

3.5 m 口径空间望远镜单块式主镜技术展望

李宗轩*, 金光, 张雷, 孔林

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要:主反射镜的口径大小与结构形式在极大程度上决定了空间望远镜的技术难度与经济成本。为了实现更高的空间分辨率与更强的信息收集能力,各国研制的空间望远镜主反射镜的口径朝着越来越大的趋势发展,从“哈勃空间望远镜”(HST)的2.4 m,到“新世界观测者空间望远镜”(NWO)的4 m,甚至到“先进技术大口径空间望远镜”(ATLAST)的8 m,无不体现了对超大口径空间观测能力的追求。而单块式主镜凭借其支撑技术的可靠性与经济性,正成为超大口径空间望远镜的首选。通过对国外研制的超大口径空间望远镜的论述与分析,探讨了目前空间望远镜中超大口径主反射镜的关键技术与发展方向。针对目前国内运载能力与光学制造加工能力的极限,提出了建造基于3.5 m口径主镜的空间望远镜设想。

关键词:空间望远镜;主反射镜;超大口径;单块;反射镜支撑

中图分类号:TH751.1;V474.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20140704.0532

Overview and outlook of monolithic primary mirror of spaceborne telescope with 3.5 m aperture

LI Zong-xuan*, JIN Guang, ZHANG Lei, KONG Lin

(National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: lizongx@126.com

Abstract: The aperture and structural configuration extremely determine the technical difficulty and economic cost of a spaceborne telescope. In order to realize higher spatial resolution and capacity of acquisition of information, the aperture of primary mirror of space telescope abroad is getting larger and larger. From the 2.4 m aperture of the Hubble Space Telescope (HST), to the 4 m aperture of the New World Observer (NWO), up until to the 8-m aperture of the Advanced Technology Large Aperture Space Telescope (ATLAST), all without exception embodies pursuing the high capacity of ultra-large aperture observation. Monolithic primary mirror is becoming the first choice of ultra-large aperture space telescope by right of its technical reliability and economical efficiency. Through analysis and discussion on developing ultra-large aperture space telescopes abroad, the key techniques and trend of development of ultra-large aperture primary mirror are investigated. Then we proposed the assumption to build a 3.5 m aperture space telescope with a monolithic primary mirror based on

收稿日期:2014-02-21;修订日期:2014-04-23

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2012AA121502)

the state-of-art capacity of launching and optical fabrication in China.

Key words: space telescope; primary mirror; ultra large aperture; monolithic; mirror support

1 引言

空间望远镜由于不受地面大气扰动、吸收与散射的影响而具有极其优越的空间观测能力。高分辨率、多光谱空间望远镜能使天文学家以前所未有的洞察力,探索如下科学问题的答案^[1]:宇宙如何诞生又如何发展;哪些物质与基本规律影响着星系形成;是否存在适宜人类居住的类地行星;地外生命是否存在而又如何起源。

越来越高的空间分辨率要求空间望远镜设计的口径越来越大。在运载器运载能力与载荷舱整流罩内包络空间允许的前提下,实现最大的主反射镜口径尺寸是目前实现空间望远镜高分辨率与高信息收集能力的必然技术路线^[2-4]。1990年,由美国国家航空航天局(NASA)规划并发射入轨的哈勃空间望远镜(HST)采用口径为2.4 m的单块式主反射镜,并经过在轨校正维护后获得清晰的图像与诸多科学新发现。詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST)作为NASA的第二代空间望远镜,其口径为6.5 m,采用的可展开分块拼接式主反射镜技术先进而复杂,整个项目成本高昂并不断增加预算,进度缓慢,发射日期也推至2018年^[5]。NASA在下一代空间望远镜的论证与研制阶段,基于技术成熟度与成本的考虑,又重新提出了基于单块式主反射镜的8 m口径空间望远镜技术方案^[6-7],这既得益于具有10 m内包络直径载荷舱的战神5号(Ares V)运载火箭的问世,同时也体现了NASA在工程项目中采用的实用主义。

本文通过介绍几种大口径空间望远镜的应用与研究进展,详细论述并分析超大口径单块式主反射镜的关键技术,并提出基于3.5 m口径主镜技术的空间望远镜设想。

2 超大口径空间望远镜的发展趋势

目前世界上已经发射入轨和计划发射的超大

口径空间望远镜光学探测谱段主要集中在红外与可见光波段。对宇宙中在两个主要谱段所呈现信息日益迫切的观测需求,驱使着空间望远镜的口径不断朝着越来越大的方向发展。

在针对红外谱段的空间望远镜中,由欧洲空间局(ESA)建造并发射入轨的赫歇尔空间天文台(Herschel Space Observatory)是其中的翘楚。2009年发射入轨后,它便具有人类已发射入轨的空间望远镜中最大的单块式主反射镜—3.5 m口径。宇宙学与天体物理空间红外望远镜(SPICA)作为红外空间望远镜的另一极,是日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)、NASA以及ESA的合作项目^[8]。同样具有口径为3.5 m的主反射镜^[9],成为新一代的中远红外波段空间望远镜。SPICA将与以近、中红外波段(NIR/MIR)为主要观测谱段的JWST在红外太空观测中形成互补。

在针对可见光谱段的空间望远镜中,1990年发射入轨的哈勃空间望远镜(HST)开创性地改变了世界空间观测的格局,能同时观测紫外(UV)、可见光与近红外(NIR)波段的宇宙信息。它具有口径为2.4 m的单块式轻量化主反射镜。此后NASA在发射可见光波段大口径空间望远镜方面的努力从未停止。2009年发射入轨的开普勒空间望远镜(Kepler)被NASA设计用来发现其他环绕恒星运动的类地行星,通过观测太阳系外行星从其环绕的恒星前掠过的凌日现象,来推测该行星轨道的大小并估计它的温度^[10]。它具有口径为1.4 m的单块式轻量化主反射镜^[11]。计划中的超新星加速度探针(SNAP)是NASA与美国能源部合作的项目^[12],作为联合暗能量任务(JDEM)的一部分,计划于2020年之前发射,其单块式轻量化主反射镜口径为2 m^[13]。该空间望远镜将被用于测量宇宙膨胀并确定加速宇宙膨胀的暗能量的性质。新世界观测者空间望远镜(NWO)是Kepler望远镜的下一代继任者,同样将用于发现适宜人类居住的类地行星,其单块式轻量化主反射镜口径为4 m。而由于JWST的可观

测波段仅为 MIP/NIR^[14], NASA 为了在 HST 退役后保持空间望远镜的观测能力覆盖可见光与紫外波段,提出了先进技术大口径空间望远镜(ATLAST)项目,计划将一个具有 8 m 口径单块式主反射镜的空间望远镜发射至放置于太阳—地球的第二拉格朗日点位置,用于寻找类地行星并探索地外生命。

中国首台自行研制的大口径空间望远镜即将安装于 2020 年前后发射的首个载人空间站上。该空间望远镜计划安装于实验舱内,其单块式主反射镜的口径为 2 m,它的特点在于拥有较大的视场,兼具红外与可见光观测谱段。

3 超大口径单块式天基主镜技术进展

3.1 HST 2.4 m 口径主反射镜

HST 于 1990 年由发现号航天飞机送入轨道。由于光学加工承包商珀金·埃尔默公司(Perkin-Elmer)在主镜加工过程中检测所用反射式补偿器的误差,导致 HST 入轨成像后产生了严重的球差。这一错误经过在轨人工维护并安装球差校正镜(COSTAR)后,才得以更正^[15-16]。在此之后 HST 显示了巨大的成功,得到的图像帮助天文学家解决了诸多的问题。HST 的 2.4 m 口径单块式轻量化主反射镜由 Corning 公司的 7941 ULE 零膨胀玻璃熔合焊接而成,图 1(a)为未镀膜前的蛋箱式轻量化结构,图 1(b)为镀膜后主镜外观。主镜镜面面形精度 RMS 值被加工至 6.4 nm。如此高的面形精度是依靠加工过程中的

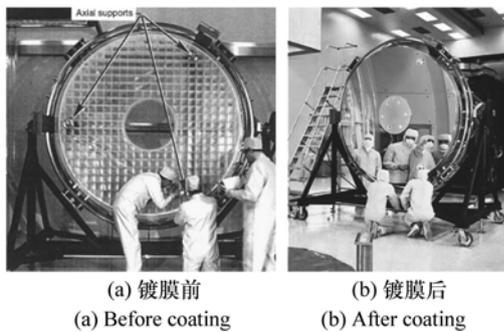


图 1 HST 的单块式主反射镜
Fig. 1 Monolithic primary mirror of HST

卸荷支撑技术以及相机总装时的柔性飞行支撑结构实现的。图 2 为安装于 52 点卸荷支撑上的 HST 主镜 1.5 m 口径缩比试验件。该试验件在此支撑上进行加工与检测,最终被抛光至 $\lambda/61$ RMS 的面形精度,初步验证了卸荷支撑设计的正确性。最终 HST 的 2.4 m 口径主镜是安装于 134 点的卸荷支撑上加工并检测的。在加工完成后,即由

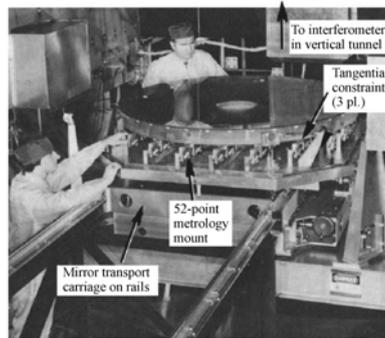


图 2 安装于 52 点计量卸荷支撑并进行立式加工与检测的 HST 主镜 1.5 m 口径缩比试验件
Fig. 2 1.5 m diameter aspheric mirror fabricated and tested as a subscale experimental model of the PM for the HST

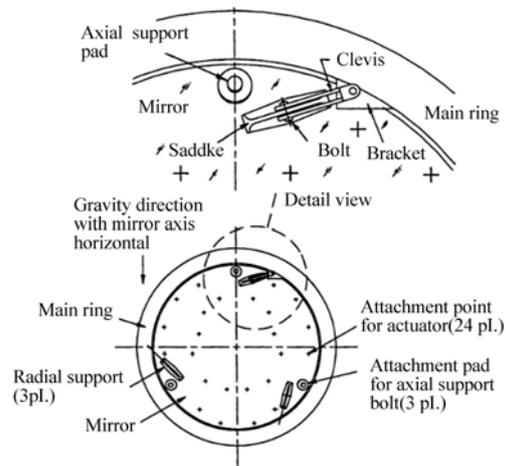


图 3 HST 主镜背部的轴向与切向支撑结构
Fig. 3 Schematic diagram of the HST primary mirror showing the axial and radial supports

图 2 所示的卸荷支撑改为图 3 所示的飞行支撑,它由三处轴向支撑与三处切向支撑构成。图 4 为轴向支撑的结构图,可见主镜的轴向支撑采用了

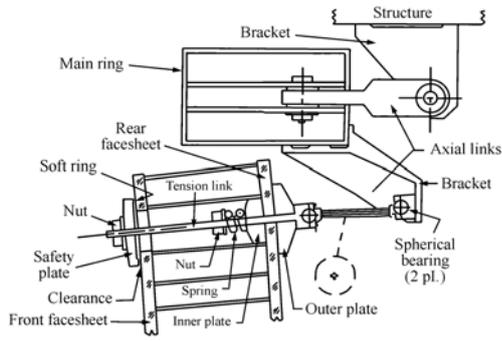


图4 HST主反射镜轴向支撑结构图

Fig.4 Schematic diagram of one axial support for the HST PM

球铰与柔性铰链来实现无应力安装。在镀膜、运输、装调与发射期间主镜的机械接口即为三处轴向支撑^[17]。

在主反射镜的背后还布置了24处促动器提供光学面形的在轨控制,但HST的主镜面形控制并不是在轨实时作用的,仅是为了在入轨后调整主镜由于重力释放所产生的像散式变形,事实上这一调整机构并未使用。

HST的23年服役历程充分说明了主反射镜对空间望远镜实现高质量成像的关键作用。其单块式主反射镜的轻量化设计、卸荷支撑加工技术与轴向支撑设计直到今天仍然值得借鉴。

3.2 SOFIA 2.7 m口径主反射镜

同温层红外线天文台(SOFIA)是由NASA、德国航空太空中心(DLR)和大学太空研究协会(URSA)共同合作的红外线天文学观测望远镜项目^[18]。SOFIA红外望远镜在大气层所有水蒸气之上的高度运行,能够充分观测到宇宙的红外谱段信息,但在运行时要同时承受外界风载与动基座振动的恶劣影响,同时自身视轴的变化也导致重力作用的不断变化,如图5所示。^[19] SOFIA的2.7 m口径主反射镜由法国SAGEM公司负责设计与加工。它是由一整块 Zerodur 零膨胀微晶玻璃在背部加工出半封闭六边形轻量化孔而成,轻量化率达80%,镜体自身一阶自然频率达240 Hz。主镜的主支撑结构剪力箱采用碳纤维增强塑料,在接口部位预埋有殷钢和钛合金镶嵌件,如图6^[20]所示。主镜通过侧面三处Bipod支撑和

背部18点的Whiffletree支撑件同剪力箱连为一



图5 SOFIA首次打开舱门进行飞行观测

Fig.5 SOFIA during its first open door flight



(a) 主镜 (b) 主镜背部
(a) Primary mirror (b) Back view of primary mirror

图6 SOFIA主反射镜与其背部细节

Fig.6 Primary mirror of SOFIA & back view

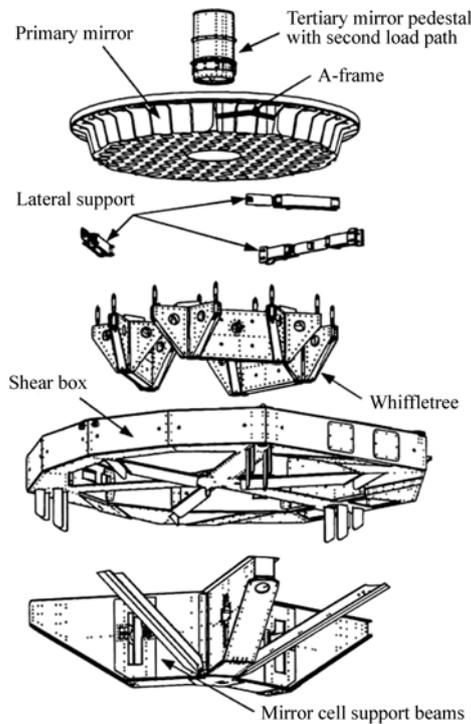


图7 SOFIA主镜组件爆炸图

Fig.7 SOFIA primary mirror mount assembly

体。经过优化设计的主镜组件(PMA)总质量为2 000 kg,一阶自然频率达70 Hz。图7所示为SOFIA主镜组件的爆炸视图^[21-22]。主镜组件在高度轻量化的同时保持了较高的比刚度,并对主镜进行了正确的运动学约束,成功地满足了观测时的面形需求。

3.3 HERSCHEL 3.5 m 口径主反射镜

欧洲空间局(ESA)建造的赫歇尔空间天文台^[22](Herschel Space Observatory)在2009年由阿丽亚娜五号火箭发射升空(见图8),进入距离地球 1.5×10^6 km的L2拉格朗日点。2013年4月,它因液氮冷却剂耗尽,已停止红外观测工作。Herschel的制造承包商ASTRIUM通过对结构采用全SiC材料^[23],成功地将望远镜整机结构质量由1 500 kg减至315 kg,而其单块式主反射镜具有3.5 m口径尺寸。主镜的制备是通过将12块SiC子镜拼接焊接而成的,如图9所示。其中均布的3块子镜背部有机械接口分别同3处Bipod支撑



图8 全部由SiC材料制造的HERSCHEL空间红外望远镜

Fig.8 HERSCHEL all-in-SiC infrared space telescope

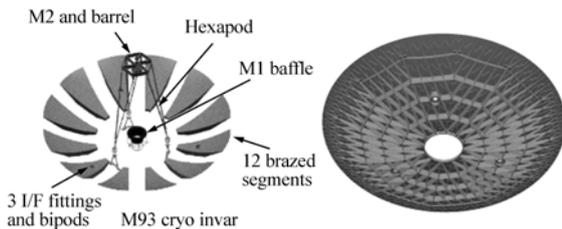


图9 Herschel望远镜主镜组件结构图

Fig.9 Schematic diagram of HERSCHEL PMA structure

结构连接,接口的细节见图10所示。Herschel主镜背部的轻量化形式为开放式的“大筋套小筋”,

通过主干筋板形成稳定的三角形轻量化孔,在每个轻量化孔内部布有3条小筋,以增强局部刚度。



图10 Herschel主镜背部放大图

Fig.10 Detailed view of the rear face of HERSCHEL primary mirror including an interface

3.4 NWO 4 m 口径主反射镜

为了同鲍尔宇航科技公司(Ball)竞争NASA的下一代类地行星探索项目NWO(如图11),洛克希德马丁公司(Lockheed Martin)将一份工程分析合同授予了亚利桑那大学,以研究利用其成熟的硼硅酸盐(Borosilicate)光学玻璃技术制造4 m口径单块式主镜,并将具有此主镜的空间反射镜发射进入500 kg高度近地轨道,用于探索类地行星与地外生命^[24]。

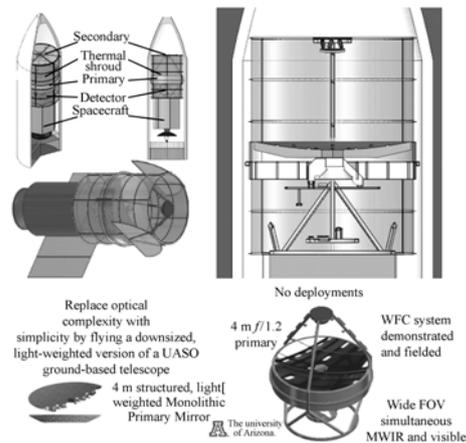


图11 亚利桑那大学提出的4 m口径NOW

Fig.11 Overview of the 4 m monolithic mirror and NOW space telescope structure proposed by University of Arizona

亚利桑那大学的研究团队认为在目前现有的美国EELV火箭运载能力与载荷舱内包络尺寸

下,将4 m口径的单块式主镜空间望远镜发射送入近地轨道是可行的。在权衡比较主镜分块拼接技术与单块式主镜技术后,该报告认为主镜的分块拼接技术在空间望远镜应用中过于复杂,成本昂贵,而亚利桑那大学在硼硅酸盐玻璃制备地面望远镜用超大口径反射镜以及非移动式波前测量方面已经具有成熟经验。在6 nm RMS的高面形精度要求下,亚利桑那大学提出采用自行研制的硼硅酸盐光学玻璃制备与加工技术,制造背部半封闭式轻量化结构的4 m口径单块式主反射镜,采用入轨前多点辅助支撑、入轨后三点运动学支撑的技术方案。并提出充分利用硼硅酸盐光学玻璃的大热胀系数,通过在背部轻量化孔中布置热辐射加热片驱动主反射镜镜面变形从而实现在轨面形调整,如图12所示。通过在次镜支撑桁架杆上布置9处固定式五棱镜来测量主次镜之间的对

准误差,在主镜反射面表面安装有哈特曼反射镜阵列,这些哈特曼反射镜指向第一像面,用于测量主镜的面形变化,该辅助波前测量系统已经成功应用于地面上的6.5 m口径LOTIS自准直仪,如图13所示。

3.5 ATLAST 8 m 口径主反射镜

在Ares V运载火箭项目出现后,NASA便开始筹划利用其10 m口径的载荷舱内包络尺寸将具有8 m口径单块式反射镜的空间望远镜发射进入日—地L2拉格朗日点,如图14所示^[25-26]。ATLAST项目的概念由此而生。由于单块式主反射镜具有与生俱来的高对比度成像能力与优异的波前控制能力,与分块拼接式主反射镜技术方案相比,采用8 m口径单块式主反射镜将大大减小方案的成本与技术危险。在已建成的地面望远镜中8 m口径的单块式反射镜的制造、检测技术十

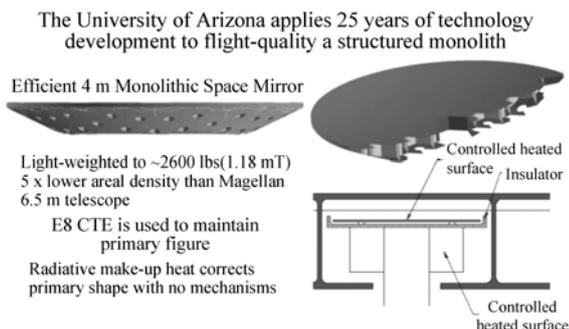


图12 镜体的轻量化结构与腔体内的热辐射加热片
Fig. 12 Perspectives of the lightweight mirror and thermal radiator placed into each cell for controlling mirror shape

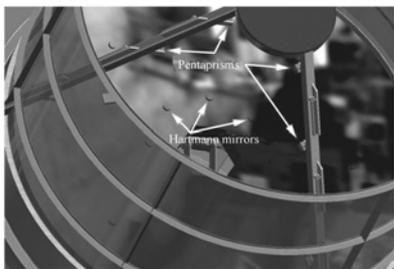


图13 非移动式波前系统可测量主次镜位置变化与主镜面形
Fig. 13 Non-moving supplementary wavefront systems measure alignment and mirror figure changes

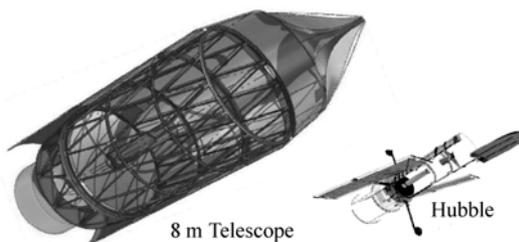


图14 8 m口径单块式主镜空间望远镜同HST的比较

Fig. 14 8 m aperture monolithic PM telescope compared with HST

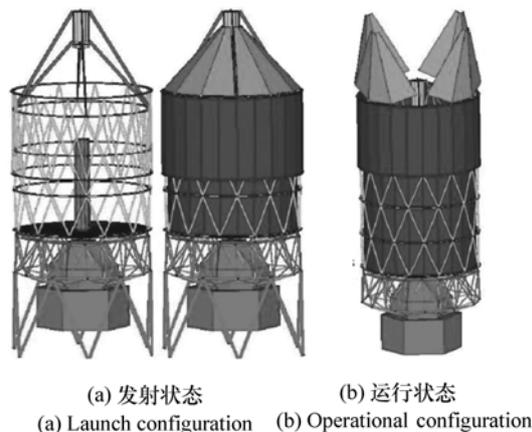


图15 8 m口径空间望远镜的配置方案
Fig. 15 Configuration of 8 m aperture telescope

分成熟,在此口径上反射镜的加工面形精度 RMS 值已能够达到 8 nm,并且同 JWST 那样的可展开分块拼接技术相比造价很低^[27]。通过对 8 m 口径单块式主反射镜的 66 点轴向支撑结构进行动力学分析,认为这种设计能够承受发射时的火箭动载荷。目前已开展的详细结构设计如图 15 所示。在 ATLAST 的 3 种口径技术方案中,该方案以其高性价比的单块式主反射镜结构而被寄予最大的期望^[28-29]。

4 超大口径主反射镜的关键技术

4.1 镜坯制备与光学加工技术

超大口径单块反射镜的镜坯制备是基础技术,需要具备相应口径规模的光学材料熔炉或烧结炉等特种设备,才能开展相应尺寸的加工作。美国空间望远镜中通常使用的 Corning ULE 材料。Schott 公司的 Zerodur 微晶玻璃材料^[30-32]、亚利桑那大学的 Borosilicate 材料都具有制备 8 m 以上镜坯的能力,其中 Corning 公司又具备对 8 m 以上镜坯轻量化机械加工的能力。美国 L-3 公司的 Brashear 部门、法国 Sagem 公司的 REOSC 部门与亚利桑那大学均具备对 8 m 口径单块反射镜进行光学加工与检测的能力,均有加工实例和相关经验。Gemini 公司更是具有世界独一无二的 8.4 m 口径真空磁溅射镀膜机^[33]。上述反射镜的加工,需要在制坯、测量、机械加工、光学抛光、光学镀膜等各个环节具有相应的大口径设备。

4.2 地面与在轨光学检测技术

高精度面形光学反射镜的加工需要高精度检测设备的保证。4 m 以上口径的单块反射镜,其自身质量随反射镜半径的平方而迅速增加,反射镜自身的重力变形也极具增大,传统小口径反射镜的水平检测光路就不再适用,需要搭建立式检测光学。这不仅对检测场所的建筑设施提出了高举架的要求,同时光路长度的增加也导致检测稳定的困难,可能需要制造更大体积的真空检测容器来消除空气对流扰动的影响。

4.3 卸荷支承技术

随着空间主反射镜口径的不断增大,其在地

面加工与检测过程中的重力变形也越来越难以控制,而为了实现更轻的整机质量,往往又对反射镜体进行轻量化设计,这又降低了镜体的绝对刚度。如何保证反射镜在加工后的面形精度即发射入轨工作后的面形精度,是对光学加工提出的一大挑战。HST 在地面加工时所采用的 134 点计量卸荷支撑,通过精确计算每个支撑点的支撑力,实现了对镜体在光轴竖直放置进行光学加工时的零重力状态模拟。在 2.4 m 口径的通光面上实现了 6.4 nm RMS 的面形精度。在 SNAP 的设计阶段,更是对卸荷支撑点的位置与支撑力同时进行了多变量优化。先对反射镜镜体进行卸载支撑,加工完毕后再进行“飞行支撑”安装,是国外对超大口径反射镜加工采取的成熟策略。

4.4 飞行支撑与面形控制技术

在反射镜的地面加工阶段,即便是采取了卸荷支撑技术,在经过飞行支撑安装、运输、总装、发射、在轨重力释放和热平衡、热梯度作用后,反射镜的面形精度难免会发生退化。而发射时的恶劣力学振动环境也对支撑和主反射镜的结构强度提出了更高的要求。在 HST、4 m 口径 NWO 以及 8 m 口径 ATLAST 的支撑设计上,都采取了在轨主动调整技术,用于修正主镜重力释放和发射时振动所造成的镜面变形。在 4 m 口径 NWO 空间望远镜中更是提出了在运输和发射时采取除三点运动学支撑以外的多点辅助支撑,以保证三点支撑和镜体的结构强度,在发射入轨后辅助支撑在机构作用下会接触对主反射镜的夹持接触,以保证主反射镜在轨工作时不会过定位。

5 对 3.5 m 口径主镜技术方案的设想

由中国运载火箭技术研究院研制的长征 5 号运载火箭的整流罩外直径达到 5.2 m,内包络直径达到 4.5 m,轴向长度可随载荷需求改变。未来长征 5 号运载火箭与海南文昌卫星发射中心具备发射条件后,可具备将 20 t 级的空间望远镜送入近地轨道的能力。这将使我国运送航天器入轨的能力达到世界先进水平,并使得超大口径空间光学望远镜的论证、规划与研制变得更加现实与

紧迫。

综合国内加工设备能力、基础条件与已有空间光学遥感器研制经验,独立自主地开展基于3.5 m口径圆形单块式主反射镜的空间望远镜系统研制是现实可行的。目前中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称中科院长春光机所)光学技术中心已经具备了4 m口径以下量级圆形反射镜反应烧结SiC材料的轻量化制备与加工技术^[34],同时具备4 m口径以下量级光学反射镜的数控抛光、立式检测和镀膜能力^[35-36]。中科院长春光机所已经具有主镜从制坯到总装至空间望远镜整机全流程的研制能力与条件。该空间望远镜光学系统可采用卡塞格林式结构,同时具备可见光、近红外、近紫外等主要观测波段。主镜镜体采用单块式结构,地面检测与加工时采用多点卸荷支撑以模拟在轨零重力场,运输与发射时采用运动学三点支撑加多点辅助支撑以增加强度,空间在轨运行以运动学三点支撑,并应设计有在轨面形调整机构和在轨面形检测手段。一旦主镜发射入轨后面形退化超差,将采取调整补救措施。

6 结束语

国外对2 m口径以下的空间反射镜往往通过

采取简单的单块式反射镜加运动学三点被动支撑方案即可满足需要。对于2 m以上口径的反射镜,虽然分块拼接主动光学技术已经开始进入实用阶段,但其结构与控制系统复杂,造价高昂,失效危险性大。随着以EELV和Ares V等为代表的大型低成本运载火箭的发展,空间望远镜技术总体对整机允许质量的约束有所放松,反射镜允许质量的增大带来的是对空间望远镜技术复杂性要求和成本的降低,继续在2 m以上的超大口径空间主反射镜中采取单块式镜体设计外加面形主动调整的技术路线又重新成为国外空间光学结构工程师的首选。鉴于天文学家需求正使得空间望远镜朝口径越来越大的方向发展,一台超大口径空间望远镜成本的剧增极可能成为国家航天事业的经济负担。JWST的高昂造价和不断增加的预算已经导致NASA削减了多项其他科学研究计划。这是在制定未来超大口径空间望远镜总体规划时必须借鉴的。依靠单块式超大口径主反射镜技术将是未来一段时间空间望远镜领域的优先选择。目前立足国内技术条件,开展基于3.5 m口径单块式主镜空间望远镜的研制已经愈发现实与紧迫,这将使我国在世界空间天基光学观测领域占有一席之地,并将极大地带动相关领域技术的发展。

参考文献:

- [1] STAHL H P. Optic needs for future space telescopes[J]. *SPIE*,2003,5180:1-5.
- [2] STAHL H P. Development of lightweight mirror technology for the next generation space telescope[J]. *SPIE*,2001,4451:1-4.
- [3] EGERMAN R, MATTHEWS G, WYNN J. The current and future state-of-the-art glass optics for space-based astronomical observatories[R]. US: ITT Corporation.
- [4] KENDRICK S, STAHL H P. Large aperture space telescope mirror fabrication trades[J]. *SPIE*,2008,7010:70102G.
- [5] STAHL H P. JWST mirror technology development results[J]. *SPIE*,2007,6671:667102.
- [6] KENDRICK S. Monolithic versus segmented primary mirror concepts for space telescopes[J]. *SPIE*,2009,7426:742600.
- [7] NEIN M E, LAWRENCE J F. Monolithic vs. deployable primary mirror trade considerations for the next generation space telescope[R]. US: NASA,2002.
- [8] CASTEL D, SEIN E, LOPEZ S, *et al.*. The 3.2 m all SiC telescope for SPICA[J]. *SPIE*,2012,8450:84502P.
- [9] KANEDA H, NAKAGAWA T, ENYA K, *et al.*. Optical testing activities for the SPICA telescope[J]. *SPIE*,2010,7731:77310V.
- [10] BORUCKI W J, KOCH D G, LISSAUERA J, *et al.*. The kepler mission: a wide field of view photometer designed to determine the frequency of earth-size planets around solar-like stars[J]. *SPIE*,2003,4854:129-140.
- [11] KOCH D, BORUCKI W, DUNHAM E. Overview and status of the Kepler Mission[J]. *SPIE*,2004,5487:1491-1500.

- [12] LAMPTON M, SHOLL M, KRIM M. SNAP telescope: an update[J]. *SPIE*, 2004, 5166:113-123.
- [13] BESUNER R W, CHOW K P, KENDRICK S E. Selective reinforcement of a 2m-class lightweight mirror for horizontal beam optical testing[J]. *SPIE*, 2008, 7018:701816.
- [14] STAHL H P. JWST primary mirror technology development lessons learned[J]. *SPIE*, 2010, 7796:779604.
- [15] ALLEN L, ANGEL R, MANGUS J D, *et al.*. The hubble space telescope optical systems failure report[R]. US:NASA, 1990.
- [16] FEINBERG L D, GEITHNER P H. Applying HST lessons learned to JWST[J]. *SPIE*, 2008, 7010:70100N.
- [17] YODER J P R. *Opto-Mechanical Systems Design*[M]. 3rd ed. US:SPIE Press, 2006.
- [18] BITTNER H, ERDMANN M, HABERLER P. SOFIA primary mirror assembly: structural properties and optical performance[J]. *SPIE*, 2003, 4857:266-273.
- [19] CASEY S C. The SOFIA program: astronomers return to the stratosphere[J]. *SPIE*, 2006, 6267:62670Q.
- [20] KEAS P, BREWSTER R, GUERRA J. SOFIA Telescope modal survey test and test-model correlation[J]. *SPIE*, 2010, 7738:77380K.
- [21] KAERCHER J, EISENTRAEGER P, S M. Mechanical principles of large mirror supports [J]. *SPIE*, 2010, 7733:77332O.
- [22] BOUGOIN M, LAVENAC J. From HERSCHEL to GAIA, 3-meter class SiC space optics[J]. *SPIE*, 2011, 8126:81260V.
- [23] TOULEMONT Y, PASSVOGEL T, PILLBRAT G. The 3,5m all SiC telescope for HERSCHEL[J]. *SPIE*, 2004, 5487:1119-1128.
- [24] WEST S C, BAILEY S H, BAUMAN S. A space imaging concept based on a 4 m structured spun-cast borosilicate monolithic primary mirror[J]. *SPIE*, 2010, 7731:77311O.
- [25] MARC P. Science with an 8-meter to 16-meter optical/UV space telescope[J]. *SPIE*, 2008, 7010:701021.
- [26] STAHL H P. Design study of 8 meter monolithic mirror UV/optical space telescope[J]. *SPIE*, 2008, 7010:701022.
- [27] WILLIAM R O, FEINBERG L D, PURVES L R. ATLAST-9.2 m: a large-aperture deployable space telescope[J]. *SPIE*, 2010, 7731:77312M.
- [28] ARGABRIGHT V, ARNOLD B, ARONSTEIN D. Advanced Technology Large-Aperture Space Telescope (ATLAST): a technology roadmap for the next decade[R]. US:NASA, 2009.
- [29] HYDE T, POSTMAN M. Technology development project plan for the Advanced Technology Large Aperture Space Telescope (ATLAST), a roadmap for UVIOR Technology, 2010-2020[R]. US:NASA, 2009.
- [30] THORSTEN D, PETER H, RALF J. Status of Zerodur mirror blank production at Schott[J]. *SPIE*, 2005, 5869:5869O2.
- [31] HULL T, HARTMANN P, R CLARKSON A. Lightweight high-performance 1-4 meter class spaceborne mirrors: emerging technology for demanding spaceborne requirements[J]. *SPIE*, 2010, 7739:77390C.
- [32] HULL T, WESTERHOFF T, PEPI J W. Game-changing approaches to affordable advanced lightweight mirrors II: new cases analyzed for extreme ZERODUR lightweighting and relief from the classical polishing parameter constraint[J]. *SPIE*, 2012, 8450:84505O.
- [33] SCOTT S W, STAHL H P. Overview of mirror technology development for large lightweight space-based optical systems [J]. *SPIE*, 2001, 4198:1-5.
- [34] 张舸. 1.5 m 量级 SiC 陶瓷素坯凝胶注模成型工艺[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12):2989-2993.
ZHANG G. Gelcasting process of 1.5 m SiC ceramic green body[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):2989-2993. (in Chinese)
- [35] 徐宏, 关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6):1488-1495.
XU H, GUAN Y J. Structural design of 1 m diameter space mirror component of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1488-1495. (in Chinese)
- [36] 刘巨, 董得义, 辛宏伟. 大口径反射镜组件的温度适应性[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12):3169-3175.
LIU J, DONG D Y, XIN H W. Temperature adaptation of large aperture mirror assembly[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,

21(12):3169-3175. (in Chinese)

作者简介:



李宗轩(1986—),男,河北衡水人,博士,助理研究员,2009年于中国科学技术大学获得学士学位,2014年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间反射镜设计与分析方面的研究。E-mail: lizongx@126.com



张雷(1982—),男,山东菏泽人,副研究员,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学仪器设计与分析方面的研究。E-mail: zhangleisong@tom.com



金光(1958—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事星载一体化总体设计方面的研究。E-mail: jing@ciomp.ac.cn



孔林(1986—),男,安徽舒城人,博士,2009年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事航天器热控制方面的研究。E-mail: konglin@mail.ustc.edu.cn

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路3888号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价:50.00元/册