引用格式： 邵伟, 朱文发, 范国鹏, 等. 多盲孔缺陷的超声兰姆波时域拓扑能量成像方法研究[J]. 声学技术, 2021, **40**(5): 624-629. [SHAO Wei, ZHU Wenfa, FAN Guopeng, et al. A study of the time-domain topology energy based ultrasonic Lamb wave imaging method for multi-blind hole defects[J]. Technical Acoustics, 2021, **40**(5): 624-629.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.05.006

多盲孔缺陷的超声兰姆波时域拓扑能量成像方法研究

邵 伟[1]，朱文发[1,2]，范国鹏[1]，张海燕[3]，张 辉[1]，张梦可[1]
(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院，上海 201620；2. 华东理工大学机械与动力工程学院，上海 200237；
3. 上海大学通信与信息工程学院，上海 200444)

摘要： 传统超声成像方法受瑞利准则的约束，难以对缺陷间距小于成像分辨率阈值的多缺陷进行成像。提出了一种基于时域拓扑能量的超声兰姆波成像方法，将逆散射拓扑成像方法中的拓扑渐进过程转换成求解直接声场和伴随声场。然后通过将伴随声场进行时间反转，两个声场将具有在缺陷处聚焦，在非缺陷处不聚焦的特性。将直接声场和伴随声场进行融合，以时域拓扑能量值作为像素值进行成像，从而使表征缺陷的精度较高。建立了缺陷间距小于分辨率阈值的多盲孔缺陷有限元模型，通过“一发多收”的方式激发 S0 模式和采集缺陷散射信号，并进行时域拓扑能量成像。仿真结果表明：对于多盲孔缺陷，时域拓扑能量成像法能够获得比延时叠加法和时间反转成像法更高的分辨率，并且能在缺陷间距小于成像分辨率阈值时进行成像。

关键词： 时间反转；兰姆波；时域拓扑能量；分辨率
中图分类号： TB553 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-3630(2021)-05-0624-06

A study of the time-domain topology energy based ultrasonic Lamb wave imaging method for multi-blind hole defects

SHAO Wei[1], ZHU Wenfa[1,2], FAN Guopeng[1], ZHANG Haiyan[3], ZHANG Hui[1], ZHANG Mengke[1]
(1. *School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai* 201620, *China*;
2. *School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai* 200237, *China*;
3. *School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai* 200444, *China*)

Abstract: The traditional ultrasonic imaging methods are constrained by Rayleigh criterion, so it is difficult to image multiple defects in the case of defect spacing less than the imaging resolution threshold. In this paper, an ultrasonic Lamb wave imaging method based on time-domain topological energy is proposed, which converted the topological gradual process in the inverse scattering topological imaging method into solving the forward sound field and the adjoint sound field. Then, the two sound fields, in which the adjoint sound field is time reversed, have the characteristics of focusing at the defects rather than focusing in the non-defective area. By fusing the forward sound field and the adjoint sound field and using the time-domain topological energy value as the pixel value for imaging, the defect can be characterized with high precision. In this paper, the finite element models of multi-blind hole defects in the case of defect spacing less than the imaging resolution threshold is established. The S0 mode Lamb wave is excited and the defect scattering signals are collected in the way of "one transmitter and multiple receiver" for time-domain topological energy imaging. The simulation results show that for multi-blind hole defects, the time domain topological energy imaging (TDTE) method can obtain higher resolution than the delay and sum (DAS) method and the time reversal (TR) imaging method, overcome the influence of mode conversion and achieve high-resolution imaging in the case of the defect spacing less than the imaging resolution threshold.

Key words: time reversal (TR); Lamb wave; time domain topological energy (TDTE); resolution

0 引 言

缺陷的高精度定位、定量评估和表征是目前无损检测领域的研究热点。超声成像方法可实现缺陷的定量表征。基于延时叠加(Delay and Sum, DAS)

收稿日期： 2020-09-30; **修回日期：** 2021-03-01
基金项目： 国家自然科学基金青年项目(12004240)、中国博士后基金面上项目(2020M671022)。
作者简介： 邵伟(1996－), 男, 江苏淮安人, 硕士, 研究方向为超声无损检测。
通信作者： 朱文发, E-mail: zhuwenfa1986@163.com

的超声成像方法，如 B 扫、合成孔径聚焦技术(Synthetic Aperture Focusing Technique, SAFT)和全聚焦(Total Focusing Method, TFM)，这些方法建立在将介质视为具有恒定波速的基础上，将距离与飞行时间相关联，利用接收到的信号幅度、相位等信息进行成像。这类方法利用声波的衍射，受瑞利准则[1]的约束，无法识别缺陷间距小于分辨率阈值的多个缺陷。基于时间反转(Time Reversal, TR)的超声成像方法，例如时间反转运算符分解(Time Reversal Operator Decomposition, DORT)[2]，多信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)[3]或时间反转接收器，基于特征向量分解或时空最大能量检测的非线性处理，可在一定程度上补偿导波的频散效应[4]，但对于缺陷间距小于分辨率阈值的多缺陷的成像分辨率依然不高。

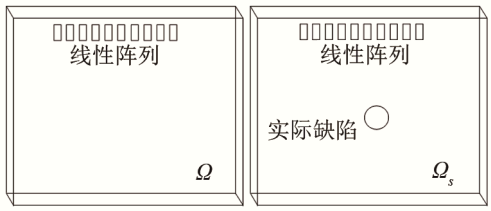
近年来，源于形状优化的拓扑成像，是一种高精度的超声成像方法，已成功应用于超声兰姆波成像[5]。然而，该方法需要经过大量迭代计算，耗费了时间成本[6]。2010 年，Dominguez 等[7]提出了时域拓扑能量法(Time Domain Topology Energy, TDTE)，将拓扑优化问题转换为求解直接声场和伴随声场，大大减少了拓扑梯度法的迭代计算。同年，Gibiat 等[8]成功实现了多缺陷的超声兰姆波时域拓扑成像。2020 年，我们考虑了在瑞利准则对成像分辨率的影响，阐述了缺陷间距小于分辨率阈值的多通孔缺陷拓扑成像过程，实现了多通孔缺陷的兰姆波拓扑成像[9]。非对称缺陷才是实际中最可能出现的缺陷，超声兰姆波在非对称处会产生模式转换，对非对称缺陷的拓扑成像研究较少，原因在于目前的研究缺乏对超声兰姆波模式转换的系统认识。2018 年，张海燕等[10]通过不同时刻的瞬态声场图可视化地显示多模式兰姆波在缺陷处的聚焦过程，揭示了拓扑成像方法的物理机理，实现了单个盲孔缺陷的拓扑成像。但是，针对多个盲孔缺陷，尤其是间距小于分辨率阈值的多个盲孔缺陷的时域能量成像问题，目前尚未见有研究。

如何实现缺陷间距小于分辨率阈值的多盲孔缺陷超声兰姆波拓扑成像，是拓扑成像走向无损检测实际应用的基础。本文分析了超声兰姆波在多盲孔缺陷处的模式转换，掌握了兰姆波与盲孔缺陷的相互作用规律，采用时间反转实现了多模态散射信号的聚焦。将拓扑渐进问题转换为求解直接声场与伴随声场，并通过时间反转，实现了直接声场与伴随声场在缺陷处自适应聚焦。利用直接声场和伴随声场求得时域拓扑能量值，并以此为像素进行成像。结果表明，由于声波衍射和导波的频散效应，延时叠加和时间反转无法识别出缺陷间距小于成像分辨率阈值的多个盲孔缺陷。而时域拓扑能量成像不受瑞利准则的限制，即使是对存在模式转换的盲孔缺陷，也能实现高分辨率成像。

1　时域拓扑能量成像理论

1.1　直接声场与伴随声场的计算

时域拓扑能量法成像的主要思想是把拓扑渐进的过程，转换成求解直接问题和伴随问题即直接声场和伴随声场[8]。如图 1(a)所示，不含缺陷但与待检测试样属性完全相同的试样称为参考试样 Ω。如图 1(b)所示，有缺陷的试样称为待检测试样 Ω_s。



(a) 参考试样　　(b) 待检测试样

图 1　参考试样和待检测试样

Fig.1　Reference test plate and plate to be tested

若在参考试样的阵元处激励信号，在参考试样的成像区域内接收，通过计算得到整个成像区域的声场，此声场称为直接声场。激励位置不变，由待检测试样在各阵元处的接收信号与参考试样在各阵元处接收到的信号差值，可得到散射信号。将散射信号作为二次激励源，在参考试样各阵元处重新激励，再通过计算可得到试样各点处信号即成像区域的声场，此声场称为伴随声场。

设激励信号为 $u_0(t)$，根据式(1)计算直接声场 $D_0(x,y,t)$[8]：

$$D_0(x,y,t)=F^{-1}\{F[u_0(t)]\exp[(-i2\pi fd/c_P(f)]\} \quad (1)$$

式中，d 表示成像区域内各点与对应激励传感器的相对距离，$c_{\mathrm{P}}(f)$ 为激发频率下兰姆波的相速度，$F\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换，$F^{-1}\{\cdot\}$ 表示傅里叶逆变换。分别建立无缺陷和有缺陷的有限元模型，一发多收，由各阵元测得的信号分别记为 $u_{0,j}(t)$、$u_{1,j}(t)$，各阵元接收到的散射信号为 $\overline{z}_j(t)=u_{1,j}(t)-u_{0,j}(t)$。$J$ 表示传感器的编号。将散射信号进行时间反转得到 $z_j(t)$。

利用式(2)计算伴随声场 $V_0(x,y,t)$[8]：

$$V_0(x,y,t)=F^{-1}\{F[z_j(t)]\exp[-\mathrm{i}2\pi fd/c_{\mathrm{P}}(f)]\} \quad (2)$$

利用时域拓扑能量成像公式(3)，计算成像区域中各点的像素值[8]：

$$A(x,z)=\int_0^T \|D_0(x,y,t)\|^2\|V_0(x,y,T-t)\|^2\,\mathrm{d}t \qquad (3)$$

其中，$V_0(x,y,T-t)$ 为时间反转后的伴随声场，(x,y) 为成像区域内各点的坐标位置。

1.2 盲孔伴随声场的计算

在盲孔有限元模型中，Lamb 波发生了模态转换。计算盲孔的声场时，利用式(4)计算声场 $V_{\mathrm{S0+A0}}(x,y,t)$ [11]：

$$V_{\mathrm{S0+A0}}(x,y,t)=F^{-1}\left\{\varphi F[z_j(t)]\exp[-i2\pi fd/c_{\mathrm{p}}^{\mathrm{S0}}(f)]\right\}+ F^{-1}\left\{\gamma F[z_j(t)]\exp[-\mathrm{i}2\pi fd/c_{\mathrm{p}}^{\mathrm{A0}}(f)]\right\} \qquad (4)$$

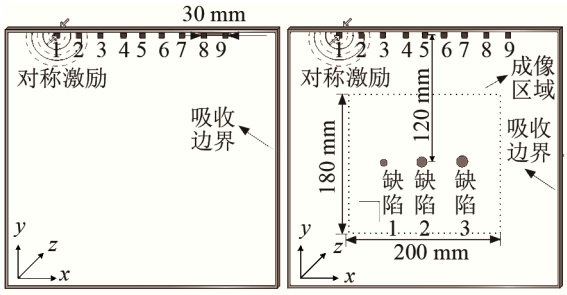
式中：$c_{\mathrm{p}}^{\mathrm{S0}}(f)$ 和 $c_{\mathrm{p}}^{\mathrm{A0}}(f)$ 分别表示 S0 和 A0 模态波的传播速度；φ 和 γ 分别表示 S0 和 A0 模态波的传播系数。

由于直接声场与时间反转后的伴随声场在缺陷处聚焦，拓扑能量成像公式让直接声场与时间反转后的伴随声场相乘，使能量集中在缺陷处。此外，在计算直接声场时不涉及散射波，所以直接声场不受声波衍射的影响，使得时域拓扑能量成像法不受瑞利准则的约束，可分辨出缺陷间距小于超声阵列成像分辨率阈值的多个缺陷，实现超分辨率成像。

2 多盲孔缺陷的成像结果分析

2.1 有限元模型及声场聚焦过程

铝板的盲孔有限元仿真模型示意图如图 2 所示，在有限元仿真软件 PZFlex 的环境下建立铝板有限元模型，铝板模型参数如表 1 所示。



(a) 参考试样 (b) 待检测试样

图 2 铝板的盲孔有限元仿真模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the finite element simulation model of aluminum plate with blind holes

表 1 铝板有限元仿真模型参数

Table 1 Parameters in the finite element simulation model of aluminum plate

模型尺寸/mm³	杨氏模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m⁻³)
300×300×2	69	0.35	2.69

如图 2(b)所示，建立与实际尺寸 1:1 等比例的铝板三维有限元模型。在整个模型中，使用三维八节点应变网格划分计算区域，网格长、宽和高均为 1 mm。在有限元模型的待检测试样上设置三个与待检测试样上边沿平行的盲孔缺陷。三个盲孔缺陷与待检测试样上边沿距离 150 mm，第二个盲孔缺陷位于整个试样的中心处。盲孔深度为 1 mm，直径分别为 7、10 和 13 mm。成像区域位于模型的中心处，尺寸为 200 mm×180 mm。有限元仿真中采用一发多收的信号采集方式，相互间隔 30 mm 的 9 个相互独立的阵元依次激励，其他所有阵元全部接收，传感器编号为 1～9，阵列与试样上边沿距离 30 mm。所有接收信号的采样频率为 15 MHz，采样时间为 250 μs。。

本文采用对称激励方式，激励信号是汉宁加窗的 5 个周期正弦脉冲波，信号中心频率为 200 kHz。当频厚积为 400 kHz·mm 时，由兰姆波频散特性可知，产生的是 S0 模式的兰姆波，群速度为 5 210 m·s⁻¹，波长约为 26.05 mm。

受声波衍射的限制，延时叠加和时间反转法成像分辨率遵守瑞利准则。根据瑞利准则，当介质中相邻两个目标缺陷之间的距离 d 小于阈值 d_{R} 时[12]，成像系统无法区分这两个目标，阈值 d_{R} 由瑞利准则计算得到，与超声波在介质中的传播波长有关。

$$d_{\mathrm{R}}=0.61\frac{\lambda}{\sin\theta_{\mathrm{R}}} \qquad (5)$$

式中，λ 为兰姆波中心频率处的波长，θ_{R} 为第 1 个阵元到 3 个缺陷中心的纵向偏转角。由式(5)计算得到的盲孔缺陷有限元模型中的分辨率阈值为 22.47 mm。

根据分辨率阈值，设置有限元仿真模型，模型中缺陷间距 d=20 mm。在参考式样与待检测式样中都激励第 1 个阵元，所有阵元接收信号。如图 3 所示，以第 1 个阵元激励、第 9 个阵元接收的散射信号为例，说明时间反转对于多盲孔缺陷的聚焦原理。其中 A0/S0 表示由 S0 模式转换产生的 A0 模式，S0/A0 表示由 A0 模式转换产生的 S0 模式，S0/S0 和 A0/A0 分别表示 S0 和 A0 产生的同模式的信号。

如图 4(a)所示是所有阵元接收到的散射信号 $A_{\mathrm{l}}^{n}(t)(n=1,\cdots,9)$。$ZA_{\mathrm{l}}^{n}(t)$ 为散射信号作时间反转得到的信号，如图 4(b)所示。各接收阵元重新激励 $ZA_{\mathrm{l}}^{n}(t)$，在检测区域重新接收并进行第二次时间反转得到伴随声场，缺陷处得到聚焦信号 $V_m A_{\mathrm{l}}^{n}(t)$ (m 表示第几个缺陷)，分别如图 5(a)、图 5(b)和图 5(c)所示，$D_m A_{\mathrm{l}}(t)$ 为直接声场中缺陷处接收到的信号。图 5 中的时域信号均根据 Lamb 的传播模型计算所

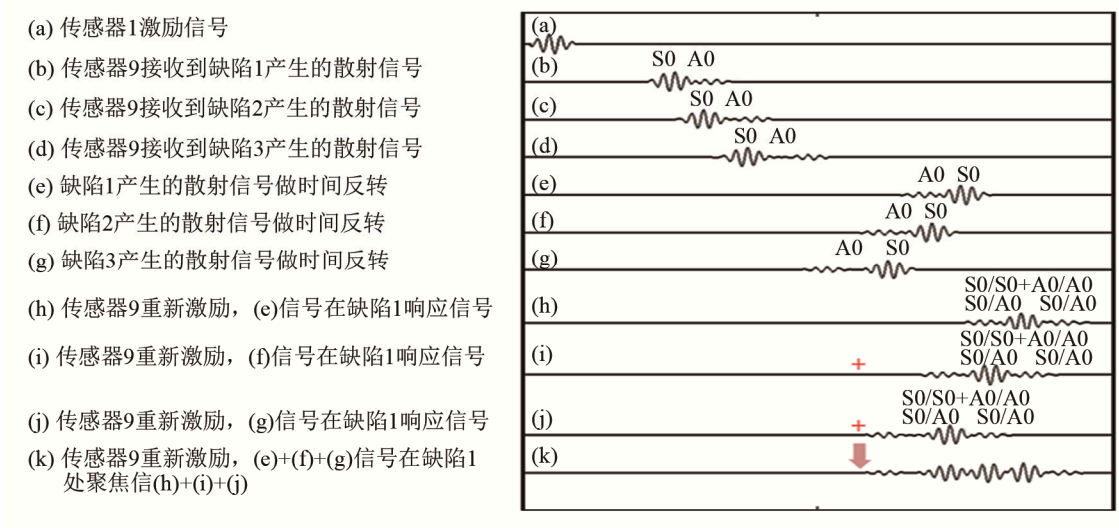
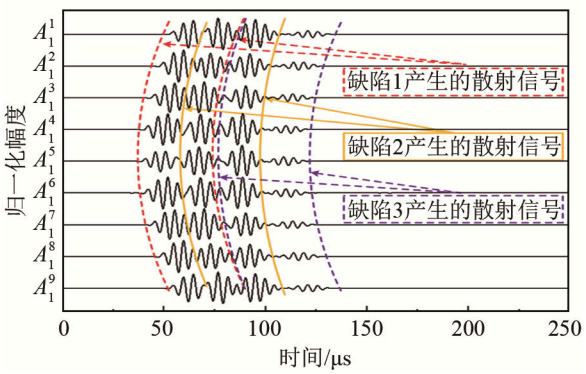
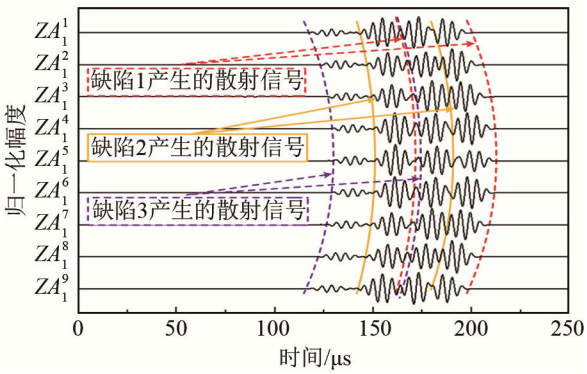


图 3　时间反转对于盲孔缺陷的聚焦原理图

Fig.3　Principle diagram of time reversal focusing for blind hole defects



(a) 接收到的散射信号



(b) 散射信号进行时间反转

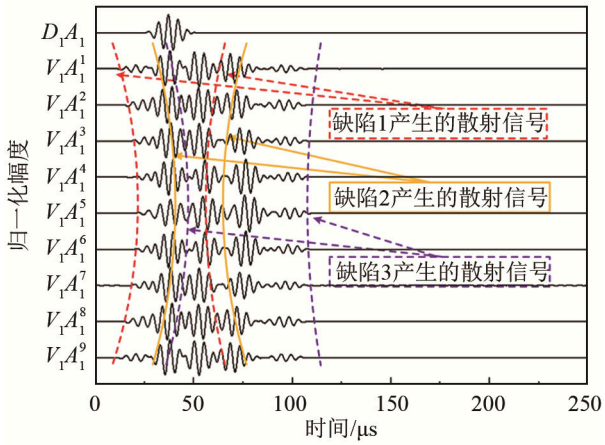
图 4　散射信号及其时间翻转示意图

Fig.4　Schematic diagrams of scattered signal and its time inversion

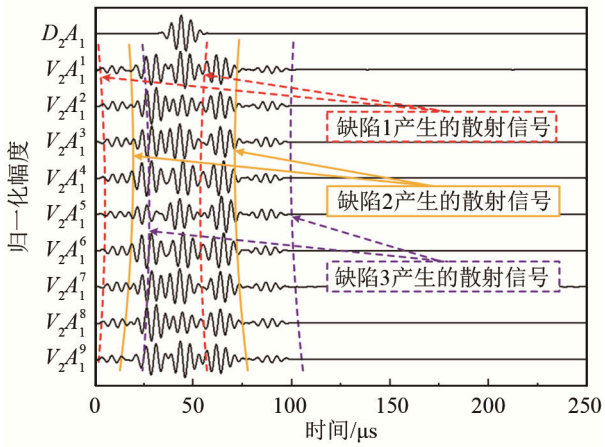
得。3 个缺陷处直接声场和伴随声场的信号聚焦，而非缺陷处不聚焦。非缺陷处接收到的信号如图 5(d)所示。

2.2　成像结果分析

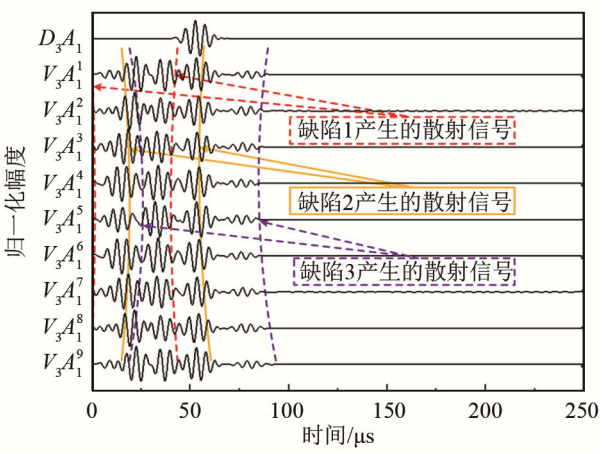
对于非对称的缺陷，拓扑能量成像公式除了克服了声波衍射的限制，还消除了无缺陷处多模式信号混叠的干扰，使得缺陷之间距离小于分辨率阈值的多盲孔缺陷也能分辨出来。拓扑图像利用拓扑能量公式，计算出成像区域中各点处的拓扑能量，再将拓扑能量作为图像的像素值。延时叠加、时间反



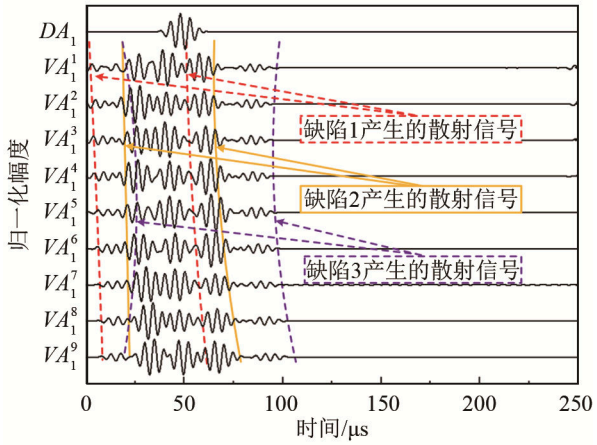
(a) 散射信号在缺陷 1 处聚焦



(b) 散射信号在缺陷 2 处聚焦



(c) 散射信号在缺陷 3 处聚焦



(d) 非缺陷处散射信号不聚焦

图 5 直接声场和伴随声场在盲孔缺陷处实现聚焦和非缺陷处不聚集的示意图

Fig.5 Schematic diagrams of the forward acoustic field and the adjoint acoustic field focusing at the blind hole defects rather than focusing in non-defective area

转和时域拓扑能量成像结果分别如图 6、7 和图 8 所示。

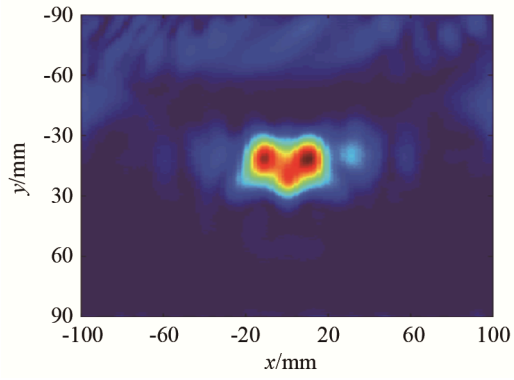
如图 6、7 所示是缺陷之间的距离 $d<d_R$ 的成像结果，延时叠加法和时间反转算法均无法区分出 3 个缺陷，缺陷的大小也无法区分开来。如图 8 所示，时域拓扑能量算法依旧能够区分 3 个缺陷，且缺陷周围没有伪像。

为了更好地评价三种方法对多个缺陷的成像结果，用阵列性能指标(Array Performance Indicator, API)来量化成像分辨率[13]：

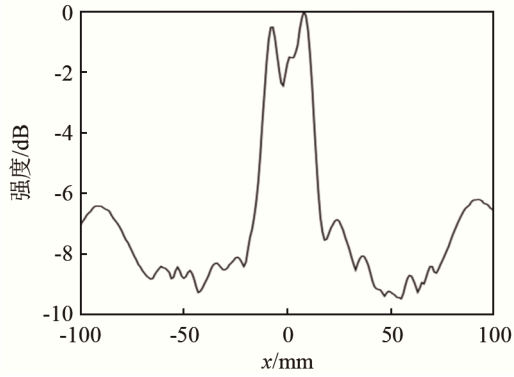
$$I_{AP}=\frac{A}{\lambda^2} \tag{6}$$

式中，A 是长度方向剖面图中强度阈值所截取对应三维图像的横截面积，λ 是兰姆波中心频率处的波长。因此，I_{AP} 的数值越小，表明图像的分辨率越高。如表 2 所示，I_{AP} 为阈值取−3 dB 时的计算结果。

当缺陷间距小于分辨率阈值时，时域拓扑成像



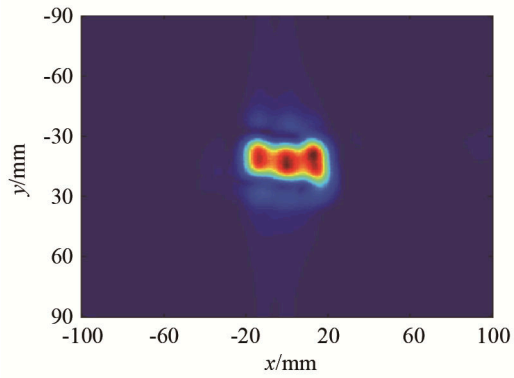
(a) 延时叠加成像



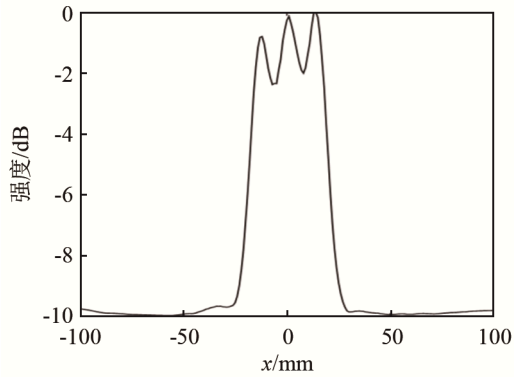
(b) 长度方向剖面图

图 6 三盲孔缺陷延时叠加法成像结果

Fig.6 DAS imaging results for three blind hole defects



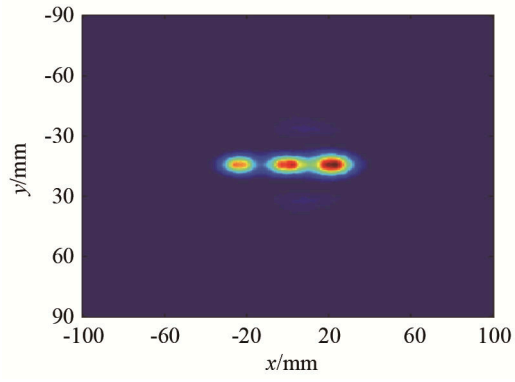
(a) 时间反转成像



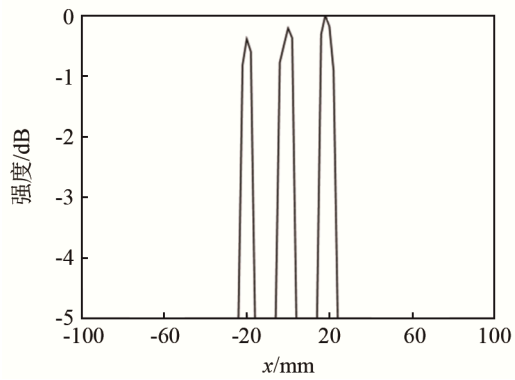
(b) 长度方向剖面图

图 7 三盲孔缺陷时间反转法成像结果

Fig.7 TR imaging results for three blind hole defects



(a) 时域拓扑能量法成像结果



(d) 长度方向剖面图

图 8　三盲孔缺陷时域拓扑能量法成像结果

Fig.8　TDTE imaging results for three blind hole defects

表 2　三种方法对多盲孔缺陷成像的分辨率比较

Table 2　Comparison of the resolutions of multi-blind hole defects of the three methods

成像方法	I_{AP}
DAS	0.995 3
TR	0.684 1
TDTE	0.185 2

法对比延时叠加法和时间反转法，分辨率分别提高了 81.39%和 72.93%。因此，三种方法的分辨率为 $I_{AP,DAS}>I_{AP,TR}>I_{AP,TDTE}$，所以时域拓扑能量法对于盲孔的成像分辨率也要优于另外两种。

3　结 论

本文将拓扑渐进的过程转化为求解直接问题和伴随问题，计算了直接声场与伴随声场，并通过时间反转实现了两个声场的自适应聚焦，构建了以时域拓扑能量为像素值的拓扑成像方法。考虑到分辨率阈值对成像的影响并且通过有限元计算实现盲孔的拓扑成像，展现了该方法在超声兰姆波检测的潜力，具体结论如下：

(1) 基于时间反转时域拓扑成像法，实现了直接声场与伴随声场的自适应聚焦，能够克服声波衍射的限制以及补偿信号的频散，大大提高了成像分辨率。在进行盲孔检测时，时域拓扑能量法相比较延时叠加和时间反转法，具有更好的适应性。

(2) 直接声场并不参与与缺陷的相互作用，不含有散射信号，使得时域拓扑能量成像法不受瑞利准则的约束，可分辨出缺陷间距小于超声阵列成像分辨率阈值的多个非对称盲孔缺陷。

(3) 当多盲孔缺陷距离小于分辨率阈值时，拓扑成像分辨率为 0.185 2，对比延时叠加法和时间反转法的分辨率，分别提高了 81.39%和 72.93%。

参　考　文　献

[1] 张西托, 杜小勇, 王壮. 基于稀疏贝叶斯学习的雷达目标成像技术[J]. 计算机仿真, 2008, **25**(8): 227-230.
ZHANG Xituo, DU Xiaoyong, WANG Zhuang. Radar target imaging techniques based on sparse Bayesian learning[J]. Computer Simulation, 2008, **25**(8): 227-230.

[2] HE J Z, YUAN F G. Lamb wave-based subwavelength damage imaging using the DORT-MUSIC technique in metallic plates[J]. Structural Health Monitoring, 2016, **15**(1): 65-80.

[3] ZHANG X, HUANG J C, SONG E L, et al. Design of small MEMS microphone array systems for direction finding of outdoors moving vehicles[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2014, **14**(3): 4384-4398.

[4] ZENG L, LIN J, HUANG L P. A modified lamb wave time-reversal method for health monitoring of composite structures[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, **17**(5): 955.

[5] ZHU W F, SHAO W, PENG L L, et al. Time-domain topological energy imaging method of concrete cavity defect by lamb wave[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1-13.

[6] AUROUX D, BELAID L J, RJAIBI B. Application of the topological gradient method to color image restoration[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2010, **3**(2): 153-175.

[7] DOMINGUEZ N, GIBIAT V. Non-destructive imaging using the time domain topological energy method[J]. Ultrasonics, 2010, **50**(3): 367-372.

[8] GIBIAT V, SAHUGUET P. Wave guide imaging through time domain topological energy[J]. Ultrasonics, 2010, **50**(2): 172-179.

[9] ZHU W F, ZHANG Y J, FAN G P, et al. Time-domain topological energy imaging with ultrasonic Lamb waves considering multiple defects[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2020, **62**(4): 208-215.

[10] 张海燕, 李加林, 徐梦云. 多缺陷兰姆波拓扑成像[J]. 声学技术, 2019, **38**(5): 520-525.
ZHANG Haiyan, LI Jialin, XU Mengyun. Multi-defect Lamb wave topological imaging[J]. Technical Acoustics, 2019, **38**(5): 520-525.

[11] 张海燕, 刘凡杰, 范国鹏, 等. 各向同性板中盲孔缺陷的兰姆波拓扑成像[J]. 声学学报, 2018, **43**(6): 968-976.
ZHANG Haiyan, LIU Fanjie, FAN Guopeng, et al. Lamb wave topological imaging for blind hole defects in isotropic plates[J]. Acta Acustica, 2018, **43**(6): 968-976.

[12] SIMONETTI F. Localization of pointlike scatterers in solids with subwavelength resolution[J]. Applied Physics Letters, 2006, **89**(9): 094105.
ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Effects of array transducer inconsistencies on total focusing method imaging performance[J]. NDT & E International, 2011, **44**(4): 361-368.