

基于压电传感技术的钢板冲击定位与监测研究

黄璇璇¹

HUANG Xuanxuan

摘要

在工程实践中,桥梁、管道、飞机和风力涡轮机叶片等钢结构经常受到鸟击、雹灾、山体滑坡和抛射物的冲击,对大型结构物的彻底检查往往需要耗费大量的时间和资源。对此,提出一种利用压电传感器阵列间接表示冲击力的冲击应力波分析方法。采用 COMSOL Multiphysics 的仿真方法,建立了粘接 4 个高灵敏度石英晶体压电传感器的钢板声固耦合模型。此外,还利用 LabVIEW 平台建立了多通道声波信号采集和处理系统,结合基于 MATLAB 的信号处理模型进行傅里叶变换,计算声波飞行时间差。采用模拟退火算法优化实验方案,准确监测撞击位置。通过自主设计的 LabVIEW 平台自动显示和实时监测所有采集到的声波和计算出的撞击位置,其具有体积小、便携、成本低、刷新速度快(小于 1 s)等优点,在减少工程结构冲击造成的灾害事故方面具有广阔的应用前景。

关键词

结构健康监测;压电传感器阵列;冲击;定位;声固耦合

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.10.029

0 引言

在土木工程领域,随着钢结构应用的不断增加,钢板在生产与使用过程中遭受撞击的事件变得频繁。桥梁、船舶、管道等关键结构时常面临自然灾害或偶发事件的冲击威胁。这些撞击事件可能引发设备损坏甚至人员伤亡,因此对这类结构的健康状况进行实时监测显得尤为关键,以便确保它们正常运营。尽管已有多项技术被提出以应对这一挑战,但依旧存在诸多不足之处。

在基于声波传播理论的撞击位置监测研究方面,Alexander Gibson 等人提出了一种基于导波理论的方法,指出板中的撞击回波共振与 S1 Lamb 模式的零群速度频率相对应^[1]。K. Diamanti 等人采用有限元分析法研究了 Lamb 波的传播特性,旨在确定发射器的最佳数量和间距^[2]。同时,Pawel Kudela 等人运用时域谱元方法对碳-环氧复合材料中的 Lamb 波传播及相互作用进行了数值模拟^[3]。此外,Gabriel Vivas 等人还进行了许多损伤检测试验,通过实验分析了导波在结构中的传播性能^[4]。

对于定位方法,L. Gaul 等人提出利用小波变换分析记录信号,从而确定不同频率波的到达时间,并据此推算出撞击位置^[5]。Liang D 等人则提出了一种分布式协调算法来解决复合结构中的撞击定位问题^[6]。随后,Arpita Mukherjee 和

Aishwarya Banerjee 进一步开发了一种信号识别算法,能够同时确定裂纹源与声发射传感器之间的距离,显示出较高的精度^[7]。李丹等研究者提出可引入深度学习算法以提高定位精度,还可应用离群点识别算法实现更好的损伤量化^[8]。

对于一些成熟的技术,尽管无损检测技术^[9]包括热成像、剪切成像、放射成像和超声波检测^[10]等已经广泛应用于内部损伤检测,但这些技术往往成本高昂且需要专业人员操作。后来,又有人提出主动监测技术^[11],但是这个技术设备昂贵,操作复杂且不易携带。

针对上述问题,本文提出了一套基于压电传感器阵列与 LabVIEW 虚拟平台的钢板冲击监测定位系统。通过在钢板表面布置压电传感器阵列,并利用 LabVIEW 平台采集与处理传感器输出信号,该系统能够在钢板遭受冲击时实时监测其振动响应。此方法不仅提升了钢板冲击监测的准确性与实时性,而且由于其低成本、易操作和便携性,极大地提高了生产过程的安全性和效率。本研究不仅为钢板撞击监测提供了一种新的解决方案,也为工程安全监测领域带来了新的研究进展和应用可能性,展示了广阔的应用前景和实际价值。

1 理论模拟

1.1 模型原理

本研究通过模拟小钢球对大钢板的撞击过程,进一步探讨了冲击监测与定位技术。为了精确地定位撞击事件,在钢板平面上建立了一个二维坐标系,以 x 轴和 y 轴为基准。这一设置旨在通过明确的坐标位置,优化监测精度并便于数据

1. 长江大学电子信息与电气工程学院 湖北荆州 434023

的可视化表达。

在实验布局中,四个传感器(A、B、C、D)被安置于钢板上的不同位置,其坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) 。这些传感器用于捕捉由撞击信号源 P 产生的波。信号源 P 与各传感器之间的距离 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 ,以及波从信号源 P 传播到各个传感器所需的时间 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 ,均被精确记录。利用这些数据,采用到达时间差法来计算撞击点 P 的确切位置。该方法依据波传播至不同传感器的时间差异,结合传感器间的已知距离,通过算法计算出撞击点的坐标。此法不仅提高了定位的准确性,还增强了系统的响应速度。二维原理图如图1所示。

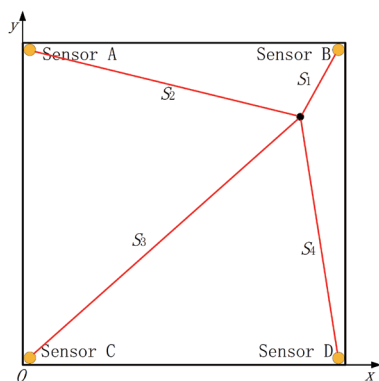


图1 二维原理图

如图1所示,根据时间-速度-位移公式可得方程:

$$\begin{cases} (T_1 - T_2) \times V = S_1 - S_2 \\ (T_1 - T_3) \times V = S_1 - S_3 \\ (T_1 - T_4) \times V = S_1 - S_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: V 代表波的传播速度。将冲击源的坐标设为 $P(x, y)$,并已知四个传感器的坐标 $S_A(x_1, y_1)$ 、 $S_B(x_2, y_2)$ 、 $S_C(x_3, y_3)$ 和 $S_D(x_4, y_4)$,根据距离公式得出:

$$\begin{cases} (T_1 - T_2) \times V = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \\ (T_1 - T_3) \times V = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \\ (T_1 - T_4) \times V = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2} \end{cases} \quad (2)$$

在钢板受到冲击时,安置于其上的传感器阵列会捕捉到冲击波信号。这些信号被传输至LabVIEW平台,并经由嵌入的MATLAB程序进行处理。通过FFT算法,成功地提取了各个传感器之间的时间延迟差。得出的震源坐标 $P(x, y)$ 并不是唯一的,基于这些时间差,通过模拟退火算法对结果进行优化,找出相对误差最小的坐标,算出震源坐标,显示在LabVIEW界面上。

1.2 方法

1.2.1 仿真

仿真模型的建立是实验的基础,它能够有效地模拟实际物理现象,并为后续的数据分析提供准确的基础。本实验利用COMSOL Multiphysics软件的仿真部分创建了一个尺寸为 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ 的钢板模型。为了模拟实际的传感器

布置,在钢板上布置了四个传感器,每个传感器用一个半径为 6 mm 、高为 1 mm 的小圆柱来表示。在材料选择方面,为钢板和传感器分别设置了相应的材质属性。传感器被设定为PZT-5H,这是一种常用的压电材料,具有良好的传感性能。为了模拟传感器的内部电路,进一步配置了传感器的内部电路参数。这些参数的设定对于准确捕捉传感器对冲击波的响应至关重要。随后,在模型中的指定位置施加了一个具有特定加速度比的冲击源,用以模拟实际中的冲击事件。

网格划分是仿真过程中的关键步骤之一,它直接影响到仿真结果的准确性和计算效率。在本实验中,采用了自由四边形网格对模型进行划分。首先对四个传感器的表面进行网格划分,并采用扫掠技术将网格从传感器表面延伸至整个传感器体积。接着,对钢板表面进行类似的网格划分,并同样采用扫掠技术将网格延伸至钢板的整个厚度。这种网格划分策略确保了模型在关键区域的网格密度足够高,同时非关键区域保持了计算效率。仿真模型和网络划分分别如图2、图3所示。

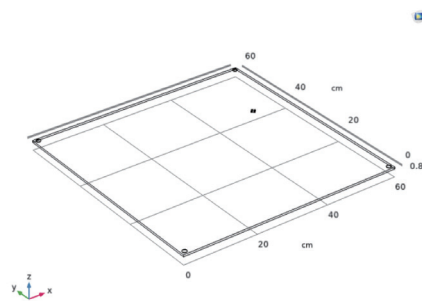


图2 仿真模型

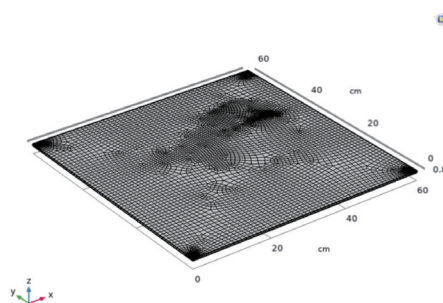
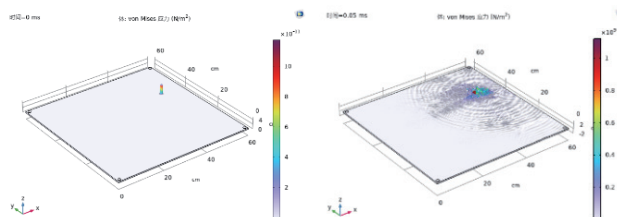


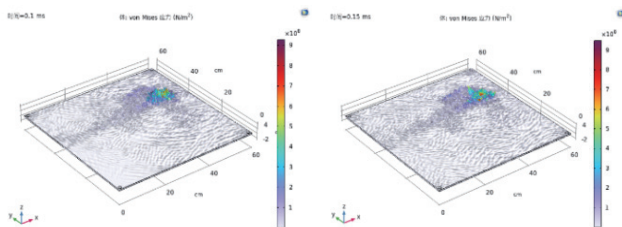
图3 网格划分

通过计算,可以清楚地观察到,从 $0 \sim 0.15 \text{ ms}$ 的时间内,钢板在受到冲击力作用时应力波传播的动态变化。冲击模拟图如图4所示。



(a) 0 ms时刻震动仿真图

(b) 0.05 ms时刻震动仿真图



(c) 0.1 ms 时刻震动仿真图 (d) 0.15 ms 时刻震动仿真图

图 4 冲击模拟图

1.2.2 实验

在本研究中，在物理实验环境中构建了基于 LabVIEW 平台的监测系统，用于实时采集和处理来自压电陶瓷传感器的冲击信号。LabVIEW 平台因其强大的数据处理能力和用户友好的界面设计，被广泛用于各类实验数据采集与监控系统。本文设计了专门的程序框图，以确保实验数据的准确性和操作的便捷性。

实验中，压电陶瓷传感器负责捕捉钢板受到冲击时产生的冲击波信号。这些信号首先通过 LabVIEW 平台进行初步处理，包括快速傅里叶变换（FFT）。FFT 是一种将时域信号转换为频域信号的算法，帮助分析信号的频率成分，从而为后续的时域分析提供必要的信息。在完成 FFT 后，对频域信号进行逆变换，将其转换回时域，以便于进一步分析。随后，为了去除信号中的噪声并提高数据的清晰度，实施了低通滤波处理。接下来，采用自动识别算法（AIC 算法）来自动拾取波形到达传感器接收到的初始时间。AIC 算法是一种自动检测信号到达时间的方法，它能够准确快速地识别出信号的初始到达点，从而为计算时间差提供了基础。通过对接收到的时间数据进行减法运算，得到了原理所需的时间差值。这些时间差值是后续定位算法的关键输入，它们直接影响到冲击点定位的准确性。寻找时间差的程序框图如图 5 所示。再将多个时间差解经过模拟退火算法选出最优解，模拟退火算法如图 6 所示。搭建 LabVIEW 平台显示的前面板，用于选择显示的通道、接地方式、采样频率等，并将波形和落点位置情况显示出来，模拟示波器，如图 7 所示。

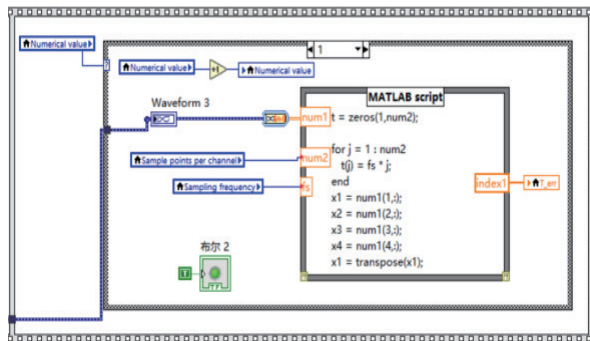


图 5 查找时差的 LabVIEW 框图



图 6 模拟退火算法的 LabVIEW 框图

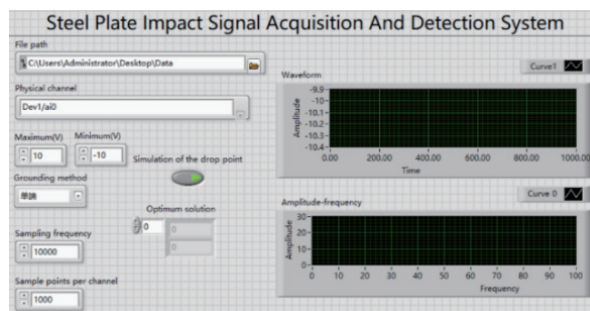


图 7 LabVIEW 前面板示波器显示屏

计算机连接主板和采集卡，采集卡连接四个压电陶瓷传感器，将传感器接收到的波形信号通过采集卡转换成电信号输入计算机，在 LabVIEW 前面板上显示四个通道的波形。组装好的冲击检测装置如图 8 所示，主要包括钢球、尺寸为 60 cm×60 cm×0.5 cm 的钢板、主板、最大采样率为 500 kS/s 的多通道数据采集卡、四个压电陶瓷传感器和一台计算机。

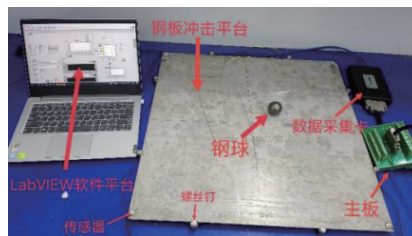


图 8 冲击探测系统装置

为了确保信号的清晰与准确，采取了多项措施减少外界噪声的干扰。其中，钢板通过 8 颗螺丝钉被悬挂起来，以减少环境振动对信号采集的影响。

在钢板冲击监测系统的构建过程中，传感器的固定方式对信号采集的质量有着直接影响。为了确保传感器能够稳定且有效地捕捉到冲击波信号，对比了三种不同的粘接材料：502 胶、硅胶和环氧树脂（AB 胶）。

在初步的工艺测试中，发现使用 502 胶粘接的传感器在接收信号时噪声较重。这可能是由于 502 胶的物理特性导致其在传递冲击波时产生了额外的干扰，影响了信号的清晰度。

接着，尝试将硅胶作为粘接材料。尽管硅胶在某些应用中表现出良好的粘接性能，但在本实验中发现，用硅胶粘接的传感器易于脱落。这说明硅胶可能无法提供长期稳定的粘接效果，尤其是在受到连续冲击的环境中。

最终，选择将环氧树脂（AB 胶）作为传感器的粘接材料。环氧树脂因其优异的粘接强度和稳定性而被广泛应用于各种工业领域。在本文的测试中，环氧树脂不仅确保了传感器的牢固固定，还保持了信号的清晰和完整性。

通过详细的对比分析，本文确定环氧树脂（AB 胶）是最适合用于钢板冲击监测系统中传感器固定的粘接材料。它既保证了传感器的稳定性，又优化了信号采集的质量，从而提高了整个监测系统的性能和可靠性。

2 实验和结果

2.1 仿真

为了验证所提方法的有效性和可行性，进行了一系列实验。使用 COMSOL Multiphysics 软件分别设置了四个传感器的内置电路，模拟了小球下落撞击钢板的过程；通过接入四个探针，分别提取了四个传感器接收到的波形信号，再将接收到的模拟波形信号进行 AIC 处理，四个通道接收波形 AIC 处理如图 9 所示。

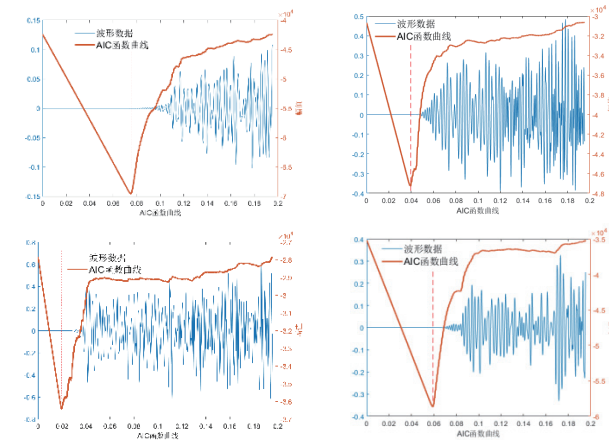


图 9 四个通道 AIC 函数曲线

通过 AIC 读取，可以得到四个传感器接收到波形的初始时间，将四个波形到达的初始时间代入原理公式，与实际位置坐标 (50,40) 相比，可以求出误差最小的位置坐标 (51.76,38.26)，平均误差不超过 4%，仿真误差较小，证明了实验的可行性。

2.2 实验

钢板上的传感器电极用导线与主板连接，主板与数据采集器连接，数据采集器与计算机平台连接。选择钢板上的特定位置，用钢球敲击，平台采集到的数据波形如图 10 所示。

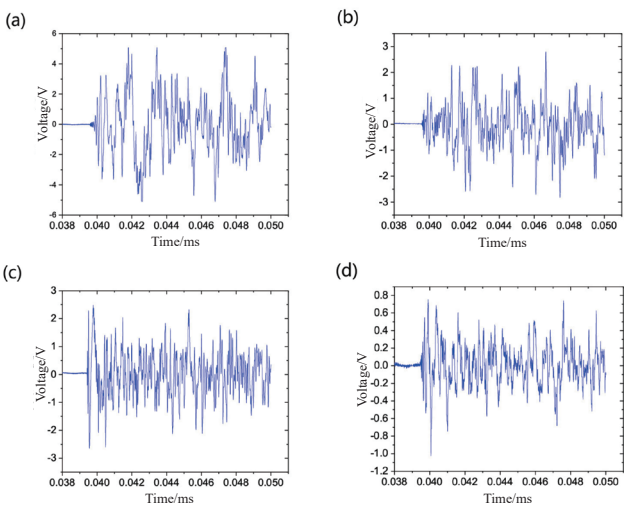


图 10 四个通道波形数据

小球砸落钢板，落点定位也实时显示在计算机上，小球砸落定位如图 11 所示。

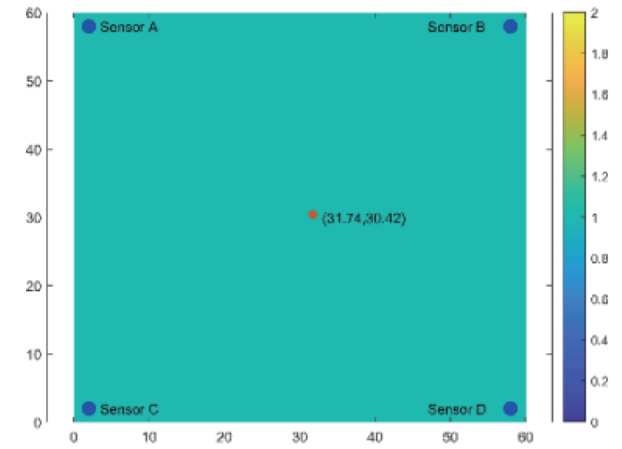


图 11 小球落点示意图

钢球被砸在钢板的四个象限上，其定位数据被记录下来，实际坐标与测量坐标的比较见下表 1。

表 1 实际坐标与测量坐标的比较

位置	实际值 /cm	测量值 /cm	误差 /cm
I	(31.80,30.30)	(31.74,30.42)	≤ 1
II	(35.40,27.80)	(33.03,30.00)	≤ 3
III	(30.00,30.00)	(32.37,31.64)	≤ 3
IV	(10.50,25.10)	(7.76,27.87)	≤ 3

实验结果表明，基于压电传感器阵列的钢板撞击监测定位方法能够准确监测钢板振动，并实时反馈撞击位置信息。结合仿真和实际实验证明，基于压电传感器阵列的钢板冲击监测与定位方法在提高冲击监测效果方面具有良好的应用前景。

3 结论

本研究结合了 COMSOL 仿真工具与 LabVIEW 实验平台。建立实验平台后,为了模拟各种撞击条件,采用速度分别为 1 m/s、1.5 m/s、2 m/s、2.5 m/s 和 3 m/s 的标准钢球撞击尺寸为 60 cm×60 cm×0.5 cm 的钢板,利用自主设计的 LabVIEW 监测系统对 4 个高灵敏度石英晶体压电传感器接收到的声波进行采集和显示,采样小球下落冲击钢板产生的波形图显示,结果显示钢球运动速度越快,受到的冲击力越大,接收到的声波电压也越高。成功地实现了对钢板冲击定位系统的仿真与物理实验的相互验证。在精确控制的条件下,仿真结果与物理实验结果之间的绝对误差被控制在 2 cm 以内,这一高精度的吻合度证明了本文所采用方法的有效性与可靠性。

利用 LabVIEW 平台的灵活性与易用性,整合了 MATLAB 程序来精确计算时间差,并据此实现了对撞击点的精确定位。在定位效果上,达到了高度的准确性,模拟误差和实际误差均被控制在 3 cm 以内,这为钢板冲击定位提供了一种高效的解决方案。通过冲击仿真模拟和实验验证相结合,利用声学飞行时间差从理论上计算了冲击信号的位置。结果表明,仿真结果与实验结果非常接近,实际定位相对误差小于 6%。

在传感器粘接工艺的测试中,对比了多种粘接材料,最终确定环氧树脂(AB 胶)提供了最佳的粘接效果,确保了传感器的稳定性与信号采集的清晰度。此外,在 LabVIEW 系统平台上搭建了模拟示波器,极大地提高了实验设备的便携性和操作便利性。

本研究的优势在于显著节约了成本,同时实现了实时监测与定位功能,且保证了实验设备的便携性。尽管本文在基于压电传感器阵列的钢板撞击监测定位方法研究中取得了显著成果,但仍存在进一步优化的空间。未来的工作可以致力于优化传感器阵列的布局,提高实验精度,并尝试在不规则结构上进行冲击实验,以拓宽该技术的应用范围和提升其鲁棒性。

本研究的创新性在于将先进的仿真工具与现代测控技术相结合,为钢板冲击监测与定位问题提供了一种准确且实用的解决方案。通过进一步的研究与开发,这一技术有望在结构健康监测领域得到更广泛的应用。

参考文献:

[1] GIBSON A, POPOVICS J S. Lamb wave basis for impact-echo method analysis[J]. Journal of engineering mechanics, 2005,

131(4): 438-443.

[2] DIAMANTI K, HODGKINSON J M, SOUTIS C. Detection of low-velocity impact damage in composite plates using lamb waves[J]. Structural health monitoring, 2004, 3(1): 33-41.

[3] KUDELA P, RADZIENSKI M, OSTACHOWICZ W. Impact induced damage assessment by means of lamb wave image processing[J]. Mechanical systems and signal processing, 2018, 102: 23-36.

[4] VIVAS G, GONZÁLEZ J, ETXANIZ J, et al. Proof of concept for impact and flaw detection in airborne structures[J]. Procedia structural integrity, 2022, 37: 344-350.

[5] GAUL L, HURLEBAUS S. Identification of the impact location on a plate using wavelets[J]. Mechanical systems and signal processing, 1998, 12(6): 783-795.

[6] LIANG D, YUAN S F, LIU M L. Distributed coordination algorithm for impact location of preciseness and real-time on composite structures[J]. Measurement, 2013, 46(1): 527-536.

[7] MUKHERJEE A, BANERJEE A. Analysis of acoustic emission signal for crack detection and distance measurement on steel structure[J]. Acoustics australia, 2021, 49: 133-149.

[8] LI D, NIE J H, WANG H, et al. Damage location, quantification and characterization of steel-concrete composite beams using acoustic emission[J]. Engineering structures, 2023, 283: 115866.

[9] 潘文华. 浅谈无损检测[J]. 黑龙江科技信息, 2011(2): 24+170.

[10] 李春亮, 施同飞, 房丽云, 等. 超声波检测技术的现状[J]. 中国建材科技, 2016, 25(5): 133+135.

[11] 徐颖娣. 基于 Lamb 波主动监测技术的复合材料结构损伤定位研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.

【作者简介】

黄璇璇(2001—), 女, 湖北荆州人, 硕士研究生, 研究方向: 油气信息探测与仪器装备。

(收稿日期: 2024-06-29)