

# 基于时间反转算法和归一化小波能量熵的套筒灌浆缺陷检测

陈冬冬<sup>1,2</sup>, 张子航<sup>1</sup>, 汪莹<sup>3</sup>, 孙瑜<sup>2</sup>, 董志强<sup>2</sup>, 朱虹<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 南京 210037;

2. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 211189;

3. 中国建筑第五工程局有限公司, 长沙 410007)

**摘要:** 灌浆套筒灌浆缺陷严重削弱预制装配式结构性能, 需要发展有效的检测方法。在灌浆套筒表面黏贴压电陶瓷传感器, 对直接接收信号进行时间反转处理, 得到具有高信噪比的超声聚焦信号, 借助快速傅里叶变换和归一化小波能量熵算法, 对水平连接和竖向连接形式的套筒不同灌浆程度的聚焦信号进行频谱及能量分析。结果表明, 相对于直接接收信号, 经过时间反转算法处理的聚焦信号将幅值提高了 25.4 dB, 聚焦信号更适用于复杂连接环境下的套筒灌浆缺陷检测; 基于归一化小波能量熵的缺陷评价指标可以定量反映灌浆套筒内部缺陷程度。

**关键词:** 灌浆套筒; 缺陷检测; 时间反转; 小波能量熵; 压电陶瓷

中图分类号: P375; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)08-0001-07

## Defect detection for grouting sleeve based on time reversal algorithm and normalized wavelet energy entropy

CHEN Dongdong<sup>1, 2</sup>, ZHANG Zihang<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>3</sup>, SUN Yu<sup>2</sup>, DONG Zhiqiang<sup>2</sup>, ZHU Hong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. China Construction 5th Engineering Co., Ltd., Changsha 410007, China)

**Abstract:** Grouting defects of grouting sleeve reduce the seismic performance of prefabricated assembled structures and effective detection methods need to be developed. Piezoelectric ceramic transducers are pasted on the surface of the grouting sleeve, and the directly received signals are processed by the time-reversal algorithm to obtain high signal to noise ratio ultrasonic focused signals. Quantitative analysis of the spectral characteristics and energy of the focused signals with different grouting degrees of horizontal and vertical connection sleeves are carried out using the fast Fourier transform and normalized wavelet energy entropy algorithm. The results showed that: compared to the directly received signal, the time-reversed focused signal increases the amplitude by 25.4 dB, indicating that the focused signal is more suitable for defect detection in the complex connection environment of grouting sleeves. The defect evaluation index based on the normalized wavelet energy entropy method can quantitatively reveal the degree of grouting defects.

**Key words:** grouting sleeve; defect detection; time reversal; wavelet energy entropy; piezoelectric ceramic

收稿日期: 2023-04-25

基金项目: 教育部重点实验室开放基金(CPCSME2022-02)

作者简介: 陈冬冬(1992—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构健康监测的相关工作

通信作者: 陈冬冬, chendongjt@163.com

相比于现浇法施工, 装配式结构具有工期短、节能环保以及个性化定制的特点<sup>[1]</sup>。其的装配质量决定了整体结构性能。作为装配式结构的重要组成部分, 装配整体式混凝土结构竖向钢筋的连接在实际工程中普遍采用套筒灌浆方式。但由于套筒灌浆是

隐蔽工程,灌浆料的堵塞、回流及套筒内气孔上浮等因素会导致灌浆不饱满。相关研究表明,当套筒灌浆缺陷长度超过钢筋锚固区长度 30%时<sup>[2]</sup>,套简单向拉伸强度将被削弱,而带来结构安全隐患。

针对上述问题,国内外学者提出了包括预埋钢筋拉拔法、内窥镜法、射线法、冲击回波法以及超声法等不同类型灌浆饱满度检测和质量方法<sup>[3]</sup>。高润东等<sup>[4]</sup>依据预埋钢丝拉拔值对灌浆饱满度进行了判断,同时利用内窥镜观测灌浆缺陷深度,提出注射器外接透明软管的补灌方法;该方法可视性好,但需要一定宽度的检测孔道。唐科等<sup>[5]</sup>基于 X 射线 DR 成像技术,对预制剪力墙和柱角部套筒灌浆饱满度进行了检测,结果表明,套筒内部灌浆段与非灌浆段界面可通过 DR 成像清晰判断,但对于预制柱的连接节点检测较困难。冲击回波法是利用脉冲弹性波在结构表面及缺陷处反射回波信号的差异对缺陷进行判断的,最早由美国国家标准和技术研究所的 N. J. CARINO 和美国康奈尔大学的 M. SANSALONE 提出<sup>[6]</sup>。包龙生等<sup>[7]</sup>基于改进的冲击回波法,对装配式混凝土桥墩套筒灌浆饱满程度进行了数值仿真,但该方法并未进行试验研究。

超声波由于具有定向性好、穿透性强且无损的特点<sup>[8]</sup>,近年来在灌浆套筒饱满度检测方面应用广泛。由于超声波在灌浆不密实区的传播声时会增加,姜绍飞等<sup>[9]</sup>根据首波声时的不同,反推首波传播路径差异,实现了套筒灌浆缺陷检测。LI 等<sup>[10]</sup>利用汉宁窗调制 8 周期 40 kHz 超声激励信号,选用 L (0, 1) 模态对灌浆缺陷进行检测,验证了所提方法的可行性。李峰等<sup>[11]</sup>利用不同反射界面声阻抗的差异,通过计算反射波的衰减,对灌浆套筒缺陷进行检测。LIU 等<sup>[12]</sup>基于弹性波逆时偏移方法(RTM),对不同灌浆缺陷的套筒进行成像,得到了高分辨率灌浆缺陷图像。XU 等<sup>[13]</sup>在套筒表面黏贴压电陶瓷传感器,通过激励超声信号,研究了超声波在套筒表面和内部的传播特性,使用缺陷评估指数反映灌浆缺陷程度。WU 等<sup>[14]</sup>基于小波能量和希尔伯特黄变换方法对 5 个不同密实度的灌浆套筒进行超声检测,结果表明,两种方法都可以有效反映灌浆程度的变化。目前,虽然灌浆套筒的超声检测引起了广泛的关注,但由于灌浆套筒连接处界面情况复杂,超声波能量衰减严重,且抗环境噪声干扰能力差,影响脱空程度的判断,故需要发展一种具有噪声鲁棒性的套筒缺陷检测定量评估方法。

针对上述问题,笔者基于时间反转算法,通过对接收信号时域反演再发射,实现超声信号在发射点处的时空聚焦,从而显著提高信号信噪比,增强超声信号的噪声鲁棒性。制作了不同灌浆缺陷的套筒试件,基于快速傅里叶(FFT)变换,对不同聚焦信号进行频谱特性分析,并借助归一化小波能量熵,对灌浆套筒内部不同程度缺陷进行定量评估。

## 1 时间反转算法

时间反转技术本质上是在时域上对接收到的信号进行逆序操作<sup>[15]</sup>,即频域的相共轭变换,单个散射声源下时间反转算法示意如图 1 所示。

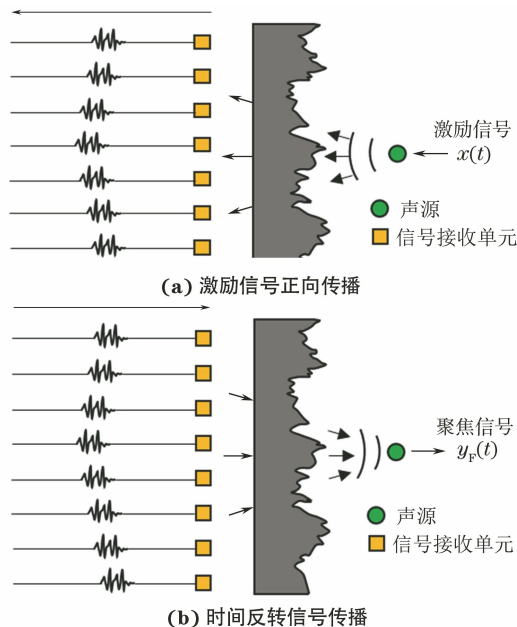


图 1 单个散射声源下时间反转算法示意

假设声源位于原点处,对声源激励信号  $x(t)$ , 其频域内表示为  $X(\omega)$ ,  $\omega$  为圆频率,空间内有  $N$  个信号接收单元,位置坐标为  $r_n$  ( $1 \leq n \leq N$ ),声源与信号接收单元间传递函数为  $g(r_n, t)$ , 转换到频域为  $G(r_n, \omega)$ , 则第  $n$  个信号接收单元接收到的频域信号  $y(r_n, t)$  可以表示为

$$y(r_n, t) = g(r_n, t) \otimes x(t) \quad (1)$$

式中:  $\otimes$  表示卷积运算。

通过傅里叶变换,式(1)转换到频域为

$$Y(\omega, r_n) = G(r_n, \omega) X(\omega) \quad (2)$$

将第  $n$  个信号接收单元接收信号进行时间反转操作得到  $Y_{\text{TR}}^{(n)}(\omega, r_n)$ ; 该信号由  $N$  个信号接收单元同时再次发射后,声源处接收信号(频域) 为

$$Y_F(\omega) = \sum_{n=1}^N G(r_n, \omega) Y_{\text{TR}}^{(n)}(\omega, r_n) \quad (3)$$

假设声源处激励信号  $x(t)$  为时域对称信号, 则在时域内满足

$$x(t) = x(-t) \tag{4}$$

转换到频域内则有

$$X(\omega) = X^*(\omega) \tag{5}$$

式中:  $*$  表示卷积。

经推导, 有

$$Y_F(\omega) = \sum_{n=1}^N |G(r_n, \omega)|^2 X(\omega) \tag{6}$$

对式(6)进行逆傅里叶变换, 得到  $y_F(t)$ , 即

$$y_F(t) = \sum_{n=1}^N |G(r_n, \omega)|^2 x(t) \tag{7}$$

由式(7)可以看出, 声源处接收的经过时间反转再发射的信号  $y_F(t)$  与激励信号  $x(t)$  具有相同的波形, 只在幅值上有差别, 因此可以实现信号的自适应聚焦。此外, 由于环境噪声一般是随机信号, 不满足式(4), (5)的条件, 在时间反转过程中不具备自适应特性, 在声源处不会实现噪声的聚焦, 因此, 时间反转算法能够提高接收信号抗噪声能力, 实现复杂波导环境的高信噪比。

## 2 灌浆套筒检测试验

### 2.1 试件及传感器

试验采用全灌浆套筒, 套筒外径为 48 mm, 长度为 310 mm, 纵向钢筋材料为 HRB400 螺纹钢(直径为 16 mm), 灌浆套筒结构如图 2 所示。高强灌浆料的水灰比为 1:0.14, 高强灌浆料性能指标如表 1 所示。

表 1 高强灌浆料性能指标

指标	时间	值
流动度/mm	初始	305
	30 min	275
抗压强度/MPa	1 d	30.1
	3 d	47.5
竖向膨胀率/%	3 h	0.14
	24 h 与 3 h 差值	0.06
氯离子含量/%	—	0.01
泌水率/%	—	0

套筒和灌浆料性能满足 JG/T 398—2011《钢筋连接用灌浆套筒》和 JG/T 408—2013《钢筋连接用套筒灌浆料》规范要求。采用 PZT5H 型压电陶瓷传感器(PZT), 为方便试验操作, 正负电极设置在同一侧, 在进浆口处和出浆口设置两个测点, 上下位置黏贴一对传感器, 编号分别为 PZT1, PZT2, PZT3

和 PZT4。传感器尺寸为 10 mm×10 mm×1 mm(长×宽×厚)。需要注意的是, 为了更好地实现套筒与传感器的贴合, 在套筒圆弧面打磨出一个尺寸为 15 mm×15 mm(长×宽)的平整面, 用酒精将表面擦拭干净后用压电振子胶黏贴压电陶瓷传感器。

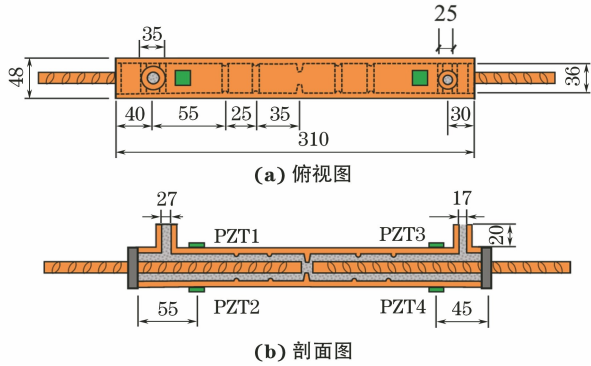


图 2 灌浆套筒结构示意图

考虑到灌浆缺陷通常为底部漏浆导致的出浆口上端空洞, 浇筑时可通过控制灌浆料质量来控制灌浆程度。根据灌浆料在截面内的填充程度, 考虑 5 种灌浆工况, 按灌浆高度定义灌浆程度分别为 0%(无浆), 28%, 50%, 72%, 以及 100%(全浆), 工况示意如图 3 所示。

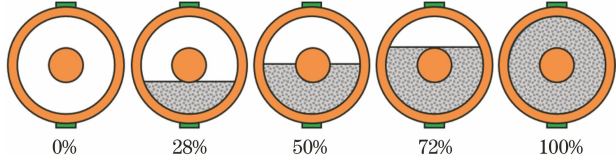


图 3 套筒 5 种灌浆工况示意

### 2.2 信号发射与采集装置

试验所用的信号发射和接收设备有: ① NI USB-6366 型数据采集模块, 采样频率为 2 MHz/s; ② 美国 TREK Model-2100HF 型功率放大器, 放大倍数为 50 倍, 输出电压范围为 ±150 V; ③ LabVIEW 2019 型计算机。试验装置的连接方式如图 4 所示。

试验采用激励信号为高斯调制的正弦脉冲信号, 即

$$x(t) = A_G e^{-k_e(t-d)^2} \cos(2\pi f_c(t-d)) \tag{8}$$

式中:  $A_G$  为激励信号幅值;  $d$  为信号延迟;  $f_c$  为信号中心频率;  $k_e$  表达式如式(9)所示。

$$k_e = \frac{5\pi^2 b^2 f_c^2}{q \ln(10)} \tag{9}$$

式中:  $b$  为归一化带宽;  $q$  为衰减系数。

由于信号中心频率以及归一化带宽对信号频谱以及超声信号传播具有显著影响, 试验中通过线性



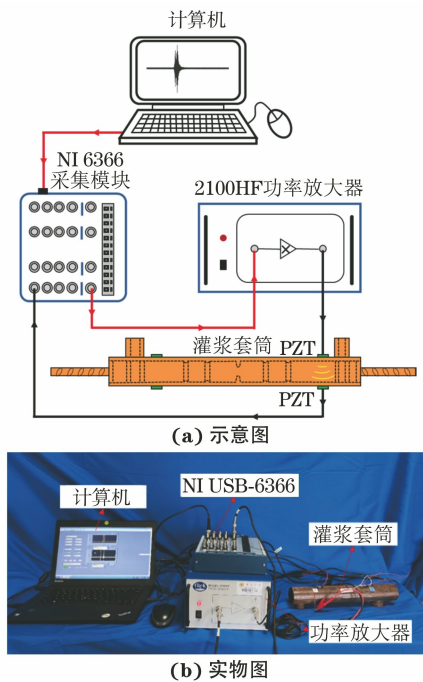


图4 试验装置的连接方式示意

扫频形式对黏贴到灌浆套筒上的 PZT 传感器进行激励,扫频信号参数为:起始频率,1 kHz;截止频率,500 kHz;信号幅值,1 V。

扫频信号如图 5 所示,图 5(b)为图 5(a)经过快速傅里叶变换得到的频域图,可以看出,PZT 传感器黏贴到套筒后,其谐振频率为 228.8 kHz,将该频率作为高斯激励信号式(8)中  $f_c$  的取值。

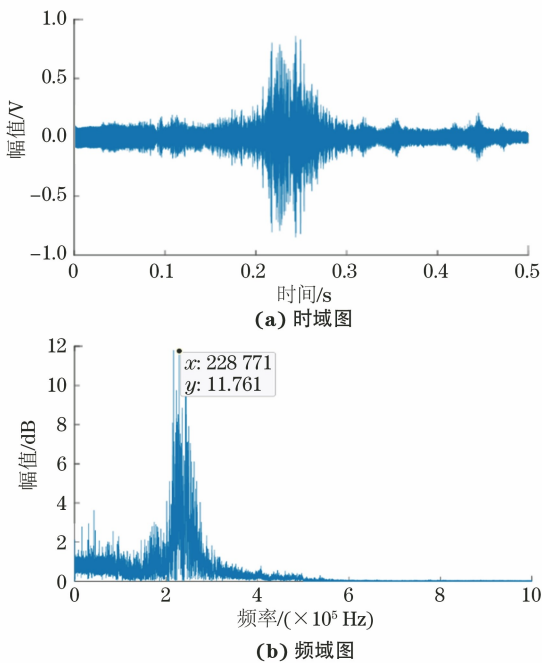


图5 试验扫频信号

时间反转过程如图 6 所示,具体为:① 高斯脉冲信号作为发射信号激励 PZT1;② PZT2 接收由

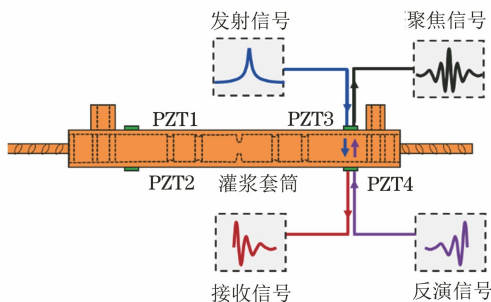


图6 时间反转过程示意

套筒传播的超声波并记录为接收信号;③ 对接收信号进行时域反转,先接收的信号后发射,并将反转后的信号由 PZT2 再次发射;④ PZT1 接收由套筒传递过来的反演信号,实现信号的时空聚焦。

已有的研究表明,虽然灌浆料龄期越长强度越高,但套筒 7 d 龄期后承载力可达最终承载力的 96%,之后增长缓慢<sup>[16]</sup>。因此,每一次灌浆养护 7 d 后对套筒超声信号进行采集。试验每种工况包含 5 个相同试件,每个试件的采集信号按照“试件编号-密实度工况-激励器-传感器”进行编号,如“1-50%-3-4”表示 1 号试件 50%灌浆程度下压电陶瓷传感器 3 和 4 之间信号。需要说明的是,试验进行过程中 PZT 焊点短路,导致 1 号试件进浆口和 2 号试件出浆口传感器失效,因此,试验过程中只有 8 对传感器接收到有效信号。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 接收信号波形

对 5 个试件的两个测点进行了 3 次重复采样,取 3 次信号平均值作为原始信号,4-100%-3-4 时间反转过程信号如图 7 所示,由于试验包含 5 个重复试件,所有测点发射信号一致,时间反转过程也相同,此处只给出 4 号套筒出浆口测点在满浆情况下的时间反转过程信号时域图。

从图 7 可以看出,激励信号是幅值为 1 V 的高斯脉冲信号,经过功率放大器放大后,接收信号幅值为 0.0148 V,如图 7(b)所示;经过时间反转操作,形成时间反转信号,如图 7(c)所示;反演信号再次经功率放大器放大后发射,再次接收的信号如图 7(d)所示。可以看出,图 7(d)的信号在  $t$  为 0.05 s 时刻达到峰值,同时,信号接收点为初始信号发射点,即验证了时间反转算法在灌浆套筒中的时空聚焦特性。此外,直接接收信号幅值为 0.0148 V,而经过时间反转后的聚焦信号幅值达 0.274 V,即经过时间反转算法操作后信号幅值提高了 25.4 dB,但噪声

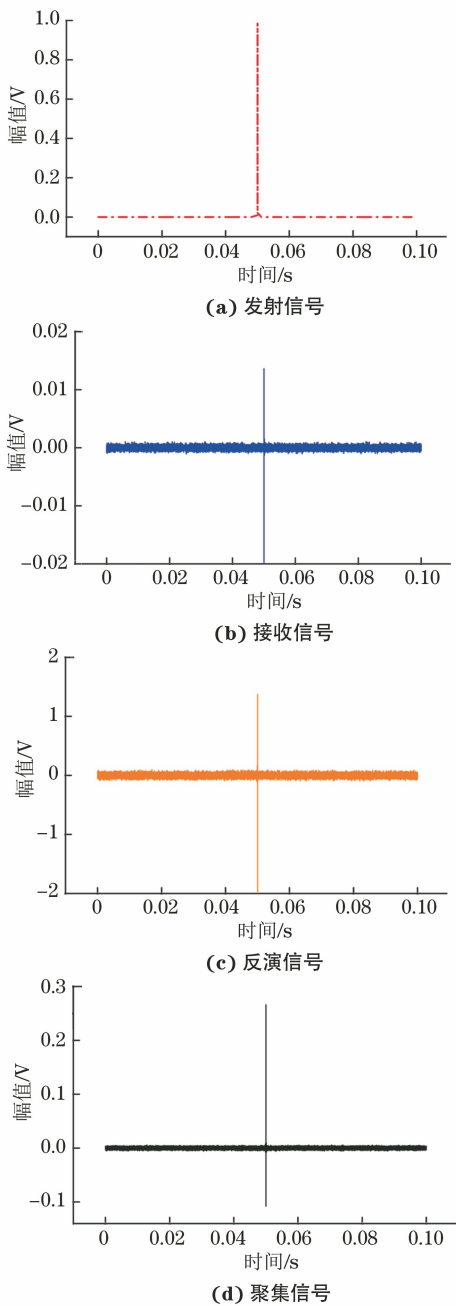


图7 4-100%-3-4 时间反转过程信号

水平不变,验证了时间反转算法可以显著提高信号信噪比的特性。

为了进一步说明时间反转算法对信号信噪比的提升效果,选取5号套筒出浆口测点在不同灌浆情况下直接接收信号幅值和聚焦信号幅值进行对比,其结果如图8所示,可以看出,随着灌浆程度的增加,直接接收信号幅值和聚焦信号幅值都呈下降趋势。相对于聚焦信号,直接接收信号幅值普遍偏低,环境噪声更容易对直接接收信号造成干扰,导致灌浆程度的误判。此外,在无灌浆的情况下,超声信号沿套筒壁进行传播,此时信号幅值最大。随着灌浆

量的增加,超声沿着灌浆料进行传播的路径增多,而相对于金属灌浆套筒,灌浆料内存在颗粒和微观裂缝,阻碍了高频短波超声信号的传播。

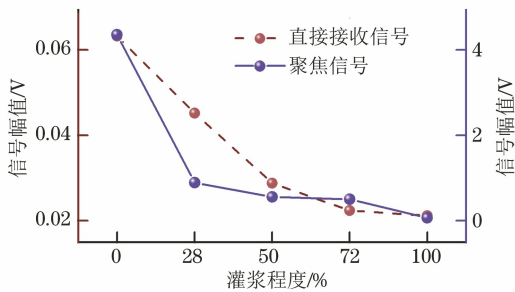


图8 不同灌浆情况下5号试件出浆口测点信号对比

5号套筒出浆口测点在灌浆量为0%和100%情况下反演信号频域图如图9所示,可以看出,在无灌浆时,反演信号频带高频部分占比较大且主要集中在200~280 kHz;而在满灌浆情况下,反演信号频谱显著变窄,高频成分消失,信号频谱主要集中在800~1 800 Hz。这说明当灌浆料存在时,灌浆料充当了低通滤波器的作用,滤掉了大部分波场内的高频短波,导致超声波在传播过程中高频部分衰减严重。

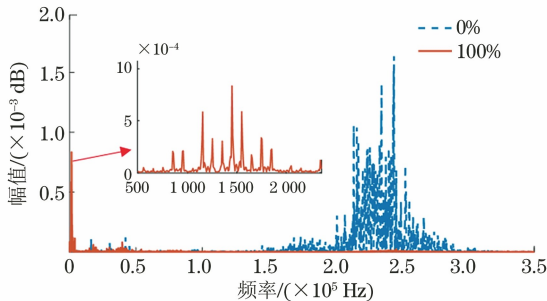


图9 5号套筒出浆口测点反演信号频谱图

### 3.2 灌浆程度定量分析

由3.1节可知,不同程度的灌浆料会过滤一部分高频成分,进而影响信号能量,根据此特性,文章定义归一化小波能量熵算法,对时间反转聚焦信号进行处理。

对于系统随机变量 $\{I(m) \mid m=1, 2, 3, \dots, N\}$ ,  $N \geq 1$ ,每个变量对应的取值概率为 $\{p(m) \mid m=1, 2, 3, \dots, N\}$ ,  $0 \leq p(m) \leq 1$ ,则该系统的信息熵 $H$ 可以表示为

$$H = - \sum_{m=1}^N p(m) \{ \ln [p(m)] \} \quad (10)$$

基于信息熵的定义,对聚焦信号进行小波包分解并计算能量熵,可以得到小波包能量熵。聚焦信号 $y_F(t)$ 的 $i$ 层小波包分解可以表示为

$$y_F(t) = [y_{i0}, y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{i(j-1)}] \quad (11)$$

式中: $i = 1, 2, \cdots, k, k \geq 1, k$  为分解层数; $j = 1, 2, \cdots, 2i$ 。

笔者选取有限紧支撑正交小波 Sym8 作为小波基,4-100%-3-4 聚焦信号 3 层小波包分解结果如图 10 所示。

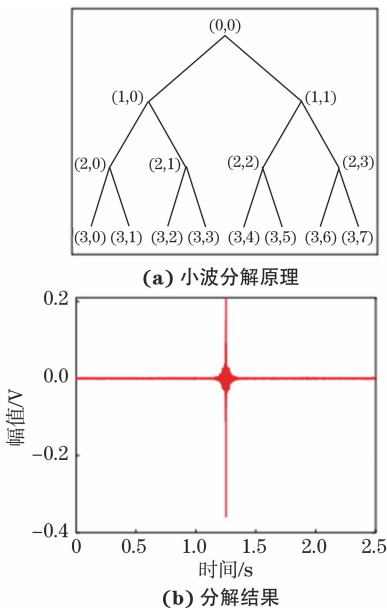


图 10 4-100%-3-4 聚焦信号 3 层小波包分解结果

信号  $y_{ij}$  能量可以表示为

$$E_{ij}(t) = \sum_{j=0}^{2^i-1} |y_{ij}|^2 \tag{12}$$

将  $k$  层分解的  $E_{ij}(t)$  能量归一化,即

$$p_{ij}(t) = \frac{\sum_{j=0}^{2^i-1} |y_{ij}|^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^{2^i-1} |y_{ij}|^2} \tag{13}$$

式(13)可以看作是  $E_{ij}(t)$  能量序列的概率分布,定义归一化小波能量熵,即

$$H_{wE} = - \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^{2^i-1} [p_{ij}(t) \ln p_{ij}(t)] \tag{14}$$

根据式(14),对 8 个有效测点不同灌浆程度下的聚焦信号进行归一化小波能量熵处理,归一化小波能量熵随灌浆程度的变化曲线如图 11 所示。由图 11 可以看出,时间反转聚焦信号归一化小波能量熵随着灌浆程度的增加而逐渐降低;在完全脱空情况下,归一化小波能量熵有最大值,随着灌浆程度的增加,应力波在灌浆料内传播,导致信号大幅衰减,归一化小波能量熵也随之减小,在满浆情况下,归一化小波能量熵衰减 95% 以上。此外,8 个有效测点均方根误差最大值为 5.08%,表示检测结果一致性

较好。上述结果表明,归一化小波能量熵指数能够定量反映灌浆缺陷程度。

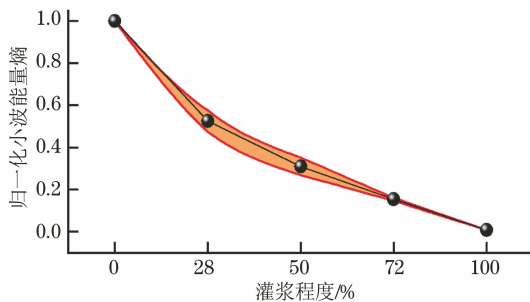


图 11 归一化小波能量熵随灌浆程度的变化曲线

### 4 试验验证

考虑到实际工程中,灌浆套筒目前主要用于竖向构件的钢筋连接,故利用提出的方法对竖向套筒灌浆缺陷进行验证。选取了 3 种不同直径的竖向连接套筒,其实物如图 12(a)所示,在套筒前后表面黏贴 PZT5H 型压电陶瓷片,在距离出浆口附近设置一段灌浆缺陷,缺陷高度占套筒长度的 40%,缺陷区域如图 12(b)所示。试验中模拟了以下 4 种灌浆情况:0%,40%,70%和 100%。试验装置同图 4,采用式(8)所示的高斯调制的正弦脉冲信号作为激励信号,经过时间反转过程,对聚焦信号提取归一化小波能量熵,得到的不同灌浆程度下归一化小波能量熵变化曲线如图 13 所示。

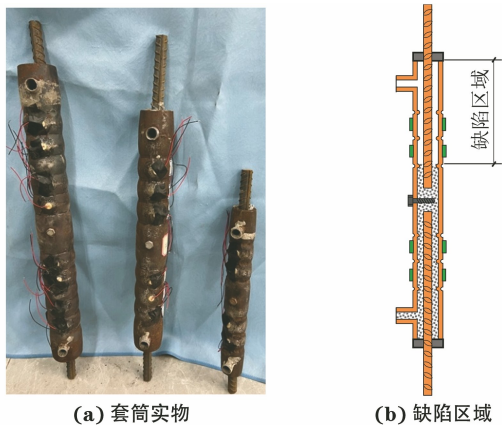


图 12 竖向灌浆套筒实物及缺陷区域示意

由图 13 可以看出,竖向套筒归一化小波能量熵随着灌浆程度的增加逐渐减小,这与图 11 所示的水平放置套筒的情况基本一致,即未灌浆的情况下,超声波完全在金属套筒中传播,能量衰减较小,归一化小波能量熵有最大值;当灌浆密度不断增加,应力波在灌浆料内传播,高频信号被过滤,导致归一化小波能量熵的减小;当套筒灌满浆时,超声波衰减最



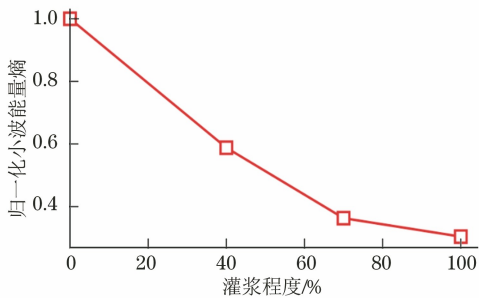


图 13 竖向套筒不同灌浆程度下归一化小波能量熵变化曲线

大,归一化小波能量熵最小。因此,基于聚焦信号的归一化小波能量熵结果,可以反映竖向连接套筒灌浆程度。综上所述,提出的方法对水平和竖向连接套筒均适用。

5 结论

提出了一种基于归一化小波能量熵的灌浆套筒密实度检测方法,通过时间反转算法,获得高信噪比超声聚焦信号,分析了超声信号在套筒内传播与衰减特性,通过定义归一化小波能量熵,得到了聚焦信号归一化小波能量熵与灌浆量之间的关系,并得出以下结论。

(1) 随着套筒内部缺陷的增加,压电超声直接接收信号和聚焦信号幅值均增加。以 4 号套筒出浆口测点为例,直接接收信号幅值为 0.0148 V,经过时间反转处理后的聚焦信号幅值达 0.274 V,时间反转算法将信号幅值提高了 25.4 dB。

(2) 不同灌浆程度下的信号频谱图表明,随着灌浆量的增加,超声传播路径增多,灌浆料内的颗粒和微观裂缝阻碍了高频短波超声信号传播,灌浆料吸收了高频短波,导致应力波的能量减小。

(3) 归一化小波能量熵可以反映水平和竖向连接套筒内部灌浆密实情况,该指数与灌浆缺陷程度成反比,即灌浆程度越大,聚焦信号归一化小波能量熵越小,相对无浆情况,满浆情况下归一化小波能量熵衰减 95% 以上,归一化小波能量熵指数能够定量反映灌浆缺陷程度。

参考文献 :

[1] 郭云飞,侯照保,杨斌,等. 市政工程装配化产业发展问题及展望[J]. 市政技术,2022,40(1):166-171,177.  
[2] 李向民,高润东,许清风,等. 灌浆缺陷对钢筋套筒灌浆连接接头强度影响的试验研究[J]. 建筑结构,2018,48(7):52-56.  
[3] YAO F Y, JI Y B, TONG W J, et al. Sensing

technology based quality control and warning systems for sleeve grouting of prefabricated buildings [J]. Automation in Construction, 2021, 123: 103537.  
[4] 高润东,李向民,王卓琳,等. 基于预埋钢丝拉拔法套筒灌浆饱满度检测结果的补灌技术研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(24): 88-92.  
[5] 唐科,顾月芹. X 射线 DR 成像技术检测套筒灌浆料饱满度的研究[C]//中国土木工程学会 2019 年学术年会论文集. 上海:中国土木工程学会,2019.  
[6] CARINO N J, SANSALONE M, HSU N N. Flaw detection in concrete by frequency spectrum analysis of impact-echo waveforms[J]. International Advances in Nondestructive Testing, 1986, 12: 117-146.  
[7] 包龙生,陶天阳,刘杰,等. 基于改进冲击回波法的装配式混凝土桥墩套筒灌浆检测理论研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(6): 1082-1089.  
[8] CHEN D D, HUO L S, SONG G B. High resolution bolt pre-load looseness monitoring using coda wave interferometry [J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(5): 1959-1972.  
[9] 姜绍飞,蔡婉霞. 灌浆套筒密实度的超声波检测方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 43-49.  
[10] LI D S, LIU H. Detection of sleeve grouting connection defects in fabricated structural joints based on ultrasonic guided waves[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(8): 085033.  
[11] 李峰,宋潮,孙彬,等. 基于超声反射波衰减系数的套筒灌浆饱满度检测技术研究[J]. 建筑结构, 2019, S2: 550-557.  
[12] LIU H, QI Y, CHEN Z J, et al. Ultrasonic inspection of grouted splice sleeves in precast concrete structures using elastic reverse time migration method [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 148: 107152.  
[13] XU B, FAN X L, WANG H D, et al. Experimental study on grout defects detection for grouted splice sleeve connectors using stress wave measurement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274 (3): 121755.  
[14] WU C, YANG C, MA S L, et al. Feasibility study on grouting compactness detection in sleeves using Piezoelectric transducers[J]. Applied Sciences, 2019, 10(1): 149.  
[15] FINK M. Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 1992, 39 (5): 555-566.  
[16] 吴小宝,林峰,王涛. 龄期和钢筋种类对钢筋套筒灌浆连接受力性能影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(14): 77-82.