

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108537

自适应解卷积方法抑制管道 TOFD 周向扫查盲区*

金士杰, 张 波, 王志诚, 孙 旭, 林 莉
(大连理工大学无损检测研究所 大连 116085)

摘 要:利用超声衍射时差法(TOFD)沿管道外表面实施周向扫查时,受管道曲率和直达纵波脉冲宽度共同影响,在近表面区域形成分层盲区。本文采用自适应解卷积方法,选取与混叠信号主频接近的子带直达纵波信号作为参考信号,进行解卷积与自回归谱外推处理,拓宽有效频带范围,实现时域信号脉冲压缩,并结合周向扫查图像中端点衍射波确定缺陷深度。实验结果表明,对于外壁半径 100.0 mm、壁厚 30.0 mm,以及外壁半径 148.0 mm、壁厚 27.0 mm 的碳钢管道,在中心频率 5 MHz、探头中心距 87 mm 的检测条件下,自适应解卷积方法能够将管道近表面分层盲区范围减少约 60%,且到直达纵波声线距离不小于 4.0 mm 缺陷的深度定量误差不超过 10.6%。同常规频谱分析方法和自回归谱外推方法相比,自适应解卷积方法具有更优的盲区抑制效果,且能够准确定量前者难以检测的缺陷,测量误差不超过 5.8%。

关键词:超声衍射时差法;管道;周向扫查;盲区;自适应解卷积

中图分类号: TH142 TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Reducing dead zone for TOFD circumferential scan of pipeline by the adaptive deconvolution method

Jin Shijie, Zhang Bo, Wang Zhicheng, Sun Xu, Lin Li

(NDT & E Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

Abstract: When the circumferential scan is performed along the outer surface of pipeline by the ultrasonic time-of-flight diffraction (TOFD) technique, the layered dead zone is generated in the near-surface area due to the influence of the pipe curvature and the pulse width of direct longitudinal wave (DLW). In this article, the adaptive deconvolution method is applied to perform deconvolution and autoregressive spectrum extrapolation by selecting the sub-band DLW, whose main frequency is close to that of the overlapped signals, as the reference signal, realizing the extension of effective frequency band and the pulse compression of time-domain signal. Meanwhile, the defect depths are determined according to the tip-diffracted waves in circumferential scan images. Experimental results show that the range of layered dead zone is reduced by about 60% under the condition of 5 MHz central frequency and 87 mm probe center separation (PCS) for the carbon steel pipelines with 100.0 mm outer wall radius and 30.0 mm wall thickness, and with 148.0 mm outer wall radius and 27.0 mm wall thickness by the adaptive deconvolution method. When the distances from defect tips to the ray path of DLW are no less than 4.0 mm, the measurement error of the depths for the defect is within 10.6%. Compared with the conventional spectrum analysis method and the autoregressive spectrum extrapolation method, the adaptive deconvolution method has better performance in reducing dead zone and can accurately quantify the defects being difficult to detect with measurement error within 5.8%.

Keywords: time-of-flight diffraction; pipeline; circumferential scan; dead zone; adaptive deconvolution method

0 引 言

超声衍射时差法(time-of-flight diffraction, TOFD)是

基于缺陷端点衍射波声时差实施定位和定量检测,在工业压力容器与钢制焊接接头无损检测中应用广泛^[1-5]。在对平板工件实施 TOFD 检测时,通常以直通波为参考计算缺陷端点深度^[6-7]。考虑到直通波脉冲具有一定时

间跨度,则靠近表面的端点衍射波易与直通波信号发生混叠,形成检测盲区^[8-9]。信号后处理方法可有效抑制盲区,主要包括频谱分析^[10]、经验模态分解^[11]、小波变换^[12-13]以及自回归谱外推方法^[14]等。这些方法直接对混叠信号进行分析解耦,在提升 TOFD 检测纵向分辨力方面有较好效果。

上述研究主要集中于平板结构盲区抑制。当沿管道结构外表面实施 TOFD 周向扫查时,沿两探头连线方向传播的超声波最先到达接收探头,称为直达纵波^[15-16]。由于管道外表面存在曲率,与直达纵波不重合,则直达纵波传播路径上下均为待检测区域。进一步根据 TOFD 盲区形成机制可知,管道近表面区域形成分层盲区^[17]。结合模式转换波可将管道下层盲区范围减少 50% 以上,且裂纹长度和角度定量误差分别不超过 0.27 mm 和 1.57°^[16]。在此基础上,Jin 等^[17]利用频谱分析方法,根据扫查图像中的衍射波特征确定端点与直达纵波的相对位置关系,同时抑制上下分层盲区。对于端点距离直达纵波声线 6 mm 的缺陷,深度测量误差不超过 0.52 mm。需要指出的是,频谱分析方法直接利用原始频谱进行缺陷信息提取,在一定程度上实现了管道近表面盲区抑制。在此基础上,可结合解卷积方法直接分离混叠信号,进一步改善 TOFD 盲区抑制效果。

本文将自回归谱外推方法与小波变换相结合,采用自适应解卷积方法提高管道 TOFD 周向扫查时的检测信号纵向分辨力,并结合扫查图像确定缺陷深度,实现管道分层盲区抑制。随后,对管道中不同深度表面开口槽实施检测,给出对应的周向扫查图像、后处理信号及缺陷深度定量结果。最后,实验对比了频谱分析方法、自回归谱外推方法与自适应解卷积方法的盲区抑制效果与定量检测结果。

1 原 理

1.1 管道 TOFD 检测

如图 1 所示,在沿管道外表面实施 TOFD 周向扫查时,沿发射与接收探头连线方向传播的声波称为直达纵波,其传播声程最短,声时最小。因此,直达纵波脉冲宽度同时对上下两侧缺陷的检出和定量产生影响,与平板结构盲区相比,形成了特殊的分层盲区^[16]。

定义 TOFD 探头位于管道外表面任意位置,直达纵波以上及以下盲区分别为区域 1 与区域 2,其中区域 1 的垂直深度 d_1 与管道半径 R 和探头中心距 (probe center separation, PCS) 有关

$$d_1 = R - (R^2 - S^2)^{1/2} \quad (1)$$

式中: S 为 PCS 的 1/2。

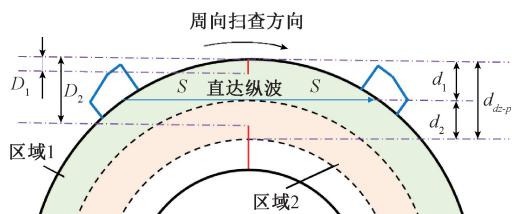


图 1 管道 TOFD 周向扫查模型及近表面盲区

Fig. 1 TOFD circumferential scan model and dead zone for pipeline

区域 2 盲区范围与平板结构盲区范围类似,其理论深度 d_2 由式(2)可得:

$$d_2 = \left[c_l^2 \left(\frac{t_p}{2} \right)^2 + S c_l t_p \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: c_l 为材料纵波声速, t_p 为直达纵波脉冲宽度。

因此,在对管道结构进行 TOFD 周向扫查时,近表面分层盲区深度 d_{dp} 可由式(3)给出:

$$d_{dp} = d_1 + d_2 = R - (R^2 - S^2)^{1/2} + [c_l^2 (t_p/2)^2 + S c_l t_p]^{1/2} \quad (3)$$

显然,近表面盲区范围受管道曲率影响较大,有必要进行分层抑制。同时,由于区域 1 与区域 2 内端点衍射波传播声时均大于直达纵波,检测时难以从 A 扫描信号及对应频谱中区分不同盲区内缺陷,但可以结合周向扫查图像中端点衍射波特征进行定位检测^[17]。

1.2 自适应解卷积方法

TOFD 检测中,近表面缺陷端点衍射波与直达纵波混叠导致声时差读取困难。解卷积方法通过选择合适的参考信号,以提高扫查图像纵向分辨力,并分离混叠信号。因此,本文引入自适应解卷积方法,通过选取与混叠信号主频接近的子带直达纵波信号进行解卷积运算,以抑制管道分层盲区。

自适应是指解卷积处理过程与接收信号特征直接相关,而非采用固定参考信号实施处理。首先,对未发生混叠的直达纵波信号进行连续小波变换,通过控制尺度因子 a ($a > 0$) 与位移因子 τ ,将待测信号 $y(t)$ 分解为不同尺度下的子带信号,即:

$$WT(a, \tau) = \langle y(t), \psi_{a, \tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt \quad (4)$$

式中: $\psi(t)$ 为母小波。

考虑到 TOFD 检测过程中,沿不同路径传播信号的频率成分存在差异,则反卷积运算中的参考信号有必要结合小波变换结果获取。此时,参考发生混叠的信号频谱主频,从小波变换后的直达纵波子带信号中选择频率成分最接近的信号作为参考信号。随后,结合式(5)进行维纳滤波解卷积运算。

$$Y(\omega) = \frac{X(\omega)H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + Q^2} \quad (5)$$

式中: $Y(\omega)$ 、 $X(\omega)$ 与 $H(\omega)$ 分别为检测信号 $y(t)$ 、缺陷响应信号 $x(t)$ 与参考信号 $h(t)$ 的频谱, $H^*(\omega)$ 是 $H(\omega)$ 的共轭复数, Q^2 通常被称为噪声减敏因子, 一般选取为 $0.01 |H(\omega)|_{\max}^{2[18-19]}$ 。

考虑到 TOFD 检测信号是带限的, 可利用自回归谱外推方法拓展有效频带的宽度, 进一步提高检测信号纵向分辨率^[14]。选取自回归阶数 p 与有效频带范围 $[i_L, i_H]$ 建立自回归模型, 再利用式(6)与(7)分别进行前向与后向预测。

$$\tilde{Y}_i(\omega) = - \sum_{k=1}^p a_k Y_{i-k}(\omega), \quad i > i_H \quad (6)$$

$$\tilde{Y}_i(\omega) = - \sum_{k=1}^p b_k Y_{i+k}(\omega), \quad i < i_L \quad (7)$$

式中: $\tilde{Y}_i(\omega)$ 为外推频带, a_k 是自回归系数, b_k 是 a_k 的共轭复数。

最后, 采用逆傅里叶变换得到压缩后的时域脉冲信号, 读取直达纵波与端点衍射波声时差 Δt , 并代入式(8)计算可得端点到直达纵波声线距离 d_{l-f} :

$$d_{l-f} = \sqrt{(S + c_l \Delta t / 2)^2 - S^2} \quad (8)$$

在此基础上, 对分层盲区内缺陷进行深度定量。如图1所示, 由于区域1深度为 d_1 , 则位于该区域内缺陷的端点深度 D_1 为:

$$D_1 = d_1 - d_{l-f} = R - \sqrt{R^2 - S^2} - \sqrt{(S + c_l \Delta t / 2)^2 - S^2} \quad (9)$$

区域2内缺陷端点深度 D_2 为:

$$D_2 = d_1 + d_{l-f} = R - \sqrt{R^2 - S^2} + \sqrt{(S + c_l \Delta t / 2)^2 - S^2} \quad (10)$$

2 实验检测

如图2所示, 实验检测对象为两段碳钢管道, 分别命名为管道1和管道2, 并加工不同深度的表面开口槽和底面开口槽。管道1外壁半径100.0 mm, 壁厚 h 为30.0 mm, 纵波声速为5890 m/s。共加工6个缺陷, 其中缺陷1~3是上表面开口槽, 其端点深度 D_1 分别为4.0、5.0与6.0 mm; 缺陷4~6是下表面开口槽, 其端点深度 D_2 分别为16.0、15.0与14.0 mm。管道2外壁半径148.0 mm, 壁厚 h 为27.0 mm, 加工的缺陷7为端点深度 $D_1 = 2.0$ mm的上表面开口槽, 缺陷8为端点深度 $D_2 = 10.0$ mm的下表面开口槽。管道壁厚 h , 端点深度 D_1 和 D_2 均已在图2中标示。检测采用中心频率5 MHz, 楔块角度60°, PCS为87 mm的TOFD探头, 沿管道外壁进行周向扫查和信号采集。在此检测条件下, 管道1直达纵波到管道表面的

垂直深度, 即 d_1 为10.0 mm。计算可得区域1盲区范围为10.0 mm、区域2盲区范围为10.2 mm, 则总的盲区范围达到20.2 mm。管道2的 d_1 为6.5 mm, 则区域1盲区范围6.5 mm、区域2盲区范围10.2 mm, 总盲区范围达到16.7 mm。图3给出各缺陷的周向扫查图像, 图4给出对应衍射波弧顶处的混叠信号。

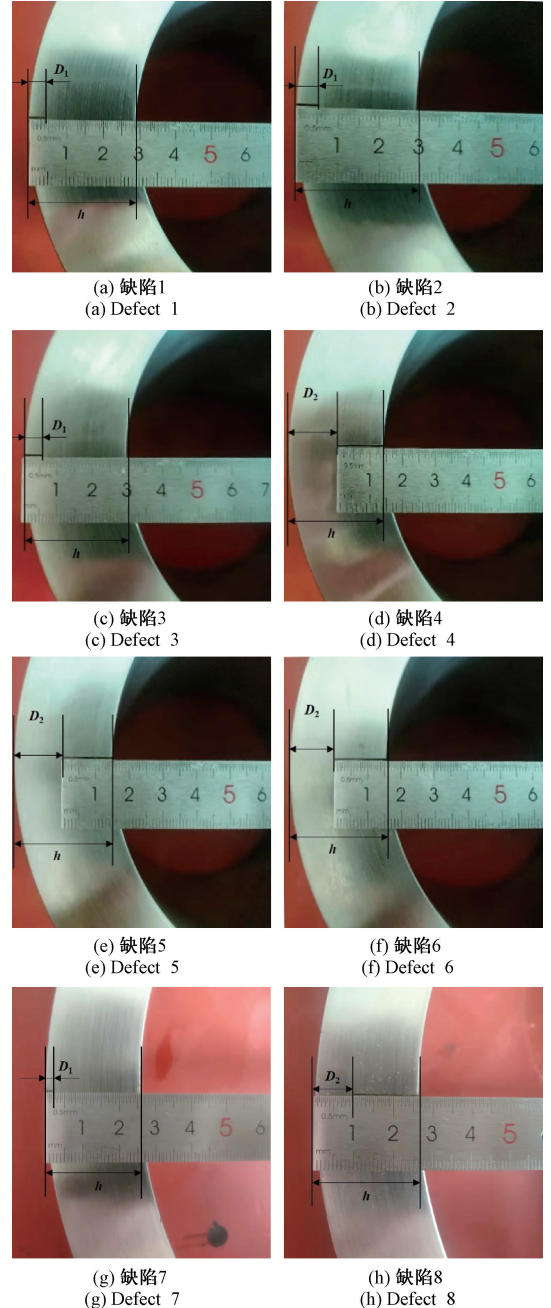


图2 加工不同深度缺陷的碳钢管道试块

Fig. 2 Carbon steel pipelines with artificial defects having different depths

显然, 图3和4中的端点衍射波与直达纵波混叠, 表明缺陷端点均位于常规TOFD检测盲区以内。对比图3

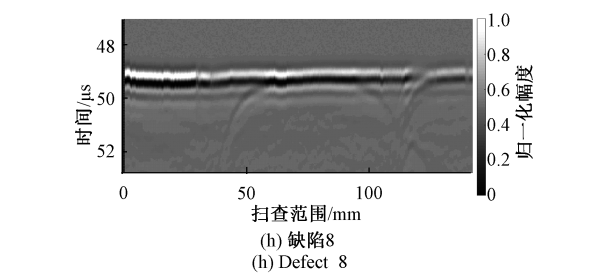
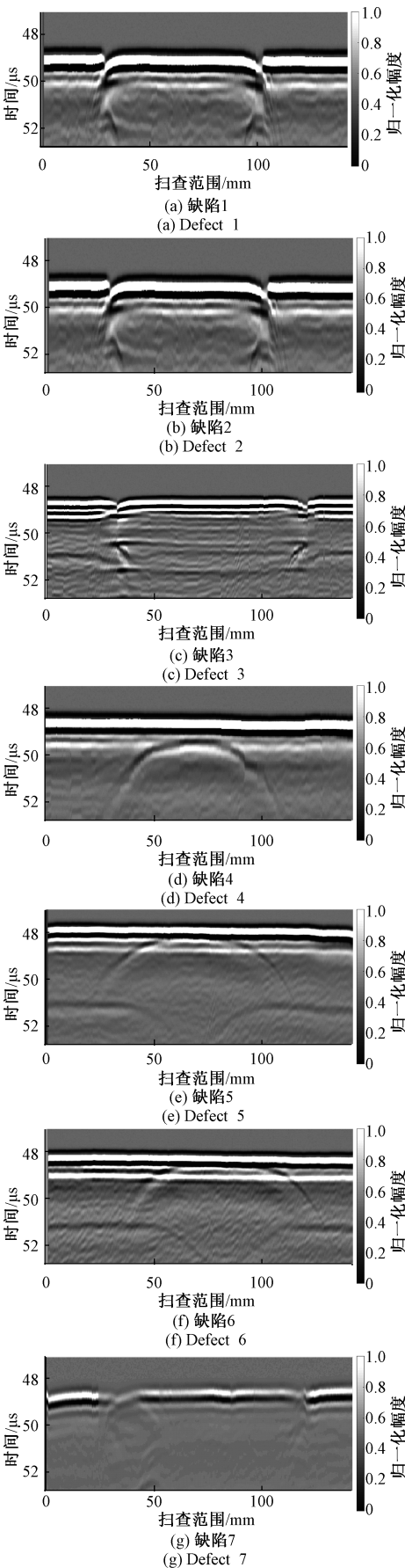


图 3 管道内不同深度缺陷的 TOFD 检测周向扫查图像
Fig. 3 TOFD circumferential scan images for the artificial defects with different depths in pipelines

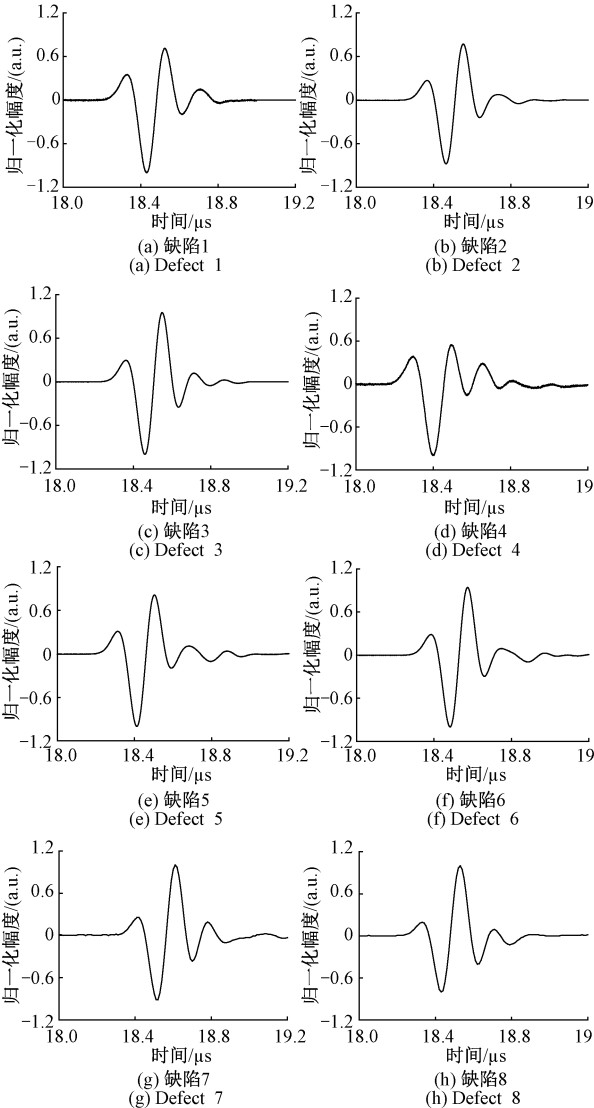


图 4 管道内不同深度缺陷的 TOFD 检测时域信号
Fig. 4 Time-domain signals of TOFD inspection for the artificial defects with different depths in pipelines

所示的周向扫查图像,缺陷1~3与缺陷7的衍射波绝大部分都与直达纵波混叠,仅在混叠信号上存在两处间断;缺陷4~6与缺陷8的衍射波的形状则为抛物线。因此,可根据衍射波特征差异确定缺陷端点深度与直达纵波深度的相对位置关系^[17],即可判断缺陷1~3与缺陷7的端点位于图1所示的区域1内,而缺陷4~6与缺陷8的端点位于区域2内。

随后,对图4所示的混叠信号实施解卷积处理。以缺陷1为例,图5(a)给出了原始时域信号的对应该频谱,其主频为4.8 MHz。对无衍射波干扰部分的直达纵波进行小波变换,并选择主频最接近的子带信号作为参考信号,其频谱与时域信号分别如图5(b)和(c)所示。在此基础上,实施解卷积和自回归谱外推处理,以解耦直达纵波和端点衍射波。

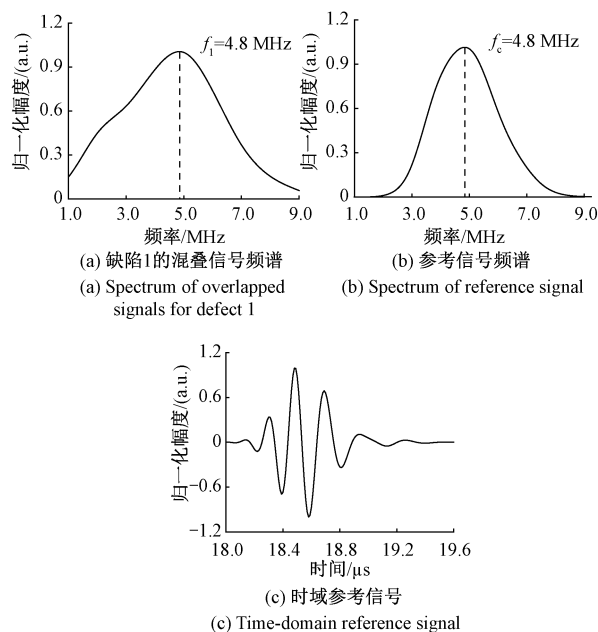


图5 缺陷1的混叠信号频谱及参考信号频谱与时域信号

Fig. 5 Spectrum of overlapped signals for defect 1, spectrum of reference signal, and time-domain reference signal

图6给出了各缺陷的自回归谱外推结果,图7为逆傅里叶变换后的对应时域信号。读取分离后的直达纵波与衍射波声时差,结合式(8)~(10)计算可得不同缺陷深度。图8给出8个缺陷的深度定量误差,显然均不超过10.6%。同时,与原始盲区范围相比,利用自适应解卷积方法能够实现到直达纵波声线距离不小于4 mm缺陷的定量检测。因此,对于两根管道,TOFD周向扫查分层盲区均减小了约60%。

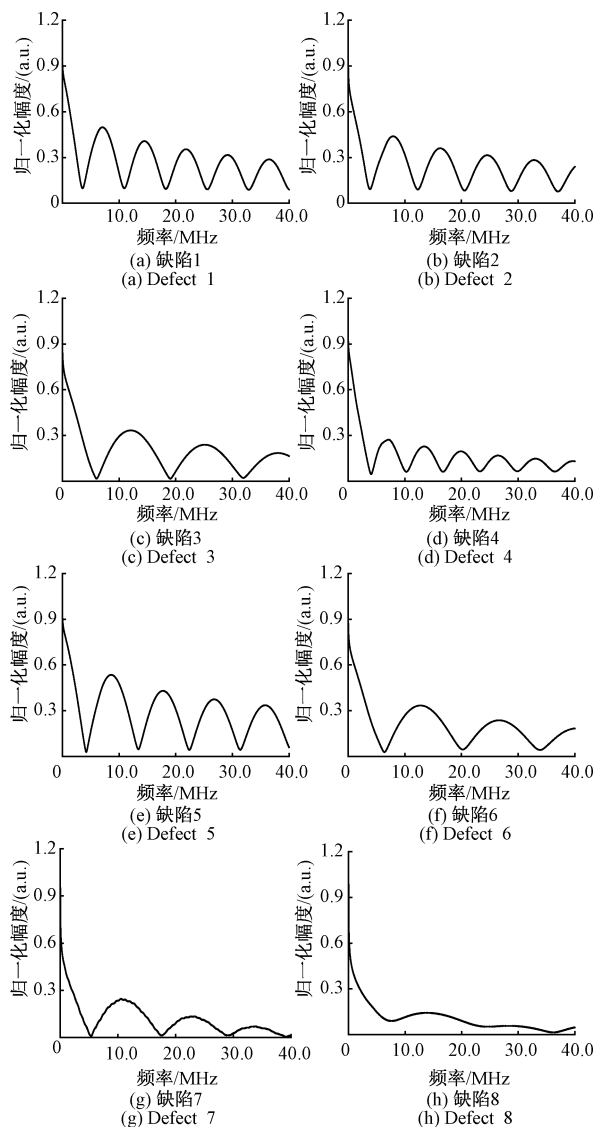


图6 管道内不同深度缺陷外推后频谱

Fig. 6 Frequency spectrums after extrapolation for the artificial defects with different depths in pipelines

3 讨论

本文采用的自适应解卷积方法是在频谱分析基础上,结合小波变换提取子带直达纵波信号并实施解卷积处理,最后利用自回归谱外推方法拓展频带宽度,压缩时域信号脉冲宽度,从而抑制管道 TOFD 周向扫查分层盲区。与常规频谱分析方法和自回归谱外推方法相比,其更有利于抑制干扰频率成分,获取窄脉冲信号特征。

频谱分析方法是利用直达纵波和缺陷端点衍射波的干涉效应,基于傅里叶变换获取频域信息特征,从而实现缺陷深度定量^[10]。在对混叠信号频谱与直达纵波频谱

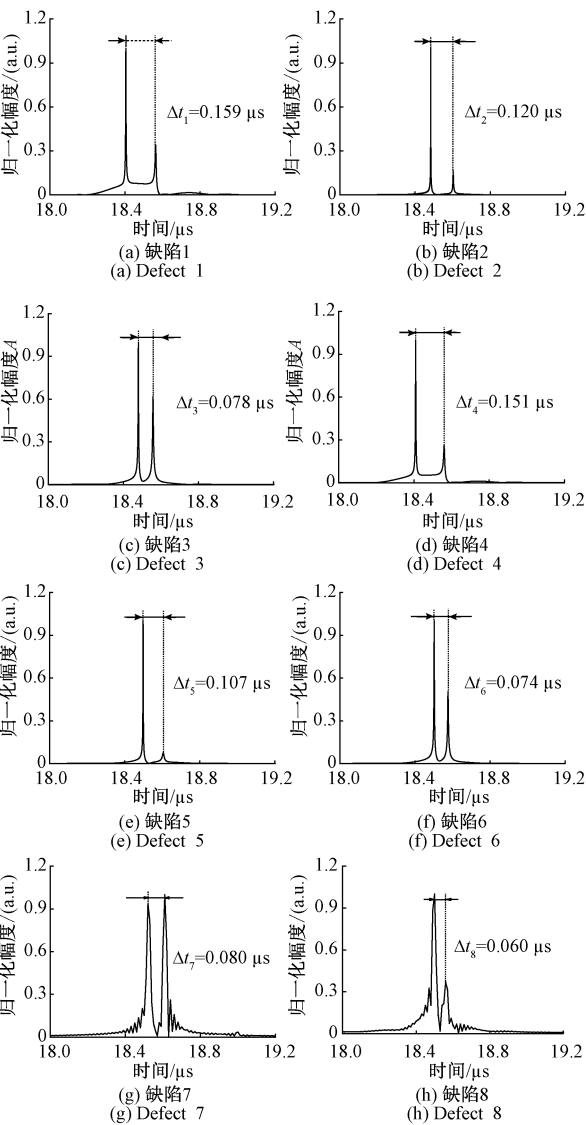


图7 不同深度缺陷 TOFD 检测自适应解卷积处理信号
Fig. 7 Adaptive deconvolution signals of TOFD inspection for the artificial defects with different depths

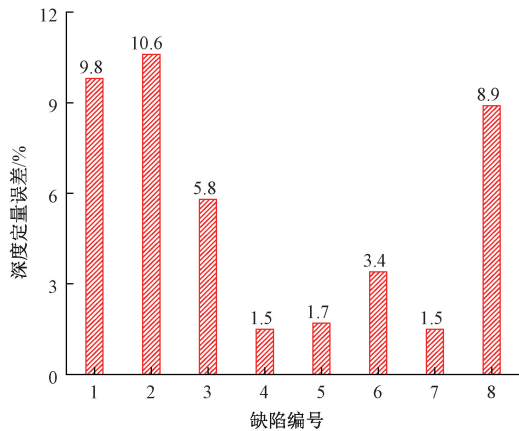


图8 管道内不同深度缺陷的定量误差
Fig. 8 Measurement errors of the artificial defects with different depths in pipelines

进行归一化处理, 频谱极值间隔与混叠信号之间的声程差有关, 则缺陷端点到直达纵波声线的垂直距离 d_{l-f} 可由式 (11) 给出^[20]:

$$d_{l-f} = \sqrt{(S + c_l / (2\Delta f))^2 - S^2} \quad (11)$$

式中: Δf 为归一化频谱中相邻极大值或相邻极小值之间的频率间隔。

在此基础上, 可结合式 (9) 与 (10) 计算得到管道中直达纵波上方和下方缺陷的埋深。以第 2 节中管道 1 的实验信号为例, 图 9 给出了不同深度开口槽的 TOFD 检测信号归一化频谱。显然, 只有在 d_{l-f} 较大的缺陷 1 (深度 4.0 mm) 和缺陷 4 (深度 16.0 mm) 的频谱中, 能够分辨出不同极值, 其对应计算深度分别为 3.81 和 16.52 mm。对于其它 d_{l-f} 较小的缺陷, 信号混叠较严重, 难以利用有效频带范围内的频谱计算缺陷埋深。因此, 频谱分析方法仅能抑制约 40% 的分层盲区。

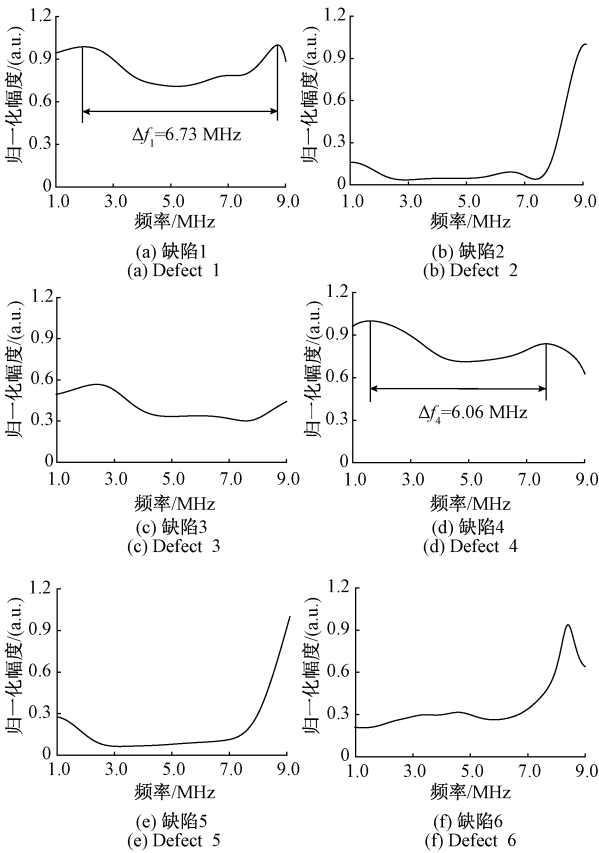


图9 管道内不同深度缺陷的归一化幅度谱
Fig. 9 Normalized amplitude spectrums for the artificial defects with different depths in pipelines

当仅采用自回归谱外推方法^[21]时, 图 10 给出了处理后的时域信号。结果显示, 缺陷 1 至缺陷 6 的外推端点衍射波均明显与直达纵波分离, 可以直观读取混叠信号声时差。然而, 当 d_{l-f} 不小于 5 mm 时, 计算得到的缺

陷深度定量误差不超过 11.8%。 d_{I-f} 进一步减小时,缺陷 3(深度 6.0 mm)和缺陷 6(深度 14.0 mm)的深度定量误差分别达到 1.48 mm 和 1.20 mm,相对误差分别为 24.7%和 8.6%。因此,在测量误差允许范围内,自回归谱外推方法可将 TOFD 分层盲区从 20.2 mm 减小到 10 mm,即抑制了约 50%。

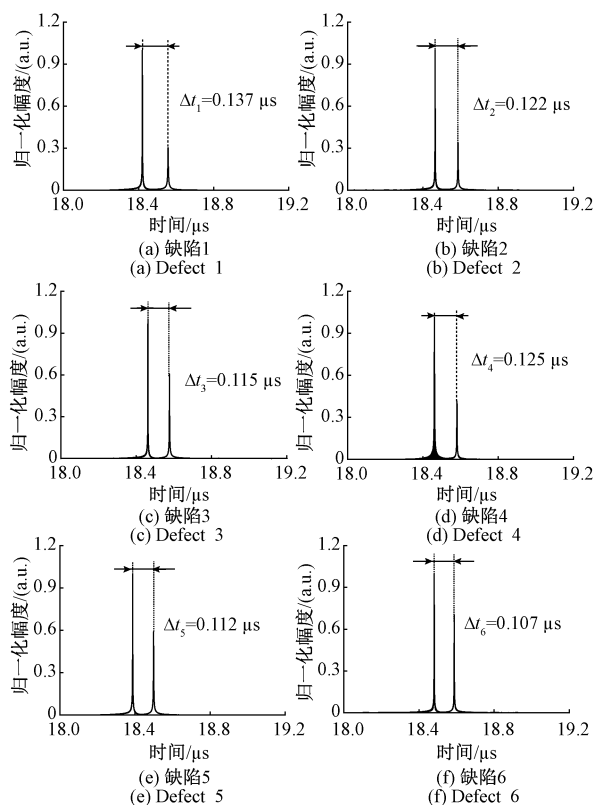


图 10 管道内不同深度缺陷的自回归谱外推处理信号

Fig. 10 Processed signals by autoregressive spectrum extrapolation for the artificial defects with different depths in pipelines

对比常规频谱分析方法、自回归谱外推方法与自适应解卷积方法可得,对于距离直达纵波距离较远的缺陷,以上 3 种方法均能检测且测量误差相近,不超过 11.8%;对于前两种方法难以检测的缺陷,自适应解卷积法也能够较为准确定量。因此,自适应解卷积方法在管道近表面分层盲区抑制,以及盲区内缺陷定量方面效果更优。

4 结 论

自适应解卷积方法将小波变换与自回归谱外推方法相结合,提取与混叠信号频率成分相近的子带直达纵波信号进行解卷积处理,并拓展有效频带,压缩各混叠信号脉冲宽度,从而提高 TOFD 检测信号纵向分辨力。在对 TOFD 检测信号进行自适应解卷积处理基础上,可结合

周向扫查图像中缺陷衍射波特征,确定其与直达纵波传播路径的位置关系,抑制管道分层盲区并实现缺陷深度定量。实验结果表明,利用自适应解卷积方法可将管道近表面盲区范围减小约 60%,盲区抑制效果优于常规频谱分析方法和自回归谱外推方法。对于 3 种方法均能检测的缺陷,测量误差均不超过 11.8%。对于频谱分析方法与自回归谱外推方法难以检测的缺陷,自适应解卷积法也能够较为准确定量,定量误差不超过 5.8%。

参考文献

- [1] MERAZI-MEKSEN T, BOUDRAA M, BOUDRAA B. Mathematical morphology for TOFD image analysis and automatic crack detection [J]. Ultrasonics, 2014, 54(6): 1642-1648.
- [2] ZHI Z, JIANG H, YANG D, et al. An end-to-end welding defect detection approach based on titanium alloy time-of-flight diffraction images[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022: 1-15.
- [3] 彭森,何连海,马志华,等. 钢结构桥梁对接焊缝缺陷的 TOFD 检测图像特征[J]. 无损检测, 2021, 43(12): 49-53.
PENG S, HE L H, MA ZH H, et al. TOFD testing image characteristics of butt weld defects in steel structure bridges[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(12): 49-53.
- [4] 王国庆,杨理践,刘斌. 基于磁记忆的油气管道应力损伤检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 271-278.
WANG G Q, YANG L J, LIU B. Study on the testing method of oil-gas pipeline stress damage based on magnetic memory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 271-278.
- [5] 刘金海,臧东,汪刚. 基于 Markov 特征的油气管道泄漏检测与定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 944-951.
LIU J H, ZANG D, WANG G. Leakage detection and location method of oil and gas pipelines based on Markov features[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 944-951.
- [6] YE H F W T, LUKOMSKI T, HAAG J, et al. An alternative ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) method[J]. NDT & E International, 2018, 100:74-83.
- [7] 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.
LI W CH, CHEN ZH H, LU CH. TOFD testing signal noise reduction technology for stainless steel welds based on depth resampling superposition [J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(6): 41-44.

- [8] SUN X, LIN L, MA ZH 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.
- [9] NATH S K. Effect of variation in signal amplitude and transit time on reliability analysis of ultrasonic time of flight diffraction characterization of vertical and inclined cracks[J]. Ultrasonics, 2014, 54(3): 938-952.
- [10] 张树潇. 厚壁压力容器 TOFD 检测参数优化与缺陷定量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- ZHANG SH X. The parameter optimization and flaw sizing of tofd testing for thick-walled pressure vessel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [11] CHEN T L, QUE P W, ZHANG Q, et al. Ultrasonic signal identification by empirical mode decomposition and Hilbert transform[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(8): 85109.
- [12] CHEN J, WU E Y, WU H T, et al. Enhancing ultrasonic time-of-flight diffraction measurement through an adaptive deconvolution method [J]. Ultrasonics, 2019, 96: 175-180.
- [13] 赵烨, 方正中, 郑鼎鼎, 等. 小波匹配追踪技术在超声 TOFD 图像处理中的应用[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2016, 36(5): 26-30.
- ZHAO Y, FANG ZH ZH, ZHENG D D, et al. Application of wavelet matching pursuit technique in ultrasonic TOFD image processing [J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2016, 36(5): 26-30.
- [14] 孙旭, 金士杰, 张东辉, 等. 基于自回归谱外推方法的 TOFD 检测盲区抑制[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 15-20.
- SUN X, JIN SH J, ZHANG D H, et al. Suppression of dead zone in TOFD with autoregressive spectral extrapolation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 15-20.
- [15] 马天天, 林莉, 张东辉, 等. 基于 TOFD 周向扫查的厚壁管道倾斜裂纹精准定量[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 23-29.
- MA T T, LIN L, ZHANG D H, et al. Accurate quantification of inclined cracks in thick-walled pipes based on TOFD circumferential scanning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 23-29.
- [16] JIN SH J, SUN X, LUO ZH B, et al. Quantitative detection of shallow subsurface cracks in pipeline with time-of-flight diffraction technique [J]. NDT & E International, 2021, 118: 102397.
- [17] JIN SH J, ZHANG B, SUN X, et al. Reduction of layered dead zone in time-of-flight diffraction (TOFD) for pipeline with spectrum analysis method [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2021, 40(2): 48.
- [18] YAMANI A, BETTAYEB M, GHOUTI L. High-order spectra-based deconvolution of ultrasonic NDT signals for defect identification [J]. Ultrasonics, 1997, 35(7): 525-531.
- [19] 郭建中, 林书玉. 超声检测中维纳逆滤波解卷积方法的改进研究[J]. 应用声学, 2005, 24(2): 97-102.
- GUO J ZH, LIN SH Y. A modified Wiener inverse filter for deconvolution in ultrasonic detection [J]. Applied Acoustics, 2005, 24(2): 97-102.
- [20] 金士杰, 张波, 孙旭, 等. 基于 TOFD 周向扫查图像特征的管道缺陷超声检测 [J/OL]. 机械工程学报, 2021, 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20211129.1430.028.html>.
- JIN SH J, ZHANG B, XUN X, et al. Ultrasonic testing of defects in pipeline based on image characteristics of TOFD circumferential scan [J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2021: 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20211129.1430.028.html>.
- [21] 张波. 管道 TOFD 近表面盲区抑制及缺陷定量检测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- ZHANG B. Reduction of near-surface dead zone and quantitative detection of defects for pipeline with TOFD [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.

作者简介



金士杰, 2008 年于北京大学获得学士学位, 2014 年于中国科学院声学研究所获得博士学位, 现为大连理工大学副教授, 主要研究方向为材料无损检测与评价。

E-mail: jinshijie@dlut.edu.cn

Jin Shijie received his B.Sc. degree from Peking University in 2008, and received his Ph.D. degree in acoustics from the Institute of Acoustics of the Chinese Academy of Sciences in 2014. He is currently an associate professor at Dalian University of Technology. His research interest is the nondestructive testing and evaluation for materials.



林莉 (通信作者), 1997 年于大连理工大学获得学士学位, 2003 年于大连理工大学获得博士学位, 现为大连理工大学教授, 主要研究方向为材料无损检测与评价。

E-mail: linli@dlut.edu.cn

Lin Li (Corresponding author) received her B.Sc. degree and Ph.D. degree both from Dalian University of Technology in 1997 and 2003, respectively. She is currently a professor at Dalian University of Technology. Her main research interests include nondestructive testing and evaluation for materials.