

超声成像检测技术研究进展综述

张鹏辉¹, 赵扬^{1,2*}, 李鹏¹, 周志权², 白雪¹, 马健¹

¹齐鲁工业大学山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250104;

²哈尔滨工业大学信息科学与工程学院, 山东 威海 264209

摘要 超声成像检测(UID)技术具有检测结果直观等优势,是无损检测领域未来的主要发展方向之一。相比传统超声检测方式,激光超声因具有非接触式的特点成为重要检测手段。时间反转成像法可实现时间和空间的自适应聚焦,在非均匀介质中对目标的定位和检测具有广阔前景。介绍了以时间反转法为主的几种典型超声成像方法,对比分析不同成像算法的结果,介绍了超声成像领域常用的仿真软件。以激光超声为切入点对比常规超声,给出了现代超声检测技术概况和国内外先进的工业超声成像检测仪器设备概况,并对未来的成像检测技术进行了简要分析和展望。

关键词 激光超声; 超声成像; 时间反转法; 成像算法; 无损检测技术

中图分类号 TB566

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0200003

Research Progress in Ultrasonic Imaging Detection Technology

Zhang Penghui¹, Zhao Yang^{1,2*}, Li Peng¹, Zhou Zhiquan², Bai Xue¹, Ma Jian¹

¹Laser Institute, Shandong Academy of Sciences, Qilu University of Technology, Jinan, Shandong 250104, China;

²School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, Shandong 264209, China

Abstract Ultrasonic imaging detection (UID) technology has the advantages of intuitive test results, and is one of the main development directions in the field of nondestructive testing in the future. Compared to traditional ultrasonic testing methods, laser ultrasonic detection has gained popularity due to its non-contact characteristics. The time reversal imaging method has a potential application in locating and detecting targets in inhomogeneous media due to its ability of acoustic beam self-focusing in time and space domains. This study primarily reviews the time reversal method and other conventional ultrasonic imaging methods. The results of different imaging algorithms used in the data post-processing are compared and analyzed. Moreover, the professional simulation softwares available for use in the ultrasonic imaging field are briefly summarized. Starting from laser ultrasound and compared to conventional ultrasound, the general situation of the modern ultrasonic testing technology and the advanced industrial ultrasonic imaging testing instruments and equipment at home and abroad are discussed. Further, the future imaging testing technology is briefly analyzed.

Key words laser ultrasonic; ultrasonic imaging; time reversal method; imaging algorithm; nondestructive testing technology

收稿日期: 2021-02-03; 修回日期: 2021-02-28; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010418, 2020CXGC010705)、山东省重点研发计划(2019GSF111058)、哈尔滨工业大学科研创新基金(202006)、齐鲁工业大学(山东省科学院)科教产融合创新试点工程项目(国际合作)(2020KJC-GH12)

通信作者: *zhao.yang@hit.edu.cn

1 引 言

在材料冷热加工和产品服役过程中,时常出现非预期的工件质量问题,例如冷却速度不均匀产生的裂纹会导致残余应力集中、熔融金属在凝固时因未及时排出气体而产生的气孔会削弱材料的连续性、工件长期处于运转状态而造成抗疲劳强度下降。这些问题可能致使试件的报废,严重时可能导致设备系统停止运行,及时对工件进行非破坏性的定量化检测可有效避免危害生产安全的事故发生。研究更加精准的反映内部缺陷信息的成像方法一直以来都是工业检测领域的一大关键课题。

传统的超声无损检测通常基于脉冲回波法得到描绘时间和幅值关系的一维图像,主要表征材料内部缺陷纵向深度的分布情况,难以反映出工件表面或近表面层存在的气孔排布,存在一定的检测盲区。所以只对试件进行简单判别并做出定性分析的方法易受人为因素影响而出现误检、漏检现象。随着现代化工业的迅速发展,传统检测方式已难以满足部分场景下的生产制造需求,设备的结构健康监测和工件的缺陷检测对无损检测技术提出了更高的要求,人们迫切希望得到直观性强、精准度高、可靠性强的超声检测技术,因此研究人员将目光转向材料内部缺陷的直观显示研究。

超声成像检测技术是当代无损检测领域向定量化无损评价方向发展的研究热点。近些年,超声检测在材料性能表征、零部件质量检测、产品性能评价等方面发展极为迅速,作为无损检测技术中进展最快、应用最广泛的检测手段,以穿透力强、灵敏度高、指向性强等优势活跃于航空航天、石油化工、机械制造等诸多领域。

在现代无损检测技术中,超声成像技术是一种令人瞩目的新技术^[1]。超声成像检测利用压电换能器或激光等方式激励超声波在介质中传播,通过一定方法对采集的缺陷回波数据进行分析处理并进行图形重构,使得试件内部微结构以图像形式直观清晰地呈现,进而检测人员基于图像可定量地分析材料体内缺陷的具体情况并做出损伤评估。随着现代数字信号处理、计算机技术、电子信息技术不断进步,超声成像检测技术日趋成熟,成像方法研究和检测技术也更加深入广泛,新生代超声成像设备不断被开发并应用在不同领域的相关场合。超声成像检测技术是未来无损检测的主要发展方向

之一,因此,研究灵活可靠的超声成像检测技术对推进无损检测的应用具有重要的科学研究意义。

2 超声成像方法

由于声波可以穿透金属或非金属表面到达内部,在遇到声阻抗不连续的界面时,会在界面发生反射、衍射、透射等声学现象,于是可利用超声波与缺陷的相互作用得到物体内部结构的声学特性信息,通过超声成像方法将采集到的数据处理为声场传播的可视化图像和缺陷分布图像。在工业超声无损检测中,零部件的形状大小、材质组织结构、损伤分散情况和检测环境往往不同,使得超声波在介质内部的模态和传播方式产生一定差异,从而研究人员需要根据检测的多样性探究不同成像方法。其中,对固体介质中的声学成像方法研究较为广泛,在液体环境下关于弱信号目标的探测成像研究相对较少,在此介绍以时间反转法为主的相关超声成像方法以及几种常见的经典成像方法。

2.1 时间反转法

时间反转法(TR)是一种利用声场互易性和自适应聚焦特性在非均匀介质中表现优异的新成像方法。传统成像方法和一般的现代成像方法在面对复杂环境的强散射体时,声束在随机不均匀介质中会因多途效应发生散焦,引起波形畸变,导致图像分辨率降低,难以达到高质量成像要求。而TR作为一种自适应聚焦方法,可在介质先验条件和换能器阵型分布未知的情况下实现声场能量的会聚,基本原理如图1所示^[2]。由换能器单阵元激励,向靶点发射单信号,声波信号在不均匀介质内部发生无规律的声散射,传播至目标后经不同路径反射回换能器阵列并储存;之后阵列换能器对接收的信号进行时间反转处理,即按照先到后发、后到先发的原则使信号时序反转后再发射,由于介质具有稳定的理化特性,故不同阵元重新发射的信号将沿原路径传播,声场能量最终在原目标靶点会聚;最终完成对成像域内目标的声场聚焦,从而实现增加目标对象能量,提升成像质量的目的。该方法是从光学中的相位共轭镜(PCM)扩展到声学中的,最早由巴黎大学的 Fink 教授^[2]提出,他给出了时间反转镜(TRM)这一概念,同时通过水箱试验,初步证明了TRM对非均匀介质中的未知目标实现自适应聚焦的可行性,为水下目标和复杂介质中目标检测提供了新型超声成像方法。

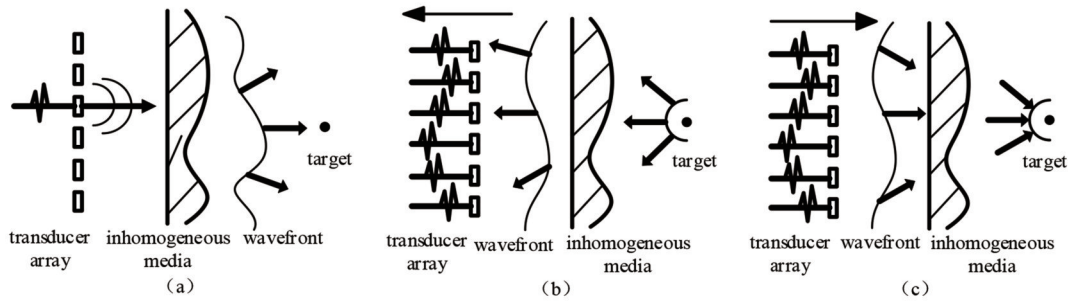


图 1 时间反转自聚焦原理^[2]。(a)单阵元发射;(b)多阵元接收;(c)声束自聚焦

Fig. 1 Principle of time reversal self-focusing^[2]. (a) Single-array emission; (b) multi-array reception; (c) acoustic beam self-focusing

时间反转成像法可经过多次迭代来增强聚焦效果,但当成像域内存在多个散射目标时,该方法存在局限性,即只能对其中散射能力最强的单一目标实现有效聚焦。针对多目标聚焦成像问题,Prada等^[3]提出了时间反转算子(TRO)。后来,Prada和Fink将TRO和迭代时间反转法结合,提出了时间反转算子分解法(DORT),实现了不均匀介质环境下多目标的选择聚焦成像^[4]。上述成像方法都是针对点目标这一概念提出的,对于具有一定轮廓的扩展性目标,Devaney等^[5]将时间反转法和多信号分类法并用,提出了时间反转多信号分类法(TR-MUSIC),用理论和实验论证了该方法对距离分辨率较差的多散射目标同时聚焦成像的可行性,丰富了时间反转法的应用范畴。

在国内,中国科学院声学研究所的汪承灏院士^[6]首先报道了这一技术,利用改进的时间反转法的自聚焦特性先后对分层介质、固体介质、各向异性介质等不同材料进行聚焦和成像验证。邓菲等^[7]将DORT引入基于导波的板缺陷成像检测研究中,成像分辨率明显优于传统时间反转法。针对宽带扩展性目标的检测较为复杂的问题,李春晓等^[8]将拓展性目标分解为有限个独立的散射体模型,在时间反转算子分解的基础上,利用全信号子空间在整个宽带上进行DORT成像,与选择性聚焦和TR-MUSIC相比,旁瓣水平明显降低。为解决时间反转的信号处理过程中声场幅值较低问题,李震等^[9]结合仿真与实验,证明了进行角度增益后的超声时间反转聚焦信号比常规激励的声波信号有更强信噪比,可有效提升板件中对缺陷的检测能力,图2为时间反转的换能器布置情况。

现阶段,对时间反转成像法的研究大多停留在仿真和实验层面,少部分结论已应用于复杂的水下

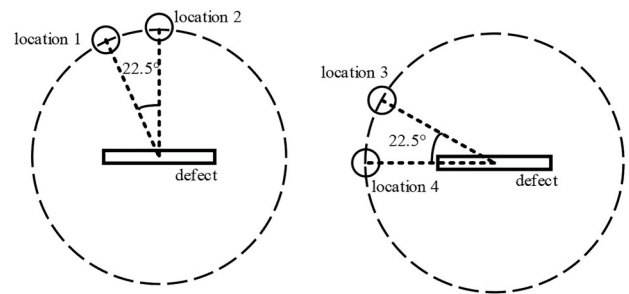


图 2 虚拟增益时间反转法布置^[9]

Fig. 2 Layout of virtual gain time reversal method^[9]

环境。由于可以很好地补偿Lamb波的频散效应,该方法的自适应聚焦特性在结构复杂的薄板缺陷检测中很具有前景,作为可精准定位的成像手段,时间反转法正在由理论分析过渡到实际应用。但在面对多途效应不明显的环境时,时间反转法对目标成像的检测效果相比其他方法并不具备显著优势,在特定情况下,水平时反阵列产生的聚焦峰会发生移动而变得不稳定^[10]。发生多重散射情况的多个微结构扩展目标的识别成像是研究热点,加快运算速度,克服低信噪比的干扰,使该方法更加成熟地应用于工业成像检测和水下目标成像探测领域。

2.2 扫描成像法

在常见的超声成像方法中,扫描超声成像^[11]是无损检测领域研究早期使用最广泛的成像方法,也是操作较为便捷的成像手段,根据扫查方式不同,可分为B扫描、C扫描、D扫描、S扫描、P扫描等。图3为部分扫描方式示意图,B扫描成像得到平行于声束传播方向且垂直于试件表面的断面图,C扫描成像得到垂直于声束传播方向且平行于试件表面的截面图。上述扫描方式将接收到的缺陷回波峰值信号作为成像处理的基础数据,将异质材质或

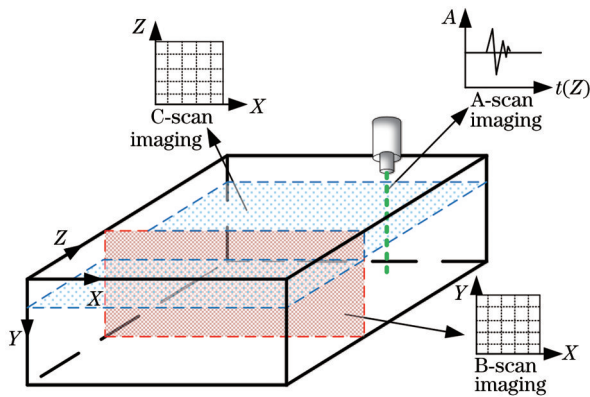


图 3 超声扫描成像原理图

Fig. 3 Diagram of ultrasonic scanning imaging

缺陷分布在灰度图上以不同亮度显示,针对不同剖面进行扫描成像。单独使用一种扫描方法得到的缺陷图像存在信息量不足的缺点,如B扫描成像只能表示样品内部缺陷的深度信息,C扫描成像只能表征样品内部缺陷的水平分布情况,而且单一的扫描成像法存在分辨率较差、定位准确性低等问题,故不宜单独用于高精密仪器的检测。在现实检测过程中,通常将其中两种或多种扫描方式相结合使用。

2.3 合成孔径聚焦法

在传统的成像方法中,传感器阵元的尺寸会极大地限制聚焦成像的分辨率,目标的方位分辨率随着声信号传播距离的增加而降低,低频超声信号穿透能力强但成像分辨率难以达到理想效果。合成孔径聚焦技术(SAFT)^[12]应用小尺寸换能器及较低的工作频率,通过时延或相延聚焦可在远场和近场(菲涅耳区)工作,同时获得较高的方位分辨率,并且可突破经典衍射理论的限制,增加图像分辨率。多阵元合成孔径聚焦原理如图4所示,在同一时刻激励多个换能器阵元发射超声波,重复进行 N 次发

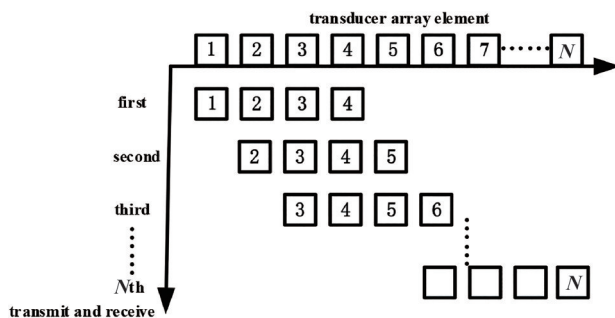


图 4 多阵元合成孔径聚焦成像原理图

Fig. 4 Diagram of multi-element synthetic aperture focused imaging

射和接收的过程,并由该组阵列接收到的回波信号,得到多个目标域的低分辨率图像,其中 N 为换能器阵元数。对多组图像进行合成重构处理,得到高分辨率的目标成像图,但其重建理论复杂,待存储和待处理数据多,对系统软硬件要求较高。

2.4 相控阵法

在众多成像方法中,相控阵成像^[13]在工业检测中发展较快,技术较为成熟,成像原理如图5所示。相控阵成像方法通过控制各阵元的激励时序来改变声场的相位关系,以完成对声束的偏转和聚焦效果,提高信噪比和检测能力,最后利用电子扫描对缺陷进行成像,具有分辨率高、检测速度快、灵敏度高、可实时成像等优点,然而远离聚焦点处成像分辨率不高,限于复杂晶粒结构体中声束传播的多变性,适用范围存在局限性。图6为Simonetti^[14]分别用相控阵法和TR-MUSIC对亚波长缺陷钢板进行成像的效果图,很明显,在特定环境下TR-MUSIC成像结果具有更高的分辨率。另外还有衍射时差(TOFD)超声成像^[15]、ALOK成像^[16]、超声全息^[17]、超声显微镜^[18]等现代超声成像方法。

3 仿真模拟

3.1 成像算法

延时叠加波束形成算法(DAS)是超声成像中最传统、最基础、也是应用最广泛的成像算法^[19],通常使用聚焦和偏转、幅度变迹、动态孔径技术实现对声波束的控制,很多成像方法都是依据此方法衍生而成。为改善DAS加权值无法改变的问题,学者们开始研究自适应波束形成算法^[20],又称最小方差波束形成算法,该算法可较好地提高成像空间分辨率,但仅限于远场,稳定性较差,许琴^[19]使用Field II工具箱对二者进行了仿真模拟,验证了改进后算法的优越性。还有如合成孔径聚焦算法^[21]和全聚焦成像算法(TFM)^[22]等一些成熟算法已广泛用于相控阵技术及其他成像方法中并投入实际应用。图7为Li等^[23]利用仿真软件得到的传统TR与改进后的TRIS仿真成像对比图,很明显,改进后的TRIS只需要一个发射源,对于多目标的成像分辨率有极大改善。

上述时间反转法中,TR-MUSIC的超分辨率能力在噪声环境中易受到干扰的问题一直困扰着研究学者,Asgedom等^[24]提出结合相位相干的TR-MUSIC,即相位相干多信号分类法(PC-MUSIC),

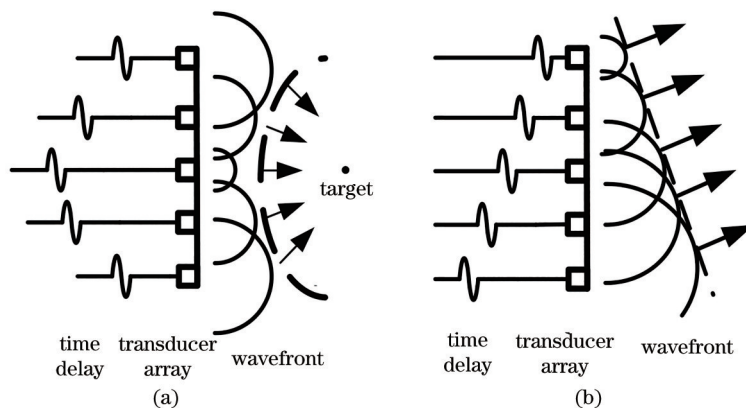


图 5 相控阵。(a)相控聚焦原理图;(b)相控偏转原理图

Fig. 5 Phased array. (a) Diagram of phased array focusing; (b) diagram of phased array deflection

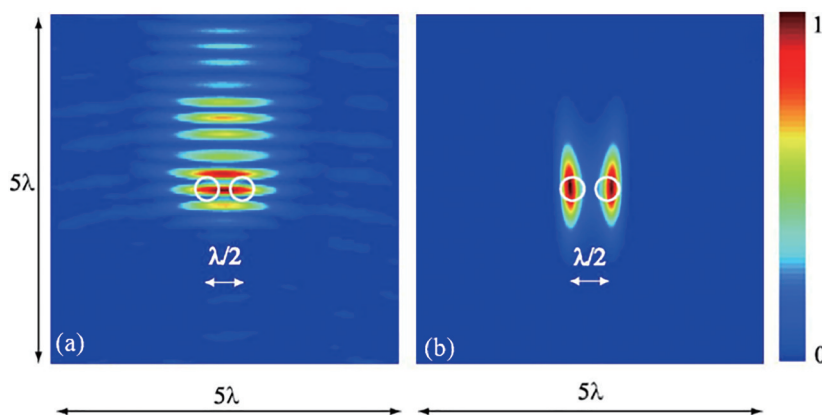


图 6 相控阵成像与 TR-MUSIC 成像结果^[14]。(a)相控阵成像;(b)TR-MUSIC 成像

Fig. 6 Results of phased array imaging and TR-MUSIC imaging^[14]. (a) Phased array imaging; (b) TR-MUSIC imaging

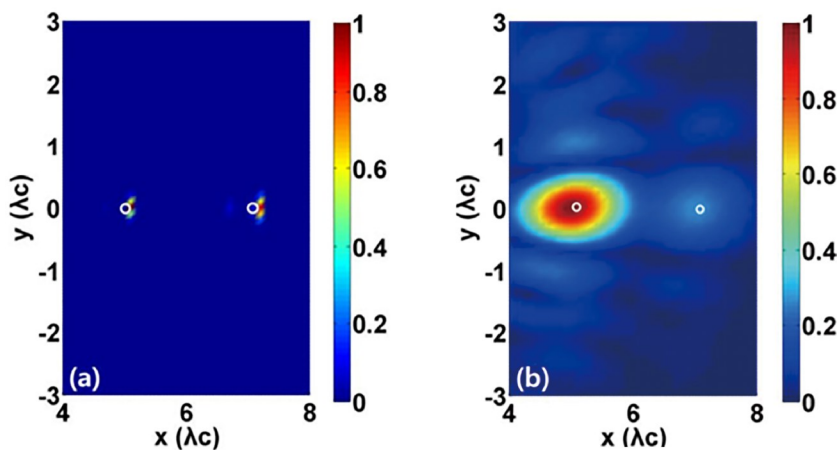


图 7 成像结果对比^[23]。(a)TRIS 成像图;(b)传统 TR 成像图

Fig. 7 Comparison of imaging results^[23]. (a) Imaging of TRIS; (b) imaging of traditional TR

通过蒙特卡罗仿真结合水槽实验,证明了 PC-MUSIC 比普通 TR-MUSIC 具有更好的分辨噪声中散射体的能力。针对目标数量超过传感器数量时出现的成像分辨率不理想问题,Labyed 等^[25]提出了一种加窗的 TR-MUSIC,该方法使用合成孔径超声

系统将平面划分为若干子区域,对子区域进行成像后合并,图像质量和分辨率得到显著改善。康维新等^[26]利用小波阈值去噪算法和小波包分解算法对时间反转聚焦进行改进,在原时间反转效果的基础上进一步突出有用信号,该方法在噪声中可有效分

离出奇异点,实现信号聚焦的图像重构,提高信噪比。苗晓婷等^[27]将加权分布成像算法用于时间反转法,建立了一种新的兰姆波损伤识别方法。艾春安等^[28]分别用求和及求积两种形式的算法将时间反转法应用于 SRM 壳体缺陷进行成像,开发的超声波相干耦合检测系统克服了传统超声时间反转成像需要耦合介质的问题。Fan 等^[29]提出了一种可

以突破衍射极限的基于多信号分类的中心频率时间反转法,给出了该方法在给定频率宽带上的多频形式和相位相干形式,同时将这三种算法应用于实验超声阵列数据,成像结果如图 8 所示。结果表明,三种算法均可实现超分辨率成像并准确定位目标,同时多频形式和相位相干形式的多信号分类时间反转法可有效抑制“伪像”的产生。

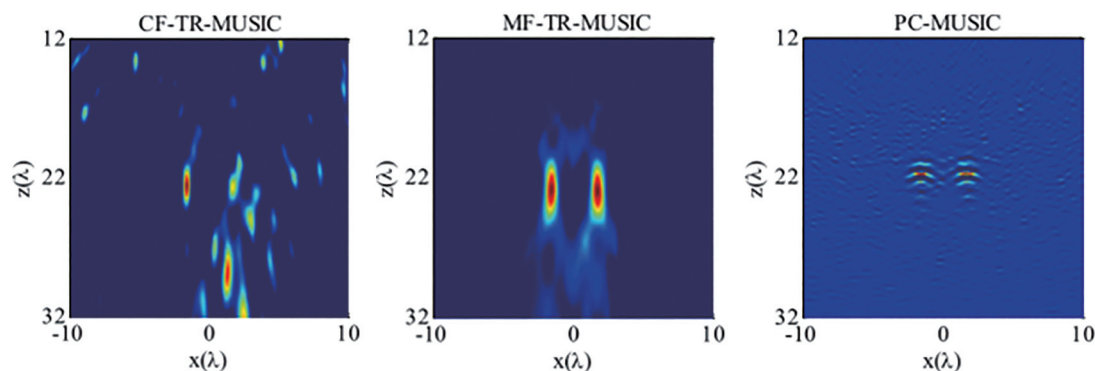


图 8 三种算法的成像对比^[29]

Fig. 8 Imaging comparison of three algorithms^[29]

3.2 仿真软件

计算机技术的飞跃进步为声学、光学、力学、机械等工业学科的仿真研究提供了便利条件,仿真是从理论过渡到实验并投入实际工程使用的重要途径,对类似航天飞行器和超远射程运载武器等高端精密设备的前中期开发尤为重要。将仿真技术用于超声成像检测,通过对换能器阵列、介质条件或材料属性等各参数项进行修改,可观测到肉眼无法查看的声波在材料组织内部的传播过程和声场分布情况,并且可保留不同时刻的采样数据,便于研究人员进一步的优化分析,具有灵活、便捷、经济等巨大优势。声场仿真中常用到解析法和数值法,其中数值法因适用范围广、结果精确等特点得到研究人员的认可,具体方法主要包括有限差分法(FDM)、有限元法(FEM)、边界元法(BEM)等^[30]。基于不同种类方法,通过仿真软件使用成像算法对声场数据进行图形重构,可将包括缺陷在内的介质中的微结构信息和声波在组织内部的传播情况直观地表现出来。

Matlab 这款强大的数学分析软件中的数值分析功能广泛应用于声场仿真的研究中,k-Wave^[31]是搭建在 Matlab 环境下基于 k-space 伪谱法的开源声学工具箱,可对均匀或非均匀介质中光声和超声信号进行仿真成像。Field II^[32]是由丹麦理工大学 Jensen 于 1996 年开发的程序,运行在 Matlab 环境

下,如美国 GE、西门子等多家大型公司也用该软件进行超声声场的仿真和产品研发,该程序在工业超声研究领域有很高的权威性。Imagine3D^[33]是加拿大 UTEX 公司开发的可视化超声检测软件,可模拟材料在三维空间的声场分布。CIVA^[34]是法国原子能委员会(CEA)研发的针对无损检测的仿真软件,主要完成对超声检测声场的计算模拟以及声波与各缺陷响应的模拟。大型商用有限元分析软件 Comsol Multiphysics^[35]为解决偏微分方程的多物理场耦合仿真提供了良好的操作环境。图 9 为本研究

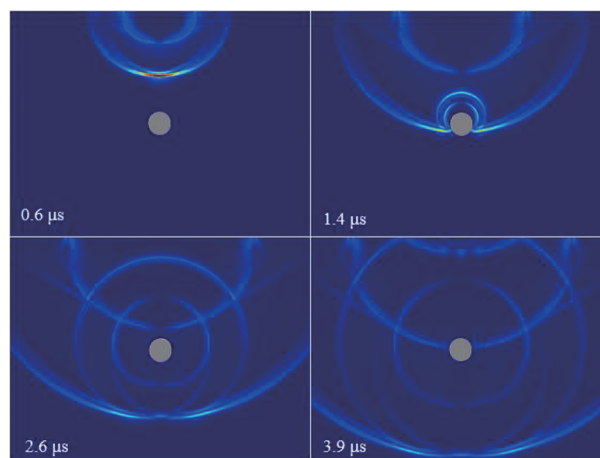


图 9 固体中的超声波与缺陷相互作用的数值模拟

Fig. 9 Numerical simulation of ultrasonic interactions with defects in solids

团队利用 Comsol 软件对声波与固体中气孔缺陷在不同时刻下相互作用的有限元模拟仿真情况,其中固体两侧已进行吸声处理。

4 检测技术

工业领域生产制造过程常用的无损检测方法有超声检测(UT)、涡流检测(ET)、射线检测(RT)、磁粉检测(MT)、渗透检测(PT)。其中超声无损检测技术以指向性强、检测灵敏度高、成本较低、对人体无害等优势发展最迅速,使用频次最高。超声波检测方式主要分为接触式和非接触式,其中非接触式超声检测中的空气耦合^[36]、电磁超声(EMAT)^[37]、激光超声检测^[38]等方法是现代检测研究的突破方向。

4.1 传统超声检测

传统超声探伤过程中,一般由压电换能器完成对超声信号的发射和接收环节,整体操作简单。按照不同方式对多个探头进行排列,可组成常见的线形、扇形、矩形等几何形状分布的超声阵列,用其控制声场的空间聚焦和偏转,增强目标域的声场能量,达到提高信噪比、改善成像质量的目的,实现对大部分表面平整构件的内部缺陷检测。换能器阵列技术普遍适用于工业检测的各大领域,压电换能器如图 10 所示。为保证检测的灵敏度和可靠性,传统超声检测往往还需添加耦合剂或采用水浸法^[39]以增大声波在介质内的传播能量,但耦合物质的长期使用可能会削弱试件的理化性质,降低结构体的完整性,在一定程度上可能会影响敏感试件对裂纹的检测结果。除了在对复合材料这类新材料进行检测时遇到障碍外,对于一些复杂工件深处的微结构而言,换能器自身带宽有限而且探头难以固定贴合



图 10 压电换能器实物图

Fig. 10 Picture of piezoelectric transducer

表面,不能进行遥测,高温恶劣环境下也无法对其完成常规检测步骤,传统的压电换能器的局限性一目了然。提高换能器灵敏度和可靠性是传统检测技术的主要研究方向,开发新型可靠的检测手段及完善现有传统和先进检测技术是现代化工业的必然要求。

4.2 激光超声检测

激光超声是光学、传热学、声学等多学科交叉的热门技术,超声波的激励和接收模式与使用传统换能器进行检测的方式不同,但与在组织内部发生的声波传播过程及与缺陷相互作用的机理一致。根据材料对脉冲激光所能承受功率密度阈值的不同,激光在固体中诱导超声的现象可分为热弹机制和烧蚀机制两类^[40]。具体来说,通过对脉冲激光在空间和时间上进行调制,控制激光器向靶材发射光脉冲,因材料表面吸收来自激光的能量,表面迅速温升,在未达到材料损伤阈值之前,材料内的晶格在一定弹性范围内小幅增加,源自热膨胀的切向压力会使介质表层发生细微的位移并形成声场。由于激光产生的热源只在表面作用,脉冲能量不高,此时声信号幅值与功率密度呈线性相关,这就是激光超声中的热弹机制。而烧蚀机制则在脉冲功率密度达到材料的损伤阈值后发生,材料表面会发生熔化、汽化现象,产生的小部分等离子体会向外喷射,施加给垂直于材料表层方向一定反作用力,致使声波的产生。二者原理如图 11 所示。由于热弹机制可控性好,而且不会对材质表面造成实质性损伤,符合无损检测的要求,所以在研究中更受人们关注。

张淑仪^[41]和钱梦騄^[42]在早期便对激光超声检测技术进行了报道。沈中华团队^[40]研究了纳秒激光脉冲与不同固体材料的作用机理,建立了激光辐照硅、铝板、薄膜等固体材质的仿真模型,并通过实验证明了激光超声检测技术的可行性。随着激光器的不断进步,研究人员对激光与物质的作用原理的研究愈发深入。针对激光超声检测过程中外界噪声和入射波对成像质量的干扰影响,朱洪玲等^[43]采用局部滤波算法滤除噪声干扰,并结合罚函数削弱散射波的干扰,加入拉普拉斯二阶微分算子成功地改善了可视化图像质量。朱倩等^[44]利用激光超声完成了对双层层压复合材料损伤信号的激励与接收,并采用波数滤波损伤成像算法实现了复合材料中缺陷的定位和形状成像。杨连杰等^[45]通过对铝试块进行激光超声声场可视化实验,研究了不同

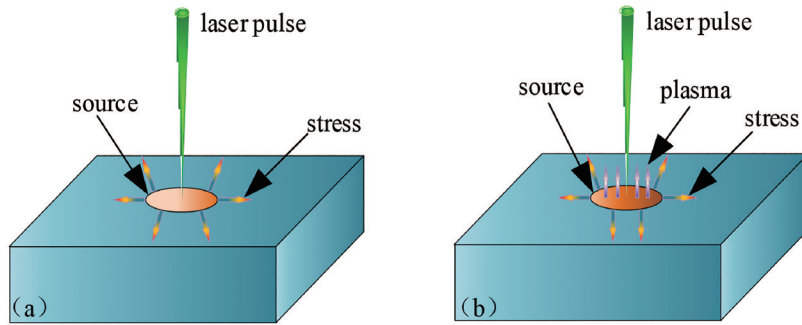


图 11 激光在固体中诱导超声示意图。(a)热弹机制;(b)烧蚀机制

Fig. 11 Diagram of laser ultrasound in solids. (a) Thermoelastic mechanism; (b) ablation mechanism

深度缺陷处表面波的反射和透射情况,并给出了缺陷深度与反射系数及透射系数的关系。现代化的科学技术利用激光超声手段已可实现对管道表面^[46]、带涂层金属板件^[47]、钢轨^[48]等各类材质试件的裂纹探测、气孔缺陷定位成像检测,图 12 为激光超声检测钢轨示意图^[48]。

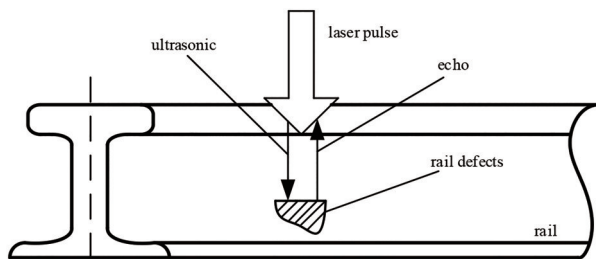


图 12 激光超声检测钢轨原理示意图^[48]

Fig. 12 Laser ultrasonic detection principle for rail^[48]

利用激光激励超声进行检测这一技术除了可对材料内部缺陷进行检测外,还可用于材料的弹性模量和残余应力的检测,激光超声在面向高温、高压等恶劣环境时相对于传统检测技术表现出巨大优势。针对目前激光超声存在对金属箔材的弹性常数研究精度不高、需预先设置误差的猜想值而且计算复杂的问题,陈龙等^[49]提出了一种利用激光超声快速测量材料弹性常数和泊松比的数值方法,分别对镁锂合金、不锈钢和铝合金进行有限元模拟和实验,在 3% 以内的误差实现了 40~193 GPa 的参数测量,证明了该方法可精准地检测金属材料的力学参数。冯湾湾等^[50]利用实验室自主研发的激光超声场检测仪对铸铁制件表面不同位置的残余应力进行了测定,同时与 X 射线应力法对比,发现通过激光超声表面波法得出的残余应力与 X 射线应力法的变化趋势一致,为激光超声在材料的残余应力测量方面提供了依据。针对增材制造技术中应用激光熔化技术在层内累积的残余应力,庞金城

等^[51]采用临界折射纵波法检测应力,通过对激光融化技术制成的金属制件进行实验,有效地实现了对工件中残余应力的检测,同时利用小孔法证明了临界折射纵波法在增材制造过程中在线监测残余应力的可能性。不同温度尤其是高温下的声速变化规律对缺陷检测和材料性质研究十分重要,为此,陶程等^[52]在 20~450 °C 条件下对铝材进行了声速数值模拟,模拟结果如图 13 所示,脉冲激光产生的超声波对温度敏感,纵波和横波的声速随温度的升高而降低,并呈现明显的线性关系。油气运输使用的管道长期处于潮湿、高温、高压环境下,在疲劳状态下易产生管道裂纹,易受电磁干扰,不易采用传统超声检测和电磁技术检测。针对这一问题,赵万里等^[53]通过仿真和实验构建了一种低频环境下的基于激光超声的油气管道焊缝缺陷的精确检测方法,为恶劣环境下的工业材料检测提供了思路。

激光超声检测技术不仅可用于固体材料的无损表征^[54],对海洋资源探测和海底武器监测同样适用,这一技术有利于提高水体目标的检测能力,进一步巩固海域国防领域。在空中平台发射激光,置于水中的接收设备收集超声信号,可完成水下目标物体的跨介质遥感探测,通过对接收到的水下回波数据进行信号处理来完成水下目标成像的方式具有机动性强、检测方式灵活等特点。图 14 为跨空-水下激光超声示意图^[55]。为实现不同检测方式的优势互补,现代化工业检测正在探索多种技术融合的混合检测技术,以提高检测效率和可靠性。Kenderian 等^[56]使用激光-空气耦合超声换能器完成了对铁轨底座裂缝的检测,该方法的成功率极高。Dixon 等^[57]在铝板中利用激光激发兰姆波并用电磁换能器探测,完成了对裂纹信号的检测。赵扬等^[58]将可激发高频声波的激光与对表面适应力较强的 EMAT 相结合,采用激光-电磁超声检测技

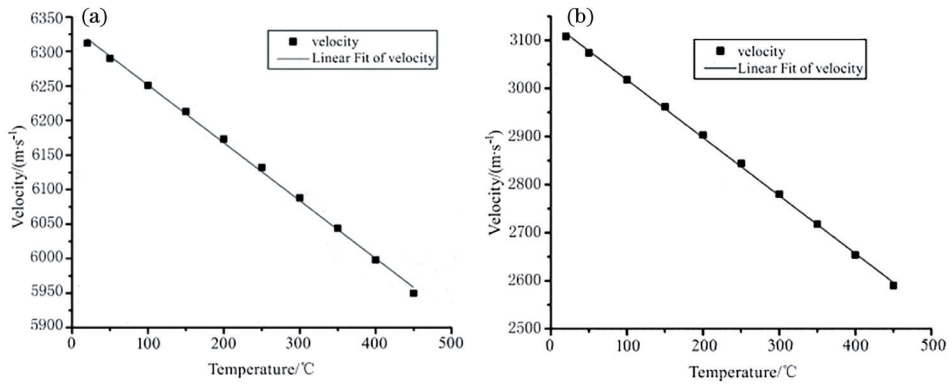


图 13 声速随温度的变化^[52]。(a)纵波声速;(b)横波声速

Fig. 13 Variation of velocity with the temperature^[52]. (a) Velocity of longitudinal wave; (b) velocity of transverse wave

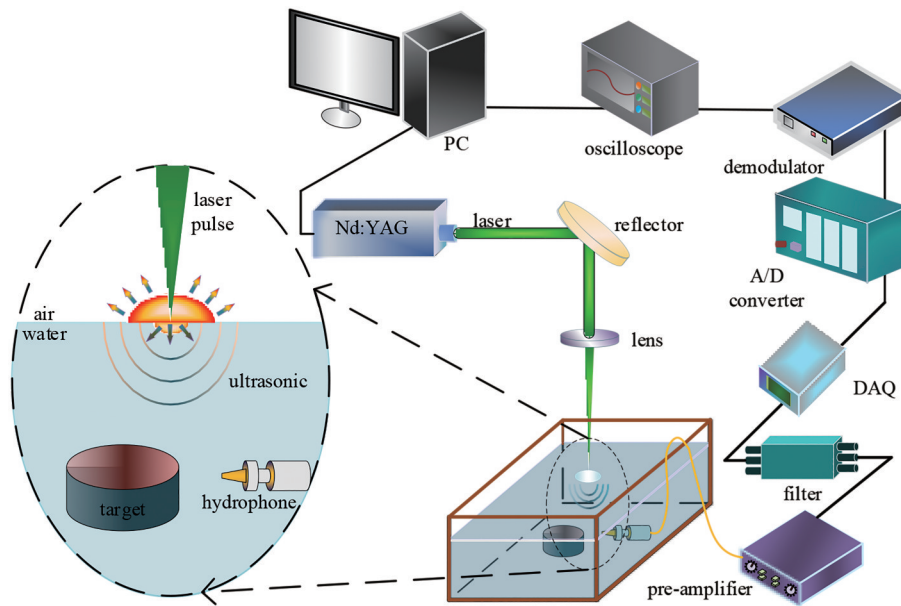


图 14 跨空-水下激光超声示意图^[55]

Fig. 14 Laser ultrasonic through air and water^[55]

术,成功实现了对钢材内部缺陷的检测。进一步地,谷艳红等^[59]对比分析了激光干涉仪和电磁超声换能器接收的由激光产生的超声信号,实验结果表明,激光超声与电磁超声相结合的方式可提高检测精度,且相比传统的干涉仪接收方式,具有更高的稳定性。

5 超声成像仪器

5.1 发展现状

近年来,高端制造业和高精密仪器产业的快速发展带动了超声成像设备的进步,研究人员对各领域所需的设备进行不断研究开发,促使成像仪器向自动化、数字化、便携化、智能化方向迈进。在超声

成像检测仪器的研发和应用层面,国外各大公司起步较早,已有大量成像设备应用到实际生产制造的检测当中,国内的成像检测仪器产品研发技术相对滞后,部分技术仍停留在实验研究进程中。在实际工业检测中,大多引进国外早已发展成熟的成像设备投入使用,但国内不少研究机构和企业公司在困难境遇下仍凭借先进技术创新研发出具有自主知识产权的超声成像检测仪器,为各种新兴无损检测领域研发成像检测设备带来了新的发展动力。

国外具有代表性的大型成像无损检测仪器设备制造公司以美国的通用电气公司(GE)、日本的奥林巴斯公司(Olympus)、加拿大R/D TECH公司、法国的M2M公司、德国Krautkramer(KK)公司等为

首,旗下的产品早已成熟化并应用于工业及军事国防等领域。国内可实现规模化生产且具有先进水平的超声成像仪器的公司以汕头超声仪器研究所有限公司和武汉中科创新公司为代表,以及近些年发展势头迅猛的金波公司、北京北极星公司、美泰科仪公司等,都推动着我国超声成像无损检测设备研发的进步。

5.2 国外商用成像设备

OmniScan X3是Olympus新推出的以全聚焦方式(TFM)为基础的相控阵超声成像检测探伤仪,如图15所示,该设备同时搭载了声学影像工具和扫查工具,可最多同时显示4种模式的不同角度的图像,提供涵盖油气管道、焊缝、高温氢致缺陷、耐腐蚀合金和复合材料等问题的解决方案。航空航天领域认可的设备制造商以色列ScanMaster制造的大型超声波水浸LS-500系列工业扫描设备是一台模块化的C扫描检测仪器,可实现对冷/热轧铝板、钛棒、转子、叶片等工件的成像检测。图16是俄罗斯ACS公司生产的A1040MIRA超声断层成像检测仪,该设备是针对钢筋混凝土进行结构3D影像的检测成像仪器。



图 15 OmniScan X3 检测仪
Fig. 15 OmniScan X3 device



图 16 A1040MIRA 检测仪
Fig. 16 A1040MIRA device

5.3 国内商用成像设备

CTS-PA322T是我国汕头超声仪器公司自主研发的基于相控阵法的全聚焦实时超声成像检测系统,可完成对碳纤维复合材料、奥氏体不锈钢、壳体铸件、复杂锻件等金属或非金属材料工件的高精度实时3D全聚焦成像检测,其优势在于能以旋转的方式观察被检测工件的立体成像,且缺陷细节具体易判读。针对管道腐蚀、压力容器等检测,汕超旗下SyncScan 32P/32PT型超声成像检测仪可适应无损检测要求。对于平面、圆柱体、复杂曲面零件,丁旭升等^[60]介绍了六轴水浸式超声C扫描自动成像系统。中科创新的HS PA20-P是一款超声波相控阵检测仪,能满足绝大多数常规超声相控阵检测的应用需求。TopScan-UPA是京声普探公司拥有完全自主知识产权的一款能代表国内超声相控阵新行业标准的国产仪器,具有常规超声和相控超声的多通道配置功能。

我国在激光超声成像无损检测领域的设备研制一直空白,西安金波检测仪器公司自主研发的激光超声波可视化检测仪LUVI系列产品是激光超声无损检测领域的革命性突破,使人们首次能够观察到超声波在介质内部的实时传播过程并直观判断材料的缺陷分布,激光超声波可视化检测仪如图17所示,其可视化原理如图18所示^[61],所具备的超声可视化识别技术达到国际领先水平。

超声无损检测涉及领域广泛,成像检测设备种



图 17 激光超声波可视化检测仪^[61]
Fig. 17 Laser ultrasonic visualizing inspector^[61]

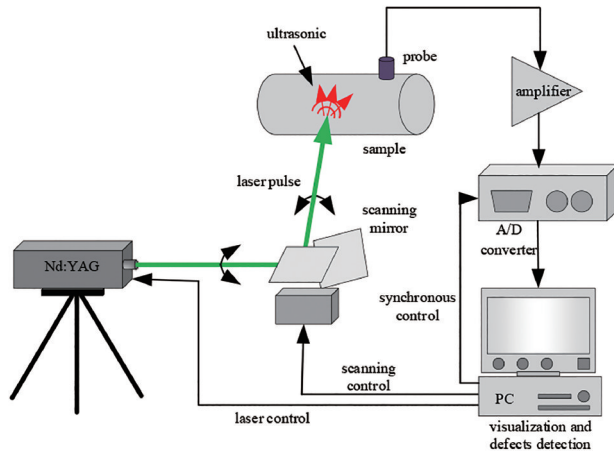


图 18 激光超声波可视化检测仪的可视化原理图^[61]

Fig. 18 Diagram of visualization principle of laser ultrasonic visualizing inspector^[61]

类表现出多元化。根据各行业产品缺陷性质及检测环境的复杂程度,选择适合的超声成像检测设备可更加高效地完成材料的检测,通过对容易理解的直观图像分析缺陷分布情况,达到无损评估的目的。现阶段的成像检测设备通常结合多种扫描方式,利用相控阵手段和 TOFD 等方法进行产品研发,提升无损检测过程的准确性,降低缺陷分析的复杂程度,使无损检测成像设备不断更新,以适应不同成因损伤的材料以及更加恶劣环境。

6 总结与展望

随着工业制造对产品质量及设备服役要求的提高,面对高温、高压、强辐射等复杂环境,工件长期在疲劳状态下作业,加之冲击、震动等因素造成的结构内部损伤缺陷,传统的无损检测方式已无法满足高速发展的机械零部件的现代检测需求,超声成像检测技术作为现代工业化中先进的检测手段已成为研究热点。电子信息技术和材料学的发展使得相控阵压电超声检测技术已趋于成熟,大部分设备实现了便携化要求,正在向智能化、多功能化方向迈进。在不均匀介质中,成像质量往往受多途效应影响,造成波形畸变,导致图形失真,时间反转法因自适应聚焦能力可有效补偿多途效应而受到广泛关注,通过改进迭代时间反转法可实现对多目标的探测定位成像,该方法在固体缺陷检测、水下声学、室内定位、医疗诊断成像领域发展迅速。激光器的不断革新和光声效应机理研究的不断深入为具有非接触式性质的激光超声检测手段提供可靠支持,在特定检测环境下显示出不可替代的巨大

优势。

从总体角度来看,我国部分核心检测技术虽已走在世界前列,但距离成熟工业成像检测产品大量出口仍有一定距离,上述方法和技术仍存在不足: 1) 激光超声系统造价昂贵、整体操作复杂、光声转换效率较低等问题制约着激光超声技术的发展,远达不到普及应用的范畴; 2) 时间反转法对于大型材料内部缺陷和气孔等拓展目标的表征精度不足; 3) TRM 通常是收发合置的阵列装置,硬件系统复杂性和功耗较高,始终限制着该成像方法的发展。

完善巩固现有超声成像方法,使目前停留于仿真和试验的成像技术早日走出实验室,投入实际检测中,尝试将多种技术手段相融合,发展新型超声成像检测技术,弥补各方法的不足,将时间反转法的时空自适应聚焦特性用于非线性材料缺陷探测是一重要课题。大力研究出可实时在线的超声成像检测技术及设备对实际无损检测发展具有重要意义。未来,将激光超声检测系统打造为便携式轻量化设备有利于拓展无损检测的适用范围,实现非接触式超声成像检测技术在无损检测领域更为广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] Shen J Z. Acoustic imaging and its application in NDT[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 1994, 16(7): 202-206.
沈建中. 超声成像技术及其在无损检测中的应用[J]. *无损检测*, 1994, 16(7): 202-206.
- [2] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields. I. basic principles[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, 39(5): 555-566.
- [3] Prada C, Fink M. Eigenmodes of the time reversal operator: a solution to selective focusing in multiple-target media[J]. *Wave Motion*, 1994, 20(2): 151-163.
- [4] Prada C, Manneville S, Spoliansky D, et al. Decomposition of the time reversal operator: detection and selective focusing on two scatterers[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 99(4): 2067-2076.
- [5] Devaney A J, Marengo E A, Gruber F K. Time-reversal-based imaging and inverse scattering of multiply scattering point targets[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 118(5): 3129-3138.
- [6] Wang C H, Wei W. Distinguishing between target

- and interface in ultrasonic detection by a modified time reversal method[J]. *Acta Acustica*, 2002, 27(3): 193-197.
- 汪承灏, 魏炜. 改进的时间反转法用于有界面时超声目标探测的鉴别[J]. *声学学报*, 2002, 27(3): 193-197.
- [7] Deng F, Hu F C, Zhang X. Imaging small damages in plates using DORT processing[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2018, 44(5): 743-748.
- 邓菲, 胡方朝, 张僖. 基于时间反转算子分解算法的板中导波小缺陷成像[J]. *北京工业大学学报*, 2018, 44(5): 743-748.
- [8] Li C X, Guo M F, Wang Z K. Wideband imaging of extended targets with the decomposition of the time reversal operator[J]. *Acta Acustica*, 2018, 43(2): 145-153.
- 李春晓, 郭明飞, 王忠康. 宽带扩展性目标时反算子分解成像[J]. *声学学报*, 2018, 43(2): 145-153.
- [9] Li Z, Zhao Y L, Wang S F. New method of magnifying defect echo based on time reversal focusing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(8): 154-161.
- 李震, 赵钰龙, 王少锋. 基于时间反转聚焦的缺陷回波增益新方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(8): 154-161.
- [10] Sabra K G, Dowling D R. Effect of ocean currents on the performance of a time-reversing array in shallow water[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 114(6): 3125-3135.
- [11] Liu S P, Liu F F, Shi J W, et al. High-resolution ultrasonic imaging evaluation and behavior analysis of impact damages in composites[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(22): 16-23.
- 刘松平, 刘菲菲, 史俊伟, 等. 复合材料冲击损伤高分辨率超声成像检测与损伤行为分析[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(22): 16-23.
- [12] Li J Y, Shen Z H, Ni X W, et al. Laser-ultrasonic non-destructive detection based on synthetic aperture focusing technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0904003.
- 李俊燕, 沈中华, 倪晓武, 等. 基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0904003.
- [13] Pan L, Dong S Y, Xu B S, et al. The review of study and application of phased array ultrasonic testing technology[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2013, 35(5): 26-29.
- 潘亮, 董世运, 徐滨士, 等. 相控阵超声检测技术研究与应用概况[J]. *无损检测*, 2013, 35(5): 26-29.
- [14] Simonetti F. Localization of pointlike scatterers in solids with subwavelength resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(9): 094105.
- [15] Kim S Y, Kim K, Hong K, et al. Investigation of metal peel-off technique for the fabrication of flexible organic light-emitting diodes[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2009, 156(9): J253.
- [16] Song Y K, Wang X K, Hua L. Research on ultrasonic test and reconstruction method of the internal defects in shaft parts[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2016, 35(2): 109-115.
- 宋雨珂, 汪小凯, 华林. 轴类零件内部缺陷超声检测与重构方法研究[J]. *应用声学*, 2016, 35(2): 109-115.
- [17] Melde K, Mark A G, Qiu T, et al. Holograms for acoustics[J]. *Nature*, 2016, 537(7621): 518-522.
- [18] Janjic J, Kruizinga P, van der Meulen P, et al. Structured ultrasound microscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(25): 251901.
- [19] Xu Q. Study on beamforming algorithm of ultrasound imaging[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 41-51.
- 许琴. 超声成像中波束形成算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 41-51.
- [20] Nilsen C I C, Hafizovic I. Beam-space adaptive beamforming for ultrasound imaging[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2009, 56(10): 2187-2197.
- [21] Hwang Y S, Hong S H, Javidi B. Free view 3-D visualization of occluded objects by using computational synthetic aperture integral imaging[J]. *Journal of Display Technology*, 2007, 3(1): 64-70.
- [22] 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.
- [23] Li Y Q, Xia M Y. Time reversal imaging based on synchronism[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2058-2061.
- [24] Asgedom E G, Gelius L J, Austeng A, et al. Time-reversal multiple signal classification in case of noise: a phase-coherent approach[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 130(4): 2024-2034.
- [25] Labyed Y, Huang L J. Detecting small targets using windowed time-reversal MUSIC imaging: a phantom

- study[C]//2011 IEEE International Ultrasonics Symposium, October 18-21, 2011, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1579-1582.
- [26] Kang W X, Li H F. Improvement of time reversal focusing algorithm based on wavelet packet analysis[J]. Applied Science and Technology, 2018, 45(6): 47-52.
康维新, 李海峰. 基于小波包分析的时反聚焦算法改进[J]. 应用科技, 2018, 45(6): 47-52.
- [27] Miao X T, Li F C, Meng G. Identification of multi-defects by combining time-reversal lamb waves with weight distribution imaging algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 1-8.
苗晓婷, 李富才, 孟光. 结合时间逆转的兰姆波与加权分布成像算法对多损伤识别的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 1-8.
- [28] Ai C A, Cai X F, Li J, et al. Dry-coupled ultrasonic detection of solid rocket motor by time reversal method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(2): 145-150.
艾春安, 蔡笑风, 李剑, 等. 时间反转的固体火箭发动机干耦合超声检测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(2): 145-150.
- [29] Fan C G, Yang L, Zhao Y, et al. A generalized time-reversal-based imaging for ultrasonic nondestructive evaluation[C]//2017 Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), June 22-24, 2017, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2017: 8-12.
- [30] Shan H B, Li M, Chen H D, et al. The development of overseas simulation software for ultrasonic testing[J]. Nondestructive Testing Technologing, 2008, 30(7): 446-450.
单洪彬, 李明, 陈怀东, 等. 国外超声检测仿真软件的研究进展[J]. 无损检测, 2008, 30(7): 446-450.
- [31] Treeby B E, Cox B T. K-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields[J]. Journal of Biomedical Optics, 2010, 15(2): 021314.
- [32] Jensen J A. Field: a program for simulating ultrasound systems[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 1996, 34(1): 351-352.
- [33] Mair H D, Ciorau P, Owen D, et al. Ultrasonic simulation: imagine3D and SimScan: tools to solve the inverse problem for complex turbine components[J]. AIP Conference Proceedings, 2000, 509: 911-918.
- [34] Calmon P, Mahaut S, Chatillon S, et al. CIVA: an expertise platform for simulation and processing NDT data[J]. Ultrasonics, 2006, 44: e975-e979.
- [35] Liu Z H, Jia J W, Xiong G. Research of the design and simulation of ultrasonic focusing system with phased array[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 620: 162-165.
- [36] Kažys R, Demčenko A, Žukauskas E, et al. Air-coupled ultrasonic investigation of multi-layered composite materials[J]. Ultrasonics, 2006, 44: e819-e822.
- [37] Wang S J, Kang L, Li Z C, et al. 3-D modeling and analysis of meander-line-coil surface wave EMATs[J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 653-660.
- [38] Li Y B, Han Y, Yang G, et al. Weak defect enhancement in ultrasonic testing of laser deposition manufactured TA15 alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 0504002.
李一波, 韩毅, 杨光, 等. 超声检测激光沉积制造 TA15 合金弱小缺陷的增强[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 0504002.
- [39] Ohara Y, Kawashima K. Detection of internal micro defects by nonlinear resonant ultrasonic method using water immersion[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(5B): 3119-3120.
- [40] Shen Z H, Yuan L, Zhang H C. Laser ultrasound in solids[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015: 31-38.
沈中华, 袁玲, 张宏超. 固体中的激光超声[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 31-38.
- [41] Zhang S Y. Laser ultrasound and nondestructive evaluation of materials[J]. Applied Acoustics, 1992, 11(4): 1-6.
张淑仪. 激光超声与材料无损评价[J]. 应用声学, 1992, 11(4): 1-6.
- [42] Qian M L. Progress in laser ultrasonics[J]. Technical Acoustics, 2002, 21(Z1): 19-24.
钱梦騷. 激光超声学的若干进展[J]. 声学技术, 2002, 21(Z1): 19-24.
- [43] Zhu H L, Liu C, Zhang B, et al. Research on laser ultrasonic visual image processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0104004.
朱洪玲, 刘畅, 张博, 等. 激光超声可视化图像处理研究[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0104004.
- [44] Zhu Q, Qiu J H, Zhang C, et al. Application of laser ultrasonic detection method for double-layer laminated material[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031402.
朱倩, 裘进浩, 张超, 等. 双层层压材料中激光超声检测方法的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031402.

- [45] Yang L J, Li Y, Sun J J, et al. Reflection and transmission of laser ultrasonic waves on surface defects[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041203.
杨连杰, 李阳, 孙俊杰, 等. 激光超声表面波在表面缺陷上的反射与透射[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041203.
- [46] Cao J S, Cao Z, Zhao L F, et al. Detecting techniques of surface crack of pipeline based on laser ultrasonic[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(3): 1-6.
曹建树, 曹振, 赵龙飞, 等. 激光超声管道表面裂纹检测技术[J]. *光电工程*, 2016, 43(3): 1-6.
- [47] Guo H Y, Xu Z X, Liu Z Y, et al. Laser ultrasonic test for defects of metal plate with coating[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(5): 541-547.
郭海洋, 徐志祥, 刘志毅, 等. 带涂层金属板件缺陷的激光超声检测研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47(5): 541-547.
- [48] Liu Y, Xiang Z Q, Tang Z F. Application of laser-induced ultrasound on rail flaw inspection[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(10): 60-61.
刘洋, 项占琴, 唐志峰. 激光超声技术在钢轨探伤中的应用研究[J]. *机械设计与制造*, 2009(10): 60-61.
- [49] Chen L, Liu X, Zhan C, et al. Measurement of elastic constants of metal foils by laser ultrasonic method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1104003.
陈龙, 刘星, 詹超, 等. 金属箔材弹性常数的激光超声测量方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1104003.
- [50] Feng W W, Pan Y D, Ru D H, et al. Residual stress in cast iron brake disc measured by laser-generated surface wave technique[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2018, 42(9): 78-82.
冯湾湾, 潘永东, 茹东恒, 等. 激光激发表面波法测铸铁制动盘残余应力[J]. *机械工程材料*, 2018, 42(9): 78-82.
- [51] Pang J C, Yan X L. Ultrasonic nondestructive testing of residual stress in parts formed by laser 3D printing[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2020(5): 106-111.
庞金城, 闫晓玲. 激光 3D 打印件残余应力超声无损检测[J]. *制造技术与机床*, 2020(5): 106-111.
- [52] Tao C, Yin A M, Ying Z Q, et al. Numerical simulation of ultrasonic velocity at high temperature based on laser ultrasonic[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(7): 815-820.
陶程, 殷安民, 应志奇, 等. 基于激光超声在高温下对超声波声速的数值模拟[J]. *激光与红外*, 2018, 48(7): 815-820.
- [53] Zhao W L, Li C, Wu T. Laser ultrasonic inspection of weld defects in oil and gas pipelines[J]. *Laser Journal*, 2017, 38(8): 24-27.
赵万里, 李灿, 吴桐. 油气管道焊缝缺陷的激光超声检测[J]. *激光杂志*, 2017, 38(8): 24-27.
- [54] Li P, Zhao Y, Bai X, et al. A review of ultrasonic methods used for nondestructive characterization of polycrystalline materials[J]. *Applied Physics*, 2019, 9(11): 429-441.
李鹏, 赵扬, 白雪, 等. 一种多晶金属材料超声无损表征方法研究综述[J]. *应用物理*, 2019, 9(11): 429-441.
- [55] Li P, Zhao Y, Zhou Z Q, et al. Research on laser induced acoustic detection of trans-media aerial underwater[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 55-63.
李鹏, 赵扬, 周志权, 等. 一种跨介质的空中-水下激光致声探测技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(5): 55-63.
- [56] Kenderian S, Cerniglia D, Djordjevic B B, et al. Laser-air hybrid ultrasonic technique for dynamic railroad inspection applications[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2005, 47(6): 336-340.
- [57] Dixon S, Burrows S E, Dutton B, et al. Detection of cracks in metal sheets using pulsed laser generated ultrasound and EMAT detection[J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(1): 7-16.
- [58] Zhao Y, Guo R, Song J F, et al. Noncontact nondestructive detection of inner metal defects based on laser-EMAT technique[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3): 277-280.
赵扬, 郭锐, 宋江峰, 等. 激光-EMAT 法非接触式无损检测金属内部缺陷研究[J]. *激光技术*, 2013, 37(3): 277-280.
- [59] Gu Y H, Zhang Z Z, Gao X H, et al. Application of nondestructive detection of aluminum using laser ultrasonic technology and EMAT method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0504002.
谷艳红, 张振振, 高先和, 等. 激光超声结合电磁超声在铝板无损检测中的应用研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0504002.
- [60] Ding X S, Chen K Y. The development of six-axis immersion C-scan automatic imaging system[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2014, 43(2): 37-39, 98.

- 丁旭升, 陈坤裕. 六轴水浸式超声 C 扫描自动成像系统的研制[J]. 机电工程技术, 2014, 43(2): 37-39, 98.
- [61] Chen L, Luo Z L, Liu X J, et al. Applications of the laser ultrasonic visualizing technology in nondestructive testing[C]//Proceedings of 2014 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum, June 21-23, 2014, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2014: 135-139.
- 陈林, 罗朝莉, 刘小军, 等. 激光超声波可视化检测技术在无损检测中的应用[C]//2014 远东无损检测新技术论坛论文集, 6月21日到23日, 2014, 成都. 纽约: IEEE 出版社, 2014: 135-139.