

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.01.003

大口径空间光学望远镜桁架结构关键技术研究进展

郭崇岭¹, 陈佳夷¹, 陈传志², 陈金宝²

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094; 2. 南京航空航天大学航天学院, 南京 211106)

摘要: 近年来大口径空间光学望远镜以高像质、宽波段、大幅宽等特点, 在开展空间科学探索、精细化对地观测等方面越来越重要。大口径望远镜的主承力结构、大型光学组件的支撑结构往往采用桁架结构, 本文围绕实现桁架结构的超轻、超稳特性, 从构型优化设计、新型材料、先进制造工艺、精确测量标定方法等方面, 系统性梳理了其理论基础、研究方法、应用现状等, 并探讨了空间桁架结构技术的发展趋势。

关键词: 空间光学望远镜; 桁架结构; 热稳定性; 尺寸稳定性

中图分类号: TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)01-0031-13

Review on Critical Technologies for Truss Structure of Large-Aperture Space Optical Telescope

GUO Chongling¹, CHEN Jiayi¹, CHEN Chuanzhi², CHEN Jinbao²

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China; 2. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In recent years, large-aperture space optical telescope has become more and more important in space scientific exploration and fine earth observation because of its high image quality, wide band and wide range. The main bearing structure of large-aperture telescope and the supporting structure of large optical components often use truss structure. Focusing on the realization of the ultra light and ultra stable characteristics of truss structure, this paper systematically combs its theoretical basis, research methods and application status from the aspects of configuration optimization design, new materials, advanced manufacturing technology and accurate measurement and calibration methods, and discusses the development trend of space truss structure technology.

Key words: space optical telescope; truss structure; thermal stability; dimensional stability

随着空间光学遥感技术多年的发展, 光学望远镜承力结构特别是主次镜间结构的构型, 已经形成了较为完善的结构构型体系方案, 主要的形式包括筒式(Cylinder)^[1-2]、桁架式(Truss)、三角架式(Tripod)、整体框架式(Frame)等。对于大口径空间光学望远镜而言, 桁架结构形式的应用最为广泛。

Hubble 空间望远镜的镜头结构是桁架结构应

用的典型代表^[3], 其主次镜间距为 4.9 m, 结构由 48 根 2 m 长的桁架杆组成, 材料选用了树脂基碳纤维增强复合材料^[4]。2021 年 12 月, 新一代太空望远镜詹姆斯·韦伯太空望远镜发射升空 (James Webb space telescope, JWST), 其主反射镜口径达到了 6.5 m, 包括主镜组件、集成科学仪器模块在内的部件大量地采用了方形桁架结构, 材料为 M55J/

收稿日期: 2023-01-23; 修订日期: 2023-06-01

作者简介: 郭崇岭, 男, 研究员, 中国宇航学会空间遥感专业委员会委员、中国振动工程学会航天器振动与控制专业委员会委员, 获国防科技进步三等奖等, 主要研究方向为空间光学遥感器技术。E-mail: chongling.guo@live.com。

通信作者: 陈金宝, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: chenjbao@nuaa.edu.cn。

引用格式: 郭崇岭, 陈佳夷, 陈传志, 等. 大口径空间光学望远镜桁架结构关键技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(1): 31-43. GUO Chongling, CHEN Jiayi, CHEN Chuanzhi, et al. Review on critical technologies for truss structure of large-aperture space optical telescope[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(1): 31-43.

954-6 复合材料^[5-6]。日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)和ESA共同开发的口径为3.2 m的SPICA(Space infrared telescope for cosmology and astrophysics)望远镜^[7-8],整星质量仅为3 700 kg,主结构大量采用桁架,根据结构分区,其材料选用了氧化铝纤维增强复合材料和碳纤维增强复合材料。NASA的宽视场红外巡天望远镜(Wide field infrared survey telescope,WFIRST)主次镜间结构采用了6杆桁架,其后光学承力结构采用了与JWST非常相似的构型形式,由碳纤维/氰酸酯复合材料(M55J/954-6)桁架组件组成,在轻型结构中实现了高水平的结构强度和稳定性^[9-10]。面向下一个十年,下一代空间望远镜的口径直径在8 m到16 m范围甚至更大,以ATLAST(Advanced technology large-aperture space telescope)16.8 m口径的设计方案为例^[11-13],其桁架折叠形式与JWST一致,整个主承力桁架的尺寸包络为 $\varnothing 8\text{ m}\times 16\text{ m}$,这个桁架结构的设计还考虑了在轨的可扩展性。

对于大型空间望远镜光机结构设计而言,相比于其他的航天器结构设计^[14],除了考虑轻量化设计、抗力学环境设计、抗辐照设计等要素之外,最大的特点就在于热稳定性设计,以满足这类高精密光学仪器在轨运行稳定性的要求。

鉴于此,本文从大型超轻、超稳桁架结构的实现角度出发,梳理典型桁架结构构型方案及优化设计方法、新材料和新工艺的应用、桁架结构稳定性测试与评估等技术要素,并结合这些技术的验证情况,给出当前可靠的、可用于工程实践的研究方法,为大型桁架结构的研制提供参考,如图1所示。

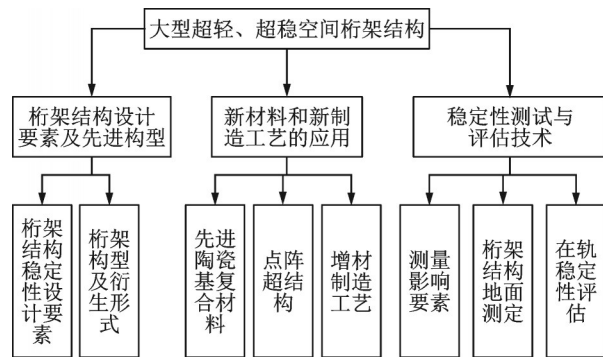


图1 大口径空间光学望远镜桁架结构关键技术要素

Fig.1 Key technical elements of truss structure for large-aperture space optical telescopes

1 桁架结构设计要素及先进构型

1.1 桁架结构设计要素

1.1.1 桁架的杆系优化理论

典型的大型空间系统(Large space system,

LSS)对结构的要求很大程度上取决于轨道环境和负荷,以及对敏捷性、几何精度和稳定性的任务要求^[15]。自从Michell在1904年首次提出了桁架理论以来,桁架结构以其结构简单可靠、组装灵活、比刚度、可设计性强等优点而得到广泛的应用^[16]。针对桁架结构和拓扑优化^[17]的特点,中国空间技术研究院郝宝新等^[18]提出了一种连续体-离散体两级拓扑优化策略,以连续体结构拓扑优化得到的桁架构型为基础,通过离散体优化得到拓展基结构。同时还基于桁架结构拓扑优化的半定规划模型及算法,以MATLAB为平台设计开发了桁架结构拓扑优化系统软件TODOSST^[19],为工程化设计提供了重要参考。

静定空间桁架原理是本类结构构型设计中的重要理论,基于此可对空间望远镜的支撑结构进行设计与分析^[20]。德国科学家Föppl将空间桁架定义为一个由支杆和节点组成的系统,并满足如下条件:在不改变连线长度的条件下,系统组件之间无相对运动。如果一个空间桁架满足式(1),那么这个空间桁架是稳定的、刚性的,并且是没有相对运动的。

$$S = 3K - 6 \quad (1)$$

式中: S 为支杆的数目, K 为节点的数目。这就是静定空间桁架原理^[21-22]。四面体、八面体和二十面体是典型的静定桁架构型,在设计中可直接作为基线结构。

桁架热匹配性的设计,是另外一个重点。一种解决方案是使用接近零线胀系数(Coefficient of thermal expansion, CTE)的材料来进行结构设计,例如碳纤维增强基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)。另一种方法是使用不同CTE的材料组合来抵消整体的热膨胀效应^[23]。安明鑫完成了基于“类泊松效应”的消热桁架结构研究,给出了多层桁架的热稳定性判别公式^[24]。

1.1.2 尺寸稳定性设计要素

应用于大口径空间望远镜的桁架结构遵循的是以精度主导的刚度驱动设计原则^[25],并具有长期的结构稳定性。基于空间应用的特点,空间光学望远镜结构需从设计、部组件研制、地面的测试、在轨飞行等各个环节(图2)开展针对性的稳定性指标的分解,从而保证入轨后长期的结构稳定性。

除地面研制和发射力学环境影响外,需要在设计时考虑更多的是影响望远镜尺寸精度的扰动载荷,包括热载荷(例如热致振动)、惯性载荷(例如旋转载荷、重力梯度载荷和太阳压力载荷等)、星上载荷(例如红外制冷机振动载荷、控制力矩陀螺(Control moment gyro, CMG)振动载荷等)^[26]。

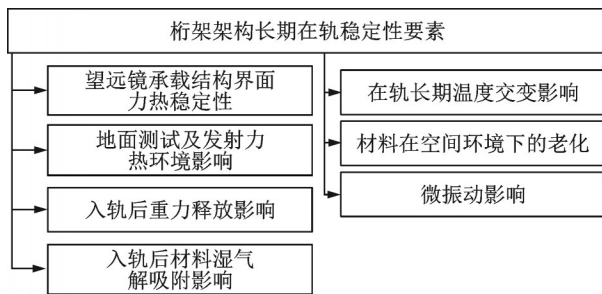


图2 结构长期稳定性影响要素

Fig.2 Influencing factors of long term structural stability

1.2 桁架结构构型及其衍生形式

空间光学望远镜桁架结构的布局形式在基线形式的基础上类型多样,地基望远镜桁架结构的应用实践为桁架在空间望远镜中的应用提供了大量参考,如 Hale 地基望远镜的赛路里桁架(Serrurier truss)形式^[27],经过改造后在空间望远镜中得到了大量应用^[28]。为了进一步增加空间桁架结构的刚度,提高谐振频率,衍生出了多层桁架构型(Multi-bay truss),这种构型在 Hubble 望远镜^[29]及国内某 3 m 口径望远镜中得到了应用。当空间望远镜的口径超过 4 m 或者更大,运载火箭的整流罩尺寸将限制空间望远镜系统发射时的尺寸包络,“分块式”是未来大口径空间光学望远镜的基本形态之一^[30]。实现分块式望远镜研制的技术途径有可展开技术及在轨建造技术等,由此发展产生了可展开桁架及模块化桁架的概念,如 TriTruss^[31],桁架模块可作为基础构件,实现结构的可重构。同时,大型望远镜对结构重量的极致要求,也促进了张弦梁和薄壁充气技术在桁架中的应用。

1.2.1 可展开桁架构型

望远镜可展开桁架不仅在于其结构的庞大和复杂性,更在于对结构要求有高的指向精度、定位精度以及精确的形状控制^[32-33]。结构构型形式主要包括桅杆式、平面可展开结构、变几何桁架与自适应结构、张力桁架等^[34],主要用于镜头主体结构 and 遮光罩结构。在镜头主体结构方面,JWST 的主次镜间结构采用了连杆式的静定桁架构型,ATLAST-9.2 m 空间望远镜的可展开次镜支撑桁架与此方案一致^[35-36]。在 IXO 项目^[37]及 DOT 项目^[38]中,可展开次镜支撑桁架采用的是套筒式的次镜塔结构,这类桁架展开精度相对较低,但是收拢比高。在遮光罩结构方面,用于遮光罩的可展桁架一般作为刚性的可展开的框架支撑,由柔性膜覆盖^[39-40]。这类桁架的尺寸稳定性要求要比镜头桁架小很多,但必须具有足够的形状保持特性和动态稳定性,以确保在观测过程中不会给光学组件施加不必要的力或力矩。

望远镜可展开桁架中涉及的关键技术包括:

(1)机构的微动力响应和非线性特性抑制技术^[41]:桁架展开机构的微动力学特性主要由机构中的接头不稳定性或铰链的迟滞效应等造成,带来的是运动精度和定位精度的不确定性。

(2)高重复性和稳定性展开对接锁定技术:关键点是保证桁架结构在轨展开全过程可达、可测、可控。常见的机械对接形式有三爪式、锥杆式、卡扣式等,空间电磁对接机构和形状记忆合金锁紧机构在望远镜桁架结构中也逐渐得到应用。

(3)地面重力卸载技术:由于构型的复杂性,桁架结构有效重力卸载点的识别难度较大,通过多目标优化分析及试验验证确保完全重力卸载的展开精度测试,是桁架研制中的重点工作内容之一。

1.2.2 张弦桁架构型

张弦桁架是在建筑行业大量应用的一种结构形式。张弦梁结构的创始人 Saitoh 教授对这种结构给出的定义是:“用撑杆连接抗弯受压构件和抗拉构件而形成的自平衡体系”^[42]。张弦结构在空间望远镜中的应用主要是利用其轻质的特点,其依靠预应力形态来保持结构的稳定性。代尔夫特理工大学 Krikken 在主次镜间结构中采用了这类结构^[43],每个支撑杆节点与两组张弦梁共同组成稳定结构,如图 3 所示。鉴于望远镜结构类似于建筑中塔的形式,在设计中借鉴的是塔式张力优化设计方法^[44]。

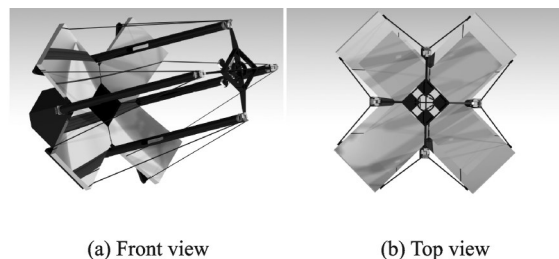


图3 望远镜张弦桁架结构形式

Fig.3 Telescope beam string truss structure form

张弦桁架原理是利用弦的高拉伸刚度、低弯曲和扭转刚度,实现弦轴向的高刚度支撑和截面内的刚度解耦,多根弦的组合实现高刚度稳定支撑。在设计中需重点考虑:弦组的空间布局、张紧力、弦梁稳定特性、地面及发射力学环境对弦梁结构的影响。

1.2.3 充气桁架构型

空间充气结构是一种以柔性复合材料薄膜构造的空间结构,基于其重量轻、压缩比大的特点,在太阳帆板、天线、太阳防护罩、太阳阵列上应用较多^[45]。浙江大学关富玲团队研究了圆柱状充气遮

光罩^[46];代尔夫特理工大学在DST项目也开发了支撑桁架结构^[47],其充气桁架质量为12.81 kg,展开长度约3 m,展开状态基频为0.92 Hz。亚利桑那大学正在设计和开发两个颠覆性的太空望远镜,将充气桁架应用到了主次镜间结构中,以实现20 m口径的望远镜建造^[48]。

充气桁架应用于望远镜中的关键问题包括:

(1)充气结构动力学及可控展开:重点是开展动力学行为和荷载挠度关系的研究^[49],当前望远镜充气桁架基本不涉及复杂的三维折叠方案,关键问题是展开时序及展开后的确定性状态确认。

(2)空间环境对充气结构的影响分析:空间热及辐照环境会造成薄膜材料的性能退化,根据工作环境定制多功能的柔性材料,可较好地解决这一问题。

2 适应于桁架结构的新材料和新工艺

桁架结构由杆系和接头两类基本的单元组成。杆系结构材料以树脂基复合材料和陶瓷基复合材料为主。传统的CFRP因其具有优异的力学性能,即刚度高、强度高以及热膨胀系数的可设计性,已经广泛地应用于望远镜桁架结构上^[50-54]。但其也有一定的缺陷,如抗弯刚度差、真空质损、材料在经受力学环境及电子辐照环境时表现出的不确定性^[55]。采用树脂基碳纤维增强复合材料实现三维空间构型,导致其制备工艺较复杂,目前应用较多的为模压成型、三维编织、树脂传递模塑成型(Resin transfer molding, RTM)等,模压制备的接头层间性能很差,三维编织工艺成本很高,缺陷检查复杂,限制了这类材料的应用和工艺发展^[56-57]。在接头结构的研究中,传统的金属接头也已不再满足大型桁架对刚度和稳定性的需求,为进一步保障桁架结构的尺寸稳定性以及整器对桁架结构减隔振特性的要求,须采用更先进的超材料及工艺方法。

2.1 氮化硅陶瓷复合材料

近年来,我国在陶瓷基结构材料方面取得了显著的进展,先后突破了C/SiC、SiC/SiC等系列材料的设计与制备关键技术,研制出系列大尺寸望远镜构件并获得型号应用。氮化硅(Si_3N_4)具有出色的材料特性组合,它具有和碳化硅(SiC)相当的材料密度,但微观结构赋予其出色的抗热冲击性能、高断裂韧性等优秀的机械特性。Thales公司将氮化硅应用在大口径望远镜的高刚性、稳定和轻质的桁架结构中^[58],这些结构件均已完成了飞行验

证,如图4所示^[59]。材料由德国FCT公司生产,具有高比刚度、低线胀系数、高强度等特点,且其成本较低^[60],其采用的工艺以热等静压及气压烧结为主。



图4 氮化硅材料在空间光学望远镜结构中的应用^[59]

Fig.4 Application of silicon nitride materials in space optical telescope structures^[59]

氮化硅、典型树脂基复合材料^[60-62]以及钛合金的材料特性对比如表1所示,可见其材料本身的特性在望远镜结构的应用中具有明显优势。此外在可靠性方面, Si_3N_4 具有高达20的威布尔系数,即使在大区域高负载的边界下,也能维持很好的力学可靠性。国际上公布的应用在空间望远镜上的 Si_3N_4 桁架杆的最大尺寸在2 m左右。

表1 典型材料特性对比

Table 1 Comparison of typical structural material characteristics

| 材料参数 | Si_3N_4 ^[60] | M55J/cyanate* ^[61-62] | TC4 |
|---------------------------------------|---|----------------------------------|-----------|
| 密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 3.22~3.25 | 1.8 | 4.5 |
| 杨氏模量/GPa | 320~330 | 233 | 110 |
| 抗弯强度/MPa | 700~1 000 | — | 900~1 100 |
| 线胀系数/ $10^{-6}/\text{K}$ | 1.4 | -0.3~0.8 | 8.6 |
| 热导率/($\text{W}\cdot\text{mK}^{-1}$) | 25~30 | 1.01 | 7.95 |

注:“*”表示以纤维体积含量60%为例,且不同铺层形式,特性参数不同。

在国产化方面,国产氮化硅材料^[63-64]的研究主要集中在多孔氮化硅陶瓷制备方面,应用场景为高温及透波。但制备方法还不够系统、深入,在制备的透波材料应用方面较国外有一定的差距。国内企业采用气压烧结等工艺制备了各种尺寸的天线罩、天线窗样件,通过了地面考核试验^[65],但离真正的在轨飞行还需开展大量的验证工作。

2.2 增材制造工艺技术

增材制造工艺技术是实现大型桁架结构的地面及在轨建造的基础性技术之一,其在桁架构型中

的应用主要体现在两个方面,一是桁架构型中接头节点的制造,二是桁架框整体结构的一体化制造。由于桁架结构的多样性,接头节点作为连接桁架构件的重要零件,其横截面相当复杂,往往难以制造,而且节点零件的性能决定了整个桁架结构的性能。如采用传统的机械加工方法^[66]制造的金属材料接头,配件最高可占桁架总重量的60%。因此,需要对接头结构构型及材料的选择进行创新性的研究^[67]。俄罗斯科学院列别捷夫物理研究所天文航天中心的研究人员,采用拓扑优化结合增材制造的方法研究了金属接头的特性,如图5所示,拓扑优化使优化区域的重量减少了34%,并使拟合后的总重量减少了9%,结构中的最大应力水平下降了21%^[68]。这对于空间光学望远镜桁架结构的制造非常有意义。

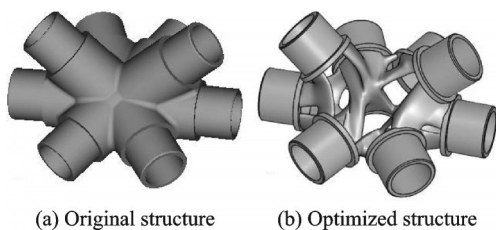


图5 拓扑优化的接头结构^[68]

Fig.5 Topological optimization of joint structure^[68]

针对桁架结构整体结构的一体化制造,Thales公司在航天器结构中大量地采用了这种构型^[69],材料则选用钛合金,最大尺寸达到360 mm。桁架结构的整体打印解决了传统空间望远镜刚度、热变形、重力变形、装配应力等多种力学条件耦合的问题,基于增材制造工艺设计的一体化桁架概念如图6所示。基于大型空间望远镜在轨建造以及未来深空探测的技术需求,在轨原位建造一体化桁架结构是重要的技术发展方向。美国NASA Ames研究中心开展了3D打印物理模型的研究^[70],开发了一套多尺度的预测方法,从量子尺度、分子尺度和微观尺度预测增材制造界面对性能影响,以及从宏观尺度分析构件成形过程。我国空间站中也已验证了聚合物作为原料的增材制造工艺。

相对于金属、聚合物材料,陶瓷材料的增材制

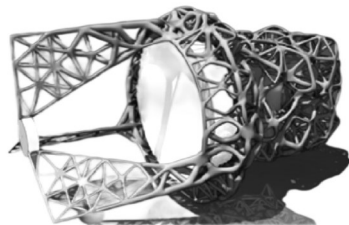


图6 望远镜桁架一体化制造示意图

Fig.6 Schematic diagram of integrated manufacturing of telescope truss

造技术发展起步较晚,但是也已经积累了大量行业经验。目前氧化物陶瓷(Al_2O_3 ^[71-72]、 ZrO_2 ^[73])、非氧化物陶瓷(SiC ^[74]、 Si_3N_4 ^[75-76])等的增材制造已被大量报道。陶瓷材料与增材制造技术的结合,为桁架结构的接头制造提供了新的解决方案。

2.3 三维点阵超结构

望远镜桁架对材料轻质化,以及对机械、热和其他物理性能的理想化综合特性的要求,可以说是材料科学的“天花板”。先进材料与先进制造技术不断发展和完善,极大拓展了桁架结构的选材和宏观构型设计理念。空间轻量化高承载三维点阵超结构,具有优异的力学特性和独特的多功能复合特性,一定程度上满足了大型桁架对结构尺寸稳定性的极致要求。三维点阵作为典型的轻质周期性结构,其宏观力学性能高度依赖于结构内部微观胞元的几何构造、分布特征和形变模式^[77-79]。与传统无序多孔材料(泡沫)、二维周期结构(蜂窝)和传统致密材料相比,具有如下特点:微结构内部的载荷传递路径精准,力学性能可调控范围广,可设计参数多。增材制造工艺技术的进步,也促进了复杂三维结构、高深宽比以及多材料点阵超结构的发展^[80],具体包括如表2特性^[81]。

表2 超材料特性及应用^[81]

Table 2 Characteristics and applications of metamaterials^[81]

| 特性 | 能力或应用 |
|-------|-------------------|
| 负刚度 | 高能量吸收率,极限传感器,极限阻尼 |
| 负泊松比 | 抵抗压痕,减少表面起皱,提高渗透率 |
| 负线胀系数 | 零线胀系数,无热应力材料 |
| 带隙 | 热绝缘 |

在具体应用中,点阵超结构理论在广义上进行了延伸,结构尺度从纳米级可拓展到米级,即宏观尺度的点阵结构,可实现结构轻量化、高强度、高吸能等特点的一体化设计。针对桁架应用而言,使用点阵超结构,主要面向力学和零膨胀设计^[82-83]。

点阵结构应用于桁架接头的重要的力学特性之一是减隔振。超结构抑振的工作频率与谐振微结构的设计密切相关,通过特定的微结构设计,一定程度上解决了桁架结构在静承载与动态功能设计上的固有矛盾^[84]。

3 桁架结构稳定性测试与评估技术

3.1 测量的影响要素及测量方法

对于空间光学望远镜结构参数及特性的测量,一般采用的是光学计量的方法。地面测试的目的是在一定精度下测量结构参数,并验证其在模拟空

间条件(真空、高低温、辐照)下维持这一精度的能力。对于大口径望远镜而言,还需要通过光学技术等监测结构在轨稳定性。测试验证环节如图7所示^[85-86],其中“*”表示测量结构尺寸变化。

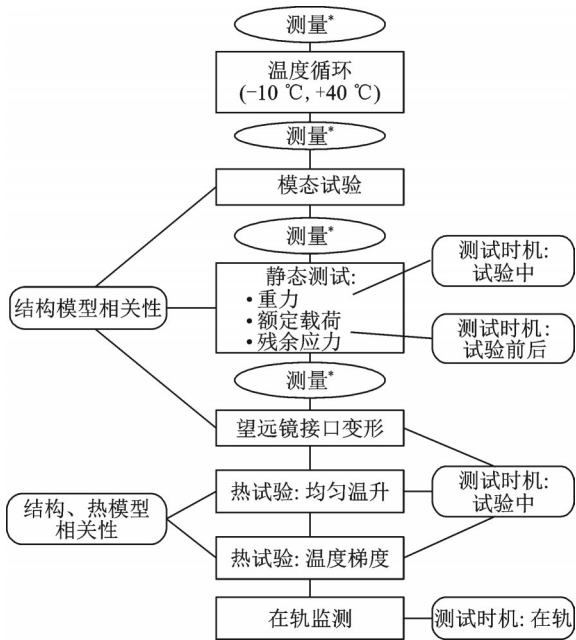


图7 望远镜结构测试验证环节^[85-86]

Fig.7 Telescope structure testing and verification process^[85-86]

对于桁架结构而言,待测量结构的尺寸在1 m至10 m范围内,预计测量精度为30 nm至100 μm^[87]。影响测量误差的要素主要包括:结构的尺寸,变形的范围,被测结构表面的反射特性(漫反射、镜面反射等),空间采样频率(奈奎斯特标准),绝对测量的精度及相对测量的分辨率,试验环境(振动水平、热环境条件、地面或天基环境)等。

光学计量方法(接触式的三坐标测量等方法本文不做描述)主要包括单自由度测量^[88-89]、3D轮廓测量^[90]、坐标测量、摄影测量^[91]、干涉测量(电子散斑干涉、全息)等。常用的仪器设备包括经纬仪、激光跟踪仪、摄影测量设备、电子散斑干涉仪、激光双频干涉仪等。

桁架结构常用的测量方法及其精度如表3所示^[87]。

表3 测量方法及其特性^[87]

Table 3 Measurement methods and characteristics^[87]

| 测量要素 | 光学成像摄影测量 | 散斑测量 | 坐标测量 |
|---------|----------|-----------|---------|
| 精度 | 10 μm/m | 0.5 μm/m | 15 μm/m |
| 变形或位移范围 | 无限制 | >1.5 m | 80 m |
| 测试稳定性 | 3 nm | 0.5 nm | 5 μm |
| 测量点数 | >1 000 | 1 000 000 | 10 000 |

3.2 桁架结构稳定性地面测定

3.2.1 桁架杆CTE参数测试

CTE是空间望远镜结构关注的重要指标之一。桁架杆线胀系数的精确测量是桁架结构设计及评估后续尺寸稳定性的基础^[92],不同于材料特性的测试,结构件的测试往往根据产品的工作温度及结构特点搭建相应的测试系统。在欧洲航天局(ESA)的指导下德国联邦物理技术公司研制了一种新的超精密干涉仪(Ultra-precision interferometer, UPI)实现了10 K到室温条件下CTE的精确测量^[93]。美国喷气推进实验室在JWST项目背景下通过激光干涉仪测试了在15 K温度下的结构蠕变和CTE^[94-95]。中国科学院长春光机所研制了一种基于激光干涉法的位移测量干涉仪(Displacement measuring interferometer, DMI)系统,其测试的对象是管状桁架杆,可测温度范围为20~40 °C,2.5 m长杆件的CTE测试精度达10⁻⁸ °C⁻¹^[96]。上海应用数学和力学研究所提出了基于电子散斑干涉法的CTE测量系统,测试的温度区间为-60 °C到180 °C^[97],测试精度达10⁻⁷ °C⁻¹。

Badami和Linder系统性讨论了CTE高精度绝对测量中的重大误差源^[98]。综合分析,针对桁架杆等细长结构件的CTE测试,其误差主要包括:

(1) 测试系统引入的误差

- ① 测试系统的标定精度,如一些系统采用Zerodur®计量块进行系统测量精度的标定;
- ② 测试环境的影响,包括温度、湿度、压力水平及均匀性的控制精度;
- ③ 测试系统中支撑工装,如接头的稳定性等;
- ④ 测试源的稳定性,如激光源的频率稳定性、干涉非线性、光源指向精度误差等。

(2) 测试对象的相关误差

- ① 被测件的表面状态及质量,如表面的反射特性、表面是否有与基体线胀系数差异性较大的涂层等;
- ② 被测样件在测试系统放置时与测试光路的配准关系及稳定性;
- ③ 被测样件的对称性,其表现为是否在不同的温度边界下产生非单一自由的变形等;
- ④ 重力的影响。

3.2.2 桁架结构尺寸稳定性的保证及标定

评估桁架结构的整体的尺寸稳定性时,主要考虑两个方面,分别是制造精度(包括尺寸精度及装配应力控制等)及在轨的热稳定性。结构装配的质量,是稳定的前提。JWST在主镜背板桁架结构装配过程中,进行了实时的应变和线性可变位移换能器(Linear variable displacement transducer,

LVDT)监测^[99],位置精度达到了0.01 mm。

在尺寸稳定性的测量方面,北京卫星制造厂马立等^[100]采用数字散斑干涉测量技术测试了星敏感器的安装桁架(尺寸300 mm),评估桁架的最终变形量为 $0.7 \mu\text{m}/\text{K}$ ($20\sim 45^\circ\text{C}$),由于其测试在实验室常压环境中开展,不确定度较大。真空环境下的测试可进一步提高结构变形测量的准确性、减小测量不确定度。JWST望远镜的科学仪器集成模块(Integrated science instrument module, ISIM)桁架支撑结构($2.2 \text{ m} \times 1.7 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$)的测量则在戈达德空间飞行中心的空间环境模拟器室中进行^[101],测试系统采用近景摄影测量方法,在30 K的低温环境下,实现了0.033 mm的测试精度。与此类似,中航工业成飞的科研人员研究了利用近距离摄影测量技术实现热真空大部件变形的测量系统^[102]。这类测试系统主要包括真空环境控制系统、测量系统及支撑系统。此外,镜头产品在地面环境试验时的光学像质变化,也更直观地体现了结构的尺寸稳定性。当然这已经是系统测试的范畴,本文不再赘述。

3.3 桁架结构稳定性在轨评估

空间光学望远镜结构的在轨监测是目前研究的一个新课题,结构在轨监测可以为主动热控提供控制依据、为已配置执行器的结构形状或位置修正提供依据。另外,光机结构的变形趋势为在轨主动光学的闭环调整提供一定的参考。现阶段国内外常见在轨测量技术主要有摄影测量技术、结构光测量技术、微波雷达探测技术、激光雷达探测技术、无线射频识别技术、红外辐射测量技术等,在轨应用的结构监测系统的基本要求是简单、紧凑,且鲁棒性好。

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)传感器具有简单、紧凑的特点^[103-105],通过在结构上安装/嵌入光纤来测量应变和/或温度,从而在地面和轨道上监测结构尺寸稳定性。基于分布式光纤传感技术的智能结构,其在健康监测等方面也得到广泛应用和研究^[106]。基于光学干涉原理的位移测量干涉仪系统,是另外一种技术途径,国内外学者对这两种方法的对比也得出了精度相当的结论。日本JAXA的研究人员提出了将传感器内嵌到桁架结构中以精确测量结构位移的技术方案,称之为BDMI,其原理示意图如图8所示^[107]。

在大尺度结构的在轨监测方面,天文卫星ASTRO-H上安装了一套基于激光干涉测量原理的精确对准监测系统,以满足更大的结构尺度上稳定性监测^[108-109]。这套监测系统的质量仅为3.5 kg,功耗小于5 W,实现了14 m长的桁架结构的在轨

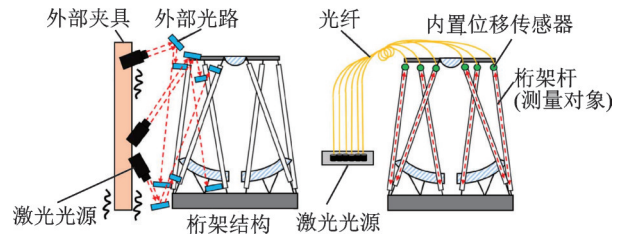


图8 内嵌在桁架中的精确位移测量系统

Fig.8 An accurate displacement measurement system embedded in the truss

监测,其监测精度为 $240 \mu\text{m}$,最终监测到的结构变形最大为1.5 mm。

综上,桁架结构稳定性测量测试主要在两个尺度下进行:宏观尺度测量,用于测量组件的整体形状及稳定性,以确保其满足光学系统的要求;微观尺度测量,用于根据建造对象的结构局部特征,准确地确定基础组件的稳定性特性,辅助高精度的装配等工艺过程。

4 结 论

未来太空探索中,大型化、轻量化、高性能、低成本的空间桁架需求广泛。空间桁架作为大口径空间光学望远镜结构的理想支撑平台已开展了广泛应用。本文围绕实现桁架结构的超轻、超稳特性,从构型优化设计、新型材料、先进制造工艺、精确测量标定方法等方面,系统性梳理了其理论基础、研究方法、应用现状。具体包括:

- (1)在概念/架构方面,桁架结构已具备模块化可重构的特点,应用层面需进一步增强功能性能;
- (2)在方法/构型方面,典型的充气展开钢化桁架需进一步增强功能性能,张弦桁架和自适应桁架构型需进一步开展创新研究;
- (3)在设计/分析方面,桁架设计等效本构模型已在工程应用,基于模型的系统工程及数字孪生方法的应用日趋完善;
- (4)在材料/工艺方面,桁架结构的极端温度适应性、增材制造的工艺性研究等已成熟,其多功能特性和智能特性需开展进一步的研究;
- (5)在装配/建造方面,大量的非接触计量方法得到应用。

面向未来应用,建议在以下4个方面开展研究:

- (1)提升面向大型空间望远镜建造的张弦桁架、充气桁架的先进桁架构型的设计、制造与验证技术能力;
- (2)面向3~5年的工程应用,亟待提升陶瓷材料增材制造、轻量化高承载三维点阵结构、空间环

境热变形稳定结构、轻量化智能折展结构等为代表的结构设计、优化、制造工艺及试验验证全流程技术能力；

(3)建设大型结构件湿胀、热胀特性精确测量装置(干涉测量装置),精确获取大型桁架总装、集成和测试前的产品特性；

(4)大力发展包括数字近景摄影测量、电子散斑干涉测量、数字全息干涉测量在内的分布式组合在线测量技术,服务大型望远镜桁架结构高精度测量及装配过程跟踪监控。

参考文献:

- [1] 刘湃,黄巧林,杨居奎.大口径长焦距相机主次镜支撑结构方案初步研究[J].航天返回与遥感,2014(3):60-67.
LIU Pai, HUANG Qiaolin, YANG Jukui. Research on support structure between primary and secondary mirror in large-aperture and long-focal-length space camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014(3): 60-67.
- [2] 曲慧东.空间望远镜光机结构设计及力学特性研究[D].长春:长春工业大学,2021.
QU Huidong. Research on optical and mechanical structure design and mechanical characteristics of space telescope[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- [3] LALLO M D. Experience with the hubble space telescope: 20 years of an archetype[J].Optical Engineering, 2012, 51(1): 011011.
- [4] CARTER R. Space telescope systems description handbook: LMSC/D974197B[R]. [S.l.]: Lockheed Missiles & Space Company, Inc, 1985.
- [5] ATKINSON C B, ARENBERG J W, GILMAN L, et al. Technology demonstration of large stable cryogenic composite structures for JWST[C]//Proceedings of SPIE Optical Engineering + Applications. San Diego, California, USA: SPIE, 2007: 668703.
- [6] BARTOSZYK A, JOHNSTON J D, KAPRIELIAN C, et al. Design/analysis of the JWST ISIM bonded joints for survivability at cryogenic temperatures[C]//Proceedings of Optical Materials and Structures Technologies II: International Society for Optics and Photonics. San Diego, California, USA: [s. n.], 2005, 5868: 58680K.
- [7] MIZUTANI T, YAMAWAKI T, KOMATSU K, et al. Preliminary structural design and key technology demonstration of cryogenic assembly in the next-generation infrared space telescope SPICA[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2015, 1(2): 027001.
- [8] MACEWEN H A, RANDO N, BRECKINRIDGE J B, et al. Assessment study of the SPICA telescope assembly[C]//Proceedings of UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts IV. San Diego, California, USA: [s. n.], 2009: 743605.
- [9] MONDELLO J, BAIRD P, BARTUSEK L, et al. Wide-field infrared survey telescope (WFIRST): Composite structure verification for operational temperatures[C]//Proceedings of Astronomical Telescopes + Instrumentation. Austin, Texas, USA: [s. n.], 2018: 106982G.
- [10] PASQUALE B A, CASEY T, MARX C T, et al. Optical design and predicted performance of the WFIRST phase-b imaging optics assembly and wide field instrument[C]//Proceedings of Optical Engineering + Applications. San Diego, California, USA: [s. n.], 2018: 107450K.
- [11] REDDING D C, HICKEY G, AGNES G, et al. Active optics for a 16-meter advanced technology large aperture space telescope[R]. [S.l.]: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2008.
- [12] POSTMAN M, ARGABRIGHT V, ARNOLD B, et al. Advanced technology large-aperture space telescope (ATLAST): A technology roadmap for the next decade[J]. Instrumentation and Methods for Astrophysics, 2009. DOI:10.48550/arXiv.0904.0941.
- [13] ARNOLD W R, STAHL H P. Structural design considerations for an 8-m space telescope[C]//Proceedings of Optical Engineering + Applications. San Diego, California, USA: [s. n.], 2009.
- [14] 雷红帅,赵则昂,郭晓岗,等.航天器轻量化多功能结构设计与制造技术研究进展[J].宇航材料工艺, 2021, 51(4): 10-22.
LEI Hongshuai, ZHAO Zeang, GUO Xiaogang, et al. Research progress on the design and manufacture technology of lightweight multifunctional spacecraft structures[J]. Aerospace Materials and Technology, 2021, 51(4): 10-22.
- [15] BELVIN W K. Advances in structures for large space systems[C]//Proceedings of AIAA Space. San Diego, California, USA: AIAA, 2004: 1-10.
- [16] MICHELL A G. The limits of economy of material in frame-structures[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1904, 8(47): 589-597.
- [17] 李东泽,于登云,马兴瑞.基频约束下的桁架结构半定规划法拓扑优化[J].工程力学, 2011, 28(2): 181-185.
LI Dongze, YU Dengyun, MA Xingrui. Truss topology optimization with fundamental frequency constraints

- via semi-definite programming[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(2): 181-185.
- [18] 郝宝新,周志成,曲广吉,等.大型航天器桁架式主承力结构构型拓扑优化研究[J].*航天器工程*, 2014, 23(2): 44-51.
HAO Baoxin, ZHOU Zhicheng, QU Guangji, et al. Research on configuration topology optimization for main truss structure of large spacecraft[J]. *Spacecraft Engineering*, 2014, 23(2): 44-51.
- [19] 郝宝新,周志成,曲广吉,等.桁架结构拓扑优化系统软件开发及其在大型天线安装桁架设计中的应用[J].*航天器环境工程*, 2020, 37(1): 73-80.
HAO Baoxin, ZHOU Zhicheng, QU Guangji, et al. Development of truss topology optimization software and its application in configuration design of a large antenna mounting truss[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(1): 73-80.
- [20] 杨利伟,李志来,鲍赫.基于静定空间桁架原理的空间相机结构设计[J].*光电工程*, 2010, 37(11): 73-77.
YANG Liwei, LI Zhilai, BAO He. Design for structure of space camera based on the theory of statically determinate spatial frameworks[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(11): 73-77.
- [21] KURRER K E. The history of the theory of structures: From arch analysis to computational mechanics [J]. *International Journal of Space Structures*, 2008, 23(3): 193-197.
- [22] FÖPPL A. *Das fachwerk im raume*[M]. [S.l.]: BG Teubner, 1892.
- [23] BELY P. *The design and construction of large optical telescopes*[M]. [S.l.]: Springer, 2003.
- [24] 安明鑫.大型空间相机桁架结构稳定性研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
AN Mingxin. Research on stability of the truss structure in large-scale space camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [25] HEDGEPEETH J. Critical requirements for the design of large space structures[C]//*Proceedings of the 2nd Conference on Large Space Platforms: Toward Permanent Manned Occupancy in Space*. San Diego, California, USA: [s.n.], 1981: 443.
- [26] LAKE M S, PETERSON L D, LEVINE M B. Rationale for defining structural requirements for large space telescopes [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2002, 39(5): 674-681.
- [27] CUNNINGHAM C, RUSSELL A. Precision engineering for astronomy: Historical origins and the future revolution in ground-based astronomy [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2012, 370: 3852-3886.
- [28] 范斌,王艳.国外长焦距高分辨率遥感相机桁架结构研究[J].*航天返回与遥感*, 2008(2): 35-41.
FAN Bin, WANG Yan. Research on truss structure of foreign remote-sensing cameras with long focal length and high resolution [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008(2): 35-41.
- [29] OKEN S, SKOUMAL D, STRAAYER J, et al. Design of a graphite/epoxy metering truss for the large space telescope[C]//*Proceedings of the 16th Structural Dynamics, and Materials Conference*. Denver, CO, USA: [s.n.], 2002: 784.
- [30] LILLIE C. Large deployable telescopes for future space observatories[C]//*Proceedings of UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts II*. San Diego, California, USA: [s.n.], 2005: 108-119.
- [31] SIMMONS L, SONG K, DOGGETT W R. TriTruss strut-to-joint bond test: Analysis and setup [C]//*Proceedings of AIAA SCITECH 2022 Forum*. San Diego, CA & Virtual: AIAA, 2022: 1-9.
- [32] 牛波.一种空间可展开精密光学望远镜的展开动力学分析[D].西安:西安电子科技大学, 2008.
NIU Bo. The deployment dynamics analysis of a space deployable precision optical telescope[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [33] NURRE G, RYAN R, SCOFIELD H, et al. Dynamics and control of large space structures[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1984, 7(5): 514-526.
- [34] MIURA K. Concepts of deployable space structures [J]. *International Journal of Space Structures*, 1993, 8(1/2): 3-16.
- [35] OEGERLE W R, FEINBERG L D, PURVES L R, et al. ATLAST-9.2 m: A large-aperture deployable space telescope [C]//*Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*. San Diego, California, USA: NASA, 2010: 77312M.
- [36] REDDING D C, FEINBERG L D, POSTMAN M, et al. Beyond JWST: Performance requirements for a future large UVOIR space telescope[C]//*Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*. Montréal, Quebec, Canada: [s.n.], 2014: 914312.
- [37] DANNER R, PELLEGRINO S, DAILEY D, et al. Precision-deployable, stable, optical benches for cost-effective space telescopes[M]. Falls Church, VA: Northrop Grumman Systems Corporation, 2011: 1-10.
- [38] SCHRADER K N, FETNER R H, GRIFFIN S F,

- et al. Development of a sparse-aperture testbed for optomechanical control of space-deployable structures [C]//Proceedings of Highly Innovative Space Telescope Concepts. Waikoloa, Hawaii, USA: [s.n.], 2002: 384-395.
- [39] DAI L, HU L. Kinematic analysis and model fabrication of a space deployable optical baffle[J]. *AIAA Journal*, 2020, 58(3): 1386-1396.
- [40] MACEWEN H A, WARREN P A, BRECKINRIDGE J B, et al. Lightweight optical barrel assembly structures for large deployable space telescopes[C]//Proceedings of UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts IV. [S.l.]: [s.n.], 2009.
- [41] 李志来, 杨利伟, 徐宏, 等. 空间望远镜可展开次镜支撑桁架综述[J]. *航天返回与遥感*, 2017, 38(3): 58-67.
LI Zhilai, YANG Liwei, XU Hong, et al. Overview of deployable secondary mirror support truss for space telescope [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(3): 58-67.
- [42] SAITOH M, KUROKI F, OKADA A, et al. Design and construction of tension strut dome[J]. *Kou Kou-zou Rombunshuu*, 1994, 1(3): 67-78.
- [43] KRIKKEN A. Design of the secondary mirror support structure for the deployable space telescope[D]. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, 2018.
- [44] LIU K, PAULINO G H. Tensegrity topology optimization by force maximization on arbitrary ground structures[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, 59(6): 2041-2062.
- [45] 郁顺旺. 空间充气桁架动力学响应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
YU Shunwang. Dynamic response analysis of space inflatable truss[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [46] 徐彦, 关富玲. 新型充气展开遮光罩设计方案研究和仿真分析[J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(2): 55-63.
XU Yan, GUAN Fuling. The design and simulation research of new inflatable sunshield structure[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(2): 55-63.
- [47] ARINK J W. Thermal-mechanical design of a baffle: For the deployable space telescope[D]. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, 2019.
- [48] KIM D, WALKER C K, APAI D, et al. Disruptive space telescope concepts, designs, and developments: OASIS and Nautilus-INVITED[C]//Proceedings of the European Physical Journal Conferences. Joensuu, Finland: [s.n.], 2020: 06001.
- [49] 洪一红, 刘勇兵, 徐彦, 等. 充气薄膜桁架的协同折叠设计及展开过程仿真[J]. *中国空间科学技术*, 2020, 40(5): 91-98.
HONG Yihong, LIU Yongbing, XU Yan, et al. Collaborative fold design and deployment simulations of inflatable membrane trusses[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2020, 40(5): 91-98.
- [50] SONG W Y, XIE P, LIU S, et al. Thermal stability design of asymmetric support structure for an off-axis space camera[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 5184.
- [51] PRADEEP T, SONI S K, THOMAS B. Design manufacture and testing of a composite support structure for spacecraft application[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 22: 1374-1379.
- [52] WEI L, ZHANG L, GONG X X. Design and optimization of the CFRP mirror components[J]. *Photonic Sensors*, 2017, 7(3): 270-277.
- [53] WEI L, ZHANG L, GONG X X, et al. Design and optimization for main support structure of a large-area off-axis three-mirror space camera[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 1094-1100.
- [54] PATI S, MANOMASANTIPHAP S, GOTO T, et al. Development of CFRP with polyaniline-based resin using curable dopants employing storage stable prepregs[J]. *Applied Composite Materials*, 2021, 28(2): 381-394.
- [55] 张永涛. 热循环和电子辐照对 M55J/氰酸酯复合材料结构及性能影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
ZHANG Yongtao. Effect of thermal cycling and electron irradiation on structure and properties of M55/CE composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [56] 罗锡林. 复合材料桁架融合节点设计及其承载性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LUO Xilin. Design and loading capacity analysis in integrated joints of composite truss[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [57] KUO J C, HUNG H C, YANG M Y, et al. Composite materials application on FORMOSAT-5 remote sensing instrument structure[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2017. DOI: 10.3319/TAO.2016.04.17.01.
- [58] GUIONIE S, BRICHE G, SUCHER D, et al. Full scale active telescope engineering model[C]//Proceedings of International Conference on Space Optics—ICSO 2020. [S.l.]: [s.n.], 2020.
- [59] BÉHAR-LAFENÊTRE S, GRASSET P, LOUH N, et al. Silicon nitride for space optical applications [C]//Proceedings of International Conference on

- Space Optics—ICSO 2020. [S.l.]: [s.n.], 2020.
- [60] DEVILLIERS C, LASIC T, BOBAN D, et al. Si₃N₄ ceramic application for large telescope development results[C]//Proceedings of International Conference on Space Optics—ICSO 2012. [S.l.]: [s.n.], 2012.
- [61] LI Y, GE W, JIANG W. Research on sub-micron measurement methods of M55J carbon fibre/cyanate ester composites[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(23): 9241-9245.
- [62] SHI P L, BAI X L, FU P J, et al. M55J carbon fiber/cyanate ester composites' properties and application [C]//Proceedings of the 21st International Congress on Composites. Xi'an, China: [s.n.], 2016.
- [63] 陈力, 冯坚. 氮化硅陶瓷材料的研究现状及其应用[J]. 硬质合金, 2002, 19(4): 226-229.
CHEN Li, FENG Jian. Research status and application of silicon nitride ceramic materials[J]. Cemented Carbide, 2002, 19(4): 226-229.
- [64] 陈波, 韦中华, 李宾, 等. 氮化硅陶瓷在四大领域的研究及应用进展[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(4): 1404-1415.
CHEN Bo, WEI Zhonghua, LI Bin, et al. Research and application progress of silicon nitride ceramics in four major fields[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(4): 1404-1415.
- [65] 蔡德龙, 陈斐, 何凤梅, 等. 高温透波陶瓷材料研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2019, 40(Z1): 4-120.
CAI Delong, CHEN Fei, HE Fengmei, et al. Research progress in high-temperature transparent ceramic materials[J]. Advanced Ceramics, 2019, 40(Z1): 4-120.
- [66] ATKINSON C, TEXTER S, KESKI-KUHA R, et al. Status of the JWST optical telescope element[C]//Proceedings of Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Edinburgh, United Kingdom: [s.n.], 2016: 990403.
- [67] KUMAR L J, KRISHNADAS NAIR C. Current trends of additive manufacturing in the aerospace industry[M]. [S.l.]: Springer, 2017: 39-54.
- [68] GOLUBEV E, ARKHIPOV M, GALINOVSKY A, et al. Lightweight nodal parts for large space truss structures enabled by SLM: Modelling, manufacturing, and testing[C]//Proceedings of Advanced Materials & Demanding Applications 2020 (AMDA 2020). [S.l.]: [s.n.], 2020.
- [69] THALES ETHM. The 3D printed electrical thruster mechanism[EB/OL]. (2022-02-10). <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/ethm-3d-printed-electrical-th-ruster-mechanism>.
- [70] PRATER T, EDMUNSON J, FISKE M, et al. NASA's in-space manufacturing project: Update on manufacturing technologies and materials to enable more sustainable and safer exploration[C]//Proceedings of the 70th International Astronautical Congress (IAC). Washington, DC, USA: NASA, 2019.
- [71] ZHANG K, HE R, DING G, et al. Effects of fine grains and sintering additives on stereolithography additive manufactured Al₂O₃ ceramic[J]. Ceramics International, 2021, 47(2): 2303-2310.
- [72] ZHANG K, XIE C, WANG G, et al. High solid loading, low viscosity photosensitive Al₂O₃ slurry for stereolithography based additive manufacturing[J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 203-208.
- [73] WEI K, HE R, CHENG X, et al. Fabrication and mechanical properties of lightweight ZrO₂ ceramic corrugated core sandwich panels[J]. Materials & Design, 2014, 64: 91-95.
- [74] DING G, HE R, ZHANG K, et al. Stereolithography 3D printing of SiC ceramic with potential for lightweight optical mirror[J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 18785-18790.
- [75] WU X, XU C, ZHANG Z. Preparation and optimization of Si₃N₄ ceramic slurry for low-cost LCD mask stereolithography[J]. Ceramics International, 2021, 47(7): 9400-9408.
- [76] WEI Z H, CHENG L J, MA Y X, et al. Direct fabrication mechanism of pre-sintered Si₃N₄ ceramic with ultra-high porosity by laser additive manufacturing[J]. Scripta Materialia, 2019, 173: 91-95.
- [77] 韦凯, 裴永茂. 轻质复合材料及结构热膨胀调控设计研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62(1): 47-60.
WEI Kai, PEI Yongmao. Development of designing lightweight composites and structures for tailorable thermal expansion[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(1): 47-60.
- [78] WEI K, CHEN H, PEI Y, et al. Planar lattices with tailorable coefficient of thermal expansion and high stiffness based on dual-material triangle unit[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2016, 86: 173-191.
- [79] MILLER W, MACKENZIE D S, SMITH C W, et al. A generalised scale-independent mechanism for tailoring of thermal expansivity: Positive and negative [J]. Mechanics of Materials, 2008, 40: 351-361.
- [80] 高立波, 陆洋. 微点阵金属复合机械超材料[C]//2018年全国固体力学学术会议摘要集(下). 哈尔滨, 中国: [s.n.], 2018.
GAO Libo, LU Yang. Microarray metal composite mechanical metamaterials[C]//Proceedings of Solid-Mechanics 2018. Harbin, China: [s.n.], 2018.
- [81] JIA Z, LIU F, JIANG X, et al. Engineering lattice

- metamaterials for extreme property, programmability, and multifunctionality[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127: 150901.
- [82] ZHAO W, WANG C, XING B, et al. Mechanical properties of zirconia octet truss structures fabricated by DLP 3D printing[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(8): 085201.
- [83] 殷德政, 张学勤, 张可强, 等. 基于增材制造的陶瓷材料点阵结构研究现状与挑战[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(9): 1786-1809.
- YIN Dezheng, ZHANG Xueqin, ZHANG Keqiang, et al. Development on ceramic lattice structures via additive manufacturing[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(9): 1786-1809.
- [84] 赵伟佳, 王倚天, 朱睿, 等. 轻质嵌入式超结构的低频抑振研究[J]. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 2020, 50(9): 158-171.
- ZHAO Weijia, WANG Yitian, ZHU Rui, et al. Isolating low-frequency vibration via lightweight embedded metastructures[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(9): 158-171.
- [85] BAILLY B, CORNU J L, CAPDEPUY B, et al. High stability carbon/carbon telescope structure[C]// *Proceedings of International Conference on Space Optics—ICSO 1997*. Toulouse, France: [s.n.], 2018.
- [86] EDESON R, MORRIS N, TATNALL A, et al. Dimensional stability testing on a space optical bench structure[J]. *AIAA Journal*, 2009, 47(1): 219-228.
- [87] ROCHUS P, ROOSE S, STOCKMAN Y, et al. Optical test and measurement methods for mechanical structures used in space flight application and for space telescope applications[C]// *Proceedings of the 57th International Astronautical Congress*. Valenica, Spain: [s.n.], 2006.
- [88] JUST A, KRAUSE M, PROBST R, et al. Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator[J]. *Metrologia*, 2003, 40(5): 288.
- [89] CALVEL B, CABEZA I, CABRAL A, et al. High precision optical metrology for Darwin: Design and performance[C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Space Optics*. Toulouse, France: [s.n.], 2004: 501-507.
- [90] MÉDART P, BUSURIN V, GAILLY P, et al. Manufacturing of aspherical optics by ion beam and measuring techniques[C]// *Proceedings of the 2nd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*. Xi'an, China: [s.n.], 2006: 104-115.
- [91] FRASER C S. Photogrammetric measurement to one part in a million[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, 58: 305-310.
- [92] ROOSE S, HELTZEL S. High-precision measurements of thermal expansion at cryogenic temperature on stable materials[C]// *Proceedings of MacroScale 2011*. Wabern, Switzerland: [s.n.], 2011.
- [93] SCHÖDEL R, WALKOV A, ZENKER M, et al. A new ultra precision interferometer for absolute length measurements down to cryogenic temperatures[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(9): 094004.
- [94] HALVERSON P G, DUDICK M J, KARLMANN P, et al. The JPL cryogenic dilatometer: Measuring the thermal expansion coefficient of aerospace materials[R]. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2007.
- [95] DUDIK M J, HALVERSON P G, LEVINE-WEST M B, et al. Precision cryogenic dilatometer[R]. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2005.
- [96] SUN B, ZHANG H, XUE C, et al. A high-precision apparatus for dimensional characterization of highly stable materials in space applications[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021. DOI: 10.1080/15376494.2021.1926605.
- [97] DONG C, LI K, JIANG Y, et al. Evaluation of thermal expansion coefficient of carbon fiber reinforced composites using electronic speckle interferometry[J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 531-543.
- [98] BADAMI V G, LINDER M. Ultrahigh-accuracy measurement of the coefficient of thermal expansion for ultralow expansion materials[C]// *Proceedings of Emerging Lithographic Technologies VI*. Santa Clara, California, USA: [s.n.], 2002: 469-480.
- [99] COHEN L M. NASA James Webb Space Telescope Engineering of the primary mirror segment assemblies (PMSA) and the primary mirror backplane support structure (PMBSS)[R]. [S.l.]: Harvard-Smithsonian Center For Astrophysics, 2015.
- [100] 马立, 杨凤龙, 陈维强, 等. 尺寸高稳定性复合材料桁架结构的研制[J]. *航天器环境工程*, 2016, 33(3): 229-234.
- MA Li, YANG Fenglong, CHEN Weiqiang, et al. Development of a high dimensional stable composite truss[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2016, 33(3): 229-234.
- [101] NOWAK M D, CLEVELAND P E, COFIE E, et al. Cryogenic performance of a high precision photogrammetry system for verification of the James Webb Space Telescope Integrated Science Instrument Module and associated ground support equipment structural

- alignment requirements[C]//Proceedings of Optical System Alignment, Tolerancing, and Verification IV. San Diego, California, USA: [s.n.], 2010: 80-88.
- [102] ZHU X, LIU L, CHEN X. Accuracy improving deformation measurement system for large components in thermal vacuum using close-range photogrammetry [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(7): 1201-1216.
- [103] FRIEBELE E, ASKINS C, BOSSE A, et al. Optical fiber sensors for spacecraft applications[J]. Smart Materials and Structures, 1999, 8(6): 813.
- [104] MIZUTANI T, TAKEDA N, TAKEYA H. On-board strain measurement of a cryogenic composite tank mounted on a reusable rocket using FBG sensors [J]. Structural Health Monitoring, 2006, 5(3): 205-214.
- [105] KIM H I, KANG L H, HAN J H. Measurement of the thermal expansion for space structures using fiber bragg grating sensors and displacement measuring interferometers[C]//Proceedings of ASME 2008 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. Lake Buena Vista, Florida, USA: [s.n.], 2008: 387-395.
- [106] 刘鹏. 基于分布式光纤传感技术的空间桁架结构形态监测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- LIU Peng. Research on spatial truss structure morphology monitoring technology based on distributed optical fiber sensing technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [107] KITAMOTO K, KAMIYA T, MIZUTANI T. Evaluation of dimensional stability of metering truss structure using built-in laser interferometric dilatometer [J]. Engineering Research Express, 2020, 2(4): 045023.
- [108] KAWANO T, ISHIMURA K, IIZUKA R, et al. Validation of on-orbit thermal deformation and finite element model prediction in X-ray astronomical satellite Hitomi[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 2018, 16(3): 242-247.
- [109] GALLO L, LAMBERT C, KOUJELEV A, et al. The Canadian ASTRO-H metrology system[C]// Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering. [S.l.]: SPIE, 2012.

(编辑: 胥橙庭)