

◇ 研究报告 ◇

# 复杂曲面构件的超声虚拟声源阵列成像\*

甘勇<sup>1</sup> 陈尧<sup>1,2†</sup> 石文泽<sup>1</sup> 陈果<sup>1</sup> 卢超<sup>1,3</sup>

(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 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

(3 上饶师范学院 上饶 334000)

**摘要** 利用虚拟声源和合成孔径聚焦相结合的复合成像技术解决复杂曲面构件超声检测图像中的缺陷位置失真问题。首先,在水浸检测条件下利用 128 阵元线性阵列换能器中采集曲面构件内部缺陷的 B 扫描数据。通过相邻阵元界面回波时间差构建虚拟声源,并将其定义为声波在水-构件双层界面上的入射点。然后,根据实际阵元-虚拟声源-聚焦目标三者之间的声传播路径,通过合成孔径聚焦技术将各路阵元的接收信号反推至虚拟声源处进行图像的延时叠加重建,最终获得复杂曲面构件中缺陷的超声图像。结果表明,与传统 B 扫描图像和合成孔径聚焦图像相比,虚拟源-合成孔径聚焦图像能够准确呈现复杂曲面构件的表面轮廓,精确表征构件内部的缺陷位置。

**关键词** 曲面构件, 超声成像, 虚拟源, 双层界面

**中图分类号:** TH878.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2019)02-0173-06

**DOI:** 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.02.004

## Ultrasonic virtual source imaging for components with arbitrarily shaped

GAN Yong<sup>1</sup> CHEN Yao<sup>1,2</sup> SHI Wenzhe<sup>1</sup> CHEN Guo<sup>1</sup> LU Chao<sup>1,3</sup>

(1 Key Laboratory of Non-destructive Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(3 Shangrao Normal University, Shangrao 334000, China)

**Abstract** A method combining virtual source (VS) and synthetic aperture focusing technique (SAFT) was applied to solve the position distortion of defect echo in ultrasonic image for the components with arbitrarily shaped. First, the line array transducer with 128 elements was used to collect the raw B-scan signals of the component with arbitrarily shaped under the water immersed condition. Then a series of virtual sources at the two-media interface between water and component were created by the time of flight of two consecutive elements. Secondly, in virtue of the virtual sources, the two-segment sound propagation path from emitting elements to virtual sources and from here to focus points were respectively calculated. Last each point of the imaging region was focused by the delay and sum process of SAFT. The results show, in compared of the traditional B-scan and SAFT image, that the defect location of component is displayed accurately in the VS-SAFT image.

**Key words** Arbitrarily interface structures, Ultrasonic imaging, Virtual source, Two-media interface

2018-07-12 收稿; 2018-09-14 定稿

\*国家自然科学基金项目 (51705232, 51265044, 51705231), 声场声信息国家重点实验室开放课题项目 (SKLA201806), 江西省优势科技创新团队专项 (20171BCB24008), 南昌航空大学研究生创新专项资金项目 (校级项目)(YC2017035)

作者简介: 甘勇 (1994-), 男, 江西景德镇人, 硕士研究生, 研究方向: 超声阵列成像检测技术。

† 通讯作者 E-mail: chenyaoyao1984@foxmail.com

## 0 引言

超声成像技术具有检测灵敏度高、缺陷显示直观、检测速率快等优点,已被广泛应用于航空航天、石油船舶、汽车电力等工业领域<sup>[1-2]</sup>。在检测复杂曲面构件时,为保证耦合质量,通常采用楔块或水浸等耦合方式进行检测,声束在耦合介质和被测构件组成的双层介质中传播,以单介质声速为基础的传统成像方法难以适用。在双层介质中,声波在界面处的折射使声束的传播速度和方向发生变化。当界面形状复杂时,声速在水平和垂直方向上均发生变化,声波经由界面到达缺陷的发生时间难以准确测定,造成图像上缺陷位置严重失真,影响缺陷的定位和定量<sup>[3]</sup>。

针对双层介质中缺陷成像问题,目前广泛认可的方法为合成孔径聚焦技术(Synthetic aperture focusing technique, SAFT)与射线追踪(Ray tracing method, RTM)相结合的复合成像技术<sup>[4]</sup>。根据Snell定律或者Fermat定理,RTM能够准确求得声束在各层介质之间的折射角和传播路径,进一步求得信号缺陷回波的发生时间,再通过SAFT技术中的延时叠加算法进行聚焦成像,最终将缺陷回波位置准确地呈现在超声图像中<sup>[5-6]</sup>。此外,RTM还可以与全聚焦技术(Total focusing method, TFM)相结合,进一步提升超声图像的分辨率和信噪比<sup>[7-9]</sup>。虽然对界面的形状没有限制,但此类方法使用迭代运算求解界面上折射点,计算开销大,降低了SAFT和TFM成像效率<sup>[10]</sup>,这一不足严重限制了这类方法在分层介质成像中的进一步应用。

虚拟源成像技术是一种适用于双层介质的超声成像技术,最早应用于医学超声成像。早期虚拟源技术将虚拟源设置在换能器的后方<sup>[11-12]</sup>,通过对各阵元进行延时激励,整个传感器产生的声场可以看作是由后方的虚拟源产生的,这一过程使得进入被检物体的声场能量增加,再结合延时叠加算法,能提高图像的信噪比。Passmann等<sup>[13]</sup>进一步地将凹形传感器的焦点看作虚拟源并结合合成孔径聚焦技术进行成像,在皮肤类疾病诊断中取得良好的效果。Sutcliffe等<sup>[7,14-15]</sup>拓宽了虚拟源在工业无损检测领域中的应用,他通过将声波传播时间进行预先计算、储存的方法结合延时叠加设计了基于虚

拟源的实时成像系统。国内对于虚拟源技术的研究相对较少。王平等<sup>[16]</sup>对虚拟阵元进行了仿真研究,并结合动态聚焦技术在一定程度上解决了分辨率与探测深度之间的矛盾。李遥等<sup>[17]</sup>将虚拟源技术与自适应加权相结合,提高了病灶目标的超声图像分辨率。王浩等<sup>[18]</sup>利用虚拟源成像技术对有机玻璃/钢双层固体介质进行成像,得到了高分辨率的第二介质边钻孔(Side drilled hole, SDH)检测图像。然而,这些方法均针对于单层介质或者分界面规则的双层介质,并未尝试界面为非规则曲面的检测状况。

本文在此基础上,结合合成孔径聚焦技术解决复杂曲面构件超声图像中缺陷位置的失真问题。利用相邻阵元的界面回波时间差以及阵元中心坐标构建在界面上的虚拟源。虚拟源位置确定之后,根据实际阵元-虚拟声源-像素点三者之间的声传播路径计算延时时间,对非规则曲面构件进行虚拟聚焦。

## 1 原理

复杂曲面构件虚拟源成像原理如图1所示。在图1(a)中,声波传播到界面上的入射点可以看作向第二介质中辐射声场的波源。依次激励阵元,在相邻两入射点之间构造虚拟的发射源。假设虚拟源的位置已知,那么通过阵元中心、虚拟源、像素点三点坐标和对应介质声速可以求得声波在阵元中心-虚拟源以及虚拟源-像素点的传播时间。如图1(b)所示,将成像区域网格化后,通过上述传播时间对阵列信号进行合成孔径聚焦,可得到第二层介质的超声图像。在此过程中,声波在界面处复杂的折射点迭代运算被避免了,相比于RTM严格计算每个成像点到每个发射点的传播时间,这一过程大大减少了运算成本,提高了成像效率。

利用相邻阵元界面回波时间差构建虚拟源原理如图2所示。图2中, $u_i$ 和 $u_{i+1}$ 为相邻激励阵元中心。由于耦合介质中一般不存在反射体,因此阵元接收信号中的第一个回波为界面回波。分别将 $u_i$ 和 $u_{i+1}$ 垂直入射到界面的点记为 $q_i$ 和 $q_{i+1}$ ;  $u_i q_i$ 和 $u_{i+1} q_{i+1}$ 分别是阵元中心至入射点的路径, $c_k$ 为相邻阵元 $u_i$ 和 $u_{i+1}$ 中心, $v_k$ 为相邻阵元 $u_i$ 和 $u_{i+1}$ 对应的虚拟源。当阵元间距 $d$ 与界面的曲率半径相对很小时,路径 $u_i q_i$ 和 $u_{i+1} q_{i+1}$ 可以看作是平行的。

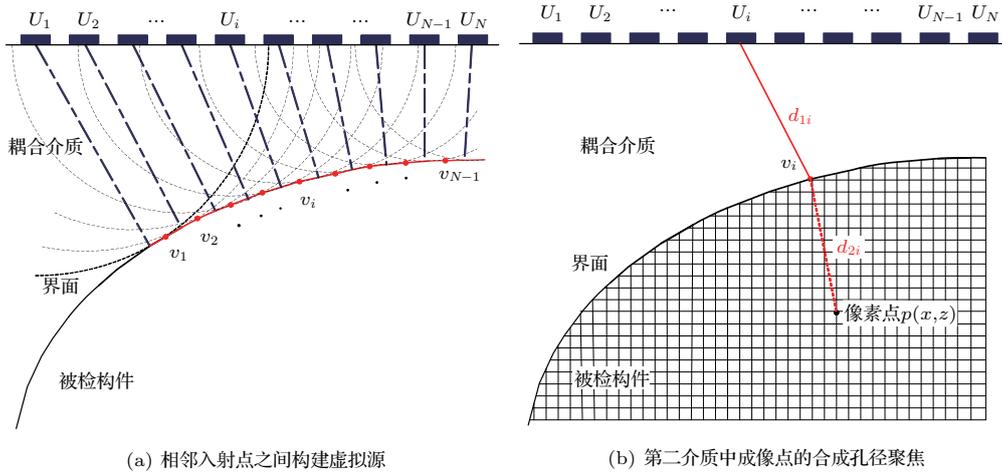


图1 虚拟源-合成孔径聚焦成像示意图

Fig. 1 Schematic representation of VS-SAFT imaging

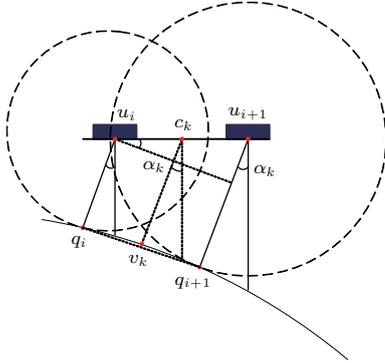


图2 虚拟源构建示意图

Fig. 2 Creating VS at the arbitrarily interface

由上述几何关系,虚拟源  $v_k$  到  $c_k$  的偏转角为

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \arcsin\left(\frac{u_i q_i - u_{i+1} q_{i+1}}{d}\right) \\ &= \arcsin\left(\frac{c_1}{2d}(T_i - T_{i+1})\right), \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中,  $T_i$  和  $T_{i+1}$  为阵元  $U_i$  和  $U_{i+1}$  的界面回波信号的对应时间。由于阵元坐标已知,虚拟源  $v_k$  的坐标可以表示为

$$\begin{aligned} x_{v_k} &= x_{c_k} + \left(\frac{u_i q_i + u_{i+1} q_{i+1}}{2}\right) \cdot \sin \alpha_i, \\ z_{v_k} &= z_{c_k} + \left(\frac{u_i q_i + u_{i+1} q_{i+1}}{2}\right) \cdot \cos \alpha_i. \end{aligned} \quad (2)$$

可以看出,如果阵元依次激励,那么前一个界面回波时间可以利用到下一个虚拟源的构建中,假设激励的阵元个数为  $N$ ,那么构建的虚拟源数量为  $N-1$ 。虚拟源  $v_k$  坐标确定后,可以得到声波从阵元中心到虚拟源处再到像素点的传播距离:

$$d_{1k} = \sqrt{(x_{u_i} - x_{v_k})^2 + (z_{u_i} - z_{v_k})^2}, \quad (3)$$

$$d_{2k,xz} = \sqrt{(x_{v_k} - x)^2 + (z_{v_k} - z)^2}, \quad (4)$$

其中,  $x, z$  为像素点坐标。根据对应介质声速,声波在阵元中心-虚拟源-像素点路径上的传播时间为

$$t_{k,xz} = t_{1k} + t_{2k,xz} = \frac{d_{1k}}{c_1} + \frac{d_{2k,xz}}{c_2}. \quad (5)$$

注意到  $t_{1k}$  的计算与像素点坐标无关,仅取决于阵元中心坐标以及界面回波差值。对于每两个相邻的阵元,  $t_{1k}$  仅计算一次。将  $N-1$  个虚拟源信号进行延时叠加,得到像素点  $p(x, z)$  处的幅值为

$$I_{\text{VS-SAFT}}(x, z) = \sum_{i=1}^{N-1} h(2t_{k,xz}), \quad (6)$$

式(6)中,  $h(2t_{k,xz})$  为接收信号的希尔伯特变换。

## 2 实验

图3为水浸实验检测平台,由独立128通道超声信号采集系统、计算主机、阵列信号采集软件和128阵元信号采集传感器组成。其中,传感器为广州多浦乐电子科技有限公司生产的线性128阵元的线性阵列探头,中心频率为5 MHz,阵元宽度为0.9 mm,阵中心间距为1 mm,阵元长度为10 mm。

检测构件为半径60 mm的铝制半圆柱,构件两端面分别加工了三个和五个 $\phi 2$ 边钻孔,如图4所示。为便于描述,分别将其命名为端面1和端面2。由图4可知,端面1的三个边钻孔与底面之间的距离均为30 mm,孔圆心相距20 mm;端面2的五个边钻孔距圆心均为30 mm,相邻孔圆心之间的圆周角为 $30^\circ$ 。

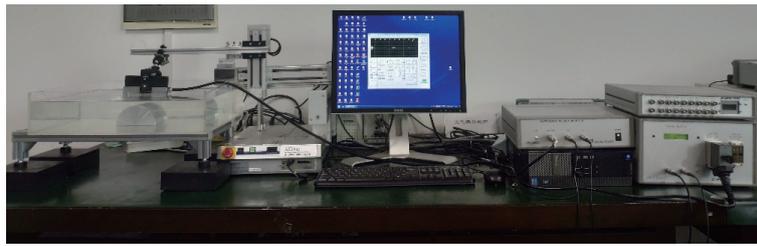
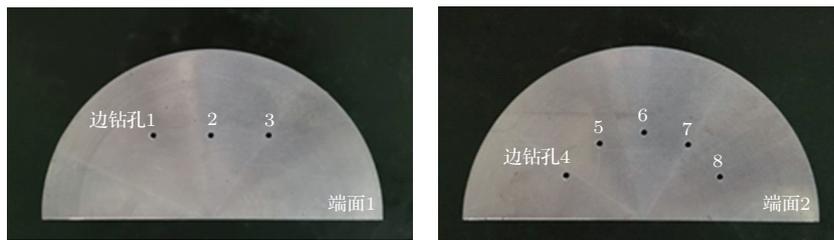


图3 检测实验平台

Fig. 3 Ultrasonic array testing system



(a) 构件端面1与边钻孔示意图

(b) 构件端面2与边钻孔示意图

图4 构件边钻孔加工示意图

Fig. 4 The SDHs in the test block

实验过程中,步进电机固定传感器在距构件表面高30 mm处,采集两个端面边钻孔的B扫描信号。整个实验过程中使用的设备为线性阵列传感器和多路转换器等常规仪器,硬件要求较低。信号采集完成之后的进一步处理和成像均在离线的计算机上完成。

### 3 结果与分析

图5(a)为端面1的原始B扫描图像,幅值单位为dB(分贝值)。从图上可以看出,在未经过算法处理之前,构件上表面和底面轮廓均出现变形,其轮廓较真实情况更为上凸。由图5(a)可知,边钻孔1~3图像不在同一水平线上,且边钻孔图像部分重叠,边钻孔的实际位置和大小难以判断。图5(b)为仅使用水中声速计算的SAFT图像。在图5(b)中,首先注意到由于声速关系(铝中纵波声速为6290 m/s,水中纵波声速为1480 m/s),图5(b)相比于图5(a)宽度不变,长度增加了近四倍。其次,由于进行了SAFT,边钻孔的分辨率得到了提高,但三个边钻孔的位置未在同一水平线上,无法正确地判断缺陷位置。最后,构件表面和底面轮廓较原始B扫描图像大幅缩短,无法正确表征构件的实际轮廓。图5(c)为仅使用铝中声速进行的SAFT图像,

相比于图5(b),图5(c)的长度缩短了四倍,但除此之外,其他特点与图5(b)较为类似,仍无法正确地表征边钻孔的正确位置。图5(d)为经虚拟源-合成孔径算法(Virtual source-synthetic aperture focusing technique, VS-SAFT)处理之后的图像。从图形上可以直观地看出,首先,图像中上表面轮廓长度相比于图5(b)和图5(c)增加,更能真实地表现构件表面信息。其次,构件中的三个边钻孔形状完全分离,且处在与底面相距30 mm的同一水平线上;边钻孔间距接近20 mm,较为符合构件中边钻孔的实际位置。最后,底面轮廓的长度较图5(b)和图5(c)有所增加,并从原始B扫描图像中的上凸型变成了水平型,与实际情况相符。

图6分别为端面2的原始B扫描、水中声速SAFT、铝中声速SAFT以及VS-SAFT处理后图像。其中,图6(a)、图6(b)、图6(c)与图5(a)、图5(b)、图5(c)有着相同的特点,在此不再赘述。

在图6(d)中,端面2的轮廓以及五个边钻孔位置同样得到了正确的表示。但与图5(d)不同的是,随着成像点深度的增加,图6(d)中边钻孔图像的分辨率和亮度下降。边钻孔6与端面1中边钻孔1~3的分辨率大致相同,而边钻孔5、7和4、8的分辨率较差。造成这一结果的原因在于,当图1(b)中声束从右往左依次入射进构件时,入射进第二介质的声

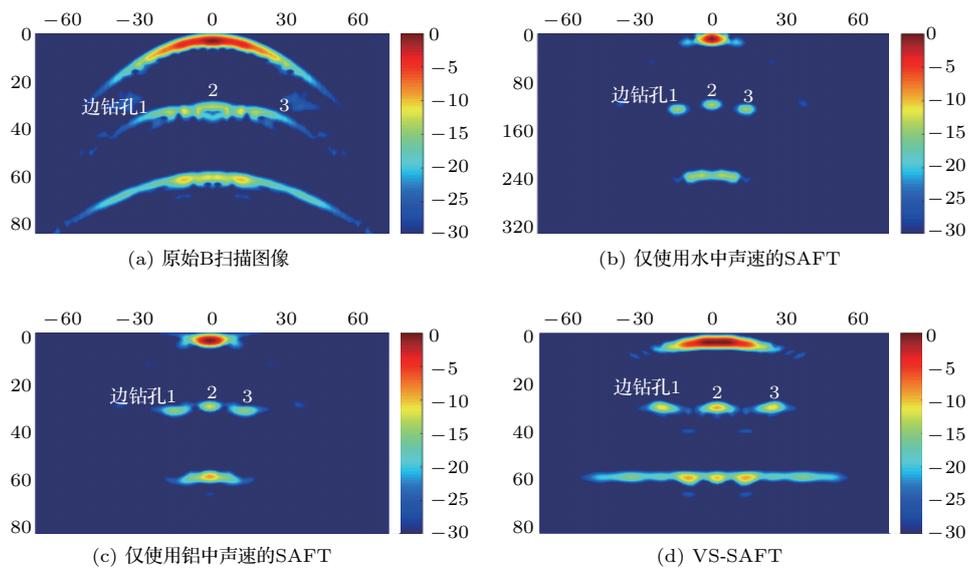


图5 端面1的不同方法后处理图像

Fig. 5 Images obtained by different methods of the plate1

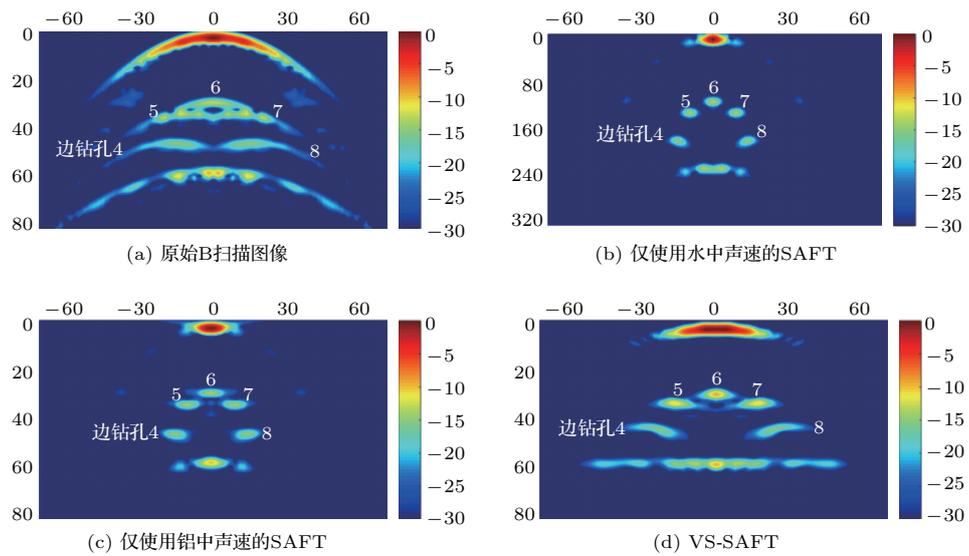


图6 端面2的不同方法后处理图像

Fig. 6 Images obtained by different methods of the plate 2

束从声束扩散角正中心向右边移动，入射声束能量逐渐减少。另一方面，水层厚度增加，传播过程中超声能量损耗加大，导致界面回波变弱。当曲面倾斜到一定角度时，界面回波信号太弱以至于无法提取其对应时间。因此，界面上的虚拟源数量是有限的，尽管在第二介质中运用了合成孔径聚焦，但在倾斜角较大位置下方的缺陷4、8并不能像缺陷1、2、3等有足够的虚拟源辐射声场覆盖，导致缺陷4、8处的分辨率低于其他缺陷位置。上述结果表明，声波入

射方向和曲面之间的夹角对图像分辨率和缺陷回波完整程度有着极大的影响。因而可从声波入射方向和曲面之间的夹角与超声回波信号幅值、波形之间的联系入手，确定幅值、波形等缺陷特征随夹角的变化关系。在此基础上，建立对应的加权函数，补偿因夹角引起的回波幅值下降、波形失真，进而提高分辨率和修正缺陷特征失真。此外，阵元中心间距、阵元尺寸等因素也会影响超声图像的分辨率和缺陷特征完整性。例如，阵元中心间距越小，所建立

的虚拟声源之间的间距也会越小, 所得图像分辨率会相应提高, 进而改善缺陷形状和大小失真。再如, 阵元尺寸会影响声束扩散角和所发出的声波能量, 会对分辨率产生较大的影响。综上, 选择适当的相控阵探头参数有利于得到高质量虚拟源缺陷图像。

#### 4 结论

本文利用虚拟源与合成孔径聚焦相结合的复合成像技术, 解决耦合条件下复杂曲面构件超声检测图像缺陷位置失真问题。利用半径为 60 mm 的铝制半圆柱 B 扫描数据分别获得了构件的原始 B 扫描图像、水中声速的合成孔径聚焦图像、铝中声速的合成孔径聚焦图像以及虚拟源-合成孔径聚焦图像。结果表明, 与单声速的合成孔径聚焦方法相比, 基于虚拟源的合成孔径聚焦成像算法能够准确地表征耦合条件下复杂曲面构件的界面轮廓和缺陷的真实位置。

#### 参 考 文 献

- [1] 周正干, 李洋, 周文彬. 相控阵超声后处理成像技术研究、应用和发展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 1-11.  
Zhou Zhenggan, Li Yang, Zhou Wenbin. Ultrasonic phased array post-processing imaging technique: a review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 1-11.
- [2] 陈尧, 罗忠兵, 张东辉, 等. 基于 EBSD 技术构建弹性各向异性粗晶材料超声仿真模型的研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 24-30.  
Chen Yao, Luo Zhongbing, Zhang Donghui, et al. Research on modeling of ultrasonic propagation in anisotropic coarse-grained materials based on EBSD technique[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(18): 24-30.
- [3] 徐娜, 周正干, 刘卫平, 等. L 型构件 R 区的超声相控阵检测方法[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 419-425.  
Xu Na, Zhou Zhenggan, Liu Weiping, et al. Ultrasonic phased array inspection method for the corner of L-shaped components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 419-425.
- [4] 杨春. 分层物体的合成孔径聚焦超声成像技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [5] Shlivinski A, Langenberg K J. Defect imaging with elastic waves in inhomogeneous-anisotropic materials with composite geometries[J]. Ultrasonics, 2007, 46(1): 89-104.
- [6] 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(一)[J]. 应用声学, 1993, 12(3): 43-48.  
Sun Baoshen, Shen Jianzhong. Synthetic aperture focused ultrasound imaging[J]. Journal of Applied Acoustics, 1993, 12(3): 43-48.
- [7] Sutcliffe M, Weston M, Dutton B, et al. Real-time full matrix capture with auto-focussing of known geometry through dual layered media[C]//51st Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing, 2012.
- [8] Weston M, Mudge P, Davis C, et al. Time efficient auto-focussing algorithms for ultrasonic inspection of dual-layered media using full matrix capture[J]. NDT & E International, 2012, 47(2): 43-50.
- [9] 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. Ultrasonic phased array inspection on the wedge using full matrix data[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 1-7.
- [10] 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.
- [11] O'donnell M, Thomas L J. Efficient synthetic aperture imaging from a circular aperture with possible application to catheter-based imaging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 1992, 39(3): 366-380.
- [12] Ylitalo J. Improving contrast resolution in ultrasound holographic B-imaging: comparison between simulation and experiment[C]. Proceedings of the Ultrasonics Symposium, 1993 Proceedings, IEEE, F, 1993.
- [13] Passmann C, Ermert H. A 100-MHz ultrasound imaging system for dermatologic and ophthalmologic diagnostics[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 1996, 43(4): 545-552.
- [14] Sutcliffe M, Charlton P, Weston M. Multiple virtual source aperture imaging for non-destructive testing[J]. Insight: Non-Destructive Testing & Condition Monitoring, 2014, 56(2): 75-81.
- [15] Sutcliffe M, Charlton P, Weston M. Virtual source aperture image processing methods for non-destructive testing[J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2016, 58(2): 82-86.
- [16] 王平, 高阳, 曹世超, 等. 超声成像中基于虚拟阵元的双聚焦波束合成方法[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(5): 75-79.  
Wang Ping, Gao Yang, Cao Shichao, et al. The method of dual focusing beamforming based on virtual element in ultrasound imaging[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(5): 75-79.
- [17] 李遥, 吴文焘, 李平, 等. 超声虚源成像中自适应双向空间逐点聚焦方法[J]. 声学学报, 2016, 41(3): 287-295.  
Li Yao, Wu Wentao, Li Ping, et al. Adaptive bidirectional point-wise focusing method in ultrasonic imaging based on virtual source[J]. Acta Acustica, 2016, 41(3): 287-295.
- [18] 王浩, 戴丹蕾, 胡文祥. 基于虚拟源技术的双层固体结构超声成像[J]. 应用声学, 2017, 36(4): 283-288.  
Wang Hao, Dai Danlei, Hu Wenxiang. Ultrasound imaging of double layer solid structure with virtual source[J]. Journal of Applied Acoustics, 2017, 36(4): 283-288.