

一种基于小波分解和压缩感知的冲击声学无损检测方法

蒋志迪*

(宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211)

摘要: 压缩感知理论对稀疏信号的采样与重构十分有效, 该文将对携带信息量少的冲击声信号利用压缩感知理论进行采样, 提出一种基于小波分解和压缩感知的冲击声学无损检测方法。首先, 对冲击声信号进行小波分解构建观测矩阵, 求解 l_1 最优化问题, 完成类别的稀疏表示, 然后对表示误差进行分类, 得到检测结果。仿真及实验结果表明, 该方法实用有效, 其检测系统性能稳定, 在信噪比 3 dB 时可达到 90% 以上的正确率。

关键词: 压缩感知; 小波分解; 无损检测; 冲击声学

中图分类号: TP277

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)12-3021-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00779

A New Impact-acoustics Non-destructive Test Method Based on Wavelet Decomposition and Compressive Sensing

Jiang Zhi-di

(College of Information & Science Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Compressive sensing theory is efficient to sampling and reconstruction for sparse signal. In this paper, acoustic signals carried less information are sampled deploying compressive sensing and a new impact-acoustics non-destructive test method is proposed, based on wavelet decomposition and compressive sensing. The stages are building the sensing matrix using wavelet decomposition, solving the l_1 minimization, getting sparsity representation in classes and computing error of representation, followed by classification to obtain the results. Simulations and experiments show that the proposed method is practical and efficient, having good performance with corrective rate above 90% under the environment SNR 3 dB.

Key words: Compressive sensing; Wavelet decomposition; Non-destructive test; Impact acoustics

1 引言

社会工业化的发展, 无损检测成为不可缺少的技术手段, 其在不损害或不破坏被测对象的前提下完成使用性能的测定, 在工业领域极具优势。同时, 自动无损检测也是社会技术发展的重要研究方向, 常用的技术方法有超声、红外照相、冲击回波和冲击声学等。其中, 基于冲击声学的检测方法^[1,2], 结构简单, 安装操作便捷, 得到较好的发展。

随着城市化进程的加快, 高层建筑随处可见。近年来高层外墙脱落事件时有发生, 危及公众的财产和生命安全, 高层建筑外墙装饰的安全问题已引起社会的关注。外墙表面的不正确施工或风化作用下容易造成脱皮, 人们及时发现此类外墙问题及避免外墙脱落伤及无辜的关键是在外墙脱落之前及时发现脱皮, 做好预防或修补工作。因此需要对外墙

是否存在空洞进行定期检测, 而此类高层墙体检测如采用人工作业, 难度较大, 同时存在诸多安全问题。基于冲击声学的无损检测方法^[1,2]为其提供了可靠自动作业手段, 该方法通过采集和分析冲击声信号反演出材料的物理特性, 已有的大量研究工作主要集中在频域, 同时, 小波分析等现代信号处理方法应用于冲击声学, 也取得了初步成果。本质上, 冲击声信号携带少量的材料物理特性信息, 可视为一定程度的稀疏信号, 近期的压缩感知理论为冲击声学信号的处理提供了一种新的思路。

压缩感知是 Candes 和 Donoho 等人^[3-5]提出的一种新的信号处理理论, 突破了传统的奈奎斯特定理对信号采集频率的限制: 对于可压缩信号进行低速率采样也可以恢复出原始信号。在该理论框架下, 采样频率不再取决于信号的带宽, 而是取决于信号的结构和内容; 通过一个观察矩阵将高维信号投影到低维空间, 而这些少量的投影分量包含的信息足以重构原始信号。该理论将传统“信号采集模式”转变为“信息采集模式”, 已在国际上受到高度关注,

2012-06-18 收到, 2012-09-03 改回

宁波市自然科学基金(2010A610175)和浙江省自然科学基金(LY12D06002)资助课题

*通信作者: 蒋志迪 jiangzhidi@nbu.edu.cn

包括信息编码^[6]、信号处理^[7]、医疗成像^[8]、通信^[9]、光学/雷达成像^[10]等领域。

鉴于此, 本文将压缩感知理论引入冲击声信号的处理, 并结合小波分解, 提出一种新的无损检测方法。文章结构安排如下: 第2节介绍压缩感知的理论和冲击声学无损检测原理; 第3节以墙体检测为例, 在分析冲击声信号的时频特性的基础上, 提出基于小波分解和压缩感知的无损检测方法; 第4节对无损检测仿真和实验结果进行讨论, 并给出详细的操作步骤和细致的性能分析。

2 相关理论

2.1 压缩感知^[3-5]

信号 $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T$ 为 R^N 空间的列向量, 可由 N 个基向量 $\{\varphi_i, 1 \leq i \leq N\}$ 线性组合表示。当这些基向量线性无关, 即相互规范正交时, \mathbf{s} 可由 $\{\varphi_i, 1 \leq i \leq N\}$ 唯一表示。

$$\mathbf{s} = \sum_{i=1}^N x_i \varphi_i = \Psi \mathbf{x} \quad (1)$$

此时, \mathbf{x} 是信号 \mathbf{s} 在 Ψ 域上的正交变换系数, 即 Ψ 域内的另一种等价表示形式。当 \mathbf{x} 仅有 $K \ll N$ 个非零值时, 则称 Ψ 为信号 \mathbf{s} 的稀疏基, \mathbf{x} 为信号 \mathbf{s} 在 Ψ 域内的稀疏表示。

对于 K -稀疏信号 \mathbf{s} , 用一个与正交基不相关的测量矩阵 $\Phi_{M \times N}$ 对信号进行线性变换, 得测量值 $\mathbf{y}_{M \times 1}$:

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{s} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 可得

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{s} = \Phi \Psi \mathbf{x} \equiv \Theta \mathbf{x} \quad (3)$$

其中 $\Theta = \Phi \Psi$ 称为观测矩阵。

当 $M \ll N$ 时, 式(3)实现了高维信号 \mathbf{s} 到低维信号 \mathbf{y} 的映射, 从而达到信号压缩的目的。当满足 $K < M \ll N$ 时, 测量值 \mathbf{y} 包含了原始 K -稀疏信号 \mathbf{s} 足够的信息, 可以最大概率或精确重构得到信号 \mathbf{s} , 方法就是通过 l_0 范数下求解式(3)的最优化问题:

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min \|\mathbf{x}\|_0, \text{ s.t. } \Theta \mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (4)$$

其中 $\|\cdot\|_0$ 为向量的 l_0 范数, 表示向量 \mathbf{x} 中非零值的个数, 同时矩阵 Θ 应满足约束等距性条件。解决实际问题过程中, 因最小 l_0 范数是一个 NP-难问题, 求解比较困难, 往往用 l_1 范数代替 l_0 范数, 获得次最优解:

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min \|\mathbf{x}\|_1, \text{ s.t. } \Theta \mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (5)$$

2.2 冲击声学无损检测^[1]

冲击声学无损检测的原理是: 刚性小物件(如小钢球)撞击被测目标材料表面产生的声场, 通过采

集、分析声信号反演目标材料的物理参数, 系统结构如图1所示, 其中, 小钢球的冲击力度需要进行控制, 使其不足以破坏被测物体的原有性质。碰撞过程遵循能量守恒定律, 是一个能量转换的复杂过程。碰撞瞬间, 物体表面产生变形, 内部形成应力波, 而表面通过固气耦合向外发射声波。高方向性麦克风收集声信号, 通过 A/D 转换后进入计算机进行信号处理, 完成检测。

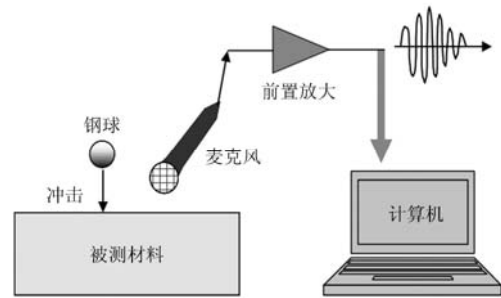


图1 冲击声学无损检测系统

这是一个非理想完全碰撞过程, 文献[1]通过对冲击系统建模, 进行了详细的分析, 将采集到的声信号分成两部分: 冲击时物体起振过程和分离后的振动过程。

冲击时, 起振过程中采集到的声信号幅度与刚性物体的半径 a , 声速 c , 冲击持续时间 t_0 , 冲击前速度 v_0 和材料的厚度 h , 密度 ρ , 质量 M 以及两物体的杨氏模量 E_1, E_2 和泊松比 ν_1, ν_2 都有关系。

$$p_1 = f_1(a, c, t_0, v_0, h, \rho, M, E_1, E_2, \nu_1, \nu_2) \quad (6)$$

冲击分离后, 刚性物体的自由振动由固有频率决定, 而被测物体的变形振动的频率与材料的厚度 h , 密度 ρ , 杨氏模量 E_2 , 泊松比 ν_2 和冲击点位置 b 等有关。

$$p_2 = f_2(h, \rho, E_2, \nu_2, b) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知, 很难通过求解方程得到参数的精确解, 但采集到的声信号已包含了材料的主要参数信息。应用冲击声学就是通过分析采集到的声信号, 获得材料的相关参数信息。Liu 等人^[11]已成功构建了基于冲击声学方法的自动检测机器人。

3 基于小波分解和压缩感知的冲击声学无损检测

冲击声学无损检测方法通过分析冲击声信号, 反演被测材料的物理参数。如采用冲击声学方法检测外墙的健康程度, 及时发现脱皮现象。外墙的附着质量分为两类: 一类外墙性质一致性较好, 附着严密; 另一类外墙下出现空洞, 存在脱皮现象。不

同性质墙体的冲击声信号特征不同，为描述方便，前者称为“实 solid”，后者称为“空 void”。

3.1 冲击声信号的时频特性

无噪声环境下，冲击声信号典型频域特征如图 2 所示：图 2(a)实 solid，图 2(b)空 void。信号特征符合冲击声学的原理。当刚性物体撞击被测墙体时，采集的声信号频谱特征大致为：当表面附着性能较好，由文献[1]能量主要分布于刚性物体自由振动的共振频率附近，此例中能量集中范围为 8~10 kHz，即采集信号的高频段区域；当表面附着性能不好或表面下含有空洞时，能量会向低频段转移。

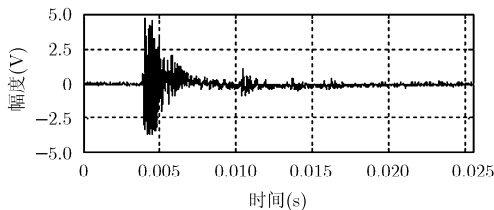
冲击声学检测系统，工作于可闻声频段。现有降噪措施都不能将工作现场的可闻噪声消除。可闻噪声会改变功率谱密度的形状，如图 3 所示：图 3(a)实 solid，图 3(b)空 void。现场的自然音频信号作为可闻噪声，当其频率正好落在了高频段区域，无论材料性质如何，采集到的冲击声信号的能量都可能集中在高频区域。此时采用频谱分析容易对图 3(b)类信号作出“实采样”的误判，从而降低了系统的检测性能。

3.2 冲击声信号的小波域特性

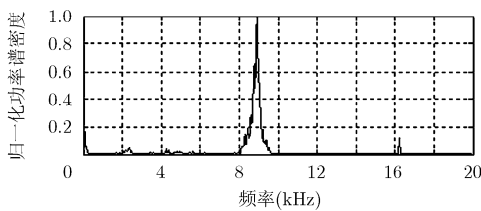
冲击声信号受可闻噪声的干扰较大，一种可行的方案就是在频谱分析的基础上进行分频带处理，在分频带上进行分析，但增加系统复杂度。小波分析提供一种简易的分带处理技术，可用于冲击声学信号的分析。

对冲击声信号 x 进行 L 级小波分解，可得 $M = 2^L$ 频带的小波域信号 $\{w_i, 1 \leq i \leq M\}$ ，从而得到小波域的能量分布 $d_j, 1 \leq j \leq 2^L$ ：

$$d_j = \frac{\langle w_i, w_i \rangle}{\sum_i \langle w_i, w_i \rangle} \quad (8)$$

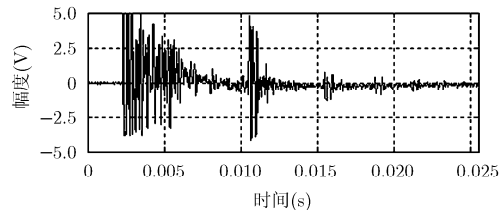


(a₁)实幅度

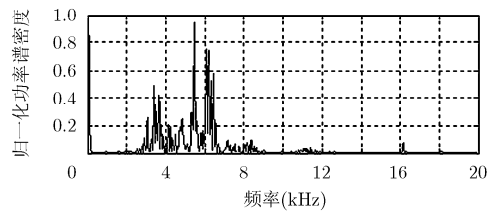


(a₂)实功率谱密度

(a)实solid



(b₁)空幅度



(b₂)空功率谱密度

(b)空void

图 2 无噪声时的冲击声信号频域特征

由式(8)可得到图 4 所示的冲击声信号小波域能量分布特征图。

图 4 显示了对 400 个冲击声信号采样值(前 200 个实采样，后 200 个空采样)的分析，其小波域能量分布的情况：图 4(a)无噪声，图 4(b)存在可闻噪声。此时可闻噪声为音频范围内的各种工况非平稳噪声，如机械声、说话声等。通过比较可以看出：有无可闻噪声的存在，小波域的能量分布轮廓大致未变。显然，冲击声信号在小波域受噪声影响较小，具有较好的抗噪性能。同时，小波域能量分布一定程度上反映了材料的物理特性，小波域是冲击声信号的稀疏域。

3.3 小波域中基于压缩感知的稀疏信号重构

通过对冲击声信号的小波分析，将采集声信号映射到小波域，得到冲击声信号的小波域能量分布 d 。一般的检测方法是通过对数据集 $C[c_1, c_2, \dots, c_L]$ 进行训练，然后将 d 近似映射为训练集 C 中某一类的样本，即 d 可以用训练集 C 及其相应的系数 q 来表示。

$$d = Cq \quad (9)$$

显然，系数 q 是稀疏的。现通过测量矩阵 Φ 对 d 进行测量可得值 y ：

$$y = \Phi d = \Phi Cq \equiv Dq \quad (10)$$

将压缩感知理论引入无损检测中，与式(3)进行比较， D 即为式(3)中的观测矩阵 Θ ，由训练数据集 C 生成。此时可通过求解 l_1 最优化问题，得到系数 q ，最后通过计算表示残差 r 得到材料类别的判断结果。

$$r = y - Dq \quad (11)$$

3.4 无损检测系统结构

根据第 2 节的分析，冲击声信号含有材料足够

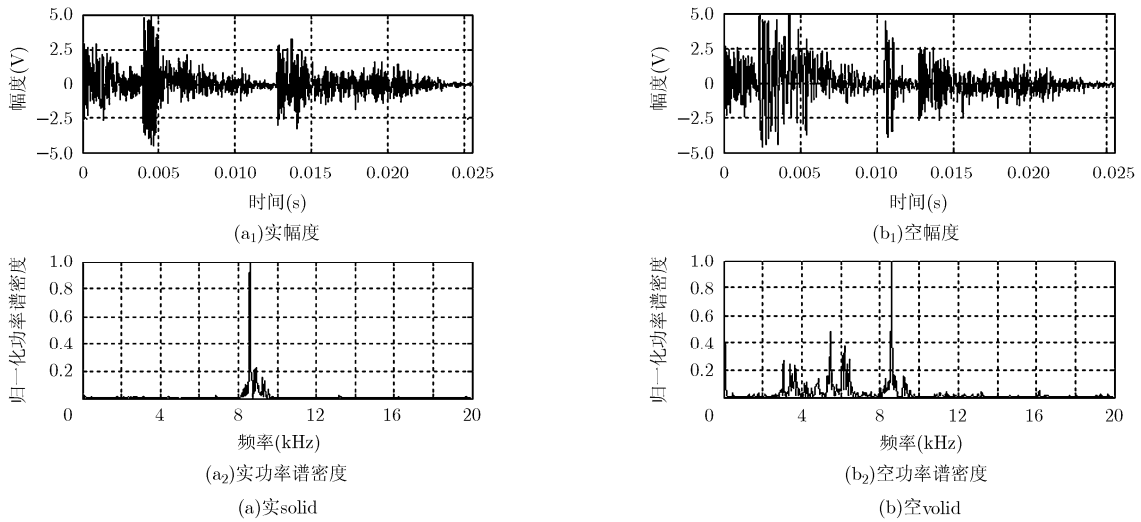


图3 可闻噪声环境下的冲击声信号频谱特征

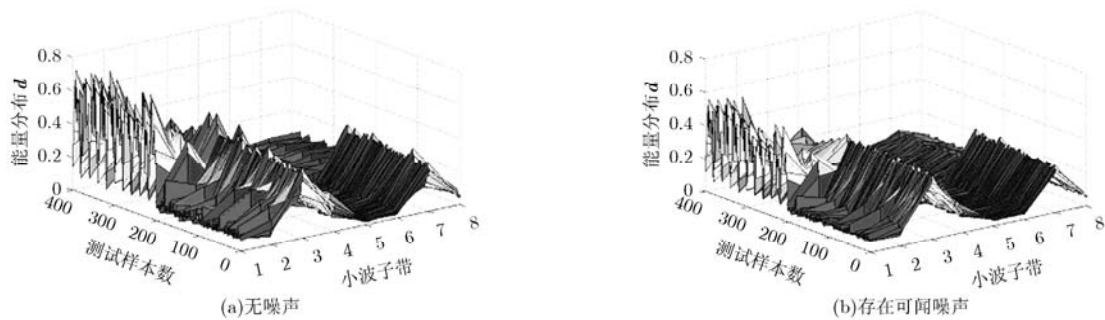


图4 冲击声信号小波域能量分布特征

的物理信息。对于特定的检测系统，其用于撞击的刚性物体材料是固定的，此时仅仅要获取被测材料的信息，因此可搭建如图5所示系统结构。

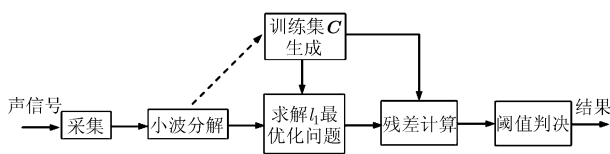


图5 基于小波分解和压缩感知的无损检测系统

系统中的“采集”模块完成冲击声信号的整理和数字化；“小波分解”模块完成信号在小波域的稀疏表示；“训练集C生成”模块完成测试墙体足够的材料特性的收集；“求解 l_1 最优化问题”模块完成类别稀疏表示；“残差计算”模块完成类别稀疏表示的误差计算，以平方和作为表示的误差大小。

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \sum_{i=1}^{2^{L-1}} r_i^2 \\ \gamma_2 &= \sum_{i=2^{L-1}+1}^{2^L} r_i^2 \end{aligned} \right\}, L \text{ 为小波分解的级数} \quad (12)$$

其中， $r_i (1 \leq i \leq 2^L)$ 为小波各子带的表示误差， γ_1 为低频域残差， γ_2 为高频域残差。

系统中的“阈值判决”模块对不同小波子带域的误差进行比较，得到误差的区域分布 δ ，并通过设置阈值 θ ，获得本次冲击声信号的归类结果 τ 如下：

$$\delta = \lg(\gamma_1 / \gamma_2) \quad (13)$$

$$\tau = \begin{cases} 1, & \delta \geq \theta \\ 0, & \delta < \theta \end{cases}$$

若 $\tau = 1$ ，被测材料的物理参数一致性较差，如表面下存在空洞；若 $\tau = 0$ ，被测材料物理参数一致性较好，比较严实。

检测系统过程分两个阶段：

- (1) 初始化阶段：采集不同类型足够的实体样本，经小波分解之后得到能量分布 d_j ，记入矩阵 D 。
- (2) 实时检测阶段：实时采集单次冲击的声信号，按如下步骤处理，完成检测。
 - (a) 数据采集 $\{x(i), 1 \leq i \leq N\}$ ；
 - (b) L 级小波分解得小波域信号 $\{w_i, 1 \leq i \leq M\}$ ，根据式(8)计算小波域的能量分布 $y\{y_j, 1 \leq j$

$\leq 2^l\}$;

(c)求解 l_1 最优化问题： $q = \arg \min \|q\|_1$ ，使得 $y = Dq$ ；

(d)计算表示误差，根据式(11)计算得 r ，再由式(12)得 γ_1 和 γ_2 ；

(e)计算误差的区域分布 δ ，设置阈值 θ ，根据式(13)得出检测结果。

4 仿真和实验结果

按图1搭建实验装置，小钢球直径为 $\Phi 12$ mm，高方向性麦克风为 C900，经预放大电路后以 40 kHz 的采样率进行 A/D 数字化，然后由计算机进行处理。实验用计算机配置为 Pentium 2.8 GHz, 2 GB 内存。同时，实验准备了表面粘贴马赛克陶瓷片的混凝土样品板(尺寸：400 mm×400 mm×150 mm)，两种结构：一种粘贴质量很好，比较严实；另一种表面下含有直径 $\Phi 280$ mm 的空洞，以模拟实际情况中墙体脱皮的情况。为描述方便，它们分别称为“实 solid”的和“空 void”的样品。在系统初始化阶段，将 200 个“实 solid”和 200 个“空 void”采样数据作为训练集合，而用另外 200 个“实 solid”和 200 个“空 void”采样数据对该算法进行验证。

具体实验的操作步骤如下：

(1)A/D 得到 1024 点采样点；

(2)对采集数据进行三级 Daubechies(Db)小波变换，得到 8 个子带的能量分布；

(3)将 200 个“实 solid”采样和 200 个“空 void”采样形成训练集 C ；

(4)实时采样值 x ，也进行三级小波变换，然后根据式(10)求解 l_1 最优化问题，得系数 q ；

(5)根据系数 q 计算式(11)的小波域表示残差 r ；

(6)计算残差 r 的平方和，以此为依据进行分类处理，获得检测结果。

实验中，计算冲击声信号的 8 个子带能量分布

作为信息载体，这是因为：由式(6)和式(7)可知，特定系统中信号携带的未知物理参数个数较少，一般仅有厚度 h ，密度 ρ ，杨氏模量 E_2 ，泊松比 ν_2 和冲击点位置 b 等，而其他参数可视为常数。另， l_1 最优化问题不是研究的重点，实验中采用经典 l_1 -MAGIC 方法^[12]。

系数 q 的分布如图 6 所示，大致反映出材料的特性：“实 solid”采样数据的系数 q 主要分布于下端(图 6(a)图中的“实”区域)，而“空 void”采样数据的系数 q 主要分布于上端(图 6(b)图中的“空”区域)。

根据式(10)计算出小波域的表示残差 r ，其分布如图 7 所示。为图像显示明显，将各系数扩大了 5000 倍。图 7 的小波域残差 r 分布与图 6 的 q 值分布特征一致，仍然保持了反映材料特性的分布区域性。

按式(12)分别计算 $L = 3$ 级小波域内的残差平方和可得 γ_1 及 γ_2 。实验中采用的阈值为 0.55，按式(13)计算后，使用阈值法得到图 8 的结果。当 $\delta > 0.55$ 时，材料为“空 void”，表面下存在空洞；当 $\delta \leq 0.55$ 时，材料为“实 solid”，性能良好。

为评估系统的检测性能，实验中加入了音频信号作为噪声来模拟工况环境中受到可闻噪声的干扰。各种信噪比环境下的测试结果如图 9 所示，在信噪比 3 dB 时，系统检测的正确率仍有 90% 以上，并且系统的检测性能随着信噪比的增加而提高，当信噪比达到 11 dB 时，系统的检测正确率已达到 100%。

5 结束语

工业检测领域中无损检测具有相当的吸引力，如何提高系统检测性能和适应性是一直追求的目标之一。压缩感知理论的兴起为无损检测提供了一种新的处理方法。本文从分析冲击声信号的特征出发，将压缩感知理论引入无损检测中，给出了一种基于

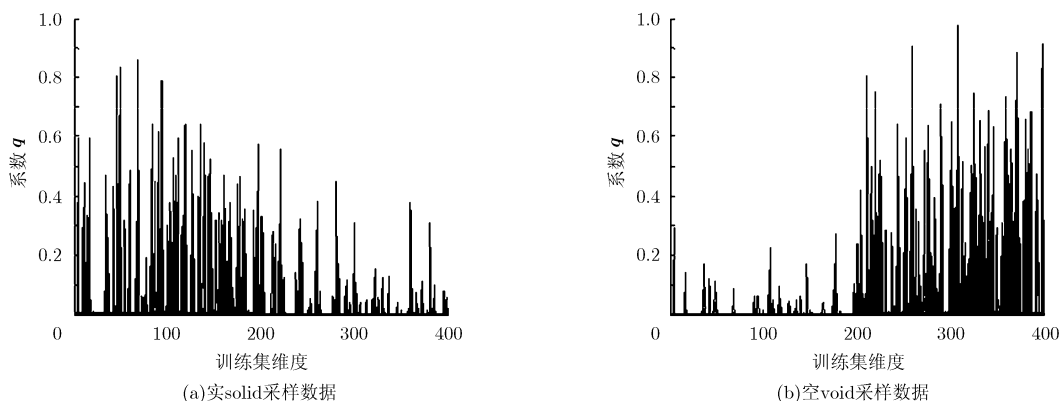


图6 系数 q 的分布

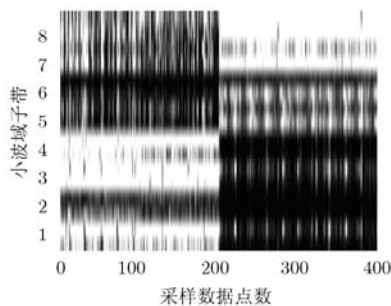
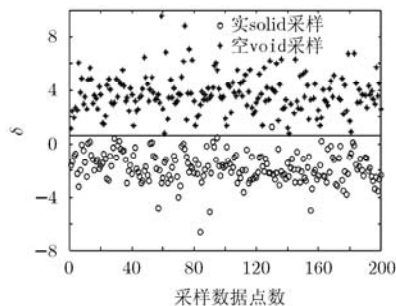
图7 小波域残差 r 分布

图8 检测分类结果

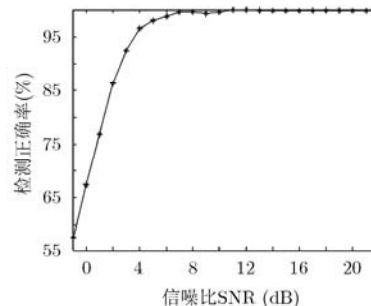


图9 不同信噪比环境下的系统检测性能

小波分解和压缩感知的无损检测新方法。通过详细的实验和仿真结果表明,该方法不仅有效,而且具有较好的抗噪性能,在信噪比 3 dB 时,系统检测的正确率仍有 90% 以上,当信噪比 11 dB 以上时,系统的检测正确率达到 100%。

致谢 感谢香港城市大学机械工程与工程管理系 Dr. Luk 和 Dr. Louis 在项目研究中的帮助和服务机器人实验室(Server Robot Lab)提供的测试数据。

参考文献

- [1] Tong F, Tso S K, and Xu X M. Tile-wall bonding integrity inspection based on time-domain features of impact acoustics[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 132(2): 557-566.
- [2] Luk B L, Liu K P, Tong F, *et al.*. Impact-acoustics inspection of tile-wall bonding integrity via wavelet transform and hidden markov models[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(10): 1954-1967.
- [3] Candes E, Romberg J, and Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [4] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [5] Candes E. Compressive sampling[C]. Proceedings of the International Congress of Mathematicians, Madrid, Spain, 2006, 3: 1433-1452.
- [6] Reeves G and Gastpar M. The sampling rate-distortion tradeoff for sparsity pattern recovery in compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(5): 3065-3092.
- [7] Lexa M A, Davies M E, Thompson J S, *et al.*. Compressive power spectral density estimation[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Prague, Czech Republic, 2011: 3884-3887.
- [8] Haldar J P, Hernando D, and Liang Z P. Compressed-sensing MRI with random encoding[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2011, 30(4): 893-903.
- [9] Sen Gupta A and Preisig J. A geometric mixed norm approach to shallow water acoustic channel estimation and tracking[J]. *Physical Communication*, 2012, 5(2): 119-128.
- [10] 李学仕, 孙光才, 徐刚, 等. 基于压缩感知的下视三维 SAR 成像新方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1017-1023.
Li Xue-shi, Sun Guang-cai, Xu Gang, *et al.*. A new method of downward-looking 3D-SAR based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1017-1023.
- [11] Liu K P, Luk B L, Tong F, *et al.*. Application of service robots for building NDT inspection tasks[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2011, 38(1): 58-65.
- [12] Candes E and Romberg J. L1-magic: recovery of sparse signals via convex programming [OL]. Available: <http://users.ece.gatech.edu/~justin/l1magic/downloads/l1magic.pdf>. 2005.

蒋志迪: 男, 1974 年生, 博士, 讲师, 研究方向为信号处理、电路与系统。