

多防护涂层超声检测混叠信号稀疏分解与分离重构处理^{*}

刘易奕¹ 李秋峰¹ 李 昕² 方雨宣¹ 王海涛³ 王志刚⁴ 李 坚¹

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 江西省检验检测认证总院 南昌 330052;
3. 中建一局集团第二建筑有限公司 北京 100161; 4. 南昌市建筑科学研究所有限公司 南昌 330096)

摘要:装配式钢结构因其轻质高强度、施工便捷等优势在建筑工程中广泛应用,但其在复杂服役环境下的防火与防腐性能不足,需依赖多层防护涂层(如防火层、防腐层)保障长期耐久性。而涂层厚度的精确测量是质量控制的关键环节,现有超声检测技术面临多层界面回波混叠、噪声干扰等难题,导致测量精度不足。为此,提出一种基于高频超声脉冲反射法与稀疏分解匹配追踪(MP)算法相结合的涂层厚度检测方法,通过信号分离与重构提升检测精度。首先,基于COMSOL建立装配式钢结构防护涂层的有限元模型,模拟水浸超声检测过程,分析超声波在多层介质中的传播特性,揭示界面回波混叠的物理机制。针对混叠信号分离难题,提出优化Chirp过完备原子字典的稀疏分解MP算法,通过迭代匹配最优原子实现信号降噪与特征重构,并对比传统小波变换模极大值法的分离效果。仿真结果表明,在相同信噪比条件下,MP算法重构信号的均方根误差显著低于小波变换方法;其防火层与防腐层厚度检测相对误差同样优于小波变换方法。为验证方法的实用性,采用20 MHz水浸探头对防腐层与防火涂层试块进行检测,结合金相法标定真实厚度。通过MP算法成功分离混叠界面回波,计算得到防火层与防腐层厚度相对误差分别为-4.64%和-4.65%,明显优于小波变换的-7.15%和-7.28%,本文方法具备更好的实际检测应用场景。

关键词:防护涂层;超声测厚;稀疏分解;匹配追踪

中图分类号: TB5; TP391; TN6 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460

Sparse decomposition and separation reconstruction processing for aliased signals in ultrasonic testing of multiple protective coating

Liu Yiyi¹ Li Qiufeng¹ Li Xin² Fang Yuxuan¹ Wang Haitao³ Wang Zhigang⁴ Li Jian¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of MOE, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Jiangxi General Institute of Testing and Certification, Nanchang 330052, China; 3. The Second construction Co., Ltd. of China Construction First Group, Beijing 100161, China; 4. Nanchang Architecture Science Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: Prefabricated steel structures are widely used in construction projects due to their advantages such as light weight, high strength, and convenient construction. However, their fire resistance and anti-corrosion performance are insufficient in complex service environments, and they need to rely on multiple protective coatings (such as fireproof layers and anti-corrosion layers) to ensure long-term durability. The precise measurement of coating thickness is a key link in quality control. The existing ultrasonic testing technology is confronted with problems such as echo aliasing at multi-layer interfaces and noise interference, resulting in insufficient measurement accuracy. To this end, this paper proposes a coating thickness detection method based on the combination of high-frequency ultrasonic pulse reflection method and sparse decomposition matching pursuit (MP) algorithm, and improves the detection accuracy through signal separation and reconstruction. Firstly, a finite element model of the protective coating for prefabricated steel structures was established based on COMSOL to simulate the ultrasonic detection process of water immersion, analyze the propagation characteristics of ultrasonic waves in multi-layer media, and reveal the physical mechanism of interface echo. Aiming at the problem of aliasing signal separation, a sparse decomposition MP algorithm that optimizes the over-complete atomic dictionary of Chirp is proposed. Signal denoising and feature reconstruction are achieved by iterative matching of the optimal atoms, and the separation effects of the traditional wavelet transform

modulus maximum method are compared. The simulation results show that under the same signal-to-noise ratio condition, the root mean square error of the reconstructed signal by the MP algorithm is significantly lower than that of the wavelet transform method. The relative errors in the thickness detection of its fireproof layer and anti-corrosion layer are also better than those of the wavelet transform method. To verify the practicability of the method, a 20 MHz water-immersed probe was used to test the anti-corrosion layer and fireproof coating test blocks, and the true thickness was calibrated in combination with the metallographic method. The echo of the superimposed interface was successfully separated through the MP algorithm. The relative errors of the thickness of the fireproof layer and the anti-corrosion layer were calculated to be -4.64% and -4.65% respectively, which were significantly better than -7.15% and -7.28% of the wavelet transform. Therefore, the method proposed in this paper has better practical detection application scenarios.

Keywords: protective coatings; ultrasonic thickness measurement; sparse decomposition; match tracking

0 引言

装配式钢结构质量轻、强度高,能快速生产和建设,节约大量人力和资源成本,使其在世界范围内被广泛使用,国内的以北京的鸟巢为例,国外的以巴黎的埃菲尔铁塔为代表。然而,与钢筋混凝土结构相比,其在防火和耐腐蚀方面存在一定劣势。为了提升安全性能,通常会在装配式钢结构表面涂覆防护涂层。首先装配式钢结构的耐火性能较差,防火涂料因其优异的阻燃性能、简易的生产工艺和较低的成本,成为常用的防护手段之一,所以广泛应用于各个行业^[1]。其次,装配式钢结构的耐腐蚀性能较差,用特殊材料制作防腐涂料,将附着力强的防腐涂料涂刷在装配式钢结构表面,保护钢结构不被外部环境腐蚀^[2-3]。表面涂层材料的选择以及涂层的厚度都将对装配式钢结构的使用寿命造成影响,因此对装配式钢结构表面防护涂层进行厚度测量需求日渐提高。

目前涂层厚度的检测技术研究重点在于超声检测、红外热成像检测、涡流检测以及太赫兹检测等^[4]。Sakata 等^[5]针对红外热成像检测涂层厚度受限于光照条件的瓶颈,提出了基于主动自参考的锁相近红外测量法,实验表明该方法可以克服传统红外热成像检测的局限性,并准确测量涂层厚度。Yang 等^[6]针对热障涂层精确测厚的问题,提出使用具有激光束均质化的脉冲热成像系统对热障涂层进行检测,并通过简化模型处理热响应信号,实验表明可以准确获取涂层厚度变化的信息。但是红外热成像检测精度易受表面污染或粗糙度及环境温度变化的影响,且不适用于涂层/基材热导率差异小的检测对象。Zain 等^[7]针对非磁性金属涂层厚度涡流检测需要校正特性曲线的问题,使用表观涡流电导率光谱技术对不同涂层厚度进行实验,结果表明,在±25.4 mm 提离范围内,该方法检测误差仅为 3%。马云鹏等^[8]针对印制电路板表面的防护涂层难以全面检测的难题,提出了改进的自适应波动序列差异性度量方法,分别对正常涂层和异常涂层的电磁扫描信号进行分析,实验表明该方法切实可靠。虽然涡流检测可以不受试件表面粗糙度的影响,但不适用于涂层/基材均不导电的场景。龚云丽等^[9]针对热障

涂层测厚时,太赫兹检测信号易混叠导致测厚误差较大的问题,通过调制窗函数参数适配太赫兹脉冲信号,提出了新型窗函数适配的盲反卷积方法,实验表明该方法检测精度得到大幅提升。但是太赫兹检测成本与设备复杂性较高,测量精度与材料种类相关性强,测量速度通常较慢,不适用于现场快速检测。

孙珞茗等^[10]分析了涂层对声压反射系数相位谱的影响,实验结果表明声压反射系数相位谱技术可以表征涂层内部质量。刘海波等^[11]针对复杂曲面薄壁零件快速精确测厚的技术瓶颈,开发了一套面形自适应在机超声测厚系统,并通过 S 形和弧形薄壁热防护涂层验证了检测系统的可靠性。杜晶晶等^[12]通过小波变换信号处理方法,对厚度为 200~300 μm 的纯铝涂层超声测厚数据进行分析,其测量数据与金相法的检测结果一致。通过小波变换对超声检测涂层的混叠信号进行分离易受到噪声的影响,容易导致重构信号中出现异常波峰,干扰对涂层界面回波位置的判断。针对噪声和混叠同时存在的
情况,陆传雨等^[13]提出改进的平滑化 L0 范数的方法 (smoothed the L0 norm, SL0),对混叠的焊接缺陷信号进行分离,经过实验验证了算法的准确性。超声检测适用性广,可测量多层薄涂层,测量范围大,测量速度快,适合装配式钢结构防护涂层厚度的现场快速检测。

本文研究对象为微米级的多层防护涂层,在检测过程中会存在噪声和信号混叠对检测信号的污染,所以需要选择合适的算法对检测信号进行混叠分离的同时,能不受噪声的干扰。本文选用稀疏分解匹配追踪算法分离混叠信号,稀疏分解算法同样具备一定的降噪的能力,因此可以有效重构分离后的各涂层界面反射回波,再根据重构信号的特征计算对应涂层厚度。

1 涂层检测理论

1.1 超声波在涂层中传播原理

超声波在薄层中的传播包括层间的反射与界面的透射,而对涂层厚度的检测实际上是分辨涂层界面反射信号特征^[14]。用脉冲反射法对涂层进行检测,在涂层中超

声波的入射和反射特征如图 1 所示。

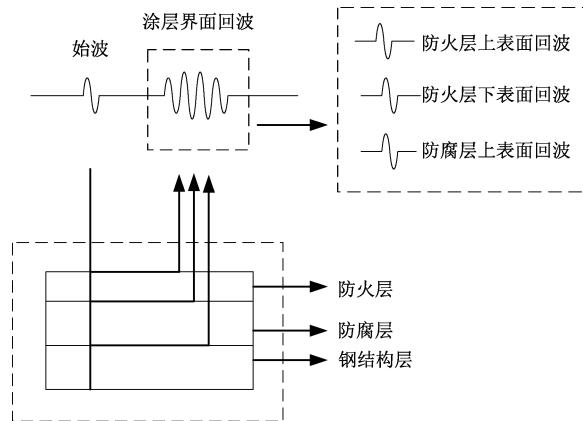


图 1 超声波在涂层中的传播模型

Fig. 1 Model of ultrasonic wave propagation in the coating

使用超声波垂直入射是避免倾斜入射的波形转换对回波的干扰,超声波声束传播依次经过防火涂层上表面,经过防火层、防腐涂层和基体层内的反射、透射和衰减后,到达基体层下表面。超声波在到达基体层下表面时,由于防护涂层与基体材料在声学特性和厚度上存在显著差异,导致超声波在防护层中传播时会产生复杂的物理现象,包括多次反射、透射导致的超声波能量的衰减,同时还会出现超声波叠加和干涉等现象,所以从信号时域图上分析,始波之后的各个涂层界面的反射回波会混叠在一起。将涂层界面反射回波从混叠信号中分离出来,读取分离重构后回波信号峰值处的时间信息,而涂层中超声传播的路程与时间满足一定的关系,进一步即可计算出涂层的厚度^[15-16]。

1.2 信号稀疏分解理论

不同回波信号在传播过程中会互相混叠、干扰,严重影响对信号特征的判断和识别,同时噪声也会对信号特征的判断和识别造成不利影响。而通过稀疏分解对信号进行特征识别提取,可以有效解决上述问题,因此获取的各个涂层界面的回波信息也更准确。稀疏分解首先需要构造特定的过完备原子字典,然后在其中搜寻出数量足够少的原子,以线性组合的方式重构出原始信号的特征,以便后续进一步分析信号^[17-18]。

过完备原子字典 D 是由 M 个单位向量构成的矩阵, $D = \{d_i, i = 1, 2, \dots, M\}$,且 Hilbert 空间 $t^N = \text{span}(D)$ 。字典 D 的每个列向量称为字典原子 d_i ,即字典拥有 M 个原子,字典的每个原子都是 N 维的,当 $M \gg N$ 时,构造出的集合 D 就称为过完备原子字典。稀疏分解即通过寻找过完备原子字典 D 中的最佳原子,将搜寻到的最佳原子通过线性组合的方式,近似的表示待处理信号,如式(1)所示。

$$f = \sum_{i \in I} \alpha_i d_i = D\alpha \quad (1)$$

式中: I 为基的脚标合集; α_i 为对应原子在字典 D 下表示的系数; α 集合中非零个数为有限个,也称为稀疏系数。

稀疏分解算法的应用需要满足两个条件,其一是搜寻到的最佳原子数量尽可能少,其二是线性组合的表示形式越简单越好。以匹配追踪算法 (matching pursuit, MP) 为核心的贪婪算法在稀疏分解应用中最为常见,以下是运用 MP 算法分解重构信号的步骤^[19-20]。

设原始信号为 f ,过完备原子字典为 D ,使用匹配追踪算法在过完备原子字典 D 中遍历搜索与原始信号 f 内积最大的原子,该原子即为与原始信号 f 匹配程度最佳的原子,如式(2)所示。

$$|\langle f, d_{r0} \rangle| = \sup_{r \in \Gamma} |\langle f, d_r \rangle| \quad (2)$$

式中: $|\langle f, d_{r0} \rangle|$ 为原始信号 f 与原子 d_{r0} 作内积的模; Γ 为原子索引空间; d_r 为字典内的原子。原始信号 f 可表示为过完备原子库 D 上的投影 $\langle f, d_{r0} \rangle d_{r0}$ 和残差 R_1 两部分之和,如式(3)所示。

$$f = \langle f, d_{r0} \rangle d_{r0} + R_1 \quad (3)$$

式中: d_{r0} 为第 1 次稀疏分解时最佳匹配的原子; R_1 为第 1 次特征提取后信号残差部分。当原始信号 f 分解到第 M 次时,如式(4)所示。

$$f = \sum_{k=0}^{M-1} \langle R_k, d_{rk} \rangle d_{rk} + R_M \quad (4)$$

式中: $\sum_{k=0}^{M-1} \langle R_k, d_{rk} \rangle d_{rk}$ 表示经过 M 次稀疏分解后筛选出的最优原子组合,其中剩余信号分量 R_M 即为特征提取后的残差。当残差能量 R_M 低于设定阈值时,稀疏分解过程结束,此时获得的信号 f 的近似表达即为最优稀疏表示,如式(5)所示。

$$f = \sum_{k=0}^{M-1} \langle R_k, d_{rk} \rangle d_{rk} \quad (5)$$

综上所述,在原子参数离散化基础上形成过完备原子字典,MP 算法通过在过完备原子字典中迭代寻找与信号内积值最大的原子的发那个发,确定最佳匹配原子,并用这些最佳匹配原子进行线性组合,从而表示原信号的特征。这种迭代寻优的方式降低了信号稀疏分解的复杂程度,有利于快速找到一组稀疏基用于重构信号特征。MP 算法如今在信号分析领域最为常见,涉及到需要稀疏分解处理的各种领域的问题,MP 或 MP 的衍生算法都是首选。

基于稀疏分解和匹配追踪的算法框架,该方法能够有效重构信号的重要特征分量。通过噪声抑制和混叠信号分离的双重处理机制,可实现对解耦后信号各回波成分的精确提取,从而准确测定不同涂层界面的反射波到达时间,进而准确快速地计算出相应涂层的厚度。

1.3 过完备字典的优化

信号稀疏分解处理的首要步骤是依据待分析信号的

特性,设计并建立相应的过完备原子库,既有利于提升稀疏分解算法的运算效率,也有利于提高稀疏分解的准确性。其次为保证过完备原子字典中原子的多样性和冗余性,其原子时频特性应具有普遍差异。

Gabor 过完备字典的构建方法如下^[21],以高斯原子为基础单元,对其时频域参数通过离散化处理,最终形成冗余字典。其单个原子的数学表达如式(6)所示。

$$g_\gamma = \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-u}{s}\right) \cos(\zeta t + \theta) \quad (6)$$

其中, $g(t) = e^{-\pi t^2}$, $\gamma = (s, u, \zeta, \theta)$ 是时频参数。其中分别代表尺度、位移、频率和相位的变化。而在本文中,多层薄涂层超声检测信号的混叠会影响信号的频宽,但是 Gabor 冗余字典中对于频率这一时频参数随时间的变化未体现,在此基础上的 Chirp 原子^[22]则是在 Gabor 原子中引入频率倾斜参数 c ,同时对 Chirp 原子的构造公式进行优化,对式中的余弦函数同样进行移位和尺度变换,得到优化后的 Chirp 原子表示如式(7)所示。

$$g_\gamma = \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-u}{s}\right) \cos[\zeta\left(\frac{t-u}{s}\right) + \frac{c}{2}\left(\frac{t-u}{s}\right)^2 + \theta] \quad (7)$$

其中, $g(t) = e^{-\pi t^2}$, $\gamma = (s, u, \zeta, \theta, c)$ 是时频参数。对参数集合 γ 作离散化处理, $\gamma = (a^i, pa^i \Delta u, ka^i \Delta \zeta, j \Delta \varphi, la^{-2i})$, 其中 $a = 2$, $\Delta u = 1/2$, $\Delta \zeta = \pi$, $\Delta \varphi = \pi/6$, $0 < i \leq \log_2 N$, $0 \leq p \leq 2^{-i+1}N$, $0 \leq k < 2^{i+1}$, $0 \leq j < 12$, $0 < l < 2^{i+1}$, 其中 $t = 0, 1, \dots, N, N$ 表示信号总采样点数。Chirp 原子按照上述参数范围变化张成 Chirp 原子库。

2 数值仿真实验

2.1 防护涂层数值仿真建模

在实验前,通过 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真平台进行装配式钢结构防护涂层超声水浸检测的数值仿真建模分析,为降低模型运算量,建立的数值仿真模型如图 2 所示。装配式钢结构防护涂层超声水浸检测的数值仿真模型采用分层结构设计,自顶向下依次为用于超声耦合的 1 mm 的水层,0.3 mm 的防火涂层,0.1 mm 的防腐涂层,1 mm 的钢结构基体层。为尽量保证数值仿真模型的运算结果符合实际,所以在模型中采用自拟的材料参数,具体数值如表 1 所示。

仿真模型的求解精度和模型的边界条件的选择息息相关,尤其在本次仿真研究中,超声波在涂层边界的多次反射与透射是重中之重^[23]。基于上述分析,将模型的外边界均设置为低反射边界,目的是抑制边界多次反射回波的干扰,以实现最佳的检测效果。为了优化有限元仿真运算的结果,模型的网格划分如式(8)所示。

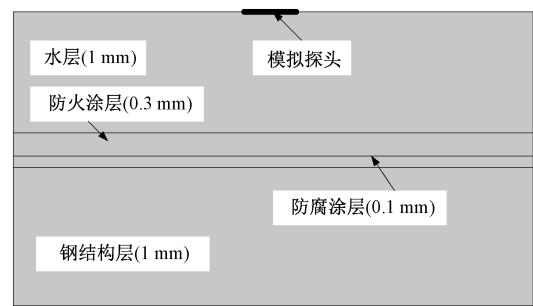


图 2 装配式钢结构防护涂层超声水浸检测模型

Fig. 2 Ultrasonic water immersion inspection model of protective coating for assembled steel structures

表 1 模型对应材料声学属性

Table 1 Acoustic properties of materials corresponding to the model

构层	泊松比	杨氏模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)
水层	-	-	1 000
防火涂层	0.45	0.99	800
防腐涂层	0.28	30	2 400
钢体层	0.3	200	7 850

$$l_{max} = \frac{\lambda_L}{8} = \frac{c_L}{8f_0} \quad (8)$$

式中: l_{max} 表示最大网格尺寸; λ_L 表示超声波纵波波长; c_L 为纵波在介质中的波速; f_0 为激励信号频率。

超声波纵波在任一介质中的声速理论值可以通过计算得到,其大小仅仅与介质的密度、泊松比和杨氏弹性模量相关,计算公式如式(9)所示。

$$C = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (9)$$

式中: E 为杨氏弹性模量; ρ 为介质密度; σ 为泊松比。在 COMSOL 的参数定义模块设置 f_0 大小为 20 MHz,根据表 1 每层对应材料声学属性数据,先计算得到钢体层中理论声速为 5 900 m/s,防火涂层中理论声速为 2 167 m/s,防腐涂层中理论声速为 3 997 m/s,再根据式(7)计算模型中网格大小,钢体层中网格大小为 $5 900 / (f_0 \times 8) = 0.037$ mm,防火涂层中网格大小为 $2 167 / (f_0 \times 8) = 0.014$ mm,防腐涂层中网格大小为 $3 997 / (f_0 \times 8) = 0.025$ mm]。

2.2 激励信号加载

仿真模型中将超声探头简化为 1 mm 长的线段,仅用于激励出超声脉冲信号,激励信号选择使用正弦调制信号,其数学模型如式(10)所示。

$$h(t) = \sin(2\pi ft) \cdot \exp\{-[(t - 2T)/(T/2)]^2\} \quad (10)$$

式中: f 表示激励信号频率,模型中参数设置为 20 MHz;

T 表示激励信号周期; t 表示超声脉冲激励时间, 时长为 $6 \mu\text{s}$ 。本次仿真实验选用的激励频率为 20 MHz , 信号的波形如图 3 所示。

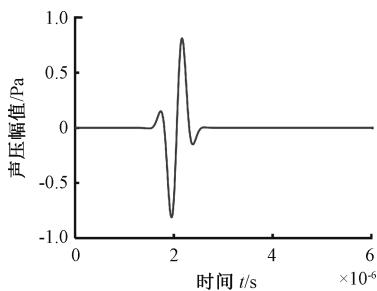


图 3 20 MHz 模拟激励信号的时域图

Fig. 3 Time-domain plot of a 20 MHz analog excitation signal

2.3 仿真结果

仿真运算结果如图 4 所示, 从图 4 可以发现, 数值仿真模型的运算得到的检测信号没有噪声, 其信号质量只受到超声波在介质中多次反射、透射和衰减等现象的影响, 而在实际检测环境下, 噪声的干扰同样是使得检测误差偏大的重要因素, 因此在仿真信号中通过引入不同信噪比的高斯白噪声来模拟实际检测环境中的噪声干扰, 并且在后续验证稀疏分解 MP 算法和小波变换对于克服噪声影响混叠信号分离效果的能力, 不同信噪比 (SNR) 加噪信号如图 5(a)~(c) 所示。

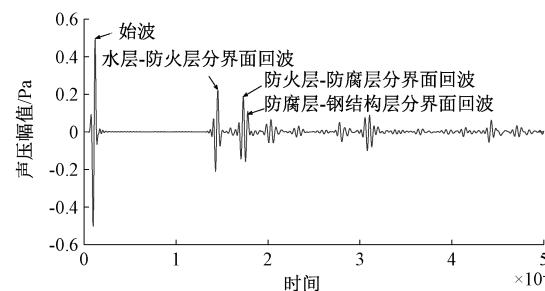


图 4 数值仿真运算结果

Fig. 4 Numerical simulation operation results

从仿真原始信号时域图像可以看出, 防火涂层和防腐涂层的界面反射信号已经相互混叠在一起, 出现多个波峰的混叠信号, 对原始信号添加高斯白噪声之后, 混叠导致的信号失真更加明显, 并且波峰出现失真会导致波峰时域信息提取不够准确, 为准确获取涂层界面的反射特征, 必须对原始检测信号通过降噪预处理、混叠信号分离以及特征重构等处理步骤, 才能从信号中提取出各个涂层界面的反射回波信息。可见, 在不同的信噪比条件下, 涂层界面的反射回波信号混叠的细节不同。当 $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$ 时, 界面回波波形细节较原始信号变化不大, 信号混叠区域波形未明显畸变; 当 $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$ 时, 信

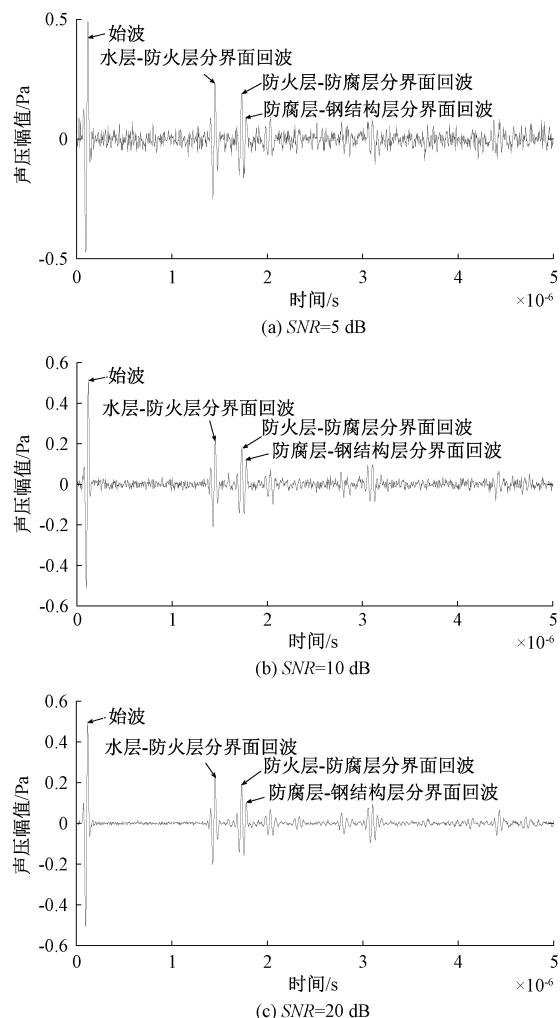


图 5 不同信噪比加噪仿真信号

Fig. 5 Simulated signal with different signal-to-noise ratios

号整体受噪声影响变形, 但仍能区分信号混叠区域; 当 $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$ 时, 信号被噪声污染现象更明显, 波形不再规则, 混叠区域信号不规则变化更明显, 对于混叠信号的分离带来困难。若本文算法能适应不同信噪比条件下的信号混叠分离, 则实验条件下同样可以有效分离混叠信号。

2.4 信号分解重构

采用 MP 算法在过完备优化 Chirp 原子字典中对不同信噪比条件下信号进行稀疏分解后重构, 得到信号特征如图 6(a)~(c) 所示。

基于匹配追踪算法的信号处理流程如下:首先依据信号能量分布特征, 从优化 Chirp 过完备原子库中迭代搜索最优匹配原子, 随后通过原子的线性组合实现信号特征重构。如图 6 所示, 基于优化 Chirp 过完备原子库的 MP 算法展现出较强的抗干扰能力, 即使在存在噪声和波形混叠的情况下, 仍能准确识别匹配原子, 有效完成信号降噪与混叠分离。实验结果表明, 基于 MP 算法的特

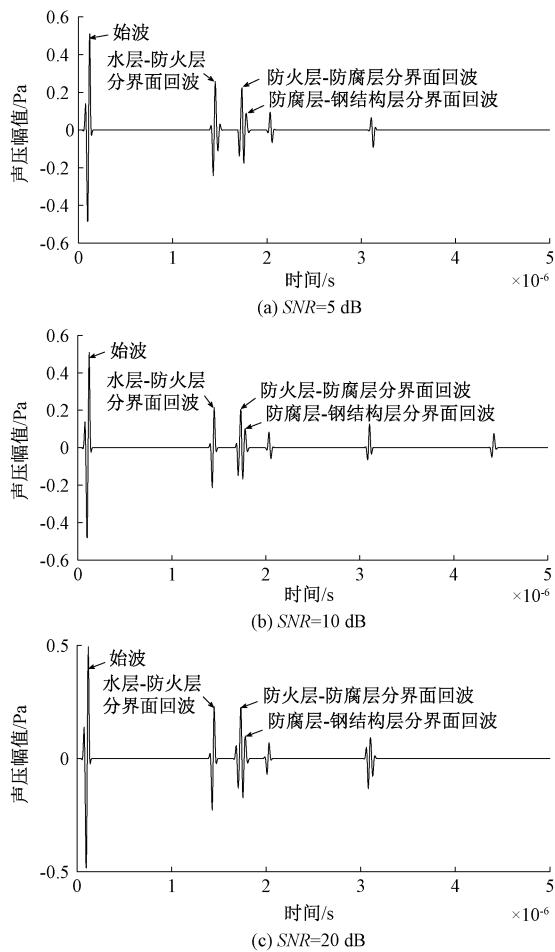


图 6 稀疏分解信号特征重构结果

Fig. 6 Sparse decomposition signal feature reconstruction results

征重构过程具有较好的鲁棒性,能够显著降低噪声干扰对信号处理的影响。

对加噪后的信号通过小波变换分离混叠信号,分解结果如图 7(a)~(c) 所示。从图 7 可以看出,通过波峰幅值特征确定各个界面回波,对于 $SNR = 20$ dB 的加噪信号,小波变换能较清晰的分离混叠信号,但是重构信号容易受到激励信号脉宽的影响,其分离效果没有 MP 算法好;而当信噪比降低时,小波变换的分离效果受到噪声的影响,导致重构信号在待读取时域信息的波峰周围出现异常波峰,这会对分辨界面回波位置造成干扰,而稀疏分解 MP 算法则能很好的克服噪声带来的不良影响,所以将 MP 算法应用于涂层检测信号的混叠分离效果优于小波变换。

现借助信号均方根误差 (root mean square error, RMSE) 来评价稀疏分解 MP 算法分解重构后信号和涂层检测原始信号的匹配程度,如式(11)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^2} \quad (11)$$

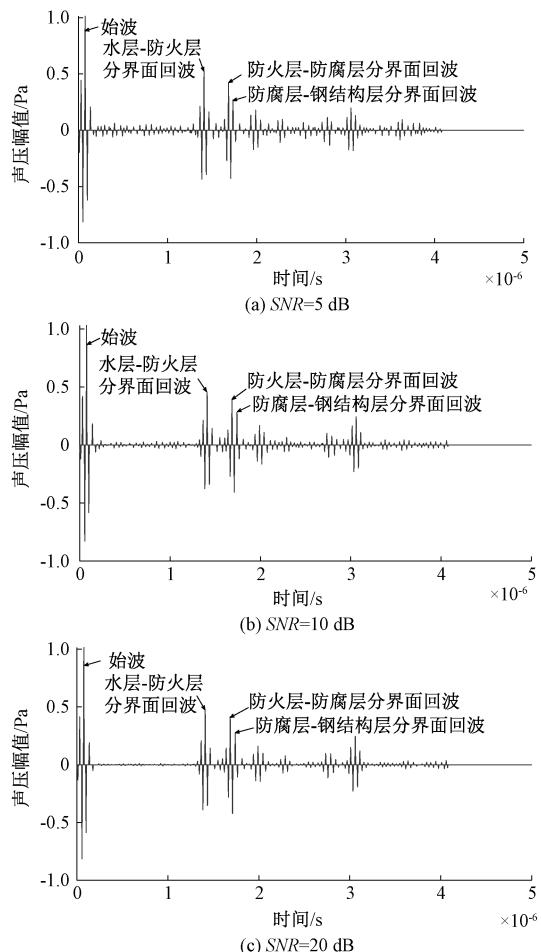


图 7 小波变换模极大值法信号特征提取结果

Fig. 7 Wavelet transform modal maxima method signal feature extraction results

式中: x_0 是待处理信号; x_i 表示分解算法对 x_0 的处理结果; N 为待处理信号长度。

以 20 MHz 的仿真实验信号为例,根据式(11)计算得到重构信号与原始信号的 RMSE 值,首先对比不同原子字典情况下的 MP 算法的分离混叠信号的重构质量,然后对比两种算法重构信号与原始信号的相似度,验证两种算法分离混叠信号的重构质量,结果如表 2 和 3 所示。

表 2 不同原子字典 MP 算法重构信号匹配程度对比

Table 2 Comparison of the degree of matching of reconstructed signals by different atomic dictionary MP algorithms

指标	Gabor 字典			Chirp 字典		
	5 dB	10 dB	20 dB	5 dB	10 dB	20 dB
RMSE	0.013 8	0.012 6	0.012 4	0.013 2	0.012 3	0.012 1

由表 2 和 3 可知,在不同信噪比情况下,本文优化后

表 3 不同算法重构信号匹配程度对比

Table 3 Comparison of reconstruction signal matching degree by different algorithms

指标	MP 算法			小波变换		
	5 dB	10 dB	20 dB	5 dB	10 dB	20 dB
RMSE	0.013 8	0.012 6	0.012 4	0.068 1	0.066 6	0.066 3

的基于 Chirp 字典的稀疏分解 MP 算法重构信号的质量较 Gabor 字典有一定提升, 稀疏分解 MP 算法在信号重构过程中展现出显著优势, 其重构信号与原始信号具有更高的匹配度, 能有效降低噪声对信号细节特征的干扰, 同时提升混叠信号的分离效果。为直观对比分析两种算法分解重构混叠信号的能力, 计算涂层检测相对误差, 结果如表 4 所示。

表 4 不同算法重构信号检测误差对比表

Table 4 Comparison of detection errors of reconstructed signals with different algorithms

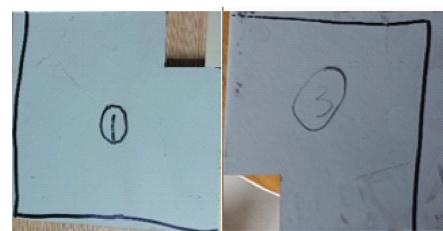
算法	防火层检测相对误差/%			防腐层检测相对误差/%		
	5 dB	10 dB	20 dB	5 dB	10 dB	20 dB
MP 算法	-0.68	-0.68	-0.68	-0.08	-0.08	-0.08
小波变换	-0.68	-0.68	-0.68	9.92	9.92	9.92

根据表 4 可知, MP 算法的防腐涂层检测相对误差明显小于小波变换算法, 说明小波变换算法受噪声的影响导致分解重构能力降低, 而实际应用中避免不了噪声对检测的影响, 所以稀疏分解 MP 算法在涂层超声检测混叠信号分离中更有应用前景。

3 实验与分析

3.1 试块与实验平台

为验证 MP 算法的实际应用性能, 设计了两块喷涂环氧富锌底漆作为防腐层的钢结构试块, 每块试块的喷涂厚度不同, 试块大小均为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的钢板基材, 表面喷涂环氧富锌底漆形成防腐涂层, 如图 8(a)所示。为精确测定涂层厚度, 从试块上截取 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 样本进行金相分析, 如图 8(b)所示, 所得结果将与超声水浸法测量值进行对比验证。后续实验中, 在防腐涂层试块表面喷涂防火涂料形成复合涂层结构, 其中 1 号试块用于实验研究, 3 号试块作为对照样本, 如图 9 所示。涂层试样的金相显微镜检测结果如图 10(a)、(b)所示, 试样截面呈现明显的分层结构, 右侧为金属基体, 左侧涂层区域中, 浅色区域对应防腐涂层, 深色区域则为防火涂层。为获得可靠数据, 在每个试样上随机选取 5 个测量点, 分别测定两种涂层的厚度, 具体测量结果如表 5 和 6 所示。



(a) 装配式钢结构防腐涂层试块
(a) Test blocks for anti-corrosion coating of prefabricated steel structures



(b) 装配式钢结构防腐涂层金相试块
(b) Metallographic test blocks for anti-corrosion coatings of prefabricated steel structures

图 8 装配式钢结构防腐涂层试块实物图

Fig. 8 Physical drawing of the test block for anti-corrosion coating of prefabricated steel structure

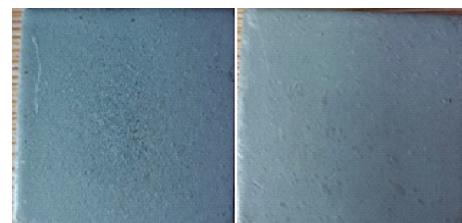


图 9 装配式钢结构防护涂层试块实物

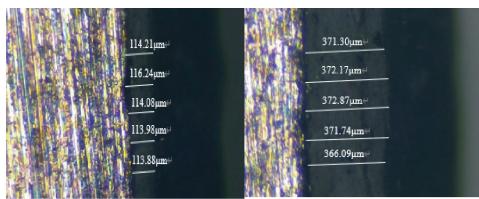
Fig. 9 Physical drawing of the test block for the protective coating of prefabricated steel structure

表 5 装配式钢结构防腐涂层厚度金相测试结果

Table 5 Metallographic test results of anti-corrosion coating thickness for prefabricated steel structures

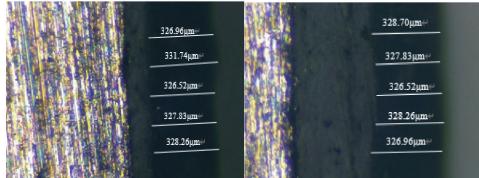
试块编号	测试点	涂层厚度测量结果/ μm	厚度均值/ μm
1	1	114.21	114.48
	2	116.24	
	3	114.08	
	4	113.98	
	5	113.88	
3	1	371.30	370.83
	2	372.17	
	3	372.87	
	4	371.74	
	5	366.09	

在涂层厚度检测实验中, 与数值仿真模型保持一致采用水浸超声检测方法, 同时使用中心频率为 20 MHz 的



(a) 装配式钢结构防腐涂层金相结果

(a) Metallographic result diagram of anti-corrosion coating for prefabricated steel structures



(b) 装配式钢结构防火涂层金相结果

(b) Metallographic result diagram of fireproof coating for prefabricated steel structures

图 10 装配式钢结构防护涂层试块金相结果

Fig. 10 Metallographic result diagram of the test block for protective coating of prefabricated steel structure

超声水浸探头对装配式钢结构防护涂层进行检测。由于所选水浸探头激励的超声波半波长均小于装配式钢结构防护涂层厚度,确保了检测分辨率满足界面回波分辨要求。实验过程中,随机选取试块多个位置进行测量,检测信号通过 200 MHz 采样频率的数据采集卡接收,使用 20 MHz 水浸探头检测时单次采集 1 642 个数据点用于信号重构,如图 11 所示。

表 6 装配式钢结构防火涂层厚度金相测试结果

Table 6 Metallographic test results of fireproof coating thickness for prefabricated steel structures

试块编号	测试点	涂层厚度测量结果/ μm	厚度均值/ μm
1	1	326.96	328.26
	2	331.74	
	3	326.52	
	4	327.83	
	5	328.26	
3	1	328.70	327.65
	2	327.83	
	3	326.52	
	4	328.26	
	5	326.96	

基于时域信号分析(图 12)和厚度测量数据(表 5 和 6),计算得到 3 号试块防护涂层的平均声速,结果如表 7 所示。

通过 3 号对比试块进行的声速测定实验结果如表 7 所示,超声波在装配式钢结构防腐涂层中的平均传播速度为 5 458 m/s,在装配式钢结构防火涂层中的平均传播速度为 3 295 m/s,根据上述实验结果为通过 1 号试块实

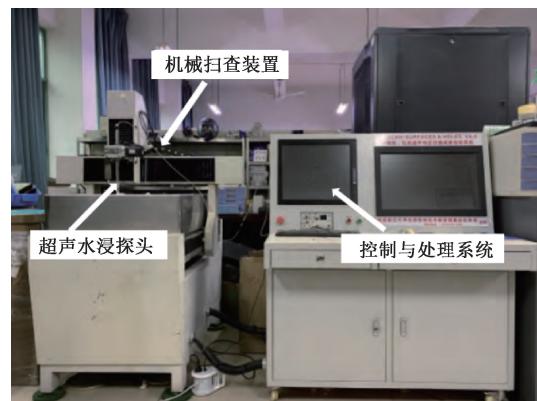


图 11 实验平台实物

Fig. 11 Physical diagram of the experimental platform

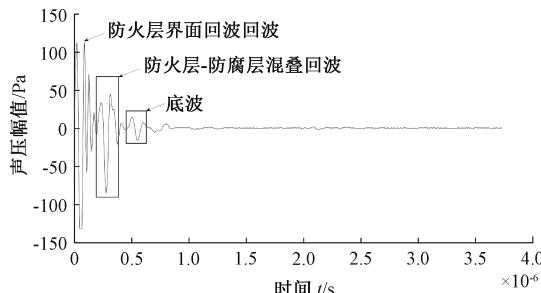


图 12 3 号试块随机检测信号

Fig. 12 Random detection signal of test block No. 3

验数据进行计算提供了关键基准数据。

表 7 3 号试块涂层声速计算结果

Table 7 Calculation results of sound velocity of coating of No. 3 specimen

组数	防腐涂层声速计算值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	防火涂层声速计算值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	5 494	3 277
2	5 298	3 197
3	5 705	3 361
4	5 298	3 277
5	5 494	3 361
平均值	5 458	3 295

3.2 信号分解与特征提取

基于涂层声速参数,本文采用 20 MHz 中心频率探头对 1 号试块进行水浸检测(采样频率 200 MHz,扫描步进 1 mm)。试块上某点处采集信号如图 13 所示,由于涂层表面粗糙度影响,防火层上界面回波(点 A)呈现多峰特征,通过统一取中间峰值作为特征点来消除人为误差。根据声速公式计算,水浸实验检测系统极限分辨率为 136.45 μm ,由于与涂层厚度相近导致检测回波出现严重的混叠现象,其中点 B 对应防火/防腐层界面,点 C 对应

防腐层/基体层界面。

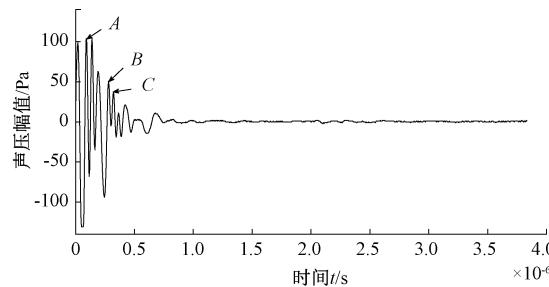


图 13 试样检测回波信号

Fig. 13 Specimen test echo signal

现使用 MP 算法对混叠信号进行处理, 算法迭代 10 次后得到最佳匹配原子, 根据特征原子的波峰时域信息可以计算出涂层的厚度, 信号分解结果如图 14(a)~(c) 所示。通过读取图 14 中各个特征原子的波峰时域信息的方式获得采样时间分别为 9.5×10^{-8} 、 2.85×10^{-7} 、 3.25×10^{-7} s, 则超声波在防火涂层中的传播时间为 $0.19 \mu\text{s}$, 在防腐涂层中的传播时间为 $0.04 \mu\text{s}$ 。根据式 $\Delta d = c\Delta t/2$, 计算得到防火涂层的检测厚度为 $313.02 \mu\text{m}$, 检测相对误差为 -4.64% ; 防腐涂层的检测厚度为 $109.16 \mu\text{m}$, 检测相对误差为 -4.65% 。

此外, 为了进一步说明 MP 稀疏分解算法在涂层检测信号混叠分离方面的优越性能, 将小波变换模极大值法应用于本实验的混叠信号分离, 其结果如图 15 所示。

从图 15 可以看出, 小波变换对于信号突变点敏感, 可以通过小波变换模极大值法对混叠信号的分离, 但是对于检测过程中的噪声同样变换到信号时域图中, 会对需要分辨的有用信号造成干扰。就如图 15 中在关键信号峰值周围出现多个高幅值波峰, 并且根据图 15 中标注的时域信息可以计算得到防火涂层的检测厚度为 $304.79 \mu\text{m}$, 检测相对误差为 -7.15% ; 防腐涂层的检测厚度为 $122.81 \mu\text{m}$, 检测相对误差为 -7.28% 。由此可见相较于 MP 算法稀疏分解的结果, 小波变换模极大值法的检测误差更大, 同时更容易受到噪声的干扰, 所以基于优化 Chirp 字典的稀疏分解 MP 算法对于涂层混叠信号的分离更有效。

4 结 论

本文针对装配式钢结构多层防护涂层厚度检测中存在的界面回波混叠与噪声干扰问题, 提出了一种基于高频超声脉冲反射法与 MP 算法相结合的高精度检测方法。本文核心在于通过优化 Chirp 过完备原子字典的稀疏分解技术, 实现混叠信号的精准分离与噪声抑制, 解决了传统小波变换在低信噪比条件下分解混叠信号受噪声

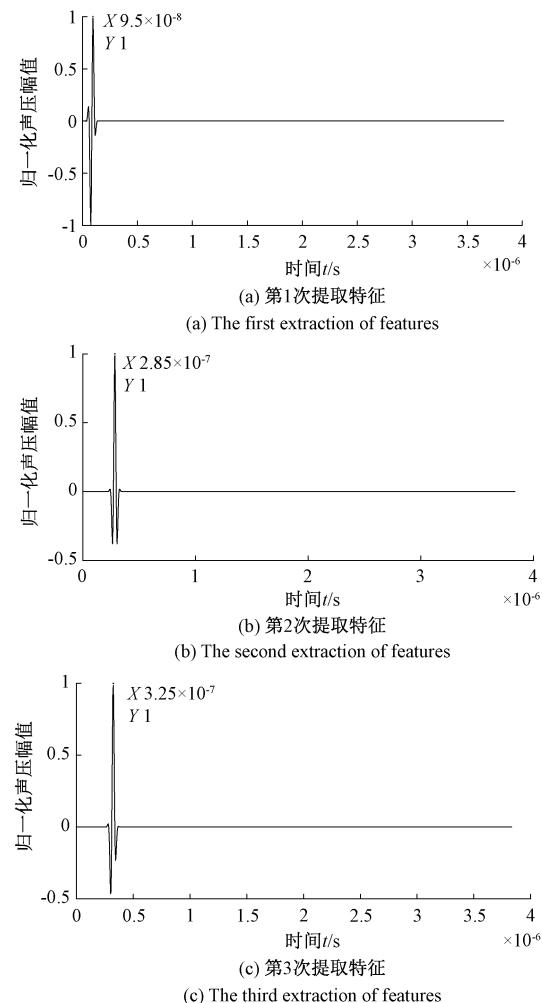


图 14 装配式钢结构水浸检测信号的稀疏分解结果

Fig. 14 The sparse decomposition result of the water immersion detection signal of prefabricated steel structures

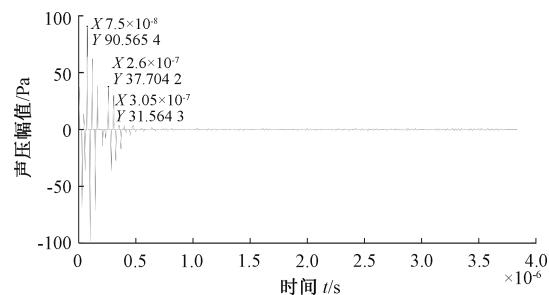


图 15 混叠信号的小波变换结果

Fig. 15 Wavelet transform results of the mixed signal

影响大的难题。通过构建具有频率倾斜特性的优化 Chirp 原子库, 显著提升了信号特征的匹配精度, 结合 MP 算法的迭代优化策略, 解决了多层薄涂层界面回波时域信息提取的难题, 实验结果表明, 本文方法在相同信噪比条件下, 防火层与防腐层厚度检测相对误差分别为在

-4.64% 和 -4.65%，明显优于传统小波变换方法 -7.15% 和 -7.28% 的检测相对误差，验证了本文方法在复杂工程环境中的适用性。所以基于优化 Chirp 字典的 MP 算法在涂层超声检测领域的应用更有价值。尽管 MP 算法在涂层检测中表现出了显著的优势，但仍有进一步改进和拓展的空间，其计算复杂度较高，尤其是在处理大规模数据时。未来可以研究如何优化 MP 算法，降低其计算复杂度，提高算法的运行效率，使其能够更快速地处理涂层检测信号，以满足实际工程中对检测效率的要求。同时，随着深度学习技术的快速发展，其在信号处理领域的应用也越来越广泛。可以探索将深度学习与稀疏分解 MP 算法相结合，利用深度学习模型自动提取信号的特征，进一步提高信号分离和重构精度。

参考文献

- [1] 张琰, 江辉, 文霁, 等. 薄壁墙式墩结构装配式方案及其抗震性能分析 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(4): 911-920.
ZHANG Y, JIANG H, WEN J, et al. A prefabricated structure scheme for thin-wall pier and seismic performance analysis [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024, 54(4): 911-920.
- [2] 蔺鹏臻, 戚彦福, 李籽祺, 等. 动荷载作用下钢结构涂装的累积损伤机理与量化模型 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(6): 113-121.
LIN P ZH, QI Y F, LI Z Q, et al. Cumulative damage and prediction model of steel structure coating under dynamic load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(6): 113-121.
- [3] 张昱, 陈尧, 李秋锋, 等. 基于波包分解技术的铁基非晶涂层厚度超声检测与评价 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(12): 38-45.
ZHANG Y, CHEN Y, LI Q F, et al. Ultrasonic test and evaluation for iron-based amorphous coatings based on wave packet decomposition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(12): 38-45.
- [4] LIU Y Y, ZHOU R Q, WANG Z G, et al. Ultrasonic detection of aliased signal separation based on adaptive feature dictionary and K-SVD algorithm for protective coatings of assembled steel structure [J]. Coatings, 2023, 13(7): 1239.
- [5] SAKATA T, KISHIGAMI S, OGAWA Y, et al. Quantitative assessment of heavy-duty anticorrosion coating thickness via near-infrared measurements [J]. NDT & E International, 2023, 138: 102893.
- [6] YANG X, WANG X Y, FANG W, et al. Pulsed thermography with laser beam homogenizing for thickness prediction of thin semi-transparent thermal barrier coatings [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 158: 107182.
- [7] ZAIN A, BASSAM A, MAEN A, et al. Experimental evaluation of nonmagnetic metal clad thicknesses over nonmagnetic metals using apparent eddy current conductivity spectroscopy [J]. Measurement, 2020, 164: 108053.
- [8] 马云鹏, 郑伟, 吴沁珂, 等. 基于电磁扫描的电路板防护涂层覆盖性检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(1): 24-35.
MA Y P, ZHENG W, WU Q K, et al. Detection technology of conformal coating coverage on circuit board based on electromagnetic scanning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(1): 24-35.
- [9] 龚云丽, 曹丙花, 孙凤山, 等. 新型窗函数适配的热障涂层太赫兹盲反卷积方法 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(9): 270-279.
GONG Y L, CAO B H, SUN F SH, et al. A blind deconvolution method for terahertz thermal barrier coating adapted by novel window function [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(9): 270-279.
- [10] 孙珞茗, 林莉, 马志远. 基于声压反射系数幅度谱特征的涂层脱粘超声 C 扫描成像检测研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 44-49.
SUN L M, LIN L, MA ZH Y. Measurement of the coatings debonding using ultrasonic C-scan imaging based on reflection coefficient amplitude spectrum characterizations [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 44-49.
- [11] 刘海波, 廉盟, 周连杰, 等. 面形自适应超声在机测厚方法研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(18): 11-17.
LIU H B, LIAN M, ZHOU L J, et al. Research on shape adaptive thickness on-machine measurement using ultrasonic [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(18): 11-17.
- [12] 杜晶晶, 张军芳, 刘建晓, 等. 基于小波变换模极大值法的涂层信号奇异性检测 [J]. 科技资讯, 2022, 20(5): 16-18.
DU J J, ZHANG J F, LIU J X, et al. Singularity detection of coating signal based on wavelet transform mode maximum method [J]. Science & Technology Information, 2022, 20(5): 16-18.
- [13] 陆传雨, 陆铭慧, 刘浩宇, 等. 基于改进式 SL0 算法的超声混叠信号分离 [J]. 航空学报, 2022, 43(7): 425419.
LU CH Y, LU M H, LIU H Y, et al. Ultrasonic aliasing signal separation based on improved SL0 algorithm [J].

- Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(7):425419.
- [14] LI Q, ZHANG X, ZHU J, et al. Sensing signal analysis and imaging processing with high frequency ultrasonic testing for Fe-based amorphous coatings [J]. IEEE Sensors Journal. 2022, 22:17455-17463.
- [15] 刘柯, 邬冠华, 石剑, 等. 涡轮叶片 NiCoCrAlYTa 涂层超声测厚[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 708-713.
- LIU K, WU G H, SHI J, et al. Ultrasonic thickness measurement of NiCoCrAlYTa coating on turbine blade[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(5):708-713.
- [16] 王志刚, 李秋锋, 王萍, 等. 装配式钢结构防护涂层质量超声评价方法[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2023, 37(4):88-96.
- WANG ZH G, LI Q F, WANG P, et al. Ultrasonic evaluation method for protective coating quality of assembled steel structure [J]. Journal of Nanchang Hangkong University(Natural Sciences), 2023, 37(4): 88-96.
- [17] LI X, SUN L F, LI J, et al. Method for acquiring time of flight from high aliasing signal in heat exchange fouling ultrasonic testing [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 11(43): 2438-2449.
- [18] 章雯, 张君, 王璐, 等. 稀疏正交联合约束多通道非负矩阵分解声信号分离算法[J]. 声学学报, 2023, 48(1):249-263.
- ZHANG W, ZHANG J, WANG L, et al. Sparse orthogonal joint constrained multichannel non-negative matrix factorization algorithm for acoustic signal separation[J]. Acta Acustica, 2023, 48(1):249-263.
- [19] 张龙, 赵丽娟, 杨锦雯, 等. 动力学小波字典驱动的轴承故障个性化稀疏诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7):213-222.
- ZHANG L, ZHAO L J, YANG J W, et al. Dynamic wavelet dictionary driven bearing fault personalization sparse diagnosis[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(7):213-222.
- [20] 罗文, 张伟, 赫丽华, 等. 碳纤维复合材料表面雷达吸波涂层超声测厚方法研究[J]. 失效分析与预防, 2021, 16(4):233-237.
- LUO W, ZHANG W, HE L H, et al. Thickness measurement of radar absorbing coating on carbon fiber by ultrasonic method [J]. Failure Analysis and Prevention, 2021, 16(4):233-237.
- [21] PROA Z, HOLIGHAUS N, BALAZS P. Fast matching pursuit with multi-gabor dictionaries [J]. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 2021(47):1-20.
- [22] 谢惠华, 黎明, 王艳, 等. 基于 DE-Gabor 特征的人脸表情识别[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2021, 35(2):82-91, 124.
- XIE H H, LI M, WANG Y, et al. Facial expression recognition based on DE-Gabor feature [J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2021, 35(2):82-91, 124.
- [23] 刘嘉同, 金永, 张浩亚, 等. 基于多层次界面脱粘的超声检测方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 58-62.
- LIU J T, JIN Y, ZHANG H Y, et al. Multilayer interface debonding study based on ultrasonic detection method [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(9):58-62.

作者简介



刘易奕, 2014 年于南昌航空大学获得学士学位, 2021 年于南昌航空大学获得硕士学位, 现为北京工业大学博士研究生, 主要研究方向为超声检测技术及仪器。

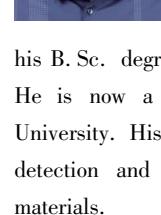
E-mail: 18380553213@163.com



Liu Yiyi received his B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2014, M. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2021. He is now a Ph. D. Candidate at Beijing University of Technology. His main research interests include ultrasonic testing technology and instruments.

李坚(通信作者), 1994 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为南昌航空大学高级实验师, 主要从事复杂结构和材料的声学图像检测与信号处理等方面的研究。

E-mail: lisnco@sina.com



Li Jian (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 1994. He is now a senior experimentalist at Nanchang Hangkong University. His main research interests include acoustic imaging detection and signal processing of complex structures and materials.