

极端环境声学检测理论与技术研究进展*

刘洋¹, 营笑¹, 汪照¹, 闫一天¹, 刘益维¹, 曾周末¹, 邓明晰²

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津, 300072)

(2. 重庆大学航空航天学院 重庆, 400044)

摘要 极端环境下工程结构的服役安全性与寿命保障问题日益凸显, 无损检测与结构健康监测技术在航空航天、深海装置、能源储运系统等关键工程领域发挥着重要作用。超声导波检测作为结构健康监测技术中的重要手段, 因其远距离传播能力强、模态丰富及对损伤敏感性高的特性, 已广泛用于结构状态评估。然而, 在高温、高压、深冷等极端工况下, 导波信号易受到频散特性、模态转换与传感器失效等因素影响, 显著制约着超声导波检测的工程应用。笔者从声学传播理论、极端环境声学传感器与信号处理技术3方面对极端环境下超声导波检测技术的研究现状进行系统梳理, 并总结极端环境结构声学检测技术在模型泛化能力、环境适配性与系统鲁棒性等方面的挑战。

关键词 结构健康监测; 极端环境; 超声导波; 多物理场耦合

中图分类号 TH878

引言

随着航空航天、深空探测、核能利用、海洋开发与氢能储运等高端装备不断向极端环境拓展, 相应服役结构正面临更加严苛的物理工况。例如, 航天器发动机舱壳体长期承受超过600℃的高温与强辐射, 深海作业装备在超过100 MPa的静水压力下运行, 而氢能储运系统中的低温储罐则须应对-253℃以下的深冷脆化风险^[1-3]。这些极端服役条件极易诱发并加速材料的微观缺陷、裂纹萌生和腐蚀损伤等结构退化过程, 材料的潜在失效不仅威胁系统安全, 同时显著增加了运维成本, 以及服役寿命管理的复杂性与不确定性。

无损检测与结构健康监测技术为上述高风险装备提供了一种在役、连续、主动的状态感知手段, 在多领域应用中逐步展现出重要价值^[4]。然而, 面对极端温度、压力、辐照与腐蚀等耦合工况, 传统监测系统在传感器环境适应性、信号稳定采集与边界条件可变性等方面仍存在瓶颈, 尤其是在早期损伤识别、长期可靠性与系统集成智能化等关键环节, 仍面临严峻挑战^[5]。

超声导波具有远距离传播、多模态、对损伤较为敏感等优势, 在关键构件结构健康监测领域已有广泛应用。与点式检测技术相比, 导波能够以较少的

传感器覆盖更大的监测区域, 并可通过模态控制与频率选择实现对特定损伤的增强识别^[6]。然而, 极端环境会改变材料的弹性模量、密度与声阻抗, 引起导波频散关系变化、波速偏移与模式转换, 进而导致信号失真与衰减情况加剧。同时, 热膨胀、腐蚀产物沉积和辐照致缺陷等因素也会在结构内部引入局部非均匀性与非线性, 这使得传统检测系统的可靠性显著下降。近年来, 相关研究领域已逐步发展出适用于高温、深冷和高压等工况下的导波建模方法。此外, 新型传感器的不断开发与优化, 对于传感器本体热失效、输出漂移与信噪比下降等问题, 也起到显著改善作用^[6]。

笔者围绕极端环境对导波传播机制的影响、声学传感器发展以及极端环境声信号处理技术演进这3个方面, 系统梳理当前研究现状与主要技术瓶颈, 旨在为极端服役条件下超声导波结构健康监测系统的高鲁棒性研究提供参考。

1 极端环境多场耦合导波传播机制

极端环境会显著改变结构中导波的传播行为, 包括频散关系、传播速度、模态分布与能量衰减等方面的演化特性, 甚至可能激发模态转换与非线性响应。这些变化源于材料本构参数在温度、应力、腐蚀

* 国家自然科学基金资助项目(12474459)

收稿日期: 2025-05-14; 修回日期: 2025-06-27

或辐照等因素影响下的动态演化,以及结构与外部介质之间声场的耦合增强。例如,在深冷环境中材料刚度的提升加快了导波传播速度,而在辐射环境中微观缺陷的累积降低了材料宏观刚度,导致声速下降和频谱展宽^[7-9]。面对极端环境中多物理场共同作用引起的导波响应演化,构建统一的多场耦合控制框架成为研究焦点。基于当前研究,可将热-力-弹-电-损伤等作用纳入统一偏微分控制体系,其基本形式为

$$\rho(x, t) \ddot{u} = \nabla \cdot [C(x, T, \sigma, D) : \nabla u] + \nabla \cdot [e(x) \cdot Q] + f_{th}(\nabla T) + f_{src} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot [\kappa(x) \nabla T + \kappa_t(x) \nabla \dot{T}] = \rho c(x) \ddot{T} + r(x, t) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot [e^T : \nabla u + \kappa \cdot Q] = 0 \quad (3)$$

其中: $\ddot{u}$ 为加速度; $\nabla \cdot [C(x, T, \sigma, D) : \nabla u]$ 为弹性力项; $C(x, T, \sigma, D)$ 为四阶弹性张量,随温度 T 、应力 σ 和损伤程度 D 变化而变化; $f_{th}(\nabla T)$ 为热应力源项; f_{src} 为外力源项; $c(x)$ 为比热容; $\dot{T}$ 为温升速率; $r(x, t)$ 为内部热源项; $e^T : \nabla u$ 为压电耦合项; κ 为介电常数张量; $\kappa \cdot Q$ 为电介质在电场作用下产生极化的标准部分。

式(1)~(3)考虑了材料在高温、高压、腐蚀、辐照等环境中的本构演化(C 、 ρ 、 c 等随 T 、 σ 、 D 动态变化),引入热-弹-声-电多物理场之间的耦合作用(如热源项 r 、热应力源项 f_{th} 、压电耦合项 $e \cdot Q$),并涵盖了换能激励、信号激发与结构响应过程中的多维驱动机制。式(1)~(3)可作为多物理场导波建模的通用形式,为后文定量建模、控制方程嵌入式学习与结构健康状态识别方法提供理论基础。

1.1 热-声耦合下导波传播特性

高温环境中,材料的热振动增强表现为弹性模量下降、阻尼参数增大与密度轻微变化,易造成导波传播速度降低、频散曲线下移以及能量快速衰减^[8,10-11]。对于Lamb波而言,热致弹性调制效应尤其显著,在高温场中对称模式与反对称模式响应差异明显。例如,Dodson等^[12]在热-弹-声耦合建模中指出, A_0 模式对温度变化更敏感,而 S_0 模式具有更高的温度鲁棒性。温度变化会引发附加应力,进而调制导波传播路径与速度分布。该现象可由Green-Naghdi热弹性理论描述,其控制方程为

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} - \beta \Delta T \quad (5)$$

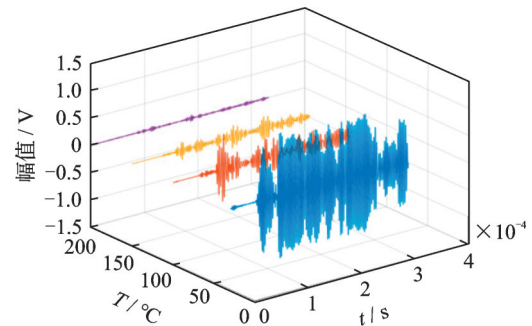
其中: σ_{ij} 为应力; ϵ_{kl} 为应变; C_{ijkl} 为弹性刚度; β 为热应力系数; ΔT 为温升量。

式(4)、(5)揭示了温度可通过附加热应力影响波动传播机制,是建立热-弹-声耦合模型的理论基础^[13]。此外,高温条件下声弹性效应使导波速度随热应力变化而呈现明显变化,速度变化量与热应力呈线性关系,该模型常作为导波频散修正与结构应力监测的理论基础,即

$$\frac{\Delta v}{v_0} = K_\sigma \sigma_T \quad (6)$$

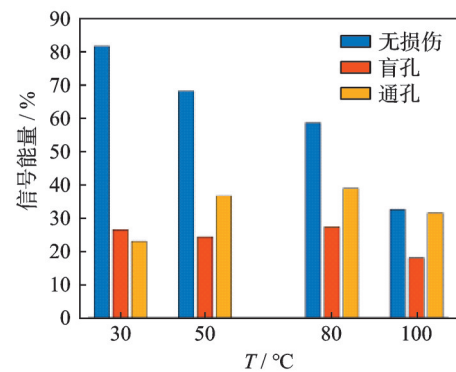
其中: v_0 为无应力状态下的声速; σ_T 为热应力; K_σ 为声弹性系数^[12,14]。

实验研究方面,Roy等^[11]提出了一种基于群速度漂移与相速度补偿的温度修正算法,有效提升了高温环境下结构健康监测的稳定性。Zhang等^[15]在航空高温服役结构中采用变分模态分解与模糊熵联合算法,实现了对高温诱导信号失真的鲁棒识别,进一步提升了特征提取与模态选择精度。结果表明,高温环境下的导波信号幅值显著衰减,且能量分布随温度升高而下降。图1为温度对导波信号时域波形与能量的影响,展示了典型激励路径下,30~



(a) 导波时域信号波形

(a) Time-domain waveforms of guided wave



(b) 导波信号损伤能量变化

(b) Variation of damage-induced guided wave energy

图1 温度对导波信号时域波形与能量的影响^[15]

Fig.1 Effect of temperature on time-domain waveform and energy of guided wave signals^[15]

200℃范围内导波时域响应的幅值变化和不同缺陷状态下的信号能量分布,图1(b)纵坐标信号能量为测试信号幅值与基准信号幅值之比。分析表明,高温背景削弱了缺陷对信号的扰动程度,尤其在存在盲孔与通孔等典型缺陷时,信号能量的辨识度下降趋势更为显著^[15]。

Lamb波频散特性中存在对温度变化不敏感的频率区域,称为零温度系数频点(zero temperature coefficient of frequency,简称ZTCF),可用于提升高温环境下检测信号的稳定性。研究表明,温度对 S_1 等高阶模态的频散关系具有显著影响,尤其在高温下表现出频率漂移趋势^[13]。高温环境下导波的非线性响应亦不容忽视。Niu等^[8]研究表明,在材料热疲劳初期,高阶谐波会显著增强,是早期损伤识别的重要信号表征,这源于高温诱导微裂纹间的非线性接触和微滑移效应。

面对高温条件下导波传播的频散漂移、模态耦合增强与能量衰减等特性,可通过适宜的应对策略进行监测,如构建热-弹-声耦合模型预测频散变化、提取ZTCF频段以提升温度鲁棒性,以及引入非线性信号指标增强微损伤识别能力。未来还需进一步探索高温非稳态环境下多模态导波响应规律,为高温服役结构健康监测提供理论支撑与工程依据。

1.2 应力耦合作用下导波调制与能量泄漏

在深海和高压工况中,结构通常处于强初始应力状态,外部液体介质与固体结构的强耦合作用显著改变了导波的传播行为,表现为频散特性偏移、能量辐射衰减增强和模态结构变化等。深入理解导波传播特性中声弹性效应与固-液耦合机制,是拓展其在深海结构健康监测中应用的基础。

高静水压作用下的预应力状态将改变材料内的弹性响应,进而影响导波速度与频散曲线走向。该现象可由一阶声弹性理论近似描述为

$$\Delta v = v_0 \frac{K\sigma}{2\mu} \quad (7)$$

其中: μ 为剪切模量。

式(7)表明导波相速度随着拉应力或压应力的增加而上升或下降,不同导波模态对应应力变化的响应程度不尽相同。这种应力敏感性可用于实现应力监测,但也会对缺陷识别构成干扰。

深海环境下的液体介质负载作用会引发导波的能量泄漏,形成“泄漏Lamb波”。当导波的相速度大于液体中纵波声速时,结构中传播的导波会以体

波形式将能量向外辐射,导致附加衰减。此时导波的传播常数呈现复数形式,衰减系数与频率、材料密度、液体介质特性密切相关^[7]。Mazzotti等^[16]提出了半解析有限元-2.5D边界元方法,有效模拟了黏弹性介质中的钢方棒结构中体现出的频散模式偏移与能量耗散机制,为深海水-固耦合系统中导波建模提供了高效解法。

地质工程中常见的岩土复合结构表现出显著的各向异性与非均质性,造成导波传播路径发生偏折,频散关系出现非对称特征,甚至模态分裂。在此背景下,Liu等^[17]提出基于完全弹性张量耦合的各向异性导波建模方法,结合应力场驱动的本构张量修正与边界条件补偿,实现对复杂材料导波行为的精细刻画。基于Legendre正交多项式展开构建的黏弹性模型,有效捕捉了层合材料中方向依赖的群速度变化,拓展了对非各向同性波导中导波机制的理解。

为提升高压与深海环境下的导波监检测能力,研究者探索了激发窄带、低频模态以减小泄漏影响,辅以提高灵敏度阵列提升信号捕获效率。同时结合频散导向机制与模态选择策略,在优化信噪比的基础上提升了成像分辨率^[7]。Mazzotti等^[16]指出,液体负载使部分模态消失或能量泄散,图2为黏弹性介质中钢结构嵌入模型的导波频散特性与能量衰减。高频泄漏模态的能量损耗显著增强,须在建模阶段提前识别有效模态窗口,以避免模态混叠造成识别失败。

在深海与高压环境下通过声弹性调制与流体负载效应改变了导波的速度、衰减与模态结构特性。构建考虑预应力-弹性-泄漏-各向异性多场耦合的传播模型,配合阵列优化与模态选择技术,是提升深海导波监检测鲁棒性的关键路径。

1.3 多场耦合条件下导波建模

极端环境对导波传播机理具有重要影响,研究人员不断发展建模理论,以提高传播预测精度与建模对复杂场景的适应性。当前主流导波建模方法包括有限元法、谱元法与半解析有限元法,在高温、预应力、深海负载与各向异性场景中已有广泛应用。图3为复杂结构中声学导波传播的有限元建模框架示意图,在半解析有限元-2.5D边界元方法建模中,通过构建精细网格、边界吸收层、导波激励与接收单元等模块,可实现复杂波导结构中导波模态的多尺度仿真^[16]。

在复杂高温、腐蚀或辐射等极端环境等工况中,导波传播不可避免地受到多物理场协同作用的影

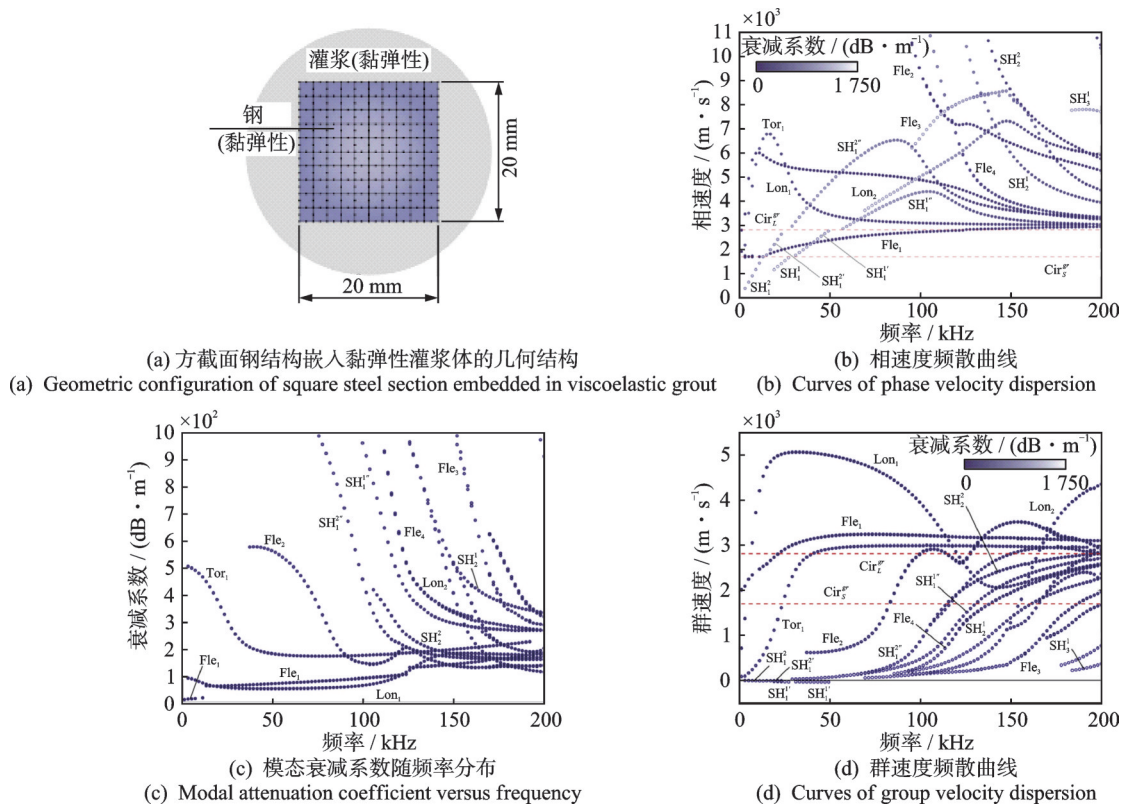


图2 黏弹性介质中钢结构嵌入模型的导波频散特性与能量衰减^[16]
Fig.2 Dispersion characteristics and energy attenuation of guided wave in steel structures embedded in viscoelastic medium^[16]

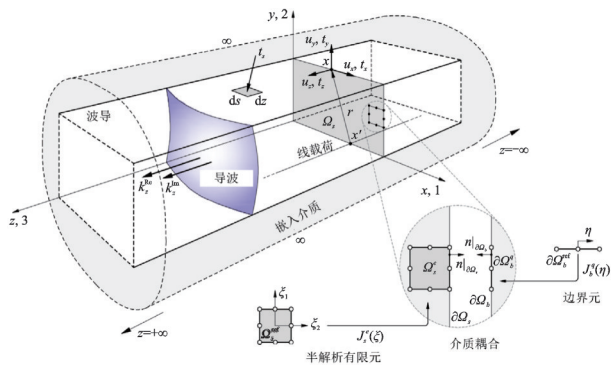


图3 复杂结构中声学导波传播的有限元建模框架示意图^[16]
Fig.3 Schematic framework of finite element modeling for acoustic guided wave propagation in complex structures^[16]

响,须引入显式耦合模型进行模拟^[9,13]。以热-弹-声耦合条件为例,须同时求解热传导方程与弹性波动方程并考虑其相互作用。例如,在 Green-Naghdi III 型模型中,热传导方程^[18]为

$$\rho c \ddot{T} = \nabla \cdot (k_3 \nabla T) + \nabla \cdot (k_4 \nabla \dot{T}) + r \quad (8)$$

其中: ρ 为密度; c 为比热容; k_3 、 k_4 为热传导参数; r 为热源项。

式(8)体现了热波在高温非傅里叶导热场下的有限传播特性,该模型可与弹性波动方程联立,建立

完整的热-弹-声多物理场导波传播模型^[19]。

针对高温、腐蚀或辐照环境下材料退化的演化行为,还需引入应力-腐蚀耦合模型以刻画材料弹性参数的时间演化。例如,总损伤可由物理-化学耦合项^[20]表示,即

$$D = 1 - (1 - D_{\text{cor}})(1 - D_m) \quad (9)$$

$$\sigma = (1 - D) E_0 \varepsilon \quad (10)$$

其中: D_{cor} 和 D_m 分别为腐蚀与机械加载引起的损伤度。

若腐蚀为反应-扩散主导,可采用扩散方程进行建模,即

$$\frac{\partial(\varphi M)}{\partial t} = \nabla \cdot (\varphi d \nabla M) - R(M) \quad (11)$$

$$\frac{\partial(b)}{\partial t} = \frac{A e^{-P_a/(R_g T)}}{R_g T} F_b M \quad (12)$$

其中: M 为腐蚀物浓度; b 为失重率; A 、 P_a 、 F_b 、 R_g 、 T 为反应相关参数,用以反映腐蚀诱导的弹性模量退化过程。

为克服上述非稳态条件下建模的复杂性,研究者引入了基于控制方程约束的物理辅助神经网络,将式(11)、(12)嵌入损失函数中,与少量实测数据联合反演材料参数与损伤状态,显著提升了在标签不全、边界不明等场景下的反演鲁棒性^[21]。在导波

传播过程预测中,替代模型可实现对时空波场的快速建模,在深海或远程应用中展现出较强的实时性与适应性。

2 极端环境声学传感技术发展

高温、高压、强辐射、强腐蚀、深海和深空等极端环境对传统声学感知单元提出了严峻挑战。声波作为一种重要的信息载体,在严峻环境中进行状态监测、过程控制和结构健康诊断等方面具有不可替代的优势。近年来,随着材料科学、微机电系统、光纤传感以及信号处理技术的发展,面向极端环境的声学感知技术取得了显著进展。

2.1 高温压电材料与换能器研究进展

传统锆钛酸铅材料($\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$,简称PZT)的居里温度通常小于 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$,限制了其在高温下的应用。因此,研究重点转向了具有更高居里温度和良好压电性能的材料^[22]。铌酸锂(LiNbO_3 ,居里温度约为 $1\,210\text{ }^{\circ}\text{C}$)是目前应用最为广泛的高温压电单晶之一,特别是Y-cut或特定旋转Y-cut晶体在高温下仍能保持较好的压电性,已应用在高达 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中^[23]。

镓酸镧系同构物如镧镓硅氧烷($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$,简称LGS,居里温度大于 $1\,400\text{ }^{\circ}\text{C}$)及其类似物(镧镓钽酸盐,镧镓铌酸盐)也因无相变、低声损耗和强高温稳定性而备受关注,但此类材料压电系数较低^[24]。Aubert等^[25]研究表明,LGS晶体在高温下具备优良的压电性能,使其成为严苛环境中声波传感器的理想材料,直到其熔点 $1\,470\text{ }^{\circ}\text{C}$ 仍不会发生相变。MSE Supplies公司研制的LGS作为一种有前景的压电材料,其机电耦合系数值介于石英晶体和钽酸锂晶体之间,主要应用于表面声波、体声波设备和各类传感器(如压力传感器、加速度传感器等)^[26]。

铋层结构铁电体(bismuth layer-structured ferroelectrics,简称BLSF,如 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 系)和一些钙钛矿结构陶瓷(如 $(\text{Bi},\text{Na})\text{TiO}_3$ 基无铅陶瓷)均展现出较高的居里温度(大于 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$)和较好的压电性能。Wang等^[27]发现铋钛铁酸盐($\text{Bi}_5\text{Ti}_3\text{FeO}_{15}$,简称BTF)作为典型的Aurivillius型BLSF化合物,具备高居里温度和优异的压电性能,已成为高温传感器应用研究领域的焦点。Irie等^[28]研究指出,具有钙钛矿结构的铋层状化合物在高温环境下表现出优异的压电和铁电性能。例如, $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 的居里温度

高达 $790\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。弛豫铁电单晶如铌镁酸铅-钛酸铅的高温相也具有较高的研究价值^[29]。

在结构与封装方面,为克服高温下材料性能退化、电荷泄漏和封装等难题,常采用特殊结构设计,如利用声波导将声信号传递到低温区的传感器,或采用高温封装材料(如陶瓷、玻璃焊料)和耐高温电缆/接头^[30]。Kim等^[31]提出,利用不锈钢作为基底,并使用高温胶粘剂将压电晶体元件粘合到基底上,再使用高温矿物绝缘电缆和银膏进行电气连接。高温下压电材料可能出现的导电性增加和热释电效应干扰,也是设计中需要考虑的问题^[32]。

2.2 磁致伸缩传感器在极端环境下的应用

与传统压电传感器相比,磁致伸缩传感器具有非接触式测量、无需耦合剂、适用于恶劣工况和复杂表面检测等优势,在极端环境结构健康监测中展现出广阔的应用前景^[33]。磁致伸缩效应的核心在于磁致伸缩材料在磁场作用下产生机械变形,常见的材料包括铁镍合金(如Terfenol-D)、非晶态磁性材料以及纳米晶材料等。近年来,随着材料科学的发展,新型磁致伸缩材料不断涌现。例如,Fe-Ga合金由于具有高应变灵敏度、良好的机械性能和较高的居里温度,逐渐成为高温磁致伸缩传感器的理想选择^[34]。磁致伸缩传感器工作原理如图4所示^[35]。

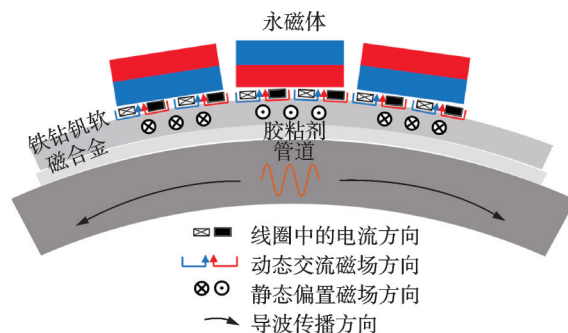


图4 磁致伸缩传感器工作原理图^[35]

Fig.4 Working principle diagram of transducer^[35]

磁致伸缩传感器的主要挑战在于信噪比相对较低和换能效率不高,尤其在极端环境下,材料磁性随温度或应力变化而发生衰减,传感器输出稳定性和灵敏度会受到影响。针对这些问题,研究人员提出了多种改进策略,包括采用高性能磁致伸缩材料、优化线圈和磁场结构以及开发信号增强算法等。Luo等^[36]设计了一种新型Fe-Ga基磁致伸缩传感器,通过优化材料结构和磁场分布,有效提高了材料在高温环境下的信号灵敏度和稳定性,在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下仍能稳定检测导波信号。

此外,磁致伸缩传感器还面临由材料非线性磁弹耦合特性带来的建模困难,尤其是在高温或高应力环境下,磁致伸缩材料的弹性和磁性特性之间存在复杂的非线性耦合效应,需要建立精确的磁-机耦合模型,以准确预测传感器响应。为此,Wang等^[37]提出了一种基于非线性磁弹耦合的多物理场有限元仿真模型,较好地预测了复杂工况下磁致伸缩材料的动态响应特性,为传感器设计和信号解调提供了理论支撑。Vinogradov等^[38]提出了一种基于高磁致伸缩系数 Fe-Co 合金条带的导波激励方法,在 800 °C 的环境下实现了稳定的导波激励。

2.3 光纤声学传感原理与极端环境下应用挑战

光纤本身由石英等耐高温、耐腐蚀材料构成,具有抗电磁干扰、本质安全、体积小、易于复用和分布式测量等优势。Zhu等^[39]采用蓝宝石光纤等特种光纤制作了法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Pérot interferometer,简称 FPI)传感器,可在高于 1 000 °C 的环境下工作。Zhang等^[40]研制了基于 SiO₂/Au/Cr 薄膜调制的光纤 FPI 传感器,在高温高压环境下表现出优异的性能,基于光纤锥形尖端 FPI 结构图如图 5 所示。迈克尔逊干涉仪和马赫-曾德尔干涉仪型传感器也常用于高灵敏度声学探测^[41]。

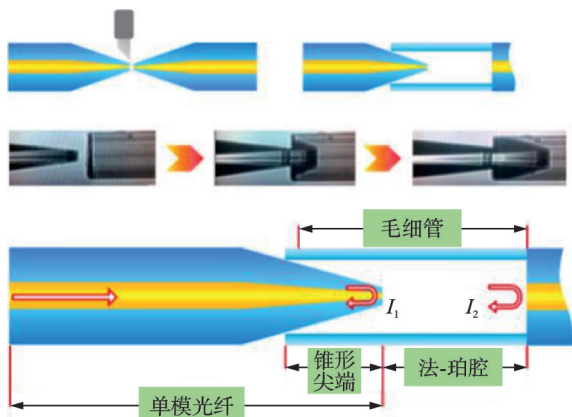


图 5 基于光纤锥形尖端的 FPI 结构图^[40]

Fig.5 Schematic of the fiber-tapered-tip-based FPI

Guan等^[42]研究表明,普通光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,简称 FBG)耐温有限(小于 300 °C),但采用飞秒激光刻写的再生 FBG 或特殊涂层保护的 FBG,以及蓝宝石光纤 FBG,可显著提高耐温性(可达 1 000 °C 以上)和耐压性。Laffont等^[43]开发的聚偏氟乙烯/TiO₂/石墨烯 FBG 传感器,表现出良好的高温应用性能。Wang等^[44]研制的高空间分辨率 FBG 传感器阵列能够同时测量海洋温度和深度。

目前,光纤声学传感器在极端环境下的应用主要存在以下挑战:光纤传感器的灵敏度可能低于压电传感器;解调系统相对复杂且成本较高;特种耐高温/耐压光纤(如蓝宝石光纤)价格昂贵且连接困难;在强振动环境下可能出现信号衰减或交叉敏感问题^[45]。

3 极端环境下导波信号处理方法

极端环境下的声学信号往往伴随着强烈的背景噪声和干扰,且信号传播可能因恶劣环境而发生畸变。因此,先进的信号处理技术至关重要。

3.1 最优基线法和基线信号拉伸法

为消除环境对基线信号的影响,研究者提出了最优基线法(optimal baseline selection,简称 OBS)^[46]和基线信号拉伸法(baseline signal stretching,简称 BSS)^[47]。Konstantinidis等^[46]提出了最优基线减法,以提高基于导波的结构健康监测在温度波动下的长期稳定性,并降低多条基线对损伤检测的掩盖效应。通过建立不同温度下的参考信号数据库,与当前温度最接近的参考信号进行比较,采用信号包络而非原始射频信号进行基线减法,提高了对温度变化的鲁棒性。然而,这种方法需要建立庞大的参考数据库,且存在误减真实损伤信号的风险。

Croxford等^[47]和 Lu等^[48]提出通过 BSS 方法对信号时间轴进行反向拉伸补偿,可部分纠正温度引起的失配。然而,该方法未能完全补偿温度变化对各个波包的影响。Clarke等^[49]将 OBS 与 BSS 相结合,并应用于稀疏阵列导波监测系统,在温差较大的环境中实现了信号补偿,进而有效检测和定位结构中的小型损伤。后续研究优化了导波模式选择、传感器布置,并在温度补偿算法方面进一步增加了相邻基线之间的温度步长,使得基线采集期间对温度波动具有更大的容忍度^[50]。

Harley等^[51-52]提出了一种利用尺度不变相关系数的尺度变换方法,通过有效估算拉伸系数、增强建模误差的稳健性以及局部峰值相干性,实现了更优的超声波温度补偿。与最佳信号拉伸等传统方法相比,该方法具有更快的计算速度。Roy等^[11]提出了一种基于物理建模的温度补偿方法,通过分析温度对材料属性和导波传播的影响,建立了传感器信号变化与材料属性变化之间的线性函数关系。该模型利用匹配追踪算法对信号进行分析和重构,能够在不同温度条件下准确预测和补偿导波信号的变

化。Wang等^[53]提出了一种基于参考匹配的方法,利用在不同温度下采集的参考信号,建立温度与信号特征之间的关系,从而对未知温度下的信号进行补偿。Mariani等^[54]提出了一种新的温度补偿方法,可根据温度变化对导波传播速度以及对换能器激发信号相位的影响来调整信号的时间轴,以对齐当前信号和参考信号。在不同的噪声水平、特征反射和缺陷尺寸条件下,均表现出更好的损伤检测性能。

Giannakeas等^[55]提出了一种新的导波结构健康监测温度补偿框架,通过从小尺度试样中提取补偿因子,并利用贝叶斯回归模型将其推广至更大尺度的结构。图6为温差校正的冲击定位成像结果,每次冲击温差为10℃,冲击顺序自上而下。该框架减少了所需的基准信号数量,提高了系统的实用性和准确性,增强了大型复合结构的损伤检测和定位。Kumar等^[56]讨论了使用带有三角形全局约束的动态时间规整算法(triangular global constraint dynamic time warping,简称Tri-DTW)进行温度补偿,与传统的Sakoe-Chiba约束动态时间规整相比, Tri-DTW在保持对齐精度的同时,将计算复杂度降低了4倍,显著提高了算法的效率。

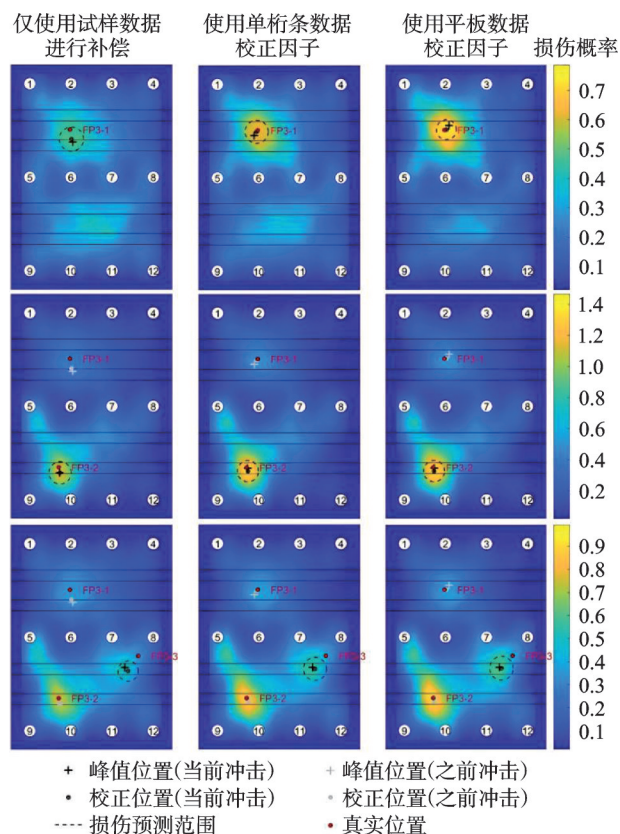


图6 温差校正的冲击定位成像结果^[55]

Fig.6 Impact localization imaging results with temperature compensation^[55]

Vospemig等^[57]详细分析了结构在受拉或受压状态下导波信号的相位、幅度和传播速度的偏移,并提出了一种基于色散补偿算法的方法,在空间域内对信号进行校正,以减小因应力状态变化引起的时间延迟和幅值偏差。该研究验证了在多模态传播背景下,通过提取某一主模(例如弯曲A₀模)并补偿其色散,可更准确地重建原始无应力状态下的信号,并提高故障特征检测的准确性。Mohabuth等^[58]提出了一种基于参考信号匹配的补偿方法,通过在不同应力载荷条件下建立参考信号库,实时匹配当前信号,补偿载荷引起的变化,提高了损伤检测的准确性。Wang等^[59]提出了改进的基于匹配追踪的载荷和温度补偿方法,引入复合环境指数,用于描述温度和载荷的耦合条件,以反映环境变化对导波信号的影响。同时,采用Gabor函数作为原子函数,对导波信号进行迭代分解和重构,通过多次迭代补偿残差信号,提高了补偿精度。Ouyang等^[60]构建了自适应高斯混合模型,描述导波信号特征(信号幅度、相位等)在不同加载条件下的概率分布。采用优化的概率迁移距离度量方法,将当前信号特征与参考特征进行匹配,建立概率差异指数与裂纹长度之间的关系,实现了裂纹的定量评估。

3.2 数据驱动信号特征提取

为解决可变环境条件下损伤检测的复杂性,学者们引入了各种监督学习方法。Wang等^[61]通过卷积神经网络(convolutional neural network,简称CNN)训练并建立检测信号与速度图之间的关系,用于在线腐蚀成像。Tong等^[62]提出了一种带监督的深度学习反演,将其应用于导波层析成像中的腐蚀映射。Wang等^[63]提出了一种基于特征补偿和深度学习网络重建的逐步反演方法,结合高阶螺旋导波扩展成像视野,实现了管道缺陷的高分辨率成像。然而,在复杂或现实中的结构获取此类数据集,往往需要付出巨大成本,这也限制了监督学习方法的实际应用。

无监督机器学习方法是克服这一挑战的有效替代方案。Sawant等^[64]利用CNN自动提取导波信号中的特征,并通过高斯混合模型(Gaussian mixture model,简称GMM)对这些特征进行建模,再利用Kullback-Leibler散度计算信号差异,实现损伤的分类与定位补偿。在CNN有效性的基础上,开发了一种提供温度补偿的损伤识别和定位的方法,该方法使用迁移学习技术来减少可训练参数的数量,图7为结合CNN和GMM的温度补偿损伤定位方法。

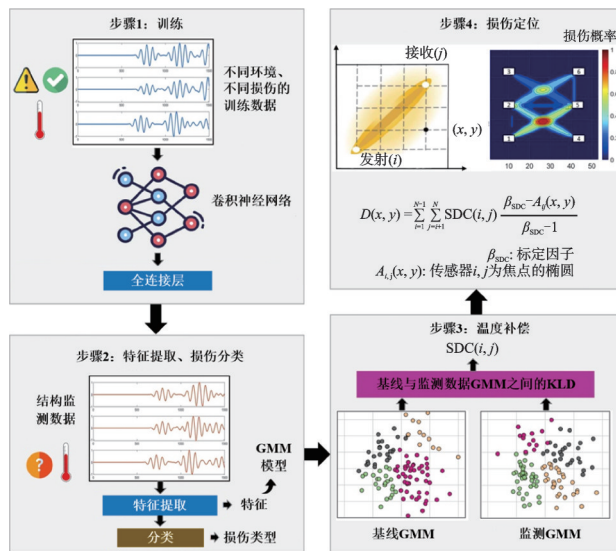


图7 结合CNN和GMM的温度补偿损伤定位方法^[64]

Fig.7 Temperature-compensated damage localization method combining CNN and GMM^[64]

Fan 等^[65]提出了结合卷积自编码器(convolutional autoencoder, 简称 CAE)和前馈神经网络(feedforward neural network, 简称 FFNN)的多功能框架。CAE 用于从原始导波信号中提取低维的潜在空间表示, 并实现信号的重构。通过 FFNN 建立潜在空间与结构状态(如损伤程度和载荷条件)之间的映射关系, 实现状态的估计和信号的生成。在缺失部分数据的情况下, 该模型仍能保持较高的性能, 显示出良好的泛化能力。

Yang 等^[66]提出了一种结合长期和短期主成分分析(principal component analysis, 简称 PCA)的重构方法, 称为长短期 PCA 重构。该方法利用长期 PCA 模型捕捉结构在正常环境条件下的导波信号特征, 短期 PCA 模型则用于识别近期环境变化对导波信号的影响。通过比较长期和短期 PCA 模型的重构误差, 可有效区分由环境变化引起的信号变化和由结构损伤引起的异常信号。随后, Yang 等^[67]提出了一种噪声增强策略, 通过在训练数据中引入适度的噪声, 增强自编码器模型对环境变化的鲁棒性, 降低了误报率。

4 总结与展望

极端环境下结构健康监测技术的发展正面临传播机理高度复杂、建模泛化能力受限以及传感系统环境适应性不足等多重挑战。笔者围绕超声导波技术, 在高温、深冷、高压、强辐照与腐蚀环境中的传播特性、建模理论、传感器适应与信号处理关键问题,

系统梳理了现阶段研究进展与工程瓶颈。

后续研究中, 极端环境结构健康监测系统亟需实现从“功能适应”向“环境协同”的跃升。在建模层面, 应进一步发展统一的热-力-弹-声-损伤多场耦合传播框架, 并结合数字孪生与参数辨识技术, 实现动态模型在线修正与预测。在传感技术层面, 应加强高温/深冷下的新型材料与集成工艺研究, 构建具备自适应耦合、自修复与长周期稳定输出能力的智能传感单元。在信号处理与系统融合层面, 推动多模态传感融合、异构数据处理与人工智能辅助决策机制的集成, 提升系统的智能感知与实时响应能力。面向未来航天、核能、深海与氢能系统的服役需求, 极端环境结构健康监测将在材料状态演化监测、灾变预警与服役寿命管理等领域发挥出更核心的技术价值。

参 考 文 献

- [1] BROWN C D. Elements of spacecraft design[M]. Menlo Park, CA: AIAA, 2002.
- [2] SONG W, CUI W. Review of deep-ocean high-pressure simulation systems[J]. Marine Technology Society Journal, 2020, 54(3): 68-84.
- [3] BERTSCH K M, NAGAO A, RANKOUHI B, et al. Hydrogen embrittlement of additively manufactured austenitic stainless steel 316L[J]. Corrosion Science, 2021, 192: 109790.
- [4] ZHOU L, YAN G, WANG L, et al. Review of benchmark studies and guidelines for structural health monitoring[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(7): 1187-1206.
- [5] AHMED H, NASRAZADANI S, JU S. Review paper on harsh environmental structural health monitoring [J]. International Journal of Scientific Research & Engineering Trends, 2021, 7(4): 11.
- [6] HAMEED M S, LI Z, ZHENG K. Damage detection method based on continuous wavelet transformation of Lamb wave signals[J]. Applied Sciences, 2020, 10(23): 8610.
- [7] GORGIN R, LUO Y, WU Z J. Environmental and operational conditions effects on lamb wave based structural health monitoring systems: a review[J]. Ultrasonics, 2020, 105: 106114.
- [8] NIU X C, ZHU L Q, YANG W L, et al. Temperature effects on nonlinear ultrasonic guided waves[J]. Materials, 2023, 16(9): 3548.
- [9] MATLACK K H, WALL J J, KIM J Y, et al. Evaluation of radiation damage using nonlinear ultrasound[J].

- Journal of Applied Physics, 2012, 111(5): 054911.
- [10] KAZYS R, VASKELIENE V. High temperature ultrasonic transducers: a review[J]. Sensors, 2021, 21(9): 3200.
- [11] ROY S, LONKAR K, JANAPATI V, et al. A novel physics-based temperature compensation model for structural health monitoring using ultrasonic guided waves[J]. Structural Health Monitoring, 2014, 13(3): 321-342.
- [12] DODSON J C, INMAN D J. Investigating the thermally induced acoustoelastic effect in isotropic media with lamb waves[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136(5): 2532-2543.
- [13] YANG X F, XUE Z P, ZHENG H, et al. Mechanic-electric-thermal directly coupling simulation method of lamb wave under temperature effect[J]. Sensors, 2022, 22(17): 6647.
- [14] MOHABUTH M, KOTOUSOV A, NG C T. Large acoustoelastic effect for lamb waves propagating in an incompressible elastic plate[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145(3): 1221.
- [15] ZHANG F, ZHANG K, CHENG H, et al. Ultrasonic guided wave health monitoring of high-temperature aircraft structures based on variational mode decomposition and fuzzy entropy[J]. Actuators, 2024, 13(10): 411.
- [16] MAZZOTTI M, BARTOLI I, MARZANI A, et al. A coupled SAFE-2.5D BEM approach for the dispersion analysis of damped leaky guided waves in embedded waveguides of arbitrary cross-section[J]. Ultrasonics, 2013, 53(7): 1227-1241.
- [17] LIU H Y, HUANG Z Q, YIN Z, et al. Investigation of viscoelastic guided wave properties in anisotropic laminated composites using a legendre orthogonal polynomials expansion-assisted viscoelastodynamic model[J]. Polymers, 2024, 16(12): 1638.
- [18] BARGMANN S. Remarks on the Green-Naghdi theory of heat conduction[J]. Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, 2013, 38(2): 101-118.
- [19] 邓武兵, 李念琪, 符力耘. 基于 Biot 熵流的孔隙介质热弛豫效应[J]. 科学通报, 2023, 68(26): 3518-3528. DENG Wubing, LI Nianqi, FU Liyun. The thermal-relaxation of porous rock by using Biot's entropy flow[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(26): 3518-3528. (in Chinese)
- [20] 刘庆生, 段旭, 李江霖, 等. 稀土电解槽石墨内衬氧化腐蚀-应力损伤耦合本构模型[J]. 高校化学工程学报, 2019, 33(5): 1223-1231. LIU Qingsheng, DUAN Xu, LI Jianglin, et al. An oxidation corrosion and stress damage coupling constitutive model for graphite lining used in rare earth electrolyzers[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2019, 33(5): 1223-1231. (in Chinese)
- [21] PASADAS D J, BARZEGAR M, RIBEIRO A L, et al. Locating and imaging fiber breaks in CFRP using guided wave tomography and eddy current testing[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7377.
- [22] ZAGHARI B, WEDDELL A S, ESMAEILI K, et al. High-temperature self-powered sensing system for a smart bearing in an aircraft jet engine[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 6165-6174.
- [23] FRITZE H. High-temperature piezoelectric crystals and devices[J]. Journal of Electroceramics, 2011, 26(1): 122-161.
- [24] ZHENG Y Q, XIN J, KONG H K, et al. Growth and characterization of langasite-type $\text{Ba}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ single crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(7/8/9): 2284-2287.
- [25] AUBERT T, KOKANYAN N, ELMAZRIA O. Langasite as piezoelectric substrate for sensors in harsh environments: investigation of surface degradation under high-temperature air atmosphere[J]. Sensors, 2021, 21(17): 5978.
- [26] BOHM J, CHILLA E, FLANNERY C, et al. Czochralski growth and characterization of piezoelectric single crystals with langasite structure: $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (LGS), $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_{14}$ (LGN) and $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ (LGT) II. Piezoelectric and elastic properties[J]. Journal of Crystal Growth, 2000, 216(1/2/3/4): 293-298.
- [27] WANG Q, LIANG E M, WANG C M. High performance bismuth titanate-ferrite piezoelectric ceramics for high-temperature applications[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(8): 5080-5087.
- [28] IRIE H, MIYAYAMA M, KUDO T. Structure dependence of ferroelectric properties of bismuth layer-structured ferroelectric single crystals[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 90(8): 4089-4094.
- [29] SUN E W, CAO W W. Relaxor-based ferroelectric single crystals: growth, domain engineering, characterization and applications[J]. Progress in Materials Science, 2014, 65: 124-210.
- [30] ZHANG S, YU F. Piezoelectric materials for high temperature sensors[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2011, 94(10): 3153-3170.
- [31] KIM K, ZHANG S J, SALAZAR G, et al. Design, fabrication and characterization of high temperature piezoelectric vibration sensor using YCOB crystals[J].

- Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 178: 40-48.
- [32] KIRK K J, SCHEIT C W, SCHMARJE N. High-temperature acoustic emission tests using lithium niobate piezocomposite transducers[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2007, 49(3): 142-145.
- [33] CALKINS F T, FLATAU A B, DAPINO M J. Overview of magnetostrictive sensor technology[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2007, 18(10): 1057-1066.
- [34] HRISTOFOROU E, K TENA A. Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 316(2): 372-378.
- [35] ZHOU J J, ZHANG H, CHEN Y P, et al. Development of a meander-coil-type dual magnetic group circumferential magnetostrictive guided wave transducer for detecting small defects hidden behind support structures[J]. *Micromachines*, 2024, 15(10): 1261.
- [36] LUO M Z, LI W J, WANG J M, et al. Development of a novel guided wave generation system using a giant magnetostrictive actuator for nondestructive evaluation [J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 779.
- [37] WANG T Z, ZHOU Y H. Nonlinear dynamic model with multi-fields coupling effects for giant magnetostrictive actuators [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, 50(19): 2970-2979.
- [38] VINOGRADOV S, COBB A, FISHER J. Evaluation of FeCo magnetostrictive sensors for SHM of components operating in harsh environmental conditions[C]//46th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Portland, OR, USA: QNDE, 2019: QNDE2019-1234.
- [39] ZHU C, GERALD R E, HUANG J. Progress toward sapphire optical fiber sensors for high-temperature applications[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(11): 8639-8655.
- [40] ZHANG X P, PENG W, ZHANG Y. Fiber fabry-perot interferometer with controllable temperature sensitivity [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5658-5661.
- [41] LIU B, RUAN Y X, YU Y G. All-fiber laser-self-mixing sensor for acoustic emission measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(12): 4062-4068.
- [42] GUAN B O, ZHANG Y, WANG H J, et al. High temperature resistant fiber Bragg grating lasers for sensing applications[C]//20th International Conference on Optical Fibre Sensors. Edinburgh, United Kingdom: SPIE, 2009: 1076-1079.
- [43] LAFFONT G, COTILLARD R, FERDINAND P, et al. Regenerated fiber Bragg grating sensors for high temperature monitoring in sodium-cooled fast reactor [C]//International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13). Paris: IAEA, 2013: 4-7.
- [44] WANG L, WANG Y, WANG J, et al. A high spatial resolution FBG sensor array for measuring ocean temperature and depth[J]. *Photonic Sensors*, 2020, 10: 57-66.
- [45] LU P, LALAM N, BADAR M, et al. Distributed optical fiber sensing: review and perspective[J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(4): 5113955.
- [46] KONSTANTINIDIS G, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The temperature stability of guided wave structural health monitoring systems[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15: 967.
- [47] CROXFORD A J, WILCOX P D, KONSTANTINIDIS G, et al. Strategies for overcoming the effect of temperature on guided wave structural health monitoring [C]//Health Monitoring of Structural and Biological Systems. San Diego, California, United States: SPIE, 2007: 719435.
- [48] LU Y H, MICHAELS J E. A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations[J]. *Ultrasonics*, 2005, 43(9): 717-731.
- [49] CLARKE T, CAWLEY P, WILCOX P D, et al. Evaluation of the damage detection capability of a sparse-array guided-wave SHM system applied to a complex structure under varying thermal conditions[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2009, 56(12): 2666-2678.
- [50] CLARKE T, SIMONETTI F, CAWLEY P. Guided wave health monitoring of complex structures by sparse array systems: influence of temperature changes on performance[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(12): 2306-2322.
- [51] HARLEY J B, MOURA J M F. Scale transform signal processing for optimal ultrasonic temperature compensation[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2012, 59(10): 2226-2236.
- [52] HARLEY J B, MOURA J M F. Guided wave temperature compensation with the scale-invariant correlation coefficient[C]//2011 IEEE International Ultrasonics Symposium. Orlando, FL, USA: IEEE,

- 2011; 1068-1071.
- [53] WANG G, WANG Y, SUN H, et al. A reference matching-based temperature compensation method for ultrasonic guided wave signals[J]. *Sensors*, 2019, 19: 5174.
- [54] MARIANI S, HEINLEIN S, CAWLEY P. Compensation for temperature-dependent phase and velocity of guided wave signals in baseline subtraction for structural health monitoring[J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19: 26-47.
- [55] GIANNAKEAS I N, SHARIF K Z, ALIABADI M H. An up-scaling temperature compensation framework for guided wave-based structural health monitoring in large composite structures[J]. *Structural Health Monitoring*, 2023, 22: 777-798.
- [56] KUMAR N, GUPTA P, CARLSON J E. Temperature compensation using constraint based dynamic time warping in guided waves, NDT[C]//EWSHM 2024 11th European Workshop on Structural Health Monitoring. Potsdam, Germany: German Society for Non-Destructive Testing (DGZfP), 2024: 1-9.
- [57] VOSPERNIG M, HEUER R, REITERER M. Demonstration of guided wave sensor signals effected by cyclic loads and breathing fatigue cracks [C]//6th European Workshop on Structural Health Monitoring Dresden. Germany: German Society for Non-Destructive Testing (DGZfP), 2012: 1-8.
- [58] MOHABUTH M, KOTOUSOV A, NG C T, et al. Implication of changing loading conditions on structural health monitoring utilising guided waves[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2): 025003.
- [59] WANG Y S, WANG G, WU D, et al. An improved matching pursuit-based temperature and load compensation method for ultrasonic guided wave signals[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 67530-67541.
- [60] OUYANG L, FANG F, QIU L, et al. Guided-wave dynamic probability model-based crack quantification method for metal structures[J]. *e-Journal of Nondestructive Testing*, 2024, 29(7): 29748.
- [61] WANG X, LIN M, LI J, et al. Ultrasonic guided wave imaging with deep learning: applications in corrosion mapping[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 169: 108761.
- [62] TONG J K, LIN M, WANG X C, et al. Deep learning inversion with supervision: a rapid and cascaded imaging technique[J]. *Ultrasonics*, 2022, 122: 106686.
- [63] WANG Z, YING X, TONG J, et al. Feature compensation and network reconstruction imaging with high-order helical modes in cylindrical waveguides[J]. *Ultrasonics*, 2025, 151: 107631.
- [64] SAWANT S, PATIL S, THALAPIL J, et al. Temperature variation compensated damage classification and localisation in ultrasonic guided wave SHM using self-learned features and Gaussian mixture models[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31: 055008.
- [65] FAN Y M, KOPSAFTOPOULOS F. Data-driven framework for forward and inverse problems in guided waves-based structural health monitoring under varying environmental and operating conditions[EB/OL]. (2024-10-06) [2025-04-28]. <https://arxiv.org/abs/2410.01127>.
- [66] YANG K, KIM S, YUE R, et al. Long-term guided wave structural health monitoring in an uncontrolled environment through long short-term principal component analysis[J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 21(4): 1501-1517.
- [67] YANG K, WANG L, GAO C, et al. Improving autoencoder-based unsupervised damage detection in uncontrolled structural health monitoring under noisy conditions[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45: 91-100.



第一作者简介:刘洋,男,1985年5月生,博士、教授。主要研究方向为声场理论、超声传感器及超高分辨率成像技术。曾发表《Sparse ultrasonic guided wave imaging with compressive sensing and deep learning》(《Mechanical Systems and Signal Processing》2022, Vol.178)等论文。
E-mail: ultrasonicslab@tju.edu.cn

通信作者简介:邓明晰,男,1965年7月生,博士、教授。主要研究方向为超声和非线性超声。
E-mail: mx deng@cqu.edu.cn