

# 相控阵超声平面波全聚焦成像算法及其应用

骆 琦,孔 傲,胡庆荣,陈 运,林文富  
(广州多浦乐电子科技股份有限公司, 广州 510700)

**摘 要:**介绍了相控阵超声平面波全聚焦成像算法。首先描述了平面波全聚焦成像技术的数据采集方法,推导了不含楔块和含楔块情况下的声时计算公式,在此基础上阐述了平面波全聚焦成像的原理和步骤,并描述了算法在不同模式下的声时计算方法和算法有效区域的处理方法。然后通过试验展示了平面波全聚焦成像结果。接着,将平面波全聚焦成像分别和相控阵聚焦成像以及基于FMC(全矩阵捕获)的全聚焦成像检测结果进行比较,总结平面波全聚焦成像算法的优点和不足。最后结合平面波成像算法优点对平面波成像的应用进行分析。试验结果表明,PWI-TFM(平面波全聚焦)成像算法和现有成像算法相比,具有多方面的优势,是具有较高实用价值的成像算法。

**关键词:** 平面波;全聚焦成像;相控阵超声检测;无损检测  
**中图分类号:** TG115.28      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6656(2023)12-0022-05

## Phased array ultrasonic plane wave fully focused imaging algorithm and its application

LUO Qi, KONG Ao, HU Qingrong, CHEN Yun, LIN Wenfu  
(Guangzhou Doppler Electronic Technologies Co., Ltd., Guangzhou 510700, China)

**Abstract:** This paper presented an ultrasonic phased array plane wave imaging (PWI) algorithm. Firstly, the data acquisition method for plane wave imaging technology was described. The time-of-flight calculation formulas were then derived for scenarios without and with wedge blocks, followed by an explanation of the principles and steps of plane wave imaging. Additionally, the paper described the time-of-flight calculation methods for different modes of the algorithm and the handling of the algorithm's effective region. Experimental results of plane wave imaging were presented. A comparison was made between plane wave imaging and phased array imaging, as well as full matrix capture-based full focusing imaging detection results, to summarize the advantages and limitations of the plane wave imaging algorithm. Finally, the paper analyzed the application of plane wave imaging algorithm in light of its advantages. The experimental results showed that the PWI-TFM (plane wave imaging-total focusing method) imaging algorithm had multiple advantages compared to existing imaging algorithms and was a highly practical imaging algorithm.

**Key words:** plane wave; fully focused imaging; phased array ultrasonic testing; nondestructive testing

超声无损检测技术经历了常规超声检测、相控阵超声检测、全聚焦超声检测的发展过程。常规超声检测技术最早普及应用,相控阵超声检测相对于常规超声检测具有更高的精度和检测效

率,但同时也需要更高的成本和技术要求。随着相控阵超声标准的制定和推广,在某些行业中,相控阵超声检测技术逐步代替常规超声检测技术。全矩阵捕获-全聚焦(FMC-TFM)超声无损检测技术最近几年开始成熟,相对于相控阵超声检测技术,全聚焦超声检测进一步提升了成像精度。由于FMC-TFM检测数据采集时间较长,成像计算复杂度很高,其成像效率远低于常规相控阵超声成像效率,这严重制约了FMC-TFM成像技术在

**收稿日期:** 2023-07-06  
**作者简介:** 骆 琦(1987—),男,高级工程师,主要从事超声无损检测仪器设备的研发工作  
**作者简介:** 骆 琦,luoqi@cndoppler.cn

工业生产领域的推广使用。平面波全聚焦成像技术平衡了成像精度和成像效率的问题,其成像精度比相控阵超声的更高,成像效率又比 FMC-TFM 的更好,具有更好的应用前景。

平面波成像技术最早起源于医学成像领域,在 1977 年由 BRUNEEL 等<sup>[1]</sup>提出,实现了 1 000 帧/s 的超快超声成像。虽然平面波成像技术大幅提升了成像帧频,但由于成像质量较差,一直没有大规模进入临床应用。2009 年, MONTALDO 等<sup>[2]</sup>提出了平面波相干复合成像技术,该技术有效改善了超快平面波成像的质量。同年,法国 Supersonic Imagine(声科)公司的 Aixplorer 型超声成像系统推向市场,数据采集帧频达到 20 000 帧/s,从此超声影像进入了超快超声新时代。

2016 年, LE 等<sup>[3]</sup>研究了平面波全聚焦成像技术(PWI-TFM)在超声无损检测领域的实现方法,并将该技术的成像效果和 FMC-TFM 及相控阵超声的成像效果进行对比,证明了 PWI-TFM 成像技术可以通过更少的数据采集和更快的后处理算法获得更少的伪影和更高信噪比的图像。其提供的图像质量与 TFM 图像的相当,但采集的数据量更少,成像效率更高。此外,该成像技术可通过设置平面波入射角范围抑制可能影响缺陷表征的伪影。

笔者通过描述平面波全聚焦成像技术的原理和数据采集方法,推导了其声时计算公式然后进行检测试验,将其检测结果与相控阵超声及 FMC 检测结果对比,总结了其优点和不足,旨在为平面波全聚焦成像技术的推广与应用提供一些参考。

## 1 方法论述

### 1.1 数据采集

相控阵超声采用延迟法则来控制多个阵元激励声波在设定的焦点进行聚焦。假设聚焦孔径为  $N$ ,相控阵超声采用  $N$  发  $N$  收的方式采集数据, $N$  个阵元的数据采集完成后,通过延迟法则进行合成,合并成一条声束。

FMC-TFM 采用每次一个阵元发射多个阵元同时接收,依次切换发射阵元的方式采集数据。假设聚焦孔径为  $N$ ,则 FMC 全矩阵数据采集需采集第 1 阵元发射 1 到  $N$  阵元接收,第 2 阵元发射 1 到  $N$  阵元接收,⋯,第  $N$  阵元发射 1 到  $N$  阵元接收的数据。采集一帧数据共需  $N$  次发射,采集  $N \times N$  个回波的数据。

PWI-TFM 采用每次多个阵元发射多个阵元同时接收的方式采集数据,每次发射形成不同角度的平面波。假设每次采集需发射平面波角度数量为  $Q$ ,聚焦孔径为  $N$ ,则其采集一帧数据需进行  $Q$  次发射。第 1 次发射通过延迟法则控制  $N$  个阵元形成角度为  $\theta_1$  的平面波, $N$  个阵元同时接收。第 2 次发射通过延迟法则控制  $N$  个阵元形成角度为  $\theta_2$  的平面波, $N$  个阵元同时接收。依次进行,直到第  $Q$  次发射通过延迟法则控制  $N$  个阵元形成角度为  $\theta_Q$  的平面波, $N$  个阵元同时接收。共采集  $Q \times N$  个回波的数据。PWI-TFM 数据采集过程如图 1 所示。

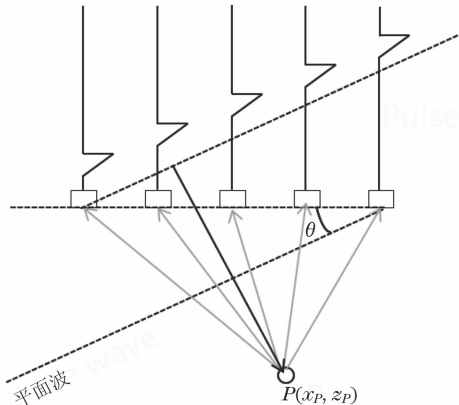


图 1 PWI-TFM 数据采集过程示意

### 1.2 声时计算

类似于 FMC-TFM, PWI-TFM 在聚焦合成计算时需要考虑声波传输所需要的声时。PWI-TFM 的声时分两个部分,即从平面波到虚拟聚焦点的声时以及从虚拟聚焦点到阵元的声时。其中从聚焦点到阵元的声时  $t_j^P$  计算方法和 FMC-TFM 中从聚焦点到阵元的声时计算方法一样,可参考 FMC-TFM 成像算法相关文献<sup>[4]</sup>,笔者重点介绍从平面波到虚拟聚焦点的声时计算方法,介绍分两种情况,即不含楔块情况和含楔块情况。

#### 1.2.1 不含楔块 PWI-TFM 的声时计算

不含楔块时,通过控制阵元的延迟法则,在工件中产生平面波,假设平面波的角度为  $\theta$ ,工件中的声速为  $c$ ,焦点的坐标为  $(x_p, z_p)$ ,无楔块平面波到焦点的声时计算示意如图 2 所示。

图 2 中,以第一个发射阵元中心所在位置  $O$  点为原点建立坐标系,从  $A$  点到  $P$  点的长度表示平面波从开始激励到传播至焦点  $P$  的声程,通过作辅助线,可以将  $AP$  长度的计算转换成  $OD$  长度加  $EP$  的长度;三角形  $OBD$ ,  $EPE$  是直角三角形。

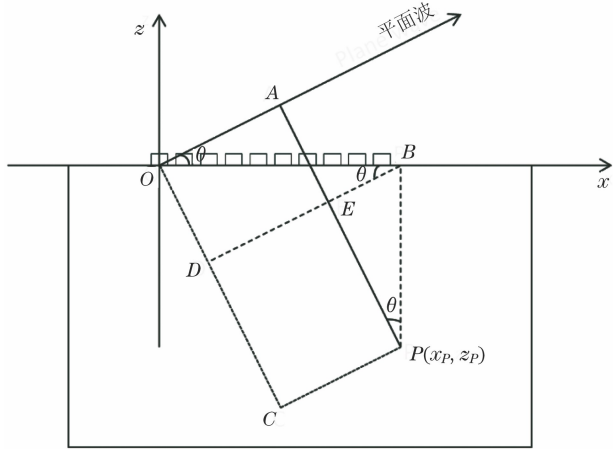


图2 无楔块平面波到焦点的声时计算示意

则直接模式下(不考虑工件底面反射)平面波到焦点  $P$  的声时计算公式为

$$\begin{aligned}
 t_q^P &= \frac{|AP|}{c} = \frac{|OD| + |EP|}{c} \\
 &= \frac{x_P \times \sin\theta + z_P \times \cos\theta}{c}
 \end{aligned} \tag{1}$$

1.2.2 含楔块的 PWI-TFM 的声时计算

含楔块时,通过控制阵元的延迟法则,在楔块中产生角度为  $\alpha$  的平面波,平面波进入工件时发生折射,改变平面波的传播角度。假设入射到工件中平面波的角度为  $\theta$ ,楔块中的声速为  $v_a$ ,工件中的声速为  $v_b$ ,焦点  $P$  点的坐标为  $(x_P, z_P)$ ,含楔块平面波到焦点的声时计算示意如图 3 所示。

图 3 中,以第一个发射阵元中心所在位置  $O$  点为原点建立坐标系,从  $A$  点到  $C$  点  $(x_{in}, z_{in})$  的长度加上  $C$  点到  $P$  点的长度表示平面波从开始激励到传播至焦点  $P$  的声程。通过作辅助线,可以将  $AC$  长度的计算转换成  $OF$  长度加  $EC$  的长度;三角形  $OGF, ECG, CBD, BPD$  均是直角三角形,可以将  $CP$  长度的计算转换成  $CD$  长度加  $DP$  的长度。

则直接模式下(不考虑工件底面反射),平面波到焦点  $P$  的声时计算公式为

$$\begin{aligned}
 t_q^P &= \frac{|AC|}{v_a} + \frac{|CP|}{v_b} \\
 &= \frac{|OF| + |EC|}{v_a} + \frac{|CD| + |DP|}{v_b} \\
 &= \frac{x_{in} \times \sin\alpha + z_{in} \times \cos\alpha}{v_a} + \\
 &\quad \frac{(x_P - x_{in}) \times \sin\theta + (z_P - z_{in}) \times \cos\theta}{v_b}
 \end{aligned} \tag{2}$$

1.3 平面波全聚焦成像

PWI-TFM 的成像原理是每帧成像按照指定的

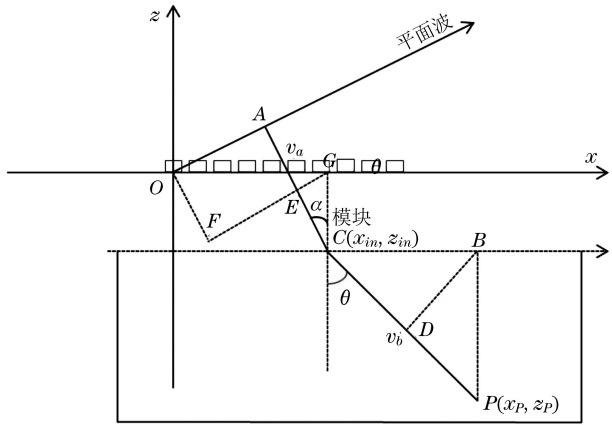


图3 含楔块平面波到焦点的声时计算示意

规则进行数据采集,需要进行  $Q$  次发射接收,每次采用  $N$  个阵元进行发射和接收,每次发射时通过延迟法则控制  $N$  个阵元激发形成指定角度的平面波,每次采集时  $N$  个阵元同时进行采集,从而形成一个  $Q \times N$  的数据矩阵  $\mathbf{M}(t)$ 。然后通过虚拟聚焦合成算法,对 ROI(感兴趣区域)内的每个焦点进行聚焦合成计算。因为在每一个焦点都进行聚焦计算,所以 PWI-TFM 具有较高的成像质量。

对于 ROI 内的某个焦点  $P$ ,其聚焦合成可表示为

$$A_P = \left| \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^N \mathbf{M}_{qj}(t_q^P + t_j^P) \right| \tag{3}$$

式中: $\mathbf{M}(t)$  为 PWI-TFM 采集的数据矩阵; $\mathbf{M}_{qj}(t)$  表示第  $q$  个平面波发射时,第  $j$  个阵元采集的数据; $t_q^P$  表示第  $q$  个平面波发射时,平面波从开始激励到传播至焦点  $P$  的声时,其计算方法见公式(2); $t_j^P$  表示从焦点  $P$  传播至阵元  $j$  的声时,该声时的计算方法和 FMC-TFM 中焦点至阵元的声时计算方法相同。

完成每个焦点的  $A_P$  计算,再对成像进行希尔伯特变换处理,即得到最终的 PWI-TFM 图像。

1.4 多模态成像

和 FMC-TFM 一样,PWI-TFM 也支持多模态成像计算。不同模态下,主要是声波传播路径的不同,即  $t_q^P$  和  $t_j^P$  的计算方式不同。直接模式下,声波传播路径比较简单,平面波传播到焦点处,然后焦点传播至阵元。含模态转换模式下,声波传播路径较为复杂,平面波传播至工件底面后,经底面反射后再传播至焦点处,然后再从焦点传播至阵元。需要注意的是,底面反射时可能发生波形转变。

1.5 有效区域

由于平面波在空间上存在的区域是有限的,



故可以根据平面波存在的区域计算有效区域, 根据有效区域减少需要进行聚焦计算的点的数量。当平面波入射角为  $\theta$  时, 其对应的有效区域如图 4 所示。

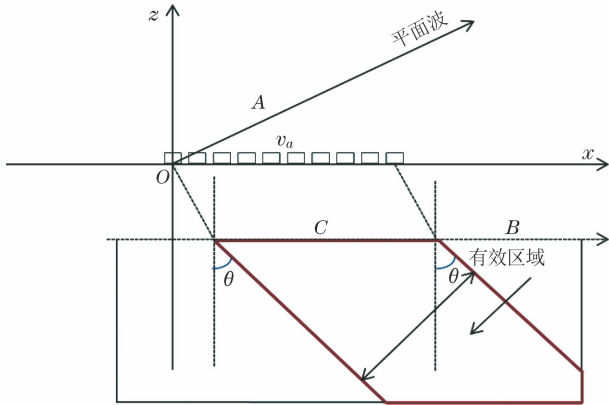


图 4 平面波入射角为  $\theta$  时对应的有效区域示意

## 2 检测试验及结果

### 2.1 PWI-TFM 和相控阵超声成像对比

采用同一个 32 阵元不带楔块的探头检测同一个 B 型试块, PWI-TFM 采用  $0^\circ$  单角度发射成像, 相控阵超声采用线扫成像, 其成像结果如图 5, 6 所示。PWI-TFM 和相控阵超声成像结果对比如表 1 所示。

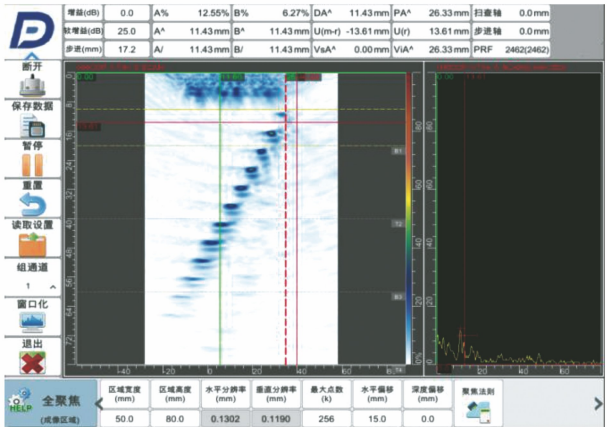


图 5 PWI-TFM  $0^\circ$  单角度发射成像结果

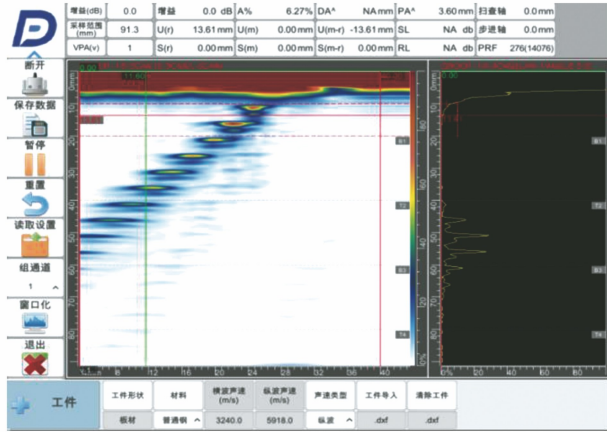


图 6 相控阵超声线扫成像结果

表 1 PWI-TFM 和相控阵超声成像结果对比

项目	相控阵超声算法	PWI-TFM 算法	比较结果
设置	线扫, 起始阵元 1, 结束阵元 32, 孔径 4	$0^\circ$ 单角度发射, 32 阵元接收	—
数据量	29 个 A 扫描	32 个 A 扫描	PWI-TFM 采集的数据量稍大
采集速度	FPGA(现场可编程门阵列) 需进行 29 次采集工作	FPGA 只需进行 1 次采集工作	单角度平面波发射情况下, PWI-TFM 的数据采集速度比相控阵超声的快很多
成像帧数	主要受采集速度限制	主要受计算速度限制	单角度, $256 \times 256$ 焦点下, PWI-TFM 可以轻松实现 1 000 帧/s 的成像速度
成像效果	焦点区域成像清晰, 远离焦点区域成像发散	整个计算区域成像清晰, 成像分辨率高	单角度的 PWI-TFM 可以实现比相控阵超声更好的成像, PWI-TFM 可以通过多角度叠加进一步提升成像质量

### 2.2 PWI-TFM 和 FMC-TFM 成像对比

采用同一个 32 阵元带楔块的探头检测同一个 B 型试块, PWI-TFM 采用 4 个角度发射成像, FMC-TFM 采用全矩阵数据采集成像, 其成像结果如图 7, 8 所示。PWI-TFM 和 FMC-TFM 成像结果对比如表 2 所示。

## 3 结语

PWI-TFM 成像算法和现有成像算法相比, 具有多方面优势, 是具有很高实用价值的成像算法。

相比相控阵超声聚焦合成算法, PWI-TFM 成像在 ROI 内每个虚拟焦点聚焦, 成像精度和成像质量更高, 可通过控制发射平面波角度数量设置更快的成像速度。相比 FMC-TFM 成像算法, PWI-TFM 成像速度更快, 每次多个阵元发射可获得更高的灵敏度和信噪比, 可实现更大范围的检测, 另外通过发射平面波角度范围的控制可有效减少 FMC-TFM 成像中存在的伪影。这些优势使得 PWI-TFM 成像具有广阔的应用空间, 未来, 该技术发展成熟后, 有望在高速自动化检测领域发挥重要的作用。

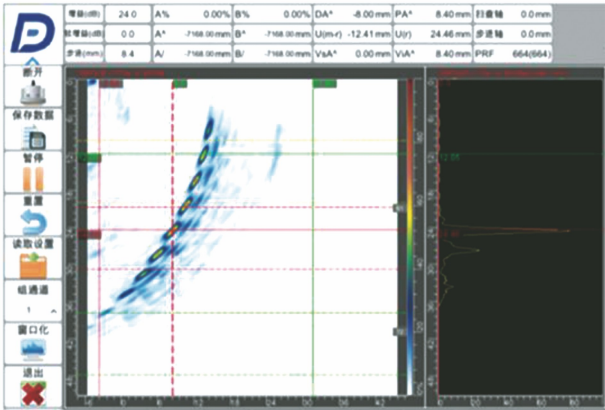


图 7 PWI-TFM 4 个角度聚焦成像结果

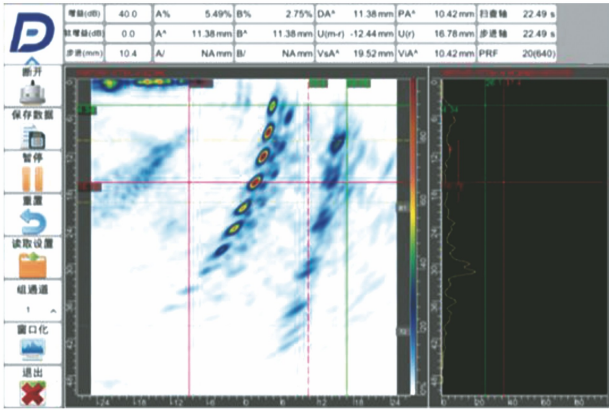


图 8 FMC-TFM 成像结果

表 2 PWI-TFM 和 FMC-TFM 成像结果对比

项目	FMC-TFM 算法	PWI-TFM 算法	比较结果
设置	1~32 阵元发射 1~32 阵元接收	20°,30°,40°,50°等 4 个角度发射, 32 阵元接收	—
数据量	32×32 个 A 扫描	4×32 个 A 扫描	PWI-TFM 采集的数据量比 FMC-TFM 的少很多
采集速度	需进行 32 次采集工作	需进行 4 次采集工作	PWI-TFM 数据采集速度比 FMC-TFM 的快很多
成像帧数	主要受计算速度限制	主要受计算速度限制	因为 Q 比 N 要小很多,所以 PWI-TFM 的计算速度要快很多
成像效果	计算区域成像清晰, 成像分辨率高	计算区域成像清晰, 成像分辨率高	PWI-TFM 多阵元同时发射,灵敏度高, 检测范围更大,伪影更少,信噪比更高

本文获“2023 Evident 杯相控阵超声检测技术  
 优秀论文评选”活动优胜奖

参考文献:

[1] BRUNEEL C, TORGUET R, ROUVAEN K M, et al. Ultrafast echotomographic system using optical processing of ultrasonic signals[J]. Applied Physics Letters,1977,30(8):371-373.

[2] MONTALDO G, TANTER M, BERCOFF J, et al. Coherent plane-wave compounding for very high

frame rate ultrasonography and transient elastography [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,2009,56(3):489-506.

[3] LE JEUNE L, ROBERT S, LOPEZ VILLAVARDE E, et al. Plane wave imaging for ultrasonic non-destructive testing: generalization to multimodal imaging[J]. Ultrasonics,2016,64:128-138.

[4] 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.

(上接第 21 页)

满足使用 DNV-ST-F101—2017 标准中 Workmanship 进行焊缝质量验收的条件。同时, PAUT+TOFD在扫查轨道偏移 3 mm 时,不同位置缺陷评定误差值小于 1 mm,6 点及 12 点位置连续 10 次重复扫查灵敏度变化小于 2 dB,满足标准要求,整个扫查工艺具有良好的可重复性和可操作性,为工程质量提供了可靠的保障,也为 PAUT+TOFD 检测工艺认证提供了经验借鉴。

本文获“2023 Evident 杯相控阵超声检测技术  
 优秀论文评选”活动三等奖

参考文献:

[1] 黄晶. 超声相控阵理论及其在海洋平台结构焊缝缺陷检测中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学, 2005.

[2] 吴员,陈亮,张俊杰,等. 海底管道无损检测技术评定的破坏性试验[J]. 无损检测,2019,41(11):34-35.

[3] 陈亮,张天江,吴员,等. 海底管道对接环焊缝的相控阵超声检测[J]. 无损检测,2018,40(9):28-29.

[4] 陈亮,吴员,龙良成. 海底管道 CRA 材料对接环焊缝 AUT 检出能力研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版),2020,21(1):31-33.