

基于频域稀疏盲解卷积的奥氏体不锈钢 TOFD 盲区小缺陷定量检测

廖静瑜¹, 孙 旭², 刘梓昱², 金士杰², 张东辉¹, 林 莉²

(1. 中国核工业二三建设有限公司, 北京 101300; 2. 大连理工大学 无损检测研究所, 大连 116024)

摘 要: 针对超声衍射时差法(TOFD)检测奥氏体不锈钢近表面盲区内小尺寸缺陷时的信号混叠及结构噪声问题,提出了频域稀疏盲解卷积法。在厚为 35 mm 奥氏体不锈钢试块 TOFD 近表面检测盲区内加工深为 3.0 mm,高为 3.0 mm 的人工缺陷,基于匹配追踪算法(MP)对 TOFD 试验信号进行稀疏分解,解耦噪声部分,再利用同态变换并结合 L_1, L_2 范数约束建立反演问题目标函数,并利用内点法求解。结果表明,在无需参考信号的情况下,该方法能够分离 TOFD 表面直通波和缺陷上、下端点衍射波,计算求得缺陷深为 3.04 mm,高为 2.65 mm,最大误差不超过 11.7%。

关键词: 超声衍射时差法(TOFD);奥氏体不锈钢;近表面盲区;检测分辨率;频域稀疏盲解卷积

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6656(2023)07-0070-06

Quantitative detection of small defects in TOFD dead zone of austenitic stainless steel based on frequency domain sparse blind deconvolution

LIAO Jingyu¹, SUN Xu², LIU Ziyu², JIN Shijie², ZHANG Donghui¹, LIN Li²

(1. China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 101300, China;

2. NDT&E Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To solve the problem of signal aliasing and structural noise in detecting small defects in the near-surface dead zone of austenitic stainless steel by time of flight diffraction (TOFD), a frequency domain sparse blind deconvolution method was proposed. The artificial defects with a depth of 3.0 mm and a height of 3.0 mm were processed in the dead zone of TOFD near surface detection of austenitic stainless steel test block with a thickness of 35 mm. The experimental signals of TOFD were sparsely decomposed based on Matching pursuit (MP) algorithm to decouple the noise parts. The objective function of inversion problem was established by homomorphic transformation combined with L_1 and L_2 norm constraints, and solved by interior point method. The results showed that without reference signal, the method can separate the direct wave and the diffraction wave on the upper and lower edge of the defect by TOFD. The calculated defect depth was 3.04 mm, the height was 2.65 mm, and the maximum error was less than 11.7%.

Key words: time of flight diffraction (TOFD); austenitic stainless steel; near-surface dead zone; resolution of detection; frequency domain sparse blind deconvolution

奥氏体不锈钢广泛应用于化工、核电等特种装

备制造中^[1-2],采用超声衍射时差法(TOFD)对其进行缺陷检测是质量控制的常用手段^[3-5]。该方法主要存在以下两方面的困扰:一是由于发射信号具有一定的脉冲宽度,检测时会存在盲区^[6-7];另一方面,缺陷端点接收到的衍射信号较弱,奥氏体不锈钢粗大晶粒带来的结构噪声会进一步降低检测信噪比^[8]。因此,奥氏体不锈钢 TOFD 近表面缺陷检测

收稿日期:2022-11-01
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51905079)
作者简介:廖静瑜(1985—),女,工程师,主要从事核工程无损检测研究工作
通信作者:林 莉(1970—),女,教授,研究方向为材料无损检测与评价,linli@dlut.edu.cn

存在信噪比和分辨率均较低的问题。尽管通过提升探头频率能在一定程度上改善检测分辨率,但同时会导致结构噪声明显增强。整体而言,仅通过优化 TOFD 检测参数难以同时解决上述两方面的问题。

研究中常采用信号后处理方法提高超声检测分辨率,根据是否采用卷积模型,可将信号后处理方法分为非解卷积和解卷积两种,其中,非解卷积法可利用信号之间的相似性或信号可分解性等实现时差与位置识别,并提升信噪比。黎文超等^[9]考虑信号之间相似性,基于深度重采样叠加算法抑制奥氏体不锈钢的结构噪声,能够识别深度为 15 mm,直径为 2 mm 的横孔,距离检测面 5 mm 的信号则由于处在检测盲区而无法辨认。LALITHAKUMARI 等^[10]基于信号可分解性,利用 Coiflet 4 小波硬阈值 5 级分解法对奥氏体不锈钢焊缝 TOFD 检测信号进行处理,得到 12.5 mm 深处熔渣的检测信噪比为 6.83 dB,但未进行缺陷定量。由于非解卷积法难以缩小信号脉冲宽度,所以无法提升时间分辨率。解卷积方法根据是否需要参考信号,可分为非盲解卷积和盲解卷积两种,其中非盲解卷积基于参考信号,通过解卷积方式来压缩信号脉冲宽度和解耦混叠信号^[11]。典型方法有自回归谱外推技术。SHAKIBI 等^[12]利用自回归谱外推模型,通过 4 800 个模拟数据拟合选取参数,对 TOFD 检测碳钢焊缝中长为 25 mm 近表面裂纹产生的上、下端点混叠信号进行处理,盲区从 2 mm 缩小至 0.5 mm,时间分辨率可达 0.1 μs。与非盲解卷积方法相比,盲解卷积方法无需参考信号即可提高检测分辨率。典型方法有最小熵解卷积和同态解卷积。LI 等^[13]利用最小熵解卷积对厚为 7.5 mm 铝块内底端埋深 4 mm 的人工缺陷进行定位,误差约为 7.1%。LU 等^[14]基于同态解卷积处理模拟超声信号时发现,相比于无噪声,添加噪声至信噪比为 12 dB 时,该方法的性能下降约 15%,且运算时间增加一倍,难以用于奥氏体不锈钢材料的检测信号处理。

研究表明,TOFD 检测信号具有稀疏特性^[13],即特征维度小于信号维度,可通过匹配追踪算法减少部分冗余信息,去除噪声的耦合影响。此外,通过引入稀疏性,对去噪后的混叠信号实施稀疏约束,则可以进一步提升时间分辨率^[15]。针对奥氏体不锈钢近表面缺陷的 TOFD 检测信噪比和分辨率均较低,且难以获取参考信号的问题,提出频域稀疏盲解卷积方法。首先利用匹配追踪算法(MP)解耦噪声

信号,再通过同态变换解耦反射序列,建立反演问题目标函数,进一步利用内点法优化求解。通过解耦试验测得的 TOFD 混叠信号,验证了该方法对奥氏体不锈钢近表面小缺陷检测的可行性及有效性。

1 检测原理

1.1 TOFD 检测及盲区

超声 TOFD 检测原理如图 1 所示,在线性系统假设下,设探头发射信号为 $w(t)$,则接收信号 $s(t)$ 可表示为

$$s(t) = w(t) * r(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $r(t)$ 为反射信号; $n(t)$ 为噪声信号。

设两探头之间的距离即探头中心距(PCS)为 $2S$ (S 为探头中心距的一半),则通过分别读取直通波与缺陷上、下端点衍射波之间的时间差,可以计算待测缺陷的位置 d 和高度 h ^[16]。

$$d = \sqrt{(S + c_1 \Delta t_1 / 2)^2 - S^2} \quad (2)$$

$$h = \sqrt{(S + c_1 \Delta t_2 / 2)^2 - S^2} - d \quad (3)$$

式中: $\Delta t_1, \Delta t_2$ 分别为直通波与缺陷上、下端点衍射波的时间差; c_1 为材料纵波声速。

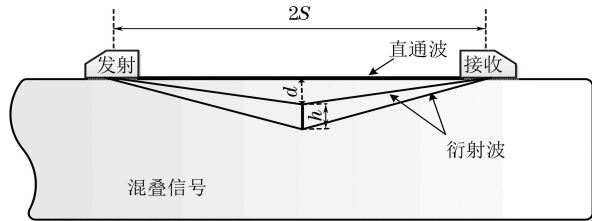


图 1 超声 TOFD 检测原理示意

由于直通波有一定的脉冲宽度,其易与近表面缺陷衍射信号发生混叠,导致存在深度为 D 的检测盲区^[17]。

$$D = [c_1^2 (t_p / 2)^2 + S c_1 t_p]^{1/2} \quad (4)$$

式中: t_p 为直通波脉冲宽度。

为进一步说明近表面盲区对缺陷检测的影响,图 2 给出了盲区与不同位置缺陷的相对关系及其检测信号。由图 2 可见,缺陷处于盲区外(位置 1)、部分处于盲区内(位置 2)及全部处于盲区内(位置 3)且有噪声影响时,TOFD 检测信号有较大区别,缺陷检出及定量难度不同,其中,缺陷全部处于盲区内且信噪比低时检测最为困难,文章即针对此展开研究。

1.2 频域稀疏盲解卷积方法原理

在 TOFD 检测中,接收的离散信号 $s(n)$ 可表示为

$$s(n) = w(n) * r(n) + n(n) \quad (5)$$

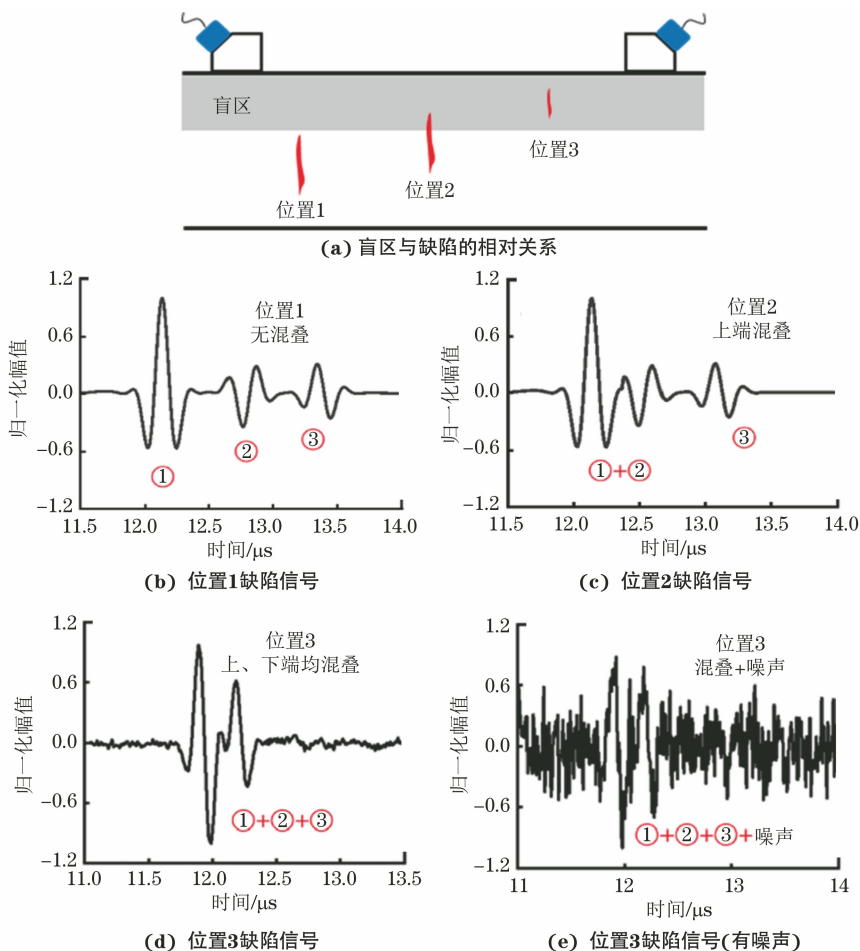


图2 TOFD检测盲区与不同位置缺陷的相对关系及其检测信号

式中: n 为离散序列的点; $w(n)$ 为探头发射序列; $r(n)$ 为反射序列; $n(n)$ 为噪声序列。

由于奥氏体不锈钢的结构噪声和近表面盲区的信号混叠,参考信号会产生畸变或缺失。若无参考信号,根据式(5)可知 $w(n)$ 和 $r(n)$ 难以获得,常规方法难以解决该问题。因此,需要通过稀疏盲解卷积处理将 $w(n)$, $r(n)$ 和 $n(n)$ 从 $s(n)$ 中解耦,获得反射序列 $r(n)$,提高超声检测分辨率。

1.2.1 信号重构

首先利用匹配追踪算法将噪声序列 $n(n)$ 从 $s(n)$ 中解耦出来。该算法是一种自适应信号分解方法,基于冗余原子库对信号进行迭代分解。考虑到一般激发超声信号为高斯调制的正弦波,采用 Gabor 函数构成原子库或冗余字典^[18-19]。

$$D_{\theta} = \frac{1}{\sqrt{s}} \exp \left[-\frac{\pi(t-u)^2}{s^2} \right] \cos(vt + \omega) \quad (6)$$

式中: D_{θ} 为原子参数为 θ 的原子, $\theta = (s, u, v, \omega)$, s 为尺度因子, u 为平移因子, v 为瞬时频率, ω 为瞬时相位,通过离散化参数 $\theta = (2^j, p2^{j-1}, k\pi2^{-j}, \omega)$

构成冗余字典 $D = \{D_1, D_2, \dots\}$, 其中 $j \in [0, \log_2 N]$, $p \in [0, N2^{-j+1}]$, $k \in [0, 2^{j+1})$, $\omega \in [0, 2\pi]$, N 为离散序列的采样点数; t 为时间。

利用式(6)生成的冗余字典对信号进行匹配追踪去噪处理,设迭代次数为 $M(M > 1)$,定义第 0 次迭代的残差 $R_{y0} = y(n)$ 。每一次迭代选取与残差相关性最大的原子 D_i ,则第 M 次迭代得到的离散信号可以表示为^[19]

$$s(n) = \sum_{i=0}^{M-1} \langle R_y^i, D_i \rangle D_i + R_y^M \quad (7)$$

式中: $\langle R_y^i, D_i \rangle$ 为第 i 次迭代残差 R_y^i 与原子 D_i 的内积。

由于噪声的分解系数是非稀疏的,其分解系数值较小,主要包含在残差项中,因此利用主要的分解系数和对应原子进行信号重构,解耦噪声信号 $n(n)$,获得无噪声信号 $\tilde{s}(n)$,结合式(7),可得

$$\tilde{s}(n) = \sum_{i=0}^{M-1} \langle R^i y, D_i \rangle D_i = w(n) * r(n) \quad (8)$$

1.2.2 目标函数构建

同态变换是一种实现简单且运算效率高的变换方法,其基本原理是通过傅里叶变换和对数变换将信号的非线性组合转化到线性域内,实现系统响应与反射序列对数幅度谱的解耦。

利用上述原理,对式(8)两边进行傅里叶变换,并取对数得^[20]

$$\lg(\tilde{S}(f)) = \lg[R(f)] + \lg[W(f)] \quad (9)$$

式中: f 为频率; $\tilde{S}(f)$ 为接收信号频谱; $R(f)$ 为反射信号频谱; $W(f)$ 为始发信号频谱。

由于在倒谱域中, $r(n)$ 的倒谱具有波动性,而 $w(n)$ 的倒谱主要位于原点附近且较为平滑。因此,通过低通滤波器截断部分信号滤除倒谱中的不平滑部分,得到 $w(n)$ 的倒谱特征,并分别对其进行傅里叶变换和指数变换,得到 $W(f)$ 的频谱估计 $\tilde{W}(f)$ ^[15]。

进一步 $R(f)$ 可以表示为

$$R(f) = \frac{\tilde{S}(f)}{\tilde{W}(f)} = \text{real} \left[\frac{\tilde{S}(f)}{\tilde{W}(f)} \right] + j \left\{ \text{img} \left[\frac{\tilde{S}(f)}{\tilde{W}(f)} \right] \right\} \quad (10)$$

式中: $\text{real}\{\cdot\}$ 表示实部; $\text{img}\{\cdot\}$ 表示虚部。

考虑到信号 $\tilde{s}(n)$ 可模型化为^[21]

$$\tilde{s}(n) = \sum_{k=0}^{+\infty} w(n-k)r(k) \quad (11)$$

式中: $r(k) = \sum_{i=1}^N r_i \delta(k-t_i)$, r_i 为反射序列中第 i 点的幅值, t_i 为第 i 点与原点的时间间隔, δ 为函数。

反射序列 $r(k)$ 的频域形式 $R(f)$ 为

$$R(f) = \sum_{k=1}^N [r(t_k) \cos(2\pi f t_k)] - j \sum_{k=1}^N [r(t_k) \sin(2\pi f t_k)] \quad (12)$$

结合式(11)和(12),则有

$$\frac{\tilde{S}(f)}{\tilde{W}(f)} = \sum_{k=1}^N [r(t_k) \cos(2\pi f t_k)] - j \sum_{k=1}^N [r(t_k) \sin(2\pi f t_k)] \quad (13)$$

式(13)两边的实部与虚部对应相等,将式子扩展为矩阵形式并简化得^[15]

$$\mathbf{A}_{2N \times N} \mathbf{x}_{N \times 1} = \mathbf{B}_{2N \times 1} \quad (14)$$

式中: \mathbf{A} 为反射序列与其频域耦合的三角函数系数矩阵; \mathbf{B} 为反射序列频域形式所有实部和虚部组成的向量; \mathbf{x} 为所求的反演信号。

根据反射序列 $r(n)$ 具有稀疏性这一特征,为控制解的稀疏性,引入 L_1 范数建立约束问题^[22],然后利用 L_2 范数控制解的误差范围,约束问题等价于

式(15)的无约束问题。

$$\min_R \{ \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{B}\|_2 + \mu \|\mathbf{x}\| \} \quad (15)$$

式中: μ 为正则化参数。

至此,目标函数建立。

1.2.3 目标函数优化求解

进一步,利用内点法对目标函数优化求解。内点法是一种求解不等式约束最优化问题的方法,通过在可行域内不断迭代、遍历搜索,逐步逼近原问题的最优解,避免了传统梯度方法在某点不可导的问题。与其他方法相比,内点法的原理复杂,但是精度更高。利用内点法把构造的新的无约束目标函数定义在可行域内,在可行域内部逐步逼近原约束优化问题的最优解,再与截断牛顿法相结合提高计算效率。其原理详见文献[21]。

求解获得高分辨率信号后,读取缺陷上、下端衍射波的传播时间差,利用公式(2)与(3)分别计算缺陷埋深 d 与高度 h ,实现奥氏体不锈钢 TOFD 检测近表面盲区内小尺寸缺陷的定量检测。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

在厚为 35 mm 的奥氏体不锈钢试块(声速为 $5\,890\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)中加工埋深为 3.0 mm,高为 3.0 mm 的近表面人工槽缺陷,其平均宽度约为 0.5 mm。带有人工缺陷的奥氏体不锈钢试块外观如图 3 所示。使用 Olympus OmiScan X3 型相控阵探伤仪进行 TOFD 检测,选用中心频率均为 5 MHz 的发射和接收探头,探头中心距为 22 mm,折射角为 70° ,直通波脉冲宽度为 $0.4\text{ }\mu\text{s}$,根据式(4)计算可得到检测盲区深约为 5.7 mm,即该缺陷全部位于近表面盲区内。

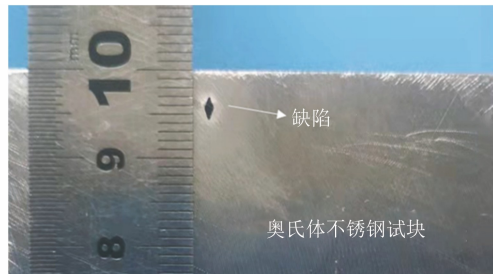


图3 带有人工缺陷的奥氏体不锈钢试块外观

试块近表面小缺陷的 TOFD 检测 A 扫描信号如图 4(a)所示,通过短时傅里叶变换得到的信号时频图如图 4(b)所示,可见,直通波及缺陷的上、下端点衍射波混叠在一起无法分辨,且存在较强的结构

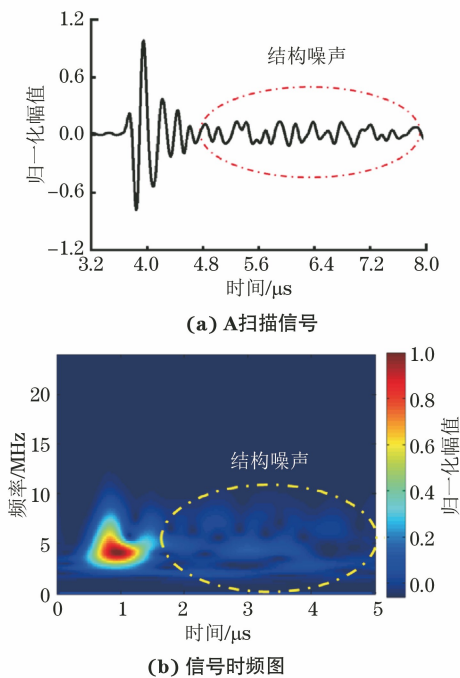


图 4 奥氏体不锈钢近表面小缺陷 TOFD 检测信号
噪声,通过计算可得试验信号的信噪比为 8.7 dB。

2.2 信号处理与定量结果

首先,利用 1.2.1 中的 MP 算法对图 4 中的 TOFD 检测信号进行重构,得到的 A 扫描信号如图 5(a)所示。与原始信号相比,重构后信号的检测信噪比得到明显提升。重构信号的时频图如图 5(b)所示。

进一步利用同态变换得到图 5(a)重构信号的

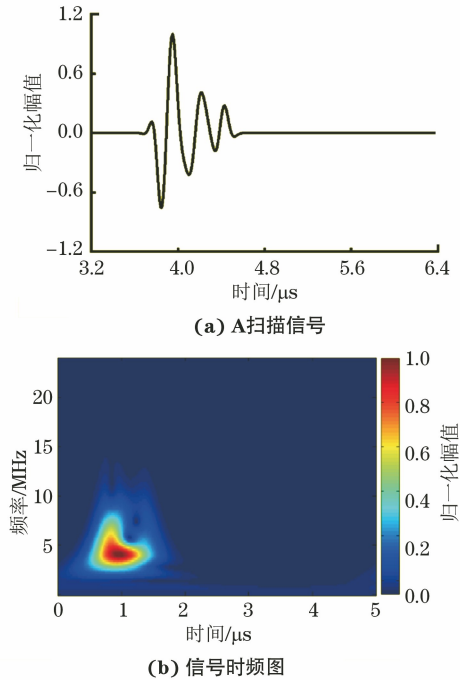


图 5 基于匹配追踪算法重构得到的信号

倒频谱,提取信号的倒谱特征,再引入反射序列的稀疏性,结合 l_2 和 l_1 范数约束,构建目标函数,并利用内点法反演求解,反演结果如图 6 所示。由图 6 可见,与原始信号相比,三重混叠信号得到有效分离,缺陷上、下端点位置清晰可见,处理后信号的信噪比由 8.7 dB 提升至 32 dB。图 6 中直通波与上端点衍射波时间差为 $0.14\ \mu\text{s}$,缺陷上、下端点衍射波时间差为 $0.47\ \mu\text{s}$,根据式(2)及式(3)计算得到缺陷埋深 d 与高度 h 分别为 3.04, 2.65 mm。利用频域稀疏盲解卷积方法对缺陷进行定量,所得结果与设计值对比,深度定量相对误差仅为 1.3%,高度定量相对误差为 11.7%。

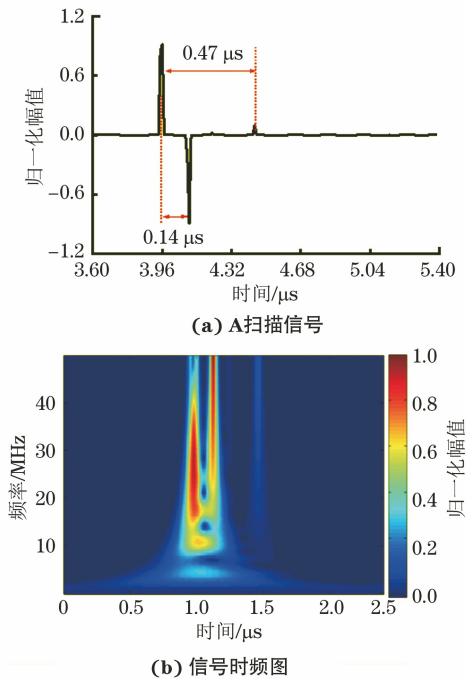


图 6 频域稀疏盲解卷积法信号的反演结果

3 结论

针对奥氏体不锈钢 TOFD 检测信噪比和检测分辨率均较低的问题,提出了频域稀疏盲解卷积法。在缺少参考信号的情况下解耦粗大晶粒带来的结构噪声,利用稀疏约束建立目标函数并通过内点法优化求解,将直通波和缺陷上、下端点衍射波信号从混叠信号中分离出来,提升检测分辨率,实现了奥氏体不锈钢近表面小缺陷的 TOFD 定量检测。

参考文献:

[1] 王长建,杜南胜,汪文锋. 加氢装置 TP321 不锈钢管道焊缝裂纹产生原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2015,51(6):445-448.

[2] 严宇, 张晓峰, 杨会敏, 等. 核电主管道奥氏体不锈钢焊缝的相控阵超声检测[J]. 无损检测, 2018, 40(2): 24-28.

[3] NATH S K, BALASUBRAMANIAM K, KRISHNAMURTHY C V, et al. Reliability assessment of manual ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) inspection for complex geometry components[J]. NDT & E International, 2010, 43: 152-162.

[4] 陈振华, 张翀, 李新蕾, 等. 超声 TOFD 二次波检测技术在奥氏体不锈钢焊缝无损检测中的应用[J]. 无损检测, 2016, 38(6): 1-5, 32.

[5] 黄焕东, 胡利晨, 胡炜炜, 等. 奥氏体不锈钢焊缝超声衍射时差法检测的有限元仿真及应用[J]. 无损检测, 2020, 42(7): 5-9.

[6] 张树潇, 谢雪, 刘丽丽, 等. 基于频谱分析原理减小 TOFD 检测近表面盲区的方法[J]. 无损探伤, 2013, 37(6): 20-21, 26.

[7] JIN S J, SUN X, LUO Z B, et al. Quantitative detection of shallow subsurface cracks in pipeline with time-of-flight diffraction technique [J]. NDT & E International, 2021, 118: 102397.

[8] 陈振华, 张翀, 卢超, 等. 奥氏体不锈钢焊缝超声 TOFD 检测中声波传播特性分析及其应用[J]. 焊接学报, 2016, 37(8): 91-95, 133.

[9] 黎文超, 陈振华, 卢超. 基于深度重采样叠加的不锈钢焊缝 TOFD 检测信号降噪技术[J]. 无损检测, 2021, 43(6): 41-44.

[10] LALITHAKUMARI S, PANDIAN R. Preprocessing of ultrasonic signals austenitic stainless steel weld at high temperature[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 21: 430-433.

[11] HONARVAR F, SHEIKHZADEH H, MOLES M, et al. Improving the time-resolution and signal-to-noise ratio of ultrasonic NDE signals[J]. Ultrasonics, 2004, 41(9): 755-763.

[12] SHAKIBI B, HONARVAR F, MOLES M D C, et al. Resolution enhancement of ultrasonic defect signals for crack sizing[J]. NDT & E International, 2012, 52: 37-50.

[13] LI X A, LI X B, LIANG W, et al. Regularized minimum entropy deconvolution for ultrasonic [J]. NDT & E International, 2012, 47: 80-87.

[14] LU J, DEMIRLI R, SANIIE J. Ultrasonic reflectivity function estimation using Cepstrum Sparse Deconvolution [C]//2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Tours, France: IEEE, 2016: 1-4.

[15] SUN X, LIN L, JIN S J. Improving time resolution of ultrasonic signals with frequency-domain sparse blind deconvolution (FSBD) method [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2022, 41(2): 1-11.

[16] SUN X, LIN L, MA Z Y, et al. Enhancement of time resolution in ultrasonic time-of-flight diffraction technique with frequency-domain sparsity-decomposability inversion (FSDSI) method[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68(10): 3204-3215.

[17] 胡先龙, 季昌国, 刘建屏. 衍射时差法 (TOFD) 超声波检测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[18] LU Z K, YANG C, QIN D H, et al. Estimating the parameters of ultrasonic echo signal in the Gabor transform domain and its resolution analysis [J]. Signal Processing, 2016, 120: 607-619.

[19] MALLAT S G, ZHANG Z F. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.

[20] ADAM D, MICHAILOVICH O. Blind deconvolution of ultrasound sequences using nonparametric local polynomial estimates of the pulse [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2002, 49(2): 118-131.

[21] 孙旭. 基于频域稀疏反演的超声 TOFD 检测盲区抑制与缺陷定量[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.

[22] SOUSSEN C, IDIER J, CARCREFF E, et al. Ultrasonic nondestructive testing based on sparse deconvolution [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2012, 353: 012018.



(上接第 69 页)

在不更换探头的情况下, 实现双晶线阵和单晶面阵的切换、纵波探头和横波探头的切换、不同聚焦深度的切换, 完成整个厚壁焊缝全壁厚范围内的探测和定量工作。

参考文献:

[1] 乔建生, 尹世忠, 杨文. 反应堆压力容器材料辐照脆化

预测模型研究[J]. 核科学与工程, 2012, 32(2): 143-149.

[2] 汤建帮, 余哲, 王韦强, 等. 核电厂 CRDM 耐压壳焊缝超声检验工艺设计[J]. 核动力工程, 2022, 43(2): 254-258.