DOI: 10.3901/JME.2020.22.008

基于自回归谱外推的全聚焦成像分辨力提升*

林莉¹ 史思琪¹ 孙旭¹ 马志远¹ 张晓峰² 刘丽丽³ 金士杰¹

(1. 大连理工大学无损检测研究所 大连 116085;

2. 核工业工程研究设计有限公司 北京 101300;

3. 中国核工业二三建设有限公司 北京 101300)

摘要: 针对相邻缺陷全聚焦超声成像混叠问题, 结合低阶、宽有效频带自回归谱外推方法, 压缩超声波时域脉冲宽度, 实现亚波长级全聚焦(Total focusing method, TFM)成像分辨力。建立碳钢试块模型, 设置两个中心间距 1.8 mm, 直径 1.3 mm 圆孔, 选用中心频率 2.25 MHz, 32 阵元相控阵探头采集全矩阵数据。针对全矩阵数据, 选择自回归阶数为 2, 信号频谱最大幅值下降 14 dB 为有效频带, 建立自回归模型并外推有效频带外的高频与低频成分, 随后对全矩阵数据进行延迟叠加处理和 TFM 成像。仿真结果表明, 低阶、宽有效频带自回归谱外推处理方法具有较高的鲁棒性和准确性, TFM 成像后可有效分离中心间距 0.7λ (λ 为超声波长) 圆孔, 保留缺陷横向位置信息的同时, 定位误差不超过 0.73%。对碳钢试块中相同位置及尺寸的圆孔进行试验验证, 定位误差不超过 1.06%, 有效地提高 TFM 成像分辨力。

关键词: 超声检测; 全聚焦方法; 自回归谱外推; 成像分辨力

中图分类号: TG115

Resolution Enhancement of Total Focusing Imaging Combining with Autoregressive Spectral Extrapolation

LIN Li¹ SHI Siqi¹ SUN Xu¹ MA Zhiyuan¹ ZHANG Xiaofeng² LIU Lili³ JIN Shijie¹

(1. NDT & E Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116085;

2. Nuclear Industry Research and Engineering Co., Ltd., Beijing 101300;

3. China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 101300)

Abstract: The defects with close spacing are difficult to be distinguished by ultrasonic imaging with total focusing method(TFM). Autoregressive spectrum extrapolation with low-order and wide effective frequency band is introduced to compress the pulse width in time domain, achieving subwavelength resolution imaging of TFM. Two preset side-drilled holes having 1.8 mm center distance and 1.3 mm diameter in the simulated model of carbon steel are detected by array probe with 2.25 MHz center frequency and 32 elements. Focusing on full matrix capture, taking 2-order and the width of frequency window represented a 14 dB drop from the maximum amplitude of spectrum, and the autoregressive model is established to extrapolate the high-frequency and low-frequency components beyond effective frequency band. Then, the delay-and-sum algorithm is implemented on the processed full matrix capture data to obtain the TFM image. The simulated results indicated that the combination of TFM and autoregressive spectrum extrapolation with low-order and wide effective frequency band had high robustness and accuracy, so as to effectively separate adjacent defects with center distance of 0.7λ (λ is ultrasonic wavelength). The positioning error is no more than 0.73% while retaining the lateral resolution. Finally, side-drilled holes having 1.8 mm center distance are calculated with the same testing parameters in experiment, and the positioning error is no more than 1.06%, effectively improving imaging resolution of TFM.

Key words: ultrasonic detection; total focusing method; autoregressive spectrum extrapolation; imaging resolution

* 国家自然科学基金(51905079)和国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2015CB057306)资助项目。20191108 收到初稿, 20200711 收到修改稿

0 前言

超声成像分辨力是指在一定条件下区分两个相邻反射体的能力^[1]。相控阵超声检测技术通过灵活控制声束的时空特性, 声束聚焦区域可分辨相距 $2\lambda \sim 3\lambda$ (λ 为超声波长) 缺陷^[2-5]。基于全矩阵数据的全聚焦方法(Total focusing method, TFM)能够实现待检测区域逐点聚焦, 成像分辨力具有空间一致性^[5-7], 如采用 64 阵元相控阵探头实施成像, 可分辨相距约 1λ 缺陷^[8]。当缺陷间距进一步缩小时, 受超声波脉冲宽度影响, 相邻缺陷回波信号发生混叠, 成像后无法准确辨别缺陷数量和相对位置。

在提高 TFM 成像分辨力方面, 国内外学者开展了相关研究。ZHOU 等^[9]对钢中横向间隔 1.7λ 点缺陷实施 TFM 成像时, 将阵元指向性函数与延迟后的回波信号加权相乘, 改善了近场成像质量, 提高了成像分辨力。ZHANG 等^[10]对铝中相距 1λ 点缺陷进行 TFM 成像, 并利用相位相干性构建表征相位分布的相干因子, 降低重建图像中相位散乱的噪声幅值, 成像分辨力提高约 0.2λ 。对全矩阵数据中各 A 扫描信号进行脉冲压缩处理, 进而实施 TFM 成像也可提高成像分辨力。焦敬品等^[11-12]将维纳滤波和自回归谱外推方法相结合, 以试块底面回波为参考信号对全矩阵数据进行解卷积处理, 取自回归阶数 20, 频谱最大幅值下降 6 dB 对应频域窗口为有效频带, 对解卷积后的全矩阵数据进行自回归谱外推处理, TFM 成像后分离了铝中两个中心间距约 1.1λ 、直径 0.7λ 圆孔。自回归谱外推方法能够拓宽有效频带, 压缩时域脉冲宽度, 提高信号时间分辨力, 但是有效频带及自回归阶数的选择对信号处理效果存在较大影响^[13-15], 进而影响 TFM 成像分辨力。

本文将低阶、宽有效频带自回归谱外推方法与 TFM 相结合, 将 TFM 成像分辨力提升至亚波长级, 并应用于碳钢试块中相邻圆孔的分离辨识。在此基础上, 讨论了不同有效频带及自回归阶数对缺陷信号分离的影响。

1 原理

1.1 全聚焦成像

全矩阵捕捉是 TFM 成像的基础, 是指相控阵探头中每个阵元依次发射超声脉冲, 所有阵元接收并储存 A 扫描信号的过程。设相控阵探头阵元数量为 N , 则完整的全矩阵数据包括 N^2 个时域信号。

TFM 成像算法采用离线计算的方式对全矩阵数据进行分析, 在成像区域划分网格, 将每一组时域信号通过延时叠加聚焦到每个网格点以实现图像表征。TFM 成像原理如图 1 所示, 建立二维笛卡尔坐标系, X 轴为平行于试块表面的阵列方向, Z 轴垂直于试块表面并指向内部。将每个阵元简化为一个点, 用 $(x_i, 0)$ 表示阵元 i 的位置坐标。

图 1 TFM 成像原理示意图

设任意聚焦点 Q 坐标 (x_{ref}, z_{ref}) , 根据各阵元到 Q 点的声程计算延时法则, 所有经过 Q 点信号的积分响应总幅值

$$I(x_{ref}, z_{ref}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{ij}(t - t_{ij}(x_{ref}, z_{ref})) \quad (1)$$

式中, $y_{ij}(t)$ 表示阵元 $i(x_i, 0)$ 发射, 阵元 $j(x_j, 0)$ 接收的超声信号; $t_{ij}(x_{ref}, z_{ref})$ 表示超声波经过 Q 点的延迟时间

$$t_{ij}(x_{ref}, z_{ref}) = \frac{\sqrt{(x_i - x_{ref})^2 + z_{ref}^2}}{C_L} + \frac{\sqrt{(x_j - x_{ref})^2 + z_{ref}^2}}{C_L} - 2 \frac{z_{ref}}{C_L} \quad (2)$$

式中, C_L 表示试块纵波声速。

同理依次得到每个聚焦点的幅值, 即可完成被测区域 TFM 成像^[16-18]。

1.2 自回归谱外推

在超声检测过程中, 可将系统传输过程简化为缺陷响应与检测系统脉冲响应线性卷积的结果^[14], 因此, 全矩阵数据中每个 A 扫描信号可表示为

$$y_{ij}(t) = h(t) * s(t) + n(t) \quad (3)$$

式中, $h(t)$ 表示检测系统的脉冲响应; $s(t)$ 表示缺陷响应; $n(t)$ 表示噪声。

始发脉冲频带宽度有限, 导致时间分辨力降低。自回归谱外推方法通过选取有效频带和自回归阶数, 建立自回归模型, 对信号进行频谱外推处理。首先对信号 $y_{ij}(t)$ 进行傅里叶变换, 得到频谱

$$Y(\omega) = \text{FFT}(y_{ij}(t)) \quad (4)$$

式(5)、(6)分别给出了频谱的前向预测公式和后向预测公式

$$\hat{Y}_f(\omega) = -\sum_{p=1}^k a_p Y_{f-p}(\omega) \quad f > n \quad (5)$$

$$\hat{Y}_b(\omega) = -\sum_{p=1}^k a_p^* Y_{b+p}(\omega) \quad b < m \quad (6)$$

式中, $\hat{Y}_f(\omega)$ 为前向预测频带; $\hat{Y}_b(\omega)$ 为后向预测频带; k 为自回归阶数; a_p 为自回归系数; a_p^* 为 a_p 的共轭复数。

选择合适的自回归阶数和有效频带, 基于式(5)和(6)插补有效频带以外的数据。如图2所示, 将归一化频谱 $Y(\omega)$ 最大幅值下降 ε dB 时对应的频域窗口定义为有效频带, 宽度为 $[m, n]$ 。

图2 频谱最大幅值下降 ε dB 对应有有效频带

此时, 处理后总频谱为

$$\hat{Y}(\omega) = \hat{Y}_b(\omega) + Y_{[m,n]}(\omega) + \hat{Y}_f(\omega) \quad (7)$$

对 $\hat{Y}(\omega)$ 进行逆傅里叶变换即得压缩后时域信号

$$\hat{y}_{ij}(t) = \text{IFFT}(\hat{Y}(\omega)) \quad (8)$$

2 仿真模拟

采用 CIVA 数值仿真软件建立厚度 50 mm 碳钢模型(图3)。碳钢密度 7.8 g/cm^3 , 纵波声速 5900 m/s , 在 2.25 MHz 检测频率下, 波长 $\lambda \approx 2.6 \text{ mm}$ 。模型中设置 2 个直径均为 1.3 mm , 即 $\lambda/2$ 的圆孔。其中 1#圆孔中心深度 33.7 mm , 2#圆孔中心深度为 35.0 mm ; 1#与 2#圆孔中心间距 1.8 mm , 约 0.7λ 。采用中心频率 2.25 MHz , 32 阵元相控阵探头采集全矩阵数据, 探头的时域波形与频谱如图4所示, 纵坐标用归一化幅度表示。

图3 设置两个中心间距 0.7λ 圆孔的碳钢试块模型示意图(mm)

图4 探头时域波形与幅度谱

相控阵电子扫查成像结果如图5a所示, 由于 2 个圆孔相距较近, 成像结果重叠, 无法区分缺陷位置和数量。对采集的全矩阵数据进行 TFM 成像后结果如图5b所示, 成像分辨力有所提高, 可初步判断缺陷相对位置关系, 仍无法对圆孔准确定位。

图5 1#与 2#缺陷仿真成像结果

在对信号进行自回归谱外推处理的过程中,有效频带和自回归阶数的选择对处理结果精度存在显著影响。应根据待处理信号合理选择参数,以达到理想效果。目前,采用自回归谱外推与 TFM 相结合的方法提高成像分辨力时,多选用高自回归阶数,以及接收信号频谱最大幅值下降 3~10 dB 对应的有效频带^[11, 13]。借鉴相关文献研究工作^[12-13],选择 $k=20$, $\varepsilon=6$ dB, 对模型中采集的全矩阵数据实施自回归谱外推处理和 TFM 成像,结果如图 6a 所示。

图 6 采用不同 k 和 ε 进行自回归谱外推处理和 TFM 仿真成像结果

可以实现缺陷的分离,但图像中出现伪缺陷,且丢失了缺陷的横向位置信息^[11],无法正确判断缺陷数量和相对位置。

本文针对相邻缺陷 TFM 超声成像混叠问题,提出了低阶、宽有效频带自回归谱外推与 TFM 相结合的方法,以达到亚波长级 TFM 成像分辨力。选择 $k=2$, $\varepsilon=14$ dB, 对接收信号进行自回归谱外推处理,并将处理后的全矩阵数据实施 TFM 成像。成像结果如图 6b 所示,正确分离了两个中心间距 0.7λ 圆孔,并保留了缺陷横向位置信息。经测量,圆孔上端深度分别为 33.12 mm 和 34.61 mm,深度定位误差最大不超过 0.21 mm,相对误差不超过 0.73%。

分析上述结果产生原因。首先,研究相邻缺陷分辨力提升问题时,脉冲混叠个数较少,较低的自回归阶数即可得到较好的缺陷分离效果^[13],而高自回归阶数会造成过拟合现象^[19],出现虚假信号峰。其次,选择较窄的有效频带会损失更多的原频谱特征,处理后的信号将产生畸变,峰值位置发生偏移,最终导致成像后无法对缺陷进行准确定位,甚至出现伪缺陷信息。

考虑到脉冲混叠个数为 2, 对接收信号进行处理后应分离出两个峰值。图 7 为采用两组参数对不同阵元组合 $i-j$ 接收信号实施自回归谱外推处理结果。可以看到,选择参数 $k=2$, $\varepsilon=14$ dB 进行处理时均可分离出 2 个脉冲峰,鲁棒性较高。与之相比,选择参数 $k=20$, $\varepsilon=6$ dB 对信号进行自回归谱外推处理后分离效果不一,分离的脉冲峰个数不同,鲁棒性较低导致 TFM 成像后产生伪缺陷,难以对缺陷准确定位。

图 7 选择不同 k 和 ε 对不同阵元组合 $i-j$ 的接收信号实施自回归谱外推处理结果

进一步地,以图 7a 信号为例,计算不同发射-接收信号两峰值时间与理论时间,并对比计算误差。结果表明,外推处理带来的误差存在差异,绝对误差不超过 $0.1\ \mu\text{s}$,相对误差不超过 0.84% ,表明该参数下缺陷分离效果得到提升,且准确性较高。

3 试验验证

试验采用 MultiX++检测设备、计算机和相控阵超声探头组成的超声检测系统(图 8a)。检测参数均与仿真时一致,将相控阵线阵探头置于缺陷正上方采集全矩阵数据。被检试块为碳钢,尺寸为 $300\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 25\ \text{mm}$,如图 8b 所示,加工两个中心深度分别为 $33.7\ \text{mm}$ 与 $35.0\ \text{mm}$,直径 $1.3\ \text{mm}$ 圆孔,中心间距约 $1.8\ \text{mm}$ 。

(a) 超声检测系统

(b) 加工试块

图 8 超声检测系统及试块

对采集的全矩阵数据进行 TFM 成像,结果如图 9a 所示,两缺陷成像结果重叠,无法区分缺陷位置和数量。选择参数 $k=2$, $\varepsilon=14\ \text{dB}$,对全矩阵数据进行自回归谱外推处理,并将处理后的全矩阵数据实施延时叠加和 TFM 成像。成像结果如图 9b 所示,实现了两个中心间距 0.7λ 圆孔的分离,保留了缺陷横向位置信息。圆孔上端深度分别为 $32.73\ \text{mm}$ 和 $34.30\ \text{mm}$,深度定位误差最大不超过 $0.35\ \text{mm}$,相对误差不超过 1.06% 。仿真与试验结果的一致性表明低阶、宽有效频带自回归谱外推方法结合 TFM 成像可有效提高成像分辨力。

水平位置/mm

(a) TFM 成像

(b) 低阶、宽有效频带自回归谱外推处理后 TFM 成像

图 9 1#与 2#缺陷试验结果

4 结论

(1) 低阶、宽有效频带自回归谱外推方法能够扩宽信号频带,压缩时域脉冲宽度,将 TFM 超声成像分辨力提升至亚波长级。

(2) 有效频带及自回归阶数的选择对 TFM 成像结果有较大影响。对于信噪比较高、峰值较少的信号应尽量选择低阶模型。同时,有效频带应尽量保留原频谱特征,以保证 TFM 延时叠加的准确性。

(3) 仿真及试验结果表明,结合低阶、宽有效频带自回归谱外推与 TFM 可分离中心间距 0.7λ 相邻缺陷,在保留缺陷横向位置信息的同时,缺陷深度定位误差低于 $0.35\ \text{mm}$ 。

参考文献

- [1] 晏荣明,周光平,万高峰,等. 提高超声无损检测分辨力的方法[J]. 无损检测, 1997, 19(4): 91-94.
YAN Rongming, ZHOU Guangping, WAN Gaofeng, et al. Improvement of ultrasonic testing resolution[J]. Nondestructive Testing, 1997, 19(4): 91-94.
- [2] SAFARI A, ZHANG J, VELICHKO A, et al. Assessment methodology for defect characterisation using ultrasonic arrays[J]. NDT & E International, 2018, 94: 126-136.

- [3] 林莉, 杨平华, 张东辉, 等. 厚壁铸造奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术概述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 12-20.
LIN Li, YANG Pinghua, ZHANG Donghui, et al. Review of phased array ultrasonic testing for thick wall cast austenitic stainless steel pipeline welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 12-20.
- [4] 杨平华, 林莉, 刘春伟, 等. 相控阵超声检测横向分辨力实验测试及分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1384-1389.
YANG Pinghua, LIN Li, LIU Chunwei, et al. Experimental measurement and analysis of the lateral resolution of phased array ultrasonic detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6): 1384-1389.
- [5] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review[J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525-541.
- [6] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701-711.
- [7] 杨贵德, 方俊钊, 詹红庆, 等. 基于相控阵全矩阵采集的全聚焦技术应用研究[J]. 无损探伤, 2016, 40(2): 26-27.
YANG Guide, FANG Junchai, ZHAN Hongqing, et al. Application of full focus technology based on phased array full matrix acquisition[J]. Nondestructive Inspection, 2016, 40(2): 26-27.
- [8] 李衍. 超声相控阵全聚焦法成像检测[J]. 无损检测, 2017, 39(5): 57-64.
LI Yan. Ultrasonic phased array imaging testing by total focusing method[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(5): 57-64.
- [9] ZHOU X, PENG J P, LUO L, et al. Effects of directivity function on total focusing method imaging performance[C/CD]// Far East NDT New Technology & Application Forum 2014. June 20-23, 2014, Chengdu, China.
- [10] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic array imaging in nondestructive evaluation: Total focusing method with using circular coherence factor[C/CD]// Eighth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation. August 8-11, 2012, Chengdu, China.
- [11] 焦敬品, 马婷, 刘德宇, 等. 基于脉冲压缩技术的相邻缺陷识别方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1614-1621.
JIAO Jingpin, MA Ting, LIU Deyu, et al. Study on identification method of adjacent defects using pulse compression technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7): 1614-1621.
- [12] JIAO J, MA T, HOU S, et al. A pulse compression technique for improving the temporal resolution of ultrasonic testing[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2018, 46(3): 1238-1249.
- [13] 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.
- [14] 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 Jianzhong, LIN Shuyu. A modified wiener inverse filter for deconvolution in ultrasonic detection[J]. Applied Acoustics, 2005, 24(2): 97-102.
- [15] CHEN J, WU E, WU H, et al. Enhancing ultrasonic time-of-flight diffraction measurement through an adaptive deconvolution method[J]. Ultrasonics, 2019, 96: 175-180.
- [16] 胡宏伟, 杜剑, 李洋, 等. 基于稀疏矩阵的两层介质超声相控阵全聚焦成像[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 128-135.
HU Hongwei, DU Jian, LI Yang, et al. Two-layer medium ultrasonic phased array total focusing method imaging based on sparse matrix[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14): 128-135.
- [17] 周进节, 郑阳, 张宗健, 等. 缺陷散射对相控阵超声全聚焦成像的影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 454-461.
ZHOU Jinjie, ZHENG Yang, ZHANG Zongjian, et al. Research on the effect of defect scattering on phased array ultrasonic TFM imaging[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 454-461.
- [18] 周正干, 彭地, 李洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 1-7.
ZHOU Zhenggan, PENG Di, LI Yang, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its

(下转第 23 页)

- ZHENG Jianfei, HU Changhua, SI Xiaosheng, et al. Remaining useful life prognostic for the stochastic degradation device subject to imperfect maintenance[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(7): 1740-1749.
- [19] 裴洪, 胡昌华, 司小胜, 等. 不完美维护下基于剩余寿命预测信息的设备维护决策模型[J]. 自动化学报, 2018, 44(4): 719-729.
- PEI Hong, HU Changhua, SI Xiaosheng, et al. Remaining life prediction information-based maintenance decision model for equipment under imperfect maintenance[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(4): 719-729.
- [20] WANG Zhaoqiang, HU Changhua, SI Xiaosheng, et al. Remaining useful life prediction of degrading systems subjected to imperfect maintenance: Application to draught fans[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 100: 802-813.
- [21] SI Xiaosheng, WANG Wenbin, CHEN Maoyin, et al. A degradation path-dependent approach for remaining useful life estimation with an exact and closed-form solution[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 226: 53-66.
- [22] SI Xiaosheng, WANG Wenbin, HU Changhua, et al. Remaining useful life estimation based on a nonlinear diffusion degradation process[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(1): 50-67.
- [23] LALL P, WEI J, GOEBEL K. Comparison of Kalman-filter and extended Kalman-filter for prognostics health management of electronics[C]// Thermal and Thermo mechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2012 13th IEEE Intersociety Conference, IEEE, 2012.
- [24] SAXENA A, CELAYA J, SAHA B, et al. Evaluating algorithm performance metrics tailored for prognostics [C]// Aerospace Conference, IEEE, 2009.
-
- 作者简介: 王泽洲, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为可靠性、剩余寿命预测。
E-mail: 350276267@qq.com
- 蔡忠义(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为可靠性、剩余寿命预测。
E-mail: afeuczy@163.com
-
- 作者简介: 林莉, 女, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为材料无损检测与评价。
E-mail: linli@dlut.edu.cn
- 金士杰(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为材料无损检测与评价。
E-mail: jinshijie@dlut.edu.cn

~~~~~
(上接第 13 页)

calibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 1-7.

- [19] 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 Xu, JIN Shijie, ZHANG Donghui, et al. Suppression of dead zone in TOFD with autoregressive spectral

extrapolation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 15-20.