

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508146

光纤光栅在飞机结构载荷监测中的发展现状及展望*

张逸群^{1,2} 张钰民^{1,2,3} 姜小平^{1,2,3} 孙广开^{1,2} 李红^{1,2} 董明利^{1,2} 于明鑫^{1,3} 祝连庆^{1,2,3}

(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; 3. 广州市南沙区北科光子感知技术研究院 广州 511462)

摘要:随着航空装备轻量化与智能化转型的加速推进,传统依赖定期检修的被动维护模式已难以满足高可靠性与实时安全评估的迫切需求。在长期服役过程中,机身、机翼等关键结构承受多轴交变载荷、疲劳累积、环境腐蚀及动态冲击等复杂耦合效应,极易引发隐性损伤的渐进式扩展,亟需依托在线载荷监测技术实现损伤演化机理的精准表征与空间定位。光纤光栅传感技术凭借其抗电磁干扰、高灵敏度及长期稳定性等核心优势,成为突破传统电学传感器性能瓶颈的关键传感手段,正逐步从实验室研究向工程化应用演进。然而,该技术在部署中仍面临一系列技术挑战,限制了其在飞机结构载荷监测中的广泛应用,亟待探讨解决方法。为此,以光纤光栅技术在飞机结构载荷监测中的研究和应用为主线,系统梳理了飞机结构载荷监测技术的需求背景与发展现状,综述了国内外在飞机结构载荷的典型应用案例,讨论了飞机结构光纤光栅载荷监测的关键技术问题和未来发展趋势。

关键词: 光纤光栅; 结构载荷监测; 飞机结构; 疲劳损伤; 预测性维护

中图分类号: TN98; V19 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 413.1040

Research status and the prospect of fiber Bragg grating in aircraft structural load monitoring

Zhang Yiqun^{1,2} Zhang Yumin^{1,2,3} Lou Xiaoping^{1,2,3} Sun Guangkai^{1,2} Li Hong^{1,2} Dong Mingli^{1,2}
Yu Mingxin^{1,3} Zhu Lianqing^{1,2,3}

(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; 3. Guangzhou Nansha Intelligent Photonic Sensing Research Institute, Guangzhou 511462, China)

Abstract: With the accelerated transformation of aerospace equipment toward lightweight and intelligent design, the traditional passive maintenance model based on periodic inspections can no longer meet the urgent demands for high reliability and real-time safety assessment. During long-term service, key aircraft structures such as the fuselage and wings are subjected to complex coupled effects, including multi-axial cyclic loads, fatigue accumulation, environmental corrosion, and dynamic impact. These factors can induce the progressive expansion of hidden damage, highlighting the urgent need for online load monitoring technologies to enable accurate characterization and spatial localization of damage evolution mechanisms. FBG sensing technology, with its core advantages of strong electromagnetic immunity, high sensitivity, and long-term stability, has emerged as a promising alternative to overcome the limitations of traditional electrical sensors. It is steadily progressing from laboratory research toward practical engineering applications. However, the deployment of FBG-based systems still faces several technical challenges, such as cross-sensitivity, miniaturization of demodulation units, and precision integration, which hinder their widespread adoption in aircraft structural load monitoring. This study focuses on the research and application of FBG technology in aircraft structural load monitoring. It systematically reviews the background and current development of load monitoring requirements, summarizes representative research progress and typical application cases both domestically

收稿日期: 2025-01-28 Received Date: 2025-01-28

* 基金项目: 国家自然科学基金(52375524)、北京学者计划研究(BJXZ2021-012-00046)项目资助

and internationally, and discusses key technical issues and future development trends of FBG-based structural load monitoring in aviation.

Keywords: FBG; structural load monitoring; aircraft structure; fatigue damage; predictive maintenance

0 引言

《国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》明确指出, 高端航空装备是我国战略性支柱产业, 在国防安全、交通运输及应急救援等领域具有核心支撑作用^[1-2]。高端航空装备不仅是保障国家安全的关键组成部分, 更在提升航空技术水平、执行复杂任务中具有不可替代的重要性。

在高端航空装备的研制过程中, 飞机结构健康监测作为核心环节, 能够发现对潜在结构损伤和性能退化的早期识别, 为飞行安全保障、使用寿命延长及结构稳定性提升提供有力保障^[3]。通过精确的载荷监测, 可以全面评估飞机在不同飞行条件下的受力状态, 为设计优化和预防性维护决策提供科学依据。

目前, 飞机载荷监测的常用检测手段主要包括电阻应变片、光纤传感器等^[4-6]。电阻应变片虽具有成本低廉、工程成熟度高等特点, 但其抗电磁干扰能力与耐久性难以满足现代航空器复杂工况需求^[7]。相比之下, 光纤光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 技术凭借抗电磁干扰、长寿命、高灵敏度以及体积小等特点, 逐渐成为飞机载荷监测的理想选择^[8-9]。如光纤传感器能够在飞机高迎角机动或直升机旋翼交变载荷等极端条件下提供可靠的数据支持, 尤其在高精度测试和上千点监测的复杂应用环境中, FBG 技术展现出更为显著的优势^[10]。

然而, FBG 技术在航空应用中仍面临以下挑战: 从传感机制层面, 飞机跨域飞行导致的多物理场耦合会引发

FBG 啁啾效应, 易造成波长解调误差^[11]。在系统集成方面, 现有解调设备受限于通道和带宽制约, 难以满足飞机全域监测需求^[12]。数据处理维度上, 单架次产生的监测数据与机载计算资源受限形成矛盾, 现有智能化诊断算法仍需优化^[13]。

因此, 本文以飞机结构 FBG 载荷监测技术为主线, 梳理了飞机结构载荷监测的主要工作、FBG 传感原理与技术特点, 综述了国内外飞机结构 FBG 载荷监测技术的发展历程, 指出了 FBG 在航空领域的关键核心技术, 并对未来发展提出建议。

1 飞机结构载荷监测技术概况

飞机结构载荷监测通过传感器网络对机翼、起落架等机体结构进行实时感知。当机体应变、温度及加速度等参数发生变化时, 监测系统自动采集并反馈状态信息。结合信号处理、模式识别、深度学习等数据分析方法, 对数据进行特征提取及多元数据融合, 识别并量化机体结构变化, 通过分析机体结构的受力、疲劳等当前状态, 完成对飞机结构监测、诊断及结构安全性能的评估^[14]。如图 1 所示, 飞机结构载荷监测技术可分为智能传感嵌入式集成技术和物理机理驱动式感知技术。智能传感嵌入式集成技术通过传感器网络实现结构状态实时跟踪, 物理机理驱动式感知技术则基于结构动力学模型进行逆向载荷辨识。两者的协调融合可突破单一方法的感知局限, 提升状态评估与寿命预测的可靠性, 为飞机维护决策提供量化依据。两类技术特征的对比如表 1 所示。



图 1 飞机结构载荷监测系统

Fig. 1 Aircraft structural load monitoring system

表1 典型的飞机结构载荷监测技术优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of aircraft load monitoring techniques

类别	技术名称	优势	不足
智能传感嵌入式集成技术	压电传感技术 ^[7]	响应速度快,适合动态载荷和高频监测;结构简单,易于集成	低频信号响应较弱;受环境温度影响大,需额外温度补偿
	FBG 传感技术 ^[10]	高灵敏度和高精度,抗电磁干扰;实时监测应变、温度变化;多点覆盖;寿命长	成本较高,分析和处理数据需专用设备
	加速度传感技术 ^[15]	能有效监测振动和动态响应;体积小、响应速度快;可捕捉微小动态变化	对低频和静态载荷的敏感度较差;受噪声和环境刚度影响大,需校准
物理机理驱动式感知技术	声发射技术 ^[4-5]	适用于大范围结构检测;在检测裂纹、疲劳等潜在损伤识别上表现优异	对噪声和环境干扰敏感;仅提供定性信息,难以精确定位损伤
	智能涂层传感技术 ^[16]	实现多参量监测;可直接集成于材料中,适用于局部精密监测;灵活性高	集成复杂性高;性能受环境变化影响;成本较高,技术成熟度较低
	电磁传感技术 ^[5-6]	非接触式监测,对金属结构监测精度高;可通过磁场变化或电磁波反射评估状况	非金属结构监测中应用受限;易受电磁干扰,需额外屏蔽措施

1.1 飞机结构载荷监测技术与系统

从载荷监测系统的研制、传感器的选择与优化、载荷数据处理与分析3个方面解析飞机结构载荷监测技术体系的核心要素。

1) 载荷监测系统的研制

载荷监测系统的工程化应用需兼顾飞行安全、维护效率与经济效益的协同优化。在军用航空领域, Park 等^[17]研发的多点监测系统通过分布式传感网络实现对机体动态响应的实施捕捉,试验表明可识别超90%的结构异常。但嵌入式设计导致整机增重1.2%,且在极端机动条件下信号丢失率高达15%,影响了数据的连续性与完整性。在民航领域, Wada 等^[18]提出融合光频域反射与FBG的复合监测系统,在A350机身纵梁监测中实现0.8 $\mu\epsilon$ 的应变分辨力,空间分辨率较传统系统提升8倍,但复杂的光纤拓扑结构使布线复杂度增加40%,导致维护成本上升。

2023年,北京航天控制仪器研究所针对航空发动机的高频载荷监测需求,研发了可调谐激光解调系统,借助波长误差补偿算法,在50 kHz 采样频率和100 m 传输距离下,将解调误差从2 nm 降至10 pm,成功捕捉涡轮叶片3.2 Hz 共振频率偏移,提升了预警能力^[19]。但其高功耗与激光模块的高精度控制需求,仍制约其在资源受限平台的应用推广。

2) 传感器的选择与优化

传感器的选择和优化直接决定载荷系统的可靠性与适用边界。欧洲空客公司部署压电传感器网络以捕捉结构响应,飞行验证表明异常识别准确率达92%^[20]。但压电材料存在时效性,年均灵敏度衰减约8%,限制了长期服役能力。美国国家航空航天局(national aeronautics space administration, NASA)在X-33验证机与F/A-18战机上布设的光纤传感器网络^[8],采用波长编码技术实现应变与温度的同步解耦,具备优异的电磁抗扰特性,但复

杂的飞线布设导致机体改装的成本增加。

2022年,中国飞机强度研究所提出智能涂层传感器,可实现腐蚀、疲劳与裂纹扩展的多参数监测,盐雾试验下电化学阻抗漂移控制在5%以内^[16]。北京信息科技大学开发的微结构光谱调制型光纤传感器,在10 $^{\circ}\text{C}$ ~ 60 $^{\circ}\text{C}$ 实现12.3 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ 温度灵敏度,较裸光纤提升4.5倍^[21]。但其在大大应变范围内表现出非线性特征,且多模耦合效应引起应变解调误差高达 $\pm 25 \mu\epsilon$ 。当前传感器优化仍面临压电材料的时变特性、光纤布设复杂性及智能涂层的环境耐久性等共性瓶颈,亟待通过材料改性 with 飞秒激光微加工等手段实现突破。

3) 载荷数据处理与分析

载荷数据的智能处理是实现飞行控制与结构健康评估的关键。Holmes 等^[22]提出高斯过程回归模型,通过贪心算法优化输入维度,在起落架载荷预测中将均方根误差降至1.8 kN,但计算复杂度高,难以满足飞行控制系统对ms级响应的要求。南京航空航天大学针对支柱式起落架提出的双向回归标定方程在地面工况下误差小于 $\pm 1.5\%$,但在非稳态飞行动作中误差扩大至 $\pm 7.3\%$,暴露其动态适应性不足^[23]。2023年, Wang 等^[14]构建LSTM残差网络模型,通过时空特征融合实现0.08%的平均相对误差,精度较传统BP神经网络提升82%。但其参数量大,在嵌入式平台上推理延迟达320 ms,影响实际部署。

当前技术发展呈现两大趋势:1)融合物理模型与神经网络的混合建模正在突破纯数据驱动模型的泛化瓶颈;2)面向边缘计算的轻量化算法可在保持高精度的同时,将模型压缩至原始体积的1/10。这些进展为提高数据处理效率提供了新路径,但传感器与算法的协同设计、多源异构数据融合机制仍需深入研究。

1.2 飞机结构载荷监测技术存在的发展演变

飞机结构载荷监测技术大致经历了机械式、电子式

和光纤式 3 个发展阶段,其技术演进如图 2 所示。

1) 机械式仪器系统

机械式仪器系统是早期飞机结构载荷监测的主要工具,主要使用疲劳计、压力传感器等机械式仪表来测量机体结构的载荷。然而,这些监测系统往往体积庞大,安装和维护过程较为复杂。此外,其存在分辨率低、稳定性和可靠性不足等问题,影响测量结果的准确性^[24]。这些局限性限制了其在精确监测中的应用。

2) 电子式仪器系统

随着微电子技术进步,电子式仪器系统成为飞机结构载荷监测的主流。其主要通过飞参记录仪记录飞行过程中系统和机体结构的工作状态,提供高精度数据。相比机械系统,电子系统在分辨率和稳定性方面有所提升^[25]。然而,这些系统需要外部电源供电,存在降低系

统稳定性和可靠性的风险,并且电子式监测系统极易受到其他机载电子系统的电磁干扰,导致测量误差增加^[26]。

3) 光纤式仪器系统

近年来,光纤式仪器系统凭借其本征抗电磁干扰特性与长寿命周期,在先进机型中探索规模化应用^[27-28]。然而,光纤传感器的安装与维护过程较为复杂,传感网络的布局与优化需要丰富的工程经验。此外,较高的成本和对数据处理的专业要求也限制了其广泛应用^[29]。尽管光纤式系统在复杂环境中的应用仍面临挑战,其潜力依然巨大。未来的研究应重点聚焦于降低传感器成本、简单布设技术,并开发高效的数据处理方法,以提升其在实际监测系统中的可行性与可靠性。

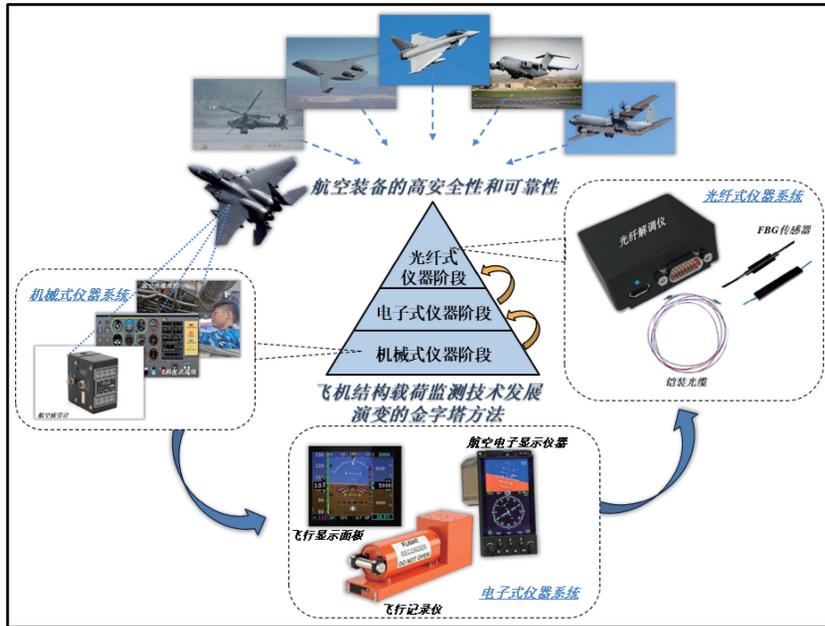


图 2 飞机结构载荷监测技术的发展演变情况

Fig. 2 Evolution of aircraft structural load monitoring technology

1.3 高端航空装备研制推动新技术发展

在新一代战斗机、舰载隐身战机及武装直升机等高端装备研制的牵引下,飞机结构载荷监测技术对装备性能、安全性和可靠性要求不断提高。以 F-35 战机为例,其机体复合材料占比达 35%,传统应变监测系统在跨域机动与强电磁对抗工况下的失效概率高达 22%,倒逼监测技术向抗干扰、高动态方向演进^[30]。光纤传感系统凭借其本征抗电磁特性与微秒级响应能力,在机翼载荷、机身冲击及疲劳裂纹等关键结构参数中展现出更高的精确度和稳定性,极大拓宽了其在复杂环境中的应用范围^[31]。

此外,大数据与人工智能技术的深度融合正重构监

测体系架构,FBG 技术通过与先进方法结合,使结构健康状况、载荷分布感知及环境参数测量的实时监测和预防性维护成为可能,不仅提升了其准确性和智能化程度,还在数据处理和趋势预测方面提供了新思路^[32]。

2 基本原理与技术特点

2.1 FBG 传感原理

作为光纤传感技术的核心元件,FBG 通过光纤芯内周期性折射率调制结构,实现对外部多物理场参量的耦合感知。当宽带光源入射时,满足布拉格相位匹配条件的波长 λ_B 将在光栅处产生特征反射峰。通过解调装置

测量反射波长的变化,可实时获取应变与温度变化信息。 λ_B 由光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 决定,其关系式为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

该传感机制源于弹光、热光与热膨胀 3 种物理效应的耦合。当外界载荷或温度变化时, Λ 因机械应变与热膨胀而发生变化, n_{eff} 则受到弹光效应与热光效应影响,导致反射波长 λ_B 发生漂移。根据弹性理论^[33],方程可表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (2)$$

式中: P_e 为有效弹光系数; α 为热膨胀系数; ζ 为热光系数。

2.2 FBG 的封装及应变传递关系

为实现结构表面应变向 FBG 的高保真传递,通常构建“基体-粘接层-涂覆层-FBG”4 层封装结构,如图 3 所示。该传递过程符合弹性力学中的剪切滞后模型^[34],其关系可表达为:

$$\varepsilon_a(x) = \varepsilon_b \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh\left(k\frac{L}{2}\right)} \right] \quad (3)$$

式中: ε_a 为 FBG 轴向应变; ε_b 为结构实际应变; k 为应变传递系数; L 为封装长度; x 为沿光栅轴向位置。

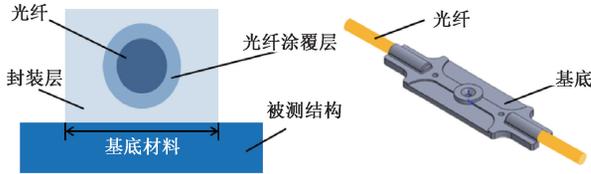


图 3 FBG 传感器应变传递关系

Fig. 3 FBG sensor strain transfer relationship

2.3 技术特点

FBG 传感器在飞机结构载荷监测中的核心优势可归纳为耐久性、感知能力、环境适应性与集成特性 4 个维度。

1) 长寿命、耐腐蚀

FBG 具有优异的环境适应性,其全介质结构赋予其良好的化学稳定性和热稳定性^[35]。以 SiO_2 为基材的 FBG 在盐雾试验中腐蚀速率远低于金属基体材料。疲劳测试表明,在 $\pm 500 \mu\varepsilon$ 加载 1.32×10^8 次后,其波长漂移小于 0.5%^[36]。温度稳定性方面,在 $-35 \text{ }^\circ\text{C} \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,FBG 的传感线性度高达 0.999,温度灵敏度为 $9.93 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ^[37],满足机体长期服役需求。

2) 波分复用、集信息传输于一体

FBG 具备波分复用能力,单根光纤可容纳 200 个以上传感节点,信道间隔控制在 0.8 nm 以内,覆盖 C+L 波段^[38]。Costa 等^[39]在复合材料机翼中嵌入 FBG 阵列,实

现结构应变分布精准测量。北京航空航天大学利用改进型人工蜂群算法对温度、应变信号进行解耦,误差控制在 1.2% 以内^[40],展现出 FBG 在复杂场景中的高可靠性与多功能集成能力。

3) 抗电磁干扰、高可靠

FBG 本征不导电,具有良好的抗电磁干扰能力。广州大学的实验验证表明,FBG 与电阻应变片同时工作于强电磁环境下,FBG 测量数据保持稳定^[41]。结合法拉第旋转镜补偿,系统偏振相关损耗低于 0.02 dB。在雷击模拟测试中,FBG 传感器存活率达 100%,满足航电系统抗干扰标准^[42]。

4) 质量轻、体积小、高灵敏度

借助飞秒激光微加工技术,FBG 传感器已实现微型化制备。其高光电转换效率与低噪解调算法相结合,能够实现对微小应变或温度变化的高灵敏探测。在空间受限的机翼结构中,FBG 可实现高密度布设,提升监测覆盖率^[31]。

从传感原理、应变传递机制及技术特性 3 个方面综合分析,FBG 具备高精度、强抗扰、多参数、长寿命等优势,其剪切滞后模型驱动的封装方式增强了应变传递精度。与传统电阻应变片相比,FBG 在飞机结构载荷监测的适应性与性能表现方面具有显著优势,具备在现代航空装备中广泛应用的工程潜力。

3 应用发展历程及典型案例

自 20 世纪 80 年代末以来,FBG 传感技术在飞机结构监测领域取得显著进展,发展历程可划分为 3 个阶段,初步研究与实验室验证阶段、工程应用探索阶段以及规模化应用与标准化阶段^[43]。公开报道的 FBG 技术在该领域的研究路线如图 4 所示,各阶段的技术成熟度与典型案例如表 2 所示。

3.1 初步研究与实验室验证阶段

1) 国外研究

1988 年,美国 NASA 首次将 FBG 嵌入碳纤维复合材料机翼蒙皮,构建航空结构原型监测系统,系统应变分辨率达 $2 \mu\varepsilon$ ^[8]。随后,美国空军在 F-15、F-22 等机型上开展系统验证,展示了 FBG 在高精度载荷监测中的潜力,但在长期稳定性与集成密度方面仍受限制^[44-45]。

欧洲方面,德国宇航中心在复合材料机翼中部署 FBG 网络,重构应变场精度达 95%^[50];意大利那不勒斯大学在起落架动态载荷测试中将误差控制在 3.2%^[51];韩国科学技术院通过风洞试验验证其在复杂气动载荷下的适用性,但温度补偿算法在高温环境中表现出灵敏度退化^[52]。

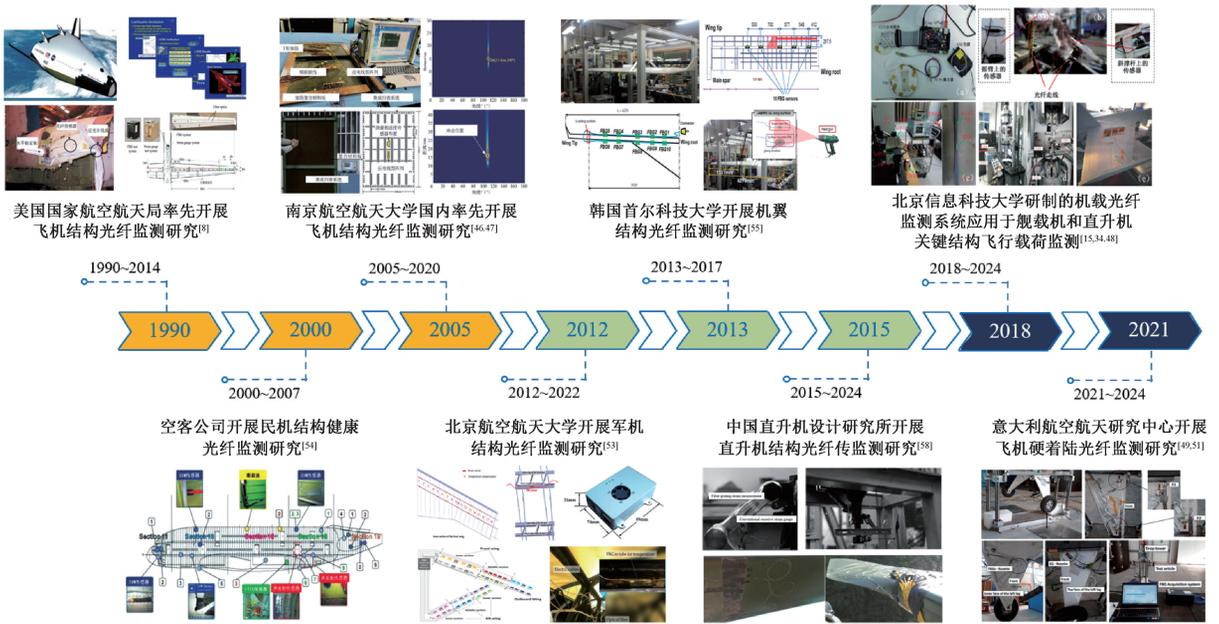


图 4 公开报道 FBG 技术在飞机结构监测中的发展历程

Fig. 4 Public coverage of the development of FBG technology in aircraft structural monitoring

表 2 飞机结构 FBG 监测技术成熟度与典型案例

Table 2 Aircraft structural FBG monitoring technology maturity and typical cases

研究机构	监测参数	目标结构	技术突破点	技术成熟度等级 (TRL)
NASA ^[8]	应变、温度	复合材料机翼蒙皮	首创嵌入式 FBG 阵列, 128 通道, 应变分辨率达 2 $\mu\epsilon$	TRL4
美国空军 ^[44-45]	应变/温度/加速度	F-22 飞机机身、X-33 燃油箱	开发高温 FBG, 实现液氢贮箱泄漏检测	TRL5
南京航空航天大学 ^[46-47]	应变场分布	无人机机翼盒段	提出应变-温度解耦算法, 建立 34 节点传感网络	TRL3
北京信息科技大学 ^[15, 34, 48]	应变/温度/振动	舰载机起落架、直升机旋翼	研制抗冲击封装结构, 动态应变测量范围扩展至 $\pm 5\ 000\ \mu\epsilon$	TRL7
意大利航空研究中心 ^[49]	应变/变形	A320 起落架	开发形变重构模型, 实现着陆载荷谱实时反演	TRL7

2) 国内研究

国内 FBG 技术研究起始于 1996 年国家自然科学基金重点课题支持。南京航空航天大学在无人机翼盒试验中构建 34 节点 FBG 网络, 对比压电传感器验证其重复性和一致性在 1.36% ~ 1.90% 之间^[46-47], 但未考虑温漂影响。北京航空航天大学构建的光纤传感系统在应变预测中误差为 2.62%, 但高温耦合效应下误差上升至 4.8%^[53]。北京信息科技大学也开展了对翼梁、复材结构等的深入试验, 提升了 FBG 在复杂环境中的可靠性验证水平^[54]。

3.2 工程应用探索阶段

随着 FBG 传感技术的不断发展, 其在航空领域的应用逐渐扩展, 研究重点逐步转向了 FBG 传感器在实际飞行器结构中的安装与应用。在工程应用探索阶段, FBG

传感器已被逐步应用于机翼、机身等关键部位的载荷监测, 验证了其在复杂环境下的可靠性。

1) 国外研究

波音公司与 Redondo Optics 联合开展的研究在复材机舱中集成 FBG 网络, 实现 $\pm 15\ \text{mm}$ 精度的损伤定位, 但布设耗时较长^[16]。Kim 等^[55]开展了 FBG 静态标定试验, 验证了实验室结果向飞行载荷数据的映射能力, 但在动态性能方面仍有不足。

2) 国内研究

武汉理工大学在直升机旋翼监测中提升了 FBG 传感器对离心过载的适应性, 测量误差小于 1.8%^[56]。北京卫星环境工程研究所通过温变试验验证温度响应稳定性, 但高湿环境下粘接层存在微小应变损失^[57]。中国直升机设计研究所完成 FBG 在旋翼桨毂的完整测试, 但温

度补偿机制与组网效率仍待优化^[58]。天津大学、东南大学等也通过实机验证推动了FBG在关键结构中的初步集成^[59-60]。

3.3 规模化应用与标准化阶段

近年来,FBG传感技术在飞机结构监测中的应用逐渐规模化,并朝着标准化方向发展。

1) 国外研究

Pak等^[61]结合FBG阵列与有限元模型,建立应变-位移监测体系,实现高精度载荷反演。Bednarska等^[62]提出基于应力波特性的损伤识别方法,灵敏度达 $0.8\mu\epsilon$,可识别 0.3 mm^2 级分层损伤。但该方法在实装中仍受限于传感器布设容差与胶粘剂蠕变问题。

2021年,Brindisi等^[49]提出时频域融合算法,揭示了起落架缓冲能耗与冲击载荷之间的关系,定量识别70%~85%的能量转化率。都灵理工大学联合欧洲航空安全局开展适航研究,在疲劳试验中将裂纹扩展预测误

差控制在12%以内^[63]。乌兹别克斯坦国立大学则开发了具备耐高温能力的起落架多参量监测系统,进入装机验证阶段^[64]。

2) 国内研究

中国飞行试验研究院和中电科第二十三研究所军用无人机、舰载机等飞机上开展了实际飞行测试,推动了FBG技术在飞行器设计、制造及维护中的应用^[65-66]。

2023年,祝连庆团队^[15,34,48]与中国飞机强度研究所、中国直升机设计研究所等单位合作,成功自主研发出多套机载FBG监测系统,如图5所示,并已成功应用于某型舰载机起落架的载荷飞行测试中,实现了温度、应变等参数的实时监测。北京信息科技大学与国内航空重点单位合作,正逐步建立面向飞机结构载荷监测的机载FBG系统,涵盖了机载光纤传感器的制备与标定测试、机载FBG监测系统研制与安装调试,以及飞机关键结构飞行载荷监测数据的采集与分析处理。

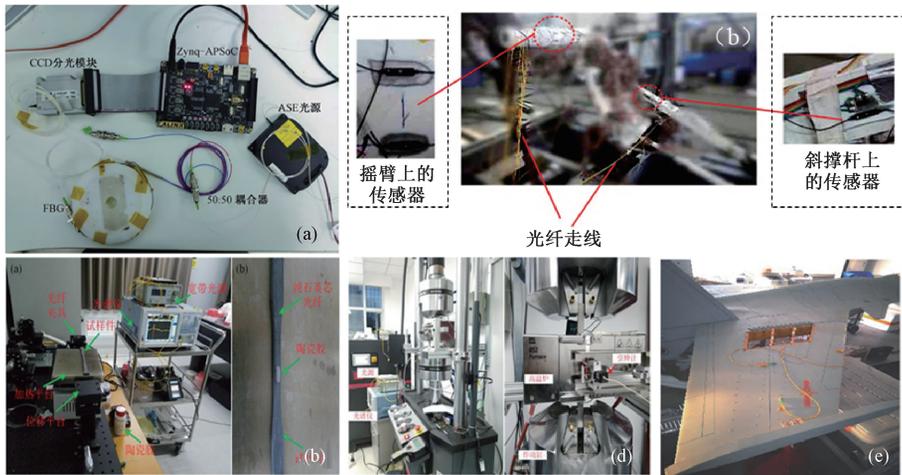


图5 北京信息科技大学开展的机载FBG监测技术研究^[15,34,48]

Fig. 5 Research on FBG monitoring technology for airborne by BISTU^[15,34,48]

随着研究深入,FBG技术在飞机结构载荷监测中的应用边界持续拓展,尽管目前已在多个平台实现初步集成与飞行测试,但在大型飞机与复杂结构场景中仍面临温度漂移补偿、组网复杂度、封装可靠性等方面挑战^[67-68]。

FBG技术已完成从实验室验证、工程化探索到实机部署的3阶段跃迁,研究重心从应变测量、温补机制逐步转向系统集成、解调算法优化与适航标准对接。当前,尽管系统成熟度不断提升,但在高密度组网、动态响应准确性和长期稳定性验证方面,仍需进一步攻关。

4 关键技术问题

随着新一代歼击机、舰载机、武装直升机和无人机等

航空装备对结构健康监测提出更高要求,FBG技术在飞机结构载荷监测中的应用也面临更为严苛的性能挑战,尤其在传感器寿命、解调精度与系统可靠性方面。尽管已有广泛探索与进展,当前仍存在一系列关键技术瓶颈,亟待突破。图6所示为该领域亟需解决的核心技术问题。

4.1 机载高强度FBG刻写技术

FBG的形成原理是通过高能激光在光纤芯部诱导周期性折射率调制结构,常见刻写技术包括紫外激光、CO₂激光、相位掩模和飞秒激光刻写。其中,飞秒激光刻写凭借超短脉冲与高峰值功率优势,展现出优异的纳米级刻写精度、环境稳定性和多物理量兼容能力^[69-70]。飞秒激光刻写技术可实现亚微米级光栅精度,显著降低定位误差并提升光谱一致性。然而,面对多物理耦合监测任务,

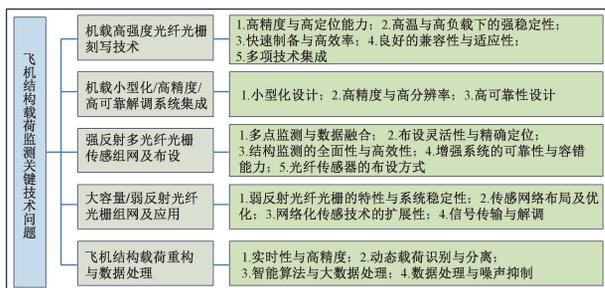


图 6 飞机结构载荷监测关键核心技术

Fig. 6 Key core technology for aircraft load monitoring

传感器间的交叉敏感性仍是主要难点^[71]。未来亟需通过更高精度的结构设计与高选择性解调技术,降低多参量干扰,提高系统集成度与传感器性能一致性。

4.2 机载小型化/高精度/高可靠解调系统集成

机载 FBG 解调系统作为监测系统核心,需在紧凑结构中实现高带宽、高分辨率、抗干扰与高可靠性性能。当前主流方法包括波长扫描法、波分解调法、相位解调法与光时域反射技术。其中,基于可调谐激光器的波长扫描法在动态响应与解调精度方面更适用于飞机载荷监测^[72]。然而,在机载环境下,解调系统不仅面临空间占用与重量限制的问题,还要解决如解调容量和速度、散热等技术瓶颈。其关键技术体现在如下 3 方面^[73-74]:

1) 小型化设计

小型化设计是机载解调系统的一个关键需求,尤其在严格的空间与重量限制下,小型化设计能够有效降低系统体积和功耗^[75]。采用高密度电路集成技术和微型光学封装方案,可显著降低系统的空间占用和整体重量。通过优化激光器与解调模块的机械布局,系统在保证性能的同时实现了高度紧凑的结构设计。此外,集成化电路设计减少了外部连接器件的数量,不仅提高了系统的可靠性,还降低了功耗,更适用于长期机载监测任务。然而,随着集成度的提高,散热问题也日益突出。为解决这一问题,未来需要开发更加高效的散热设计与材料,以确保解调系统在高温环境下的稳定运行。

2) 高精度大容量解调

飞机结构的微小变形和复杂载荷变化要求解调系统具备极高的测量精度。采用高稳定性的可调谐激光光源,并结合动态波长校准技术,确保激光输出与 FBG 传感信号的精确匹配^[76]。通过优化信号采集与处理算法,系统能够有效抑制环境噪声干扰,提高波长解调的分辨率。此外,现有解调系统的速度和容量不足以满足飞机结构载荷实时监测的要求。为此,未来的解调系统需要优化传感网络 and 数据处理能力,提升动态响应速度,并解决高频动态监测下的信号解调精度问题。

3) 高可靠性设计

机载环境通常涉及极端的温度波动及强电磁干扰,这要求解调系统不仅要具备高精度和高可靠性,还要能够适应高低温环境及电磁兼容性要求。为提高系统的环境适应性,从硬件和软件两方面进行优化,硬件上采用抗振加固设计和宽温域电子元器件,确保系统在极端条件下的稳定工作。软件上通过实时信号校正和故障自诊断算法,有效降低了误报率^[77]。此外,高效的热管理设计和低功耗优化进一步延长了系统的使用寿命,使其满足机载环境对可靠性的严格要求。

4.3 强反射多 FBG 传感组网及布设

针对飞机结构多点、高精度监测的实际需求,强反射型 FBG 传感网络通常采用时分复用与波分复用相结合的混合组网架构,构建形成准分布式多节点监测系统。该方案技术优势主要包括实现多点并行监测与信息融合、具备灵活布设与精确定位能力、支持复杂工况下的多参量动态采集、内置冗余与容错机制,增强系统可靠性。

强反射 FBG 传感网络可灵活部署于飞机结构的关键受力区域,如机身加强框、翼梁、翼肋等典型疲劳高风险部位,传感器节点通过独立反射波长进行识别和解调,能实现对各监测点应变、温度等物理量的实时感知。结合多源信息融合技术,系统可有效识别在不同载荷、温度、振动等工况下结构的健康状态,提前预警潜在损伤。

在布设方式上,强反射光纤传感器兼容多种形式,包括表贴式和嵌入式安装,能够根据材料特性与力学边界条件优化布线路径与节点密度,确保监测灵敏度与稳定性。网络化传感器的协同运行显著提升了数据采集效率与异常检测能力。为提升系统的容错性与运行安全性,该技术普遍采用双总线拓扑结构与动态路由算法,当局部节点失效时可实现路径快速重构,确保系统整体运行不受影响,避免关键区域出现监测盲区。

4.4 大容量/弱反射 FBG 组网及应用

在飞机结构载荷监测中,弱反射型 FBG 因其低反射率特性,在构建大规模分布式传感网络方面展现出独特优势。相比强反射 FBG,弱反射 FBG 具备更高的信号稳定性与抗干扰能力,尤其适用于复杂电磁环境与高密度测点布设场景。当前研究主要聚焦于其在扩展性、高灵敏度、时分复用与波分复用方面的关键技术突破^[80-81]。

基于准分布式传感原理,弱反射 FBG 可有效提升传感系统的容量与动态监测范围。时分复用技术通过在不同时序激励与读取多个传感节点,使得单根光纤具备多点监测能力,显著提高光纤资源利用效率。波分复用则通过对不同传感器分配特定反射波长,实现多通道并行解调,不仅扩展了系统的传输容量,还提升了信号传输速率与响应效率。

尽管弱反射 FBG 具备高灵敏度、抗噪声能力强等优势,其在工程应用中仍面临若干挑战。随着组网密度增加,系统易出现信号串扰,尤其在高频动态响应工况下,解调精度易受到波形畸变与通道干扰影响。此外,传感器间距缩小可能引发耦合误差,降低信号解码准确性。因此,如何优化传感器空间分布以降低串扰风险,提升系统在复杂工况下的抗干扰能力与稳定性,成为亟待解决的关键技术问题。

4.5 飞机结构载荷重构与数据处理

图7所示为智能算法在飞机载荷监测中的典型应用流程。通过光纤传感器实时采集结构应变数据,结合载荷-应变模型,可实现飞行载荷的动态重构。当前,常见的载荷重构方法主要包括基于应变数据的直接计算法、频域信号处理方法以及融合深度学习的智能算法。其技术进展集中体现在以下几个方面:高精度与实时性提升、动态载荷识别与解耦、算法自适应性增强以及大数据融合处理能力的优化^[82]。

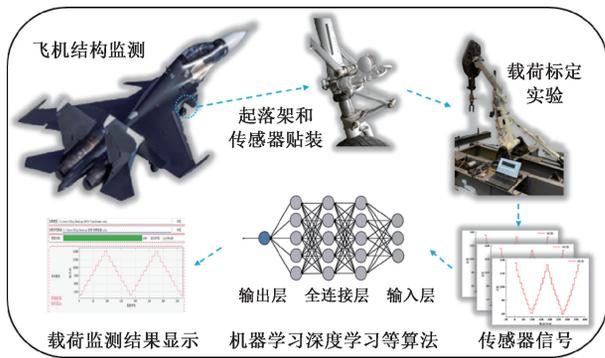


图7 智能算法在飞机载荷监测上的应用

Fig.7 Application of intelligent algorithms to aircraft load monitoring

光纤传感器可在复杂飞行条件下提供高频率、高精度的应变数据,相较传统电阻应变片在动态响应、抗干扰能力与灵敏度方面更具优势。通过先进的信号处理技术与时频分析手段,可有效提取飞行载荷的动态特征,识别飞行过程中不同类型载荷的作用规律,实现动态载荷的分离与反演,降低由于干扰引起的误差。

随着深度学习的发展,基于卷积神经网络、长短期记忆网络等神经网络的模型被广泛应用于多源传感数据的融合与自动特征提取任务中,可实现对温度、应变、加速度等物理量的高效识别。同时,通过智能算法实现传感器数据的融合处理,有助于消除冗余与冲突信息,提升监测系统的稳定性与决策可靠性。

新一代航空装备对光纤传感器设计和解调系统稳定性与响应速度提出更高要求,推动载荷监测技术升级。飞秒激光刻写实现纳米级定位,提升光栅质量与环境适

应性。解调系统注重小型化与高可靠性,优化激光器和数据处理以实现微应变测量。强反射光栅组网通过灵活布设和冗余设计,增强多点监测及容错能力。弱反射光栅依靠高灵敏度和多复用技术支持大规模传感,但需突破信号串扰和响应瓶颈。智能算法融合多传感器数据与噪声抑制,实现高精度动态载荷识别,促进飞机载荷监测智能化发展。

5 未来发展趋势

5.1 飞机结构 FBG 传感监测数据处理与故障点快速定位

随着 FBG 传感系统在飞机结构监测中的广泛应用,所获取的数据呈现出指数级增长,这对数据处理的实时性与智能化提出了更高的要求。结构状态的精确识别和故障点的快速定位,已成为保障飞行安全与提高维修效率的关键技术瓶颈^[83]。

目前,智能化数据处理正逐步取代传统信号分析模式。深度学习、迁移学习与自适应增强等人工智能算法的引入,使得复杂信号特征的提取与异常识别更加高效。研究表明,结合卷积神经网络与时序建模的多任务诊断框架,能够在高噪声环境下实现故障类型判别与部位定位的同步提升。此外,云计算与边缘计算的协同发展,为监测数据的实时处理与远程共享提供了强大的算力支撑,构建了空地一体化数据服务体系。

在自动化方面,面向多源异构 FBG 传感信息的融合算法已成为研究热点。通过引入模式识别与分布式协同分析机制,可实现多个监测点故障信号的协同识别与定位追踪,进一步提升排故效率。未来的系统将朝着自适应与闭环反馈控制演化,推动监测、诊断与决策环节的深度融合与协同优化。

5.2 多参量 FBG 传感技术动静态监测应用

随着现代飞机结构日益趋向轻量化与复合化,传统的单一参量监测手段已难以满足其动态服役环境下的状态评估需求。多参量 FBG 传感技术以其多物理量协同测量能力,正逐步成为高精度结构载荷评估的重要手段^[84]。通过结合应变、温度、振动、加速度等多参量信息,能够实现对机体静态受载状态与动态响应特性的联合监测。例如,采用 FBG 阵列融合振动信号与热-应变场分布特征,不仅提升了早期裂纹识别的灵敏度,还能有效捕捉损伤扩展过程中的耦合特征,从而实现基于状态感知的动态疲劳评估。

多参量信息融合的监测技术依赖于深度特征挖掘与数据驱动模型。目前,已有研究尝试构建基于自注意力机制的多模态特征融合网络,以提升多参量信号间的耦理解能力。未来,该技术将深度结合飞行任务谱与工

况模型,实现状态感知与寿命预测的闭环整合,推动飞机结构监测从定性诊断向定量评估的转型。

5.3 面向飞机结构的全寿命周期 FBG 传感监测与维护

传统健康管理系统多聚焦于飞机服役阶段,而全寿命周期监测理念强调在飞机“设计-制造-服役-退役”全过程中实现结构状态的连续感知与维护决策优化^[85]。FBG 传感技术凭借其分布式、高灵敏度、抗电磁干扰等优势,为全寿命周期监测提供了可扩展的解决方案。

在设计阶段,基于仿真分析与 FBG 传感反馈相结合的方法,能够提前评估关键结构在典型载荷谱下的疲劳响应,指导优化设计与材料选择。制造阶段,通过内嵌传感器对关键装配节点进行实时应变监测,帮助工艺过程中的质量控制与缺陷早期识别。

在服役阶段,连续的监测能够实现异常状态的实时识别与故障演化趋势的动态追踪。结合基于物理建模与数据驱动的寿命预测方法,能够为精细化维护提供决策支持。此外,退役阶段的结构健康档案与监测数据将成为开展再利用与资源回收评估的重要依据。构建全寿命周期健康监测体系,有望推动从被动维修向预测性维护转型,实现可靠性、安全性与经济性的协同提升。

5.4 FBG 技术在飞机结构载荷监测中的集成与融合

FBG 传感技术的工程化应用正从“点式监测”迈向“系统集成”。其与现代载荷监测技术、信息物理系统及人工智能技术的深度融合,正在推动新一代智能结构健康管理系统的形成^[86]。通过将 FBG 技术嵌入飞机结构的关键部位,可以实现对载荷谱、应力集中区及损伤萌生区域的长期在线监测。结合历史数据与知识图谱构建结构响应模型,进而实现载荷重构与失效趋势预测。

在“融合”方面,FBG 技术与数字化设计平台、智能维护系统的集成,将使得基于数据驱动的结构健康管理闭环成为可能。依托边缘计算节点,监测数据可进行前端处理与预警判断,并同步上传至决策平台,以支持远程诊断与维护调度。这种融合不仅体现了多参量信息融合,还能够通过智能化算法的优化,提升监测系统的效能和可靠性。

FBG 载荷监测技术的发展将更加重视系统集成能力与算法适配性,推动监测系统与飞行控制系统、维护保障系统的联动,形成全维度、智能化的健康管理闭环,为航空装备的高可靠性和高可用性提供坚实的技术保障。

通过聚焦飞机结构 FBG 传感的关键技术,涉及了智能化数据处理、多参量协同感知、全寿命周期监测及系统集成等领域。针对复杂飞行载荷监测任务,深度学习技术可实现故障实时精准定位,融合多参量信息可提升动态载荷评估的精度,推动载荷监测从定性向定量转变。全寿命周期监测强化了维护决策的连续性与科学性,最

终,通过人工智能的深度融合,促进 FBG 传感技术向高效、智能、全周期及集成化方向发展,以满足现代复杂航空装备的严苛需求。

6 结 论

FBG 技术作为解决飞机结构载荷监测的重要手段,凭借其高灵敏度、高精度、抗电磁干扰性及优异的实时响应能力,在飞机结构载荷监测领域展现了显著优势。该技术通过对微小应变变化的精确响应,能够实现潜在结构损伤的早期预警,显著提升飞机运行的安全性与可靠性。与此同时,光纤传感器具备出色的长期稳定性与环境适应性,为构建高性能、可靠性的结构载荷监测系统奠定了坚实基础。在国防安全、智能制造及应急响应等领域,FBG 技术具有广泛的应用潜力。

本文系统梳理了飞机结构载荷监测技术的现状,详细阐释了 FBG 的基本原理及其技术特点,回顾了国内外应用发展的历程,并总结了典型案例中的研究进展,深入分析了 FBG 技术在结构载荷监测中的独特优势,并重点讨论了机载高强度 FBG 刻写与微型化解调系统集成等技术瓶颈。结合未来智能化航空装备的需求,展望了该技术的发展趋势,尤其是在多参量感知、全寿命周期监测及数据处理与系统集成方面的技术演进,为推动飞机结构载荷监测系统向智能化、集成化发展提供了理论指导。

为进一步推动 FBG 技术在飞机结构载荷监测中的工程化应用,未来应依托新型光纤材料、微纳加工工艺及人工智能技术,优化 FBG 传感网络的结构与信息处理能力,提升其在动态环境中的实时响应速度和故障定位精度。结合航空装备的服役特性,开展具有工程适应性的技术研究,强化针对不同机型、服役阶段以及典型载荷工况下的传感性能适配设计,通过理论研究与工程实践的协同推进,有望实现从“状态感知”到“智能决策”的跨越,助力我国航空装备维护模式的转型与升级。

参考文献

- [1] 杜荣华,朱胜亿,魏克湘,等. 交通环境能量采集及自供能交通设施健康状态监测研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 3-23.
DU R H, ZHU SH Y, WEI K X, et al. Progress of energy harvesting in transportation environment and health monitoring of self-supplied transportation facilities [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 3-23.
- [2] MARQUES C, LEAL-JÚNIOR A, KUMAR S. Multifunctional integration of optical fibers and nanomaterials for aircraft systems[J]. Materials, 2023, 16(4): 1433.

- [3] FANG F, OUYANG L, MENG Y, et al. Structural adaptive damage detection under uncertainty based on probability dissimilarity and moving average control chart [J]. *Measurement*, 2024, 225: 114023.
- [4] MEEMARY B, VASIUKOV D, DELÉGLISE-LAGARDÈRE M, et al. Sensors integration for structural health monitoring in composite pressure vessels: A review [J]. *Composite Structures*, 2025, 351: 118546.
- [5] 赵琴, 王立, 郑然, 等. 空间指向测量仪器的多物理场效应研究综述 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(7): 1-16.
- ZHAO Q, WANG L, ZHENG R, et al. A review of multiphysics field effects in spatial pointing measurement instruments [J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, 44(7): 1-16.
- [6] LIU B, PANG J, TU X, et al. Three components strain-gauge type aircraft surface friction resistance sensor: Design, manufacturing, and calibration [J]. *Measurement*, 2023, 218: 113165.
- [7] OGUNLEYE R O, RUSNÁKOVÁ S, JAVOŘÍK J, et al. Advanced sensors and sensing systems for structural health monitoring in aerospace composites [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2024, 26(22): 2401745.
- [8] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8): 1681-1692.
- LIU T G, WANG SH, JIANG J F, et al. Research progress of aerospace fiber optic sensing technology [J]. *Journal of Instrumentation*, 2014, 35(8): 1681-1692.
- [9] DENG C, YU M, ZHU L, et al. A deep learning algorithm ADPNet for strain and temperature decoupling of fiber bragg gratings [J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 79: 103356.
- [10] LI Y, ZHANG Y, LI Z, et al. Operando decoding of surface strain in anode - free lithium metal batteries via optical fiber sensor [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(26): 2203247.
- [11] FAN Y, DONG J, DAI P, et al. High speed and high stability fiber Bragg grating sensing system based on fast and wideband tunable REC-DFB laser array [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 43(7): 3240-3250.
- [12] CZIKHARDT R, VAN DER MAREL H, PAPCO J. GECORIS: An open-source toolbox for analyzing time series of corner reflectors in InSAR geodesy [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 926.
- [13] PAUL K, CHATTERJEE S S, PAI P, et al. Viable smart sensors and their application in data driven agriculture [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198: 107096.
- [14] WANG P, YU M, YAN G, et al. A deep learning-based method for calculating aircraft wing loads [J]. *Measurement and Control*, 2023, 56(7-8): 1129-1141.
- [15] 王鹏飞, 宋言明, 王永千, 等. 光纤布拉格光栅解调系统的光谱数据高速传送方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(10): 65-71.
- WANG P F, SONG Y M, WANG Y Q, et al. High-speed transmission method of spectral data for fiber Bragg grating demodulation system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(10): 65-71.
- [16] 白生宝, 肖迎春, 刘马宝, 等. 基于智能涂层的飞机结构腐蚀监测实验研究 [J]. *环境技术*, 2022, 40(4): 7-10.
- BAI SH B, XIAO Y CH, LIU M B, et al. Experimental study on corrosion monitoring of aircraft structures based on smart coatings [J]. *Environmental Technology*, 2022, 40(4): 7-10.
- [17] PARK C Y, HA J S, KIM S Y. Aircraft load monitoring system development & application to ground tests using optical fiber sensors [J]. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 2017, 45(8): 639-646.
- [18] WADA D, IGAWA H, TAMAYAMA M, et al. Flight demonstration of aircraft fuselage and bulkhead monitoring using optical fiber distributed sensing system [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2): 025014.
- [19] 唐才杰, 王学锋, 卞贺明, 等. 基于可调谐激光器的光纤光栅高速解调的时延误差补偿方法 [J]. *光电子·激光*, 2023, 34(2): 174-179.
- TANG C J, WANG X F, BIAN H M, et al. A time-delay differential compensation method for high-speed demodulation of fiber gratings based on tunable lasers [J]. *Optoelectronics-Laser*, 2023, 34(2): 174-179.
- [20] BUETHE I, DOMINGUEZ N, JUNG H, et al. Path-based MAPOD using numerical simulations [C]. *Proceedings of Smart Intelligent Aircraft Structures (SARISTU)*. Berlin: Springer International Publishing, 2015.
- [21] 闫光, 卢建中, 张开宇, 等. 温度解耦大量程光纤光栅应变传感器 [J]. *吉林大学学报 (工学版)*, 2019, 49(5): 1682-1688.
- YAN G, LU J ZH, ZHANG K Y, et al. Temperature decoupled large range fiber grating strain sensor [J]. *Journal of Jilin University (Engineering Edition)*, 2019, 49(5): 1682-1688.

- [22] HOLMES G, SARTOR P, REED S, et al. Prediction of landing gear loads using machine learning techniques[J]. *Structural Health Monitoring*, 2016, 15(5): 568-582.
- [23] 黄祎丰, 裘进浩, 刘克格. 支柱式起落架载荷标定数据工程处理方法[J]. *振动. 测试与诊断*, 2020, 40(2): 248-254.
- HUANG Y F, QIU J H, LIU K G. Engineering processing method for load calibration data of strut-type landing gear[J]. *Vibration. Test and Diagnosis*, 2020, 40(2): 248-254.
- [24] HASSANI S, DACKERMANN U. A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring [J]. *Sensors*, 2023, 23(4): 2204.
- [25] ALEXAKIS H, COCKING S, TZIAVOS N I, et al. Sensor-Based Structural Assessment of Aging Bridges [M]. *Data Driven Methods for Civil Structural Health Monitoring and Resilience*. Boca Raton: CRC Press, 2023: 76-97.
- [26] KIM S G, LEE E, HONG I P, et al. Review of intentional electromagnetic interference on UAV sensor modules and experimental study [J]. *Sensors*, 2022, 22(6): 2384.
- [27] WANG H, GUO J K, MO H, et al. Fiber optic sensing technology and vision sensing technology for structural health monitoring[J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4334.
- [28] KOK S P, LI GO Y, WANG X, et al. Advances in fiber Bragg grating (FBG) sensing: A review of conventional and new approaches and novel sensing materials in Harsh and emerging industrial sensing [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(19): 29485-29505.
- [29] LOYEZ M, DEROSA M C, CAUCHETEUX C, et al. Overview and emerging trends in optical fiber apt sensing[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, 196: 113694.
- [30] WANG Y, HU S, XIONG T, et al. Recent progress in aircraft smart skin for structural health monitoring[J]. *Structural Health Monitoring*, 2022, 21(5): 2453-2480.
- [31] XIONG M, TENG C, CHEN M, et al. Simulation study of high sensitivity fiber SPR temperature sensor with liquid filling[J]. *Sensors*, 2022, 22(15): 5713.
- [32] OMAR I, KHAN M, STARR A. Compatibility and challenges in machine learning approach for structural crack assessment [J]. *Structural Health Monitoring*, 2022, 21(5): 2481-2502.
- [33] PALMOWSKI J, BARCZAK K, KUBICKA N, et al. Optical strain sensor with dual fibre Bragg grating topology[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2023, 55(5): 453.
- [34] 黄鹏宇, 陈诗, 刘元凤, 等. 基于 FBG 的某舰载机前起落架载荷监测技术研究 [J]. *激光杂志*, 2023, 44(7): 68-75.
- HUANG P Y, CHEN SH, LIU Y F, et al. Research on FBG-based front landing gear load monitoring technology for a carrier aircraft [J]. *Laser Journal*, 2023, 44(7): 68-75.
- [35] 陈光, 丁克勤, 张继旺. 表面焊接式光纤布喇格光栅应变传感器的疲劳性能研究[J]. *光通信技术*, 2023, 47(2): 6-11.
- CHEN G, DING K Q, ZHANG J W. Fatigue performance of surface-welded fiber Bragg grating strain sensors[J]. *Optical Communication Technology*, 2023, 47(2): 6-11.
- [36] 舒岳阶, 吴俊, 周世良, 等. FBG 应变传感器应力疲劳极限传感寿命评估方法 [J]. *光子学报*, 2018, 47(1): 106-111.
- SHU Y J, WU J, ZHOU SH L, et al. Stress fatigue limit sensing life assessment method for FBG strain sensors[J]. *Journal of Photonics*, 2018, 47(1): 106-111.
- [37] 张学智, 祝连庆, 张荫民, 等. 光纤光栅非金属耐腐蚀封装及其温度特性研究 [J]. *激光与红外*, 2015, 45(4): 437-441.
- ZHANG X ZH, ZHU L Q, ZHANG Y M, et al. Research on non-metallic corrosion-resistant package of fiber grating and its temperature characteristics [J]. *Laser and Infrared*, 2015, 45(4): 437-441.
- [38] SHI W, TIAN Y, GERVAIS A. Scaling capacity of fiber-optic transmission systems via silicon photonics [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(16): 4629-4663.
- [39] COSTA J M, BLACK R J, MOSLEHI B, et al. Fiber-optically sensorized composite wing [C]. *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration 2014*. SPIE, 2014, 9062: 313-318.
- [40] 张旭苹, 张益昕, 王亮, 等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来 [J]. *光学学报*, 2024, 44(1): 11-73.
- ZHANG X P, ZHANG Y X, WANG L, et al. Current status and future of distributed fiber optic sensing technology research and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(1): 11-73.
- [41] 申昊文, 朱萍玉, 施维, 等. 光纤光栅与电阻应变片磁场环境下应变测量的试验研究 [J]. *自动化与信息工程*, 2014, 35(4): 11-15.
- SHEN H W, ZHU P Y, SHI W, et al. Experimental study of strain measurement under magnetic field environment with fiber grating and resistance strain gauge [J]. *Automation*

- and Information Engineering, 2014, 35(4): 11-15.
- [42] ROSTAMI A, WAHAAB F A, SOLEIMANI H, et al. Advances in fibre Bragg grating technology for magnetic field sensing: A review [J]. Measurement, 2023; 113482.
- [43] ZHU L, SUN G, BAO W, et al. Structural deformation monitoring of flight vehicles based on optical fiber sensing technology: A review and future perspectives [J]. Engineering, 2022, 16: 39-55.
- [44] 王文娟, 薛景锋, 张梦杰. 光纤传感在飞机结构健康监测中的应用进展和展望[J]. 航空科学技术, 2020, 31(7): 95-101.
WANG W J, XUE J F, ZHANG M J. Progress and prospects of fiber optic sensing in aircraft structural health monitoring[J]. Aviation Science and Technology, 2020, 31(7): 95-101.
- [45] 王彬文, 肖迎春, 白生宝, 等. 飞机结构健康监测与管理技术研究进展和展望[J]. 航空制造技术, 2022, 65(3): 30-41.
WANG B W, XIAO Y CH, BAI SH B, et al. Research progress and prospect of aircraft structural health monitoring and management technology [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2022, 65(3): 30-41.
- [46] 袁慎芳, 邱雷, 王强, 等. 压电-光纤综合结构健康监测系统的研究及验证[J]. 航空学报, 2009, 30(2): 348-356.
YUAN SH F, QIU L, WANG Q, et al. Research and validation of piezoelectric-fiber optic integrated structural health monitoring system [J]. Journal of Aeronautics, 2009, 30(2): 348-356.
- [47] 鲍峤, 邱雷, 袁慎芳. 飞行器结构健康监测中压电-导波成像技术的发展与挑战[J]. 航空科学技术, 2020, 31(3): 15-33.
BAO Q, QIU L, YUAN SH F. Development and challenges of piezoelectric-conducted wave imaging technology in aircraft structural health monitoring [J]. Aviation Science and Technology, 2020, 31(3): 15-33.
- [48] WANG D, DONG M, LOU X, et al. Enhanced load prediction for aircraft landing gear utilizing graph convolutional neural network [J]. IEEE Sensors Journal, 2024.
- [49] BRINDISI A, VENDITTOZZI C, TRAVASCIO L, et al. A preliminary assessment of an FBG-based hard landing monitoring system[C]. Photonics. MDPI, 2021, 8(10): 450.
- [50] BEZIUK G, KRAJEWSKI A, BAUM T C, et al. Electromagnetic and electronic aerospace conformal load-bearing smart skins: A review [J]. IEEE Journal of Microwaves, 2023, 4(1): 13-42.
- [51] IADICICCO A, NATALE D, DI PALMA P, et al. Strain monitoring of a composite drag strut in aircraft landing gear by fiber bragg grating sensors[J]. Sensors, 2019, 19(10): 2239.
- [52] HE R, SUN H, GAO X, et al. Wind tunnel tests for wind turbines: A state-of-the-art review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 166: 112675.
- [53] MENG Y, BI Y, XIE C, et al. Application of fiber optic sensing system for predicting structural displacement of a joined-wing aircraft[J]. Aerospace, 2022, 9(11): 661.
- [54] LI H, ZHU L Q, SUN G, et al. Deflection monitoring of thin-walled wing spar subjected to bending load using multi-element FBG sensors[J]. Optik, 2018, 164: 691-700.
- [55] KIM J H, SHRESTHA P, PARK Y, et al. Application of fiber Bragg grating sensors in light aircraft: Ground and flight test [C]. 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. SPIE, 2014, 9157: 1265-1268.
- [56] 周祖德, 姚碧涛, 谭跃刚, 等. 光纤传感在制造领域应用的分析与思考 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(8): 3-26.
ZHOU Z D, YAO B T, TAN Y G, et al. Analysis and thoughts on the application of fiber optic sensing in manufacturing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(8): 3-26.
- [57] SERAFINI J, BERNARDINI G, PORCELLI R, et al. In-flight health monitoring of helicopter blades via differential analysis [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 88: 436-443.
- [58] 杨金花, 易晖, 王慧, 等. 基于光纤光栅传感技术的飞行器结构应变与温度监测研究[J]. 中国战略新兴产业, 2018 (20): 184,228 .
YANG J H, YI H, WANG H, et al. Research on strain and temperature monitoring of aircraft structure based on fiber grating sensing technology [J]. China Strategic Emerging Industries, 2018 (20): 184,228 .
- [59] JIANG J, LIU T, LIU K, et al. Development of optical fiber sensing instrument for aviation and aerospace application[C]. 2013 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications. SPIE, 2013, 9044: 133-141.
- [60] MA Z, CHEN X. Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: Recent applications and technical analysis[J]. Sensors, 2018, 19(1): 55.
- [61] PAK C. Wing shape sensing from measured strain[J].

- AIAA Journal, 2016, 54(3): 1068-1077.
- [62] BEDNARSKA K, SOBOTKA P, WOLIŃSKI T R, et al. Hybrid fiber optic sensor systems in structural health monitoring in aircraft structures [J]. *Materials*, 2020, 13(10): 2249.
- [63] MARCEDDU A C, QUATTROCCHI G, AIMASSO A, et al. Air-to-ground transmission and near real-time visualization of FBG sensor data via cloud database[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 23(2): 1613-1622.
- [64] ZAKIROV R, GIYASOVA F. Application of fiber-optic sensors for the aircraft structure monitoring[C]. *Safety in Aviation and Space Technologies: Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century"*. Springer International Publishing, 2022: 23-32.
- [65] 张宏林, 程卫真, 夏品奇. 基于分布式 FBG 传感测量的旋翼动载荷工程建模与试飞验证[J]. *应用力学学报*, 2025, 42(3): 542-551.
- ZHANG H L, CHENG W ZH, XIA P Q. Engineering modeling of rotor dynamic loads based on distributed FBG sensing measurements and test flight validation [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2025, 42(3): 542-551.
- [66] 张俊, 陈光辉, 倪国新, 等. FBG 传感技术在飞机机翼动态形变监测中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(11): 252-260.
- ZHANG J, CHEN G H, NI G X, et al. Application of FBG sensing technology in dynamic deformation monitoring of aircraft wings [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(11): 252-260.
- [67] CHOWDHURY H R, HAN M. Fiber optic temperature sensor system using air-filled fabry-pérot cavity with variable pressure[J]. *Sensors*, 2023, 23(6): 3302.
- [68] SEKINE M, FURUYA M. Development of measurement method for temperature and velocity field with optical fiber sensor[J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1627.
- [69] YE X, LI H, WANG M, et al. Accurate and efficient inscription of fiber Bragg gratings in double-clad ytterbium doped fiber based on femtosecond phase mask technology [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111775.
- [70] XUE J, LIU D, LI D, et al. New carbon materials for multifunctional soft electronics[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(2): 2312596.
- [71] BALENA A, BIANCO M, PISANELLO F, et al. Recent advances on high - speed and holographic two - photon direct laser writing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(39): 2211773.
- [72] GUI X, LI Z, FU X, et al. Distributed optical fiber sensing and applications based on large-scale fiber Bragg grating array [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(13): 4187-4200.
- [73] LI Y, LIU H, LIANG Q, et al. Demodulation of optical fiber sensors by MEMS tunable filter[J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 76: 103214.
- [74] WANG B, ZHANG X, TIAN J, et al. Research progress on router devices for the OAM optical communication [J]. *Sensors*, 2024, 24(3): 944.
- [75] LYU Z, ZHU B, LU L, et al. Miniature and low-power high-precision FBG interrogator with self-temperature compensation [J]. *Optics Express*, 2025, 33(5): 10289-10301.
- [76] ZHU Y, WANG L, WANG D, et al. A tracking-based high-speed demodulation method for fiber Bragg grating sensing system based on wavelength-tunable laser in space application [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 7007711.
- [77] LYU Z, WU Y, ZHUANG W, et al. A multi-peak detection algorithm for FBG based on WPD-HT [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 68: 102805.
- [78] LI S, LI H, YANG X, et al. Fully distributed multi-channel fiber-optic sensor for simultaneous relative humidity and temperature measurement with finer gauge length based on spatial-domain time-delayed multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(17): 6133 - 6142.
- [79] MCKENZIE I, IBRAHIM S, HADDAD E, et al. Fiber optic sensing in spacecraft engineering: An historical perspective from the European space agency [J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 719441.
- [80] BUTT M A, KAZANSKIY N L, KHONINA S N. Advances in waveguide Bragg grating structures, platforms, and applications: An up-to-date appraisal[J]. *Biosensors*, 2022, 12(7): 497.
- [81] REDDING B, MURRAY J B, HART J D, et al. Fiber optic computing using distributed feedback [J]. *Communications Physics*, 2024, 7(1): 75.
- [82] WANG S, CELEBI M E, ZHANG Y D, et al. Advances in data preprocessing for biomedical data fusion: An overview of the methods, challenges, and prospects[J]. *Information Fusion*, 2021, 76: 376-421.
- [83] CHAPALO I, STYLIANOU A, MÉGRET P, et al. Advances in optical fiber speckle sensing: A comprehensive review [C]. *Photonics*. MDPI, 2024, 11(4): 299.
- [84] TOSI D, MOLARDI C, SYPABEKOVA M, et al. Enhanced backscattering optical fiber distributed sensors:

Tutorial and review [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(11): 12667-12678.

[85] WANG J, JIANG C, KUANG L. High-mobility satellite-UAV communications: Challenges, solutions, and future research trends [J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(5): 38-43.

[86] 孙广开, 李红, 吴越, 等. 遥感航天器在轨结构微变形光纤监测技术发展综述[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 1-14.

SUN G K, LI H, WU Y, et al. A review on the development of optic fiber monitoring technology for micro deformation of remote sensing spacecraft on-orbit structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 1-14.

作者简介



张逸群, 2022年于中国民用航空飞行学院获得硕士学位, 现为北京信息科技大学博士研究生, 主要研究方向为光纤传感、飞机结构健康监测与深度学习。

E-mail: zhangyiqun_33@163.com

Zhang Yiqun received his M. Sc. degree from the Civil Aviation Flight University of China in 2022. He is now a Ph. D. candidate at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber optic sensing, aircraft structural health monitoring and deep learning.



张钰民 (通信作者), 2011年于中科院力学研究所获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为光纤传感、光纤激光器与光电精密测试技术等。

E-mail: yinmin.zhang@gmail.com

Zhang Yumin (Corresponding author) received his Ph. D. degree from the Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences in 2011. He is now a professor at Beijing Information Science and Technology University and a doctoral supervisor. His main research interest includes fiber sensing technology, fiber laser and opto-electrical precision measurement technology.



祝连庆, 分别在1984年和1989年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为光纤传感、光纤激光器与光电精密测试技术等。

E-mail: lqzhu_bistu@sina.com

Zhu Lianqing received his B. Sc. and M. Sc. degree both from Hefei University of Technology in 1984 and 1989, and Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is now a professor at Beijing Information Science and Technology University and a doctoral supervisor. His main research interest includes fiber sensing technology, fiber laser and opto-electrical precision measurement technology.