

在轨组装式空间望远镜光机结构关键技术

王锴¹ 王博甲¹ 许博谦² 高雁²

(1 中国载人航天工程办公室,北京 100034)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

摘要 文章介绍了超大口径在轨组装式空间望远镜发展现状,分析了在轨组装式空间望远镜设计和研制的主要难点,提出了10 m量级在轨组装式空间望远镜的概念性设计方案,对10 m量级组装式空间望远镜的系统组成、工作程序与模式、科学目标及科学仪器进行了初步规划。在此基础上,完成了望远镜光机结构初步设计,并对其关键技术进行了分析,可为未来开展10 m量级在轨组装式空间望远镜光机结构研制提供思路和参考。

关键词 10 m量级空间望远镜;在轨组装;总体设计方案;关键技术

中图分类号:V476.4 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1673-8748.2024.05.016

Key Technology of Opto-mechanical Structure for On-orbit Assembly Space Telescope

WANG Kun¹ WANG Bojia¹ XU Boqian² GAO Yan²

(1 China Manned Space Engineering Office, Beijing 100034, China)

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

Abstract: This paper discusses the recent advancements in the field of ultra-large On-Orbit Assembly Space Telescope (OAST) and explores the significant challenges in their design and development. It presents a conceptual design for a 10-meter class OAST, encompassing system configuration, operational procedures, scientific objectives, and scientific instruments. Furthermore, this study elaborates on the preliminary designs for the opto-mechanical structure of the telescope and conducts a detailed analysis of the critical technologies involved. The findings offer valuable insights and serve as a reference for the future development of 10-meter class OASTs.

Key words: 10-meter space telescope; on-orbit assembly; overall design scheme; key technology

大型空间光学望远镜是研究暗物质、暗能量、黑洞、宇宙起源、天体起源和生命起源等重大科学问题的重要平台,对于开展前沿科学探索具有重要价值。当前,天文与天体物理学界重点关注星系的形成与演化、暗物质与宇宙结构、类地行星与地外生命等前沿科学问题。相关研究结果表明,实现上述科学目标,空间望远镜口径需要达到10 m量级^[1]。

目前大多数空间望远镜采用“单体式”技术路

线,如我国在研的载人空间站巡天空间望远镜^[2]、美国发射的“哈勃”空间望远镜^[3]等。随着望远镜口径不断增大,“单体式”技术路线将面临“元件难制造、整机难发射”等技术难题。“折叠展开式望远镜”能够部分解决以上问题。然而,当望远镜口径超过10 m乃至更大时,“折叠展开式”望远镜仍然难以突破火箭整流罩有效包络的限制。针对上述难题,在轨组装式空间望远镜(On-orbit Assembly Space

收稿日期:2024-05-21;修回日期:2024-09-09

作者简介:王锴,男,博士,高级工程师,从事载人航天工程总体设计工作。

Telescope, OAST)的概念应运而生,其理念可以概括为“模块上行,在轨组装,在轨调校,在轨运维”。具体而言,将空间望远镜设计为多个分体模块,通过一次或多次发射送入预定轨道^[4-5],依托具有服务能力的空间平台完成组装,并在光学级调校完成后开展天文观测。

本文介绍了在轨组装式空间望远镜发展现状,提出了 10 m 量级在轨组装式空间望远镜光机结构的概念性设计方案,并对部分核心关键技术进行分析,为未来开展 10 m 量级在轨组装式空间望远镜光机结构研制提供思路和参考。

1 在轨组装式空间望远镜发展概况

在轨组装空间望远镜的概念最早由美国航空航天局(NASA)于 20 世纪 90 年代左右提出。在其公开的文献中,报道了在实验室模拟零重力环境下开展的空间望远镜结构组装试验^[4]。2004 年,波音公司提出了可在轨装配的 10 m 口径的自主装配空间望远镜(Autonomously Assembled Space Telescope, AAST)^[6]。AAST 采用模块化望远镜的设计方案,将超大口径望远镜分为多个组件,装入运载火箭,并在空间环境下采用机器人装配。

2012 年,NASA 联合喷气推进实验室、太空望远镜科学研究所等多家业内顶尖研究机构,启动了面向下一代在轨装配式空间望远镜的“基于‘国际空间站’的组装式光学测试平台”项目(Optical Testbed and Integration on ISS Experiment, OpTIIX)^[7]。该项目计划将“国际空间站”作为基站,通过三自由度机械手将 OpTIIX 安装于“国际空间站”的外表面。OpTIIX 由主镜模块(分为 3 个子模块)、次镜模块、探测器等模块组成,通过空间智能机器人在轨装配、宇航员辅助组装成望远镜整体,并经过在轨调试后投入使用。

哥达德宇航中心于 2013 年提出了模块化组装式空间望远镜(Modular Assembled Space Telescope, MAST)的研制概念^[8]。MAST 是一个 20 m 长的紫外光学望远镜,拟采用载人平台完成在轨组装,主要工作模式是以高分辨率和高灵敏度观测类地行星。

通过剖析国外研究现状,可得到如下启示:

(1)目前,各主要科研机构均积极开展 10 m 量级在轨组装式空间望远镜光机结构方案论证与方案设计;

(2)与“单体式”空间望远镜相比,组装式空间望远镜构成复杂度高,在轨运行性能影响要素多,研制过程需采用多学科协同总体设计的技术路线;

(3)考虑到组装后各拼接子镜间相对位姿误差为毫米量级,为了保证在轨组装式空间望远镜成像质量,子镜相对位姿误差需要控制在纳米量级,甚多维度大范围高精度在轨波前传感与控制技术是解决光学元件对准问题的优选途径;

(4)考虑到望远镜组装模块存在形状不规则、光学元件易损坏等特点,组装难度大,现有组装精度低,需要向智能化方向发展;

(5)目前国外组装式空间望远镜遮光罩以大折展比、低刚度的展开式方案为主;

(6)开展 10 m 量级空间望远镜整机测试具有一定难度,在轨组装式望远镜需要采用“子口径测试+数字化分析”模式完成地面试验工作。

2 10 m 量级组装式空间望远镜概念性设计方案

2.1 系统组成

综合分析国内外在轨组装式空间望远镜子系统划分方法,并结合传统空间望远镜工程实践经验,组装式空间望远镜由光机结构子系统、后端科学仪器子系统、稳像子系统、平台及遮光罩子系统构成,如图 1 所示。

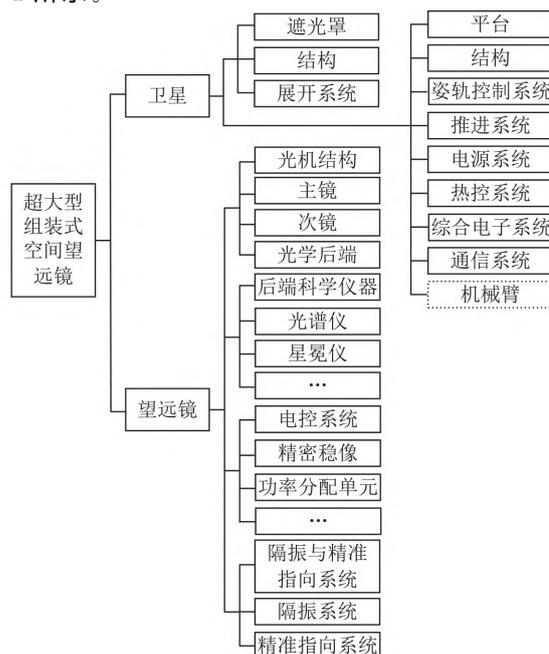


图 1 10 m 量级组装式空间望远镜系统组成

Fig. 1 System configuration of 10-meter OAST

2.2 工作程序与模式

10 m 量级组装式空间望远镜在轨部署可划分为运载上行、在轨组装、在轨调校和在轨运维等四部分。

1) 运载上行

10 m 口径在轨组装空间望远镜总质量约为 17.9 t, 根据现有发射条件, 计划选用长征五号^[9] 运载火箭作为运载工具, 其整流罩直径 5.2 m, 长度 20.5 m, 近地轨道运载能力 23 t。将运载火箭整流罩的尺寸包络和运载能力作为设计约束, 规划望远镜的运载方案, 根据货运平台的实际情况, 发射可能分为两次或多次发射。

2) 在轨组装

望远镜的在轨组装方案规划有两种, 第一种是依托现有空间站条件进行组装, 整体组装条件较为成熟。首先运载飞船将望远镜模块上行至空间站, 利用空间站现有的机械臂进行模块组装。其中, 主镜组件采用空间站小臂进行组装, 小臂为 7 自由度机械臂, 配备视觉引导相机和力传感器, 末端绝对定位精度为 ± 3 mm。次镜组件采用空间站组合臂进行组装, 工作半径不小于 14.5 m, 末端绝对定位精度为 ± 10 mm。组装过程中可由航天员和地面指挥部监控配合, 以满足望远镜的组装任务需求。

望远镜第二种组装方案为载荷自带机械臂安装, 在低轨完成组装。该方案自主化程度高, 难度较

大。首先发射的是卫星平台以及中央模块, 入轨后展开太阳能电池帆板, 卫星平台安装一条 7 自由度机械臂。搭载后续模块的运载飞船直接与卫星平台对接, 然后机械臂依次组装主镜模块和次镜模块。望远镜组装完成后, 展开遮光罩组件, 利用自身携带的燃料飞往目标轨道。

整个组装过程要求机械臂自动化执行, 机械臂要求具备视觉导航和触觉反馈能力, 以及自主规划路径的能力, 末端定位精度优于 ± 10 mm, 姿态精度优于 $\pm 1^\circ$ 。组装过程中地面指挥站可进行监测。

3) 在轨调校

望远镜通过卫星平台调整指向特定天区, 选择预先规划的天文星点目标作为实施光学调校的参考点光源, 通过望远镜配备的波前传感器捕获各类能够反映光学元件失调特征的图像进行测量、解算及校正。整个过程既可在轨自主完成, 也可通过数据下传、指令上传实现, 如图 2 所示。

4) 在轨运维

组装式空间望远镜在轨调校完成后, 根据规划的观测任务开展天文观测。同时, 开启在轨维护模式, 保障其在轨长期稳定运行。一方面, 通过配备状态监测传感器实现各组部件运行状态监测; 另一方面, 充分利用模块化设计的技术特点, 根据故障类别, 通过模块更换或维修, 实现望远镜的在轨维护。

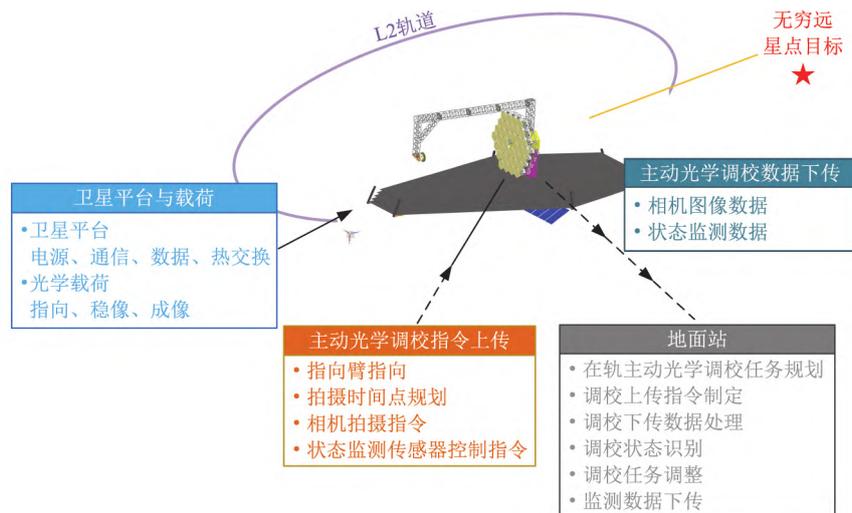


图 2 10 m 量级在轨组装空间望远镜调校方法示意

Fig. 2 Schematic diagram of alignment for 10-meter OAST

2.3 科学目标及科学仪器

当前, 天文学界重点关注类地行星生命迹象、宇

宙结构的形成和星系的演化等, 部分科学目标如表 1 所示。为实现上述科学目标, 组装式望远镜后

端应配备紫外/可见光/红外成像相机、星冕仪、光谱仪等科学仪器。

表 1 科学目标与内涵

Table 1 Scientific objectives and their connotation

科学目标	内涵
寻找潜在宜居行星	确定环绕类太阳恒星的岩质行星中产生类地行星的概率
探索生物特征和确认宜居性	通过评估行星大气的化学状态,在类太阳恒星周围的岩石世界上寻找全球生物圈的迹象,确认液态水
在太阳系寻找可居住的世界	确定木卫二羽流活动的强度和频率。记录太阳系海洋卫星地质活动引起的地表变化
在宇宙时间上追踪电离光	研究星系光度函数的暗端,以揭示矮星系为宇宙再电离提供动力的程度。量化低红移星系电离辐射的演化和逃逸
星系的多尺度组合	在宇宙时间的 100 pc 空间尺度上研究星系的形成和演化

2.4 望远镜光机结构设计

目前大型空间望远镜光学方案主要包括“离轴三反消像散”式和“同轴三反消像散”式。前者具有无遮拦等优势,但对于在轨组装式空间望远镜而言,

随着离轴量的增加,拼接子镜制造难度和代价上升、在轨光学调校难度增大。因此,10 m 量级空间望远镜选用“同轴三反消像散”式光学方案,如图 3 所示。该望远镜系统工作波长 0.2~20 μm。有效视场范围为 18'×9.6',F 数为 20,全视场设计残差波像差的均方根值(RMS)小于 20 nm,如图 4 所示。全视场波像差退化至 63 nm 时,角分辨率与斯特利尔比如表 2 所示。

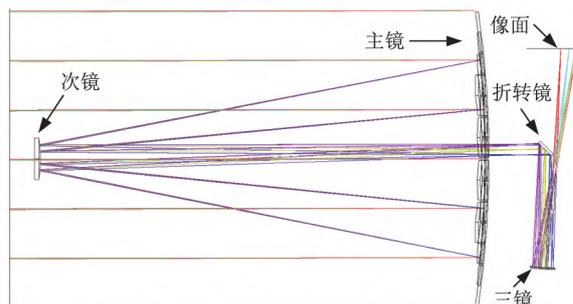


图 3 10 m 量级组装式空间望远镜“同轴三反”光学设计方案

Fig. 3 Optical design scheme for on-axis three-mirror of 10-meter OAST

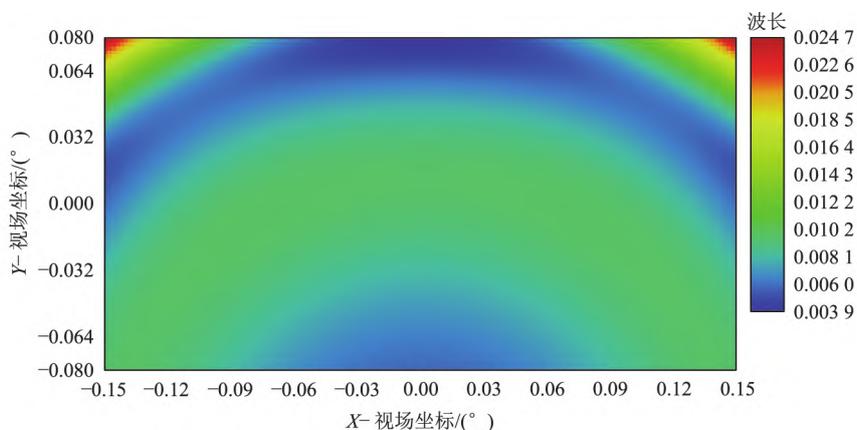


图 4 光学系统 RMS 波像差视场图(设计残差)

Fig. 4 RMS wavefront field map of optical system (in nominal state)

表 2 光学系统性能指标

Table 2 Performance indicators of optical system

波长/μm	角分辨率/(")	斯特利尔比
0.2	0.0165	0.170
0.4	0.0258	0.585
0.8	0.0433	0.878
5.0	0.2320	0.997
10.0	0.4590	0.999
20.0	0.9020	1.000

根据上述光学方案,开展口径 10 m 量级在轨组装式空间望远镜的光机结构总体设计。光机结构主要包括中央组件、主镜组件、次镜组件、光学后端组件等,布局形式如图 5 所示。其中,主镜组件包括子镜模块、旁瓣桁架模块,次镜组件包括次镜模块与次镜桁架,光学后端组件包括三镜和折转镜等光学元件模块、波前传感模块、电箱模块等。光学后端组件、中央组件及后端科学仪器通过地面装调完成集成。

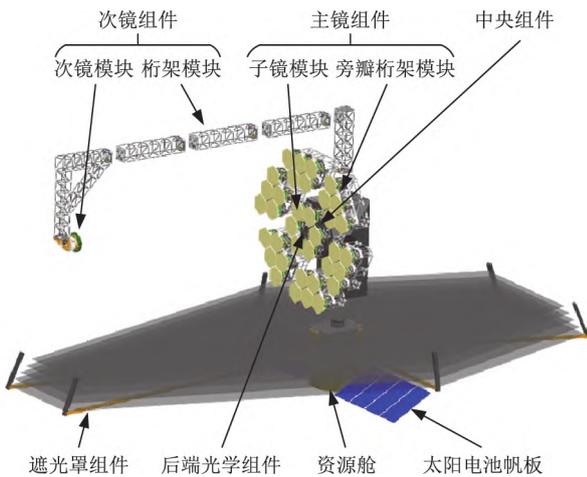


图 5 望远镜光机结构总体布局

Fig. 5 Overall layout of opto-mechanical structure of OAST

3 10 m 量级组装式空间望远镜主要关键技术

研制 10 m 量级组装式空间望远镜需要解决如下关键技术。

3.1 基于模型的组装空间望远镜多学科协同总体设计技术

在轨组装式望远镜需具备的功能多、分系统数量多、系统间耦合度高、综合性能评价考量因素多,导致在望远镜的设计过程中,实现全局、多维度优化存在困难。基于模型的多学科协同设计技术可有效解决上述问题,实现全局最优设计,但目前该技术仍处于探索阶段^[10]。该项技术主要包括:

1) 系统初始设计

对在轨组装式空间望远镜需求进行分解、细化,利用需求图等对需求进行建模分析。在需求模型的基础上,进行功能分析,进而进行逻辑和物理架构建模,完成各分系统、单机组件的建模,并将结构、行为、参数等数据集成到同一模型中,实现用户需求与模型的关联关系,实现全局追溯管理。在系统模型的基础上,对指标进行定量分解,完成在轨组装式空间望远镜系统初步设计。

2) 系统仿真模型构建

基于 Modelica/Simulink 等仿真语言与仿真工具对空间望远镜部件进行建模,建立基础模型库并进一步建立动力学与控制、电源、热控、机构结构等分系统模型,对系统设计与分系统设计进行虚拟验证,确保系统架构设计与指标分解的合理性。

3) 多学科优化设计

基于系统仿真模型,确定系统优化目标、约束与优化参数,利用多学科优化对系统初始设计进行优化,获取系统的整体最优解,完成系统总体设计。

3.2 大口径高轻量化高精度高一致性子镜制造技术

为保证望远镜的成像质量,拼接式主镜需具有纳米量级的共相精度(即共面度),要求将曲率半径非一致性误差控制在百万分之一(ppm)量级。现有曲率半径加工精度仅为毫米量级,给制造、检测带来巨大挑战^[11]。因此,需要突破大口径高轻量化高精度高一致性子镜制造技术,该项技术主要包括:

1) 高一致性拼接子镜超精密加工

围绕超轻拼接子镜超轻量化及高曲率一致性特点,基于增材制造的超轻量化反射镜体制备及特殊力学模块设计,开展超轻量化拼接子镜面复印效应产生机理、低应力超精密抛光技术、高曲率半径一致性反射镜加工及试验等研究,实现超轻拼接子镜光学表面的高精度高效加工,满足面形误差、曲率半径一致性及表面粗糙度技术指标,形成 10 m 量级组装式空间望远镜拼接子镜的超精密加工技术体系。

2) 高精度拼接子镜曲率一致性检测

加工及验收拼接子镜均需要高精度拼接子镜曲率一致性检测支持。一方面,基于传统干涉测量法,研究利用干涉仪、补偿器和绝对距离测量仪的反射镜曲率半径测量技术;另一方面,根据拼接子镜曲率一致性误差最终作用于波前的特点,基于改进相位恢复算法和矢量像差理论,开展高精度波前重建方法、曲率一致性对波前影响机理、高鲁棒性曲率一致性解算方法研究,构建拼接子镜曲率一致性非接触、超精密、高鲁棒性、快速检测技术体系,以指导高精度高一致性子镜加工与制造。

3.3 甚多维度大范围高精度在轨波前传感与控制技术

在轨组装空间望远镜各模块完成组装之后,各光学元件位姿误差达到毫米量级,导致光学系统成像质量严重退化。因此,需要在空间环境中对系统波前进行检测,进而解算系统失调量并进行高精度校正,以在有效视场范围内实现衍射极限成像分辨率。10 m 量级空间望远镜主镜各子镜与次镜位置公差要求极为严格,对波前检测精度、失调解算精度以及位姿调整机构执行精度提出了极高的要求。该项技术主要包括:

1) 动态空间环境高精度在轨波前检测

高精度波前检测是准确校正失调量、恢复系统成像质量的前提。需要在空间动态扰动环境下,采用不同的波前传感方法,逐级对系统波前进行检测。

在共焦阶段,系统失调量级较大,采用相位恢复法等对子镜级波前进行检测,对各子镜对应的低阶像差进行求解;在粗共相阶段,采用色散条纹法对子镜间平移误差(Piston)进行检测;在精共相阶段,采用相位恢复法对残余共相位误差进行检测,对各子镜之间的共相位误差进行求解。

2) 主镜各子镜、次镜复杂失调量高精度解算

完成在轨组装的望远镜系统失调量复杂、失调自由度数量庞大,需要根据不同阶段波前检测结果,求解该阶段中量值最大的失调量类型。

在共焦阶段,主要求解子镜大范围的偏心、倾斜误差以及次镜各维度位置误差,此时需要根据各个子镜级波前的低阶像差系数建立方程组,并将不同子镜系统对应的方程组进行联立,求解主镜各子镜大范围偏心倾斜误差以及次镜位置误差。粗共相阶段主要求解子镜轴向平移误差,子镜轴向Piston误差可直接从色散条纹法分析结果中获取。精共相阶段主要求解子镜间平移、倾斜误差以及次镜各维度误差,需要利用多个视场波像差联立方程组,对这些失调量类型进行求解。

3.4 大行程大折展比精密运动机构设计技术

为了突破运载火箭整流罩内部空间包络对光学系统跨度的限制,在轨组装空间望远镜中依赖大量的展开运动机构,如展开式遮光罩、展开式次镜等。这些展开式机构具有超大折展比、大行程、低刚度的特点,如何保证运动机构的高可靠性是展开式机构研究中的重点和难点^[12-14]。该项技术主要包括:轻量化大行程大折展比可重复运动机构构型设计,结构末端低振动响应的柔性展开运动控制,柔性多层薄膜的复杂空间折叠方法。

3.5 空间机械臂智能化组装、维护技术

望远镜组装模块存在形状不规则、光学元件易损坏等特点,与目前的空间机械臂遥控操作任务相比,其组装过程中路径规划更复杂、运动容差更小、对空间机械臂的视觉测量范围、机械臂的控制精度与力传感精度要求更高。现有机械臂智能化程度低,难以满足复杂环境下的在轨组装要求^[15],需要开展智能化空间机械臂技术攻关。具体技术包括:

1) 空间驱动与伺服

驱动与伺服技术是保证空间机械臂执行对望远

镜组装的核心技术。该技术解决的是空间机械臂运动能力、精度、平稳性及安全性等一系列问题,确保空间机械臂能够在轨进行高精度、高平稳性、高安全度的组装工作。

2) 基于视觉的导航与控制

面对空间复杂环境,具备视觉和精密测量功能的视觉测量系统,在抓捕、组装望远镜模块过程中,为机械臂控制器提供手眼相机与望远镜模块间的相对位姿。对视觉相机所摄像的图片进行采集与特征提取,其目的是让机械臂具备人的视觉感知能力与认知能力从而实现发现、识别望远镜模块的种类,引导机械臂完成望远镜模块的抓取、组装等工作。

3) 基于多信息融合的智能控制

传感技术是实现组装机械臂智能化的基础,多传感器信息融合技术将视觉、触觉、雷达等多传感器所提供的信息加以综合,消除各个传感信息之间可能存在的冗余和矛盾,利用信息互补,降低不确定性以形成完整统一的感知描述,从而提高智能化机械臂决策及规划的科学性,反应的快速性和正确性。

3.6 10 m 量级组装式空间望远镜地面装调、集成与测试技术

10 m 量级组装式空间望远镜光学载荷体积大、精度高,其地面装调、集成与测试过程将是巨大的挑战。一方面,望远镜整机规模大造成光学元件误差敏感度提升,给高精度元件装调、集成带来困难;另一方面,其地面测试过程周期长、成本高、风险大,对测试环境、设备需求高,且对真空、冷黑、复杂微振动等极端环境的天地差异更为敏感,导致其地面整机全物理测试难以实现^[16]。因此,需要根据组装式空间望远镜结构及运维等特点,开发10 m 量级组装式空间望远镜地面装调、集成与测试技术。该项技术主要包括:

1) 基于子口径拼接的大口径光学表面/系统测试

针对10 m 量级空间望远镜地面“难检测”问题,发展子口径拼接检测技术,通过口径较小(如3 m)的标准平面反射镜分别检测10 m 量级组装式空间望远镜的不同区域,结合相应的算法,实现对10 m 量级组装式空间望远镜系统的检测。

2) 10 m 量级空间望远镜天地一致性保障

超大型空间望远镜口径达到10 m 量级,重力在其地面制造、装调、测试过程中产生了不可忽视的影响,导致其在轨重力释放后镜面面形、装调位姿漂移,产生与地面测试状态的非一致性误差,进而造成

光学成像质量退化。针对上述问题,有必要开展基于超大口径光学元件、光机桁架的重力卸载方法的立式装调/测试技术研究,为保证望远镜地面测试阶段与在轨应用阶段的光学性能一致性奠定关键技术基础。

3) 10 m 量级空间望远镜极端环境数字化测试

针对 10 m 量级空间望远镜面临的“难试验”问题,开展 10 m 量级空间光学载荷极端环境数字化试验能力建设,通过建设空间光学载荷整机物理试验平台,形成数字试验与整机物理试验能力,突破 10 m 量级系统性能试验周期长、成本高的难点。获取关键边界参数,开展低成本、短周期的数字试验,实现真空、冷黑、复杂微振动等极端环境下系统性能评估。

4 结束语

10 m 量级组装式空间望远镜是高度集成的空间载荷,通过初步分析,提出了 10 m 量级组装式空间望远镜光机结构概念性设计方案,并对研制光机结构涉及的部分核心关键技术进行分析,分析结果表明:当前研制 10 m 量级在轨组装式空间望远镜技术成熟度相对较低,且部分关键技术迫切需要在轨验证。建议基于空间站开展 1 m 量级组装式空间望远镜关键技术验证载荷的研制,为 10 m 量级组装式空间望远镜关键技术验证提供重要平台,为工程研制奠定基础。

参考文献 (References)

- [1] LUVOIR Team. The LUVOIR mission concept study final report [DB/OL]. (2019-12-12). [2024-09-06]. <https://arxiv.org/abs/1912.06219>.
- [2] 詹虎. 载人航天工程巡天空间望远镜大视场多色成像与无缝光谱巡天[J]. 科学通报, 2021, 66(11): 1290-1298.
ZHAN Hu. The wide-field multiband imaging and slit less spectroscopy survey to be carried out by the Survey Space Telescope of China Manned Space Program[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(11): 1290-1298 (in Chinese).
- [3] BAHCALL J N, KIRHAKOS S, SAXE D H, et al. Hubble Space Telescope images of a sample of twenty nearby luminous quasars[J]. The Astrophysical Journal, 1996, 479(2): 642.
- [4] GREEN J, BALLY J, BEASLEY M, et al., The modern universe space telescope[C]// Proceeding of NASA Space Science Vision Missions (Progress in Astronautics and Aeronautics). Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008: 299-261.
- [5] MULLER R M. Assembly and servicing of a large telescope at the International Space Station[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2002: 7-7.
- [6] BASU S. Conceptual design of an autonomously assembled space telescope (AAST) [C]// Proceedings of UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts. San Diego: SPIE, 2004: 98-112.
- [7] CARPENTER K G, ETEMAD S, MCELWAIN M, et al. OpTIIX: an ISS-based testbed paving the roadmap toward a Next Generation, large aperture UV/optical space telescope[C]// Proceedings of UV Astronomy, HST and Beyond, Kauai: University of Colorado, 2012: 1-36.
- [8] FEINBERG L D, BUDINOFF J, MACEWEN H, et al. Modular assembled space telescope[J]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 091802-091802.
- [9] 李平岐, 李东, 杨虎军, 等. 长征五号系列运载火箭研制应用分析及未来展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(2): 5-8.
LI Pingqi, LI Dong, YANG Hujun, et al. Development and application analysis and future prospect of LM-5 series launch vehicles[J]. Missiles and Space vehicles, 2021(2): 5-8 (in Chinese).
- [10] YOUNSE P, CAMERON J, BRADLEY T H. Comparative analysis of model-based and traditional systems engineering approaches for simulating a robotic space system architecture through automatic knowledge processing[J]. Systems Engineering, 2022, 25(4): 360-386.
- [11] CHANEY D. Radius of curvature matching system for a space based segmented telescope[C]// Proceedings of 34th Space Symposium, Technical Track. Colorado Springs: Space Foundation, 2018: 16-19.
- [12] 许焕宾, 张敬尧, 周玉林, 等. 用于桁架在轨装配的单向触发搭接机构建模与仿真[J]. 载人航天, 2021, 27(3): 379-386.
XU Huanbin, ZHANG Jingyao, ZHOU Yulin et al. Modeling and Simulation of unidirectional trigger lapping mechanism for on-orbit Truss assembly[J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(3): 379-386 (in Chinese).
- [13] 胡斌, 李创, 相萌, 等. 可展开空间光学望远镜技术发展及展望[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20210199.

- HU Bin, LI Chuang, XIANG Meng, et al. Development and prospects of deployable space optical telescope technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210199 (in Chinese).
- [14] 唐绍锋, 吴晗玲, 万舒晨. 《美国航空航天局航天技术路线图与优先发展技术》分析——以材料, 结构, 机械系统与制造领域为例[J]. *中国航天*, 2022(5): 40-46. TANG Shaofeng, WU Hanling, WAN Shuchen. Analysis of the NASA space technology roadmap and priority technologies; With examples in the areas of materials, structures, mechanical systems and manufacturing[J]. *China Aerospace*, 2022(5): 40-46 (in Chinese).
- [15] 陈钢, 高贤渊, 赵治恺, 等. 空间机械臂智能规划与控制技术[J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(1): 1-16. CHEN Gang, GAO Xianyuan, ZHAO Zhikai, et al. Review on intelligent planning and control technology of space manipulator[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(1): 1-16 (in Chinese).
- [16] CERIMELE M, HOMAN J, GARCIA S, et al. Modernization of NASA Johnson Space Center's Chamber A to support Cryogenic Vacuum Optical Testing of the James Webb Space Telescope (JWST)[J]. *Journal of the IEST*, 2021, 64(1): 30-41.

(编辑:张小琳)