

基于超声波合成孔径技术的钻孔成像方法

汪进超¹, 陶东新², 黄燕庆³, 王川婴¹, 韩增强¹, 胡 胜¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 浙江华夏工程勘测设计研究院宁波分院, 浙江 临海 315000; 3. 中国中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘 要: 随着地下空间开发的深入, 钻孔岩壁上特殊区域的重视程度越来越高, 为了克服传统超声波钻孔成像技术分辨率低的不足, 提出一种基于超声波合成孔径技术的钻孔成像方法, 提高钻孔图像的分辨率和图像质量。采用高分辨率的合成孔径 SAFT 成像技术综合处理大量的断面扫描回波信号, 达到增强反射信号和抑制干扰信号的目的, 使对应的岩壁特征区域回波更加突显, 在该基础上提取出扫描断面回波信号的声幅和声时参数。综合声幅和声速参数的特征, 提出了基于相关性的超声波钻孔图像重建原则, 选择合适的成像数据点, 在叠加不同深度的探测数据后形成了关注区域更加明显的钻孔重建图像。将该方法应用到了实际工程中, 验证了该方法的可行性和准确性。

关 键 词: 钻孔成像; 合成孔径技术 (SAFT); 超声成像; 地质钻孔

中图分类号: TD326

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 增 1-0557-08

Borehole imaging method based on ultrasonic synthetic aperture technology

WANG Jin-chao¹, TAO Dong-xin², HUANG Yan-qing³, WANG Chuan-ying¹, HAN Zeng-qiang¹, HU Sheng¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Ningbo Branch of Zhejiang Huaxia Engineering Survey and Design Research Institute, Linhai Zhejiang 315000;

3. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract: With the development of underground space, more and more attention has been paid to the special areas on borehole wall. In order to overcome the low resolution of traditional ultrasonic borehole imaging technology, a new borehole imaging method based on ultrasonic synthetic aperture technology is proposed to improve the resolution and image quality. Firstly, high resolution synthetic aperture focusing technique (SAFT) is used to synthetically process a large number of cross-section scanning echo signals, so as to enhance the reflection signal and suppress the interference signal, which makes the echo of the corresponding typical area at the rock wall more prominent. Then the sound amplitude and sound time parameters of the scanned cross-section echo signals are extracted. The principle of ultrasonic drilling image reconstruction based on correlation is proposed based on the synthesized characteristics of sound amplitude and sound velocity parameters. After superimposing the detection data of different depths, the borehole reconstruction image with more obvious focus area is formed. Finally, the method is applied in practical engineering, and its feasibility and accuracy has been verified.

Keywords: borehole imaging; synthetic aperture focusing technique (SAFT); ultrasound imaging; geological drilling

1 引 言

随着我国经济建设的快速发展, 尤其是西部大开发战略的实施, 大型水利水电、能源交通等基础设施的建设正掀起一个新的高潮, 水利水电工程建设的规模和水平也向大型、超大型发展, 在大型土木工程建设中岩体是建筑物的地基和环境。不同建造的岩体在漫长的地质历史时期曾遭受过多期的构

造运动以及浅表地质作用的改造, 使得岩体中广泛存在性质各异的结构面和规模不等的空洞特殊区域, 具有复杂性、非连续性、各向异性等特性, 是影响岩体工程质量评价的重要参数之一^[1]。目前主要采用地质钻孔获取岩芯的方法, 同时结合地质调查资料及各种物探技术可较为准确地获取钻孔内各项岩体结构信息。

光学钻孔摄像技术能够准确获取钻孔内各项

收稿日期: 2019-01-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.41731284); 国家自然科学基金面上项目 (No.41472271)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41731284) and the National Natural Science Foundation of China (41472271).

第一作者简介: 汪进超, 男, 1988 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事地下空间探测及岩土测试方面的研究。E-mail: jcwang@whrsm.ac.cn

地质信息,形成的钻孔图像能够直观反映钻孔中结构面以及规模不等的空洞特殊区域,具有较高的分辨率和测量精度^[2-3]。在实际工程钻孔中通常采用各种方式护壁或者存在非清水环境的钻井液,导致钻孔内的探测环境常常处于非纯透明的状态,会大大影响光学钻孔成像的质量,而超声波钻孔成像能够有效适应更为复杂的钻孔介质环境诸如浑水和泥浆等,在这种环境下可采用超声波钻孔成像方法获取钻孔内壁的图像信息。由于地质钻孔是非均匀各向异性的岩体结构,超声波在传播过程中会产生复杂的反射、折射与透射等现象,能量衰减会很大,接收到的信号会掺杂结构噪声、边界面的反射和缺陷目标的反射等,使得信噪比非常的低,若采用传统的超声波钻孔成像分析方法很难从接收信号中判断缺陷,且横向分辨率比较低,因此提高钻孔图像的分辨率具有重要意义。

合成孔径技术(synthetic aperture focusing technique, SAFT)应用小尺度换能器及比较低的工作频率,获得方位的高分辨率^[4-9],过去主要应用在医学的超声图像成像中。为了解决目前超声成像分辨率低的问题,且不增加硬件系统设计的复杂度,本文从信号处理的角度改善钻孔成像的精度,并根据相关性分析方法,综合声幅和声时成像的特点,提出基于超声波合成孔径技术的钻孔成像方法,以提高钻孔岩壁的成像分辨率。

2 基于 SAFT 技术的钻孔成像方法

由于 SAFT 技术更适用于断面的高精度成像,而地质钻孔的成像关注点在于岩壁表面的结构特征,本文利用 SAFT 技术的高精度特点,结合传统声时以及声幅成像的图像重建模型,在与传统超声钻孔成像技术工作模式保存一致的情况下提出了基于 SAFT 技术的钻孔成像方法,重建较高质量的钻孔图像。

2.1 超声波钻孔 SAFT 技术

在超声波成像领域^[10]广泛使用的合成孔径技术是利用多个在不同位置的超声波换能器阵元,按一定规则发射和接收超声波回波信号,通过做适当的时延调整、信号叠加和平均等处理,达到等效孔径增大的目的。根据衍射理论,合成孔径技术能够提高成像分辨率,也可以用单阵元换能器在探测线上逐点移动,逐次发射和接收信号后合成处理得到图像,相当于用一大孔径换能器进行探测,提高了探测分辨力。由于地质钻孔的尺寸被严格限制,不允许在有限的钻孔内部布设大量的超声波换能器,

但可通过超声波换能器的旋转,等效“合成”出较大的孔径,换能器旋转一圈发射等尺寸间隔的 N 个不同位置超声波短脉冲,随着换能器的匀速旋转,在钻孔内部的中心位置形成了一个由 N 个等尺寸间隔阵元组成的环形阵,如图 1 所示。

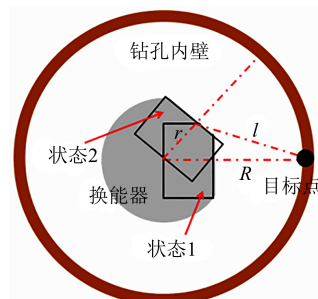


图 1 超声波 SAFT 旋转示意图
Fig.1 Sketch of ultrasound SAFT rotation

在合成孔径技术中各个位置的等效阵元是按顺序依次发射并接收,各等效阵元间的相位差是由发射到接收的“双程”距离差引起的。与实际同样尺寸的直线阵列形成的“单程”指向特性相比,合成孔径各等效基元间的相位差就大了 1 倍,波长为 λ ,长度为 L_s 的合成孔径线阵的半功率波束角 β 为

$$\beta = (0.84\lambda)/(2L_s) = 0.42\lambda/L_s \quad (1)$$

对应的合成孔径方位分辨率 δ 为

$$\delta = \beta R = D/2 \quad (2)$$

式中: D 为超声换能器的发射面水平尺寸,若发射面为圆形,则 D 为发射面的外径。由式(2)可见,超声波合成孔径的方位分辨率为 $D/2$,与超声波长以及目标物到换能器的距离无关。超声波钻孔合成孔径的长度 L 计算公式为

$$L = 0.42(c/(fD))(R-r) \quad (3)$$

式中: c 为超声波在钻孔内部介质中的传播速度; f 为超声换能器的工作频率; R 为钻孔的半径; r 为置于钻孔中心位置的换能器旋转半径。由式(3)可知,超声波钻孔合成孔径长度的大小和钻孔壁与扫描半径之差成正相关。

若以图 1 中的环形阵中心原点建立极坐标系,设环形阵半径为 r_j ,阵元角度间隔为 θ_j ,各状态的等效阵元极坐标为 (r_j, θ_j) ,目标点位于 (R_i, θ_i) 处,则第 j 个等效阵元与目标点间距离 $l_{i,j}$ 为

$$l_{i,j} = \sqrt{R_i^2 + r_j^2 - 2R_i r_j \cos(\theta_i - \theta_j)} \quad (4)$$

通常情况下环行阵半径 r 小于钻孔内壁所在半径 R ，且相差不大，可以将换能器旋转所形成的环形阵与钻孔内壁面视为两个平行面，则在超声波钻孔 SAFT 合成目标点的过程中，岩壁反射回波的到达时延 τ 为

$$\tau = 2l_{i,j}/c = 2\sqrt{R_i^2 + r_j^2 - 2R_i r_j \cos(\theta_i - \theta_j)}/c \quad (5)$$

2.2 反射回波信号处理

在 SAFT 钻孔断面成像前期需要对回波信号进行处理，时域相关处理方法是 SAFT 超声成像中最传统、最简单也是目前实际应用最广泛的处理方法之一^[11-13]，本次采用时域相关处理算法进行回波信号处理。声波信号随合成孔径目标点离随等效换能器阵元的距离而变化，预先完成这部分计算，并将结果存储起来，再作相关处理，其工作示意图如图 2 所示。

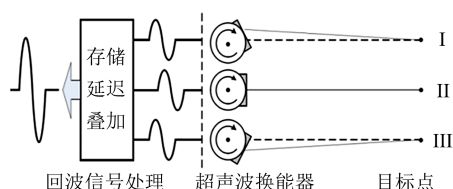


图 2 SAFT 钻孔断面成像示意图

Fig.2 Sketch of borehole section imaging of SAFT

进行相关处理时，由于反射回波信号中存在和夹杂着大量的回波噪声，信号之间的噪声相关性较差，目标点之间的相关性较好，本次进行信号处理时将信号相关性技术引入到超声波钻孔 SAFT 信号处理中，在信号处理中相关性是指变量之间相互关联的关系。

在超声波钻孔成像信号处理中钻孔内壁目标点反射回波之间具有较好的相关性，而回波噪声之间的相关性很弱，因此，进行线性幅值叠加处理之前对相邻回波信号先进行累乘处理，然后对换能器在各相邻位置接收到的原始回波信号 $s(i, j)$ ， $s(i, j+1)$ 先作相关分析，其关系用相关系数 $\gamma_{i,j}$ 表示。假设钻孔内某个深度断面钻孔内壁目标点的反射回波信号矩阵为 m 行、 n 列，其中 m 为扫描方向上回波信号的采样点数； n 为在一个断面（圆周）上的扫描次数，相邻两列扫描线之间的夹角为 $2\pi/n$ 。假设超声波换能器接收到第 j 列和第 $j+1$ 列的超声回波信号，则这两列信号之间的相关系数：

$$\gamma_{i,j} = \frac{\text{cov}[s(i, j), s(i, j+1)]}{\sqrt{D(s(i, j))D(s(i, j+1))}} \quad (6)$$

式中： $i \leq m$ ， $j+1 \leq n$ ，且存在如下关系式：

$$\text{cov}[s(i, j), s(i, j+1)] =$$

$$\sum_{i=1}^m [s(i, j) - \overline{s(i, j)}][s(i, j+1) - \overline{s(i, j+1)}] \quad (7)$$

$$D(s(i, j)) = \sum_{i=1}^m [s(i, j) - \overline{s(i, j)}]^2 \quad (8)$$

$$D(s(i, j+1)) = \sum_{i=1}^m [s(i, j+1) - \overline{s(i, j+1)}]^2 \quad (9)$$

式 (6) 中， $\gamma_{i,j}$ 用来评定两列接收回波之间的相关程度，其变化范围是从 $-1 \sim +1$ ，当 $\gamma_{i,j} = \pm 1$ 时表示第 j 列和第 $j+1$ 列回波完全(或逆)线性相关；当 $\gamma_{i,j}$ 位于 $-1 \sim +1$ 时，表示它们具有一定的相关性，取非线性函数 $\chi(\gamma_{i,j}) = \gamma_{i,j} \exp(\gamma_{i,j})$ 为权值生成函数。

相邻各列信号在作累乘时以 $\chi(\gamma_{i,j})$ 进行加权，重建点在作幅值叠加时以进行加权。对于权值函数，其值越大时，其绝对值越大，则重建图像中缺陷点得到加强，散射噪声点被抑制，图像信噪比增强，图像质量大大改善。在引入相关度加权后其超声波钻孔合成断面成像算法可以表示为

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^m \chi \left(\frac{\sum_{j=1}^{n-1} \gamma_{i,j}}{n} \right) \left\{ \prod_{j=1}^{n-1} \chi(\gamma_{i,j}) s(l_{i,j}, j+1) \right\} \quad (10)$$

其中

$$a = 2\pi r; b = 2\pi R \quad (11)$$

式中： r 为置于钻孔中心位置的换能器旋转半径； a 为扫描圆的周长，即环形阵周长； R 为钻孔的半径； b 为钻孔内壁所呈圆的的周长。

2.3 岩壁声学参数提取

完成反射回波信号处理后将信号进行坐标变换，以信号的强弱呈现钻孔断面的图像时不能有效地和直观地显示钻孔内壁的表面岩石结构特征，此外，信息量过于冗余，影响成像效率，在钻孔成像前需要提取岩壁反射信号的部分声学特征参数，包括回波信号首波达到时间和最大电压幅值。

在回波信号声学参数提取中采用包络检测法提取信号的包络曲线，由于希尔伯特变换是一种经典的求取信号包络的方法，本文方法中的包络检测采用希尔伯特变换法，使得图像重构中的各量都用其希尔伯特信号包络代替，在保留信号幅度相位信息的基础上降低了需要处理的数据量，对提取岩壁结构特征具有很大的优越性。

原始信号经过希尔伯特变换将得到原始信号的正交信号,以原始信号为实部和希尔伯特变换得到的信号为虚部构造复信号,这个复信号的模就是所要求的实信号的包络^[14-16]。若一连续的时间信号 $x(t)$ 、 $h(n)$ 是单位冲击抽样响应,根据连续信号希尔伯特变换的性质及 $H(j\Omega)$ 和 $H(e^{j\omega})$ 的关系,可得

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} -j, & (0 < \omega < \pi) \\ j, & (-\pi < \omega < 0) \end{cases} \quad (12)$$

则

$$h(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega = \frac{1 - (-1)^n}{n\pi} = \begin{cases} \frac{2}{n\pi}, & (n \text{ 为奇数}) \\ 0, & (n \text{ 为偶数}) \end{cases} \quad (13)$$

故

$$\hat{x}(n) = x(n)h(n) = \frac{2}{\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{x(n-2m-1)}{2m+1} \quad (14)$$

将 $x(n)$ 和 $\hat{x}(n)$ 结合起来构成一个解析信号:

$$z(n) = x(n) + j\hat{x}(n) \quad (15)$$

对包络信号做谱分析即可得到包络信号的包络谱,希尔伯特包络具有解调功能,通过分离出信号的低频信息进行解调,由包络分析得到的结果往往比较清晰直观。

离散信号希尔伯特变换步骤:先对采样信号 $x(n)$ 进行快速傅里叶变换,获得频域上的信号 $X(k)$, $k=0,1,\dots,N-1$,其中, $k=2/N, \dots, N-1$ 时 $X(k)$ 对应的是负频率分量,其余的是正频率分量;再将负频率分量置 0,正频率分量加倍,即

$$Z(k) = \begin{cases} X(k), & (k=0) \\ 2X(k), & \left(k=1, 2, \dots, \frac{N}{2}-1\right) \\ 0, & \left(k=\frac{N}{2}, \dots, N-1\right) \end{cases} \quad (16)$$

对 $Z(k)$ 进行快速傅里叶反变换,获得 $x(n)$ 的解析信号 $z(n)$,由解析信号 $z(n)$ 获得信号 $x(n)$ 的包络。提取 $x(n)$ 包络线的最大幅值点的幅值大小信息,通过相关计算,即可求出第 j 条扫描线对应目标点的声学传播参数即声幅 $\text{Max } F_i$:

$$\text{Max } F_i = \max \{f_{1,j}, f_{2,j}, \dots, f_{i,j}, \dots, f_{m,j}\} \quad (17)$$

提取 $x(n)$ 包络线的最大幅值点所在的位置信息,通过相关计算,可求出第 j 条扫描线对应目标点的声学传播参数即声时 $\text{Max } T_i$:

$$\text{Max } T_i = \max \{t_{1,j}, t_{2,j}, \dots, t_{i,j}, \dots, t_{m,j}\} \quad (18)$$

2.4 超声钻孔图像重建

在传统的超声波钻孔成像技术中生成的钻孔图像包括声幅图像和声时图像,其中声幅图像是利用岩壁反射回波声幅的差异对钻孔岩壁的反射系数差异进行成像,获取钻孔岩壁的声阻抗信息。声时图像利用回波走时的差异对钻孔岩壁的大小差异进行成像,获取钻孔岩壁的完整破碎信息。声速图像和声幅图像从两个角度反映钻孔内部的一些特征情况,通常存在细小差异,见图 3。

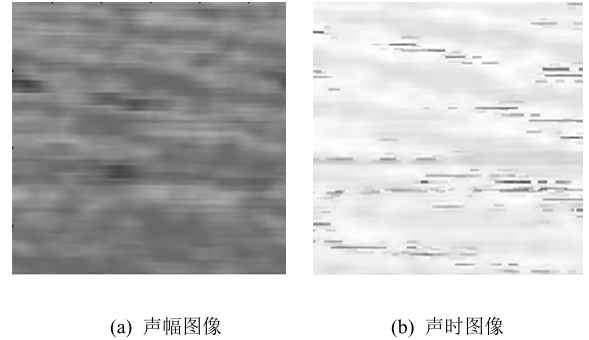


图 3 声幅图像和声时图像

Fig.3 Sound amplitude and sound interval images

本文提出的基于 SAFT 的钻孔成像方法利用钻孔内壁目标点之间的关联特性进行成像,考虑了声时和声幅两个参数对目标点的影响,突显了目标点的特征信息。

在某个深度的钻孔 SAFT 断面扫描图像中,假设有 n 条扫描线,相邻两条扫描线所对应的两个目标点若岩性一致,这两条扫描线对应的回波信号相关性较大,若存在区别,主要体现在粗糙度和完整程度上,而声时参数能够有效反映两个目标点之间的这一差异;相邻两条扫描线所对应的两个目标点若完整程度一致,这两条扫描线对应的回波信号相关性较小,若存在区别,主要体现在岩性的差异上,即声学反射系数存在区别,而声幅参数能够有效反映两个目标点之间的这一差异。因此,在超声波钻孔 SAFT 成像中选择声时参数反映钻孔内壁的粗糙度和完整程度,选择声幅参数反映钻孔内壁的岩性差异。

为了区分这一差异,设定在钻孔成像深度 h 处的特征阈值 Q_h 进行判断。特征阈值 Q_h 的大小根据

实际情况进行选择,若岩石比较完整,则特征阈值 Q_h 选择较大,体现岩性的差异,若岩石岩性比较一致,则特征阈值 Q_h 选择较小,体现岩壁的结构差异特征,其表达式为

$$P_{h,j} = \begin{cases} \text{Max } F_{h,j}, & (|\gamma_{h,j}| \leq Q_h) \\ 1 - \text{Max } T_{h,j}, & (|\gamma_{h,j}| > Q_h) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{h,j}$ 为深度 h 处断面上第 j 条扫描线对应的岩壁成像点值; $\text{Max } F_{h,j}$ 为深度 h 处断面上第 j 条扫描线对应岩壁的声幅参数; $\text{Max } T_{h,j}$ 为深度 h 处断面上第 j 条扫描线对应岩壁的声时参数; $|\gamma_{h,j}|$ 为深度 h 处断面上第 j 条扫描线与第 $j+1$ 条扫描线对应岩壁之间的相关系数绝对值。

钻孔图像由多个 $P_{h,j}$ 点组成,其基于 SAFT 的钻孔成像矩阵为 hn , 得到 hn 个成像数据点。然后采样线性映射,将最弱的岩壁成像点值映射为 0,表示在同一个断面上,声幅最弱,声时最长,最强的岩壁成像点值映射为 1,表示在同一个断面上,声幅最强,声时最短,将图 3 中的声时图像与声幅图像按照该方法进行合成重建,其结果见图 4。

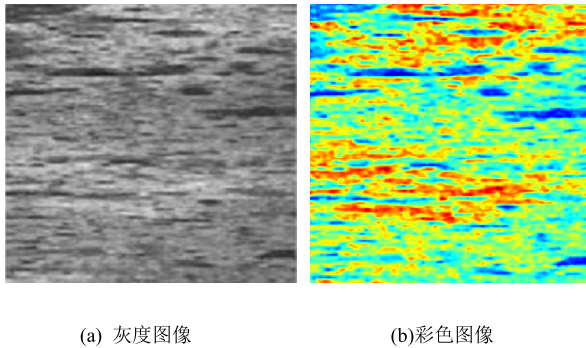


图 4 重建后的灰度图像和彩色图像
Fig.4 Gray and color images after reconstruction

图 4 中重建过程中,若相关系数大于设定的阈值即两条扫描线对应的岩壁存在较大的关联性,在反射能力上较为一致,而离换能器的远近可以反映出与岩壁距离的远近,图像中选取最大点所对应的时间参数。如果相关系数小于设定的阈值,即两条扫描线对应的岩壁存在较小的关联性,在反射能力上存在较大差异,因此图像选取最大点所对应的幅值参数。

3 工程应用

在我国北方某地铁规划沿线上存在不良地质问题,为进一步对岩体结构特征以及岩体完整性进

行分析研究,开展了钻孔成像勘察工作,由于钻孔内介质环境为非清水环境,且不利于清孔,光学钻孔成像设备不能有效发挥作用,在这种特殊环境,本文提出的基于超声波合成孔径技术的钻孔成像方法得到应用其中。

3.1 采集系统

针对基于超声波合成孔径技术的钻孔成像方法,笔者及其所在团队研制出了一套基于超声波合成孔径技术的钻孔成像系统。该系统硬件部分主要由探头、通讯电缆和地面系统三部分组成,探头主要采集钻孔内壁信息,通讯电缆主要为探头和地面系统的实时通讯以及数据传输,地面系统给钻孔内探头发送工控指令并且对数据进行存储、呈现和计算等处理,其整套系统的实物图见图 5。



图 5 基于超声波 SAFT 钻孔成像系统实物图
Fig.5 Drilling imaging system based on ultrasonic SAFT

探头主要由收发一体超声换能器、步进电机控制模块、感知模块、主控制电路、电源模块和传输模块等组成。通讯电缆为光纤通讯电缆,地面系统主要由深度编码器、电缆绞车、控制箱/存储器、数据处理器六部分所组成,感知模块包括电子罗盘、电机转角编码器。

3.2 数据分析

本次基于超声波合成孔径技术的钻孔成像系统完成了多个钻孔的孔壁成像探测工作,获得大量的钻孔岩壁特征数据,在后续的分析处理中采用本文所描述的方法进行数据分析。

首先,以各个深度的扫描断面为单位进行反射回波信号的处理,完成超声波合成孔径的断面成像,其部分断面成像效果如图 6 所示。

完成了需要钻孔成像的各断面成像后进行岩壁声学参数提取,获取声幅参数和声时参数,同时计算出相邻扫描线之间的相关性系数,为超声波钻孔成像提供成像数据点,其深度 36.650 m 处的部分

数据见表 1。

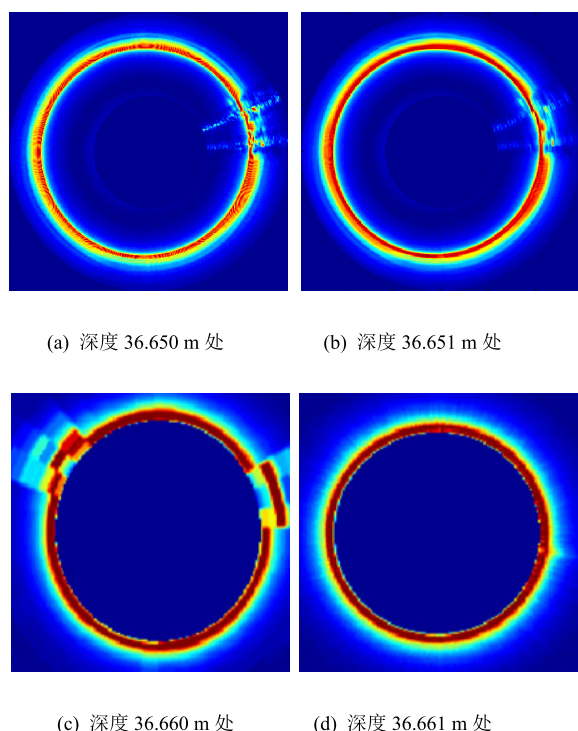


图 6 部分断面成像图

Fig.6 Partial sectional imaging

表 1 部分数据
Table 1 Partial data

扫描编号	方位/(°)	相关系数	声幅	声时	图像重建点
1	0	0.76	0.215 1	0.819 9	0.180 1
2	1.2	0.32	0.126 4	0.679 1	0.126 4
3	2.4	0.35	0.135 5	0.684 7	0.135 5
...	...	...	...	...	...
298	356.4	0.26	0.132 0	0.610 2	0.132 0
299	357.6	0.44	0.174 3	0.605 2	0.174 3
300	358.8	0.51	0.200 1	0.809 0	0.191 0

根据超声波钻孔图像重建原则,选择合适的成像数据点,并叠加不同深度的探测数据,合成最终的钻孔图像,在该深度选取特征阈值 $Q_h = 0.5$,其部分结果见图 7。



图 7 钻孔图像重建图

Fig.7 Borehole image after reconstruction

图 7 中,图像中的暗色区域,表示声幅较弱或者声时较长,其物理意义表示钻孔岩壁粗糙,或者存在结构面或者孔洞,图像中的亮色区域,表示声幅较强或者声时较短,其物理意义表示钻孔岩壁光滑或者完整。

3.3 结果对比

在反射回波信号的处理中未经 SAFT 技术处理时其原始数据噪声较大,经本文方法处理后回波信号噪声能够被有效抑制,降低噪声对后续分析的干扰,选取某个断面回波信号进行处理前后的对比图如图 8 横坐标为时间 (μs) 所示。

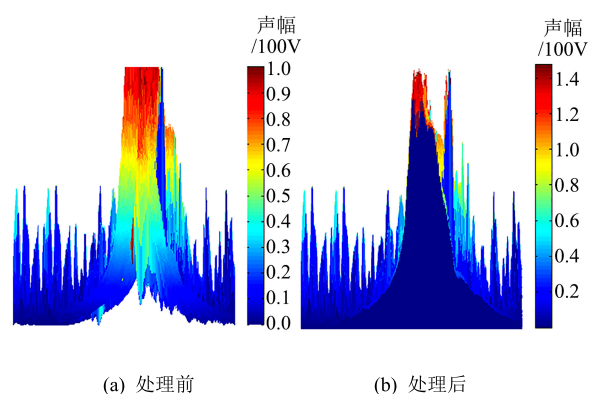


图 8 SAFT 处理前后的信号对比

Fig.8 Comparison of signals before and after SAFT processing

从图 8 中可以看出,在回波信号边缘附近 SAFT 处理后效果不是很好,是由于边缘处采集数据不足造成的,但不影响中间回波信号的噪声抑制,采用 SAFT 处理能够有效地抑制噪声,并加强回波信号的特征区域呈现。完成了基于 SAFT 的钻孔成像后将采用本方法生成的图像与未经过处理的声幅图像对比结果见图 9。

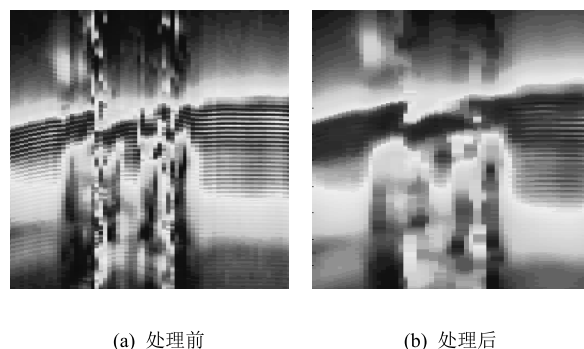


图 9 本文方法处理前后的图像对比

Fig.9 Comparison of image before and after processing using the method proposed in this paper

图 9 中, 左侧图像为未经本文方法处理的钻孔声幅图像, 右侧图像为经过本文方法处理后的钻孔图像。对比可以看出, 经过处理后的图像具有较高的信噪比, 且钻孔岩壁的特征区域较为平滑, 未经处理的声幅图像信噪比较低, 且存在明显的扫描痕迹, 是由于采用 SAFT 技术提高了超声波断面扫描的图像精度, 克服了分辨率低和噪声干扰的影响。此外, 在采用相关分析法的基础上, 结合声幅和声时的参数特征使钻孔图像的特征区域更加突出, 加强了图像特征部位的显示, 使钻孔图像的关注区域更加明显。

由于光学钻孔成像更直观, 为了验证本文方法的可行性和准确性, 将钻孔岩壁对应的光学成像图与本文方法的钻孔成像图进行对比, 其结果见图 10。

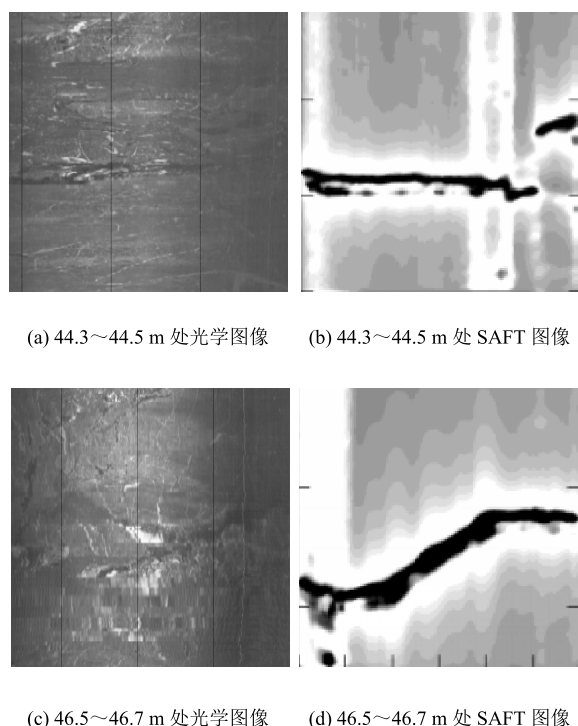


图 10 光学图像与 SAFT 图像对比
Fig.10 Comparison of optical image and SAFT image

从图 10 中可以看出, 光学图像中反映的裂隙等特征区域, 在 SAFT 图像中也能够显示出来, 且具有较好的一致性。由于光学图像对钻孔介质环境的要求较高, 而本方法的成像对钻孔环境要求较低, 形成的 SAFT 图像能够更加完整和明显地呈现裂隙等特殊区域, 为工程建设提供更多的参考依据。

本文所提方法在传统超声波钻孔成像系统工作方式保持不变的情况下, 通过综合大量的断面扫描回波信号, 采用高精度、高分辨率的 SAFT 成像

处理技术来实现同一断面上不同方位处岩壁的反射回波按距离修正并按相关性叠加处理, 增强反射信号和抑制干扰信号, 使对应的岩壁特征区域回波更加突显, 在此基础上提取出回波信号的声幅和声时参数, 采用基于相关性的超声波钻孔图像重建原则, 综合声幅和声速特征参数, 选择合适的成像数据点, 实现成像数据点的重建, 并叠加不同深度的探测数据, 合成最终的钻孔图像, 克服了分辨率低和噪声干扰的影响, 加强了图像特征部位的显示, 使钻孔图像的关注区域更加明显。

4 结 论

(1) 基于相关性的钻孔图像重建原则能够加强钻孔岩壁的特殊区域显示。

(2) 基于 SAFT 技术的钻孔成像方法能够有效克服分辨率低和噪声干扰的影响。

(3) 基于 SAFT 技术的钻孔成像方法具有可行性和准确性, 且分辨率高于传统的超声波钻孔成像方法。

参 考 文 献

- [1] 张浩然. 岩体结构面地质特征与几何要素研究[硕士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2008.
ZHANG Hao-ran. Study on geological characteristics and geometric elements of rock mass structural planes[Master's thesis D]. Nanjing: Hohai University, 2008.
- [2] 汪进超, 王川婴, 胡胜, 等. 孔壁钻孔图像的结构面参数提取方法研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 3074—3080.
WANG Jin-chao, WANG Chuan-ying, HU Sheng, et al. A new method for extraction of parameters of structural surface in borehole images[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(10): 3074—3080.
- [3] 汪进超, 王川婴, 唐新建, 等. 基于钻孔摄像技术的岩体节理大小估算方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2701—2707.
WANG Jin-chao, WANG Chuan-ying, TANG Xin-jian, et al. A method for estimating rock mass joint size using borehole camera technique[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(9): 2701—2707.
- [4] 王邓, 罗斌, 罗宏建. 合成孔径聚焦超声成像系统研究[J]. 电力技术, 2002, 23(12): 42—45.
WANG Deng, LUO Bin, LUO Hong-jian. Research on synthetic aperture focused ultrasound imaging system[J]. *Electric Power Technology*, 2002, 23(12): 42—45.
- [5] 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像[J]. 应用声学, 1996, 12(3): 43—48.
SUN Bao-shen, SHEN Jian-zhong. Synthetic aperture focused transonic imaging[J]. *Applied Acoustics*, 1996, 12(3): 43—48.

- [6] 杜英华. 合成孔径聚焦超声成像技术研究[博士学位论文 D]. 天津: 天津大学, 2010.
DU Ying-hua. Research on synthetic aperture focused ultrasound imaging technology[Ph. D thesis D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [7] 李小娟. 基于合成孔径聚焦技术的轮对探伤成像算法研究[硕士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
LI Xiao-juan. Research on imaging algorithms for wheelset inspection based on synthetic aperture focusing technology[Master's thesis D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [8] 庞勇, 韩焱. 超声成像方法综述[J]. 华北工学院测试技术学报, 2001, 15(4): 280—284.
PANG Yong, HAN Yan. Review of ultrasound imaging methods[J]. **Journal of Testing Technology North China Institute of Technology**, 2001, 15(4): 280—284.
- [9] 李力, 魏伟, 夏旺. 基于合成孔径聚焦技术的煤岩超声成像检测研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 727—734.
LI li, WEI wei, XIA Wang. Coal-rock ultrasonic imaging and testing research based on synthetic aperture focusing technology[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2018, 47(4): 727—734.
- [10] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999: 364—365.
FENG Ruo. Ultrasound manual[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999: 364—365.
- [11] 蔡兰, 兰从庆. 合成孔径聚焦超声成像方法研究[J]. 武汉工业大学学报, 1995, 18(1): 84—87.
CAI Lan, LAN Cong-qing. Study on synthetic aperture focused ultrasound imaging method[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 1995, 18(1): 84—87.
- [12] 孙宝申, 张凡, 沈建中. 合成孔径聚焦声成像时域算法研究[J]. 声学学报, 1997, 22(1): 42—49.
SUN Bao-shen, ZHANG Fan, SHEN Jian-Zhong. Research on time domain algorithms of synthetic aperture focused acoustic imaging[J]. **Journal of Acoustics**, 1997, 22(1): 42—49.
- [13] 田浩, 陶良, 于石声, 等. 线阵扫描超声相关合成成像方法与实验[J]. 应用声学, 1994, 13(5): 15—17.
TIAN Hao, TAO Liang, YU Shi-sheng, et al. Method and experiment of linear scan ultrasound correlation synthetic imaging[J]. **Applied Acoustics**, 1994, 13(5): 15—17.
- [14] 王锋, 赵拥军, 黄洁. 希尔伯特变换在雷达信号幅度和瞬时特征提取中的应用[C]//“现代雷达面临的电子对抗威胁”学术研讨会论文集, 合肥: [出版社不详], 2003: 173—177.
WANG Feng, ZHAO Yong-jun, HUANG Jie. Application of Hilbert transform in radar signal amplitude and instantaneous feature extraction[C]//Symposium on "Electronic Countermeasure Threat to Modern Radar" of Radar System Professional Committee. Hefei: [s. n.], 2003: 173—177.
- [15] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
ZHANG Xian-da. Modern signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
- [16] 谢雄耀, 万明浩. 复信号分析技术在地质雷达信号处理中的应用[J]. 物探化探计算, 2005, 22(2): 108—122.
XIE Xiong-yao, WANG Ming-hao. Application of complex signal analysis technology in geological radar signal processing[J]. **Geophysical and Geochemical Exploration Computation**, 2005, 22(2): 108—122.

上接第 540 页

- [14] 殷德胜, 汪卫明, 陈胜宏. 岩质边坡开挖过程模拟的动态有限单元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2217—2224.
YIN De-sheng, WANG Wei-ming, CHEN Sheng-hong. Dynamic finite element method for excavation process simulation of rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(11): 2217—2224.
- [15] CHEN S H, QIANG S. Composite element model for discontinuous rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(5): 865—870.
- [16] 强晟, 陈胜宏. 不连续岩体的三维弹黏塑性复合单元模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3390—3396.
QIANG Sheng, CHEN Sheng-hong. Three dimensional elasto-viscoplastic composite element model for discontinuous rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3390—3396.
- [17] CHEN S H, HE J, SHAHROUR I. Estimation of elastic compliance matrix for fractured rock masses by composite element method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 49: 156—164.
- [18] 陈胜宏, 强晟, 陈尚法. 加锚岩体的三维复合单元模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 1—8.
CHEN Sheng-hong, QIANG Sheng, CHEN Shang-fa. Study on the three-dimension composite element model of bolted rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 1—8.
- [19] CHEN S H, QIANG S, CHEN S F. Composite element model of the fully grouted rock bolt[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2004, 37(3): 193—212.
- [20] 张雄, 陈胜宏. 预应力锚索内锚段复合单元模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 933—938.
ZHANG Xiong, CHEN Sheng-hong. Composite element model research on inner anchoring section of prestressed anchor cable[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 933—938.