

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514746

基于直写式超声传感阵列的裂纹非线性导波检测*

周梓晗^{1,2}, 李叶海³, 付汝龙⁴, 洪晓斌⁵, 郭师峰^{2,6}

(1. 南方科技大学电子与电气工程系 深圳 518055; 2. 中国科学院深圳先进技术研究院深圳市智慧传感与系统检测重点实验室 深圳 518055; 3. 中山大学航空航天学院 深圳 518107; 4. 广东汕头超声电子股份有限公司超声仪器分公司 汕头 515041; 5. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510641; 6. 中国科学院深圳先进技术研究院广东省机器人与智能系统重点实验室 深圳 518055)

摘要:针对航空航天飞行器结构上因紧固件孔周围应力集中导致的早期微裂纹精度检测需求,以及传统压电超声传感器结构兼容性不足、常规线性导波检测方法对微裂纹敏感度有限的挑战,提出了一种基于直写式压电超声传感阵列的导波非线性检测方法,旨在实现微米级裂纹的高灵敏度识别。该方法通过结合导波非线性效应,设计并制备了一种局部增强型传感阵列,由外侧环形基频(0.5 MHz)激励单元与内侧弧形倍频(1 MHz)接收单元构成,以优化非线性信号的激发与接收。利用直写式压电超声传感器制备工艺,实现了超薄柔性聚偏氟乙烯-三氟乙烯共聚物(P(VDF-TrFE))压电超声传感阵列与待测结构表面的原位一致性集成,避免了传统耦合方式带来的信号不稳定问题。在此基础上,提出多路径脉冲收发检测策略,通过阵列接收的超声信号进行频域分析与特征提取,计算了表征裂纹非线性响应的关键参数——相对非线性系数,实现了裂纹位置识别,并建立其与裂纹长度(2.5、4和6 mm)之间的量化关系。实验结果表明,所提方法能有效捕获导波非线性特征的演化趋势,实现了对早期微裂纹的尺寸与扩展方向的可靠检测,为航空航天结构关键区域的原位、高精度检测提供了一条具有前景的新技术途径。

关键词: 直写式; 压电超声传感阵列; 疲劳裂纹; 非线性超声导波; P(VDF-TrFE) 传感阵列

中图分类号: TH17 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.60

Nonlinear guided wave detection of cracks based on direct-writing ultrasonic sensor array

Zhou Zihan^{1,2}, Li Yehai³, Fu Rulong⁴, Hong Xiaobin⁵, Guo Shifeng^{2,6}

(1. Department of Electronic and Electrical Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen Key Laboratory of Smart Sensing and Intelligent Systems, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China; 3. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China; 4. Ultrasonic Instrument Branch, Guangdong Goworld Co., Ltd., Shantou 515041, China; 5. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 6. Guangdong Provincial Key Laboratory of Robotics and Intelligent System, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To address the critical need for precise detection of early-stage micro-cracks originating from stress concentration around fastener holes in aerospace structures, and to overcome the challenges associated with the poor structural compatibility of traditional piezoelectric ultrasonic sensors and the limited sensitivity of conventional linear guided wave methods, this study proposes a nonlinear guided wave detection method based on a direct-write piezoelectric ultrasonic sensor array, aiming to achieve high-sensitivity identification of micron-scale cracks. The method involves the design and fabrication of a locally enhanced sensor array by integrating the nonlinear effects of guided waves. This array consists of an outer annular excitation element for the fundamental frequency (0.5 MHz) and an inner arc-shaped receiving element optimized for the second harmonic frequency (1 MHz), thereby optimizing the excitation and

收稿日期: 2025-12-02 Received Date: 2025-12-02

* 基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB3214301)、国家自然科学基金(U2133213, 12426308)、广东省基础与应用基础研究基金委员会(2023B1515120090)、深圳市科技创新委员会(JCYJ20241202124939053)项目资助

reception of nonlinear signals. Utilizing the fabrication process of direct-write piezoelectric ultrasonic sensors, an ultrathin and flexible poly vinylidene fluoride-trifluoroethylene (P(VDF-TrFE)) copolymer piezoelectric ultrasonic sensor array is achieved. This enables in-situ and consistent integration with the surface of the structure under test, effectively eliminating the signal instability issues associated with traditional coupling methods. Building on this foundation, the study introduces a multi-path pulse transmission-reception detection strategy. Frequency-domain analysis and feature extraction of the received ultrasonic signals are performed to calculate the relative nonlinear coefficient, a key parameter characterizing crack-induced nonlinearity. This facilitates crack location identification and establishes a quantitative relationship with crack lengths (2.5, 4, 6 mm). Experimental results demonstrate that the proposed method effectively captures the evolution trend of nonlinear guided wave features, enabling reliable detection of both the size and propagation direction of early-stage micro-cracks. This work provides a promising new technical pathway for the in-situ, high-precision inspection of critical regions in aerospace structures.

Keywords: direct-writing; piezoelectric ultrasonic sensor array; fatigue crack; nonlinear ultrasonic guided waves; P(VDF-TrFE) sensor array

0 引言

航空航天飞机结构中,紧固件孔部位的疲劳裂纹是典型损伤形式之一,此类裂纹会显著削弱结构的承载能力,进而对飞行安全构成严重威胁。因此,及时获取损伤的状态与位置信息,防止因损伤引发的结构性能退化或失效,对于保障飞行器安全运行具有重要意义。为兼顾维护成本控制与安全性提升,在紧固件孔周围部署有效的疲劳裂纹检测系统尤为关键。

在金属紧固件孔边疲劳裂纹的无损检测技术中,典型方法包括涡流检测^[1]、非接触式激光干涉仪^[2]、声学剪切干涉^[3]以及超声导波^[4]等。其中,超声导波具有传播距离远、可探测隐蔽区域以及多模式耦合等特点^[5](例如频散特性、多种模式以及波与缺陷的相互作用),因而具备较强的综合检测能力。

Barski 等^[6]通过在结构表面布置多组超声探头,在 2 mm 厚的铝板上激励 125 kHz 的 A_0 模式 Lamb 波实现了对裂纹长度的估计。Qiu 等^[7]提出了基于导波高斯混合模型的传播检测方法,实现了全尺寸飞机疲劳裂纹的检测。Wang 等^[8]通过在 1.6 mm 厚的铝板上激励为 1.5 MHz 的 S_0 模式 Lamb 波,并基于能量比算法实现了对大尺寸裂纹的有效表征。尽管上述方法在疲劳裂纹检测方面取得了一定进展,但其多依赖于导波线性特征,仍存在数据分析复杂性高、对早期微裂纹灵敏度有限等问题。

基于谐波频域非线性特征变化的非线性超声检测技术具有检测精度高、对微观损伤敏感等优势,已成为材料早期损伤诊断与预防的重要手段^[9-10]。相较于线性超声方法^[11],非线性超声导波技术微裂纹具有更高的识别灵敏度。一般认为宽度在 0.2~0.5 mm^[12],长度小于超声波半波长^[13-14]的裂纹属于微裂纹范畴。当导波传播经过微裂纹区域时,裂纹面在应力作用下发生“呼吸”效应,

导致导波畸变并激发高次谐波,通过对高次谐波信号进行分析即可实现对微裂纹的检测^[15-16]。

Cheng 等^[17]利用非线性声学特性和阵列成像技术检测疲劳裂纹。Santhakumar 等^[18]提出了基于非线性三波混频技术的早期疲劳裂纹识别与定位方法。Wu 等^[19]利用非线性振幅效应,通过层析成像算法构建疲劳裂纹检测的瞬时基线。Shen 等^[20]等通过研究粗糙接触面条件下孔边疲劳裂纹对导波的非线性散射行为,建立了基于局部相互作用模拟的小尺寸模型,用于早期微裂纹检测。然而,上述研究均采用传统超声探头或离散式锆钛酸铅(lead zirconate titanate, PZT)传感器,这类传感器在反复安装和使用中难以保证完全一致的接触状态与耦合条件,不仅可能导致信号重复性差,还可能因接触界面的不稳定而引入虚假的非线性干扰,严重影响检测的可靠性与量化精度。此外,传统传感器的安装通常对定位精度要求苛刻,在某些情况下甚至需要预知裂纹扩展方向,实际应用限制较多。

在重复检测过程中难以保证接触条件的一致性,导致信号重复性不佳,并可能引入额外非线性信号干扰。此外传统压电超声换能器的安装需要高度精确,且在某些情况下需预知裂纹扩展的方向。安装错位、耦合条件不一致以及耦合剂的变化均可能影响检测结果的可靠性与一致性。

采用直写式压电超声传感器可有效克服上述问题。该类换能器由压电层和电极层组成,可直接在待测结构表面原位打印成型,具有重量轻、轮廓薄等优点,且无需使用声耦合剂或依赖人工定位与安装,可以显著提高检测的一致性与可靠性^[21]。此外,直写式压电超声换能器尤其适用于狭窄空间或复杂曲面结构的集成。以柔性压电聚合物(Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene), P(VDF-TrFE))为原料,可通过喷涂方式实现传感器的原位制备,并通过电极拓扑结构的设计灵活调控导波模态^[22]。

Guo 等^[23-24]通过布设成对的直写式柔性压电超声传感器,利用瑞利波的声学非线性基波及二次谐波对金属材料的塑性变形进行了表征。然而,针对紧固件孔这一具有强烈几何散射特征的特定结构时,简单的单对传感器布局往往难以有效捕获由孔边及微裂纹反射的微弱非线性信号。

针对上述问题,本研究基于直写式的柔性压电超声传感阵列制备方法,设计了具有环形结构的局部增强型压电超声传感阵列,以聚焦并放大紧固件孔区域的反射信号;通过激励并接收特定模态的超声导波,结合信号非线性特征,系统地研究了孔边裂纹的非线性导波检测方法。

1 理论分析

1.1 非线性 Lamb 波检测原理

在体波传播过程中存在 3 种基本模态:纵波(L 波)、水平剪切波(SH 波)和垂直剪切波(SV 波),如图 1 所示,自由边界平板中传播的 Lamb 波,可视为 L 波与 SV 波在上下面板反射叠加所形成的波包。

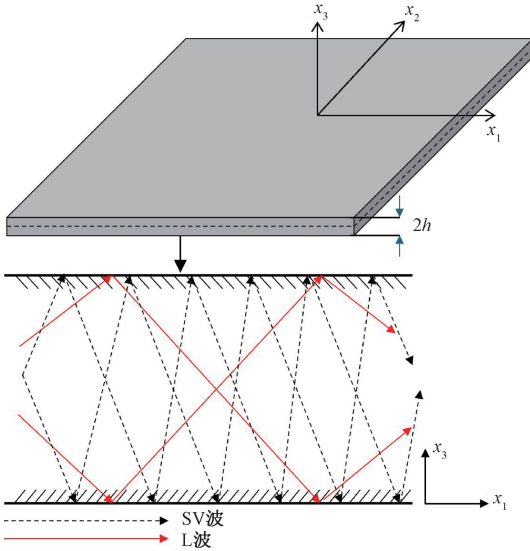


图 1 Lamb 波形成示意图

Fig. 1 Diagram of Lamb wave formation

本研究选 6061-T6 铝合金板作为实验对象,板厚 1 mm,材料密度为 $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,弹性模量为 69 GPa,泊松比为 0.5。其 Lamb 导波频散曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,除了 A_0 模态和 S_0 模态之外其余的 Lamb 波模态都存在截止频率;Lamb 波的速度和频率并不是线性关系,即 Lamb 波的频散特性;每个特定频率都至少有两种模态与之对应。而当频率较大时 Lamb 波会出现较多模式,这会使得传感器采集的信号过于复杂而

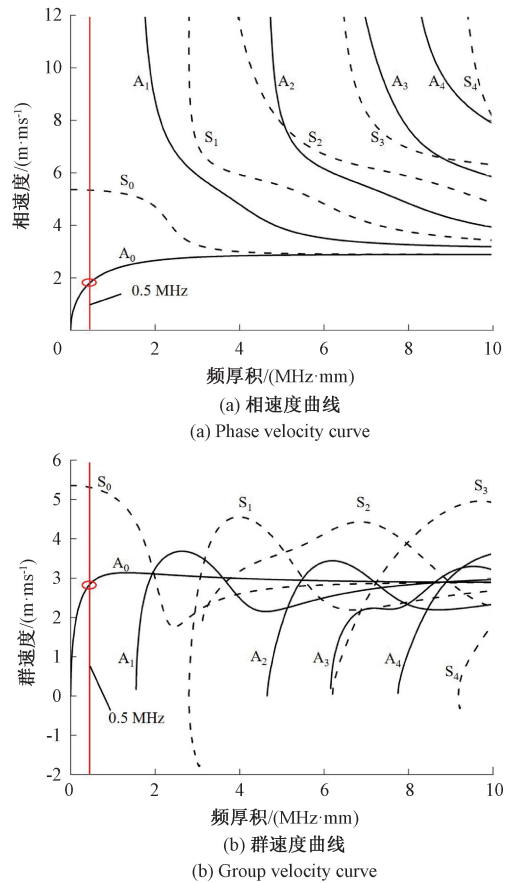


图 2 1 mm 铝板频散曲线

Fig. 2 Dispersion curve of 1 mm aluminum plate

难以处理,因此激励频率应尽量选择 2 MHz 以下的频率段,以获得更为简洁的响应信号。在 0.5 MHz 激励频率下,仅存在 A_0 和 S_0 两种模态的导波,且二者波速差异显著。便于在时域中进行区分。

针对其他不同材料或结构类型的试件,也应基于其特定的频散特性来选取激励频率,以确保实验信号清晰、分析有效。例如,沈意平等^[11]在骨形铝合金试样的检测中,以及 Jing 等^[25]在碳纤维复合材料层合板的损伤评估中,均依据该策略,通过频散曲线选取了合适的单一模态激励频率,从而有效避免了模态混叠,保证了信号的可解析性。

各向同性介质中传播的二次非线性超声体波,其一维波动方程可简化^[26]为:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度; u 为质点位移; x 为材料坐标; $\partial \sigma_{xx}$ 为 x 方向的法向应力; t 为传播时间。二次非线性本构方程为:

$$\sigma_{xx} = \sigma_0 + E_1 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} E_2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \dots \quad (2)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为二阶、三阶弹性常数。波动方程可进一步表示为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left[1 - \beta \frac{\partial u}{\partial x} \right] \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中: β 为非线性系数; c 为介质中的纵波声速。

假设超声波在平面传播,式(3)的解析解为:

$$u = A_1 \sin(kx - \omega t) + \frac{\beta A_1^2 x k^2}{8} \cos(2kx - 2\omega t) + \dots \quad (4)$$

式中: ω 为角频率; k 为波数, $k = \omega/c$; A_1 为基波幅值; 第2项系数为二次谐波幅值, 记为 A_2 。由此可得纵波非线性系数的表达式为:

$$\beta = \frac{8A_2}{A_1^2 x k^2} \quad (5)$$

由式(5)可知, 可通过测量基波幅值 A_1 、二次谐波幅值 A_2 、波数 k 及传播距离 x , 计算体波声学非线性系数 β 。此公式可扩展至三维模型, 并适用于 Lamb 波非线性系数的推导^[27]。

超声非线性系数 β 不仅取决于晶体结构, 还受材料的局部应变状态(如微裂纹分布)的影响。Hirose 等^[28] 采用边界元方法分析了裂纹接触面产生高次谐波的应力模型。Nazarov 等^[29] 推导了含随机分布裂纹的弹性固体非线性系数表达式。指出非线性源于粗糙接触面的非线性应力-应变关系。Cantrell^[30] 随后基于该模型进一步量化了疲劳裂纹对非线性响应的贡献, 并建立了其与疲劳过程参量及疲劳程度之间的关系。

1.2 传感阵列设计

针对紧固件孔这一特殊结构, 本研究设计了环形分布的压电超声传感阵列, 如图3所示。该结构可以有效聚焦放大由孔及裂纹界面反射的超声信号。图3中深色外环 E_1 作为激励单元, 内侧浅色弧形单元 ($S_1 \sim S_4$) 作为接收单元, 采用脉冲回波法^[8] 进行裂纹检测。其中, 外环激励单元的宽度与间距 d_{ex} 需依据基频 A_0 模式的半波长设计, 而接收单元宽度与间距 d_{re} 则基于二次谐波频率对应的 A_0 波半波长确定, 以实现二次谐波信号的有效接收。

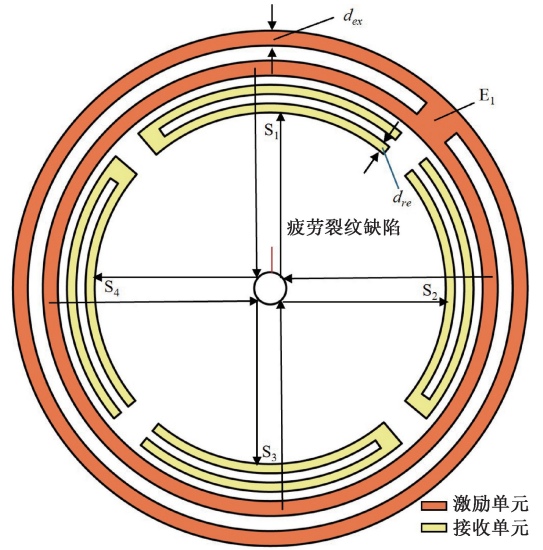


图3 传感阵列设计及检测方案示意图

Fig. 3 Diagram of sensor array design and detection scheme

2 有限元仿真

2.1 仿真模型设置

为了验证所设计传感阵列的信号收发的可靠性以及对被测区域信号的聚焦效果, 本研究采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 对铝合金板上环形压电超声传感阵列的激励-接收过程进行仿真分析。建立以 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 厚度为 1 mm 的铝合金板为对象的三维模型, 设置中心圆形通孔, 孔径为 4 mm , 并在圆孔上方设置宽度为 0.1 mm 、长度为 4 mm 的切槽模拟裂纹缺陷(符合早期微裂纹尺度^[12], 便于更准确地分析导波与微裂纹相互作用的效果), 同时设置无缺陷对照组。外环激励单元采用中心频率为 500 kHz 的 5 周期 Hanning 窗调制正弦信号进行激励, 考虑到直达波信号的持续时间约为 $10 \mu\text{s}$, 为减少其影响, 将内环内边缘定位在距孔心 38.98 mm 处, 以确保信号主模态 (A_0 模式) 的传播时间(约 $28.2 \mu\text{s}$) 显著大于直达波持续时间, 从而实现有效信号分离。传感阵列设计参数如表1所示。激励单元与接收单元的宽度与间距均设置为 500 kHz A_0 波半波长, 以增强导波模式选择和信号接收效率^[21]。

表1 仿真传感阵列设计参数

Table 1 Design parameters of simulation sensor array

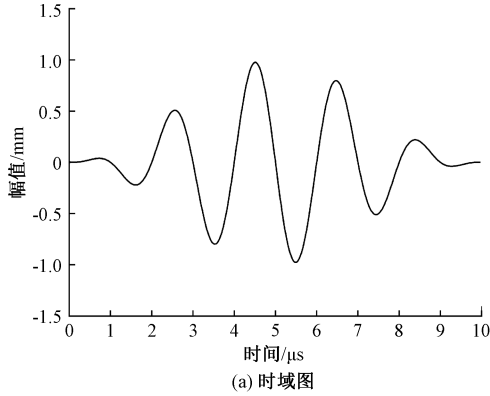
波的模式	激励频率/ kHz	相速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	群速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	环内径/ mm	环外径/ mm	传感器阵列宽度 及间距/mm	传播距离/ mm	传播时间/ μs
A_0	500	1 869	2 891	38.98	52	1.86	81.4	28.16

为避免多模式 Lamb 波耦合干扰,采用的激励方式为单一 A_0 模式激发条件,但由于 Lamb 波传播过程中的模式转换,波场中仍存在 S_0 模式 Lamb 波。

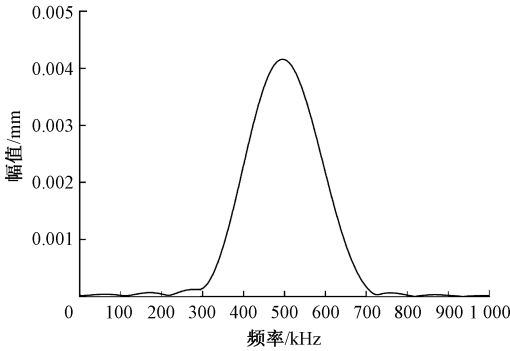
激励信号表达式为:

$$S(t) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{5}\right) \right] \cdot \sin(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq \frac{5}{f_c} \quad (6)$$

式中: f_c 为激励信号的中心频率,为 500 kHz。激励信号的时域和频谱图如图 4 所示。



(a) Time-domain plot



(b) Frequency-domain plot

图 4 仿真激励信号图

Fig. 4 Simulation excitation signal diagram

为保证计算精度和可靠性,模型的网格划分尺寸和最小时间步长的设置遵循如下原则^[31],即:

$$\begin{cases} \Delta l \leq \frac{\lambda_c}{10} \\ \Delta t \leq \frac{1}{10f_c} \end{cases} \quad (7)$$

式中: λ_c 为中心频率对应波长。据此网格的尺寸设置为 1 mm,最小时间步长设置为 2 ns。为抑制边界反射,在试

件平面边缘设置吸收边界层,其余部分采用自由四面体网格划分。

2.2 仿真实验结果

图 5 显示了有无裂纹状态下,外环激励时 S_1 接收单元所接收的时域信号。

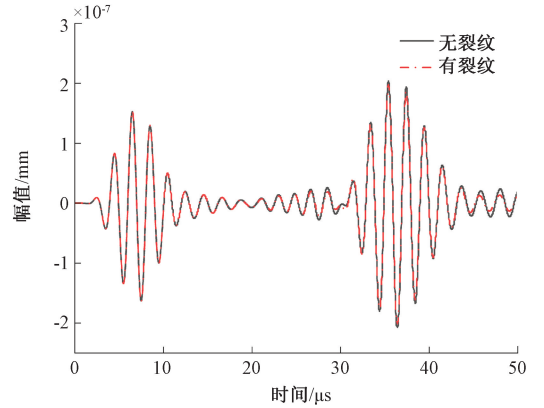


图 5 有无裂纹时域信号对比

Fig. 5 Comparison diagram of time domain signals with or without cracks

从图 5 可见,由孔边及裂纹反射的回波信号幅值明显高于直达波成分,表明本研究设计的环形传感阵列能够有效聚焦并增强被测区域的反射信号能量。然而,进一步分析可发现,在有无裂纹的不同状态下,同一接收单元所接收到的时域信号幅值差异并不显著,说明传统基于时域幅值线性特征的导波检测方法对早期微裂纹的敏感性有限,难以实现有效的损伤辨识。为此,本研究提出并采用基于导波非线性效应的检测方法(关于非线性效应的检测方法在 Cheng 等^[17]、Wu 等^[19]和 Shen 等^[20]的研究中均已有过模拟和实际实验证明过其对于早期微裂纹检测的敏感性,基于此,本研究不再重复验证其基本原理,而是聚焦于将这一成熟原理与直写式柔性传感阵列相结合,解决其在紧固件孔这一特定复杂几何结构原位实施中的关键技术问题,旨在提升检测的系统性、可靠性与工程实用价值),利用微裂纹引起的接触非线性现象,通过提取信号中的二次谐波分量及相对非线性系数,增强对金属紧固件孔边早期疲劳微裂纹的识别能力与检测灵敏度。

依据仿真结果优化实验传感阵列设计参数如表 2 所示。

表 2 实验传感阵列设计参数

Table 2 Design parameters of experimental sensor array

波的模式	激励频率/kHz	相速度/(m·s ⁻¹)	群速度/(m·s ⁻¹)	环内径/mm	环外径/mm	d_{ex} /mm	d_{re} /mm	传播距离/mm	传播时间/μs
A_0	500	1 869	2 891	18.98	32	1.86	1.15	46.98	16.25

3 直写式压电超声传感阵列制备

3.1 制备流程

将 P(VDF-TrFE) 粉末溶于 DMF/丙酮混合溶剂 (体积比为 1:1), 配置成溶液。将铝合金板样件置于 80℃ 的

加热台上, 使用喷枪在铝合金板表面喷涂固化形成 20~25 μm 的压电薄膜。喷涂后样品经干燥处理, 再在 135℃ 下退火并缓慢冷却至室温。以铝合金板作为接地电极, 对 P(VDF-TrFE) 压电涂层进行电晕极化处理。极化后在薄膜表面通过模板印刷法形成设计形状的导电银胶电极^[24-25]。具体工艺流程如图 6 所示。

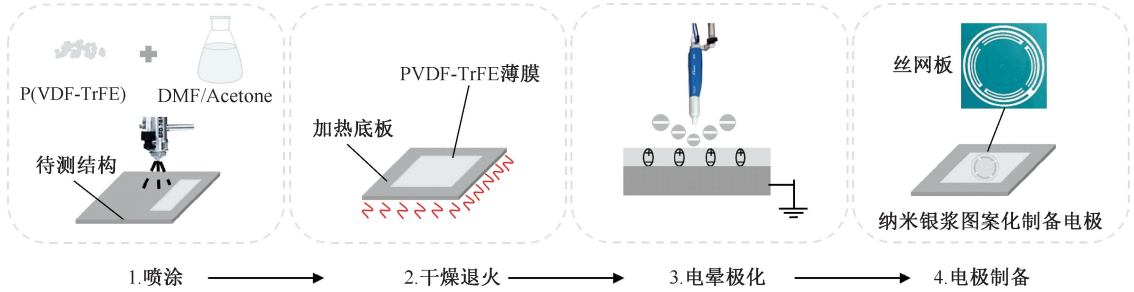


图 6 压电超声传感阵列制备流程

Fig. 6 Flow chart of piezoelectric ultrasonic sensor array preparation

3.2 压电性能表征

采用非接触激光测振仪 (Polytec, PSV-500) 对 P(VDF-TrFE) 压电薄膜进行原位压电性能表征量化。通

过金属探针对压电薄膜施加 500 kHz, 振幅为 10 V 的正弦电压, 扫描有/无电极覆盖区域^[8], 获取激励单元与 4 个接收单元压电响应, 结果如图 7 所示。

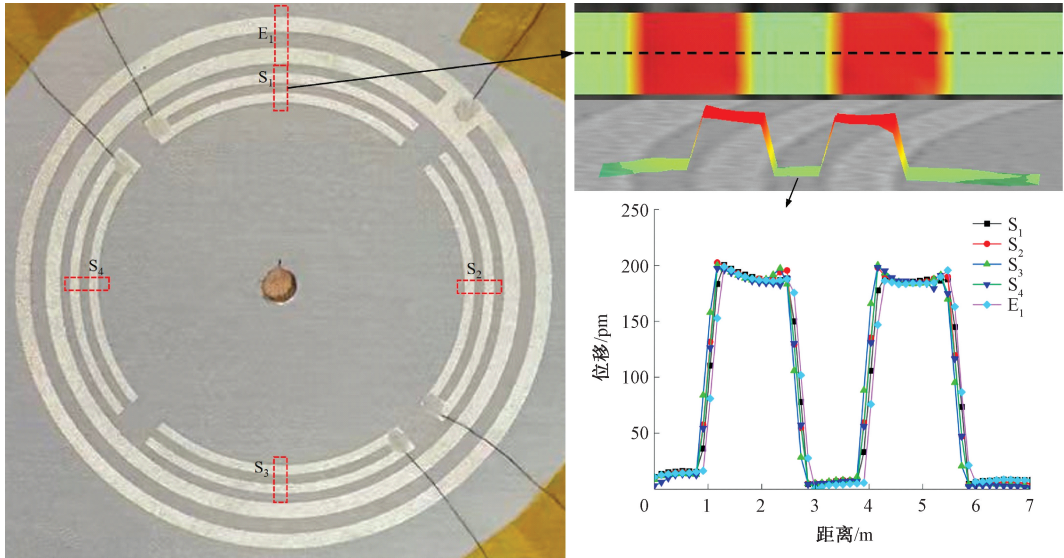


图 7 激光测振仪测量压电系数结果

Fig. 7 Results of measuring piezoelectric coefficient by laser vibrometer

通过将测量的位移幅值除以所施加电压, 获得 P(VDF-TrFE) 压电薄膜的有效 d_{33} 值, 多次测量结果如表 3 所示。结果表明, 图 7 中各单元的压电系数接近, 说明直写式技术所制备的传感阵列具有良好的性能一致性。

4 实验验证

4.1 实验设置

采用压电超声换能器测量方法进行检测, 通过研

表 3 传感阵列单元压电系数

Table 3 Piezoelectric coefficient of sensing array unit

传感阵列单元	$d_{33}/(\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$
S ₁	18.3±0.2
S ₂	18.1±0.1
S ₃	18.5±0.1
S ₄	18.4±0.2
E ₁	18.3±0.1

究^[15]可知,实际检测中 β 作为相对参数,在原位测量中常采用 A_1 和 A_2 的相对幅值代替一次和二次谐波的绝对物理位移。在相对非线性系数测量时,通常测量一次、二次谐波的电压幅值(A_1^v, A_2^v),相对非线性系数为:

$$\beta' = \frac{A_2^v}{(A_1^v)^2} \cdot \frac{8}{xk^2} \quad (8)$$

在实际测量中,固定输入幅度,通过测量不同尺寸裂纹情况下,测量一次谐波和二次谐波的幅度,计算 $(A_1^v)^2$ 和 A_2^v 的比值,即为相对非线性系数,通过这一系数的变化,表征裂纹有无以及尺寸大小。

为验证所提出的非线性导波检测方法,制备了带中心孔的铝板样件进行测试。试件尺寸为 $260 \text{ mm} \times 220 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。材料为 6061-T6 铝合金。中心设置直径 4 mm 的圆孔,并预制宽度 0.5 mm、长度 1 mm 的切口作为疲劳裂纹

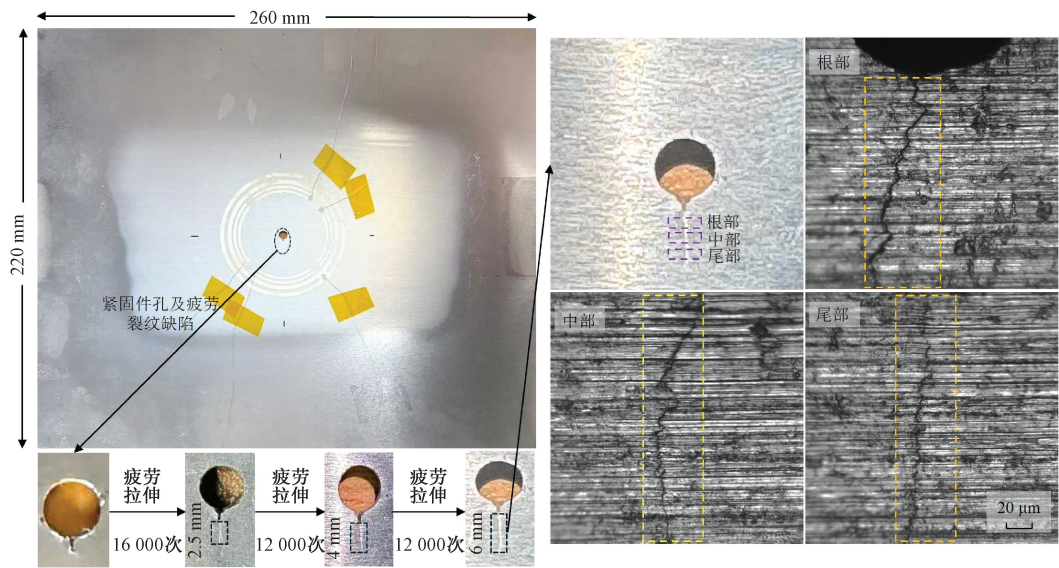


图 8 被测结构及模拟缺陷示意图

Fig. 8 Diagram of measured structure and simulated defects

为了排除疲劳加载对传感器性能的影响,在无裂纹,拉伸出 2.5 mm 裂纹,拉伸出 4 mm 裂纹和拉伸出 6 mm 裂纹时采集信号,并采用 3.2 节中所介绍的压电性能表征方法对传感阵列进行压电性能标定(在每次疲劳加载实验前后,使用标准信号源对传感阵列的各接收单元施加已知幅值的激励,记录其输出响应,通过计算各单元的有效压电系数,以监测其在疲劳过程中性能的稳定性),对信号进行归一化处理(为消除传感器单元间固有性能差异及长期重复加载可能引起的微小灵敏度漂移,本研究以无裂纹状态下采集的基波信号幅值为基准,对各次实验(含裂纹状态)下接收到的基波与倍频信号幅值进行通过乘以压电系数的比值进行归一化处理,例如 S_1 接收单元的压电系数为 18.7, S_4 接收单元的压电系数为 18.3,则 S_4 单元接收到的超声信号数据应乘以 18.7/

的制备起点,引导裂纹沿预定方向扩展,从而获取可控、真实的裂纹样本进行检测,依照第 3 章中所介绍的方法在试件表面原位制备环形柔性压电超声传感阵列,传感阵列中心与孔心重合,传感器阵列中心孔心重合。

疲劳裂纹经由 MTS-SANS CMT5000 拉伸疲劳试验机施加循环载荷生成,最大载荷 12 kN,加载方式为 10 Hz 正弦曲线,经 16 000 次循环后产生约 2.5 mm 长,0.7~2 μm (尾部-根部)宽的微裂纹(由于裂纹是经由疲劳拉伸机拉伸产生,2.5 mm 即为可视状态下裂纹扩展初期的长度),再经 12 000 次循环后产生约 4 mm 长,1~3 μm (尾部-根部)宽的微裂纹,再经 12 000 次循环后,裂纹扩展至约 6 mm 长,1~7 μm (尾部-根部)宽(由于裂纹的扩展长度与疲劳拉伸次数不是呈线性增长的关系,且试件较薄,继续拉伸扩展断裂的风险较大),如图 8 所示。

18.3 这一系数以达到归一化的效果。并在此基础上计算相对非线性系数,从而有效分离出由裂纹引起的非线性特征变化。)以消除性能差异的影响。其中, S_1 单元压电性能测试结果如图 9 所示。结果表明,拉伸前后传感阵列压电性能无明显变化。

为了进行压电超声实验,搭建了如图 10 所示的压电超声检测系统。使用 RITEC RAM-5000 SNAP 型号材料非线性测量仪生成激励信号(中心频率 0.5 MHz 5 周期 Hanning 窗调制正弦信号)传输至传感器阵列激励单元(实验室条件下未进行传感器的外接电路及接口的集成化处理,激励单元和接收单元均采用导线与激励源和示波器相连);反射波到达接收单元;经过 STANFORD SR560 电压放大器放大 20 倍并进行 10 kHz 的高通滤波后,使用 Tektronix MDO3102 数字示波器采集(采样率 1 GHz)。

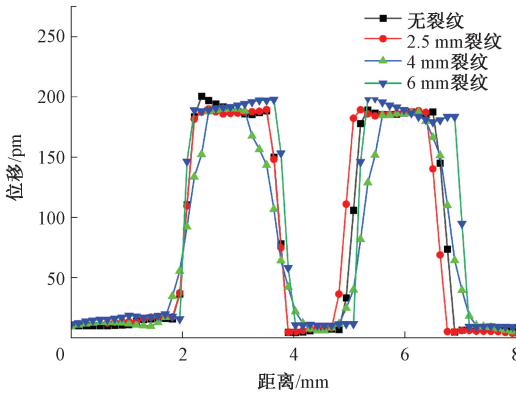


图9 不同裂纹状态下 S_1 单元压电性能对比
 Fig. 9 Comparison of piezoelectric performance of S_1 element under different crack states

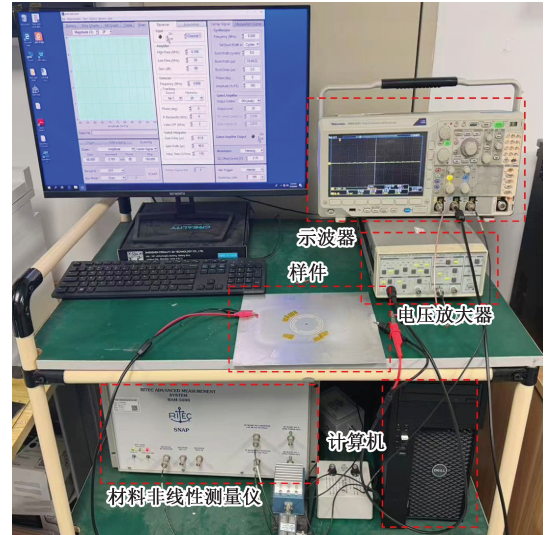


图10 超声导波非线性检测系统
 Fig. 10 Ultrasonic guided waves defect detection system

4.2 实验结果

对不同检测阶段下4个接收单元采集的时域信号进行多次测量并取平均处理,其时域波形如图11所示。对 A_0 模态信号进行傅里叶变换,得到频谱如图12所示。

基于式(8)计算相对非线性系数,结果如表4所示。相应数据亦在图13中进行了可视化展示。

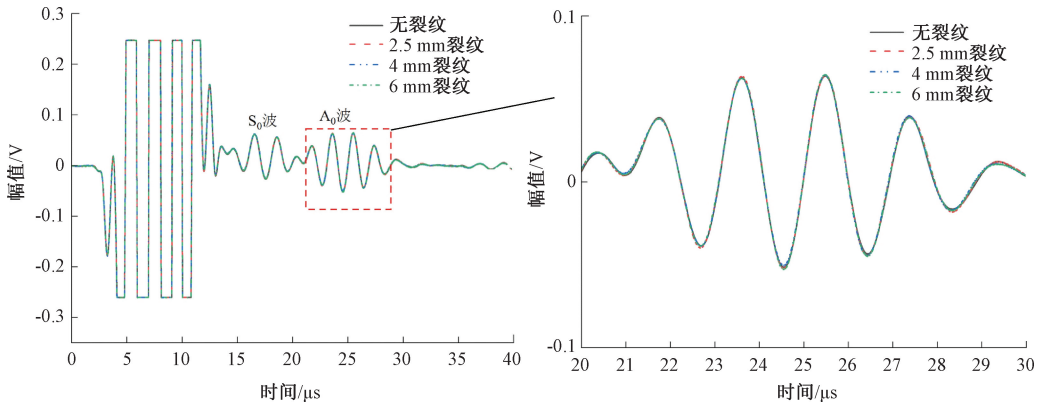
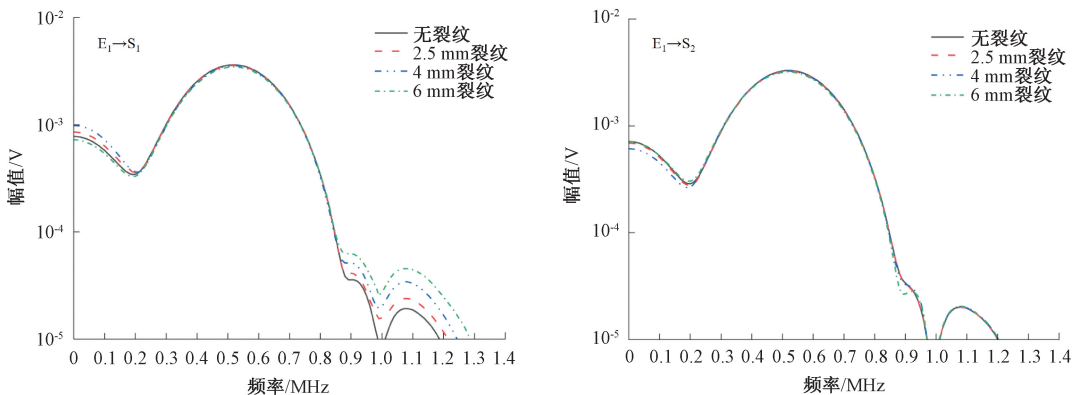


图11 S_1 接收单元接收信号时域图
 Fig. 11 Time-domain diagram of signal received by S_1 receiving unit



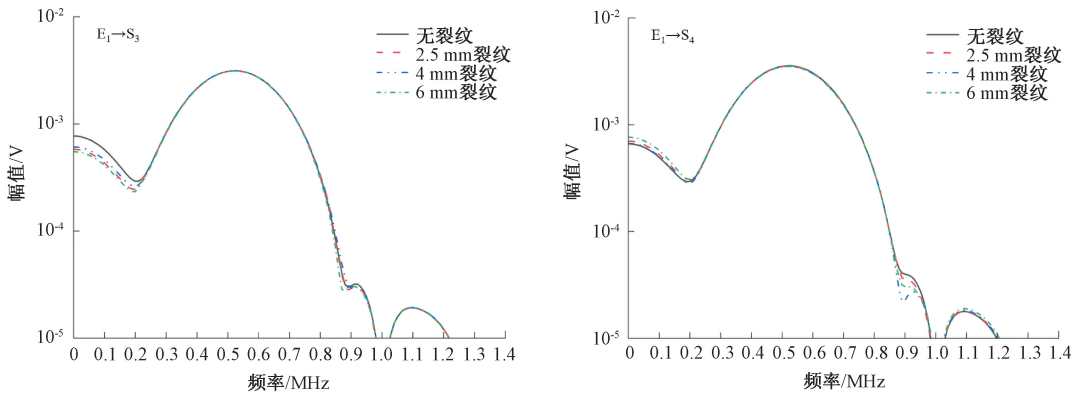


图 12 4 个接收单元接收信号频域图

Fig. 12 Four receiving units receive signal frequency domain diagrams

表 4 相对非线性系数 β 计算结果汇总表

Table 4 Summary table of calculation results of relative nonlinear coefficient β

裂纹状态	1 号接收单元	2 号接收单元	3 号接收单元	4 号接收单元
无裂纹	1.48	1.46	1.45	1.43
2.5 mm 裂纹	1.87	1.49	1.47	1.45
4 mm 裂纹	2.72	1.52	1.47	1.48
6 mm 裂纹	3.79	1.59	1.48	1.56

性关系,裂纹扩展初期(无裂纹到 2.5 mm 裂纹)增长要慢于后期。特别值得注意的是 S_1 接收单元的信号响应。该单元对应的二倍频幅值及计算所得的相对非线性系数增长最为显著,其数值远高于其他单元。这一空间分布特征与裂纹的实际扩展方向高度吻合:由于 S_1 单元位于裂纹扩展的主路径上,导波在传播过程中与裂纹缺陷的相互作用距离更长、作用机制更充分,导致由裂纹面“呼吸效应”产生的非线性谐波分量被更强地激发和累积^[30]。相比之下, S_2 、 S_3 、 S_4 单元由于空间位置偏离裂纹主线,其接收到的信号在传播过程中主要受紧固件孔几何散射与反射的主导,所携带的裂纹特异性非线性信息较弱,因此其相对非线性系数仅呈现轻微波动,变化不明显。据此可实现对裂纹扩展方向的初步判断。

5 结 论

本研究提出了一种基于直写式柔性压电超声传感阵列的孔边裂纹非线性导波检测方法,通过仿真与实验系统研究了金属紧固件孔边裂纹的检测方法。首先阐述了导波的非线性检测理论及传感阵列设计原理,通过有限元仿真验证了阵列在脉冲回波法下捕捉孔边裂纹反射信号的有效性。进一步地,制备实验样件并开展实际检测,介绍了直写式柔性压电超声传感阵列的制备工艺与性能表征方法。通过对接收信号进行频域分析,建立了相对非线性系数与裂纹长度之间的量化关系,并基于该系数的变化趋势实现了对裂纹扩展方向的初步判断,验证了该方法的可行性与有效性。实验结果表明,所提出的方法对早期微裂纹具有较高的检测灵敏度。

后续研究将围绕压电薄膜材料的掺杂改性展开,旨在提升其压电性能与信号信噪比;同时,将优化针对不同角度裂纹的定位方法,进一步提高检测的方向识别精度。

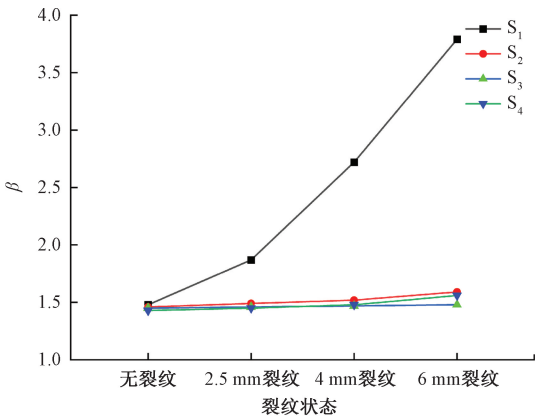


图 13 相对非线性系数结果汇总

Fig. 13 Summary chart of relative nonlinear coefficient results

实验结果表明,在各个检测阶段(无裂纹、2.5 mm 裂纹、4 mm 裂纹、6 mm 裂纹),各接收单元采集到的超声导波时域信号在波形与幅值上均未表现出显著差异。这一现象明确证实,基于时域幅值、到达时间等线性信号特征的传统分析方法,对尺度在微米级、处于萌生与早期扩展阶段的疲劳裂纹敏感度有限,难以作为有效的损伤识别指标。然而,由表 4 和图 13 可知,相对非线性系数随着裂纹长度增加逐渐增大,但这种增长关系并非严格的线

参考文献

- [1] 冯辅周,徐超,闵庆旭,等. 涡流脉冲热像中金属疲劳裂纹检测条件优化方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(3): 89-93.
FENG F ZH, XU CH, MIN Q X, et al. Optimization method for detection conditions of metal fatigue cracks in pulsed eddy current thermography[J]. Journal of Armored Force, 2017, 31(3): 89-93.
- [2] MASSEREY B, FROMME P. Analysis of high frequency guided wave scattering at a fastener hole with a view to fatigue crack detection[J]. Ultrasonics, 2017, 76: 78-86.
- [3] LIU H J, LIU M L, ZHANG L, et al. Directed acoustic shearography for crack detection around fastener holes in aluminum plates [J]. NDT & E International, 2018, 100: 124-131.
- [4] ABBAS M, SHAFIEE M. Structural health monitoring (SHM) and determination of surface defects in large metallic structures using ultrasonic guided waves [J]. Sensors, 2018, 18(11): 3958.
- [5] 张德强. 新时期金属材料焊接中超声无损检测技术的应用探究[J]. 中国金属通报, 2022(8): 153-155.
ZHANG D Q. Application of ultrasonic nondestructive testing technology in metal material welding in the new era[J]. China Metal Bulletin, 2022(8): 153-155.
- [6] BARSKI M, STAWIARSKI A. The crack detection and evaluation by elastic wave propagation in open hole structures for aerospace application[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 81: 141-156.
- [7] QIU L, YUAN SH F, BAO Q, et al. Crack propagation monitoring in a full-scale aircraft fatigue test based on guided wave-Gaussian mixture model[J]. Smart Materials & Structures, 2016, 25(5): 055048.
- [8] WONG V K, LIU M L, GOH W P, et al. Structural health monitoring of fastener hole using ring-design direct-write piezoelectric ultrasonic transducer [J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(6): 2657-2669.
- [9] PARK S H, KIM J, SONG D G, et al. Measurement of absolute acoustic nonlinearity parameter using laser-ultrasonic detection[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4175.
- [10] 许国琛,邓江勇,陈振华,等. 钛合金疲劳裂纹的线性和非线性超声综合定量检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 196-202.
XU G CH, DENG J Y, CHEN ZH H, et al. Linear and nonlinear ultrasonic comprehensive quantitative detection technology for fatigue cracks in titanium alloys [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 196-202.
- [11] 沈意平,吴迪,张博南,等. 钢轨裂纹导波检测的柔性压电复合材料传感技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 62-70.
SHEN Y P, WU D, ZHANG B N, et al. Research on flexible piezoelectric composite material sensing technology for rail crack guided wave detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 62-70.
- [12] 梁柯欣. 基于振动声调制的钢轨疲劳微裂纹损伤评价[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
LIANG K X. Evaluation of rail fatigue microcrack damage based on vibration sound modulation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [13] ZHAO Y X, LI F L, CAO P, et al. Generation mechanism of nonlinear ultrasonic Lamb waves in thin plates with randomly distributed micro-cracks[J]. Ultrasonics, 2017, 79(4): 60-67.
- [14] ZHU W J, XU Z SH, XIANG Y X, et al. Nonlinear ultrasonic detection of partially closed cracks in metal plates using static component of Lamb waves[J]. NDT & E International, 2021, 124: 102538.
- [15] WANG K, LU M L, SU ZH Q, et al. Analytical insight into "breathing" crack-induced acoustic nonlinearity with an application to quantitative evaluation of contact cracks[J]. Ultrasonics, 2018, 88(5): 157-167.
- [16] 门平,董世运,康学良,等. 材料早期损伤的非线性超声诊断[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1101-1118.
MEN P, DONG SH Y, KANG X L, et al. Nonlinear ultrasonic diagnosis of early material damage [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1101-1118.
- [17] CHENG J W, POTTER J N, CROXFORD A J, et al. Monitoring fatigue crack growth using nonlinear ultrasonic phased array imaging[J]. Smart Materials & Structures, 2017, 26(5): 055006.

- [18] SANTHAKUMAR S, SOHN H. Detection and localization of fatigue crack using nonlinear ultrasonic three-wave mixing technique[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 155: 106582.
- [19] WU W L, QU W ZH, XIAO L, et al. Detection and localization of fatigue crack with nonlinear instantaneous baseline[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, 27(12): 1577-1583.
- [20] SHEN Y F, WANG J ZH, XU W. Nonlinear features of guided wave scattering from rivet hole nucleated fatigue cracks considering the rough contact surface condition[J]. *Smart Materials & Structures*, 2018, 27(10): 105044.
- [21] DARDONA S, SHEN A, TOKGOZ C. Direct write fabrication of a wear sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(8): 3461-3466.
- [22] LI Y H, WANG K, FENG W, et al. Insight into excitation and acquisition mechanism and mode control of Lamb waves with piezopolymer coating-based array transducers: Analytical and experimental analysis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 178: 109330.
- [23] GUO SH F, CHEN SH T, ZHANG L, et al. Plastic strain determination with nonlinear ultrasonic waves using in situ integrated piezoelectric ultrasonic transducers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2018, 65(1): 95-101.
- [24] GUO SH F, CHEN SH T, ZHANG L, et al. Design and fabrication of direct-write piezoelectric ultrasonic transducers for determining yielding of aluminum alloy[J]. *NDT & E International*, 2018, 98: 186-194.
- [25] JING Z ANG, CAI G SH, YU X, et al. Research on defect identification of carbon fiber composite materials based on ultrasonic phased array[J]. *Polymer Composites*, 2025, 46(1): 902-913.
- [26] ROSE J L. Ultrasonic guided waves in solid media[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 107(4): 1807.
- [27] DE LIMA W J N, HAMILTON M F. Finite-amplitude waves in isotropic elastic plates[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2003, 265(4): 819-839.
- [28] HIROSE S, ACHENBACH J D. Higher harmonics in the far field due to dynamic crack-face contacting[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 93(1): 142-147.
- [29] NAZAROV V E, SUTIN A M. Nonlinear elastic constants of solids with cracks[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, 102(6): 3349-3354.
- [30] CANTRELL J H. Quantitative assessment of fatigue damage accumulation in wavy slip metals from acoustic harmonic generation[J]. *Philosophical Magazine*, 2006, 86(11): 1539-1554.
- [31] 黄尹, 王旗, 许才彬, 等. 基于波形相关因子加权的变厚度板 Lamb 波全聚焦成像[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(6): 348-360.
- HUANG Y, WANG Q, XU C B, et al. Lamb wave full focus imaging of variable thickness plate based on waveform correlation factor weighting[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(6): 348-360.

作者简介



周梓晗, 2023 年于山东大学获得学士学位, 现为中国科学院深圳先进技术研究院在读硕士研究生, 主要研究方向为压电超声传感器及网络。

E-mail: 2066522384@qq.cn

Zhou Zihan received his B.Sc degree from Shandong University in 2023. He is currently a master's student at the Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include piezoelectric ultrasonic sensors and sensor networks.



李叶海, 2010 年和 2013 年于南京航空航天大学分别取得学士和硕士学位, 2019 年于香港理工大学获得博士学位, 现为中山大学航空航天学院副教授。主要研究方向为结构健康监测、光声无损检测。

E-mail: liyh723@mail.sysu.edu.cn

Li Yehai received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2010 and 2013, respectively, and his Ph.D. degree from the Hong Kong Polytechnic University in 2019. He is currently an associate professor with the School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, China. His main research interests include

structural health monitoring and optoacoustic nondestructive evaluation.



付汝龙, 2010 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为广东汕头超声电子股份有限公司超声仪器分公司自动化部副经理, 高级工程师, 主要研究方向为超声无损检测工艺及自动化检测应用。

E-mail: sf.rlfu@st-ndt.com

Fu Rulong received his M. Sc degree both from Shenyang University of Technology in 2010. He currently serves as the deputy manager of the Automation Department at the Ultrasonic Instruments Branch of Guangdong Shantou Ultrasonic Electronic Co., Ltd., and holds the title of Senior Engineer. His main research interests include ultrasonic nondestructive testing (NDT) processes and automated inspection applications.



洪晓斌, 2002 年于武汉理工大学获得学士学位, 2007 年于华南理工大学获得博士学位, 现为华南理工大学教授, 主要研究方向为结构健康监测、无损检测技术与装备。

E-mail: mexbhong@scut.edu.cn

Hong Xiaobin received his B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2002, and his Ph. D. degree from South China University of Technology in 2007. He is currently a professor at South China University of Technology. His main research interests include structural health monitoring and nondestructive testing technology and equipment.



郭师峰 (通信作者), 2013 年于新加坡国立大学获得博士学位, 现为中国科学院深圳先进技术研究院研究员, 主要研究方向为超声成像方法与仪器, 超声传感器及网络, 自动化超声检测。

E-mail: sf.guo@siat.ac.cn

Guo Shifeng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from National University of Singapore in 2013. He is currently a research fellow in Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include ultrasonic imaging and system, flexible ultrasonic sensors and network, automated ultrasonic testing.