

引文格式:曾捷,朱林枫,李政颖,等.航空领域光纤结构健康监测技术及展望[J].航空制造技术,2026,69(19):25010101.

ZENG Jie, ZHU Linfeng, LI Zhengying, et al. Fiber-optic structural health monitoring technology in aviation and future prospects[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(19): 25010101.

航空领域光纤结构健康监测技术及展望

曾捷¹,朱林枫¹,李政颖²,赵鑫³,王爱军⁴,刘晓²,杨勇⁵,姜明顺⁶

(1. 南京航空航天大学,南京 210016;

2. 武汉理工大学,武汉 430070;

3. 航空工业成都凯天电子股份有限公司,成都 610091;

4. 上海飞机制造有限公司,上海 201324;

5. 北京航天控制仪器研究所,北京 100094;

6. 山东大学,济南 250061)

[摘要] 随着航空器结构形式、材料属性和任务模式朝着多样化方向发展,飞行环境日益严苛,对结构健康监测技术提出了更高要求和全新挑战。光纤传感器具有芯径细、柔韧性好、抗电磁干扰、集信号传感与传输于一体、易于构成空分/波分复用监测阵列等独特优点,已成为航空结构多参量实时监测与安全评估的理想选择。本文简要梳理了适用于航空服役环境的常见光纤传感器类型、光纤监测网络优化配置与自修复方法,综合评述了机载环境多参量监测、多物理场反演及典型结构损伤辨识方法所对应的背景需求与发展现状。在此基础上,总结了光纤结构健康监测技术在航空领域所面临的若干问题与展望。

关键词: 航空结构;光纤传感;结构健康监测;多物理场反演;损伤辨识

中图分类号: V219

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010101



曾捷

副教授,研究方向为光纤结构健康监测。

飞行器对于保障国家安全和促进国民经济发展具有特别重要的意义,研制具备高可靠性、高机动性、高维护性、多功能化和长航时特点的新一代智能化飞行器已成为保卫国家安全与和平利用空天环境的一个战略性制高点^[1-2]。

由于飞机常处于复杂恶劣环境服役,机身、机翼、起落架等关键承力部件会不断受到气动载荷、冲击载荷、热载荷等多种热力耦合因素作用,使其力学性能下降,甚至产生结构变形和损伤^[3-4]。2019年,土耳其航空公司一架波音737客机在乌

克兰敖德萨机场着陆过程中因前起落架出现断裂而导致机头触地,使机身腹部和左引擎造成严重损害^[5]。因此,发展高效飞行器结构健康监测技术对于提升飞行品质、确保飞行器安全及降低运维成本具有重要意义。

应变、温度及振动等物理量响应与分布信息作为表征飞行器结构承载与服役状况的重要参数,能够为实现结构健康监测、安全评估以及寿命预测提供数据支撑^[6]。常规监测手段如应变片、热电偶等电学量传感器需要配置大量信号传输线

收稿日期: 2025-06-17; 退修日期: 2025-08-11; 录用日期: 2025-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(52275536); 国家重点研发计划(2024YFF0508400); 体系与人工智能实验室开创基金(HLJGGG20240327517-6)

缆,不仅导致监测系统复杂,还易受电磁干扰,且不适于组建分布式监测网络。若密集布局,将会占据较大机体空间,甚至会因自重而改变被测结构的动力学响应特征。相比之下,光纤传感器具有抗电磁干扰、芯径细、质量轻、柔韧性好、集信号传感与传输一体等优点,便于构建适于机载环境的分布式智能监测网络等独特优点^[7],受到国内外学者的广泛关注与研究应用。

基于光纤传感器的飞行器结构健康监测技术是通过集成在飞行器表面或嵌入机体内部的光纤感知阵列,实时获取复杂服役环境下结构应变、温度及振动等响应信号。更进一步,结合数字孪生与人工智能技术,能够为飞行器结构可靠性评估与精细化健康管理提供有益帮助。

本文主要围绕航空领域光纤结构健康监测所涉及的关键核心技术,分别梳理了适合于机载环境的典型光纤传感器类型、光纤监测网络优化与自修复方法、主承力结构多参量辨识与多物理场反演方法、典型损伤监测方法,以及所面临的若干挑战与发展趋势。

1 面向航空结构健康监测的典型光纤传感器类型

目前,适用于航空结构健康监测领域的光纤传感器大致分为点式、准分布式及全分布式3类感知模式,它们均便于与机体部件集成,甚至嵌入复合材料内部,用于感知表征飞行器服役状态与结构健康状态的相关物理参量。

1.1 光纤法布里-珀罗腔传感器

光纤法布里-珀罗腔(Fabry-Pérot)干涉型传感器属于点式感知模式,当宽谱光注入光纤FP腔时会发生相互干涉,形成特定干涉光谱。当外界物理量(如温度、压力、应变、

声波等)作用于FP腔时,会引起腔长或腔内折射率的变化,进而引起干涉光谱移动。通过精确解调这些光谱变化,可以辨识出待测物理量微小变化,实现高精度测量,如图1所示^[8]。

Li等^[9]研制出一种基于高速相位解调的光纤法布里-珀罗腔振动与声压传感系统,可用于大型结构振动监测;该系统可实现20 Hz~8 kHz范围信号的高灵敏度振动检测,声压响应灵敏度达757.3 nm/Pa。Kienitz等^[10]研制出一种面向严苛环境飞行测试的无源光纤法布里-珀罗压力传感器,在0~30 kPa量程内,压力测量标准差为283 Pa,相对误差为1.8%。

该传感模式能够实现面向航空结构的微小应变、振动、声波及气压等参量高灵敏度测量,可与其他类型光纤传感器协同分工,构建多维度、宽频带监测体系。

1.2 光纤Bragg光栅传感器

光纤Bragg光栅传感器(Fiber

Bragg grating, FBG)作为一种波长调制型传感元件,主要组成部分包括纤芯、包层和涂覆层等^[11],如图2所示,当FBG传感器监测到外界温度或者应变变化时,光栅纤芯折射率 n_{eff} 和光栅折射率周期 Λ 将会发生变化,进而引起反射光谱中心波长改变。通过结合波分/空分复用技术,还可以灵活构建具有自诊断/自修复功能的准分布式传感网络。

光纤光栅传感器需要配套解调仪实现测量功能,典型厂商如美国LUNA公司生产的HYPERION SI255光纤光栅解调仪具有16个传输通道,采样频率可达5 kHz,如表1所示。英国SmartFibres公司生产的SmartScan Aero Mini光纤光栅解调仪具有4个传输通道,最高采样频率可达25 kHz。北京长城计量测试技术研究所研制的FI220M型光纤光栅解调仪具有4个传输通道,采样频率达250 Hz,采用军工级航空插头无风扇设计,抗振、防尘,适用于恶劣航空服役环境。航空工业成都凯天电子

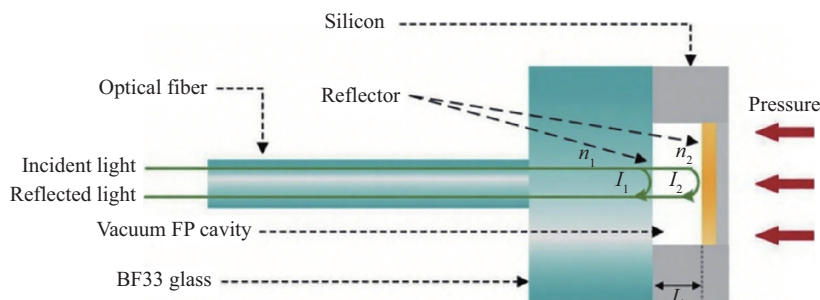


图1 光纤法布里-珀罗腔传感器结构与基本原理^[8]

Fig.1 Structure and fundamental principles of fiber-optic Fabry-Pérot cavity sensors^[8]

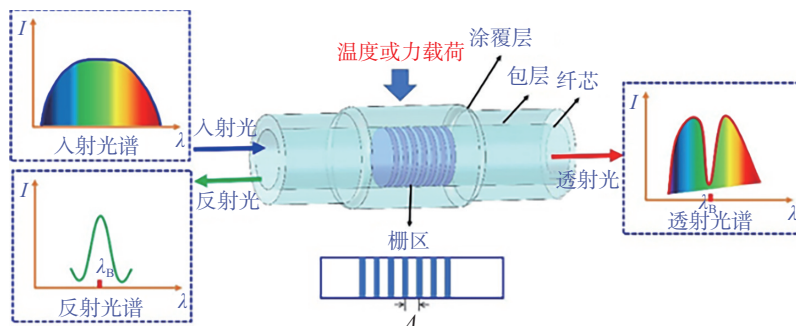


图2 光纤Bragg光栅传感器结构与基本原理^[11]

Fig.2 Structure and fundamental principles of fiber Bragg grating (FBG) sensors^[11]

股份有限公司研制出面向机载工况的32个通道光纤光栅解调仪,采样频率为100 Hz,采用全固态光电器件,耐振动冲击为20g,所有元器件通过军用二筛流程,满足-55~75 °C宽温工作范围。

1.3 光频域反射型分布式光纤传感器

光频域反射型分布式光纤传感器 (Optical frequency domain reflectometry distributed fiber-optic sensor) 基于背向瑞利散射原理 (Backward-rayleigh scattering, BRS)^[12], 解调系统如图3所示。该传感模式具有高空间分辨率(可达毫米级别)分布式测量特点,但其测量距离通常小于百米量级,比较适合于面向航空主承力结构尺度级别的热、力学参量高密度信息获取^[13]。

相关典型厂商,如美国LUNA公司生产的ODiSI-7100动态分布式光纤解调系统,空间分辨率可达0.65

mm。在国内,如武汉昊衡科技有限公司研制的OSI-D动态分布式光纤解调系统,其传感长度最高可达100 m,空间分辨率为0.64 mm。

1.4 布里渊散射型分布式光纤传感器

布里渊散射型分布式光纤传感器利用光纤中声光相互作用来实现对温度和应变的分布式测量^[13],可分为基于自发布里渊散射(SpBS)的布里渊光时域反射仪(BOTDR)和基于受激布里渊散射(SBS)的布里渊光时域分析(BOTDA)两类^[14]。

BOTDR具有单端接入特性,即使发生断纤,依然能够正常工作,但测量精度随距离快速下降。如南京法艾博光电科技研制的Ada-3000系列分布式光纤应变/温度检测仪测量距离为1~50 km,空间分辨率为1~50 m,精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}/20\text{ }\mu\text{e}$;日本Neubrex公司研制的NBX-6050A分布式光纤应变/温度监测系统测量距

离达25 km,空间分辨率为1 m,精度为 $\pm 0.35\text{ }^{\circ}\text{C}/7.5\text{ }\mu\text{e}$ 。

BOTDA需要双端接入,形成环路。若发生断纤,传感光纤即失效,但其空间分辨率较BOTDR更高。如鞍山睿科光电研制的RP2000系列分布式布里渊光纤温度/应变分析仪最大测量距离为130 km,空间分辨率为15 m,精度为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ }\mu\text{e}$ 。瑞士Omnisens公司研制的Vision Dynamic动态分布式光纤解调仪测量距离为10 km,空间分辨率为0.5~20 m,精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ }\mu\text{e}$ 。

该传感模式具有长距离、应变/温度双参数同步监测的优势,虽然采样频率相对较低,但能够与其他类型光纤传感器互补,构建“点—线—面”一体化、高低频协同监测网络,有助于满足航空航天领域大尺寸复杂空间结构健康监测需求。

2 光纤监测网络优化配置与自修复方法

2.1 光纤传感网络优化配置方法

传感器优化配置是指将一定数量的传感器布置在结构合适位置,包括传感器数量优化和位置优化两个方面。在满足辨识精度条件下,能够为提升监测效率和简化系统复杂程度提供重要帮助。

Cazzulani等^[15]在模态测试中利用遗传算法对光学后向散射反射计(OBR)传感器位置进行优化,提升了所测得各阶模态精度。Ameduri等^[16]提出基于检测概率函数(POD)与遗传算法相融合的传感器布局方法,获得光纤传感器最佳配置,成功识别出损伤位置,如图4所示。

Huang等^[17]提出一种基于改进人工鱼群算法(MAFSA)的光纤光栅传感器网络优化布局方法,该方法相较于标准人工鱼群算法、粒子群算法和遗传算法,在传感器数量一定情况下,覆盖率得到提升。Li等^[18]

表1 典型厂商生产的光纤光栅解调仪性能参数

Table 1 Performance parameters of fiber Bragg grating (FBG) interrogators from typical manufacturers

解调仪型号	生产公司	波长分辨率/ pm	传感通道数/ 个	最大采样频率/kHz
HYPERION SI255	LUNA	1	16	5
UltraSense™ UHS1.3M	Opterro	0.1	8	1300
FS22DI	HBK	1	8	1
FI220M	北京长城计量测试 技术研究所	1	4	0.25

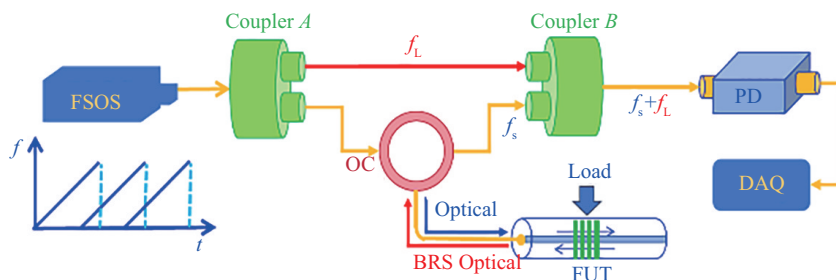
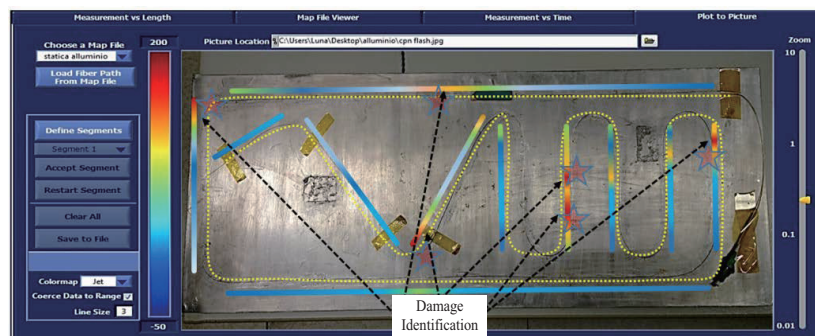


图3 光频域反射型分布式光纤解调系统^[12]

Fig.3 Optical frequency domain reflectometry (OFDR)-based distributed fiber optic demodulation system^[12]

图4 基于光纤传感网络优化布局的损伤检测^[16]Fig.4 Damage detection based on optimal fiber-optic sensor network layout^[16]

提出一种改进自适应多目标粒子群算法(IAMOPSO),用于逆有限元法中光纤传感器位置优化;相较于普通多目标粒子群算法,IAMOPSO算法对应的逆有限元法变形重建均方根误差减少0.008 mm,鲁棒指数提升0.2。

2.2 光纤监测网络自修复/自重组方法

若某一光纤传感网络节点或传输光纤性能失效,将会导致该串联支路断点之后的传感器全部无法正常工作,特别是对于嵌入型光纤传感器损坏将几乎不可修复,这将势必影响结构健康评估效果,甚至产生误报警和漏报警。因此,研究光纤航空结构健康监测自修复/自重组方法,对于提升结构健康监测系统可靠性具有重要意义。

Izquierdo等^[19]提出一种引入保护开关的光纤复用总线网络,使用光纤布拉格光栅在波长域中唯一性识别故障位置,无需使用外部资源即可发出故障信号并指示开关切换实现网络修复。Schluter等^[20]提出一种通过“专用线路”或“专用路径”保护机制,实现基于光纤光栅波长复用的光纤总线网络自愈方法;专用线路”保护通用性较强,能够在多数故障组合下实现传感器完全恢复。

Hayle等^[21]提出了一种基于波分复用的高可靠性自修复光纤布拉格光栅传感器网络,通过光开关重新配

置网络局部失效模式下的网络构型,提升了传感器网络在发生故障时的自修复能力。Peng等^[22]研究了远程节点和各种传感器子网中的交换机架构,提出基于正方形和五边形传感器单元的传感器子网,展示了在多个链路故障情况下,该传感网络的可靠性和可扩展性。

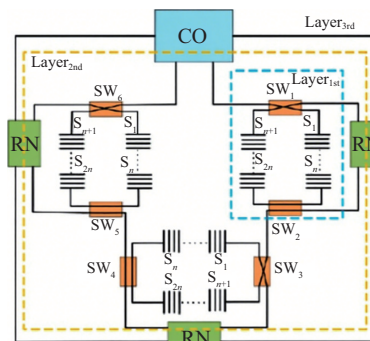
Hu等^[23]提出一种用于增强光纤光栅传感网络可重构能力的层环网架构,第一层由3个环形子网构成,每个子网包含相邻布置的FBG传感器和连接传感器的2×2光开关;第二层通过各子网的光开关将3个传感器环网连接至远程节点,该节点不仅能实现网络层间的信号传输,还能在发生多重链路故障时为网络提供备用路径;第三层由CO与远程节点互联构成,CO负责提供光源并解析传感器网络的传感信号,所有光开关均采用时分复用信号进行控制。该架构可在3条光纤链路故障时实现自愈,还可以使用多分类支持向量机算法辨识FBG传感器故障,如图5所示^[23]。

3 多物理参量辨识方法

3.1 载荷辨识方法

实时监测鸟撞、弹击及冰雹碰撞等外部低速冲击因素,准确辨识飞行器承力结构在不同任务剖面所受动静载荷特征,对于快速评估结构承载与损伤状态具有重要意义。

在冲击载荷位置识别领域,Sai

图5 三层环状FBG自愈网络架构^[23]Fig.5 Three-layer ring-based FBG self-healing network architecture^[23]

等^[24]提出一种基于FBG传感器的复合材料结构冲击定位方法,该方法不依赖于波速,通过Morlet小波变换提取冲击信号的时间差,在400 mm×400 mm监控区域内平均定位误差为8.67 mm。Chen等^[25]对表面附着FBG传感器的CFRP层压板施加外部振动激励,通过辨识FBG测试信号时域和频域变化特征,实现CFRP复合材料受激位置判别。王文娟等^[26]将光纤光栅传感器内埋于航空飞机典型复合材料加筋板结构,通过互相关函数算法成功实现了小尺寸加筋板结构冲击定位判别。Jang等^[27]基于多路复用FBG传感器测量信号,提出通过计算目标信号与参考信号之间均方根来评价信号相似性,进而识别复合材料翼箱结构低速冲击定位,如图6所示。

也有研究学者尝试通过将先进信号处理方法与人工智能技术相结合,用以实现高速冲击判位。Ding等^[28]利用FBG传感器获取CFRP层合板冲击应变响应数据,提出引入Grey Wolf算法解决BP神经网络易陷入局部极小值且收敛速度慢的问题,在450 mm×450 mm层合板上实现平均定位误差13.05 mm。Rickman等^[29]通过预先构建冲击-应变响应分布数据库,结合FBG阵列采集冲击波和残余应变,实现模拟微流星体和轨道碎片的冲击判位,在380 mm×380 mm铝合金板实现最小

定位误差 1 mm,如图 7 所示。

在冲击载荷历程和能量识别领域,常采用加速度计监测数据来重建冲击载荷特征。虽然能够提供有效信息,但其质量和安装方式可能会对结构动态响应特性产生干扰。相较之下,光纤传感器因其轻质、柔韧性好以及便于分布式组网等优点,成为一种理想替代方案。蔡芳盛等^[30]针对目前冲击载荷识别中存在的传感器质量不可忽略和识别结果带有负分量问题,提出基于非负贝叶斯正则化和光纤应变感知的复合材料结构冲击载荷识别方法,该方法可以有效克服传统 Tikhonov 正则化不足,重建的冲击载荷时间历程与实际历程吻合度较好。徐忠宣等^[31]提出了一种基于 FBG 传感器和小波包能量的复合材料冲击能量高效分类方法,能量分类准确率达到 88.9%。李昊业等^[32]建立了一种飞秒光纤光栅应变传感及边沿滤波解调模型,利用时域包络提取法分析能量传递特性,实现针对航空航天器微小碰撞产生的冲击能量辨识。

在机载环境载荷辨识领域,鲁明宇等^[33]提出了一种基于光纤光栅传感器的作动器连杆应变-载荷校准方法,建立了连杆结构在拉、压载荷工况下的应变-载荷关系模型,该方法能够满足民用飞机典型作动器连杆结构应变监测及载荷反演需求。黄

勇^[34]建立了基于光纤传感的某型号襟翼运动机构操纵载荷测量系统及测量系统校准方法,完成襟翼作动器操纵载荷和翼面总载荷的直接验证与确认,为襟翼操纵载荷验证提供了一种有效的高精度、低成本试飞测试方法。

3.2 嵌入光纤传感器的复合材料固化成型参数辨识方法

复合材料因其高强度比和各向异性特性,在航空航天领域得到广泛应用^[35]。但是如果固化成型工艺设计不合理,可能会引入若干缺陷,导致结构力学性能下降^[36]。因此,监测复合材料固化成型过程多物理量响应,对于固化工艺参数改进、固化成型缺陷在线控制及实时优化调节均具有重要意义。

Blöbl 等^[37]开展了光纤传感器在树脂传递模塑(RTM)固化过程中的监测应用,针对 3 种不同光纤传感器嵌入位置(增强结构、纯树脂区域及可控树脂区域),获取了等温固化条件下应变响应与树脂固化状态的关联特征,如图 8 所示。

Tamagawa 等^[38]开展了针对 L 形复合材料固化过程的嵌入式光纤原位变形监测,得到铺层过程中不同压缩力对复合材料变形机制的影响;该方法揭示了固化过程中不对称的预浸料形状最终将转变为对称的“自平衡”机理,如图 9 所示。

Rufai 等^[39]将分布式光纤传感器嵌入玻璃纤维织物层之间,分别实现树脂灌注和固化过程中原位应变实时测量。Arhant 等^[40]将光纤传感器嵌入热塑性复合材料(碳纤维-聚酰胺 6),得到复合材料试样沿 0°、45°和 90°方向应变响应特征,揭示了压缩模塑过程中内部应变演变及吸水后的松弛行为。王伟伦等^[41]采用内埋光纤布拉格光栅传感器监测固化成型过程中 L 形复合材料层合板弧形区域内部温度、应变演化及分布特征,给出了厚度和铺层角度对其热残余应变和回弹角的影响。

王琦等^[42]提出在三维机织复合材料中预埋光纤光栅传感器,实现多尺度模型热-化-力学耦合作用下树脂传递模塑成型过程中的温度和应变分布监测。雷伟华等^[43]将光纤传感器以 0°方向植入环氧树脂基体,研究了复合材料固化过程中热-化-力耦合对 FBG-环氧树脂基体界面应变传递机制的影响特性。Zhang 等^[44]将光纤传感器以 0°和 90°方向植入复合材料层压板,研究了振动能量对碳纤维树脂基复合材料层压板固化过程纤维含量、微观形貌和力学性能的影响特性。

北京航空材料研究院周玉敬等^[45]将光纤传感器植入纤维增强树脂基复合材料 T 型加筋板三角填充区,实现了固化过程残余应力变化在

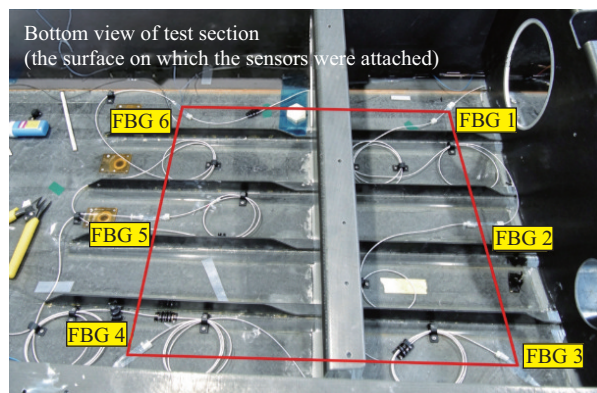


图 6 基于参考数据库方法的复合材料翼箱冲击定位^[27]

Fig.6 Impact localization on composite aircraft wing boxes using a reference database approach^[27]

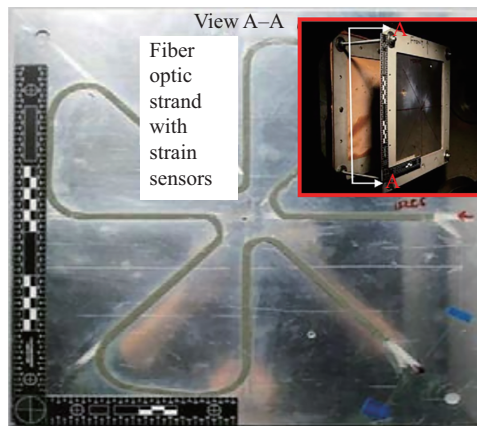


图 7 超高速冲击位置试验系统^[29]

Fig.7 Ultra-high velocity impact location test system^[29]

线监测和静态压缩过程复合材料加筋壁板应变响应辨识。武湛君等^[46]开发了一种新型的低成本、高灵敏度、易操作的光纤微弯压力传感器,用于纤维增强树脂基复合材料固化过程在线监测。

3.3 航空承力部件动力学参数辨识方法

基于光纤传感器实现针对航空部件振型、固有频率、阻尼等模态参数在线辨识,能够为结构优化设计和振动抑制提供重要帮助。

Weber等^[47]采用FBG与直接光纤形状传感(DFOSS)两种方式,对直升机主旋翼桨叶工作模态和频率进行测量,能够在0~100 Hz范围内识别桨叶前7阶固有频率,如图10所示。Zhang等^[48]提出了一种基于FBG传感器的飞行过程直升机桨叶动态应变实时测量方法,得到表征桨叶振动特性的前6阶谐波频率,如图11所示。

Chen等^[49]采用FBG传感器测量碳纤维复合材料天线在典型振动环境下的动态响应,实现天线梁振型辨识。朱超杰等^[50]提出了一种基于光纤光栅传感器的等截面悬臂梁应变模态分析方法,识别出悬臂梁前5阶固有频率、阻尼比与振型。徐彦伟等^[51]将FBG传感器布置在通过M6螺栓与L型筋条连接的铝合金加筋板表面,在不同螺栓松动工况下,提取各测点的应变响应幅值,得到螺栓连接处的第一阶应变模态。

4 多物理场反演方法

4.1 主承力结构应变场反演方法

及时、准确、全局获取航空结构动/静态应变响应与分布特征,能够为航空结构健康监测、疲劳寿命预测以及实现结构数字孪生提供实时数据支撑^[52]。

常规插值拟合方法的应变分布反演过程相对简单,适用于一维方向信息重构。徐定强等^[53]开展了基于

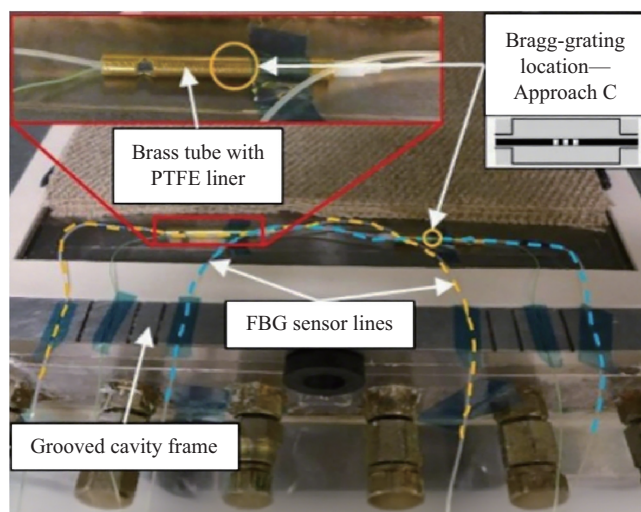


图8 树脂传递模塑中光纤传感器安装示意图^[37]

Fig.8 Schematic diagram of optical fiber sensor installation in resin transfer molding (RTM)^[37]

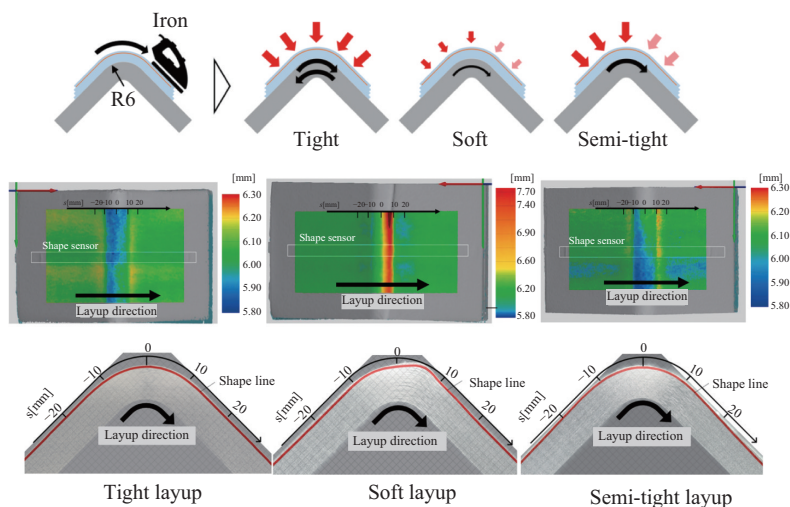


图9 不同压缩力对复合材料角部变形的影响^[38]

Fig.9 Effect of compressive loads on corner deformation in composite materials^[38]

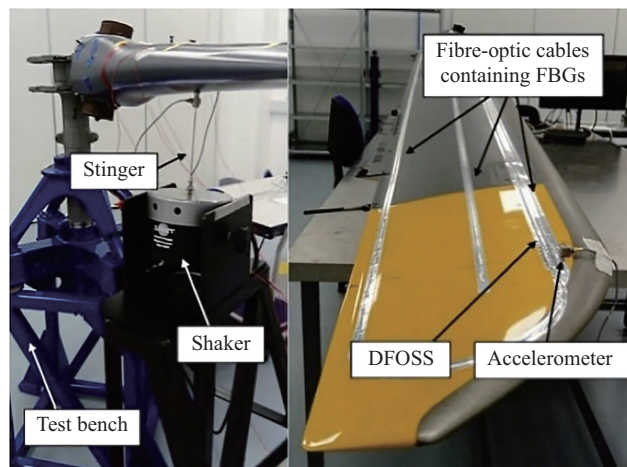


图10 直升机桨叶工作模态分析试验平台^[47]

Fig.10 Experimental platform for operational modal analysis of helicopter rotor blades^[47]

光纤光栅传感器的直升机关键承力部件应变监测试验,提出基于三次样条函数插值的承力部件应变场反演方法。Lee等^[54]研究了基于模态叠加原理的桁架结构应变场反演方法,该方法需要预先获取加载或材料属性精确信息,即通过大量试验或有限元建模分析得到目标结构应变振型和位移振型矩阵。Li等^[55]提出了一种基于载荷-应变线性叠加算法的梁式结构应变场反演方法,采用光纤光栅传感器,实现不同工况下梁式结构离散应变监测与应变分布反演,如图12所示。

NASA 兰利中心 Tessler^[56]提出了一种基于变分原理的逆向有限元法,通过采用不同误差泛函来逼近有限元模型,实现应变场重构。该方法不受结构材料、外部载荷的影响,但需预先选择合适的形函数,才能准确描述结构应变。Zhu等^[57]提出基于应变函数-四节点壳单元逆有限元法的加筋壁板应变场反演方法,突破了常规逆有限元法对于结构需要内、外两侧对称布置传感器的局限性。

大连理工大学与西安飞机强度设计研究所共同开发了基于分布式

光纤传感器的结构状态实时感知系统^[58],并利用该系统实现受载状态下复合材料翼梢小翼的应变场实时感知。

北京长城计量测试技术研究所与主机单位、综合试验单位和相关专业所联合研究团队开展了光纤光栅传感器在多个飞机型号的应用研究^[59],如某型机全机疲劳试验的应变监测、某型机复合材料应用验证、某型无人机液压导管脉动应力测量、飞机PHM 光纤光栅应变载荷监测技术攻关等项目,获得了比较丰富的工程应用经验,目前正在积极探索发动机领域的研究。

赵欣等^[60]针对典型飞机蒙皮复合材料结构,提出了一种基于深度神经网络的应变场重构方法,采用多层算法对神经网络架构及参数加以优化,使得应变分布重建精度提升至90%以上。Go等^[61]开展了基于物理信息神经网络的含孔壁板应变场反演方法研究,该方法在数据稀疏或存在噪声情况下,也能保证物理解的一致性,如图13所示。

4.2 机翼结构形态重构方法

实现机翼形态实时自感知功能,不仅能够为飞行器保持最佳气动外形,实现“按需变形”提供帮助,还可以为精确制导武器挂架提供稳定发射基准,同时解决机载共形天线相位动态补偿问题。

典型结构形态重构方法包括曲率递推法、KO位移法、模态叠加法及逆有限元法等,如表2所示。

陈宜炆^[62]结合弹性力学理论与有限元分析方法,建立了薄壁结构件应变与变形之间的映射关系,实现应变到薄壁结构件连续曲率信息的数学转化,并将其扩展为二维曲率递推算法,从而重构出薄壁结构件变形状态。刘天阔^[63]提出了一种基于曲率递推算法的动态变形监测技术,推导出光纤光栅中心波长漂移量和翼面曲率之间的理论关系,实现了扑翼机



图11 安装于旋翼上的FBG动态应变测量系统^[48]

Fig.11 FBG-based dynamic strain measurement system mounted on rotor blades^[48]

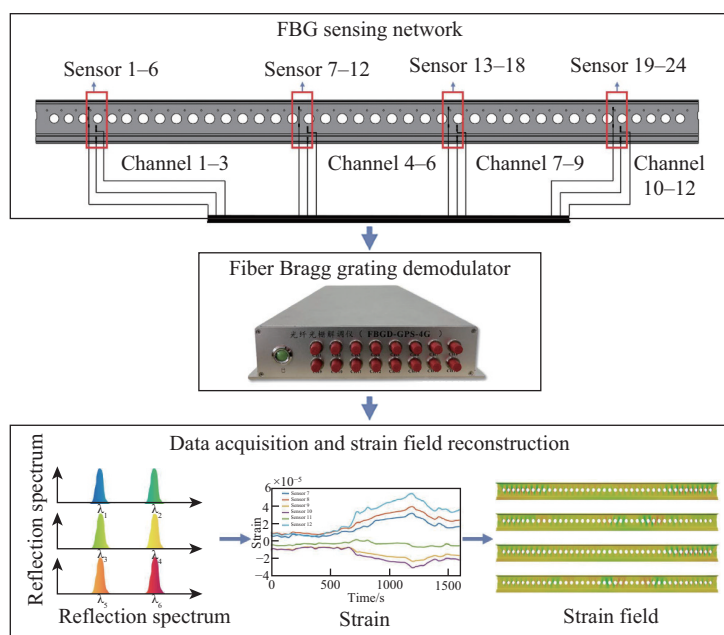


图12 基于光纤传感器的梁式应变场反演^[55]

Fig.12 Fiber-optic sensor-based beam strain field inversion^[55]

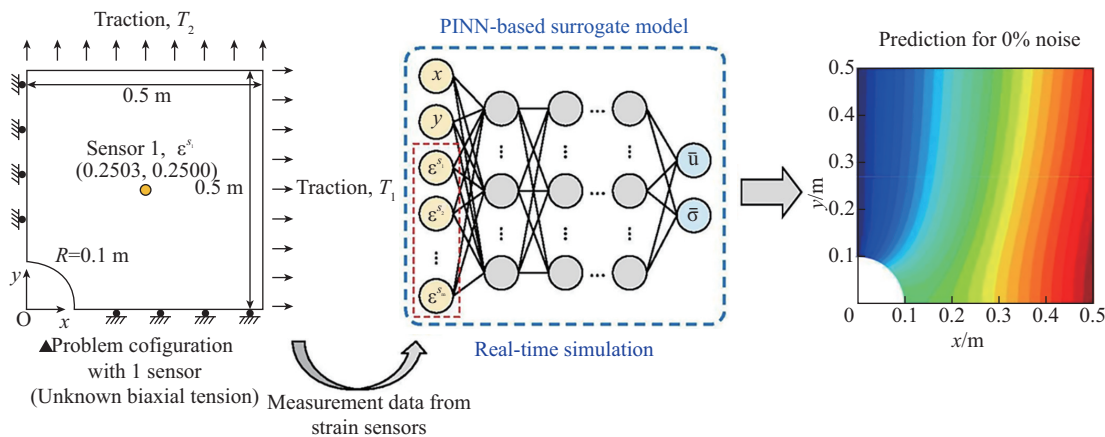


图 13 基于物理信息神经网络的壁板应变场反演^[61]

Fig.13 Physics-informed neural network-based strain field inversion for panel structures^[61]

表 2 典型结构形态重构方法

Table 2 Reconstruction methods for typical structural morphologies

方法	特征	优势	缺点
曲率递推法	基于曲率信息,重构结构形状	只需获取曲率即可重构变形,无需结构材料属性	需要传感器数量较多
KO 位移法	根据经典梁理论推导,计算沿长度方向挠度分布	计算过程简便、快速,适用于细长状结构	由于使用梁理论,对于被测结构有一定简化和假设
模态叠加法	根据结构模态信息,推导应变-位移转换关系	依据少量离散应变,可计算任意点位移,简便快速	依赖于模态信息的准确度
逆有限元法	利用有限元差分思想,计算单元节点位移向量	无需预先获取结构材料属性与载荷分布等先验知识	重构过程复杂且所需传感器数量较多

器人动态变形监测。Zeng 等^[64]提出一种基于应变-弧面曲率关系模型的变弯度机翼前缘形态重构方法,避免了弧面角度对于感知测点曲率计算精度的影响。Lally 等^[65]研究了一种基于光频域反射原理(OFDR)的螺旋多芯光纤,结合曲率递推法,采用 U 型和波浪型两种光纤路由方式,重构出柔性薄板结构变形,如图 14 所示。

Xing 等^[66]基于 KO 位移理论,推导出机翼内部支撑梁结构应变-变形函数方程。胡明月等^[67]结合改进 KO 位移理论的重构算法,实现高速飞行器典型热防护结构全场位移重构。Derkevorkian 等^[68]基于 KO 位移理论将光纤布置于翼梁并监测其多点应变,用以估算位移场,如图 15 所示。

杨勇^[69]提出基于灵敏度分析的改进模态转换矩阵计算方法,解决了

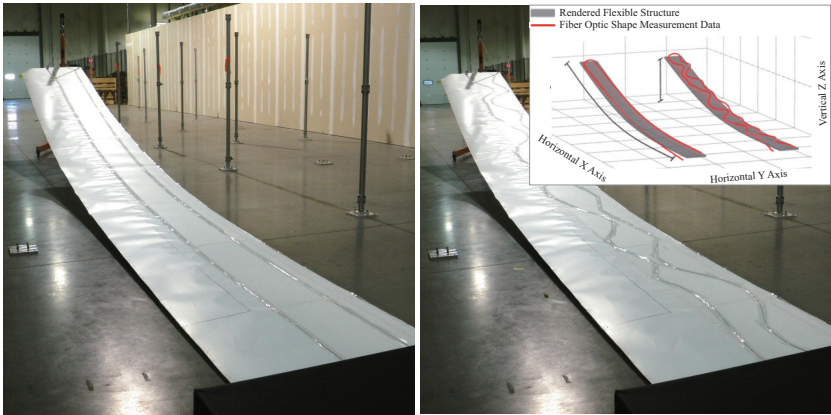


图 14 柔性薄板结构变形光纤监测^[65]

Fig.14 Fiber-optic monitoring for deformation in the flexible thin-plate structure^[65]

实际位移模态坐标与应变模态坐标难以一致的问题,实现基于实测振型的壁板变形重构,如图 16 所示。Li 等^[70]提出基于全局位移坐标的模态叠加方法,提高了位移模态矩阵计算精度,并建立了机翼壁板形态重构模型。

赵飞飞^[71]基于本构关系确定了中性轴应变函数和位移函数的阶次,提出了一种基于逆有限元法的机翼变形重构方案,实现共形天线结构变形实时重构。Kefal 等^[72]结合逆有限元法和平滑单元分析方法,提出一种新型四节点板壳单元(iRZT4),实现

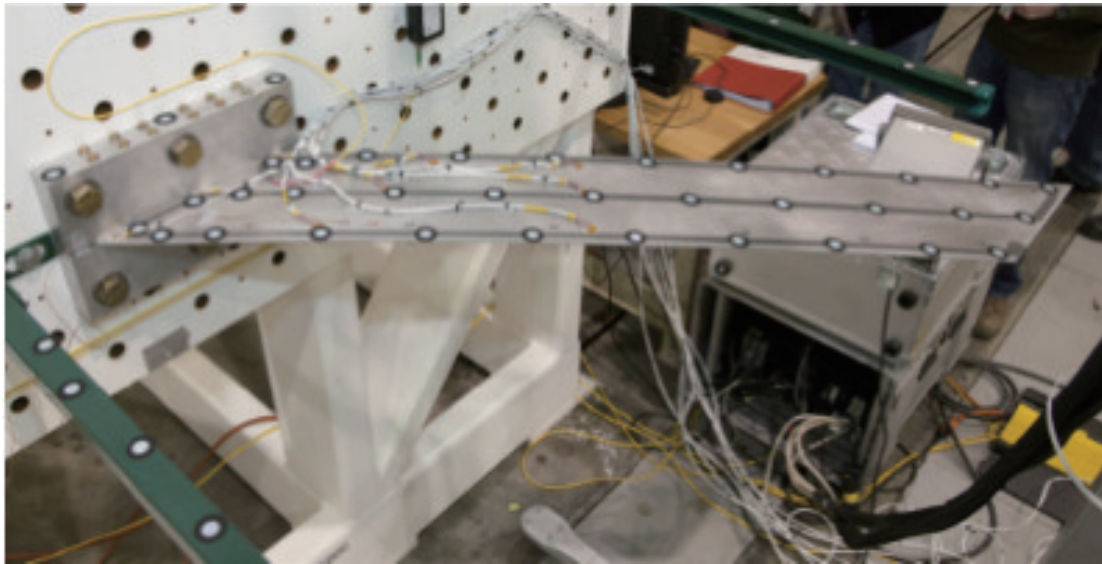


图15 集成三列光纤应变传感器的后掠测试板^[68]

Fig.15 Swept-plate with three lines of fiber optic strain sensors on the top surface^[68]

机翼壁板位移场实时重构,如图17所示。

4.3 管道类结构形态重构方法

实现飞机液压系统、环控系统附属各类管道结构受振动或冲击载荷作用后产生的变形重构,对于评估其服役和健康状态具有重要意义。典型管道类结构形态重构方法包括Frenet框架法、坐标转换理论、Bishop框架法及人工智能方法等,如表3所示。

Al-Ahmad等^[73]利用三芯光纤构成曲率传感器阵列,基于Frenet框架法实现对附着在管状结构表面的三芯光纤形态还原,得到较好精度和稳定性。Uchida等^[74]沿管道表面以螺旋图案制作平行间距为360 mm的4个凹槽,并将单模光纤嵌入凹槽;采用Frenet框架法根据曲率和弯曲角度,实现管道三维形状重建。尚秋峰等^[75]提出FBG铺设角度偏差和标定误差自校正方法,并将优化结果代入曲率和弯曲方向误差修正模型,实现管道形状重构精度提升,如图18所示。

Li等^[76]提出了一种基于相位解调扭曲补偿的高精度光纤动态形状传感方法,通过结合外部扭曲补偿和

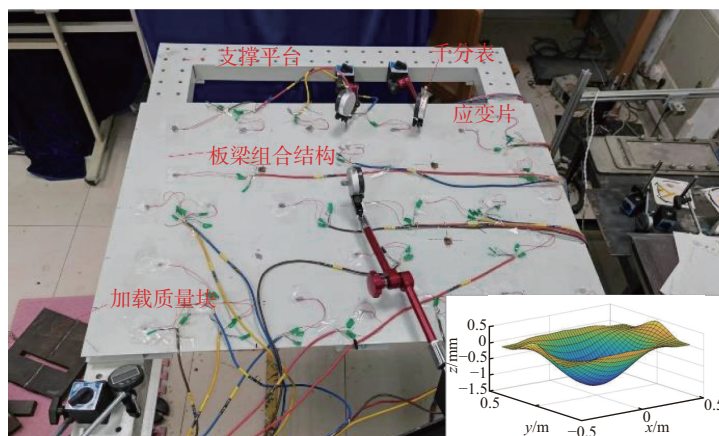


图16 天线壁板形态重构^[69]

Fig.16 Antenna panel shape reconstruction^[69]

固有自旋率校准方法,成功消除它们对光纤形状重建结果的干扰,提升了形状重建速度与精度。He等^[77]提出基于坐标转换理论的光纤形态重构方法,通过引入应变灵敏度矩阵及温度补偿矩阵,实现了变温环境下的形状重建精度提升。

测量点曲率为零时,曲线法平面将产生不确定性,进而引起形态重构偏差。为此,Jäckle等^[78]提出采用Bishop框架法求解光纤空间位置,当曲线存在奇异点或曲率为零的点时,特别是在采样点较少情况下,Bishop框架比Frenet框架更加准确和稳定。Khan等^[79]使用Bishop框架法实现对

二次可微曲线的形态重构,该方法对于局部线性或曲率不连续的场合具有更好的适用性。

Zeng等^[80]提出了一种基于ResNet-18物理信息神经网络与嵌入多层感知机频移残差神经网络的空中加油软管形态重构方法,以解决加油软管外层橡胶超弹性导致的传感器感知应变与软管形态特征难以关联映射,以及传统神经网络全连接层对于非线性映射能力不足、高维数据处理效率较低等问题。

4.4 温度场反演方法

飞行器环控和燃油系统在服役过程中由于热传导、对流换热等因素

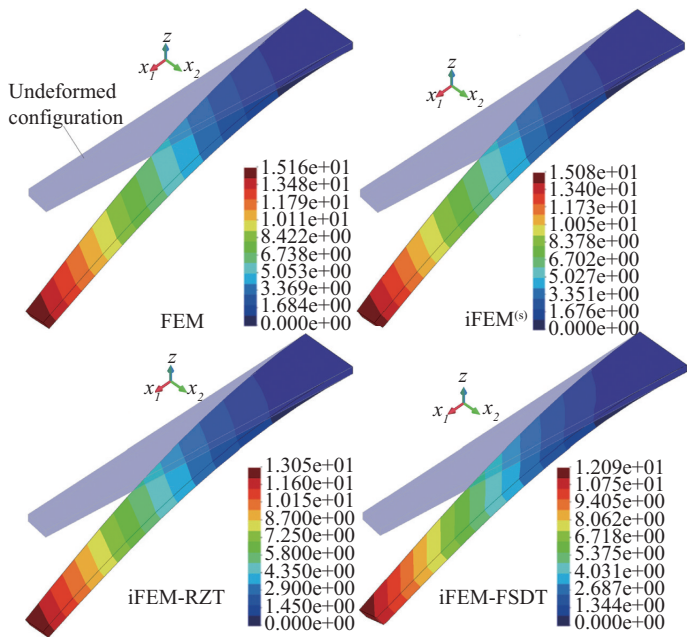


图 17 基于四节点板壳单元的机翼壁板变形重构^[72]

Fig.17 Wing panel deformation reconstruction based on four-node shell elements^[72]

表 3 典型管道类结构形态重构方法

Table 3 Reconstruction methods for typical pipeline-type structures

方法	优势	缺点
Frenet框架法	充分利用每个测点信息,可以减小单个传感器测量误差对形态重构精度影响	微分方程组求解复杂,在测量点曲率为零的情况下会导致曲线法平面不确定
坐标转换理论	避免了Frenet框架法中微分方程组求解和连续化过程复杂问题	依赖于输入数据质量,测量误差会直接影响形态反演准确性,且计算量较大
Bishop框架法	曲线具有零挠率位置, Bishop框架法相较Frenet框架法更稳定,更适于复杂曲线/曲面形态重构	对于初始条件敏感,复杂微分方程组数值求解对应的计算量较大
人工智能方法	无需推导复杂解析模型	需花费时间构建涉及一定规模的应变与结构形态特征的样本库,且适用性受限

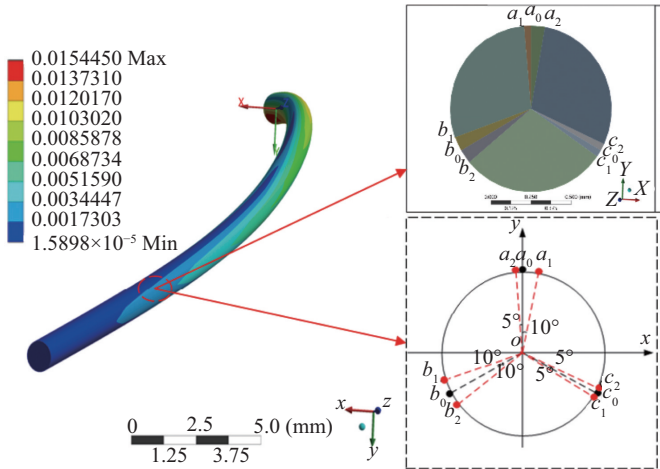


图 18 管道形状传感器验证模型^[75]

Fig.18 Pipeline shape sensor verification model^[75]

作用,易发生热损伤而导致功能失效。因此,需发展基于离散温度感知的温度分布反演方法,为实现飞行器热管理提供技术支撑。洛克希德-马丁公司在X-33可重复使用运载箭机身和低温贮箱表面布置分布式光纤传感器,实现结构表面温度在线监测^[81]。

在温度场反演算法研究方面, Wolf等^[82]提出一种基于前馈神经网络算法的温度场反演方法,平均绝对误差减小至0.086℃。Luo等^[83]提出一种基于FBG传感器和粒子群优化的B样条插值温度场反演方法(PSO-Bspline),该方法相较于三次样条插值、高斯径向基插值、B样条插值方法,均方根误差得到降低。Guo等^[84]提出一种基于光纤布拉格光栅阵列和复合插值函数(RPIM-AGQ6)的温度场反演方法,对应温度反演平均相对误差小于2.6%。Niu等^[85]提出一种基于光纤布拉格光栅阵列和BP神经网络的温度场反演方法,其温度反演精度相较于三次样条插值方法提升23.18%,如图19所示。

5 典型结构损伤监测方法

5.1 螺栓松动监测方法

螺栓连接作为航空结构常用连接形式之一,具有可重复拆卸安装、维护简单等优点^[86]。在高空飞行时,由于自身振动、交变载荷、气流扰动及温度突变等多种干扰因素影响,会使飞机螺栓紧固结构易发生松动,甚至疲劳断裂,从而产生较大安全隐患^[87]。某波音客机由于其右翼的止挡螺栓松脱后击穿油箱,致使燃料泄漏,最终造成引擎剧烈爆炸^[88]。

如何快速有效地识别螺栓群松动状态对于确保飞机结构安全至关重要,目前面向风电机组、地铁列车、大型钢构桥梁等领域的螺栓松动常见监测方法,如超声检测法、压电阻抗法,虽然效果较好,但监

测效率较低,且不适合在复杂狭小机体空间开展面向螺栓阵列松动状态的在线监测。相比之下,准分布式光纤光栅传感器具有柔韧性好、芯径细、便于嵌入式集成等优势,国内外学者已围绕其开展了基于光纤光栅传感器的螺栓松动监测技术研究。

朱云鸿等^[89]利用嵌入螺栓杆中的单个光纤光栅传感器,监测螺栓预加载与实际服役过程的轴向力,如图20(a)所示。Ren等^[90]提出一种嵌入式集成多个FBG传感器的智能剪切型螺栓,通过测量光栅中心波长变化来计算螺栓剪切力和轴向拉力,如图20(b)所示。沈阳飞机设计研究所王健志等^[91]研发了一种能够实时监测自身状态的智能螺栓,如图20(c)所示。

Chen等^[92]提出了一种基于光纤光栅传感器与应变模态振型参数计算的螺栓群松动状态辨识方法,突破了搭接壁板螺栓群松动状态的同步辨识难点,实现针对多螺栓松动工况的高效辨识。徐彦伟^[93]开展了加筋壁板紧固件连接与松脱状态识别方法研究,构建了基于光纤应变响应数据的神经网络数据库,实现螺栓松脱定位。

5.2 复合材料损伤监测方法

复合材料结构在热力耦合环境中长期服役,由于基体与增强纤维的性能差异及界面效应,易发生基体破坏、纤维脱粘或断裂、层间开裂等损伤。因此,开展复合材料损伤监测技术研究对于评估航空结构健康状态具有重要意义。

Ciminello等^[94]提出一种基于应变时域变化率的结构损伤定位算法,实现了基于光纤传感器的复合材料翼梁脱粘损伤位置辨识。He等^[95]提出一种基于振动频率和FBG应变感知的分层损伤识别方法,实现复合材料梁分层损伤位置与尺寸的识别。Li等^[96]提出通过计算两个相邻

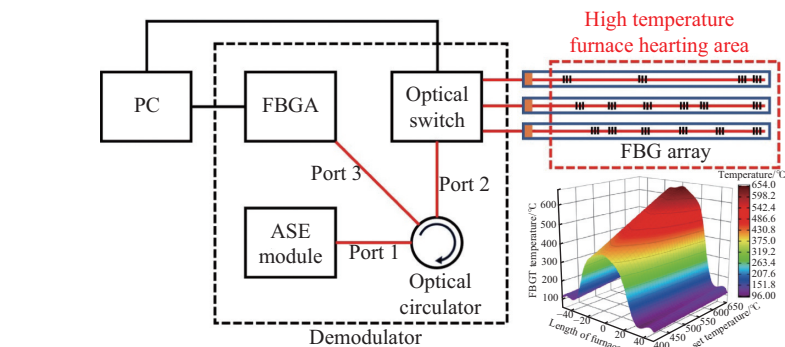


图19 基于光纤布拉格光栅和BP神经网络的温度场反演方法^[85]

Fig.19 Temperature field inversion method based on fiber Bragg grating and BP neural network^[85]

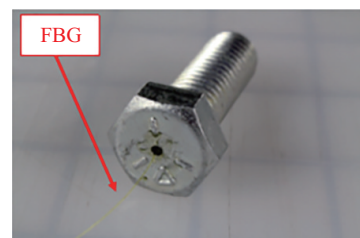
区域的局部自相关系数(Local point autocorrelation, LPA),实现复合材料层合板凹坑损伤事件的定位。

Ganjdoost等^[97]基于光纤应变传感网络,结合逆有限元(iFEM)法反演全域应变场。通过分析材料内部损伤引起的应变突变特征,实现复合材料层合板分层损伤辨识,如图21所示。

路士增等^[98]利用光纤布拉格光栅构建了传感器网络,结合小波分解与重构算法、频谱分析和支持向量多分类机算法研究碳纤维复合材料板损伤的模式识别算法;结果表明,29组损伤模式得到准确识别,正确率为96.7%,为碳纤维复合材料板的损伤模式识别提供了一种可靠的方法。崔建国等^[99]提出采用集合经验模式分解方法对光纤光栅传感网络原始损伤响应信息进行自适应分解,构建了基于奇异熵特征信息和K-ELM的复合材料结构损伤识别模型;该模型较基于BP的损伤识别模型,具有更好的工程应用价值。武湛君等^[100]提出了一种基于U-Net神经网络的智能损伤识别方法,开展了基于分布式光纤传感器的含分层损伤复合材料板的悬臂加载试验,实现分层损伤位置、尺寸与形状的定量识别,如图22所示。

5.3 结构裂纹监测方法

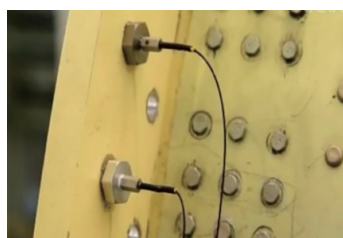
飞机关键部件如机身、机翼、起落架,一旦出现裂纹,将会破坏



(a) 预紧力螺栓传感器^[89]



(b) 剪切型螺栓传感器^[90]



(c) 智能螺栓结构^[91]

图20 嵌入式FBG螺栓传感器

Fig.20 Embedded FBG bolt sensor

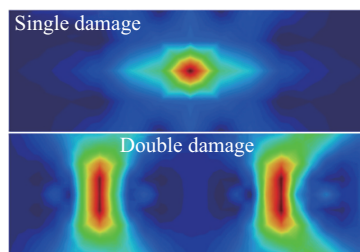


图21 基于iFEM的复合材料层合板分层损伤辨识^[97]

Fig.21 Delamination damage identification in composite laminates using iFEM^[97]

材料连续性、降低强度、引发应力集中。若裂纹没有被及时处理,还会造成裂纹扩展,引发系统连锁故障。

Gupta 等^[101]将 FBG 传感器嵌入铝合金结构沟槽来监测平行与倾斜两种类型裂纹扩展情况,得到不同裂纹扩展过程中 FBG 中心波长偏移量差异。Mieloszyk 等^[102]在 Mi-2 直升机旋翼叶片样件上布置 FBG 传感器,发现裂纹扩展与 FBG 应变响应频率偏移存在对应关系。孙玲玉等^[103]基于光纤光栅传感阵列应变感知信息,发展了一种基于梯度提升回归树 (GBRT) 算法的疲劳裂纹扩展预测方法。

中国航空研究院王文娟等^[104]针对某型飞机油箱内部关键结构的裂纹扩展,开展了光纤光栅裂纹传感器设计及封装、解调系统研发、飞机改装、现场安装与测试、数据处理等研究;结果表明,光纤传感器能够适用于机上环境应变及损伤测试。北京长城计量测试技术研究所于翀等^[105]采用极值插值法提取光纤光栅应变感知数据包络线,结合 BP 神经网络建立包络线与疲劳扩展 $a-N$ 曲线关系,实现针对铝合金板孔边裂纹扩展的在线监测。

王田天等^[106]利用扩展有限元法模拟循环加载下孔边裂纹扩展过程,结合传输矩阵法重构出光纤光栅反射光谱;采用支持向量回归法,构建反演光谱特征与裂纹尺度之间回归模型,实现孔边裂纹辨识。赵炎等^[107]采用平移不变量小波去噪方法,揭示了 FBG 反射光谱畸变机理,给出光谱中心波长、光谱带宽和光谱面积随裂纹扩展的变化规律,实现基于光谱面积曲线拐点辨识的疲劳裂纹在线监测,如图 23 所示。

5.4 结构腐蚀监测方法

航空结构处于酸、碱、盐雾等多种复杂腐蚀环境,易导致其力学性

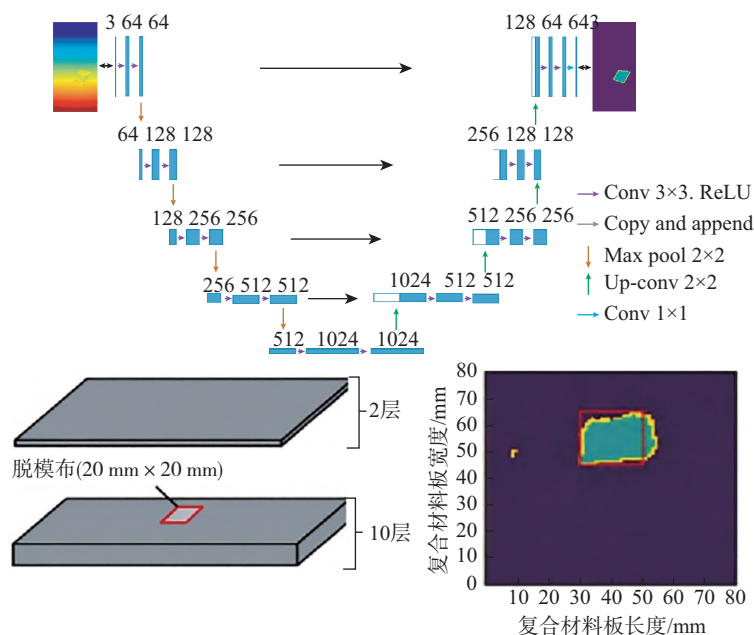


图 22 基于 U-Net 神经网络的复合材料分层损伤辨识^[100]

Fig.22 Delamination damage identification in composites using the U-Net neural network^[100]

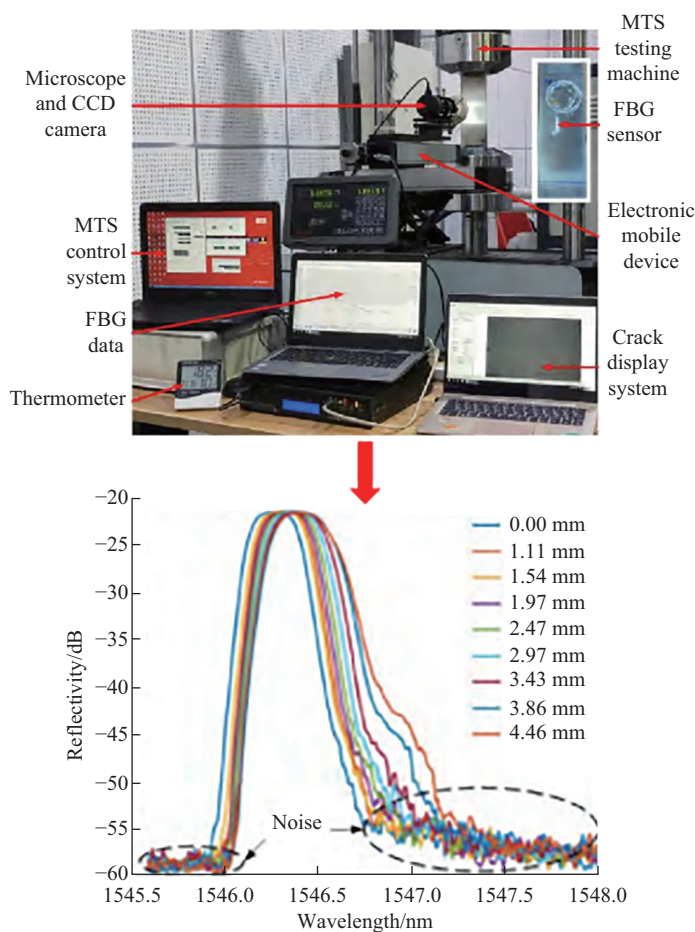


图 23 基于 FBG 传感器的疲劳裂纹监测平台与反射光谱结果^[107]

Fig.23 Fatigue crack monitoring platform based on FBG sensors and reflected spectrum results^[107]

能下降甚至损伤失效。常规目测法、取样法、机械试验法等腐蚀检测手段,存在实时性差、破坏结构等局限性,因此需要发展便于与被测机体结构集成的腐蚀状态在线感知方法。

Sousa 等^[108]提出一种基于 FBG 传感器的 NaCl 盐溶液环境下 1020 碳钢金属壁板腐蚀监测方法,获取了结构固有频率与其损失质量之间的对数关系;通过连续测量金属壁板固有频率变化,实现受蚀程度识别。Xu 等^[109]提出一种基于 FBG 传感器与分布式光纤传感器的钢板腐蚀监测方法,实现对冲击载荷影响下钢板腐蚀程度和速率的监测,如图 24 所示。

6 展望

光纤结构健康监测技术在航空航天等高端装备领域已受到广泛关注并得到深入研究,但随着飞行器任务模式与服役环境的日趋复杂,该技术仍面临诸多挑战。建议后续可以开展如下研究工作:

(1) 从光纤传感器集成角度,建议进一步研究具有良好相容性和抗弯特性的细径光纤传感器制备技术,以最大限度减小光纤植入对其自身感知特性及被测航空主承力构件力学性能的影响。

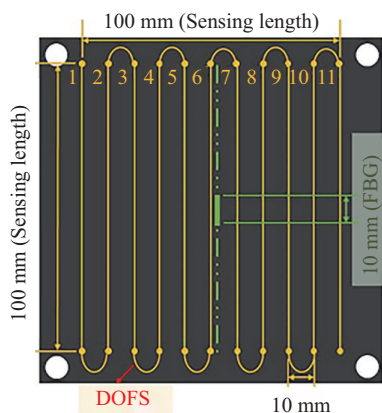


图 24 钢板腐蚀监测传感器布局^[109]

Fig.24 Steel plate corrosion monitoring sensor layout^[109]

(2) 从面向航空领域的光纤传感系统综合性能提升角度,建议发展能够更好平衡采样频率、精度、空间分辨率、量程、测点数量及系统成本等关键性能指标的新型光纤感知技术,以解决常规光纤光栅解调系统因光源带宽引起的测点受限问题,以及光频域反射型分布式光纤传感系统成本较高与采样频率较低问题。

(3) 从极端服役工况飞行器结构状态感知角度,可以发展面向高超声速飞行器热防护部件和航空发动机热端部件的热、力学响应参数高空间分辨率分布式感知与解耦技术,以获取温度与应变高密度连续分布信息,从而提升监测效率。

(4) 从人工智能赋能航空结构健康监测角度,建议发展结合物理模型先验知识的神经网络辨识方法,以解决传统神经网络方法存在的样本库构建效率低、成本高且易过度拟合等难题,以期实现对复杂构型和多载荷耦合工况下的跨尺度多物理场高精度重建与损伤特征精准辨识,为实现航空主承力结构数字孪生提供数据驱动。

(5) 从功能集成与应用拓展角度,在解决上述问题的基础上,可进一步研究柔性光纤智能蒙皮技术,以期借助同一种光纤解调模式,实现对应变、温度、变形、振动、加速度、大气压力等诸多参量的高效、低成本监测,为后续发展基于光纤智能蒙皮的先进飞行器隐身大气数据采集系统与电磁免疫机载共形天线集成感知技术提供关键支撑。

参考文献

- [1] Karuskevich M, Maslak T, Gavrylov I, et al. Structural health monitoring for light aircraft[J]. Procedia Structural Integrity, 2022, 36: 92-99.
- [2] Lin J H. Durability and damage tolerance analysis methods for lightweight

aircraft structures: Review and prospects[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2022, 5(2): 224-250.

[3] Choudhury S, Dugar V, Maeta S, et al. High performance and safe flight of full-scale helicopters from takeoff to landing with an ensemble of planners[J]. Journal of Field Robotics, 2019, 36(8): 1275-1332.

[4] Azhari A, Liang R, Toyserkani E. A novel fibre Bragg grating sensor packaging design for ultra-high temperature sensing in harsh environments[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(7): 075104.

[5] 中国新闻网. 一波音飞机着陆时前起落架支柱损坏 乌克兰机场关闭[EB/OL]. (2019-11-22) <https://www.chinanews.com.cn/gj/2019/11-22/9014449.shtml>.

[6] 于洋, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 基于光纤光栅传感器的飞行器结构健康监测[J]. 信息通信, 2013(2): 27-29.

Yu Yang, Huang Junbin, Gu Hongcan, et al. Health monitoring of aircraft structures based on fiber Bragg grating sensor[J]. Information & Communications, 2013(2): 27-29.

[7] 高伟. 基于正则化的动态载荷识别方法及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

Gao Wei. Research on dynamic load identification method and application based on regularization[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[8] 李文豪, 贾平岗, 王军, 等. 基于硅 MEMS 技术的高灵敏度微型光纤法布里-珀罗压力传感器[J]. 光子学报, 2024, 53(5): 0553110.

Li Wenhao, Jia Pinggang, Wang Jun, et al. High sensitivity micro fiber Fabry Perot pressure sensor based on silicon MEMS technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(5): 0553110.

[9] Li C X, Zhao X Y, Qi H C, et al. Integrated fiber-optic Fabry-Perot vibration/acoustic sensing system based on high-speed phase demodulation[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 169: 110131.

[10] Kienitz S U, Lohr L, Schmid M J, et al. Static and dynamic pressure measurement in flight test application with optical Fabry-Pérot sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.

- [11] Sahota J K, Gupta N, Dhawan D. Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: A comprehensive review[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(6): 1.
- [12] Qu S, Qin Z G, Xu Y P, et al. Distributed sparse signal sensing based on compressive sensing OFDR[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(12): 3288–3291.
- [13] 靳思梦, 杨智生, 王晴, 等. 布里渊分布式光纤传感技术性能评估与优化研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2025, 54(4): 20250097.
- Jin Simeng, Yang Zhisheng, Wang Qing, et al. Research progress on performance evaluation and optimization in Brillouin distributed optical fiber sensing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(4): 20250097.
- [14] 韦若雪, 刘戈, 陆杭林, 等. 光时域布里渊分布式光纤动态应变传感技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(13): 1300009.
- Wei Ruoxue, Liu Ge, Lu Hanglin, et al. Advances of optical time domain Brillouin distributed fiber dynamic strain sensing technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(13): 1300009.
- [15] Cazzulani G, Silva A, Pennacchi P. Optimization of continuous sensor placement for modal analysis: Application to an optical backscatter reflectometry strain sensor[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 150: 107242.
- [16] Ameduri S, Ciminello M, Dimino I, et al. Distributed sensor placement optimization for computer aided structural health monitoring[J]. *Archive of Mechanical Engineering*, 2019: 111–127.
- [17] Huang J W, Zeng J, Bai Y F, et al. Layout optimization of fiber Bragg grating strain sensor network based on modified artificial fish swarm algorithm[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 65: 102583.
- [18] Li X H, Niu S T, Bao H, et al. Improved adaptive multi-objective particle swarm optimization of sensor layout for shape sensing with inverse finite element method[J]. *Sensors*, 2022, 22(14): 5203.
- [19] Izquierdo E L, Urquhart P, Lopez-Amo M. Optical fibre bus protection architecture for the networking of sensors[C]// 2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 1–6.
- [20] Schluter M, Urquhart P. Optical fiber bus protection network to multiplex sensors: Dedicated line and dedicated path operation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(15): 2204–2215.
- [21] Hayle S T, Manie Y C, Dehnav A M, et al. Reliable self-healing FBG sensor network for improvement of multipoint strain sensing[J]. *Optics Communications*, 2021, 499: 127286.
- [22] Peng L M, Li X W, Yang W H, et al. Investigation on reliability and scalability of an FBG-based hierarchical AOFSN[J]. *Sensors*, 2010, 10(4): 2901–2918.
- [23] Hu J H, Wang B Y, Di K J, et al. Self-healing FBG sensor network fault-detection based on a multi-class SVM algorithm[J]. *Optics Express*, 2023, 31(25): 41313.
- [24] Sai Y Z, Jiang M S, Sui Q M, et al. FBG sensor array-based-low speed impact localization system on composite plate[J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 63(5): 462–467.
- [25] Chen C, Wang H P, Ma J, et al. Dynamic feature identification of carbon-fiber-reinforced polymer laminates based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Buildings*, 2023, 13(9): 2292.
- [26] 王文娟, 宋昊, 吴天, 等. 基于光纤光栅传感器内埋的复合材料加筋板冲击位置识别[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(15): 103–109.
- Wang Wenjuan, Song Hao, Wu Tian, et al. Impact location identification of stiffened composite plates based on FBG sensors embedded[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(15): 103–109.
- [27] Jang B W. Practical method for localizing low-velocity impact on a UAV composite wingbox structure under loading conditions[J]. *Advanced Composite Materials*, 2024, 33(2): 290–304.
- [28] Ding G P, Chen Y X. Impact localization of CFRP laminate based on FBG sensing and GWO-BP neural network[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2026, 45(3–4): 974–986.
- [29] Rickman S L, Richards W L, Christiansen E L, et al. Micrometeoroid/orbital debris (MMOD) impact detection and location using fiber optic Bragg grating sensing technology[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 188: 233–240.
- [30] 蔡芳盛, 严刚, 曾捷, 等. 基于非负贝叶斯正则化的冲击载荷光纤识别法[J]. *振动测试与诊断*, 2023, 43(3): 427–434, 615.
- Cai Fangsheng, Yan Gang, Zeng Jie, et al. An optical fiber technique of impact load identification method based on non-negative Bayesian regularization[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2023, 43(3): 427–434, 615.
- [31] 徐忠宣, 张思思, 王玉儒, 等. 基于光纤光栅和小波包变换的复合材料板状结构的冲击能量辨识方法[J]. *测试技术学报*, 2025, 39(3): 267–275, 283.
- Xu Zhongxuan, Zhang Sisi, Wang Yuru, et al. Impact energy identification method of composite plate structure based on FBG and wavelet packet transform[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2025, 39(3): 267 – 275, 283.
- [32] 李昊业, 张雯, 宋言明, 等. 面向航天器微小碰撞的飞秒光纤光栅冲击检测系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(2): 153–159.
- Li Haoye, Zhang Wen, Song Yanming, et al. Impact detection system of femtosecond fiber Bragg grating for spacecraft micro-collisions[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(2): 153–159.
- [33] 鲁明宇, 马超, 李翔宇, 等. 飞机作动器连杆光纤光栅载荷校准方法[J]. *数据采集与处理*, 2020, 35(2): 270–277.
- Lu Mingyu, Ma Chao, Li Xiangyu, et al. Load calibration method of actuator connecting panels for aircraft based on fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2020, 35(2): 270–277.
- [34] 黄勇. 基于光纤传感的襟翼操纵载荷试飞技术[J]. *航空学报*, 2020, 41(4): 223213.
- Huang Yong. Flight test technic for flap operation load with optical fiber sensing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(4): 223213.
- [35] Rajak D, Pagar D, Menezes P, et al.

Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications[J]. Polymers, 2019, 11(10): 1667.

[36] Thompson A J, McFarlane J R, Belnoue J P, et al. Numerical modelling of compaction induced defects in thick 2D textile composites[J]. Materials & Design, 2020, 196: 109088.

[37] Blöbl Y, Hegedüs G, Szebényi G, et al. Applicability of fiber Bragg grating sensors for cure monitoring in resin transfer molding processes[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2021, 40(19–20): 701–713.

[38] Tamagawa T, Minakuchi S, Niwa S, et al. Consolidation deformation of composite corner depending on compression force during layup: in situ monitoring using fiber-optic-based embeddable shape sensor[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 165: 107371.

[39] Rufai O, Chandarana N, Gautam M, et al. Cure monitoring and structural health monitoring of composites using micro-braided distributed optical fibre[J]. Composite Structures, 2020, 254: 112861.

[40] Arhant M, Meek N, Penumadu D, et al. Residual strains using integrated continuous fiber optic sensing in thermoplastic composites and structural health monitoring[J]. Experimental Mechanics, 2018, 58(1): 167–176.

[41] 王伟伦, 曹子荷, 俞星辰, 等. 大厚度 L 形复合材料层合板残余应变监测和失效行为研究[J]. 复合材料科学与工程, 2025(4): 1–10, 46.

Wang Weilun, Cao Zihe, Yu Xingchen, et al. Research on residual strain monitoring and failure behavior of thick L-shaped composite laminates[J]. Composites Science and Engineering, 2025(4): 1–10, 46.

[42] 王琦, 蒋秋梅, 杨旭峰, 等. 三维机织复合材料残余应力/应变多尺度分析及工艺参数优化[J]. 复合材料学报, 2021, 38(4): 1167–1176.

Wang Qi, Jiang Qiumei, Yang Xufeng, et al. Multiscale analysis and process parameters optimization of residual stress/strain of 3D woven composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(4): 1167–1176.

[43] 雷伟华, 胡海晓, 曹东风, 等. 考虑界面应变传递机制的内埋 FBGs 环氧树脂固

化过程模拟[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1807–1817.

Lei Weihua, Hu Haixiao, Cao Dongfeng, et al. Simulation of curing process of epoxy resin with embedded FBGs considering interfacial strain transfer mechanism[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1807–1817.

[44] Zhang Dechao, Zhan Lihua, Ma Bolin, et al. Experimental study on vibration pretreatment-microwave curing process for carbon fiber reinforced polymer composites[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(6): 1838–1855.

[45] 周玉敬, 刘刚, 胡晓兰, 等. 内埋 FBG 传感器复合材料加筋板的固化过程及准静态压缩监测[J]. 材料工程, 2021, 49(10): 132–137.

Zhou Yujing, Liu Gang, Hu Xiaolan, et al. Curing process and quasi-static compression monitoring of stiffened composite panels with embedded FBG sensors[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(10): 132–137.

[46] 武湛君, 张博明, 王殿富, 等. 用于 FRP 固化在线监测的光纤微弯压力传感器[J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 125–129.

Wu Zhanjun, Zhang Boming, Wang Dianfu, et al. A novel fiber optic pressure sensor used in composite cure process monitoring[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(6): 125–129.

[47] Weber S, Kissinger T, Chehura E, et al. Application of fibre optic sensing systems to measure rotor blade structural dynamics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 158: 107758.

[48] Zhang H L, Wang Z F, Teng F, et al. Dynamic strain measurement of rotor blades in helicopter flight using fiber Bragg grating sensor[J]. Sensors, 2023, 23(15): 6692.

[49] Chen C, Zhang C, Ma J, et al. FBG sensing data motivated dynamic feature assessment of the complicated CFRP antenna beam under various vibration modes[J]. Buildings, 2024, 14(7): 2249.

[50] 朱超杰, 魏鹏, 李成贵. 基于光纤光栅的结构应变模态测试及参数识别[J]. 半导体光电, 2019, 40(1): 123–128.

Zhu Chaojie, Wei Peng, Li Chenggui. Strain modal test and parameter identification of fiber grating structure[J]. Semiconductor

Optoelectronics, 2019, 40(1): 123–128.

[51] 徐彦伟, 谭跃刚. 基于应变模态的加筋板螺栓松脱识别[J]. 机械工程与自动化, 2016, 45(2): 166–167, 170.

Xu Yanwei, Tan Yuegang. Stiffened plate bolts loose recognition based on strain mode[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2016, 45(2): 166–167, 170.

[52] Li M Y, Kefal A, Cerik B C, et al. Dent damage identification in stiffened cylindrical structures using inverse Finite Element Method[J]. Ocean Engineering, 2020, 198: 106944.

[53] 徐定强, 陈庆童, 周鑫. 基于光纤光栅的应变场重构方法[J]. 直升机技术, 2024(4): 55–59.

Xu Dingqiang, Chen Qingtong, Zhou Xin. Strain field reconstruction method based on fiber grating[J]. Helicopter Technique, 2024(4): 55–59.

[54] Lee S, Park M, Oh M H, et al. Virtual sensing for real-time strain field estimation and its verification on a laboratory-scale jacket structure under water waves[J]. Computers & Structures, 2024, 298: 107344.

[55] Li Z H, Cheng Y Y, Zhang L, et al. Strain field reconstruction of high-speed train crossbeam based on FBG sensing network and load-strain linear superposition algorithm[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(4): 3228–3235.

[56] Tessler A, Roy R, Esposito M, et al. Shape sensing of plate and shell structures undergoing large displacements using the inverse finite element method[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 8076085.

[57] Zhu Q F, Wu G Q, Zeng J, et al. Enhanced strain field reconstruction in ship stiffened panels using optical fiber sensors and the strain function-inverse finite element method[J]. Applied Sciences, 2024, 14(1): 370.

[58] 武湛君, 渠晓溪, 高东岳, 等. 航空航天复合材料结构健康监测技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(15): 92–102, 109.

Wu Zhanjun, Qu Xiaoxi, Gao Dongyue, et al. Research progress on structural health monitoring technology for aerospace composite structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(15): 92–102, 109.

[59] 薛景峰, 宋昊, 王文娟. 光纤光栅在航空结构健康监测中的应用前景[J]. 航空制

造技术, 2012, 55(22): 45-49.

Xue Jingfeng, Song Hao, Wang Wenjuan. Application of optical fiber grating in health monitoring for aircraft structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(22): 45-49.

[60] 赵欣, 杨晨旭, 张春光, 等. 基于神经网络的复合材料应变场反演方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2024(11): 99-105.

Zhao Xin, Yang Chenxu, Zhang Chunguang, et al. Research on neural network based strain field inversion method for composite materials[J]. Instrument Technique and Sensor, 2024(11): 99-105.

[61] Go M S, Noh H K, Hyuk Lim J. Real-time full-field inference of displacement and stress from sparse local measurements using physics-informed neural networks[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 224: 112009.

[62] 陈宜扬. 薄壁结构件变形的光纤光栅分布检测研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.

Chen Yiyang. Study on the distribution detection of fiber Bragg grating with deformation of thin-plate structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.

[63] 刘天阔. 基于光纤光栅阵列的扑翼机器人动态变形监测技术研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2024.

Liu Tiankuo. Research on dynamic deformation measurement technology of flapping-wing robot based on fiber Bragg grating array[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2024.

[64] Zeng J, Zhu Q F, Zhao Y Q, et al. Morphological reconstruction for variable wing leading edge based on the node curvature vectors[J]. Biomimetics, 2024, 9(4): 250.

[65] Lally E M, Reaves M, Horrell E, et al. Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures[C]//Proceedings of SPIE, Volume 8345: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012. San Diego, 2012.

[66] Xing S P, Zhou X C, Huang Q P, et al. Beam deformation reconstruction based on Ko displacement theory[J]. Measurement, 2024, 238: 115324.

[67] 胡明月. 力热环境下薄壁结构全场位移重构技术研究[D]. 南京: 东南大学,

2023.

Hu Mingyue. Full-field displacement reconstruction technology of thin-walled structures under mechanical-thermal environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.

[68] Derkevorkian A, Masri S F, Alvarenga J, et al. Strain-based deformation shape-estimation algorithm for control and monitoring applications[J]. AIAA Journal, 2013, 51(9): 2231-2240.

[69] 杨勇. 基于应变与改进模态转换算法的结构变形位移重构研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.

Yang Yong. Research on displacement reconstruction of structural deformation based on strain and improved modal transformation algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.

[70] Li L, Zhong B S, Geng Z Y, et al. Structural shape reconstruction of FBG flexible plate using modal superposition method[C]//ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Cleveland, 2017.

[71] 赵飞飞. 机翼共形天线梁结构的变形重构方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

Zhao Feifei. Research on deformation reconstruction method for wing integrated conformal antenna beam structure[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.

[72] Kefal A, Tabrizi I E, Yildiz M, et al. A smoothed iFEM approach for efficient shape-sensing applications: Numerical and experimental validation on composite structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 152: 107486.

[73] Al-Ahmad O, Ourak M, Van Roosbroeck J, et al. Improved FBG-based shape sensing methods for vascular catheterization treatment[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4687-4694.

[74] Uchida M, Zhang T J, Kobayashi M, et al. Shape sensing of resin pipe with a helical-winding optical fiber in bending test[C]//Proceedings of the 10th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024). Potsdam, 2024.

[75] 尚秋峰, 刘峰. FBG形状传感器的

曲率和弯曲方向误差修正模型[J]. 光学学报, 2023, 43(22): 2228002.

Shang Qiufeng, Liu Feng. Curvature and bending direction error correction model of FBG shape sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(22): 2228002.

[76] Li S, Li Q R, Ding Z Y, et al. Twist compensated, high accuracy and dynamic fiber optic shape sensing based on phase demodulation in optical frequency domain reflectometry[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 216: 111462.

[77] He C J, He Y L, Yu C X, et al. Optical fiber shape sensing of flexible medical instruments with temperature compensation[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 74: 103123.

[78] Jäckle S, Eixmann T, Schulz-Hildebrandt H, et al. Fiber optical shape sensing of flexible instruments for endovascular navigation[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2019, 14(12): 2137-2145.

[79] Khan F, Donder A, Galvan S, et al. Pose measurement of flexible medical instruments using fiber Bragg gratings in multi-core fiber[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(18): 10955-10962.

[80] Zeng C, Zeng J, Cui J P, et al. Shape reconstruction of aerial refueling hose based on distributed fiber optic sensors and FSResNet-MLP[C]//First Conference on Distributed Optical Fiber Sensing Technology and Applications (DOFS 2024). Nanjing, 2025.

[81] Schweikhard K A, Richards W L, Theisen J, et al. Flight demonstration of X-33 vehicle health management system components on the F/A-18 systems research aircraft[C]//19th Digital Avionics Systems Conference. Philadelphia, 2001.

[82] Wolf A, Shabalov N, Kamynin V, et al. 2D temperature field reconstruction using optical frequency domain reflectometry and machine-learning algorithms[J]. Sensors, 2022, 22(20): 7810.

[83] Luo J J, Liu Q, Zhou Z D, et al. The temperature field modeling for metal plate surface based on PSO-B-spline interpolation and FBG sensors[J]. Measurement, 2020, 159: 107618.

- [84] Guo Y H, Wang K, Leng G J, et al. Real-time temperature field reconstruction using a few measurement points and RPIM-AGQ6 interpolation[J]. Measurement, 2024, 225: 114041.
- [85] Niu X, Si J H, Chen T, et al. Temperature field reconstruction based on femtosecond laser prepared of multiwavelength fibre Bragg grating array[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(8): 085102.
- [86] An Q L, Wang C G, Ma T, et al. Aeronautical composite/metal bolted joint and its mechanical properties: A review[J]. Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment, 2024, 5(1): 70-91.
- [87] Thoppul S D, Finegan J, Gibson R F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures—A review[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(3-4): 301-329.
- [88] 乔善勋. 质量与安全系列一个小垫圈引发的熊熊大火[J]. 大飞机, 2019(12): 69-72.
- Qiao Shanxun. Quality and safety series: a tiny washer that triggered a raging inferno[J]. Jetliner, 2019(12): 69-72.
- [89] 朱云鸿, 张旭, 娄小平, 等. 一种基于光纤光栅传感器的机械手远程操控手套[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 148-155.
- Zhu Yunhong, Zhang Xu, Lou Xiaoping, et al. An FBG sensor-based glove for remote operation of manipulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 148-155.
- [90] Ren L, Feng T Z, Ho M, et al. A smart “shear sensing” bolt based on FBG sensors[J]. Measurement, 2018, 122: 240-246.
- [91] 王健志, 邱涛. 智能螺栓技术综述[J]. 测试技术, 2015, 34(z): 547-550.
- Wang Jianzhi, Qiu Tao. Review of smart bolt technologies[J]. Measurement Control Technology, 2015, 34(z): 547-550.
- [92] Chen B B, Feng Z H, Ma C, et al. A method for identifying loose state of bolt groups in composite lapped panels based on fiber optic strain sensing[C]//2024 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference (PHM-Beijing). Piscataway, NJ: IEEE, 2024: 1-7.
- [93] 徐彦伟. 加筋板紧固件连接状态检测方法方法与松脱识别[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- Xu Yanwei. Connection state detection and loose recognition for fasteners on a stiffened plate[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [94] Ciminello M, Galasso B, Concilio A, et al. Cross-correlation based algorithm for SHM de-bonding analysis of typical aeronautical structures via OFDR[C]//European Workshop on Structural Health Monitoring. Cham: Springer International Publishing, 2023: 254-263.
- [95] He M Y, Ramakrishnan K R, Wang Y S, et al. A combined global-local approach for delamination assessment of composites using vibrational frequencies and FBGs[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108577.
- [96] Li Y W, Sharif-Khodaei Z. A novel damage detection method for carbon fibre reinforced polymer structures based on distributed strain measurements with fibre optical sensor[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 208: 110954.
- [97] Ganjdoust F, Kefal A, Tessler A. A novel delamination damage detection strategy based on inverse finite element method for structural health monitoring of composite structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 192: 110202.
- [98] 路士增, 林兰波, 姜明顺, 等. 基于光纤光栅传感器的复合材料损伤识别系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2894-2901.
- Lu Shizeng, Lin Lanbo, Jiang Mingshun, et al. Identification system of composite material damage based on FBG sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 2894-2901.
- [99] 崔建国, 张善好, 于明月, 等. 基于光纤光栅的复合材料结构损伤识别方法[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(12): 59-63.
- Cui Jianguo, Zhang Shanhao, Yu Mingyue, et al. Composite structure damage identification based on fiber Bragg grating[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(12): 59-63.
- [100] 武湛君, 董珊珊, 李建乐, 等. 基于分布式光纤传感与U-Net网络的复合材料分层损伤定量识别方法[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 20-27.
- Wu Zhanjun, Dong Shanshan, Li Jianle, et al. Quantitative identification method of composite material delamination damage based on distributed optical fiber sensing and U-Net network[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 20-27.
- [101] Gupta S, Bhatt P K, Mishra S. Design and simulation of fiber Bragg grating based structural health monitoring system for metal structure[J]. Journal of Optics, 2025, 54(5): 2649-2656.
- [102] Mieloszyk M. Fatigue crack propagation monitoring using fibre Bragg grating sensors[J]. Vibration, 2021, 4(3): 700-721.
- [103] 孙玲玉, 刘长超, 姜明顺, 等. 基于光纤布拉格光栅阵列的铝合金疲劳裂纹预测方法[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1306003.
- Sun Lingyu, Liu Changchao, Jiang Mingshun, et al. Fatigue crack prediction method for aluminum alloy based on fiber Bragg grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1306003.
- [104] 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 Wenjuan, Xue Jingfeng, Zhang Mengjie. Application progress and prospect of optical fiber sensor in aircraft structural health monitoring[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(7): 95-101.
- [105] 于翀, 宋昊, 刘春红, 等. 基于光纤光栅与BP神经网络的孔边裂纹监测研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(3): 187-198.
- Yu Chong, Song Hao, Liu Chunhong, et al. Research on hole edge crack monitoring based on optical fiber gratings and BP neural network[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3): 187-198.
- [106] 王田天, 王钦民, 阳劲松, 等. 基于光纤布拉格光栅的孔边疲劳裂纹监测研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1614-1625.
- Wang Tiantian, Wang Qinmin, Yang Jinsong, et al. Research on hole-edge crack quantification based on fiber Bragg grating[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1614-1625.
- [107] 赵炎, 胡殿印, 石炜, 等. 基于光纤光栅变形光谱的疲劳裂纹扩展监测方法[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 210503.
- Zhao Yan, Hu Dianyin, Shi Wei, et al. Monitoring approach of fatigue crack

propagation based on deformation spectrum of fiber grating[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(2): 210503.

[108] Sousa I, Pereira L, Mesquita E, et al.

Sensing system based on FBG for corrosion monitoring in metallic structures[J]. Sensors, 2022, 22(16): 5947.

[109] Xu L Y, Shi S M, Huang Y, et al.

Corrosion monitoring and assessment of steel under impact loads using discrete and distributed fiber optic sensors[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 174: 110553.

Fiber-Optic Structural Health Monitoring Technology in Aviation and Future Prospects

ZENG Jie¹, ZHU Linfeng¹, LI Zhengying², ZHAO Xin³, WANG Aijun⁴, LIU Xiao²,
YANG Yong⁵, JIANG Mingshun⁶

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. AVIC Chengdu Caic Electronics Co. Ltd., Chengdu 610091, China;

4. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;

5. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China;

6. Shandong University, Jinan 250061, China)

[ABSTRACT] With the diversified development of aircraft structural forms, material properties, and mission modes, as well as increasingly harsh flight environments, higher requirements and new challenges have been posed for structural health monitoring (SHM) technologies. Fiber-optic sensors, with their unique advantages such as small core diameter, excellent flexibility, immunity to electromagnetic interference, integration of signal sensing and transmission, and ease of forming space-division/wavelength-division multiplexing monitoring arrays, have become an ideal choice for real-time multi-parameter monitoring and safety assessment of aerospace structures. This article briefly outlines common types of fiber-optic sensors suitable for aviation service environments, optimization configurations of fiber-optic monitoring networks, and self-healing methods. It comprehensively reviews the background requirements and current development status of multi-parameter monitoring in onboard environments, multi-physical field inversion, and identification methods for typical structural damage. On this basis, it summarizes several challenges and prospects faced by fiber-optic structural health monitoring technology in the aviation field.

Keywords: Aeronautical structures; Fiber-optic sensing; Structural health monitoring; Multi-physics inversion; Damage identification

(责编 阳光)