

跨介质航行器旋翼应变监测与智能感知方法研究

薄夫森,方子怡,潘登,付博玮,李寒阳*,刘志海

(哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院,哈尔滨 150001)

摘要:针对传统电学传感器在旋翼结构健康监测中易受电磁干扰、耐久性差的问题,提出一种跨介质航行器旋翼应变监测与智能感知方法。首先,基于叶素理论建立了旋翼在流体、重力和离心载荷作用下的力学模型;其次,研制了响应时间小于100 ms、应变灵敏度达 $1.2\text{ pm}/\mu\epsilon$ 的高响应速度光纤布喇格光栅(FBG)传感器,并搭建可升降实验平台;最后,结合格拉姆角场编码与卷积神经网络对正常与损伤状态信号进行特征提取与分类识别。实验结果表明,该系统能够准确识别旋翼疲劳损伤状态,为跨介质航行器旋翼结构健康监测与损伤预警提供了有效手段。

关键词:光纤布喇格光栅;光纤传感;结构健康;跨介质航行器;神经网络

中图分类号:TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)04-0045-09

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.04.007

Research on strain monitoring and intelligent sensing methods for cross-media vehicle rotors

BO Fushen, FANG Ziyi, PAN Deng, FU Bowei, LI Hanyang*, LIU Zhihai

(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To address the issues of susceptibility to electromagnetic interference and poor durability of traditional electrical sensors in rotor structural health monitoring, this paper proposes a rotor strain monitoring and intelligent sensing method for cross-medium vehicles. First, a mechanical model of the rotor under fluid, gravitational, and centrifugal loads is established based on blade element theory. Second, a high-response-speed fiber Bragg grating (FBG) sensor with a response time of less than 100 ms and a strain sensitivity of $1.2\text{ pm}/\mu\epsilon$ is developed, and a liftable experimental platform is constructed. Finally, feature extraction and classification recognition of normal and damaged state signals are performed by combining Gramian angular field encoding with a convolutional neural network. Experimental results show that the system can accurately identify rotor fatigue damage states, providing an effective means for structural health monitoring and damage early warning of cross-medium vehicle rotors.

Key words: fiber Bragg grating, fiber optic sensing, structural health, cross-media vehicle, neural network

0 引言

跨介质航行器凭借其在水下与空中自由切换的能力,不仅在海洋观测、通信等民用领域展现出巨大潜力,更随着海洋与空天战略地位的提升,在军事上

成为一种极具价值的快速响应作战平台^[1-3]。由于跨介质航行器在执行任务时需频繁穿越水-空界面,其旋翼承受的载荷剧烈变化,易引发复杂的动态应变,进而威胁结构安全与任务可靠性。因此,对旋翼健康状态进行实时监测与智能感知,是保障其持续稳定运行、提升战场生存能力的关键。

光纤布喇格光栅(FBG)传感器具备体积小、抗电磁干扰、灵敏度高、耐腐蚀等优势^[4-6],可嵌入复合材料或贴装于金属表面^[7-8],适用于复杂环境下的长期监测^[9-10]。同时,FBG支持多点复用与多通道同步测量^[11],在振动、应变、温度等监测中应用广泛。目前,FBG在结构健康监测领域已取得显著进展,典型应用包括航空发动机高温应变测量^[12]、航天结构裂纹与脱粘损伤

收稿日期:2025-07-21。

基金项目:国家自然科学基金项目(52271344)资助。

作者简介:薄夫森(1986—),男,博士研究生,现就读于哈尔滨工程大学物理与光电工程学院光学工程专业,主要研究方向为水下光纤传感器、水下激光推进等,参与国家自然科学基金项目,负责水下光纤传感器的制备与应用等工作。

*通信作者:李寒阳(1982—),男,工学博士,副教授,主要从事光学人工智能算法、微结构光子量子动力学、微结构光学传感、微纳米光纤光学等方面的研究。



薄夫森,方子怡,潘登,等:跨介质航行器旋翼应变监测与智能感知方法研究

识别^[13]等。在旋翼/螺旋桨相关领域,FBG的应用目前仍以单一介质工况为主。比如,在航空航天方面,FBG已成功用于直升机旋翼桨叶的动态应变测量与动载荷试飞验证^[14-16];在海洋工程方面,基于FBG传感网络的螺旋桨水下运行变形监测也取得了有效成果^[17-18]。然而,上述研究均针对空气或静水环境开展,对于跨介质航行器旋翼这类需频繁穿越水-空界面、承受剧烈流固耦合瞬态冲击的对象,现有FBG传感方法的适用性尚不明确。水与空气的物理特性差异悬殊,旋翼在出入水过程中将经历复杂的两相流环境,随之产生急剧变化的冲击载荷与复杂的结构应变响应^[19-20]。尽管已有文献尝试将FBG传感器用于平板入水冲击的应变监测^[21-22],但其研究对象仅为简化结构,尚未系统研究旋翼在跨介质瞬态过程中传感器的动态响应特性与信号畸变规律。因此,本文融合叶素理论分析、光纤光栅传感与深度学习识别,提出一种跨介质航行器旋翼应变监测与智能感知方法,适用于水-空交替环境的应变监测与智能感知。

1 基本原理

跨介质航行器旋翼在出、入水过程中承受复杂的多物理场耦合载荷,其受力形式动态多变。本文基于叶素理论对旋翼进行载荷分析,即将叶片沿展向离散为若干独立微段(叶素),通过对各叶素截面的气动/水动力积分获得整片叶片的受力分布。各叶素的几何关系与所受流体载荷的示意图分别如图1(a)和图1(b)所示。图中, v_0 为来流速度, r 为叶素所在半径, φ 为入流角, α 为攻角, F_n 为轴向力, F_t 为切向力, Ω 为旋翼的转速, v_w 为相对速度矢量。

在叶素理论框架下,引入轴向诱导因子和切向诱导因子考虑来流减速与旋转效应,结合动量理论求解各叶素处的相对速度及攻角,可得到作用于叶素微段上的流体力。由此建立旋翼叶片载荷坐标系,则旋翼受力示意图如图1(c)所示。图中, X_B 、 Y_B 、 Z_B 分别为固

连于旋翼叶片上的局部坐标系(随叶片旋转), Q_{xa} 和 Q_{ya} 分别为通过对桨叶径向各叶素载荷沿展向积分得到的总轴向力与总切向力(a 为轴向诱导因子), F_{yw} 和 F_{xw} 分别为重力(w 表示重力)载荷沿 y 轴和 x 轴的分量。 F_{yp} 、 F_{zp} 分别为离心力在 y 轴和 z 轴的分量(p 表示源于离心力)。旋翼在出入水过程中,流体、重力及离心载荷在多物理场耦合下合成作用的详细推导过程参见文献[23-25]。

流体载荷在 x 、 y 方向单位长度截面上产生的流体力 q_{xa} 、 q_{ya} 为

$$\begin{cases} q_{xa} = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_n \\ q_{ya} = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; c 为对应叶素的弦长; W 为相对速度 v_w 的合速度大小(模长),即 $W=v_w$; C_n 、 C_t 分别为旋翼旋转平面的轴向力系数和切向力系数。

重力载荷导致叶片在摆振方向产生变形。单位展长上的重力载荷分量 q_{yw} 、 q_{xw} 可表示为

$$\begin{cases} q_{yw} = \rho_0 S_0 g \sin \theta \\ q_{xw} = \rho_0 S_0 g \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ_0 与 S_0 分别为桨叶材料的密度与叶素截面积, g 为重力加速度, θ 为叶片的旋转方位角。

旋翼旋转产生的离心载荷作用于叶片各截面。离心力在 y 轴和 z 轴产生的力 F_{yp} 、 F_{zp} 为

$$\begin{cases} F_{zp} = \int_r^R q_{zp} dr_1 = \int_r^R \rho_0 \Omega^2 S_0 r_1 dr_1 \\ F_{yp} = \int_r^R q_{yp} dr_1 = \int_r^R \rho_0 \Omega^2 S_0 Y_c dr_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: R 为旋翼半径; q_{zp} 与 q_{yp} 分别为单位长度上离心力产生的等效拉力和剪力,下标 r 、 y 分别表示该分布力的作用方向(径向、切向); r_1 为积分位置变量; Y_c 为截面重心的横向偏移坐标。

上述解析表达式明确了3种载荷的分布形式与作用方向,既可作为有限元建模的载荷边界条件,也可用于构建应变-载荷映射关系。

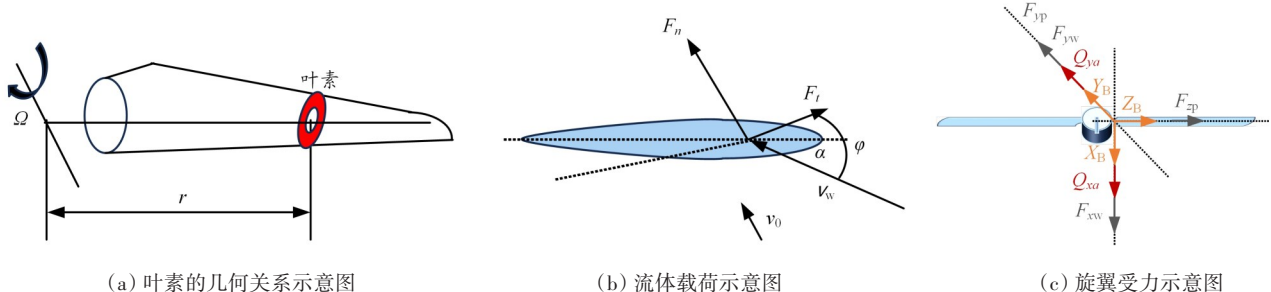


图1 叶素理论分析旋翼受力

2 系统设计

为验证基于叶素理论建立的旋翼载荷分析模型,并实现旋翼在出入水过程中动态应变的实时、准分布式监测,本文构建了一套完整的实验系统。该系统主要集成了波分/时分复用技术的应变传感网络,以及可精确模拟跨介质工况的可升降式旋翼实验平台。

2.1 准分布式应变传感网络

本文采用以FBG为核心的准分布式应变传感网络,分布图如图2所示。通过在旋翼关键部位布置分立传感点,实现多点同步测量。所用FBG传感单元均由实验室自行封装制备,具体封装工艺(含粘贴、固化及防水密封等)详见2.2节。在传感器布局方面,结合旋翼不同方向的载荷测量路径,选用总线型网络拓扑架构进行传感网络布设,即通过单根主干光纤依次串联各叶片上的全部FBG传感单元,并统一接入中央解调模块。该拓扑结构有效简化了系统布线,降低了整体复杂度,为旋翼应变实时监测提供了可靠的硬件基础。

图2中,总线型传感器拓扑结构是适配旋翼应变监测的典型架构,其模块化、线性化的布设形式具有突出的运维优势:传感单元排列规整,线路脉络清晰,便于后期设备检修、故障排查及传感器校准,可大幅降低维护成本与运维难度。应变传感网络的传感机理如下:当旋翼叶尖因应变产生信号时,光纤任意区段均可响应。在轴向与切向力矩测量路径中,只要光路畅通,FBG可布置于光纤任意位置实现监测,即便将FBG置于叶片远端,解调仪仍能稳定接收反射信号;无论FBG位于光纤任一端或中间位置,信号均可清晰捕获。该机制为传感器布局提供了高度灵活性,可根据旋翼应力分布自由选择监测点位,满足复杂工况下的多点应变测量需求。

2.2 传感器布设工艺与防护

为确保应变测量的精度与长期稳定性,FBG传感器的布设遵循了严格的工艺规范。粘贴前,对旋翼叶片表面的粘贴区域进行打磨处理,并使用丙酮清洗以去除氧化层及油污。粘接剂选用紫外线固化胶,粘贴过程中通过专用夹具施加恒定压力,确保应变传递效

率接近100%。针对跨介质实验中的浸水环境,传感器固化后在其表面涂覆柔性防水密封层,以防止水分侵入导致粘贴界面失效。

为消除温度变化对波长漂移量的影响,在每个旋翼叶片的根部(近似零应变区)各布置一个温度补偿光栅,在信号解调过程中实现温漂补偿,确保所测波长漂移量准确反映力学应变。

在光纤走线防护方面,FBG传感器粘贴后,其尾纤沿叶片表面分段固定,以减小旋翼运动过程中的晃动应力。光纤布线防护关键部件实物图,如图3所示。尾纤从叶片根部引出并进入桨毂后,嵌入桨毂中端结构预设的细长凹槽内固定,避免旋转摩擦导致光纤破损。光纤滑环的连接通过滑环固定件实现,采用“半浮动”连接方式,确保滑环转子随旋翼同步旋转而定子保持静止,避免光纤扭断风险。辅助固定装置进一步保证了动静分离的可靠性。



图3 光纤布线防护关键部件实物图

经连续旋转测试验证,在上述防护方案下的光纤信号传输稳定,无明显劣化,证明了该防护设计的有效性。

2.3 可升降式旋翼实验平台

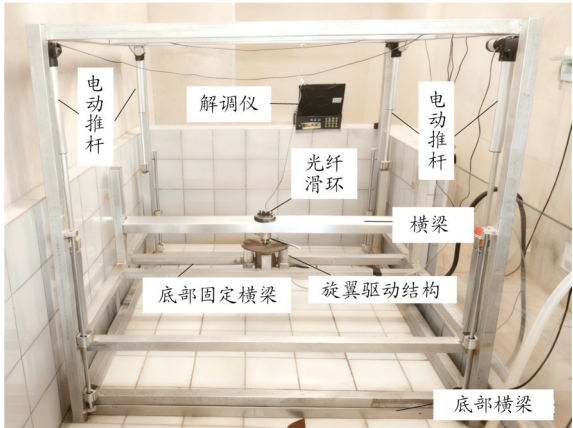
为创造可控的跨介质实验环境,本文构建了一套可升降式旋翼实验平台,如图4所示。该平台采用模块化框架式设计,整体安装于长为4 m、宽为2.05 m、深为1.2 m的水池中,核心由升降机构、旋翼驱动结构与光纤传感系统三大部分集成。

升降机构的主体为一个边长为2 m的立方体支撑框架,其四角对称安装有4套高精度电动推杆。该推杆系统采用同一控制器实现四杆同步控制,经实际测试与标定,其核心性能指标如下:同步控制精度优于0.5 mm(四推杆位移偏差),位移分辨率达0.1 mm,重

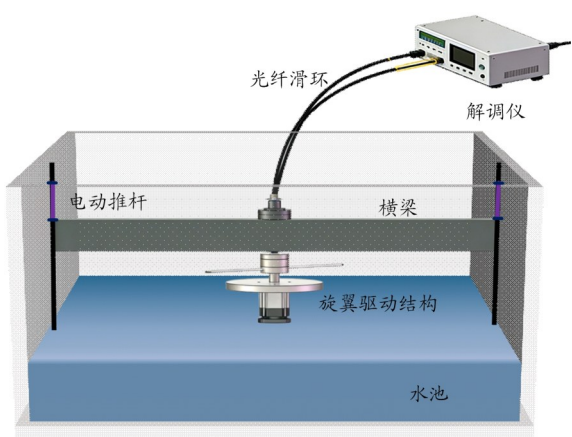


图2 应变传感网络分布图

薄夫森,方子怡,潘登,等:跨介质航行器旋翼应变监测与智能感知方法研究



(a)实物图



(b)示意图

图4 可升降式旋翼实验平台

复定位精度为 $\pm 0.1\text{ mm}$,响应时间约 0.2 s 。推杆最大行程为 395 mm ,运行速度共5档可调($8.4\sim 30.4\text{ mm/s}$),可根据不同实验工况(如出入水冲击模拟、稳态浸没等)灵活选择。

基于上述高性能推杆,通过同步控制其直线运动,可驱动平台中部的承载横梁及安装于其上的整个旋翼驱动结构进行垂直升降,从而实现对旋翼浸没深度的连续、精确调节。该设计能够高效模拟出入水瞬间的冲击、不同浸深下的稳态旋转以及周期性切水等一系列跨介质关键工况。相较于传统通过注水或排水来改变水位的方法,这种主动升降方式大幅提升了实验状态的切换速度与过程的可控性。

旋翼驱动结构主要由防水电机、专用桨毂、测试旋翼叶片及配套轴承和滑环固定装置构成。电机具备IP68防护等级,转速为 $0\sim 3\,000\text{ r/min}$ 连续可调,稳态控制精度为 $\pm 1\text{ r/min}$,可精确输出所需转速与扭矩。光纤传感系统承担信号采集与传输功能,通过光纤滑环实现旋转结构与固定解调仪之间的光信号连续传输,滑环插入损耗小于 1 dB ,适用转速为 $0\sim 5\,000\text{ r/min}$;解调仪采样频率最高为 $1\,000\text{ Hz}$,波长分辨率为 1 pm ,对应应变测量精度为 $\pm 1\text{ }\mu\epsilon$,将动态应变转化为可分析的时序数据。上述关键性能指标如表1所示。

该实验平台实现了旋翼工况的灵活调节、运动状态的可靠驱动与应变信号的高质量同步采集,为后续传感器性能测试、应变监测及损伤识别研究提供了完备的硬件基础。

3 传感器的性能测试

为验证所研制FBG传感器在动态载荷下的快速

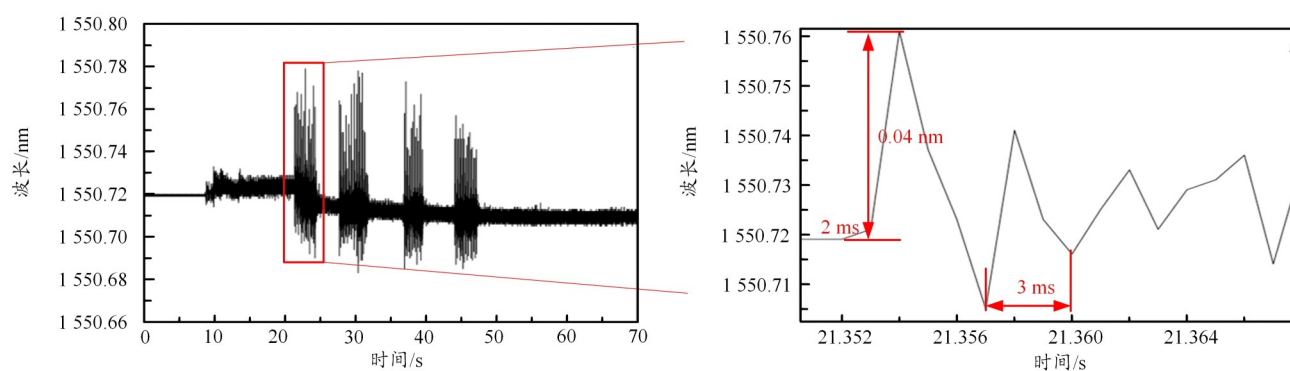
表1 实验平台关键性能指标

子系统	参数	数值
升降机构	最大行程/mm	395
	位移分辨率/mm	0.1
	重复定位精度/mm	± 0.1
	同步控制精度 (四推杆位移偏差)/mm	优于0.5
	运行速度 (5档可调)/(mm/s)	8.4、16.5、20.8、 24.7、30.4
	响应时间/s	约0.2
旋翼驱动系统 (防水电机)	转速范围/rpm	0~3 000
	稳态转速控制精度 r/min	± 1
	防护等级	IP68
光纤传感系统	光纤滑环适应转速/(r/min)	0~5 000
	滑环插入损耗/dB	<1
	解调仪采样频率/Hz	最高1 000
	波长分辨率/pm	1
	应变测量精度/ $\mu\epsilon$	± 1

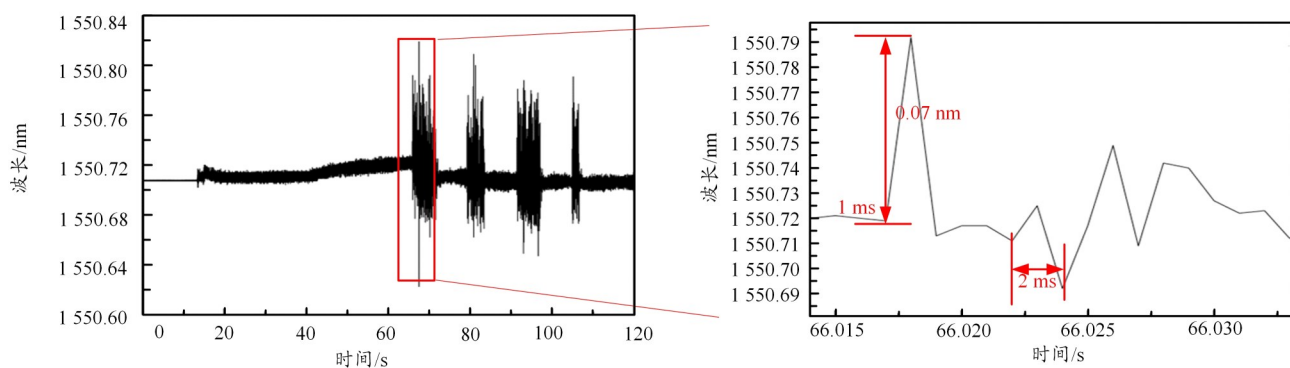
响应能力,本文基于上述传感网络与实验平台,对其动态响应时间与应变分辨率进行性能测试。

3.1 动态响应时间测试

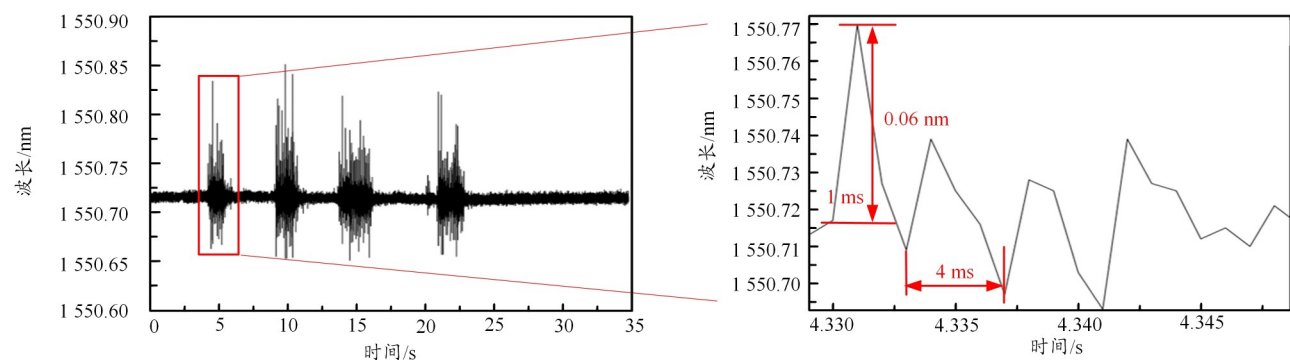
以输出信号上升沿时间(10%→90%幅值)小于 100 ms 为判定依据,在旋翼切水工况下开展动态响应测试。旋翼转速分别设为 $300、400、500、600\text{ r/min}$,传感器响应波形如图5所示。可以看出,在 300 r/min 转速下,传感器的上升沿时间为 2 ms ,波长变化幅值为 0.04 nm ,波谷间隔为 3 ms ;当转速提升至 400 r/min 时,上升沿时间缩短至 1 ms ,幅值增大至 0.07 nm ,波谷间



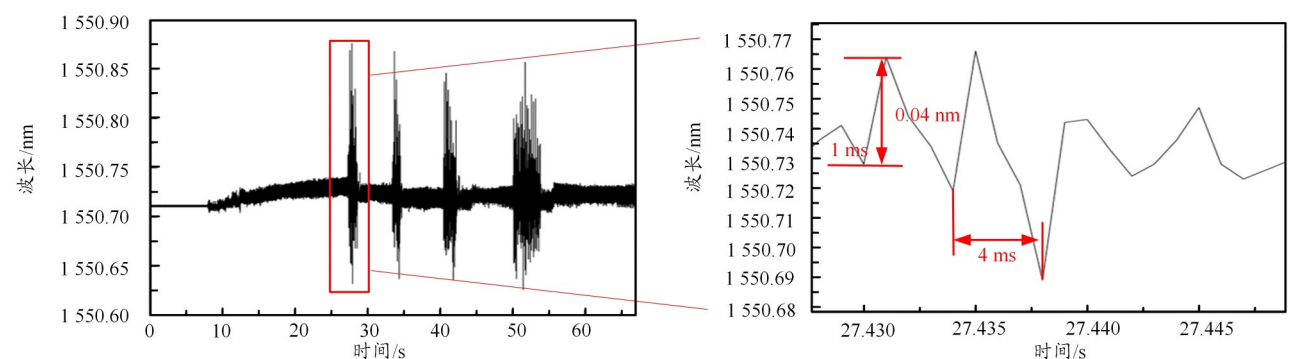
(a) 300 r/min 传感输出波形图及其局部放大图



(b) 400 r/min 传感输出波形图及其局部放大图



(c) 500 r/min 传感输出波形图及其局部放大图



(d) 600 r/min 传感输出波形图及其局部放大图

图5 不同转速下传感器响应波形

薄夫森,方子怡,潘登,等:跨介质航行器旋翼应变监测与智能感知方法研究

隔为 2 ms。进一步将转速升至 500 r/min,上升沿时间仍保持为 1 ms,幅值为 0.06 nm,波谷间隔为 4 ms;而 600 r/min 时,上升沿时间同样为 1 ms,幅值则为 0.04 nm,波谷间隔为 4 ms。该结果表明,所研制 FBG 传感器能够在旋翼高速切水引起的瞬态冲击载荷下实现毫秒级动态应变监测,为后续动态载荷分析与损伤识别提供了可靠的传感基础。

3.2 应变分辨率标定

本文基于悬臂梁应变调谐原理对 FBG 传感器的应变分辨率进行标定。FBG 粘贴于悬臂梁根部,当梁自由端受载发生挠曲时,梁体应变传递至光栅,引起布喇格波长漂移。由材料力学可知,悬臂梁 x 处的应变可表示为

$$\varepsilon = \frac{3(L-x)d}{L^3}h \quad (4)$$

式中: L 、 h 、 d 分别表示梁的长度、挠度和中性面至表面的距离。

实验采用长度 L 为 720 mm 的悬臂梁,在自由端施加不同挠度 h ,记录 FBG 中心波长变化 $\Delta\lambda$ (所用同一 FBG 的初始中心波长 $\lambda=1\,555.515\text{ nm}$),同时计算对应的理论应变 $\Delta\varepsilon$ 与实际应变变化量 ΔE ,测试数据如表 2 所示。通过线性拟合 $\Delta E-\Delta\lambda$ 数据点,得到拟合方程 $y=0.001\,2x$,斜率 $K=0.001\,2\text{ nm}/\mu\varepsilon$,即传感器应变灵敏度为 $1.2\text{ pm}/\mu\varepsilon$ 。

表 2 应变灵敏度实验测试数据

中心波长 λ/nm	波长变化量 $\Delta\lambda/\text{nm}$	L/mm	h/mm	$\Delta\varepsilon/\mu\varepsilon$	$\Delta E/\mu\varepsilon$
1 555.515	0.027	720	2.8	22.174	22.174 768
1 555.515	0.044	720	4.55	36.034	36.033 999
1 555.515	0.061	720	6.3	49.893	49.893 229
1 555.515	0.077	720	8.05	63.753	63.752 459
1 555.515	0.084	720	8.75	69.296	69.296 152
1 555.515	0.104	720	10.85	85.927	85.927 228

实验结果表明,所研制的 FBG 传感器具有较高的应变响应灵敏度与良好的线性度,能够分辨微应变量级的结构形变,满足旋翼动态载荷监测中对应变分辨率的要求,为后续定量分析旋翼受力状态提供了可靠的传感依据。

4 旋翼结构损伤识别方法的研究与实验验证

4.1 损伤对动态响应的影响分析

由于结构损伤会显著改变旋翼桨叶的刚度分布与载荷传递路径,导致其力学响应呈现局部应力集中、整体刚度退化及动态响应畸变的特征,进而直接影响结构的承载能力、疲劳寿命及运行安全性。为探究损伤对旋翼出入水过程力学行为的影响,本文对比分析了正常旋翼与损伤旋翼这 2 种状态在相同工况下的动态信号与应变响应。

2 种状态的旋翼在 140 r/min 与 220 r/min 转速下出入水过程中的中心波长时程曲线,如图 6 所示。可以看出,正常状态旋翼因结构完整、刚度分布均匀,信号表现出良好的稳定性与规律性:在空气中旋转时,信号波动幅值较小,为 $\pm(2\sim 5)\text{ pm}$;在水中稳定旋转阶段,波动更为平缓,为 $\pm(1\sim 3)\text{ pm}$;在入水与出水的瞬态阶段,分别呈现边界清晰的脉冲式峰值与谷值,且状态过渡平滑,反映了其动力学行为的高度可预测性。相比之下,损伤状态旋翼的信号呈现明显的失稳与畸变特征:即使在稳态旋转阶段,信号波动范围也显著增大,空气中达 $\pm(10\sim 20)\text{ pm}$ (约为正常状态的 2~4 倍),水中为 $\pm(5\sim 8)\text{ pm}$ (约为正常状态的 1.7~2.7 倍);波形中可见明显的锯齿状起伏、不规则波动或阶跃平台现象,入水/出水瞬态的脉冲特征减弱,并伴有杂波干扰。

基于应变传感网络的定量测量结果如表 3 所示。损伤未改变“应变与载荷随转速升高而增大”的整体趋势;但在同一转速下,损伤状态旋翼的力学载荷显著高于正常状态。以 140 r/min 为例,损伤状态旋翼最大应变为 $116.5\text{ }\mu\varepsilon$,等效载荷为 37.1 N,较正常状态分别增加约 33.3%;在 220 r/min 转速下,增幅超过 34.6%。采用独立样本 t 检验对正常与损伤状态旋翼的应变均值差异进行显著性检验,结果表明各转速下 2 组间差异均具有统计学意义 ($p < 0.05$,即差异由偶然因素导致的概率小于 5%)。

4.2 跨介质航行器旋翼损伤识别

4.2.1 数据集构建

为满足深度学习模型训练与验证需求,本文构建了包含正常与损伤状态旋翼的应变信号数据库。数据库共含 301 组有效样本(正常 177 组、损伤 124 组),转速覆盖 140~395 r/min,涵盖空中旋转、入水冲击、水中旋转及出水冲击等完整跨介质工况。按 70% 训练、15% 验证、15% 测试的比例随机划分,各类别样本均衡分布,且同转速样本均匀分配至各子集;测试集在模型训练过程中完全隔离,仅在最终评估时使用。

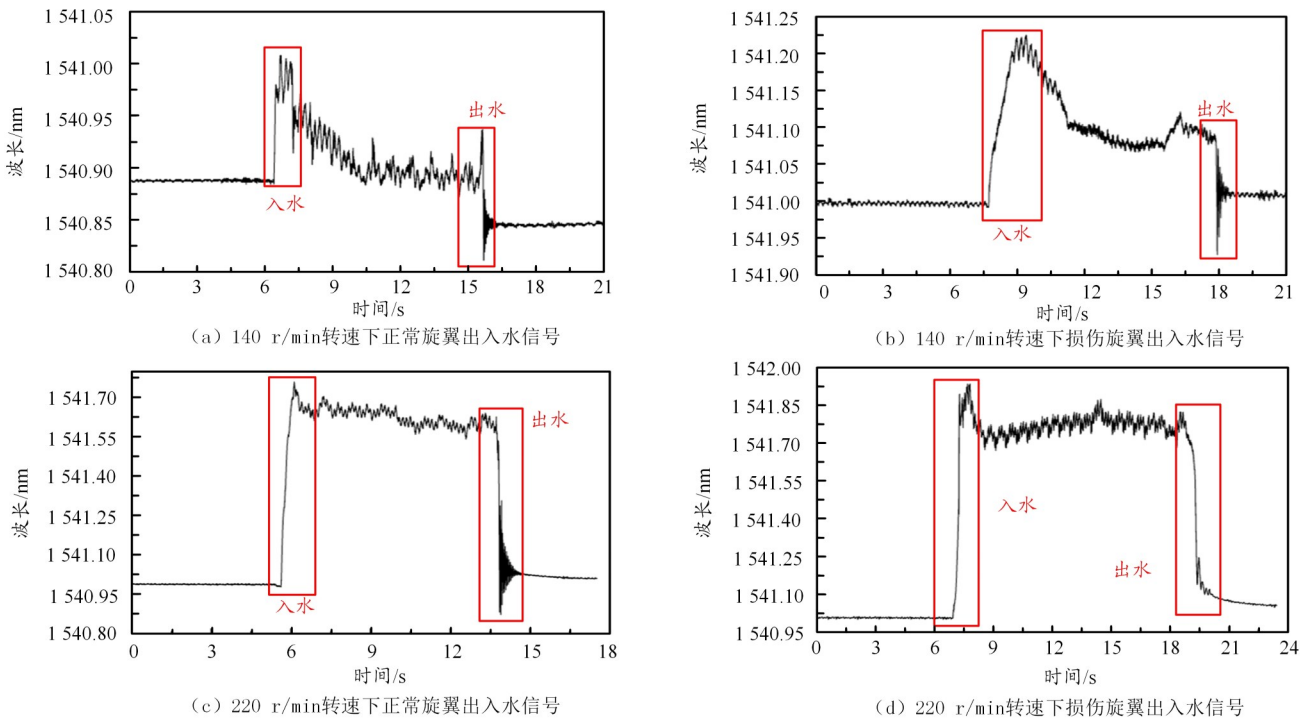


图6 正常与损伤旋翼在出入水过程中的中心波长时程曲线对比

表3 正常与损伤状态旋翼的出入水过程最大应变及等效载荷对比

转速/ (r/min)	正常状态旋翼 应变/ $\mu\epsilon$	正常状态旋翼 载荷/N	损伤状态旋翼 应变/ $\mu\epsilon$	损伤状态旋翼 载荷/N
140	87.4	27.8	116.5	37.1
170	231.3	73.7	400.2	127.5
210	354.4	112.9	582.4	185.5
220	548.3	174.7	737.9	235.1

为检验模型的跨工况泛化能力,测试集中特意纳入了训练集未覆盖的高转速样本(290~350 r/min)。

4.2.2 信号预处理与格拉姆角场(GAF)图像编码

原始应变信号中混杂有水流冲击、空气湍流及设备噪声等干扰,采用自适应小波包降噪进行预处理,在抑制噪声的同时保留反映结构状态的关键模态成分。随后对连续信号进行固定长度时间窗分段,并引入GAF图像编码技术,将一维时序信号转化为二维图像。GAF通过极坐标映射与三角运算将时间依赖性转化为空间结构信息,使卷积神经网络能够直接学习信号的动态演化模式,并将损伤识别问题转化为图像分类任务。GAF编码能够有效捕捉损伤引起的微弱非平稳调制信息,避免了人工设计时频域特征的局限性。

在同一速度下,2种状态旋翼的GAF图像对比如图7所示。可以看出,正常状态的GAF图像纹理规则、颜色过渡平滑,反映信号的周期性与稳定性;损伤状态的GAF图像则呈现明显的纹理紊乱与局部对比度增强,直观体现了损伤导致的信号畸变特征。

4.2.3 网络训练与识别结果

在此基础上,构建以ResNet为骨架的深度卷积神经网络,用于从GAF图像中自动学习损伤判别特征。网络通过多层卷积与残差连接提取从边缘、纹理到全局语义的多层次信息,最终经全连接层与Softmax函数输出“正常状态”(结构完好)与“损伤状态”(存在疲劳裂纹)2类概率。训练阶段,采用交叉熵损失函数与Adam优化器进行监督学

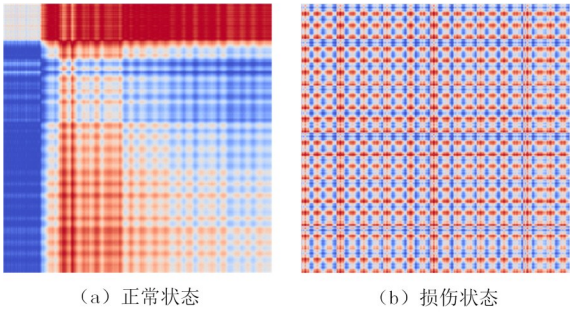


图7 2种状态旋翼的GAF图像对比

薄夫森,方子怡,潘登,等:跨介质航行器旋翼应变监测与智能感知方法研究

习,并辅以学习率衰减及正则化策略以提升泛化能力;训练完成后,通过测试集评估分类准确率。推理时,新信号经相同预处理与GAF变换后输入模型,逐窗口获得状态概率,依据最大概率准则判定瞬时状态。

为防止过拟合,训练中采用了多项策略。1)数据增强。对输入样本进行随机旋转($\pm 5^\circ$)、平移(± 2 像素)、水平翻转,以及亮度和对比度调整。2)采用Adam优化器,初始学习率设为0.001,每20轮减为原来的0.1倍,同时引入权重衰减(系数为 $1e-4$)和Dropout(丢弃率为0.5)。3)早停机制(设置patience为10)。五折交叉验证显示平均准确率为95.7%,标准差为1.2%,模型具备良好的稳定性与泛化能力。训练集和验证集测试曲线如图8所示。可以看出,训练集与验证集的准确率及损失变化趋势一致,无显著过拟合;随训练轮数增加,损失值下降,准确率提高。

4.2.4 系统实时监测验证

为验证系统的实时判别能力,在260 r/min转速下,2种状态旋翼的监测结果如图9所示。可以看出,正常状态旋翼信号曲线平滑,波长稳定在1 550.72~1

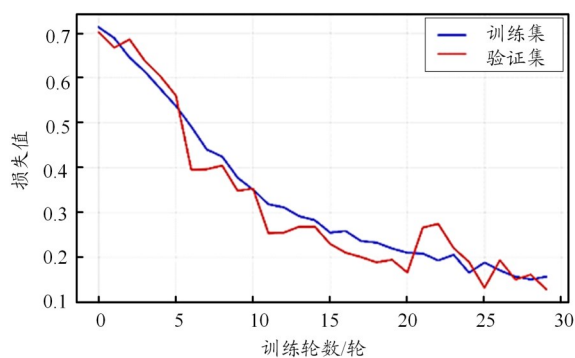
551.36 nm,入水时刻(12.057 s)与出水时刻(28.368 s)分别对应清晰的脉冲峰值与谷值,系统输出“正常”;损伤状态旋翼信号明显畸变,波长范围偏移至1 540.64~1 541.12 nm,曲线剧烈波动且含多处无规律突变,入水/出水脉冲特征模糊,系统输出“损伤”。

在200、335、450 r/min 3种转速下进一步验证,结果如表4所示。可以看出,监测平台识别的出入水时间与实际工况高度吻合,表明该系统的实时监测满足工程应用需求。

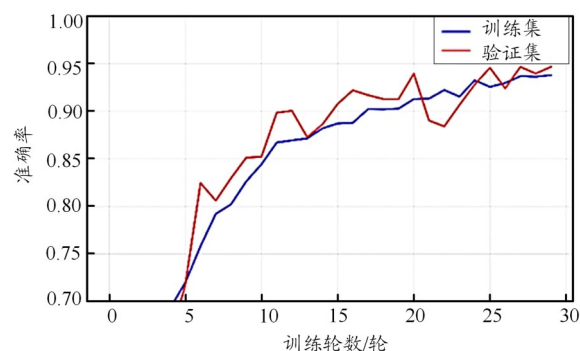
表4 不同转速下,监测平台与实际出入水时间对比

转速/ (r/min)	监测平台 入水时间/s	实际入水 时间/s	监测平台 出水时间/s	实际出水 时间/s
200	7.48	7.25	20.54	20.40
335	8.81	8.80	19.20	19.12
450	11.52	11.54	16.28	16.35

上述对比充分表明:本文所构建的“信号采集—预处理—特征编码—智能分类”一体化识别流程能够有效区分正常与损伤状态,在动态跨介质工况下实现对旋翼结构健康状况的准确判别。

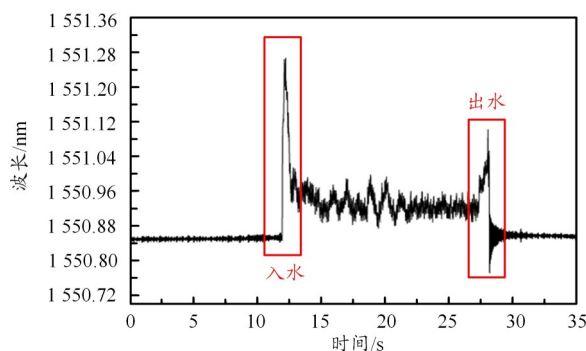


(a)损失率

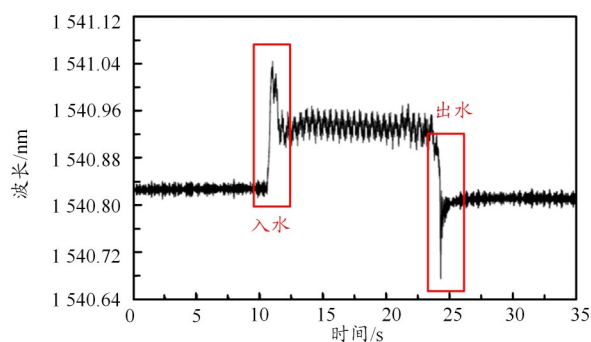


(b)准确率

图8 训练集和验证集测试曲线



(a)正常旋翼监测信号



(b)损伤旋翼监测信号

图9 260 r/min转速下监测结果监测结果

5 结束语

本文从理论建模、传感器研制到智能识别方法,系统研究了跨介质航行器旋翼结构健康监测技术,主要结论如下:

1) 基于叶素理论建立了旋翼在流体、重力及离心载荷耦合作用下的力学模型,为应变监测提供了理论依据。

2) 研制了响应时间优于 100 ms、应变灵敏度为 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 的 FBG 传感器,构建了可升降实验平台与波分/时分复用传感网络,实现了旋翼出入水全过程多测点动态应变的同步采集。

3) “正常”与“损伤”旋翼的应变信号对比表明,损伤导致波动范围扩大 2~4 倍,出现锯齿状起伏与阶跃平台等畸变特征,应变与载荷增幅与正常旋翼相比均超过 30%。

4) 结合 GAF 图像编码与卷积神经网络,构建了损伤智能识别系统,识别准确率达 95.7%。

综上,本文方法为跨介质航行器旋翼结构健康监测与服役安全评估提供了有效的实验方法与技术支撑。后续研究将聚焦于多源数据融合、现场可编程门阵列(FPGA)微型化解调及轻量化模型部署,推动系统向工程化应用发展。

参考文献:

- [1] Zeng Zheng, Lyu Chenxin, Bi Yuanbo, et al. Review of hybrid aerial underwater vehicle: cross-domain mobility and transitions control[J]. Ocean Engineering, 2022, 248(3): 1–13.
- [2] Tan Y H, Chen B M. Survey on the development of aerial-aquatic hybrid vehicles[J]. Unmanned Systems, 2021, 9(3): 263–282.
- [3] Ma Zongcheng, Chen Danqiang, Li Guoshuai, et al. Configuration design and trans-media control status of the hybrid aerial underwater vehicles[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 765.
- [4] 尚秋峰, 巩彪. 光纤周界系统振动信号识别算法研究进展[J]. 光通信技术, 2021, 45(5): 16–20.
- [5] 姜永祥. 基于 FBG 的变电站入侵事件识别方法研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2024.
- [6] Mieloszyk M, Majewska K, Zywicka G, et al. Fibre Bragg grating sensors as a measurement tool for an organic Rankine cycle micro-turbo generator[J]. Measurement, 2020, 157: 107666.
- [7] Tahir B, Saktioto J, Fadhal M, et al. A study of FBG sensor and electrical strain gauge for strain measurements[J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2008, 10: 2564–2568.
- [8] Mieloszyk M, Ostachowicz W. Moisture contamination detection in ad-

hesive bond using embedded FBG sensors[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 84: 1–14.

[9] Laarossi I, Roldán-Varona P, Quintela-Incera M A. Ultrahigh temperature and strain hybrid integrated sensor system based on Raman and femtosecond FBG inscription in a multimode gold-coated fiber[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 37122.

[10] Habisreuther T, Elsmann T, Graf A, et al. High-temperature strain sensing using sapphire fibers with inscribed first-order Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 1–8.

[11] Li Weijie, Liu Tiejun, Xiang Huangbin. Leakage detection of water pipelines based on active thermometry and FBG based quasi-distributed fiber optic temperature sensing[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2021, 32: 1744–55.

[12] 刘媛, 韦世明, 陈少华, 等. 基于光纤布拉格光栅阵列的水泥基建筑全生命周期应变监测实验研究[J]. 传感技术学报, 2025, 38(12): 2237–2245.

[13] 陈帅. 基于分布式应变传感的飞行器构件健康状态监测与评估[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.

[14] 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验验证[J]. 应用力学学报, 2025, 42(3): 542–551.

[15] Zhang Honglin, Wang Zefeng, Teng Fei, et al. Dynamic strain measurement of rotor blades in helicopter flight using fiber bragg grating sensor[J]. Sensors, 2023, 23(15): 6692.

[16] 雷智洋, 王春旭, 吴崇建, 等. 预埋光纤光栅传感器的碳纤维复合材料螺旋桨水下动应变在线测试[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(2): 183–189, 205.

[17] 丁国平, 张懿轩, 严小雨, 等. 基于 FBG 传感网络的螺旋桨变形重构研究[J]. 数字制造科学, 2020, 18(3): 164–168.

[18] 王福. 基于 FBG 传感网络的水下螺旋桨运行变形监测[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.

[19] 徐仁, 鞠世琦, 詹祺, 等. 旋翼跨介质试验系统设计与性能实验研究[J]. 飞行力学, 2024, 42(3): 89–94.

[20] Bai Xingzhi, Zhang Zhe, Wu Wenhua, et al. Fluid dynamics of interacting rotor wake with a water surface[J]. Drones, 2024, 8(9): 469.

[21] Wong K P, Kim H T, Wang A, et al. High-speed interrogation of multiplexed fiber Bragg grating sensors for monitoring dynamic strain responses during a flexible plate impact on a water surface[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(12): 125021.

[22] Panciroli R, Biscarini C, Falcucci G, et al. Live monitoring of the distributed strain field in impulsive events through fiber Bragg gratings[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 61: 60–75.

[23] 段宏. 基于动量叶素理论的风力机风轮建模仿真[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.

[24] 李东阔, 郑源, 张玉全. 基于叶素理论的潮流能水轮机叶片设计研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(7): 113–120.

[25] Wang Bingzhen, Hu Tengyan, Guo Yi, et al. Research on pitch control strategies of horizontal axis tidal current turbine[J]. China Ocean Engineering, 2020, 34(2): 223–231.