

# 基于超声CT成像的钢-混凝土组合结构 界面损伤识别研究

李修权<sup>1</sup>, 孔庆钊<sup>2</sup>, 陈琳<sup>2</sup>, 任耀军<sup>3</sup>, 许斌<sup>4</sup>, 陈洪兵<sup>3\*</sup>

(1. 长江大学 电子信息与电气工程学院, 湖北 荆州 434023; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 3. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 4. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对传统超声检测方法难以准确识别钢-混凝土组合结构内部缺陷的难题, 研究学者们提出了基于超声CT(Computed Tomography)成像的钢-混凝土组合结构界面剥离损伤量化方法用以解决上述难题。并且还研发了具有电磁屏蔽功能的磁吸式新型超声换能器, 采用了AIC(Akaike Information Criterion)算法以提取透射波初至的方法。基于所建立的正演数值模型和采用反演分析法, 系统性研究了BPT(Back Projection Technique), ART(Algebra Reconstruction Technique), SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)三种不同求解算法的成像精度。最终提出了以BPT算法获得的反演终值作为SIRT算法迭代初值的二阶段成像方法, 并通过试验研究了不同激励频率下文中所提到的成像算法的精度。研究结果表明: 采用AIC算法可以准确提取透射波的初至, 精度可达 $\mu\text{s}$ 级; 采用BPT算法所得的终值作为采用SIRT算法求解初值的方法成像精度高; 采用25 kHz作为激励频率可以获得最高的成像精度。

**关键词:** 钢-混凝土组合结构; 界面损伤识别; 界面剥离; 超声CT成像; SIRT算法; 超声换能器; 成像精度

中图分类号: TU398.9; TU317

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)07-0064-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240213001

## Research on Interfacial Damage Detection of Steel-Concrete Composite Structures with Ultrasonic CT Imaging Method

LI Xiuquan<sup>1</sup>, KONG Qingzhao<sup>2</sup>, CHEN Lin<sup>2</sup>, REN Yaojun<sup>3</sup>, XU Bin<sup>4</sup>, CHEN Hongbing<sup>3\*</sup>

(1. School of Electronic Information and Engineering, Yongtze University, Jingzhou 434023, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

\*Corresponding author: hongbingchen@ustb.edu.cn

**Abstract:** Aiming at the difficulty in accurately identifying interfacial defects in steel-concrete composite structures using traditional ultrasonic testing methods, a quantitative method for detecting interface debonding damage in steel-concrete composite

收稿日期: 2024-02-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3805100), 国家自然科学基金(52378282, 52020105005), 北京市科技新星项目(20220484012), 福建省智慧基础设施与监测重点实验室开放研究课题(IIM-01-05)

作者简介:

李修权(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事工程结构损伤检测方面的研究。E-mail: lixiuquan\_yz@163.com。

孔庆钊(1988—), 男, 博士, 教授, 主要从事土木工程结构智能防灾领域方面的研究。

通信作者:

陈洪兵(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程结构损伤检测方面的研究。E-mail: hongbingchen@ustb.edu.cn。

structures based on ultrasonic Computed Tomography (CT) images is proposed. A novel ultrasonic transducer with magnetic absorption and excellent electromagnetic shielding function is developed and a method of extracting the initial arrival of transmitted waves by using Akaike Information Criterion (AIC) is presented. Based on forward numerical model established in this study and inversion analysis, the imaging accuracy of three different solving algorithms, namely, Back Projection Technique (BPT), Algebraic Reconstruction Technique (ART), and Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT), is investigated in-depth. A "two-stage" imaging method using the final value of the BPT algorithm as the iterative initial value of the SIRT algorithm is proposed, and the accuracy of the proposed imaging algorithm under different excitation frequencies is studied experimentally. The results show that the AIC method can accurately extract the initial arrival of the transmitted wave with an accuracy of us, the BPT algorithm results can be used as the method to solve the initial value of SIRT, and the highest imaging accuracy can be obtained by using an excitation frequency of 25 kHz.

**Keywords:** steel-concrete composite structure; interfacial damage detection; interface debonding; ultrasound CT imaging; simultaneous iterative reconstruction technique (SIRT) algorithm; ultrasonic transducer; imaging accuracy

随着工程设计理论的不进步,钢-混凝土组合结构已经被广泛应用于大型桥梁、高层和超高层建筑、沉管隧道等大型基础设施中<sup>[1]</sup>。钢-混凝土组合结构能充分发挥混凝土的优良抗压性能和钢材的抗拉性能,具备承载能力高、抗震性能优异、施工便捷等特点<sup>[2-3]</sup>。然而,由于受核心混凝土的浇筑质量、配合比的设计大小、混凝土收缩徐变和温度变化等多重因素的影响,钢-混凝土组合结构极易形成界面剥离缺陷和黏结滑移等隐蔽性损伤。钢-混凝土界面具有可靠的黏结,是保证钢材和混凝土协同工作的基础和前提,尤其是针对未设置剪力连接键的大型钢管混凝土等组合结构而言,界面损伤将导致结构的承载能力降低,进而影响结构的安全性和耐久性<sup>[4]</sup>。因此,对钢-混凝土组合结构界面进行高效精准的无损检测,确保其在工作期间内维持良好的工作性能,已成为土木工程领域普遍关注的工程问题。

近年来,无损检测技术在土木工程领域中的应用发展迅速。其中,基于超声波的无损检测方法和成像技术以其灵敏度高、穿透能力强和操作便捷等诸多优势,已成为工程界和学术界的研究热点<sup>[5-6]</sup>。针对采用何种技术检测钢-混凝土组合结构的界面,已有国内外学者尝试利用超声波技术探测界面损伤。基于体波法:QIN等<sup>[7-8]</sup>根据应力波在结构界面剥离处的反射波和衍射波产生的现象,根据体波传输路径的增加、能量的损失和首波到时延长等特征开展界面剥离的损伤检测。KONG等<sup>[9]</sup>利用小波包能量的损伤指数能够准确地监测钢板-超高性能混凝土(steelplate-ultra high performance concrete,简称S-UHPC)的局部黏结界面的滑移。XU等<sup>[10]</sup>基于超声传感器的时域信号,采用功率谱密度(power spectral density, PSD)分析法进行特征提取,可判别钢管混凝土柱试件中是否存在剥离及其具体位置。LI等<sup>[11]</sup>利用应力波在钢板中的传播特性,通过接收传感器首波振幅的异常波动实现界面脱空的检测评估。周先雁等<sup>[12]</sup>通过大型拱桥

模型试验,采用首波声时法实现混凝土与钢管黏结状态的评估。雷运波等<sup>[13]</sup>通过检测超声波飞行时间、振幅衰减、能量损失及频率降低等异常,判断钢管混凝土脱空缺陷及其严重程度。董军锋等<sup>[14]</sup>以足尺矩形钢管混凝土试件作为研究对象,通过观测声速指标变化以评价结构是否具有脱空缺陷。曹国辉等<sup>[15]</sup>采用波形识别法、首波频率法和首波声时法,准确地识别出了钢管混凝土的缺陷位置。基于面波法和多道面波法:CHEN等<sup>[16]</sup>和XU等<sup>[17]</sup>以沿钢板传播的表面波信号强度,实现了钢-混凝土组合结构界面剥离缺陷的精准识别。赵玉栋等<sup>[18]</sup>深入分析了钢-混凝土组合结构的频散特性,提出了基于多道面波分析(multichannel analysis of surface waves, MASW)方法识别界面剥离损伤的新方法。

尽管传统的超声波无损检测技术已经在钢-混凝土组合结构的损伤检测中取得了一系列成果,但由于钢-混凝土组合结构由钢、混凝土两种弹性参数不同的材料组成,且结构形式和内部构造复杂,形成了材料异质性强、界面行为复杂的技术特性,目前只能定性或半定量识别界面缺陷。超声透射CT成像是近年来土木工程领域无损检测技术的新兴研究方向,已初步应用于桥梁预应力管道注浆的施工质量评估<sup>[19]</sup>、新建桥墩盖梁的混凝土凝结密实度评估<sup>[20]</sup>以及大型混凝土坝的内部裂缝、空洞等隐蔽损伤结构的评估<sup>[21]</sup>中。超声透射CT成像作为一种先进的数字超声成像技术,其CT扫描的基本原理是利用不同角度的声波透射数据,结合计算机技术重建结构内部的二维或三维图像。与传统超声检测相比,超声CT技术能够提供更为清晰、直观的结构内部图像,从而提升检测的准确性和分辨率。

为此,本文首先基于层析成像理论提出了超声CT成像原理及速度模型迭代算法,建立了考虑剥离缺陷的钢-混凝土组合结构数值模型,提出了以BPT算法反演终值作为SIRT算法迭代初值的二阶段成像方法,比较

了本文提出的算法与传统BPT、ART和SIRT三种反演算法的成像结果,验证了本文所提出的用成像算法进行界面损伤成像的可行性和准确性。其次,研发了考虑电磁噪声屏蔽的磁吸式超声换能器,实现了钢-混凝土组合结构中超声波的精准测量,显著提升了测试信号的信噪比。最后,开展了钢-混凝土组合结构界面剥离缺陷识别的超声CT成像试验研究,分析了不同频率的激励信号对超声CT成像结果的影响。研究表明:在25 kHz的激励信号频率下,成像识别的低速区与钢-混凝土界面剥离区域的重合度最高,为钢-混凝土组合结构界面损伤识别提供了新的思路和测试技术。

## 1 超声CT成像原理及迭代算法

### 1.1 超声CT成像的理论基础

超声CT成像是目前工程应用中最为广泛的超声成像方法,该方法的基础是几何声学理论。在忽略超声波散射的前提下,假定超声波在介质中的传播形式遵守Snell射线定律,采用射线路径追踪、迭代重建等方法来反演图像,实现对传播介质内部特性分布的重构。对于钢-混凝土组合结构,当超声波穿透钢板和核心混凝土后,传播路径上的混凝土内部空洞、裂缝等介质缺陷将改变其传播模态和传播特性,进而影响接收端透射波的声学参数,如图1所示。透射波的传播速度是介质空间坐标的函数,通过分析不同检测方向上透射波的飞行时间(time of flight, TOF)信息,利用TOF参数通过Radon逆变换重建介质内波速分布,最终实现介质缺陷定位。

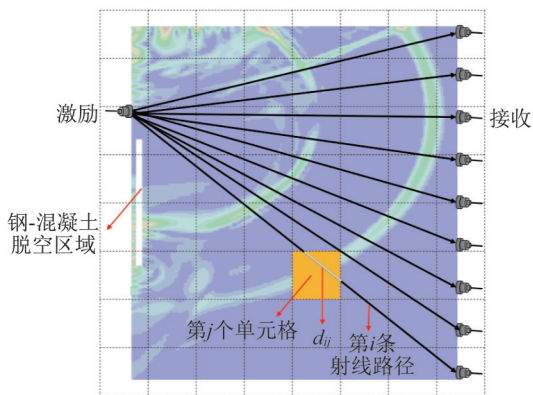


图1 超声CT成像示意

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic CT imaging

假设介质内传播速度分布为二维连续函数 $f(x, y)$ ,若 $L$ 表示平面内任一激励器和接收器构成的透射波直线传播路径 $L_{t, \theta}: x \cos \theta + y \sin \theta = t$ ,其中, $t$ 和 $\theta$ 是直线 $L$ 的位置参数; $\theta$ 为直线 $L$ 与平面坐标 $x$ 轴构成的夹角; $t$ 表示任意一点 $(x, y)$ 与原点构成的向量在单位向量 $(\cos \theta, \sin \theta)$ 上的投影。则任意传播路径的TOF可以表示为图

像函数 $f(x, y)$ 沿直线 $L$ 的线积分,也被称为Radon变换,如式(1)所示:

$$R_f(L) = \int_L f(x, y) ds = R_f(t, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t \cos \theta - s \sin \theta, t \sin \theta + s \cos \theta) ds \quad (1)$$

式中: $s$ 为任意一点 $(x, y)$ 与原点构成的向量在单位向量 $(-\sin \theta, \cos \theta)$ 上的投影。

进行内部介质传播速度重建时,若 $\theta$ 保持不变,则 $R_f(t, \theta)$ 关于参数 $t$ 的一维傅里叶变换为:

$$\hat{R}_f(\omega, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} R_f(t, \theta) e^{-i\omega t} dt = \hat{f}(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) \quad (2)$$

式中: $\omega$ 为傅里叶变换中的角频率变量( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

式(2)表明路径积分 $R_f(t, \theta)$ 关于参数 $t$ 的一维傅里叶变换即为图像函数 $f(x, y)$ 的二维傅里叶变换,也被称为中心切片定理。介质内部速度图像反演就是求 $R_f(t, \theta)$ 的逆变换,则Radon逆变换为:

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(u, v) e^{i(ux+vy)} dt dv = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} \hat{R}_f(\omega, \theta) e^{i\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} \omega d\omega d\theta \quad (3)$$

式中: $u$ 和 $v$ 是笛卡尔坐标系中的频率变量, $u$ 是 $x$ 方向的空间频率, $v$ 是 $y$ 方向的空间频率。

在实际求解时,由于透射波传播路径是有限的,连续图像函数 $f(x, y)$ 的解不是唯一的。因此,通常将介质平面离散状化为网格状,每个网格被称为像元,假定每个像元内介质是均匀的,即每个像元内波速为定值。将每条透射波传播路径TOF数据等效为该条射线经过的所有像元的飞行时间之和,通过联立求解多条传播射线的非适应方程组,得到介质波速分布,最终生成CT图像。如图1所示的传感器布置方式,第 $i$ 条路径下的超声透射波在介质中的飞行时间 $t_i$ 是所有像素单元中持续时间的总和,可表示为:

$$t_i = \sum_{j=1}^m \frac{1}{v_j} d_{ij} = \sum_{j=1}^m s_j d_{ij} \quad (4)$$

式中: $v_j$ 表示第 $j$ 个像素单元的速度,如果每个像素单元足够小,则 $v_j$ 可视为常数; $d_{ij}$ 表示第 $j$ 个像素单元中第 $i$ 条路径的长度; $s_j = 1/v_j$ ,称为慢度; $m$ 表示通过 $i$ 条路径的单元数量。

则所有的测量路径可以用式(5)线性方程表示:

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $n$ 表示射线路径的个数。

根据上述原理,离散图像重建问题转化为:给出一系列超声透射波走时飞行时间  $t_i$  数据,反演求解图像向量即传播介质中慢度  $s_j$ ,再对慢度求导数得到速度分布图像。超声CT成像主要步骤包括:数据采集、正演模拟、反演计算和图像显示,流程框图如图2所示。

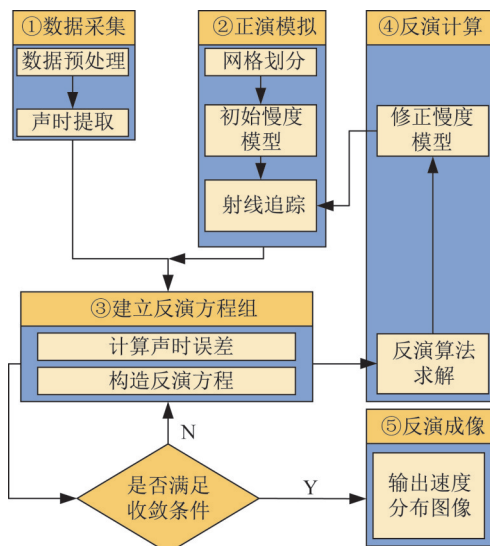


图2 超声CT成像反演流程图

Fig. 2 Flow chart of ultrasonic CT imaging inversion

## 1.2 介质传播速度反演算法

方程组(5)是过定的、稀疏和不稳定的,求解主要采用间接算法,包括逆投影法和迭代类算法。

### 1.2.1 BPT算法

BPT算法是一种基于将数据从投影空间(即测量数据)转换到图像空间(即重建图像)的反向投影算法,此种算法直观且实现相对简单。首先将走时  $t_i$  沿射线分配给每一个像元,分配时以第  $i$  条射线在像元内的长度与射线的总长度  $\sum d_{ij}$  之比为权,然后把通过  $j$  像元在加权后的走时对所有射线相加,并除以单元内总射线长度求得该单元的介质慢度。

$$\tilde{s}_j = \sum_{i=1}^n d_{ij} \left( t_i / \sum_{j=1}^m d_{ij} \right) / \sum_{i=1}^n d_{ij} \quad (6)$$

### 1.2.2 ART算法

ART算法是一种用于层析成像的代数重建技术算法,与基于解析的方法(如BPT反向投影)不同,ART算法使用了线性代数的方法,它基于待重建区域的离散模型,求解大规模线性系统。该算法是按照每一条射线依次进行迭代,其迭代公式为:

$$s_j^{k+1} = s_j^k + \frac{(t_i - \tilde{t}_i)}{\sum_{j=1}^m d_{ij}^2} d_{ij} \quad (7)$$

式中:  $s_j^{k+1}$ 、 $s_j^k$  为第  $k$  条射线迭代后的慢度值;  $\tilde{t}_i = \sum_{j=1}^m d_{ij} s_j^{(k)}$  为第  $i$  条射线估计投影时差值。

### 1.2.3 SIRT算法

SIRT算法是一种用于层析成像的联合迭代重建算法,其核心步骤为:按照每个单元格的顺序依次进行迭代,在每次迭代中,穿过第  $j$  个单元格所有射线的平均值共同参与该单元格慢度值的更新,其迭代公式为:

$$s_j^{k+1} = s_j^k + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(t_i - \tilde{t}_i)}{\sum_{j=1}^m d_{ij}^2} d_{ij}^2 \right] / \sum_{i=1}^n d_{ij} \quad (8)$$

SIRT算法与ART算法的区别在于SIRT算法每一次迭代过程是对所有射线进行迭代,此种迭代方式带来的结果是避免了ART算法中由一条射线迭代产生的误差影响,把一条射线的误差分摊到所有射线中,增加了算法的稳定性。

## 1.3 透射波初至提取

研究发现超声CT成像的关键是透射波的初至提取,为了提高超声层析成像的应用效率和精度,有必要利用一种稳定且精确的信号自动提取初至的技术。AIC全称为赤池信息量准则,是由日本统计学家赤池弘次所提出的一种评估统计模型的准则。这一准则的核心思想在于将时间序列分割为多个局部平稳的子序列,每个子序列都可以通过自回归模型进行拟合。这种准则假设在一个特定事件发生的前后,存在两个互相独立的平稳时间序列,特定事件为超声波采集信号的时间起点,在该时间点前后,时域信号位于两个相互独立的序列,以此来精确地提取波传播时间。AIC函数表达式为<sup>[22]</sup>:

$$AIC = i \times \log(\text{var}(x(1, i))) + (N - i - 1) \times \log(\text{var}(x(i + 1, N))) \quad (9)$$

式中:  $N$  为信号  $x$  的长度;  $\text{var}$  为序列的方差函数;  $i$  为信号  $x$  的第  $i$  个采样点。

## 2 钢-混凝土组合结构界面剥离数值计算及分析

为了验证基于时差层析成像的上述各种图像重建算法的准确性,本节构建了钢-混凝土组合结构的数值模型,并通过模型仿真结果对比分析各种图像重建算法的表现。

### 2.1 数值模型简介

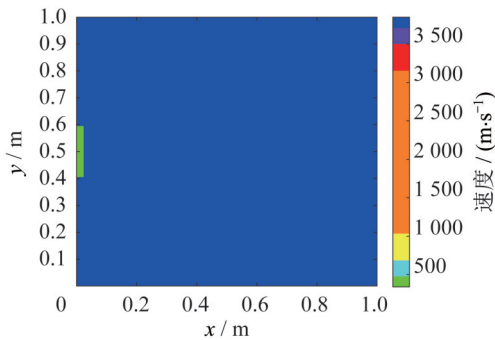
研究人员构建的理论模型为钢-混凝土组合结构,材料属性如表1所示。钢板尺寸为  $1.00 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$ ,混凝土尺寸为  $1.00 \text{ m} \times 1.00 \text{ m}$ ,在钢板和混凝土接触面中心区域设置界面剥离缺陷,其尺寸为  $0.20 \text{ m} \times 0.02 \text{ m}$ ,相当于

正演模型中有1个低速异常区域。在检测时采用左右检测的方式,每隔0.05 m激发一次且设置一个接收点,共设计了 $21 \times 21 = 441$ 条射线,激励和接收点构成的互易射线追踪路径如图3所示。

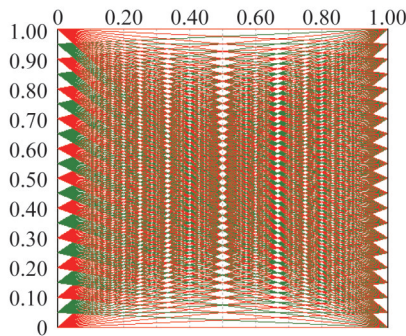
表1 数值模型材料属性

Table 1 Material properties of numerical model

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	波速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
混凝土	32	0.18	2 400	3 849
钢材	200	0.33	7 850	6 144
缺陷	—	—	—	340



a) 模型速度分布



b) 射线追踪

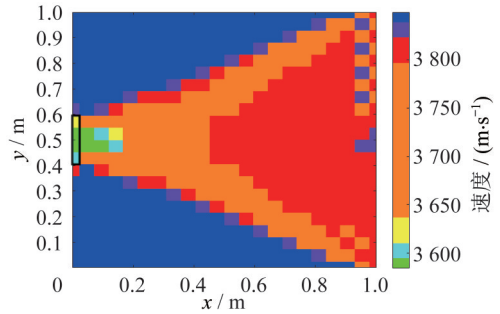
图3 数值模型

Fig. 3 Numerical model

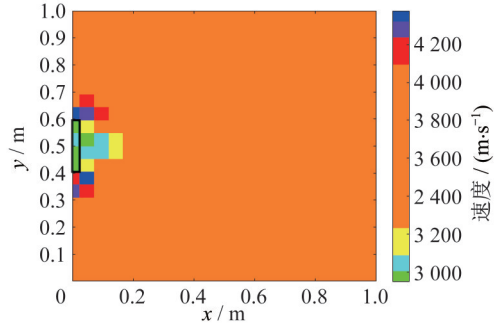
### 2.2 不同反演算法结果比较

用BPT、ART和SIRT三种反演算法对模型进行重建,正演网格数为 $25 \times 25 = 625$ 。BPT+ART和BPT+SIRT算法分别表示用ART和SIRT算法对模型进行重建时,以BPT算法的重建结果作为迭代初值进行组合反演成像的算法,取迭代误差 $\epsilon = 1 \times 10^{-9}$ ,最大迭代次数为1 000次,结果如图4所示,其中黑色方框为实际缺陷位置。

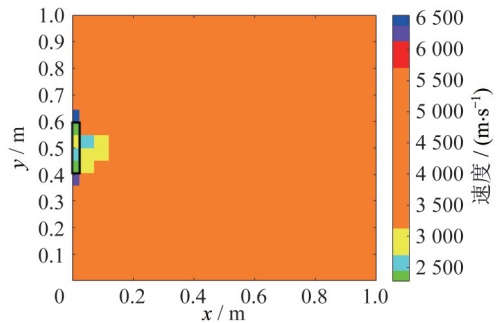
由图4可知,本文提出的二阶段BPT+SIRT组合算法的成像精度优于其他算法的成像精度。首先,该算法具有更高的对比度,使得图像的解释更为准确。此外,



a) BPT 算法反演



b) BPT+ART算法反演



c) BPT+SIRT算法反演

图4 三种重建反演算法成像结果比较

Fig. 4 Comparison of imaging results of three reconstruction inversion algorithms

BPT+SIRT组合算法提供的图像细节丰富、分辨率高。该组合算法的数值范围也更广,为进一步的复杂分析提供了丰富的数据基础。因此,本文选择采用BPT+SIRT的二阶段组合成像算法对后续试验的数据测试进行成像分析。

## 3 钢-混凝土组合结构界面剥离超声CT成像试验

### 3.1 试件设计

钢-混凝土组合结构的施工一般是在外部钢板焊接组装完成后浇筑核心混凝土。混凝土在养护期间会产生较高的水化热,加上混凝土收缩效应的影响,在采用外加膨胀剂后,仍可能在界面出现不可控制的剥离缺陷。为排除该因素对人工缺陷尺寸的干扰,本文设计了一个立方体混凝土粘钢加固试件,以排除混凝土收缩效应对无损检测

精度的影响。混凝土的尺寸为1.1 m×1.1 m×1.1 m, 钢板的尺寸为1.10 m×1.10 m×0.01 m, 缺陷布置如图5所示。

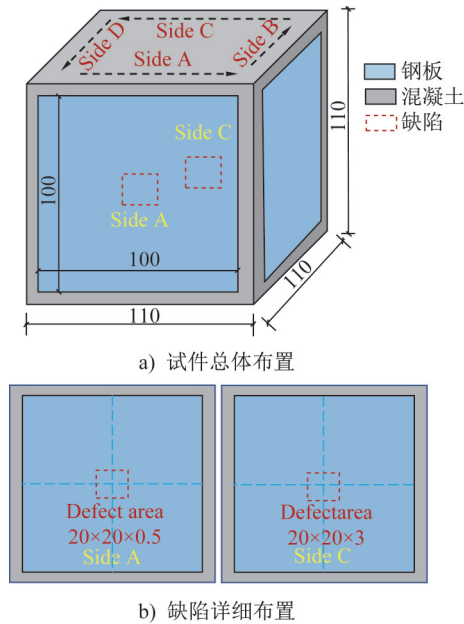


图5 钢板-混凝土界面剥离试件示意图(单位:cm)  
Fig. 5 Schematic diagram of interfacial debonding defect of steel-concrete specimens (unit: cm)

人工缺陷尺寸的加工和制作步骤主要包括:(1)浇筑并养护混凝土,并在混凝土表面开槽,形成不同规格的界面损伤;(2)为了保证钢板和混凝土表面的黏结效果,将钢板表面和混凝土立方体表面打磨平整,并清除表面浮灰;(3)采用专用粘钢胶将钢板和混凝土粘合,进行为期7天的养护;(4)当粘钢结构胶强度达到设计要求后,拆除预紧力支架,并在钢板表面做网格化处理 and 统一编号。

### 3.2 新型超声换能器特性

常见工程结构中超声无损检测的方法多用于对粘贴的压电陶瓷片(lead zirconate titanate,简称PZT)进行超声信号激励和采集,但是裸露的PZT片因未设置电磁屏蔽保护措施而导致接收信号信噪比显著降低,同时由于缺乏保护措施,裸露的PZT片比较容易遭受机械损伤<sup>[23]</sup>。为此,本文设计并研发了一种新型的磁吸附超声换能器,如图6所示。为了提高接收信号的信噪比,PZT片(直径:12 mm,厚度:2 mm)的负电极由导电环氧树脂胶粘贴在不锈钢壳体的底部<sup>[24]</sup>;PZT片的另一侧用绝缘环氧树脂胶粘贴同直径的磁铁。磁吸力有利于钢混组合结构钢板的安装,而磁铁本身可以作为背衬材料,增强能量向波导传输的效率。

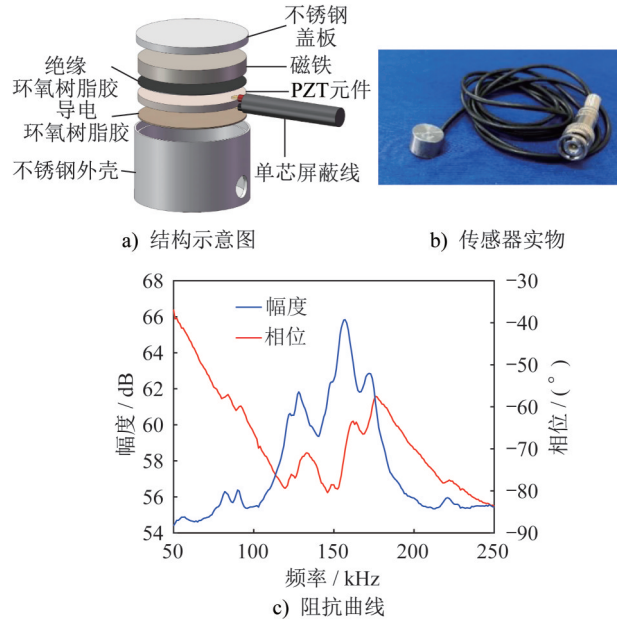


图6 新型超声换能器  
Fig. 6 New ultrasonic transducer

图6c)为该新型超声换能器的压电阻抗曲线。测试频率范围从50 kHz到250 kHz,蓝色曲线表示换能器的共振频率特性,红色曲线表示相位随频率变化的规律。因此,基于阻抗曲线可以为试验中激励信号频率的选择和优化提供基础。

### 3.3 试验装置

试验装置如图7所示,主要包括具备超声信号激励和采集功能的多功能压电超声检测仪器(SCHY-PZT,江苏三川智能科技有限公司)、功率放大器(QSX-200,湖北全新声智能科技有限公司)、新型超声换能器、低噪声前置放大器(FD101,湖北全新声智能科技有限公司)和显示终端。超声传感器分别布置在A面和C面,其中,A面布置8阵列传感器作为接收端,C面布置一个传感器作为激励端。A面和C面均设置19个测点,测点间距为5 cm。当激励端位于第一个测点位置时,进行一次激励,8阵列接收传感器同时采集超声信号,此时固定C面激励传感器位置不变,依次移动A面的8阵列接收传感器至另外的测点,直至完成19条传播路径的超声信号采集。然后移动C面的激励传感器至下一测点位置,重复以上步骤直至遍历C面所有测点。

采用Hanning调制的五峰波作为激励信号,为探究不同激励信号的中心频率对成像精度的影响,根据图6c)阻抗曲线在试验中分别设置25 kHz、50 kHz和100 kHz三种不同激励信号的工况,功率放大器输出信号为±100 V。由于该项目中钢-混凝土组合结构试件体积大,传播介质分界面多,导致透射波衰减较大,因此在接

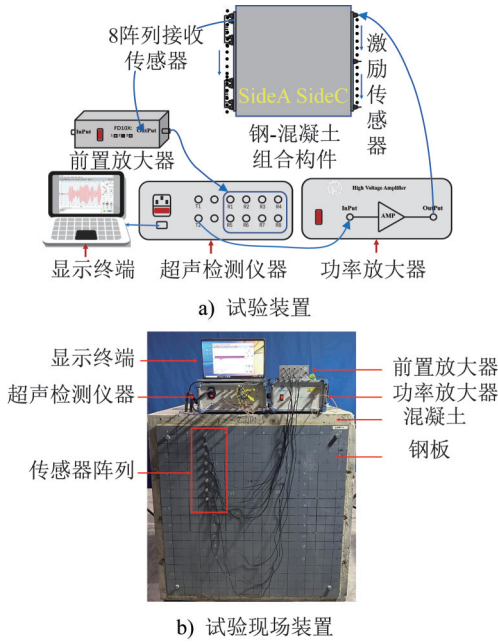


图7 超声CT成像试验装置

Fig. 7 Ultrasonic CT imaging test setup

收传感器阵列端连接低噪声前置放大器,放大175倍后传输给超声检测采集模块,采集频率为2 MHz,采集持续时间为0.1 s,以确保能够记录每个频率对应的响应。每种激励工况均遍历A面和C面所有测点,即每种激励工况均采集361条不同透射波路径的超声信号,一共采集了1 083条超声检测信号。

### 4 界面剥离成像结果分析

#### 4.1 初至提取结果

在提取的过程中,以A面第一个测点和C面第一个测点相连的第一条射线为例,利用AIC算法分别提取25 kHz、50 kHz和100 kHz三种激励频率下透射波信号的初至,如图8所示。图中AIC曲线的第一个拐点对应的时间轴刻度即为透射波的初至时刻,在25 kHz、50 kHz和100 kHz激励频率下第一条透射波的初至值分别为284.5  $\mu$ s、270.0  $\mu$ s和263.5  $\mu$ s。

依次提取不同激励频率下1 083条透射波传播路径的初至,代入式(5)中,并采用BPT+SIRT反演算法求解CT图像。

#### 4.2 不同激励频率的成像结果

图9所示为不同激励频率的CT成像结果, $x=0$ 处代表钢-混凝土组合结构C面, $x=1.1$  m代表A面。根据试验中试件所设缺陷的大小和位置,用黑色矩形框代表该横截面上缺陷的位置和深度信息。由图可知,该算法可以识别钢-混凝土组合结构的透射波传播速度较低

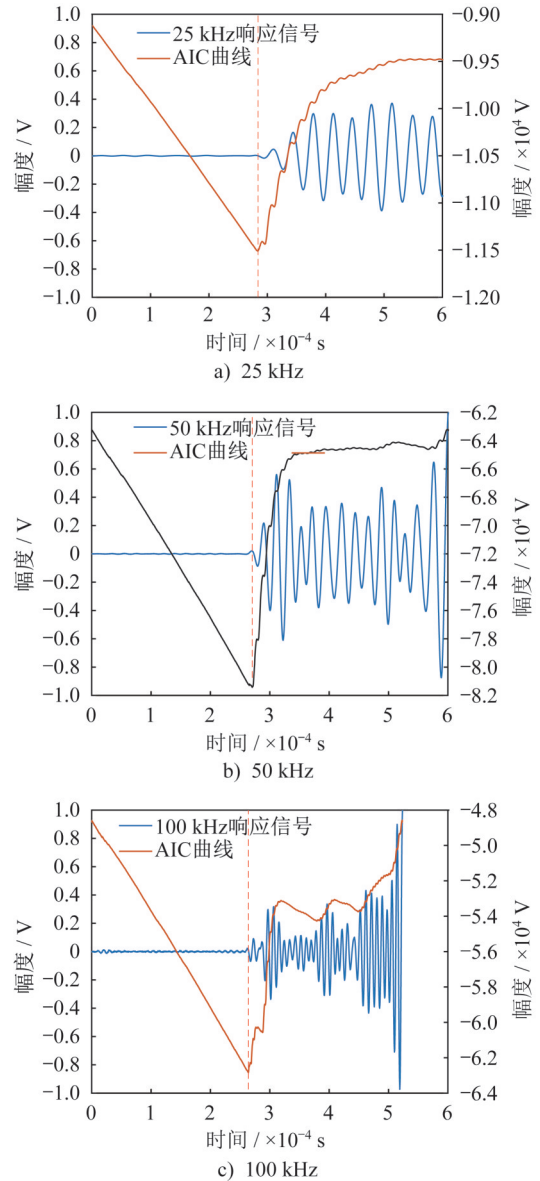


图8 AIC初至提取示意(以第一条透射波为例)

Fig. 8 AIC extraction of initial arrival (taking the first transmitted wave as an example)

的区域,该低速区域与试件的人工损伤缺陷位置处高度重合,这表明通过超声CT图像可以有效判断钢-混凝土组合结构的剥离位置。从激励频率的角度,25 kHz激励频率下的CT成像结果中,低速区域与缺陷区域重合度最高,50 kHz次之,100 kHz激励频率下的成像结果中出现了噪点,原因是超声波的频率与空间分辨率成正比,但与穿透能力成反比。高频超声波虽然对尺寸较小的缺陷更为灵敏,但高频超声波的穿透力较差,对于截面尺寸较厚的试件且具有一定深度的缺陷并不适用。因此,低频波更适用于检测深层的损伤或较厚的试件。本文试验中的钢-混凝土组合结构尺寸较大,高频100 kHz作用下混凝土材料的非均匀性影响较大,图片中会出现超声伪像。

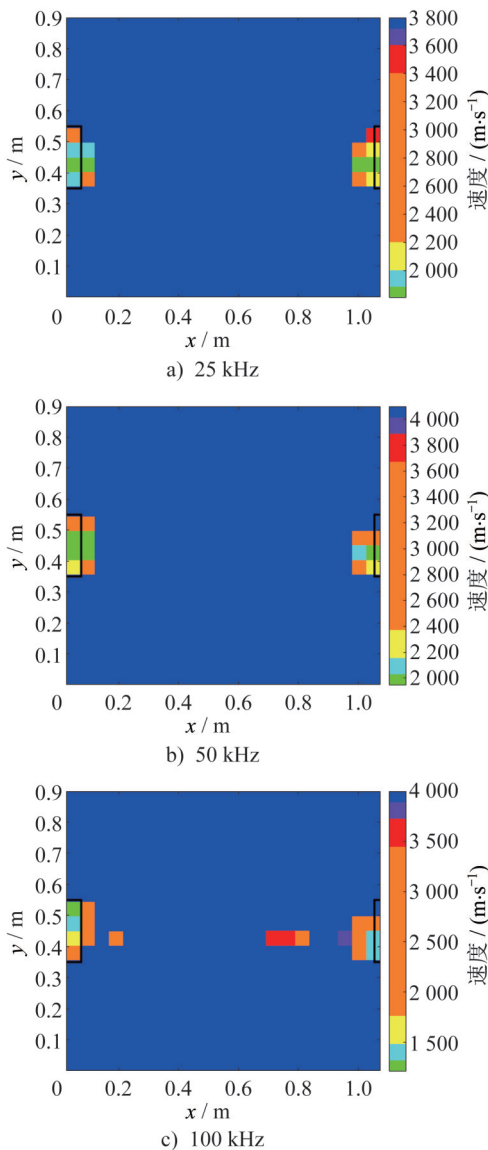


图9 不同激励频率下的成像结果对比

Fig. 9 Comparison of imaging results under various excitation frequencies

## 5 结论

(1) 本文建立了钢-混凝土组合结构的正演数值模型,通过设置虚拟的速度场分布得到了不同透射波路径的正演投影值,考察了不同求解算法的成像精度,发现将采用BPT算法的计算结果作为SIRT算法的初值的方式成像精度更高。

(2) 针对现有的超声检测接收信号信噪比低的问题,研发了磁吸式新型超声换能器。对于钢-混凝土组合结构的缺陷检测,该换能器具有便于安装且可重复使用的优点,传感器内部所设置的电磁屏蔽措施可以有效提高接收信号的信噪比。

(3) 本文所采用的AIC算法可以准确提取透射波信号的初至,有利于显著提高CT成像的精度。

(4) 试验研究验证了采用将BPT算法的计算结果作为SIRT算法的初值的方式可以准确对钢-混凝土组合结构低速区域进行重构。低速区域与缺陷区域高度重合,表明超声CT图像可以识别钢-混凝土组合结构内部缺陷,并且低激励频率的成像效果更好。

(5) 由于本文试验研究试件的两侧钢板中心位置均设置了缺陷,显著提升了界面缺陷的深度识别的难度。因此基于CT图像的缺陷深度信息的精准识别,有待进一步系统性的试验验证。

## 参考文献:

- [1] 王晓强,陶慕轩.新型海上超大型钢-混凝土组合箱式浮体平台结构设计与分析[J].工程力学,2019,36(11):147-157. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2018.12.0647.  
WANG Xiaoqiang, TAO Muxuan. Scheme design and analysis of novel very large steel-concrete composite pontoon-type floating structures[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(11): 147-157. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.12.0647. (in Chinese)
- [2] 郝婷玥,曹万林.双钢板混凝土组合剪力墙轴压承载力研究[J].工程科学学报,2017,39(11):1765-1773. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2017.11.020.  
HAO Tingyue, CAO Wanlin. Study on axial compressive bearing capacity of composite shear wall with double-skin steel plate[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(11): 1765-1773. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2017.11.020. (in Chinese)
- [3] 王琦,于恒昌,江贝,等.方钢约束混凝土拱架补强机制研究及应用[J].工程科学学报,2017,39(8):1141-1151. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2017.08.002.  
WANG Qi, YU Hengchang, JIANG Bei, et al. Study and application of strengthening mechanism of square confined concrete arch with grouting holes [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(8): 1141-1151. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2017.08.002. (in Chinese)
- [4] CHEN L H, DAI J X, JIN Q L, et al. Refining bond-slip constitutive relationship between checkered steel tube and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 79: 153-164. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.058.
- [5] 代建云,刘宇,姜清辉,等.埋入式水泥基球形压电传感器的制备表征及其在声发射监测中的应用[J].工程科学学报,2023,45(9):1569-1582. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2022.07.13.002.  
DAI Jianyun, LIU Yu, JIANG Qinghui, et al. Preparation and characterization of embedded cement-based spherical piezoelectric sensors and their application in acoustic emission monitoring[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(9): 1569-1582. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2022.07.13.002. (in Chinese)
- [6] 陈丹,肖会芳,黎敏,等.金属材料内部非金属夹杂超声检测的数值模拟[J].工程科学学报,2015,37(7):942-949. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2015.07.017.

- CHEN Dan, XIAO Huifang, LI Min, et al. Numerical simulation of ultrasonic testing for non-metallic inclusions in metallic materials[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(7): 942-949. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2015.07.017. (in Chinese)
- [ 7 ] FENG Q, KONG Q Z, JIANG J, et al. Detection of interfacial debonding in a rubber-steel-layered structure using active sensing enabled by embedded piezoceramic transducers[J]. Sensors, 2017, 17(9): 2001. DOI: 10.3390/s17092001.
- [ 8 ] QIN F, KONG Q Z, LI M, et al. Bond slip detection of steel plate and concrete beams using smart aggregates[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(11): 115039. DOI: 10.1088/0964-1726/24/11/115039.
- [ 9 ] KONG Q Z, SAWAB J, NIE X, et al. Local bond-slip monitoring in a steel plate-ultra high performance concrete (S-UHPC) beam using smart aggregates[C]// Proceedings of the 16th Biennial International Conference. Cleveland, Ohio: American Society of Civil Engineers, 2018: 1145-1154.
- [ 10 ] XU B, LI B, SONG G. Active interfacial performance monitoring for concrete filled steel tube with embedded PZT techniques using power spectral density analysis[C]// Proceedings of the 16th ASCE Aerospace Division Conference. Pasadena, California, USA: American Society of Civil Engineers, 2012: 1371-1379.
- [ 11 ] LI X Q, LUO M Z, HEI C, et al. Quantitative evaluation of debond in concrete-filled steel tubular member (CFSTM) using piezoceramic transducers and ultrasonic head wave amplitude[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(7): 075033. DOI: 10.1088/1361-665X/ab1f27.
- [ 12 ] 周先雁, 肖云凤. 用超声波法和冲击回波法检测钢管混凝土质量的研究[J]. 中南林学院学报, 2006, 26(6): 44-48. DOI: 10.3969/j.issn.1673-923X.2006.06.023.  
ZHOU Xianyan, XIAO Yunfeng. The detection of concrete-filled steel tube with methods of ultrasonic wave and impact-echo[J]. Journal of Central South Forestry University, 2006, 26(6): 44-48. DOI: 10.3969/j.issn.1673-923X.2006.06.023. (in Chinese)
- [ 13 ] 雷运波, 丁睿, 刘浩吾. 钢管混凝土拱桥超声检测技术研究[J]. 无损检测, 2005, 27(2): 80-82. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6656.2005.02.007.  
LEI Yunbo, DING Rui, LIU Haowu. Study on ultrasonic testing of steel tube-confined concrete arch bridge[J]. Nondestructive Testing, 2005, 27(2): 80-82. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6656.2005.02.007. (in Chinese)
- [ 14 ] 董军锋, 王耀南, 咎帅. 超声波检测矩形钢管混凝土脱空缺陷的研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(1): 103-107. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2018.01.018.  
DONG Junfeng, WANG Yaonan, ZAN Shuai. Study on ultrasonic detection about void defects of concrete filled rectangular steel tube[J]. Building Science, 2018, 34(1): 103-107. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2018.01.018. (in Chinese)
- [ 15 ] 曹国辉, 祝新, 刘辉. 超声法检测钢管混凝土质量[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(1): 80-83. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2010.01.022.
- CAO Guohui, ZHU Xin, LIU Hui. Ultrasound detected on the quality of concrete-filled steel tube[J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(1): 80-83. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2010.01.022. (in Chinese)
- [ 16 ] CHEN H B, XU B, ZHOU T M, et al. Debonding detection for rectangular CFST using surface wave measurement: Test and multi-physical fields numerical simulation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 238-254. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.07.047.
- [ 17 ] XU B, LUAN L L, CHEN H B, et al. Experimental study on active interface debonding detection for rectangular concrete-filled steel tubes with surface wave measurement[J]. Sensors, 2019, 19(15): 3248. DOI: 10.3390/s19153248.
- [ 18 ] 赵玉栋, 陈洪兵, 聂鑫. 基于 MASW 方法识别高速铁路组合桥梁界面剥离损伤的可行性研究[J]. 中国铁路, 2019(11): 98-103. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2019.11.098.  
ZHAO Yudong, CHEN Hongbing, NIE Xin. Feasibility study on MASW-based identification of interface peeling of composite bridge[J]. China Railway, 2019(11): 98-103. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2019.11.098. (in Chinese)
- [ 19 ] MARTIN J, BROUGHTON K J, GIANNIPOLOUS A, et al. Ultrasonic tomography of grouted duct post-tensioned reinforced concrete bridge beams[J]. NDT & E International, 2001, 34(2): 107-113. DOI: 10.1016/S0963-8695(00)00035-9.
- [ 20 ] LIU L B, GUO T S. Seismic non-destructive testing on a reinforced concrete bridge column using tomographic imaging techniques[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2005, 2(1): 23-31. DOI: 10.1088/1742-2132/2/1/004.
- [ 21 ] KEPLER W F, BOND L J, FRANGOPOL D M. Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography. Part II-application[J]. Construction and Building Materials, 2000, 14(3): 147-156. DOI: 10.1016/S0950-0618(00)00013-1.
- [ 22 ] 朱维, 吴何珍. 岩石超声检测信号初至的 AIC 自动拾取方法[J]. CT 理论与应用研究, 2015, 24(2): 225-238. DOI: 10.15953/j.1004-4140.2015.24.02.08.  
ZHU Wei, WU Hezhen. Technique of AIC for automatic onset time picking of ultrasound signals in rock [J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2015, 24(2): 225-238. DOI: 10.15953/j.1004-4140.2015.24.02.08. (in Chinese)
- [ 23 ] HEI C, LUO M Z, GONG P P, et al. Quantitative evaluation of bolt connection using a single piezoceramic transducer and ultrasonic coda wave energy with the consideration of the piezoceramic aging effect[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(2): 027001. DOI: 10.1088/1361-665x/ab6076.
- [ 24 ] LI X Q, LIU G X, SUN Q L, et al. Bolt tightness monitoring using multiple reconstructed narrowband Lamb waves combined with piezoelectric ultrasonic transducer [J]. Smart Materials and Structures, 2023, 32(10): 105017. DOI: 10.1088/1361-665X/acf2d2.