干扰而产生共振现象。

warping harness 技术早期由 Leonard 和 Alvarez 提出^[11]。该技术通过对镜面施加弯矩来校正正像散,并被首次应用于 Keck 望远镜 10 m 主镜的主动支撑系统中。该技术通过自身的柔性结构释放被动支撑中的局部自由度,从而有效地平衡了增加调节自由度和保持系统刚度之间的矛盾。

图 2 为 warping harness 结构示意图^[12]。调节时,步进电机带动丝杠旋转,促使螺母带动柔性杆上下运动,变形的柔性杆以臂长对 whiffle-tree 枢轴施加力矩,改变小三角板的平衡,从而使轴向支撑杆上的力重新分布,达到校正镜面面形的目的。若步进电机输出单位力产生的镜面变形为 $w_i(x, y)$, 根据线形叠加原理,当促动器输出 F_i 时,镜面总变形为

$$w(x, y) = \sum_{i=1}^n F_i w_i(x, y) \quad (5)$$

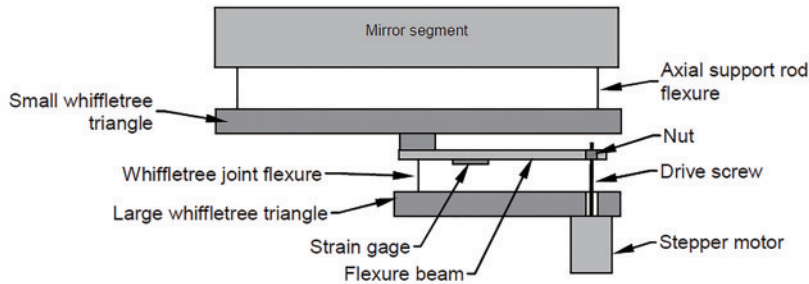


图 2 warping harness 结构^[12]

Fig. 2 Warping harness structure^[12]

设面形误差为 w_{error} , C 为 warping harness 的刚度矩阵,校正产生 $-w_{\text{error}}$ 镜面变形时,校正力 f 满足

$$Cf = -w_{\text{error}} \quad (6)$$

当面形误差用 m 项 Zernike 多项式 z_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 表达时,(6)式变为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial z_1}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial z_1}{\partial f_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial z_m}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial z_m}{\partial f_n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: n 为步进电机个数。通过最小二乘法求得校正力 f 为

$$f = -(C^T C)^{-1} C^T w_{\text{error}} \quad (8)$$

warping harness 具有结构简单、调整效率高的优点,从未来拼接式望远镜的发展趋势来看,它正成为地面拼接式望远镜面形误差校正中不可或缺的一部分^[13-14]。

2.3 主动拼接技术

主动定位技术和主动支撑技术主要是物理上调

节拼接主镜位置和面形的手段,而主动拼接技术则是主镜调整量获取和计算的主要方法。主镜的主动拼接是一个主次镜配合的复杂过程,该过程主要包括波前传感、校正量解算和校正输出三部分。波前传感主要通过 Shack-Hartmann 传感器、Zernike 传感器、位移传感器等获得主镜的位置和波相差信息。

校正量解算是根据获得的主镜信息求解每块主镜调整量的过程,此求解过程采用的算法模型主要有灵敏度矩阵法^[15]、逆向优化法^[16]和人工神经网络法^[17]等。灵敏度矩阵法假设光学系统的 Zernike 系数的变化量与主镜的失调量线性相关。主镜的调整量为

$$\Delta P = A^{-1} \Delta Z, \quad (9)$$

式中: A 为灵敏度矩阵; ΔZ 为 Zernike 系数的变化。其中灵敏度矩阵 A 和 Zernike 系数变化 ΔZ 可通过波前传感和调试实验获得。逆向优化法以主镜的调整量为优化变量,以实际 Zernike 系数和设计状态下的 Zernike 系数之差为目标函数进行优化,优化的结果就是主镜拼接过程的调整量。人工神经网络法

与灵敏度矩阵法原理类似,但神经网络法是通过训练神经网络的方式获得主镜调整量与 Zernike 系数变化之间关系的。灵敏度矩阵法和逆向优化法都是基于最小二乘法的算法,二者的模型简单,理论成熟,应用也最为广泛。

校正输出是位移促动器和力促动器具体调节的过程。在主镜拼接过程中,除了上述需要考虑的方面外,还需要考虑主镜成像位置的确定等。图 3 为 JWST 主镜拼接流程图^[18],其他拼接式望远镜(LUVOIR、E-ELT 等)的拼接过程与之大致相近。

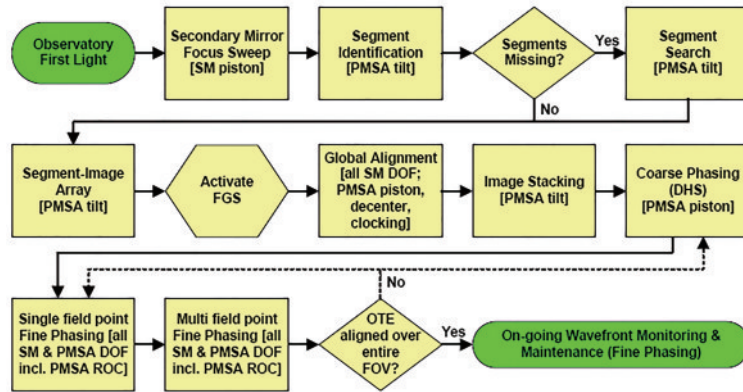


图 3 JWST 拼接过程^[18]

Fig. 3 JWST splicing process^[18]

JWST 的拼接过程主要包括:1)通过焦点扫描获得次镜位置;2)通过每块主镜微动获取每块主镜成像在视场中的位置;3)通过次镜多次移动获得主镜离焦图像;4)图像非相干叠加,配合传感器对主镜进行共焦和共相粗调;5)通过衰减镜对主镜进行共相精调。

3 主要应用案例

3.1 地基拼接式望远镜

3.1.1 Keck 望远镜

1991 年 Keck 望远镜 I 的成功建成是地基拼接式望远镜应用的一次重要探索。Keck 望远镜 10 m 主镜由 36 块厚度为 75 mm 的六边形 Zerodur 子镜拼接而成,耗资 1.3 亿美元^[19]。由于子镜较薄且轴向刚度较低,被动轴向支撑采用了三组 whiffle-tree 共 36 个柔性支撑杆的方案。Keck 望远镜的主动支撑系统采用三自由度(3DOF)主动定位与 30DOF 手动 warping harness 方案。这是 warping harness 技术在拼接式望远镜中的首次应用,之后的 TMT 与 E-ELT 都延续了这种方案。由于 Keck 望远镜中的 warping harness 主要是拼接过程的辅助手段,精度要求较低,考虑到镜体负载的影响,每组 warping harness 直接由 10 个铝制柔性弹片手动驱动。

图 4 为 Keck 望远镜 warping harness 实物图^[20]。经实验检测, warping harness 可以校正 Zernike 前四阶像差,校正后的面形误差均方根(RMS)由 110 nm

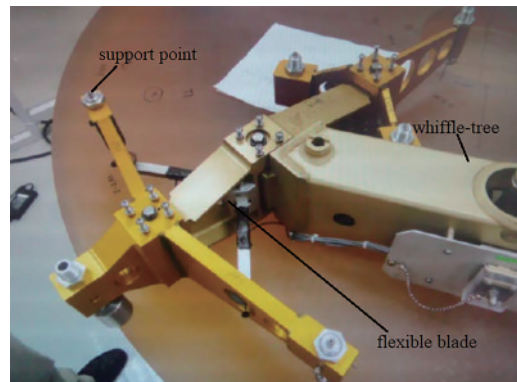


图 4 Keck 望远镜的 warping harness^[20]

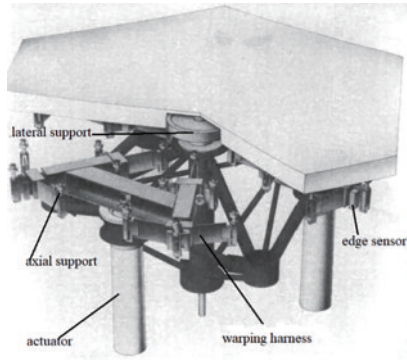
Fig. 4 Warping harness of Keck telescope^[20]

提高到了 19 nm^[21-22]。后期的 TMT 与 E-ELT 不仅提高了 warping harness 校正的像差范围,还通过电驱动方式有效提高了调整效率与精度。

如图 5 所示,在主动定位方面,由于主镜在镜面所在平面内的位移和自身光轴方向的旋转对拼接之后整体面形的影响较小,故主动定位主要对三个自由度(tilt、tip、piston)进行校正。位移促动器采用的是液压与电机混合的驱动方案,有效行程大于 1 mm,绝对重复精度为 3.8 μm,相对定位精度优于 7 nm。

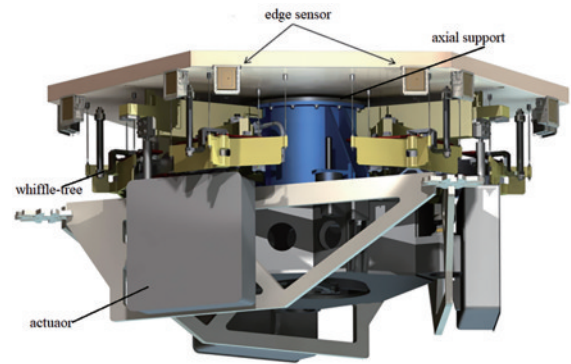
3.1.2 TMT

TMT(30 m 望远镜)由美国和加拿大等多国科研单位联合研制,主要用于可见光和红外波段观测,预计可于 2025 年建成^[23]。其主镜口径为 30 m,

图5 Keck望远镜主镜支撑结构^[19]Fig. 5 Keck telescope main mirror support structure^[19]

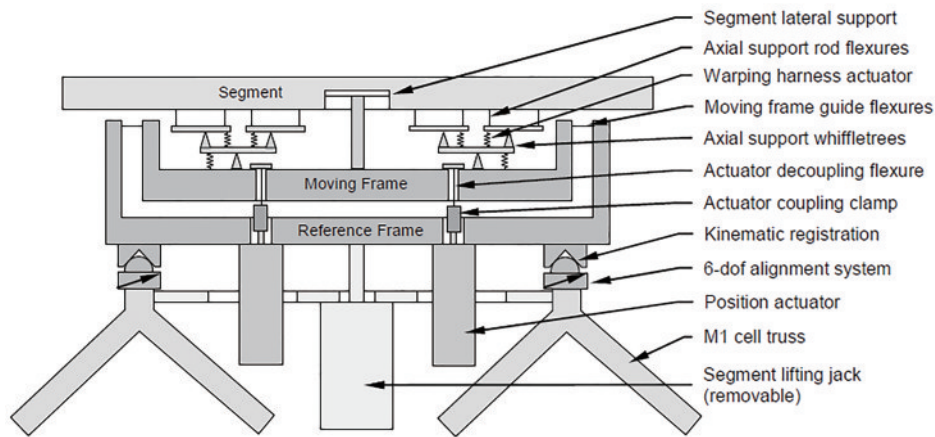
由492块六边形微晶玻璃子镜拼接而成,每块子镜的点对点距离为1.44 m,厚度为40 mm,质量约为250 kg。TMT的主镜主动支撑系统继承于Keck望远镜的主镜主动支撑系统,采用的是3DOF主动定位与18DOF自动warping harness的方案。

图6为TMT主镜支撑示意图^[12],3个位移促动器安装在固定框架上,输出轴安装在可动三角板上,可对3个自由度(tip、tilt、piston)进行调整。为提高卸载能力,TMT的位移促动器主要由音圈电机、输出轴和卸载弹簧组成。卸载弹簧主要用来分担

图6 TMT主镜支撑结构^[12]Fig. 6 TMT main mirror support structure^[12]

镜体重力,从而降低音圈电机的损耗。促动器的有效行程大于4.3 mm,精度为1.2 nm^[20,24]。

图7为TMT支撑原理图^[12]。TMT对Keck的warping harness方案进行了优化,驱动方式为力促动器驱动,驱动位置由三角架改为位于二级whiffle-tree和三级whiffle-tree的枢轴,有效提高了warping harness的像差校正范围和校正精度。实验验证后可知,该结构可以有效地对离焦、像散和彗差等低阶像差进行校正,校正后的面形误差RMS在20 nm左右^[12,25-26]。

图7 TMT支撑原理^[12]Fig. 7 Support principle of TMT^[12]

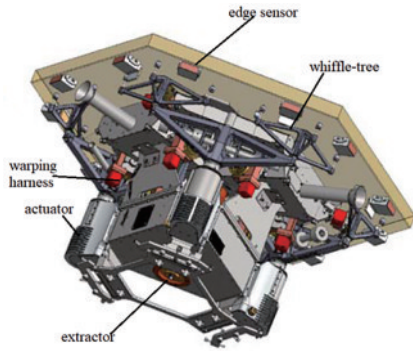
3.1.3 E-ELT

E-ELT(欧洲超大型望远镜)由欧洲南方观测站负责研制,主要用于可见光、近红外和中红外波段观测,预计于2025年建成^[27-28]。其主镜口径为39 m,主镜由798块点对点距离为1.45 m、厚度为50 mm的微晶玻璃六边形子镜组成。E-ELT主镜支撑系统的设计主要继承了TMT和Keck望远镜的主镜支撑系统。该望远镜采用的是3DOF主动定

位与27DOF自动warping harness方案。

图8为E-ELT的主镜支撑结构示意图^[28],下方的三个位移促动器主要用于三个自由度(tip、tilt、piston)的主动定位。为了保障精度,促动器采用的是步进电机-丝杠粗调控和音圈电机微调的组合调控方式。

这种方式的最大特点是在拥有大行程调整范围的同时保持纳米级定位精度。测试结果表明,该

图 8 E-ELT 主镜支撑结构^[28]Fig. 8 E-ELT main mirror support structure^[28]

促动器的定位误差小于 3 nm^[29]。

E-ELT 中每个 whiffle-tree 三角板的枢轴上有 3 个 warping harness 组件,共有 9 组 warping harness。图 9 为 E-ELT 的 warping harness 结构图^[25]。warping harness 由步进电机带动扭簧引起弹性变

图 9 E-ELT 的 warping harness^[25]

形,从而使柔性支撑杆上的力重新分布,调节镜面面形。检测结果表明,主镜未校正前的面形误差 RMS 累计为 160 nm,校正之后为 10 nm^[30]。

warping harness 基于 whiffle-tree 结构来传递校正力,但作用方式不同,所得到的校正效果也有所不同。表 1 为 Keck、TMT 和 E-ELT 中 warping harness 的对比。

表 1 Keck、TMT 与 E-ELT 中 warping harness 的应用对比

Table 1 Comparison of warping harness in Keck, TMT, and E-ELT

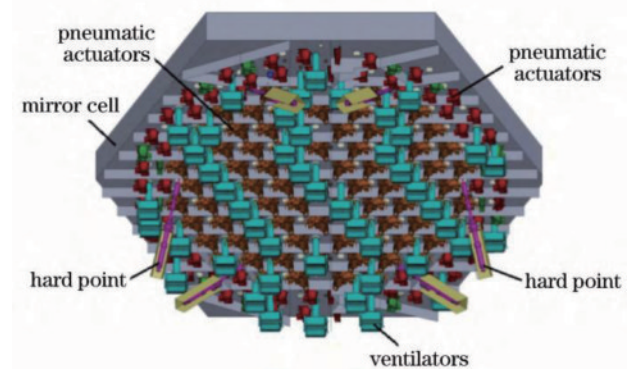
Name	Action position	Action method	Adjustment range	Adjustment DOF
Keck	Delta frame	Manual/elastic blade	Four items of Zernike	30
TMT	Pivot of delta frame	Displacement actuator/elastic blade	Six items of Zernike	18
E-ELT	Pivot of delta frame	Force actuator/torsion spring	Six items of Zernike	27

Keck 通过手动调节弹性叶片使三角架支撑杆上的力发生变化,TMT 通过位移促动器输出力矩到三角架枢轴上来改变支撑力的分布,而 E-ELT 则是通过力促动器和扭簧输出扭矩到三角架枢轴上来改变支撑力的分布。三者都可以调整低频面形误差,但达到的调整精度有所不同:E-ELT 的精度最高,Keck 的精度最低。

3.1.4 GMT

GMT(巨型麦哲伦望远镜)主要用于可见光和红外成像,预计于 2025 年建成。其 25 m 主镜由 7 块直径为 8.4 m 的圆形硼硅玻璃(E6)子镜组成。为减轻重量和保持刚度,子镜采用了蜂窝三明治结构^[31]。GMT 为目前子镜口径最大的拼接式望远镜,因此主镜采用了一套较为复杂的主动支撑系统。

图 10 为 GMT 的主动支撑示意图^[32],其采用了“6DOF 与 165DOF 促动器阵列”方案,主要是为了对主镜提供足够的支撑刚度。单个位移促动器的刚度为 172 N/ μm ,组合刚度为 580 N/ μm 。由于主镜的口径较大,warping harness 无法充分保障调节自由度,因此 GMT 的主动支撑采用的是促动器阵列方式。GMT 的促动器阵列由 165 个气压式促动

图 10 GMT 主镜主动支撑结构^[32]Fig. 10 GMT main mirror active support structure^[32]

器组成,其中的 80 个为单轴促动器,其余的为三轴促动器^[32]。

当气压式促动器工作时,气体经气阀进入气缸推动活塞,从而输出校正力。每个气压式促动器的行程为 ± 30 mm,可产生 2700 N 的推力和 1950 N 的拉力。经测试,当子镜分别在 tilt 和 tip 方向转 60° 天顶角时,主动支撑可以调整的面形误差 RMS 分别为 10 nm 和 11 nm^[33]。这种主动支撑方式虽然调节自由度较高,但支撑刚度受限,一般都需要在被动

支撑方面进行补偿^[34]。

3.1.5 LAMOST

LAMOST(大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜)中包含了两块拼接式光学元件:一块是由 24 块六边形子镜组成的反射施密特改正板,口径为 5.72 m;另一块是由 37 块六边形子镜组成的球面主镜,口径为 6.67 m^[35]。LAMOST 与其他拼接式望远镜不同,其非球面反射施密特改正板是由平面镜主动支撑调节而成的,这就要求主动支撑在具有充足调节自由度的同时子镜轴向刚度较小。

图 11 为 LAMOST 反射施密特改正板主动支撑示意图^[35]。每块子改正板的厚度为 25 mm,背后有 34 个单轴力促动器进行面形调控,并由 3 个位移促动器进行自由度调控,调整面形误差 RMS 为 21.7 nm。

LAMOST 的球面主镜只有主动定位系统,该主动定位系统采用了与改正板相同的调节方式。

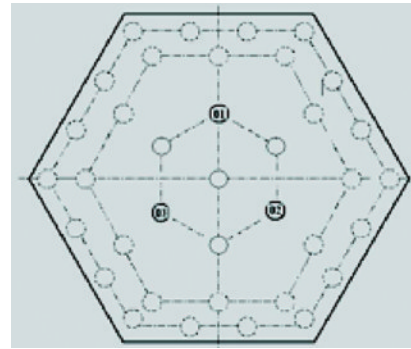


图 11 LAMOST 反射施密特改正板主动支撑结构^[35]

Fig. 11 LAMOST Schmidt correction plate active support^[35]

这是因为目前的主镜主要进行的是共焦调控^[36-37]。

3.2 天基拼接式望远镜

3.2.1 JWST

JWST(詹姆斯韦伯望远镜)^[38-40]的主镜口径为 6.6 m,由 18 块点对点距离为 1.52 m 的铍镜组成。

图 12 为 JWST 的主镜支撑图^[40]。

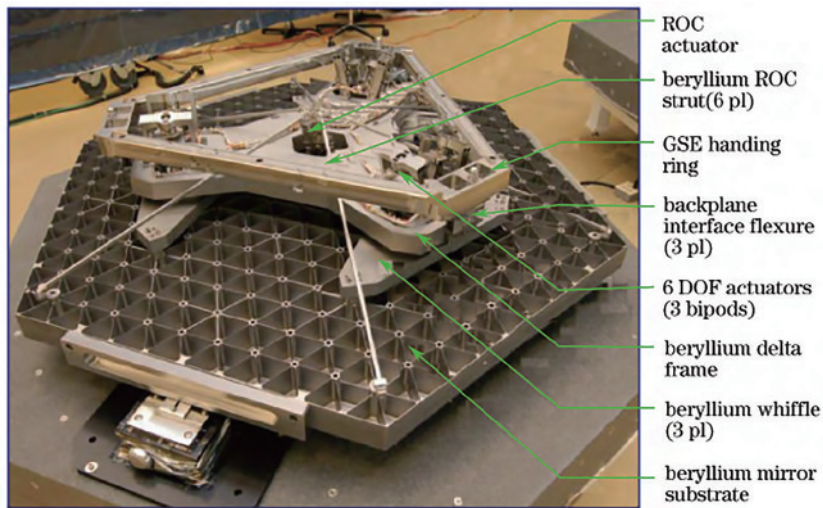


图 12 JWST 主镜支撑结构^[40]

Fig. 12 JWST main mirror support structure^[40]

为便于运载,JWST 的主镜采用了在轨展开方案。当望远镜到达第二拉格朗日点时,主镜两翼依次从后面展开,并与主体部分拼接。其主镜主动定位系统主要由背部的 6 个位移促动器组成。位移促动器采用了粗精结合的驱动方式,步进电机和丝杠构成粗输出,偏心轴和柔性铰链构成精输出^[40-41]。测试后可知,位移促动器的输出精度为 7 nm,有效行程为 21 mm。为消除子镜加工和测试中重力的影响,JWST 的主动支撑系统还采用了一种单驱动的伞状曲率调整机构。如图 13 所示,该机构由中心驱动器和周边 6 根等长连杆组成,调节时中心促动

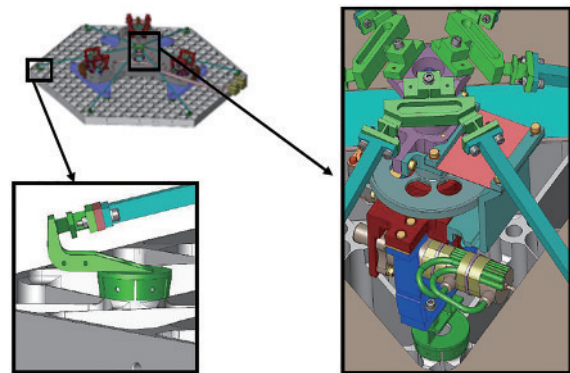


图 13 JWST 主镜主动支撑结构^[42]

Fig. 13 JWST main mirror active support structure^[42]

器对镜体中心施加作用力,周边连杆对镜体施加反作用力,二者构成的力矩使镜面发生变形^[42]。

JWST 主动支撑系统中伞状曲率调整机构的主要调节参数如表 2 所示^[42-44]。

表 2 JWST 曲率调整机构的主要调节参数

Table 2 Main adjustment parameters of radius of curvature actuation system in JWST

Description	Capability
Adjustment range capability/mm	>10 or <-10
Adjustment resolution/mm	0.0004
Induced surface deformation	24 nm RMS per mm ROC actuation

Note: ROC represents radius of curvature.

3.2.2 LUVOIR

LUVOIR (大型紫外线光学红外测量仪)作为 NASA 未来重要的太空计划,根据运载方式的不同有两种方案^[45-46]。LUVOIR-A 主镜的有效通光口径为 13.5 m,由 120 块六边形超低膨胀(ULE)石英玻璃子镜拼接而成;LUVOIR-B 主镜的有效通光口径为 6.7 m,由 55 块六边形 ULE 石英玻璃子镜拼接而成。两种方案的主镜支撑系统基本相同,图 14 为 LUVOIR 主镜支撑结构示意图^[47]。

LUVOIR 的主动支撑系统继承于 JWST,不同的是,LUVOIR 并没有采用曲率调节机构。这主要是由于 LUVOIR 镜体采用了蜂窝三明治结构,与 JWST 的开放式轻量化结构相比,主镜整体刚度更

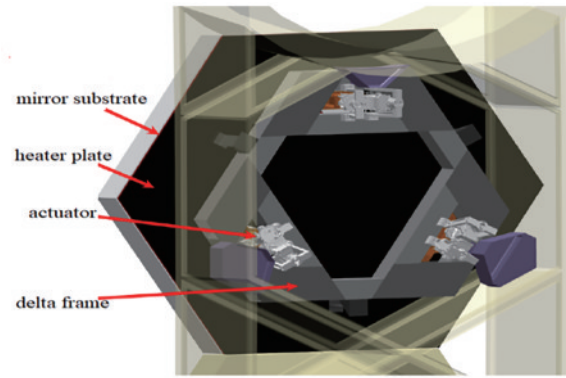


图 14 LUVOIR 主镜支撑结构^[47]

Fig. 14 LUVOIR main mirror support^[47]

大,受重力的影响更小^[48-49]。另外,LUVOIR 的光学观测波段要求主动调节误差达到 pm 级,对此,LUVOIR 进行了以下改进:1)位移促动器采用步进电机与压电陶瓷联合驱动的方式,在保留 mm 级驱动范围的同时具有 pm 级定位精度;2)子镜背后采用了以温控板为主的更为苛刻的温控系统,控制误差小于 1 mK;3)子镜边缘采用了与 TMT 类似的边缘传感器方案,可以实时反馈自由度信息^[47,50-51]。

4 总结与分析

4.1 对比分析

拼接式望远镜主镜主动支撑方案的选择需要考虑诸多因素的影响,表 3 为部分拼接式望远镜主镜参数的统计结果。

表 3 部分拼接式望远镜主镜参数

Table 3 Main mirror parameters of some segmented telescopes

Name	Keck	GMT	TMT	E-ELT	LAMOST	JWST	LUVOIR-A
Working environment	Foundation	Foundation	Foundation	Foundation	Foundation	Space-based	Space-based
Number	36	7	492	798	37	18	120
Material	Zerodur	E6	Glass-ceramic	Glass-ceramic	Glass-ceramic	Be	ULE quartz glass
Diameter /m	1.8	8.4	1.2	1.45	1.1	1.52	1.412
Thickness /mm	75	704	40	50	75	59	
Supporting system/ Adjustment DOF	WH/30	165	WH/18	WH/27	—	ROCAS	—
Positioning system	3DOF	6DOF	3DOF	3DOF	3DOF	6DOF	6DOF
Positioning accuracy	3.8 μm	1 μm	1.2 nm	3 nm	—	3 nm	1 pm
Adjustment method	Manual position	Auto	Auto	Auto	Auto	Auto	Auto
Correction effect(RMS)	19 nm	10 nm	30 nm	10 nm	16.6 nm	20 nm	10 pm

Note: WH represents warping harness and ROCAS represents radius of curvature actuation system.

从上述参数的分析对比可以得到:

1)主动定位系统在拼接式望远镜主动支撑方

案中至为重要。拼接式望远镜使用的是多个小口径镜面复合的大口径镜面,因此镜面间的自由度误

差会直接影响拼接效果。天基拼接式望远镜一般需要对全自由度进行调节,而地基拼接式望远镜主要对三个自由度(tip、tilt、piston)进行调节,这主要是因为二者在校正精度上有所区别。

2)主动支撑系统主要被应用于地基拼接式望远镜主镜的调节。这主要是由于地基望远镜主动支撑系统校正的面形误差主要来源于自重变形和环境温度的影响,而天基望远镜的工作环境较为稳定,并且温控系统较为优良。主动支撑系统方案的选择还受拼接子镜孔径的影响,大口径拼接子镜的刚度较小,更易受外界环境的影响,一般采用促动点阵列的支撑;而小口径拼接子镜多采用一种“半主动”的支撑方式——warping harness。warping harness系统在保留多自由度调节的同时,还具备被动支撑的高谐振频率,其调节精度与调节自由度(即被动支撑的柔性支撑点数)直接相关。一般情况下,随着调节自由度增大,调节精度增加。warping harness的驱动方法由最开始的手动调控发展到了现在的步进电机调控。随着驱动技术和调节算法的不断成熟,warping harness已成为地基拼接式望远镜主镜主动支撑系统的主流驱动方法。

3)特殊应用目的也是主动支撑系统方案选择的考虑因素。例如,LAMOST的反射施密特改正板通过主动支撑的手段在薄平面拼接面上生成非球面,这需要主动支撑具有较大的调节自由度,此时,即使是小口径主镜也应优先考虑促动点阵列的支撑方案。

综上所述,与整体式主动支撑系统相比,拼接式望远镜主动支撑系统具有结构简单、调节方便的优势,其设计方案是在镜体结构、工作环境和应用目的等多个因素反复优化的结果。

4.2 其他建议

在拼接式望远镜主镜主动支撑的设计中,除了满足设计指标外还应考虑以下主要特性:

1)足够的比刚度。高刚度和小质量是支撑结构的有效保障,尤其是天基主动支撑系统。

2)可替换性。要求拼接子镜与背后支撑系统组合为一个单独的子系统,该子系统与背板之间衔接简单,彼此之间没有过多干涉。

3)支撑材料的热膨胀系数与主镜材料接近。相近的热膨胀系数可以防止温度变形带来的局部应力对支撑效果产生影响。

4)输出稳定。主动支撑系统除了可以需要达

到输出效果外,还需要保障输出精度的稳定性,以便于进行长时间观测。

5 结束语

拼接式望远镜由于主镜分块化的结构使其较传统的整体式望远镜有制造成本低、加工技术成熟和子镜可替换等特点,现已成为大口径望远镜的主流设计理念之一。同时,分块化结构所带来的共焦共相调节需求对子镜的主动支撑系统也带来考验。拼接式望远镜主镜主动支撑系统的设计需要在主动调节自由度和整体刚度间进行取舍。本文首先介绍了拼接式望远镜主镜主动支撑系统中应用的主要技术,之后结合具体应用案例分析现有主动支撑系统的主要技术特点,最后对拼接式望远镜主镜主动支撑系统的设计进行了总结和建议,可为未来拼接式大口径望远镜主镜支撑系统的设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] Mast T S, Nelson J E. Fabrication of large optical surfaces using a combination of polishing and mirror bending [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1236: 670-681.
- [2] Xu H, Yang L W, Yang H S. Recent progress of active support system for large optical telescope primary mirror [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 100002.
徐宏, 杨利伟, 杨会生. 大型光学望远镜主镜主动支撑系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 100002.
- [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] Li X P, Shi J F, Wang W, et al. Review on splicing structure technology of large aperture space primary mirror [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030002.
李旭鹏, 石进峰, 王炜, 等. 大口径空间主反射镜拼接化结构技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030002.
- [5] 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.
- [6] Meeks R L, Ashby D, et al. Super hard points for the large binocular telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 733: 1-13.
- [7] Mohammed A M, Li S. Dynamic neural networks for kinematic redundancy resolution of parallel stewart platforms [C]// *IEEE Transactions on Cybernetics*. New York: IEEE Press, 2016: 1538-1550.
- [8] Li Q, Yuan J Z, Liu F. Application of 6-DOF motion platform based on position inverse solution [C]// *Proceedings of the 23rd Annual Conference on New Network Technologies and Applications in 2019*. [S.l.:s.n.], 2019: 289-292.
- 李青, 袁家政, 刘飞. 基于位置反解的 6-DOF 运动平台应用[C]//2019 年第二十三届网络新技术与应用年会论文集. [出版地不详: 出版者不详], 2019: 289-292.
- [9] Wang F Q, Yuan X Q, Jia H D, et al. Simulation analysis of six degrees of freedom motion platform based on Pro/E[J]. *China High-Tech*, 2019(10): 12-15.
- 王富强, 袁学庆, 贾洪铎, 等. 基于 Pro/E 的六自由度运动平台仿真分析[J]. *中国高新技术*, 2019(10): 12-15.
- [10] Gao Z C, Hao L, Wang F G, et al. Design and optimization of active adjusting lateral support mechanism for 2 m telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0814001.
- 高则超, 郝亮, 王富国, 等. 2 m 级望远镜主动调节侧向支撑机构设计与优化[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(8): 0814001.
- [11] Mast T S, Nelson J E. Fabrication of the keck ten meter telescope primary mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 1985, 0542: 48-59.
- [12] 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.
- [13] Gong X F, Chen X, Chen Z. Layout optimization of warping harness for segmented-mirror telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(2): 364-370.
- [14] An Q C, Zhang J X, Yang F, et al. Performance improvement of the Giant Steerable Science Mirror prototype: calibration, added-on damping treatment, and warping harness [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(36): 10009-10015.
- [15] Hvisc A, Burge J. Alignment analysis of four-mirror spherical aberration correctors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7018: 701819.
- [16] Kim S, Yang H S, Lee Y W, et al. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5059-5068.
- [17] Oteo E, Arasa J. New strategy for misalignment calculation in optical systems using artificial neural networks [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(7): 074105.
- [18] Contos A R, Scott Acton D, Atcheson P D, et al. Aligning and maintaining the optics for the James Webb Space Telescope (JWST) on-orbit: the wavefront sensing and control concept of operations [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6265: 62650X.
- [19] Mast T S, Nelson J E. The status of the W. M. Keck Observatory and ten meter telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 1986, 0571: 226-232.
- [20] Han L C. Study on correction of semi-active optics technology for large optical flat mirror based on TMT tertiary mirror [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2017.
- 韩琳楚. 基于 TMT 三镜的半主动光学面形校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [21] Jerry E, Terry S. The construction of the Keck Observatory [J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1236: 47-45.
- [22] Troy M, Chanan G, Roberts J. On-sky measurement accuracy of Keck telescope segment surface errors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9145: 91451Q.
- [23] Han L C, Liu C Z, Fan C B, et al. Low-order aberration correction of the TMT tertiary mirror prototype based on a warping harness [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): 1662-1670.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Thompson P M, MacMynowski D G, Sirota M J. Control analysis of the TMT primary segment assembly [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7012: 70121N.
- [27] Westerhoff T, Hartmann 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.
- [28] Nijenhuis J, Heijmans J, den Breeje R, et al. Designing the primary mirror support for the E-ELT [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9906: 990616.
- [29] 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.
- [30] Briguglio R, Pariani G, Xompero M, et al. A possible concept for the day-time calibration and co-phasing of the adaptive M4 mirror at the E-ELT telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 1070: 1070379.
- [31] Hull C, Gunnels S, Johns M, et al. Giant Magellan Telescope primary mirror cells [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7733: 773327.
- [32] Antonin H, Scott A, Guido A, et al. The giant magellan telescope adaptive optics program [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8847: 884711.
- [33] McLeod B, Catropa D, Durusky D, et al. The acquisition, guiding, and wavefront sensing system for the Giant Magellan Telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 1070: 107001T.
- [34] George Z, Rebecca B, Brian W, et al. Systems engineering for the Giant Magellan Telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10705: 1070501.
- [35] Yao Y G. Establishment and testing of LAMOST observation and control system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
姚仰光. LAMOST 观测控制系统的建立与测试 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [36] Yao S, Wu X B, Ai Y L, et al. The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST) quasar survey: the fourth and fifth data releases [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2019, 240(1): 6.
- [37] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST) [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, 12(9): 1197-1242.
- [38] Venot O, Parmentier V, Blečić J, et al. Global chemistry and thermal structure models for the hot Jupiter WASP-43b and predictions for JWST [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2020, 890(2): 176.
- [39] Karpenko M, King J T, Dennehy C J, et al. Agility analysis of the James Webb Space Telescope [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2018, 42(4): 810-821.
- [40] Mark C. Status of the James Webb Space Telescope (JWST) [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7010: 70100L.
- [41] 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.
- [42] Chaney D M, Hadaway J B, Lewis J A. Cryogenic radius of curvature matching for the JWST primary mirror segments [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7439: 743916.
- [43] Rober M. Cryogenic nano-actuator for JWST [C]// Proceedings of the 38th Aerospace Mechanisms Symposium. [S.l.:s.n.], 2006: 239-251.
- [44] Wells C, Coon M. Optomechanical integration and alignment verification of the James Webb Space Telescope (JWST) optical telescope element [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7433: 743303.
- [45] Sang C, Michael J, Marcel B. LUVUOIR backplane thermal architecture development through the composite CTE sensitivity study [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10398: 103980D.
- [46] Lou J Z, Redding D C, Nissen J A, et al. LUVUOIR primary mirror segment alignment control with joint laser metrology and segment edge sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 1069: 1069840.
- [47] Lee F, Matthew B, Scott K, et al. Ultra-stable segmented telescope sensing and control architecture [EB/OL]. [2020-04-29]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20170007445>.
- [48] Gong Q, Bolcar M R, Corsetti J A, et al. Optical design of the extreme coronagraph for living planetary systems instrument for the LUVUOIR mission study [J]. Journal of Astronomical Telescope Instrument and Systems, 2019, 5(2): 025002.

- [49] Bolcar M R, Aloeos S, Bly V T, et al. The large UV/Optical/Infrared surveyor (LUVOIR) : decadal mission concept design update [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10398:1039809.
- [50] Bolcar M R, Aloeos S, Bly V T, et al. The Large UV/Optical/Infrared Surveyor (LUVOIR) : decadal mission concept design update [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1039: 1039809.
- [51] James C, Matthew B, Julie C, et al. Overview of the optomechanical design of the LUVOIR instruments [EB/OL]. [2020-04-29]. [https://ntrs.nasa.gov/search.jsp? R=20190030689](https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20190030689).