

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209193

遥感航天器在轨结构微变形光纤监测技术发展综述^{*}

孙广开^{1,2}, 李 红^{1,2}, 吴 越^{1,2}, 张 旭^{1,2}, 何彦霖^{1,2}, 祝连庆^{1,2}

(1. 北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192;

2. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100016)

摘 要:对地、对天观测航天器在深空和极地探测、军事侦查、国土资源测绘、地质与农业灾害监测、海洋观测、气象观测和环境监测等系关经济社会发展的重要领域都发挥着关键作用。遥感航天器在轨结构受空间极端温度变化、重力、碎片冲击和疲劳等因素作用会产生微变形,在轨微变形监测对保障遥感航天器功能指标实现和系统可靠性及寿命有重要作用。光纤监测技术被视为最具潜力的遥感航天器在轨监测技术之一,经过近 30 年来的研究发展,正在从实验室研究向工程应用演进,但是目前存在若干问题限制了该技术的应用发展,亟待探讨解决方法。为此,梳理了遥感航天器结构微变形监测的主要技术,分析了光纤监测的主要技术类型、技术优缺点、微变形场重建算法、在轨适用性和典型应用案例,指出了需要研究解决的关键问题和未来发展方向。

关键词:遥感;航天器;微变形;在轨监测;光纤监测

中图分类号: TH-3 V19 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 413.1040

Development of optical fiber monitoring technology for micro deformation of remote sensing spacecraft on-orbit structure: A review

Sun Guangkai^{1,2}, Li Hong^{1,2}, Wu Yue^{1,2}, Zhang Xu^{1,2}, He Yanlin^{1,2}, Zhu Lianqing^{1,2}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China)

Abstract: Spacecrafts for earth and celestial observation play a key role in important fields related to national economic and social development, such as deep space and polar exploration, military investigation, surveying and mapping of land and resources, geological and agricultural disaster monitoring, marine observation, meteorological observation and environmental monitoring. The on-orbit structure of the remote sensing spacecraft may undergo micro deformation because of extreme temperature change in space, gravity, debris impact, fatigue, etc. The on-orbit micro deformation monitoring plays an important role in ensuring the realization of functional indicators of remote sensing spacecraft and the reliability and service life of the system. Optical fiber monitoring technology is regarded as one of the most potential on-orbit monitoring technologies for remote sensing spacecraft. After research and development over the past three decades, it is evolving from laboratory research to engineering application. However, there are some problems that limit the application and development of this technology, which need to be solved urgently. Therefore, this article reviews the main technologies for monitoring the micro deformation of the structure of remote sensing spacecraft, analyzes the main technical types, technical advantages and disadvantages, micro deformation field reconstruction algorithm, on-orbit applicability, and typical application cases of optical fiber monitoring, and illustrates the key problems to be studied and solved and the future development direction.

Keywords: space remote sensing; high resolution imaging; structural deformation; on-orbit monitoring; optical fiber monitoring

0 引 言

对地、对天观测航天器是“国家十四五规划和 2035 年远景目标”重点发展的高端航天装备,在深空和极地探测、军事侦查、国土资源测绘、地质与农业灾害监测、海洋观测、气象观测和环境监测等关系国民经济社会发展的重点领域都发挥着关键性作用,代表着国家核心竞争力^[1-3]。此类航天器主要包括遥感卫星和深空探测器等。

高分辨率和高图像定位精度是高性能遥感航天器的关键特征和核心指标^[4-7],而在轨结构微变形是影响遥感成像质量和图像定位精度的重要因素之一。这是因为在轨结构受空间极端温度变化(空间环境中没有空气传热和散热,航天器受太阳直接照射的一面会产生高达 100℃ 以上的高温,而背向太阳一面的温度可低至 -100℃ ~ -200℃。随着太阳照射角度和向阳面变化,航天器结构不同部位的温度会在较大范围不断变化^[7-9]),以及重力、太空碎片冲击和疲劳等因素作用会产生微变形,不仅对遥感成像质量和图像定位精度造成影响,而且可衍生出疲劳裂纹,危及航天器的安全可靠性和使用寿命^[9-11]。

在轨结构微变形对遥感航天器产生的典型影响和危害有^[11-14]:对于高分辨率光学遥感卫星,在轨微变形直接影响相机、陀螺仪和星敏感器等关键部件的空间指向及相对几何关系,进而严重影响卫星探测精度和图像定位与配准能力,如遥感相机安装平台产生微米级的变形,即可导致角秒级的相机安装面法向指向变化,造成米级的成像误差^[14]。卫星天线反射器在空间冷热交变和重力作用下,直径 10 m 的反射面天线的变形量可达 12 mm、型面误差可达 3.8 mm(天线反射器工作面各节点变形量的均方根误差),这可使天线增益减少 1.5 dB,严重影响卫星天线的信号收发能力。航天器结构长期受微变形反复作用可能产生疲劳裂纹、脱粘和分层等多种损伤,随时间推移各类损伤逐渐累积生长扩大,可能导致结构失效,进而造成航天器功能失效和报废等严重后果。

随着遥感航天器探测精度、范围和稳定性要求不断提升,大量关键部件采用可设计性强、热稳定性好、比强度高的层压复合材料制造,以有效抑制结构在轨变形^[15-18]。但是受制造误差、装配工艺和空间极端温度变化等因素影响,此类结构在轨应用时仍然可能产生超出设计阈值的变形,变形量可从纳米级跨至毫米级甚至米级。对于亚米级以上精度的遥感航天器,其关键结构即使产生微米级甚至纳米级的微小变形也可能导致米级的图像定位误差。为此,必须采用有效技术在轨监测微变形,这对实施反馈控制、修正遥感数据至关重要,也是评定航天器设计性能、反演设计参数的关键。

近 30 年间,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、欧洲空间局(European Space Agency, ESA)和中国空间技术研究院等重要航天单位针对航天器在轨结构微变形监测都开展了大量研究和应用实践,为卫星、火箭、飞船、空间站、空间探测器等各类航天器安全可靠运行提供了重要保障。但是,与其他航天器相比,高分辨遥感航天器要求在轨监测关键结构的纳级微变形(以应变表示时,需要监测的应变量为 10^{-9} ϵ 量级),而现有监测技术在测量精度和系统体积重量等方面难以同时满足其在轨应用要求。这制约着遥感成像质量和图像定位精度的进一步提升,是航天领域亟需研究解决的关键问题。

在各类航天器在轨监测技术中,光纤传感技术能够达到纳级精度,被视为最具应用潜力的在轨监测技术之一。为此,本文以该技术为主线,系统地分析了遥感航天器在轨结构微变形监测的主要技术方法、光纤监测技术类型、微变形场重建方法和典型应用案例等,指出了需要研究解决的关键问题,展望了未来发展的重点方向。

1 在轨微变形监测技术概况

1.1 在轨微变形监测主要技术方法

对于高分辨率遥感航天器,需要在轨监测微变形的主要结构包括:大型雷达天线,大口径光学元件,空间相机和星敏感器等关键载荷安装基板及支撑结构等。受空间极端温度变化等多种复杂环境因素作用(如图 1 所示),这些结构的在轨变形可超出设计阈值,并且具有跨尺度的特点。为保证遥感探测精度,需要监测的变形量可由纳米级跨至毫米级甚至米级。

目前,应用于遥感航天器结构微变形监测的主要技术包括:摄影测量法,数字图像相关法,数字散斑干涉测量法,激光干涉测量法,光电自准直测量法,基于二维基于二维位置探测器(position sensitive detector, PSD)的高精度激光位移测量法,以及各类应变传感器测量法等^[19-24]。这些监测技术经过数十年发展,已在多种航天器结构监测中得到有效应用,主要技术的优缺点及典型应用如表 1 所示。

以大口径光学相机和雷达天线为例,为满足此类关键载荷大尺寸结构变形高精度测量要求,国内外开展了大量研究工作,如:NASA、ESA、中国空间技术研究院等单位,普遍采用摄影测量、数字图像相关和激光跟踪仪等方法,在空间模拟环境下监测大口径光学相机和卫星天线等有效载荷关键结构变形,并采用光纤传感器在轨监测多种航天器结构的应变和位移等参数,测量精度一般在微米级^[30-33]。在最先进太空观测装备“詹姆斯·韦伯”太空望远镜的研制过程中,为解决主镜支撑结构变形监

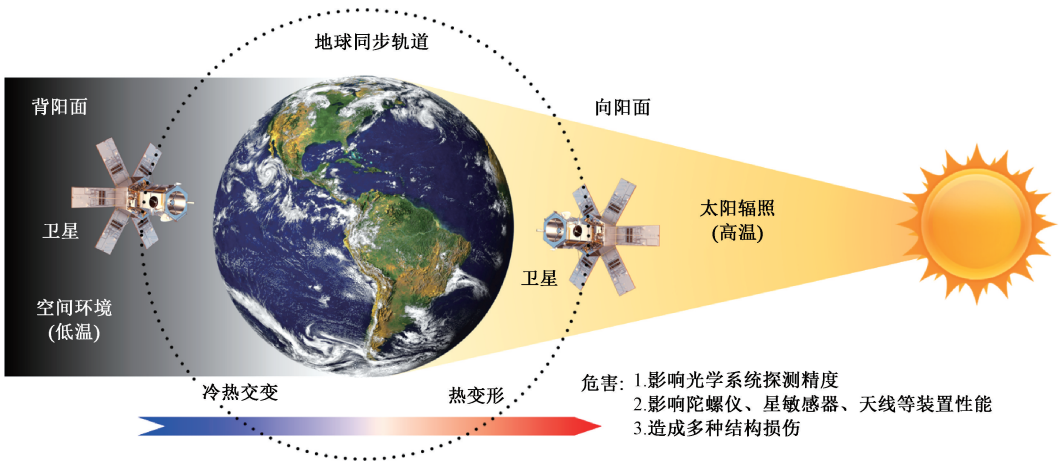


图 1 空间冷热交变环境引起的在轨微变形对航天器性能的影响

Fig. 1 The influence of on-orbit micro-deformation caused by the alternating cold and hot space environment on the performance of spacecraft

表 1 航天器结构微变形监测主要技术性能对比^[25-33]

Table 1 Comparison of technical performance of spacecraft structure micro-deformation monitoring

技术类型	测量精度 量级/m	监测点 数量	主要监 测对象	目前主要 应用场合	优点	缺点
数字摄影测量	10^{-6}	视场范围内的全场测量	大面型结构全场三维位移	地面试验	全场测量;非接触测量;装置成熟,使用简便,可靠性高。	测量精度在微米级;在轨应用时相机布置及视场范围受空间条件限制;空间温度变化和相机发热影响测量精度。
数字散斑干涉测量	10^{-6}	视场范围内的全场测量	大面型结构全场应变与三维位移	地面试验	全场测量;非接触测量;装置成熟,使用简便,可靠性高。	与摄影测量相同。
激光干涉测量	$10^{-9} \sim 10^{-6}$ 最高 10^{-20}	单个或少数几个测量点	结构关键点三维位移高精度测量	地面试验	测量精度高,可达纳米级甚至更高精度;非接触测量。	监测装置精密复杂,安装受空间条件限制,测量精度容易受空间环境影响;监测点数量少,装置数量随监测点数量成倍增加。
基于二维 PSD 的激光位移测量	10^{-6}	单个或少数几个监测点	结构关键点三维位移高精度测量	在轨监测	非接触测量;装置成熟,使用简便,可靠性高,容易在轨应用。	测量精度在微米级;监测点数量少。
电阻应变片测量	10^{-6}	任意范围内的全场测量	大面型结构全场应变与三维位移	在轨监测	监测点数量可达百级;装置成熟,使用简便,容易在轨应用。	测量精度在微米级;系统的体积重量功耗随监测点数量增加而大幅增大,在轨应用时受条件限制仅支持少量监测点。
光纤传感测量	$10^{-9} \sim 10^{-6}$ 最高 10^{-13}	任意范围内的全场测量	大面型结构全场应变与三维位移	在轨监测	测量精度高,可达纳米级甚至更高精度;监测全场应变和三维位移,监测点数量可达万级;监测装置体积重量功耗小,在轨应用时支持大量监测点。	虽然具有纳级精度,但缺少可在轨使用的关键装置;测量精度容易受环境温度等因素影响。

测难题,开展了数字散斑干涉测量方法研究与仪器研制,达到亚微米级精度。NASA 在核分光望远镜阵列 NuSTAR 上搭载了一套基于二维 PSD 的激光位移测量装置,实现镜面与探测器相对位置变化的高精度在轨监测,在 $\pm 3\text{ mm}$ 量程达到 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的测量精度^[25]。为实现纳米精度测量,激光回馈(自混合)干涉测量技术得到发展,清华大学等单位研制出在米级量程内达到纳米精度的跨尺度高精度激光回馈干涉测量仪器^[26-27],并在地面模拟环境下应用于大口径光学相机等关键结构微变形测试。

1.2 现有监测技术存在的主要问题

在各类微变形监测技术中,摄影测量、数字图像相关、数字散斑干涉法的测量精度一般在微米级至亚微米级,难以达到纳米精度。激光干涉测量虽然具有纳米精度,但是通常需要配合靶镜使用,这使其应用对象和场合受到限制:一方面是一些关键结构无法使用靶镜,另一方面是靶镜在空间环境下受热、重力作用也会发生变形,影响测量精度。激光回馈干涉测量无需使用靶镜且具有纳米精度^[27],但是目前成功应用的激光回馈干涉仪主要测量轴向一维位移,要测量三维位移则需要多台干涉仪同时工作,尤其是当需要同时监测多个测量点时,所需干涉仪数量成倍增加,这使得激光回馈干涉测量系统在体积重量和功耗上还难以满足在轨应用要求。此外,被测物和测量环境造成的遮挡盲区,空间极端温度变化对精密光学测量元件性能的影响等也是制约这些光学测量技术在轨应用的关键问题。光纤传感技术虽然已成功应用于多种航天器结构的在轨监测,但是现有装置测量精度在微米级,难以测量纳级应变和位移。

1.3 国家重大需求带动新技术发展

近年来,在国家深空探测战略和高分辨率对地观测系统重大工程需求带动下,遥感航天器性能要求不断提升,仅能在地面测试中使用的测量技术逐渐无法满足装备需求,适合在轨应用的结构微变形监测技术倍受关注,其中光纤传感技术有潜力达到纳米级甚至皮米级的测量精度,并具有体积小、重量轻、可多点同时测量和抗电磁干扰等优势,成为研究发展的重要方向,被视为最具潜力的航天器结构在轨监测技术之一,相关的传感光纤、多参数高灵敏光纤传感器、高速微型解调仪、监测组网、数据处理与高精度重构等各项技术迅速发展,推动了光纤传感技术在各类飞行器结构监测中的应用。

2 光纤监测技术主要类型

目前,成功在轨应用的光纤监测技术可分为准分布式和分布式监测技术两类^[24,34]。准分布式光纤监测技术一般利用光纤布拉格光栅阵列(fiber Bragg gratings,

FBGs)和多路复用技术组建光纤光栅传感网络。分布式光纤监测技术主要利用光纤对入射光波的散射效应,通过光频域反射(optical frequency domain reflectometry, OFDR)等方法解调光纤中的散射光信号^[34],进而测量沿光纤路径上分布的温度和应变等物理量。这两类光纤监测技术的优缺点对比如表 2 所示。

表 2 准分布式与分布式光纤监测技术对比分析
Table 2 Comparison of quasi-distributed and distributed fiber optic monitoring technology

技术类型	基于多路复用 FBG 的准分布式光纤监测技术	分布式光纤监测技术
空间分辨率	一般在微米级至毫米级	一般在厘米级甚至米级
应变分辨率	一般 $\leq 1\text{ }\mu\epsilon$	一般 $\geq 2\text{ }\mu\epsilon$
信号采样率	高达 kHz 甚至 MHz 级	$\leq 100\text{ Hz}$
传感器容量	一般 10~20 个/通道	一般 $> 10\text{ 000}$ 个/通道

注: $1\text{ }\mu\epsilon = 1\times 10^{-6}\text{ }\epsilon$

2.1 准分布式光纤监测技术

在航天器监测工程应用中,主要利用飞秒激光直写的高强度 FBG 阵列组建准分布式监测网络。相比通过紫外激光等其他工艺方法制作的 FBG,这种飞秒激光直写的 FBG 元件在机械强度、耐高低温、抗辐照性能等方面具有明显优势。目前,已有厂商提供此类产品,如图 2 所示德国 FBGS 公司的基于飞秒激光直写 FBG 的光纤传感器^[35]。

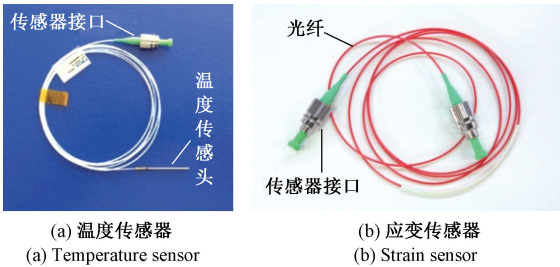


图 2 德国 FBGS 公司基于飞秒激光直写 FBG 光纤传感器^[35]

Fig. 2 FBG sensor based on femtosecond laser direct writing from FBGS, Germany^[35]

多路复用技术是组建准分布式光纤监测网络并解调 FBG 阵列信号的基础方法,主要包括波分复用、时分复用和空分复用,其中空分/波分组合复用方案是组建准分布式光纤监测网络主要采用的复用方法,已有商业化产品可应用于航天器结构监测,实现温度、应变、位移和加速度等参数监测,如图 3 所示英国 Smart Fibres 公司的 SmartScan Aero Mini 型机载 FBG 监测装置标准产品^[36]。

2.2 分布式光纤监测技术

目前,基于瑞利散射和 OFDR 原理的分布式光纤传感技术是航天器监测主要采用的技术方法,该技术可以

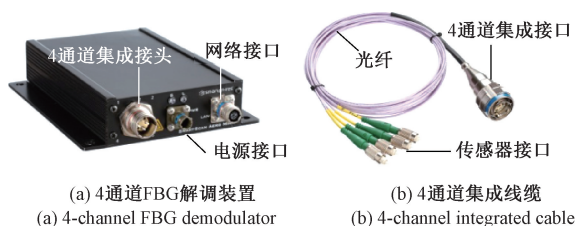


图 3 英国 Smart Fibres 公司的 FBG 监测装置^[36]
Fig. 3 FBG monitoring device of Smart Fibres, UK^[36]

达到毫米级的空间分辨率,并具有良好的灵敏度和信噪比。飞行器监测工程应用中,一般在光纤上刻写全同弱光栅以增强瑞利散射进而提高空间分辨率和信噪比。这种基于 OFDR 和全同弱光栅的分布式传感技术采用具有重叠光谱的 FBG 阵列作为传感器,其信号解调不受光源光谱带宽限制,这大幅提高了单个光纤信道的传感器复用容量,扩大了传感器的动态范围,并降低了传感器的制造成本。现已成功应用于航天器监测的主要是 NASA 研发的基于 OFDR 和连续型全同弱反射 FBG(光栅沿光纤长度连续分布且具有相同的反射波长,反射率 0.05%)的分布式光纤监测系统,如图 4 所示。

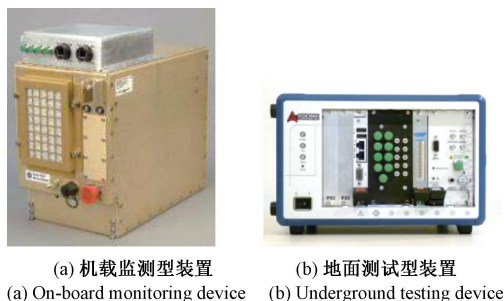


图 4 NASA 研制的基于 OFDR 和连续型全同弱反射 FBG 的分布式光纤监测装置 FOSS^[10]

Fig. 4 Distributed optical fiber monitoring device FOSS based on OFDR and continuous fully homogeneous weak reflection FBG developed by NASA^[10]

2.3 基于应变的位移动场重建方法

利用光纤监测网络获得的应变数据,通过位移动场重构算法可以建立以位移等物理量表示的结构微变形场。基于应变重建位移动场的方法主要有逆有限元法(inverse finite element method, iFEM)、模态叠加法和 Ko 位移法等。其中,逆有限元法具有更高精度和实时性,适应各类边界条件,且不需要考虑结构力学参数和外加载荷,在航天器在轨结构微变形监测中具有良好的适用性^[37]。

逆有限元法采用与有限元法类似的思想,通过理论分析结构的力学性质,定义待求解问题单元;根据结构力学模型结合单元形函数进行单元构造,确定单元几何形状、节点数、节点自由度和应变-位移矩阵等;采用所构造

的单元将待求解结构离散化;基于全部监测点的应变实测数据,采用最小二乘法建立实测应变场与计算应变场的误差函数;通过求解误差函数的最小值得到结构全部单元节点的自由度数值,实现结构三维变形场重构。

iFEM 是 NASA 重点发展的飞行器结构变形场重建技术,在航天器监测中优势明显。近 20 年来该技术不断发展,从实验室研究走向工程应用,其主要优点包括:动态变形场求解速度快、实时性好,无需考虑材料属性和复杂外界载荷,适应型面复杂的结构,可利用相对稀疏的测量点高精度地重构三维位移场。2012 年~2016 年, NASA 阿姆斯特朗飞行研究中心通过其创新基金(center innovation fund, CIF)资助了一项飞行试验项目,从监测系统精度、实时性、应用成本、环境适应性和安全可靠等方面综合分析,验证了利用光纤传感网络和 iFEM 实时监测飞行器结构变形的综合性能,为该技术在各类航天器结构变形监测中的应用奠定了基础^[38]。

2.4 技术优缺点与适用性

基于光纤光栅多路复用的准分布式监测技术的主要优点是能够实现绝对点位测量,并可组建大容量的监测网络;能够高速采样处理从准静态至 MHz 的传感信号;同时实现解调装置的轻量化、小型化甚至是微型化。但是,单根光纤上波分复用的 FBG 数量较少,通过空分复用方法扩展光纤信道数量虽然可以提高网络监测点数量,但在组建大容量监测网络时,过多的光纤信道会增加解调系统的体积、重量和功耗,这制约了该技术在大型航天器结构长距离多测量点在轨监测中的应用。

分布式光纤监测技术在长距离连续监测方面具有突出优势,能够连续感知光纤传输路径上任意点的应变和温度等物理量的空间分布和变化信息,实现远距离(按 km 计量)监测。但是,目前分布式光纤监测系统的信号解调速率只有几赫兹到几十赫兹,甚至几分钟,难以监测高频动态参数,并且系统灵敏度、分辨率和解调速率随传感距离增加而显著降低,这是该技术的主要不足。

3 应用发展历程及典型案例

从 20 世纪 90 年代至今, NASA、ESA、美国海军研究实验室(United States Naval Research Laboratory, NRL)、中国空间技术研究院等国内外相关单位都开展了航天器光纤监测技术与系统研制,并逐步应用于多种航天器结构在轨监测^[39-41]。目前,公开报道已在轨应用的航天器结构光纤监测系统的研究发展路线如图 5 所示,主要的光纤监测系统对比分析及应用情况如表 3 所示。

在 1990 年~1995 年间, NASA 率先研制出光纤监测系统的原理样机,在实验室条件下验证了利用光纤传感器监测航天器结构应变和温度等参数的可行性。该系统

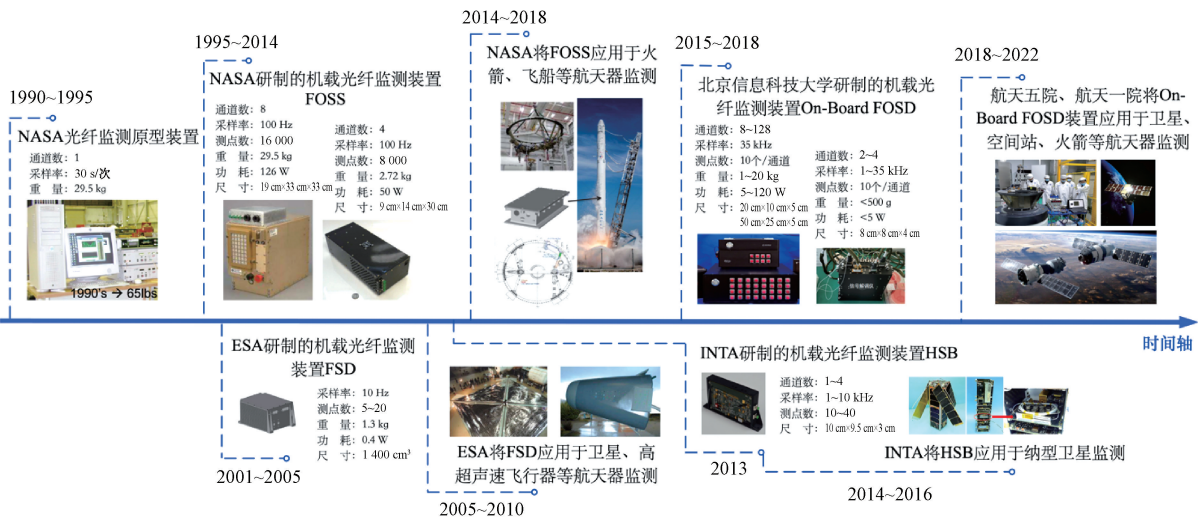


图 5 公开报道已在轨应用的航天器结构光纤监测装置的发展路线^[38-46]

Fig. 5 Development route of the publicly reported FOS systems that have been used for on-orbit monitoring of spacecraft structures^[31]

表 3 公开报道已在轨应用的航天器结构光纤监测系统的主要技术指标

设备名称/型号	设备技术类型	监测参数类型	设备主要技术指标	监测航天器类型	设备研制单位
中型/小型光纤监测装置 FOSS	基于 OFDR 的分布式光纤监测	应变、温度、3D 变形等	通道数 8, 采样率 100 Hz, 测点数 8 000~16 000, 重量 2.72~29.5 kg, 功耗 50~126 W, 尺寸 9 cm×14 cm×30 cm~19 cm×33 cm×33 cm, 应变分辨率 2 με, 应变测量精度 5%。	航天飞机, 再入飞行器, 火箭等	美国国家航空航天局 NASA
微型光纤监测装置 FSD	多路复用 FBG	应变、温度、气压等	采样率 10 Hz, 测点数 5~20, 重量 1.3 kg, 功耗 0.4 W, 尺寸 1 400 cm ³ , 温度分辨率 0.1℃, 气压分辨率 2 mbar, 应变分辨率 1 με。	卫星, 飞船, 高超声速飞行器等	欧洲空间局 ESA
板卡式光纤监测装置 HSB	多路复用 FBG	应变、温度等	通道数 1~4, 采样率 1~10 Hz, 测点数 10~40, 尺寸 10 cm×9.5 cm×3 cm。	纳型卫星等	西班牙国家太空科技研究所 INTA
小型/微型光纤监测装置 On-Board FOSD	多路复用 FBG	应变、温度、加速度等	通道数 2~128, 采样率 1~35 kHz, 测点数 10 个/通道, 重量 <500 g~20 kg, 功耗 5~120 W, 尺寸 8 cm×8 cm×4 cm~20 cm×10 cm×5 cm, 温度分辨率 0.1℃, 应变分辨率 1 με。	遥感卫星, 空间站, 火箭等	北京信息科技大学, 中国空间技术研究院

注: HSB 是集成电传感器与光纤传感器的混合型监测装置, 表 1 中 HSB 装置体积重量功耗是总和参数, 其中光纤传感模块是板卡式微型装置。

只有 1 个信号通道, 采集一次信号需要 30 s, 重量达 29.5 kg, 仅能用于实验室测试。自 1995 年起, NASA 和 ESA 等重点航天单位陆续研制出适合机载使用的光纤监测装置, 并逐渐应用于卫星、航天飞机、火箭和高超声速飞行器等装备, 如: NASA 研制的 FOSS 系统、ESA 的 FSD 系统、西班牙的 INTA 系统等, 主要技术指标如表 3 所示。

2005 年 ESA 报道了其在航天器结构参数光纤监测技术上的研究计划, 涉及结构变形监测的内容主要包括^[42]: 稳定性要求高的卫星结构上布设光纤传感器实时监测由热辐射和振动等导致的结构变形, 如图 6 所示; 在具备自驱动主动变形功能的自适应复合材料结构中埋入光纤传感器, 实时监测主动变形量以补偿被动变形或抑制振动; 在可重复使用运载器大型低温储罐和复合材料内罐上表贴或埋入光纤传感器, 实时监测结构的静态和动态应变; 利用光纤传感器与高速解调装置 (kHz 级解调频率) 在地面试验中测量反射器天线的声振干扰信号; 在太阳帆结构上布设光纤传感器监测动态应变。

2009 年 ESA 在 Proba-2 卫星上搭载光纤监测系统 (fiber sensor demonstrator, FSD) 进行了飞行试验, 验证了 FSD 的空间环境适应性^[43]。2013 年西班牙国家太空科

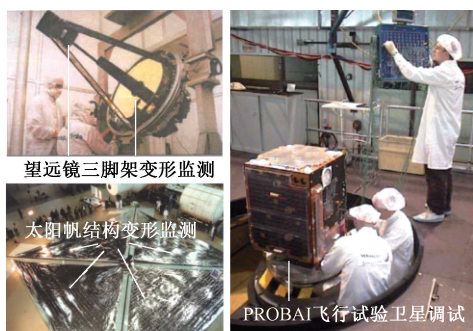
图 6 ESA 开展的航天器结构光纤监测技术研究计划^[42]

Fig. 6 Projects of optical fiber monitoring of spacecraft structures developed by ESA^[42]

技研究所 (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) 在 OPTOS 纳型卫星上搭载光纤监测系统进行了为期两年的飞行试验 (如图 7 所示), 利用 2 个 FBG 在轨监测卫星结构应变和温度, 通过高集成度的微型轻量化解调装置处理监测信号, 并与地面标定数据进行对比, 验证了光纤监测系统应用于复杂恶劣空间环境的适用性^[44]。

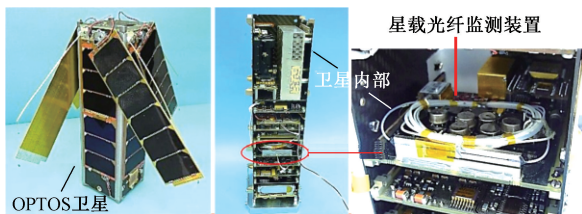
图 7 OPTOS 纳型卫星光纤监测系统验证飞行试验^[44]

Fig. 7 Flight verification of the optical fiber monitoring system based on OPTOS nanosatellite^[44]

2016 年山东航天电子技术在卫星上搭载光纤光栅传感系统进行了飞行试验, 验证了利用光纤光栅监测卫星舱内、舱外温度和应变的技术可行性^[45]。2018 年北京信息科技大学研制的光纤传感监测系统搭载天仪研究院湘江新区号卫星进行了飞行试验^[46]。试验系统通过多路复用 FBG 组建了包含 1 个应变传感器和 10 个温度传感器的监测网络, 并利用可调谐激光器扫描法解调传感信号, 实现卫星在轨结构应变和温度监测, 如图 8 所示。

2019 年~2022 年, 北京信息科技大学与中国空间技术研究院、长光卫星技术有限公司等单位合作, 研制出多套星载光纤监测系统, 并搭载试验九号、吉林一号视频 03 星和视频 09 星等型号卫星在轨应用, 实现温度、应变、位移和振动等参数的在轨监测^[46]。图 9 为星载光纤监测系统的装机联调现场照片。通过在轨试验, 验证了所研制光纤传感器和微型轻量化低功耗解调仪的空间环境适应性。

图 8 搭载卫星开展光纤监测系统空间飞行验证试验^[46]

Fig. 8 Flight verification of the optical fiber monitoring system based on satellite^[46]

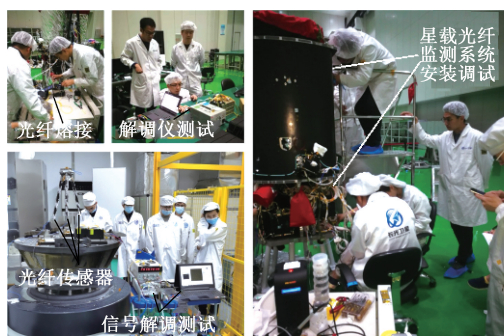
图 9 在中国空间技术研究院和长光卫星安装调试星载多参数光纤监测系统^[46]

Fig. 9 Installation and commissioning of the satellite-borne multi-parameter optical fiber monitoring system in China Academy of Space Technology and Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd^[46]

4 光纤在轨监测系统关键核心技术

光纤在轨监测系统主要由传感器网络与信号解调装置等构成^[39-42]。此类系统应具有测量精度高、响应速度快、体积重量小且功耗低等特点, 并在复杂恶劣的空间环境下具有良好的耐久性, 能够满足长期在轨应用的可靠性和寿命要求。其中, 涉及的关键核心技术主要包括: 高精度光纤传感器设计与制备技术、高可靠性的传感器封装布设技术、高精度/高速/微型/轻量/低功耗的信号解调技术、大容量的传感器网络构建技术等。

在传感器方面, 利用飞秒激光刻写等技术制备的耐辐照光纤传感器能够在空间环境下长期使用, 在轨应用时能够达到 10^{-6} ϵ 量级的应变测量精度, 可以满足一般结构监测要求。但是, 对于纳级应变 (10^{-9} ϵ 量级) 的在轨测量需求, 目前缺少可用的光纤传感器。当前在光纤传感器关键核心技术上, 需要从超高精度传感原理、核心

传感元件设计制备等方面研发具有纳级应变测量精度的光纤传感器,并研发能够同时保障在轨测量精度和应用耐久性的光纤传感器封装布设技术和工艺^[42-46]。

信号解调装置是决定光纤在轨监测系统精度、效率和监测点数量等关键指标的核心装置。要实现纳级应变的高精度在轨测量,需要专门研制超高精度的信号解调装置,使其具有纳级应变信号解调能力,并且具有实时性好、装置体积重量小和功耗低等特点。目前,对于基于多路复用 FBG 原理的准分布式光纤监测系统,采用的信号解调方法主要有可调谐滤波法、可调谐激光器扫描法、CCD 测量法和 AWG 解调法^[46]。其中,可调谐滤波法、可调谐激光器扫描法的测量范围大、精度高、速度快(kHz 级)、动态测量能力强、支持传感器数量多,在高精度解调和高频动态信号测量中优势明显;CCD 法的稳定性好,适用于大容量监测网络的高速解调,但是其测量范围较小、解调精度较低。边缘滤波、匹配滤波和啁啾光栅等解调方法在测量范围、精度和容量等方面存在不足,制约了这类技术的应用;AWG 解调是近年来快速发展的新技术,能够解调 MHz 高频动态信号,但在解调精度和传感器容量上存在不足。对于基于 OFDR 的分布式光纤监测系统,主要利用光强检测和相干检测等原理,通过光电探测器、高速采集系统和相关算法解调信号。目前,OFDR 等分布式系统的解调速率和精度较低,难以实时监测高频动态信号,并且需要减小系统体积、重量和功耗,提高稳定性、可靠性,以更好地满足航天器在轨监测应用要求^[46]。

构建在轨监测网络的关键技术主要包括基于光纤光栅多路复用的准分布式技术,以及基于 OFDR 的分布式技术^[22-23,46]。光纤光栅多路复用监测网络能够对各监测点进行精密测量(如通过光纤光栅应变花测定主应变方向及大小),并利用微型轻质的解调仪高速采集处理高频动态信号,但是监测点数量取决于光纤光栅数量,不是全网络连续监测,无光栅区域属于监测盲区。利用 OFDR 技术组建的分布式监测网络的任意光纤位置既是传感单元又是信息传输通道,可以实现全网络任意位置连续监测,但是在绝对定位精度、多参数测量、高频动态测量、高速解调和装置微型化等方面存在不足^[23,46]。将现有的在轨监测网络构建技术与具有纳级应变测量精度的光纤传感器和信号解调技术相结合,构建具有跨尺度高精度全场监测能力的大容量网络系统,是实现高分辨遥感卫星在轨结构微变形监测的关键。

5 关键问题及未来发展

近年来,在高分辨对地观测和深空探测等国家重大需求牵引下,工程应用中对高分辨遥感卫星成像质量和

目标定位精度等核心指标要求不断提高,这给在轨结构微变形光纤监测技术带来了困难和挑战,主要体现在:

为提升遥感探测精度,高分辨遥感卫星结构大量采用热膨胀系数小(理论上为 0)、隔热抗振性能好、比强度高、耐疲劳的复合材料制造,以有效抑制在轨结构变形^[47-49]。此类复合材料结构在空间环境下受热和重力等因素作用产生的变形量非常微小,以应变表示其变形量通常小于 $1 \times 10^{-6} \varepsilon$,甚至在纳应变量级($10^{-9} \sim 10^{-7} \varepsilon$)。虽然此类结构受热/力作用产生的变形量极其微小,但是当遥感探测的目标定位精度要求达到米级甚至分米级时,必须在轨精确监测这类微小变形以实施反馈控制。然而,现有光纤在轨监测技术装置的应变测量精度在 $10^{-6} \varepsilon$ 量级,无法满足纳级应变在轨监测要求。

如何实现在轨结构应变测量精度从 $10^{-6} \varepsilon$ 量级跨越提升至 $10^{-9} \varepsilon$ 量级,并通过应变反演重构结构全场三维位移等关键参数,是高分辨遥感卫星在轨结构光纤监测需要解决的关键问题,也是光纤在轨监测技术发展的重要方向。这需要研究解决一系列关键核心技术问题,主要包括:纳级应变光纤传感测量,微型/轻量/低功耗/高精度解调,全场范围跨尺度高精度三维位移场反演重构,环境影响因素抑制与误差补偿,在轨监测数据分析处理等。

5.1 纳级应变的光纤传感技术

目前,纳级应变的高精度光纤传感监测技术是国际研究的热点和难点^[50-60]。随着特种光纤光栅、高灵敏度光电器件和高性能芯片的日趋成熟,纳应变高精度光纤传感技术不断发展,在实验室条件下测量应变已经可以达到 $10^{-9} \sim 10^{-13} \varepsilon$ 量级的超高精度,典型技术原理如图 10 所示。但是此类技术与装置还无法在轨应用,在核心器件和关键技术上面临若干挑战,主要包括:高精细度光纤光栅谐振腔和低噪声窄线宽可调谐激光器等核心器件,以及高精度宽频带光纤光栅谐振腔传感器设计、高速高精度解调、多传感器组网与信号处理等关键技术^[50-51]。这是光纤在轨监测技术亟待研究解决的关键问题。

5.2 高精度/高速/微型/轻量/低功耗解调装置

要实现纳级应变的高精度在轨监测,要求信号解调装置同时满足功能性和环境适应性要求。在功能性方面,解调装置要符合纳级应变传感信号的解调精度要求;解调速率要满足动态(如 100 Hz)和准静态信号的响应速率要求;需要多个信号通道以支持多传感器网络信号解调;同时应具有体积微小、质量轻、功耗低等特点,以满足星载在轨应用要求。在空间环境适应性方面,要能够适应极端温度变化、振动和辐照等复杂空间环境条件。

目前,虽然已有多种光纤传感信号解调装置符合航天器在轨应用要求,并在卫星等航天器上得到实际应用。

6 结 论

高分辨遥感航天器代表着国家核心竞争力,其在轨结构受空间极端温度变化、重力、太空碎片冲击和疲劳等因素作用会产生微变形,严重影响遥感成像质量和图像定位精度,危及遥感航天器功能指标实现和系统可靠性及寿命。必须采用有效的技术方法在轨监测结构微变形,这对实施反馈控制、修正遥感数据至关重要,也是评定航天器设计性能、反演设计参数的关键。

光纤监测技术被视为最具应用潜力的航天器在轨监测技术之一,经过近30年来的发展,正逐步应用于工程实践。目前,各类航天器在轨监测中应用比较成功的光纤监测装置主要采用了光纤光栅多路复用技术,或全同弱光栅与OFDR等技术。NASA、ESA和中国空间技术研究院等机构的应用实践推动了光纤监测技术在高分辨遥感航天器在轨结构微变形监测中的应用发展。

在国家深空探测战略和高分辨率对地观测系统重大工程需求带动下,遥感航天器性能要求不断提升。为保证遥感探测精度,需要在轨监测纳级微变形,现有光纤监测装置难以满足需求。需要研究解决纳级应变光纤传感与解调、跨尺度高精度三维位移场反演重构、环境影响因素抑制与误差补偿、微型轻量低功耗在轨监测装置研制、在轨监测数据智能处理与精准识别等关键问题,并发展基于光纤传感网的全寿命健康监测技术,这是遥感航天器光纤在轨监测未来发展的重要方向。

参考文献

- [1] 梁晓珩, 梁秀娟, 柯蓓. 我国遥感卫星系统发展进阶路径探讨[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(1): 100-105.
LIANG X H, LIANG X J, KE B. The development path of remote sensing satellite system in China [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(1): 100-105.
- [2] 吴季. 深空探测的现状、展望与建议[J]. 科技导报, 2021, 39(3): 80-87.
WU J. Deep space exploration: Status, expectation and suggestion[J]. Science and Technology Review, 2021, 39(3): 80-87.
- [3] 马军, 傅祥博, 甄大巍. 空间跟瞄遥感器视轴指向可靠度分析[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 122-132.
MA J, FU X B, ZHEN D W. Pointing reliability analysis of LOS of space tracking and aiming remote sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 122-132.

- [4] 闫钧华, 吕向阳, 时萌玮, 等. 遥感成像耦合典型误差源反演方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 200-210.
YAN J H, LYU X Y, SHI M W, et al. Research on the inversion method of coupled typical error source in remote sensing imaging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 200-210.
- [5] CUI Y, YAO X S, CHEN X D, et al. On-orbit calibration techniques for optical payloads onboard remote-sensing satellites [J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(10): 104501.
- [6] HODGES R E, CHEN J C, RADWAY M R, et al. An extremely large ka-band reflectarray antenna for interferometric synthetic aperture radar: Enabling next-generation satellite remote sensing [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2020, 62(6): 23-33.
- [7] 苗建印, 钟奇, 赵啟伟, 等. 航天器热控制技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.
MIAO J Y, ZHONG Q, ZHAO Q W, et al. Spacecraft thermal control technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018.
- [8] ZHANG H, ZHAO X M, MEI Q, et al. On-orbit thermal deformation prediction for a high-resolution satellite camera [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195: 117152.
- [9] 于智, 孟庆亮, 于峰, 等. 某低轨倾斜轨道相机热控系统设计与验证[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(5): 20200332.
YU ZH, MENG Q L, YU F, et al. Thermal design and test for space camera on inclined-LEO orbit [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(5): 20200332.
- [10] CHAN P. Fiber optics sensing system (FOSS) at NASA armstrong flight research center (AFRC): Summary and recent deployments [R]. Report. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2018.
- [11] LUO W, CAO J H, LU Z X, et al. Progress of on-orbit autonomous measurement for spacecraft structure deformation [J]. Unmanned Systems Technology, 2020, 3(5): 54-59.
- [12] MCMANUS H L. Control of space structure thermal deformation: An overview [C]. Proc of SPIE, 1993, 1917: 545-554.
- [13] 黄杰, 罗达, 侯鹏, 等. 光学遥感卫星平台结构热变

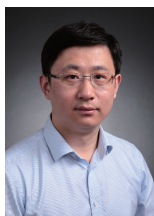
- 形试验及测量技术研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(2): 114-118.
- HUANG J, LUO D, HOU P, et al. Research on thermal deformation test and measurement technology of optical remote sensing satellite platform [J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(2): 114-118.
- [14] 刘国青, 罗文波, 童叶龙, 等. 航天器在轨全周期热变形分析方法[J]. 航天器工程, 2016, 25(6): 40-47.
- LIU G Q, LUO W B, TONG Y L, et al. Thermal deformation analysis method of in orbit whole cycle for spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 40-47.
- [15] ABDULLAH F, OKUYAMA K, FAJARDO I, et al. In situ measurement of carbon fibre/polyether ether ketone thermal expansion in low earth orbit [J]. Aerospace, 2020, 35(7): 7040035.
- [16] 马超, 陈晶, 王志国, 等. 航天器蜂窝夹层板对称热变形分析及试验验证[J]. 航天器工程, 2019, 28(3): 52-55.
- MA CH, CHEN J, WANG ZH G, et al. Symmetrical thermal deformation analysis and test verification for satellite honeycomb sandwich plate [J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(3): 52-55.
- [17] 邢思远, 刘洪新, 彭志刚, 等. 高精度复合材料天线反射器结构与热变形仿真优化分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018, 66-73.
- XING S Y, LIU H X, PENG ZH G, et al. Simulation and optimization structure and thermal deformation of high precision composite antenna reflector [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018: 66-73.
- [18] 刘国青, 阮剑华, 罗文波, 等. 航天器高稳定结构热变形分析与试验验证方法研究[J]. 航天器工程, 2014, 23(2): 64-70.
- LIU G Q, RUAN J H, LUO W B, et al. Research on thermal deformation analysis and test verification method for spacecraft high-stability structure [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(2): 64-70.
- [19] ZHANG Z H, LIU W, LIU G Z, et al. Overview of the development and application of 3D vision measurement technology[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(6): 1483-1502.
- [20] 柴家贺, 董明利, 孙鹏, 等. 工业相机自热引起像点漂移模型与补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(6): 20200494.
- CHAI J H, DONG M L, SUN P, et al. Model and compensation method of image point drift caused by self-heating of industrial camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(6): 20200494.
- [21] GUO Y, LIU D D, MAO Q. Dynamic detection of object deformation based on shearing speckle interferometry[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(5): 777-783.
- [22] 况洋, 吴昊庭, 张敬栋, 等. 分布式多参数光纤传感技术研究进展[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 170678.
- KUANG Y, WU H T, ZHANG J D, et al. Advances of key technologies on distributed fiber system for multi-parameter sensing [J]. Opto Electronic Engineering, 2018, 45(9): 170678.
- [23] 刘铁根, 于哲, 江俊峰, 等. 分立式与分布式光纤传感关键技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 070705.
- LIU T G, YU ZH, JIANG J F, et al. Advances of some critical technologies in discrete and distributed optical fiber sensing research [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 070705.
- [24] 赵士元, 崔继文, 陈勐勐. 光纤形状传感技术综述[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1): 10-29.
- ZHAO SH Y, CUI J W, CHEN M M. Review on optical fiber shape sensing technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(1): 10-29.
- [25] 杨勇, 方无迪, 孙延博, 等. 航天器变形高精度测量技术[J]. 制导与引信, 2016, 37(1): 35-39.
- YANG Y, FANG W D, SUN Y B, et al. Spacecraft deformation high-accuracy measurement technology [J]. Guidance & Fuze, 2016, 37(1): 35-39.
- [26] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1-22.
- TAN Y D, XU X, ZHANG SH L. Precision measurement and application of laser interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1-22.
- [27] 谈宜东, 李继扬, 朱开毅, 等. 激光回馈测量技术在航空精密制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(5): 24-36.
- TAN Y D, LI J Y, ZHU K Y, et al. Application of laser feedback measurement technology in aviation precision manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Techno-

- logy, 2019, 62(5): 24-36.
- [28] 石诚. 航天器舱段大部件的装配变形数字化测量技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- SHI CH. Research on digital measurement of the assembly deformation detection in large spacecraft cabin[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [29] 许婕. 航天器高稳定结构微小变形测量技术的研究与应用[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2014.
- XU J. Research and application on micro-deformation measurement technology for the highly stable structure of spacecraft [D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering, 2014.
- [30] 罗为, 曹俊豪, 卢孜筱, 等. 航天器结构变形在轨自主测量技术进展[J]. 无人系统技术, 2020, 3(5): 54-59.
- LUO W, CAO J H, LU Z X, et al. Progress of on-orbit autonomous measurement for spacecraft structure deformation[J]. Unmanned Systems Technology, 2020, 3(5): 54-59.
- [31] 陈翠圆. 面向航天器高稳定结构空间环境下变形测量技术研究[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2019.
- CHEN C Y. Research on deformation measurement technology for spacecraft in highly stable structure space environment [D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering, 2019.
- [32] 肖庆生, 蒋山平, 许杰, 等. 摄影测量技术及其在航天器变形测量中的应用[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(6): 651-656.
- XIAO Q SH, JIANG SH P, XU J, et al. Photogrammetric technology and its application in spacecraft deformation measurement [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(6): 651-656.
- [33] 丁健, 罗文波, 袁宝峰, 等. 数字图像相关测量方法及其在航天器结构微变形测量中的应用[J]. 计量学报, 2017, 38(6A): 89-93.
- DING J, LUO W B, YUAN B F, et al. Digital image correlation method and its application in evaluating the micro-deformation of spacecraft structure [J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(6A): 89-93.
- [34] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66: 074207.
- RAO Y J. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66: 074207.
- [35] SMART F. SmartScan aero mini [EB/OL]. <https://www.smartfibres.com/products/smartsan-aero-mini>, 2022-04-23/2022-04-23.
- [36] FBGS. FemtoSecond gratings (FSG®) [EB/OL]. <https://fbgs.com/components/femtosecond-gratings-fsg/>, 2022-04-23/2022-04-23.
- [37] GHERLONE M, CERRACCHIO P, MATTONE M. Shape sensing methods: Review and experimental comparison on a wing-shaped plate [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 99: 14-26.
- [38] TESSLER A, SPANGLER J L, MATTONE M, et al. Real-time characterization of aerospace structures using onboard strain measurement technologies and inverse finite element method[R]. NASA, 0704-0188, 2011.
- [39] SHOENFELT N M. Fiber optic sensors for the military[R]. U. S. Army Armament Research, Development And Engineering Center, Technical Report ARFSD-TR-90024, 1991.
- [40] FRIEBELE E J, ASKINS C G, BOSSE A B, et al. Optical fiber sensors for spacecraft applications [J]. Smart Materials and Structures, 1999, 8(6): 813-838.
- [41] FRIEBELE E J, ASKINS C G, MILLER G A, et al. Optical fiber sensors for spacecraft: Applications and Challenges[C]. Proceedings of the Photonics for Space Environments IX, 2004, 5554: 120-131.
- [42] MCKENZIE I, KARAFOLAS N. Fiber optic sensing in space structures: The experience of the European space agency [C]. Proceedings of the 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, Belgium, 2005, 5855: 262-269.
- [43] ORR J S, DALTON C L, TREVINO L C. Advanced optical sensor technology: Launch vehicle and spacecraft applications [C]. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, Atlanta, 2014, 2540: 1-11.
- [44] HURNI A, LEMKE N M K, RÖNER M, et al. Fiber-optical sensing on-board communication satellites [C]. Proceeding of the International Conference on Space Optics, Spain, 2014, 105631B: 1-9.
- [45] 邵飞, 杨宁, 孙维, 等. 基于光纤传感的航天器结构健康状态监测研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(2): 95-103.

- SHAO F, YANG N, SUN W, et al. Re-search on spacecraft structural health monitoring based on optical fiber sensing technology[J]. Space-Craft Engineering, 2018, 27(2): 95-103.
- [46] ZHU L Q, SUN G K, BAO W M, et al. Structural deformation monitoring of flight vehicles based on optical fiber sensing technology: A review and future perspectives[J]. Engineering, 2021.
- [47] GIRARD S, MORANA A, LADACI A, et al. Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications[J]. Journal of Optics, 2018, 20: 093001.
- [48] RIZIOTIS C, EINEDER L, BANCALLARI L, et al. Fiber optic architectures for strain monitoring of solid rocket motors' propellant[J]. Sensor Letters, 2013, 11: 1-5.
- [49] SIIVOLA J, MINAKUCHI S, TAKEDA N. Dimpling monitoring and assessment of satellite honeycomb sandwich structures by distributed fiber optic sensors[J]. Procedia Engineering, 2017, 188: 186-193.
- [50] ZHANG W T, HUANG W Z, LI F. High-resolution fiber Bragg grating sensor and its applications of geophysical exploration, seismic observation and marine engineering[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(9): 170615.
- [51] GAGLIARDI G, SALZA M, AVINO S, et al. Probing the ultimate limit of fiber-optic strain sensing[J]. Science, 2010, 330(6007): 1081-1084.
- [52] CHEN J G, LIU Q W, HE Z Y. Time-domain multiplexed high resolution fiber optics strain sensor system based on temporal response of fiber Fabry-Perot interferometers[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21914-21925.
- [53] HUANG W Z, ZHANG W T, ZHEN T K, et al. A cross-correlation method in wavelet domain for demodulation of FBG-FP static-strain sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(16): 1597-1600.
- [54] ARORA A, ESMAEELPOUR M, BERNIER M, et al. High-resolution slow-light fiber Bragg grating temperature sensor with phase-sensitive detection[J]. Optics Letters, 2018, 43(14): 3337-3340.
- [55] HUANG W Z, ZHANG W T, LI F. Swept optical SSB-SC modulation technique for high-resolution large-dynamic-range static strain measurement using FBG-FP sensors[J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1046-1049.
- [56] 何祖源, 刘庆文, 陈嘉庚. 面向地壳形变观测的超高分辨率光纤应变传感系统[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 074208.
- HE Z Y, LIU Q W, CHEN J G. Ultrahigh resolution fiber optic strain sensing system for crustal deformation observation[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 074208.
- [57] CHEN J G, LIU Q W, FAN X Y, et al. Sub-nano-strain multiplexed fiber optic sensor array for quasi-static strain measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018(21): 2311-2314.
- [58] HUANG W Z, ZHANG W T, ZHEN T K, et al. π -phase-shifted FBG for high-resolution static-strain measurement based on wavelet threshold denoising algorithm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(22): 3692-3698.
- [59] LIU Q W, TOKUNAGA T, HE Z Y. Ultra-high-resolution large-dynamic-range optical fiber static strain sensor using pound-drever-hall technique[J]. Optics Letters, 2011, 36(20): 4044-4046.
- [60] HUANG W Z, FENG S W, ZHANG W T, et al. DFB fiber laser static strain sensor based on beat frequency interrogation with a reference fiber laser locked to a FBG resonator[J]. Optics Express, 2016, 24(11): 12321-12329.
- [61] GUTIERREZ N, FERNANDEZ R, GALVIN P, et al. Fiber Bragg grating application to study an unmanned aerial system composite wing[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30(8): 1252-1262.
- [62] IADICICCO A, NATALE D, PALMA P D, et al. Strain monitoring of a composite drag strut in aircraft landing gear by fiber Bragg grating sensors[J]. Sensors, 2019, 19: 2239.
- [63] JUTTE C V, KO W L, STEPHENS C A, et al. Deformed shape calculation of a full-scale wing using fiber optic strain data from a ground loads test[R]. NASA, TP-2011-215975, 2011.
- [64] CHEN S. Research on deformation measurement and reconstruction method for composite structures based on

- strains[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [65] LIU P. Research on spatial truss structure morphology monitoring technology based on distributed optical fiber sensing technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [66] JOHNSON W L, RHYS N O, BRADLEY D E, et al. Cryogenic orbital testbed (CRYOTE) ground test article[R]. NASA, TM-2015-218827, 2015.
- [67] WANG H, XIANG P, JIANG L. Strain transfer theory of industrialized optical fiber-based sensors in civil engineering: A review on measurement accuracy, design and calibration[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 285: 414-426.
- [68] 李雷, 谢立, 张永杰, 等. 数据挖掘在运载火箭智能测试中的应用[J]. *航空学报*, 2018, 39(S1): 722203.
- LI L, XIE L, ZHANG Y J, et al. Application of data mining in intelligence test of launch vehicles[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(S1): 722203.
- [69] 陈书钊, 楚龙飞, 杨秀梅, 等. 状态预测神经网络控制应用于小型可回收火箭[J]. *航空学报*, 2019, 40(3): 322286.
- CHEN SH ZH, CHU L F, YANG X M, et al. Application of state prediction neural network control algorithm in small reusable rocket[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2019, 40(3): 322286.
- [70] DUBOVİK O, SCHUSTER G L, XU F, et al. Grand challenges in satellite remote sensing[J]. *Froniers in Remote Sensing*, 2021, 2: 619818.
- [71] ROCHA H, SEMPRIMOSCHNIG C, NUNES J P. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review [J]. *Engineering Structures*, 2021, 237: 112231.
- [72] SMITHARD J, RAJIC N, VELDEN S, et al. An advanced multi-sensor acousto-ultrasonic structural health monitoring system: Development and aerospace demonstration[J]. *Materials*, 2017, 10: 832.
- [73] GOOSSENS S, PAUW B D, GEERNAERT T, et al. Aerospace-grade surface mounted optical fibre strain sensor for structural health monitoring on composite structures evaluated against in-flight conditions [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28: 065008.

作者简介



孙广开(通信作者), 2007年和2010年于河北科技大学分别获得学士和硕士学位, 2015年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学副教授, 主要研究方向为航空航天器结构健康监测、手术机器人光纤导航和仿生软体机器人智能感知技术。

E-mail: guangkai.sun@hotmail.com

Sun Guangkai (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hebei University of Science & Technology in 2007 and 2010, and received his Ph. D. degree from Beihang University in 2015. He is currently an associate professor at Beijing Information Science & Technology University. His main research interests include aerospace vehicle structural health monitoring, fiber optic navigation for surgical robots and bionic soft robot intelligent perception technology.