

# 飞机复合材料超声相控阵 检测信号处理研究\*

## Research on Signal Processing of Ultrasonic Phased Array Used in Inspection of Aircraft Composite

中国民航大学航空自动化学院 詹湘琳 蔡玉杰 刘岱 刘涛 周德新



詹湘琳

博士,副教授,主要研究方向为超声无损检测,主持3项省部级及国家级科研项目,发表论文20余篇。

在飞机刚出厂时,其复合材料零部件的性能需要符合适航标准。但长时间飞行后,部分结构会在疲劳载荷及复杂的外界环境作用下出现裂纹等损伤,再加上操纵失误或维护不当等原因,飞机的一些内部结构很可

飞机有大量复杂结构零件,用常规的超声检测方式进行检测时,难度很大。而用超声相控阵方式进行检测可以在不移动探头的前提下,通过控制延时来控制超声波束的偏转和聚焦,达到多个角度和不同聚焦深度,从而提高检测效率和准确度,减少了检测人员的工作量。

能会被烧伤、撞伤。而这些损伤会降低飞机结构的强度和刚度,从而影响飞机的飞行性能和飞行安全。所以,对飞机进行定期检查和修理,确保飞机处于良好的工作状态,对保证飞机安全飞行有重要作用。但是,飞机有大量复杂结构零件,用常规的超声检测方式进行检测时,难度很大。而用超声相控阵方式进行检测可以在不移动探头的前提下,通过控制延时来控制超声波束的偏转和聚焦,达到多个角度和不同聚焦深度,从而提高检测效率和准确度,减少了检测人员的工作量。

超声相控阵技术于20世纪80年代提出,初期主要应用于医学超声成像诊断<sup>[1]</sup>。近年来国内外超声相控阵技术发展很快,在医学诊断和工业检测等方面的研究很受欢迎。另

外,在相控阵的系统设计、系统的模拟以及实际应用等方面也有所进展,相控阵技术开始走向数字化。超声相控阵换能器由多个相互独立的阵元组成,按一定的规则和时序用电子系统控制激发各个阵元,使阵列中各单元发射的超声波叠加形成一个新的波阵面。同样,在反射波的接收过程中,按与发射相同的规则和时序控制接收单元的接收并进行信号合成,再将合成结果以适当形式显示。超声相控阵系统主要有两部分组成,即超声阵列换能器和电子控制系统。通过电子系统控制超声相控阵换能器中各阵元的相位,从而获得合成波束,实现动态聚焦和高速扫描。

国外,在工业检测方面,瑞典Uppsala大学Stepinski T于1998年把相控阵技术用于核废料罐电子束

\* 国家自然科学基金(61102097)、天津市科技支撑计划项目(11ZCGHHZ00700)和中央高校基本科研业务费资助项目(3122014D023和SY-1418)资助。

环焊缝的检测,并研发了软件工具进行B扫成像显示<sup>[2]</sup>;Lamarre等于1999年把相控阵系统用于航空飞行器焊缝(FSW)的检测,实现了对动态波束的控制、电子的扇形扫描和聚焦、图像处理和显示等多种功能。美国通用航空公司(GE公司)很认定这一技术,设计出一种复合材料构件超声波水浸探伤系统,如图1所示<sup>[3]</sup>。在系统设计方面,英国的Freemantle等找到了一种新的相控阵超声探头用于检测面积较大的航空复合材料构件,把相控阵阵列安装在橡胶滚轮中,橡胶滚轮能手动也能自动控制,能检测出航空复合材料构件中的裂纹及未贴合等缺陷<sup>[4]</sup>;2000年法国原子能委员会(CEA)成功制造出了具有15mm曲率半径的弯曲探头,适合对非平面和复杂表面的物体进行检测,根据这一基础设计出了“FAUST”系统<sup>[5]</sup>;韩国Sogang大学的Hwang和Sunhkyunkwan大学的Song等借助数字化技术设计了具有动态孔径聚焦发射及动态聚焦接收特性的相控阵系统<sup>[2]</sup>。在数字化方面,德国Krautkramer公司在1964年研制成功了小型超声检测设备,成为近代超声探伤技术的标志;20世纪80年代Krautkramer公司又生产了便携式数字超声探伤仪,进一步说明超声检测装置正在奔向数字化<sup>[6]</sup>;



图1 GE Phasor XS 超声相控阵探伤系统

从1989年开始,加拿大RDTECH公司,先后研制出5代超声相控阵检测设备,前4代产品均采用模拟声束合成,第五代的OmniScan是数字声束合成。Olympus无损检测公司的Habermehl等用相控阵超声检测系统OmniScanTMPA对飞机上碳纤维增强聚合物基复合材料平板构件进行检测,还针对碳纤维增强聚合物基复合材料弯管的圆角联接的构件设计了专门检测弧形相控阵探头,检测速度快,成像效果好<sup>[7]</sup>。

国内虽然对相控阵的研究和应用还处于起步阶段,但各个高校和研究所已陆续做出很多成果。在实际应用方面,北京航空航天大学提出使用新复合材料压电换能器改善电声性能的想法,并应用于实际检测中<sup>[8]</sup>;中材科技风电叶片股份有限公司等把超声相控阵技术用于复合材料的粘结缺陷检测<sup>[9]</sup>;中国石油天然气集团公司管道科学研究院在2003年与天津大学合作,成功地研制出对PWA-01管道环焊缝的全自动超声相控阵检测设备<sup>[10]</sup>。在设计超声相控阵系统方面,2000年,中科院声学研究所设计了超声相控阵换能器动态聚焦系统,能够实现精密动态聚焦试验<sup>[11]</sup>;在2008年,哈尔滨工业大学设计出一种超声相控阵实时检测系统,直接由USB来传输所要检测

的数据信息,再进行图像显示,图2是哈尔滨工业大学分析的超声检测原理图<sup>[12]</sup>。在工业无损检测方面,在2003年,上海电气自动化设计研究所、上海市计算技术研究所和上海师范大学一起研制了侧重于算法研究和实现的管道超声相控阵检测系统<sup>[13]</sup>;在国家“863”计划的资助下,根据

海洋平台结构形式的特点,上海交通大学的金建华等通过超声相控阵技术成功地检测了海洋平台结构的缺陷<sup>[14]</sup>。一般来说,人们认为扇扫能检测到材料中所有的缺陷。然而,尽管超声相控阵检出率比常规超声检测要高,但不能保证能检测出所有缺陷<sup>[15]</sup>,很容易漏检那些取向和位置比较特殊的缺陷。对于这一技术难点,北航提出了采用线阵换能器检测L型构件R区的检测方法<sup>[16]</sup>。在实现数字化方面,清华大学把相控阵技术用于复合材料胶接层质量评估,深入探究超声聚焦的数字合成原理和相位的数字控制<sup>[17]</sup>。

### 超声相控阵技术中信号处理方面的技术难点

(1) 超声相控阵系统包含超声、信息、机械、电子等各个领域,有很多参数,往往各参数之间有复杂的关联和制约关系,若参数设置不准确,会导致信噪比和检测分辨率降低,从而很容易产生缺陷漏检、定位定量不准等问题。要想得到准确的系统特性,必须采取一定的聚焦和检测参数的优化原则,如声束宽度、阵元激活、扫描范围、聚焦能力、延迟修正等,从而很好地实现动态聚焦、动态孔径等功能<sup>[18]</sup>。

(2) 超声相控阵检测厚壁构件时,信噪比会不足,一般采取增加孔径的方法提高信噪比,增加更多通道数,使得检测系统更为复杂,各通道得到的信息具有不同的信息特征,单个信息很难全面描述被测环境。此外,有些通道由于各种原因可能会得到错误的信息,而超声相控阵本身无法识别这些错误信息,这样就会使检测结果产生误差。

从以上两点可以看出,超声相控阵技术用于工业检测等实际应用时,必须同时解决来自多方面的技术难点,是一项具有技术难度且富有挑战性的工作。

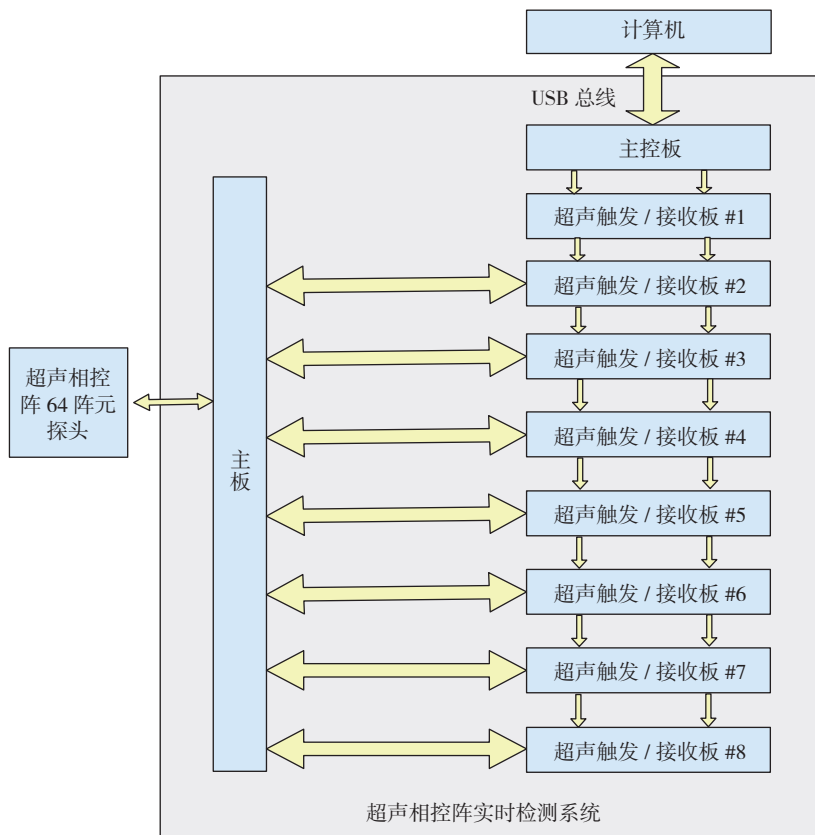


图2 超声检测装置的原理图

## 飞机复合材料超声相控阵检测信号处理的技术难点

超声相控阵各阵列得到的回波信息具有不同的信号特征,单个信息不能够全面描述被测体;另外,超声波在复合材料中幅值衰减大,所以超声阵列得到的回波幅度很小,后续信息不容易处理。根据上述技术难点,目前普遍采用加权平均法,即把各个激励阵元的信号叠加后求平均,以期提高信噪比。但权值的确定和调整具有主观性。因此,本文探讨采用信息融合技术领域中的其他方法来解决超声相控阵检测中信号处理方面存在的技术难点的可能性。

## 基于信息融合的超声相控阵信号处理关键技术的解决方案

基于上述分析,为了综合利用各阵列得到的各回波信息的有效性,本文提出把信息融合技术用于超声相

控阵的信号处理。通过选择合适的融合算法对信息进行综合处理,能够得到对现实环境更为准确、可靠的描述。

信息融合(Information Fusion, 或称为数据融合 Data Fusion)是电子战、机器人、系统导航、柔性制造、故障诊断以及数字图像处理等领域的一个重要的课题<sup>[19]</sup>。多传感器信息融合是一种处理多个或多类传感器系统的新方法,又可被称为多元合成、多源关联、混合传感器或多传感器融合等,但是有一种更广泛的说法,即多传感器信息融合,简称为信息融合。它减少了单一传感器的信息盲区,提高了多源信息处理结果的质量,有利于检测人员对检测情况做出更好的判断和决策。目前,尚没有把信息融合技术用于超声相控阵的相关文献和实际应用系统。将两者集合,可以更加灵活而有效地控制声束,所以,选择最优信息融合算法运

用于实际超声相控阵系统具有广阔的应用和发展前景。

### 1 信息融合的原理

信息融合技术就是要充分利用多个信息源,对它们所提供的来自空间或时间上的冗余或互补信息等按照某些准则组合在一起,从而得到被测对象的多元信息。信息融合并没有统一的结构和分类形式。信息融合按其多传感器信息处理层次中的抽象程度,可以分为像素级、特征级和决策级融合<sup>[20]</sup>。通常,像素级融合对传感器获得的原始数据不经过处理或者只是进行很少的处理而直接进行融合。因为数据融合前基本没有经过处理,所以比其他级别保留了更多原始信息的细节。融合结果的精度最高,能给人更加正确、全面的认识。但这种融合方式的数据处理量大,实时性差,需要很大的通信带宽。特征级融合是把来自各个传感器的原始数据先进行特征提取,然后再把这些特征进行融合。此级融合因为在融合之前对信息进行了处理,所以再融合时能增加一些特征的准确性,有利于实时处理,其缺点是融合精度比像素层差。决策级融合是一种最高层次融合,直接对来自不同传感器的多源信息形成的局部决策进行最后的分析,从而得到最终的决策。该类算法具有好的容错性和实时性,可用来处理来自异质传感器的信息,而且在一个或多个传感器失效时也能正常工作,缺点是预处理代价高,但需要带宽比较小。可以看出,特征级融合是介于像素级和决策级之间的一种中间级的处理方法。

想要完成以上3级信息融合,需要采用一种或者几种信息融合算法。

### 2 信息融合算法

对于信息融合算法具体可以分为以下4类:估计方法、分类方法、推理方法和人工智能方法<sup>[21]</sup>。

(1)估计方法。估计方法一般有加权平均法、最小二乘法、卡尔曼

滤波。最简单的信息融合方法就是加权平均法。此方法是把一组传感器得到的信息加权平均,然后把求得的加权平均值作为需要的信息融合值。加权平均法的优点是它的实时性好,缺点是权值的确定和调整具有主观性。使用最小二乘法,能减少测量过程中产生的误差,能让平滑后的数据比原数据更加有规律性。卡尔曼滤波<sup>[22]</sup>主要用于动态的低层次冗余多传感器数据的实时融合,它用测量模型统计特性递推,因此是统计意义下最优的融合算法。中国海洋大学在2004年,由国家自然科学基金数学天元基金(A0324676)及教育部科学技术研究重点项目(02131)资助,对多通道带乘性噪声系统的观测噪声最优估计算法和状态最优融合估计算法展开进一步研究<sup>[23]</sup>;中北大学王浩全博士于2011年利用最小二乘法在超声阵列层析成像中,对SIRT重建算法进行了推导<sup>[24]</sup>。

(2) 分类方法。参数模板法和聚类分析<sup>[25]</sup>是主要的两种分类方法。参数模板法是将得到的传感器数据与已知的模板进行匹配,判断数据是属于哪一个模板,从而实现信息的融合。此法比较简便易行,然而它的有效性在相当大的程度上被特征空间的划分方式和分布状态决定。聚类分析法要用相似函数和关联度量反映两个特征向量的相似度,由此来作为数据融合的依据。其中,Datta S<sup>[26]</sup>给出用于两种新的微阵列数据聚类结果的测度;2005年,哈尔滨理工大学在WGQ-268新型电磁检测仪有效提取信号的特征向量的基础上,结合模式识别方法和聚类分析算法,建立有效的算法模型,开发了用于无声检测的网络分析智能识别系统,图3就是uVision2的开发、编辑和调试界面<sup>[27]</sup>。

(3) 推理方法。常用的推理方法有贝叶斯估计和证据理论。贝叶斯估计<sup>[28]</sup>用于信息融合,主要有两

个步骤:先验信息的采集和先验信息的融合。这种方法的优点是有坚实的理论基础、很好的推理能力、简单的决策机制;缺点是主要用于静态环境中多

传感器底层数据的融合。融合前,需要给出先验概率,具有很大的不确定性。证据理论是Dempster首先在贝叶斯估计的基础上推理扩充的,后来经由Shafer加以补充发展,因此证据理论又被人称为D-S证据理论<sup>[29]</sup>。它首先要得到一个先验概率分配函数,然后通过得到的这个函数去获得后验证据区间。后验证据区间把命题的可信程度和似然概率量化了。证据理论把证据组合后,那么怎样做决策就是与实际应用最为相关的问题得到证据组合后,下一步要求出一个信任函数。对于D-S证据理论,求得的信任函数便是判决结果。可以看出,通过证据理论做判决,所能得到的结果是集合,并不是单个的点。要想解决实际问题,必须对真值究竟是什么做出一个精确的回答。可见证据理论并未做全部工作,还要求对通过证据理论的信任函数做进一步分析处理,最后推出有确切性的结果。只有这样,证据理论才能被用于决策的制定。这种方法的优点是,证据理论较传统的概率论更容易把握所研究问题的未知性和不确定性,现已广泛应用于多传感器信息融合中。2007年,安徽理工大学将D-S理论进行改进,提出了基于有效因子把证据之间的冲突按各个命题的平均支持程度加权进行分配的合成公式,并应用于无

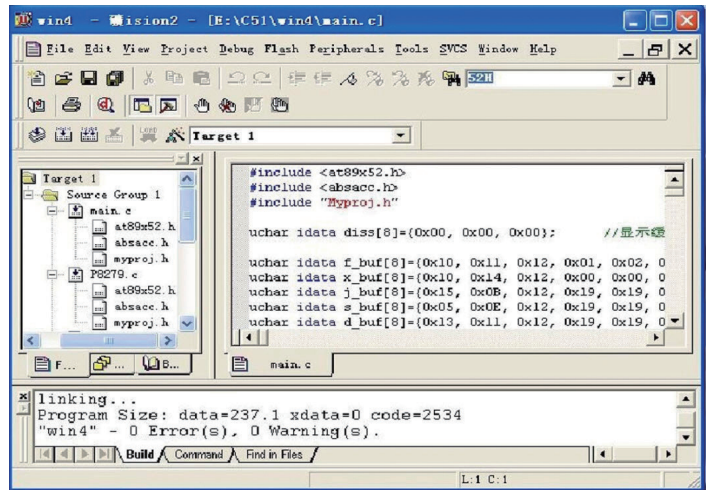


图3 uVision2的开发、编辑和调试界面

损检测<sup>[30]</sup>;2011年,国防科学技术大学机电工程与自动化学院针对超声检测的缺陷识别率不高这一现状,采用3个BP网络(3BP网络)和D-S证据理论两种融合算法,将数据融合技术应用于超声缺陷分类中,缺陷识别率可达到96%,图4是利用3BP网络的思想和应用<sup>[31]</sup>;国防科技大学针对无损检测的特点,将D-S理论这一信息融算法用于超声、红外和涡流3种无损检测的融合,设计出一套用于材料密度和密度分布的检测装置<sup>[32]</sup>。

(4) 人工智能方法。在处理大量融合信息的场合,或者在处理非线性和不确定的场合,人工智能方法具有优势。人工智能方法主要有专家系统<sup>[33]</sup>、神经网络<sup>[34]</sup>、模糊逻辑<sup>[35]</sup>、遗传算法<sup>[36]</sup>等。专家系统就是运用专家们的丰富经验,这些经验是按照一定的规则表现,继而构成了系统知识库,通过采用合适的解决某一类问题的推理方法,能在计算机上自动推出解决问题的推论。神经网络有大量的神经元连接,可以认为是一个能处理高度非线性和超大规模的连续时间自适应信息的系统<sup>[34]</sup>。神经网络虽然作为一种新的方法体系,但已被生物、计算机、数学、电子和物理等学科运用,应用前景良好。模糊逻辑是一种连续值逻辑,建立在模糊集

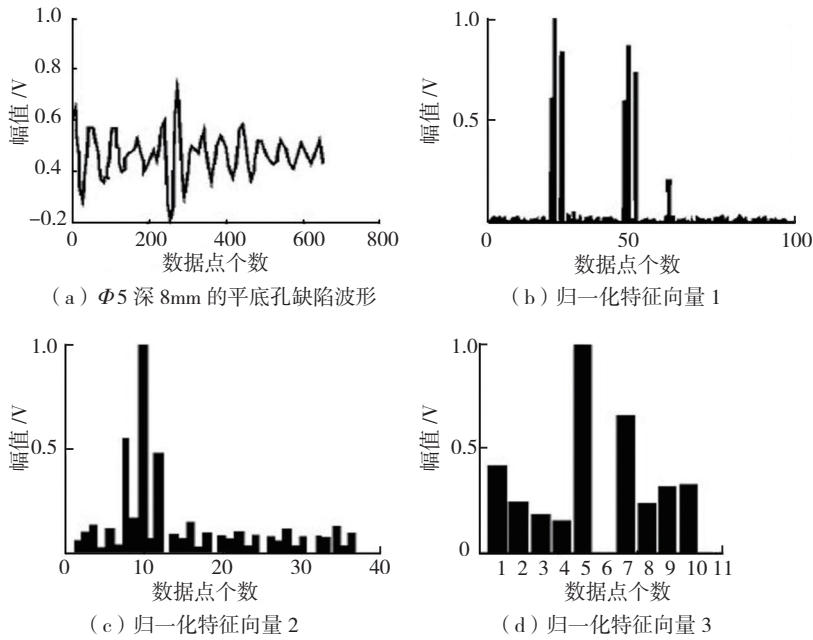


图4 平底孔波形及其特征向量3BP网络的思想和应用

合和二值的基础之上。遗传算法利用进化原理,通过二进制编码把权重系数变量写入同一染色体,再进一步计算出适应度函数,群体中适应度最高的个体就是最终融合结果。中国石油大学在管道焊缝无损检测中使用信息融合的遗传算法,提高了焊缝缺陷检出率,保证了管道焊接的质量<sup>[37]</sup>;2008年,北京信息科技大学联合安徽工业大学采用神经网络信息融合算法,开发了基于MATLAB的焊缝超声波探伤缺陷智能识别系统,该系统能够自动采集缺陷回波信号、智能化识别缺陷和分类<sup>[38]</sup>;内蒙古大学把时频分析和神经网络模式识别联合使用,创建了一套用于复合薄板粘接质量定量检测识别的完整方法,可很好地用于专用数字化超声检测仪的设计和实现,图5是神经网络输出的回归分析结果<sup>[39]</sup>。

综上所述,通过选择合适的信息融合算法对超声相控阵采集的信号进行综合处理,不但能综合利用各阵列得到的回波信息的有效性,而且能减少融合中心所要处理的信息量,提高检测速度,从而得到对现实被测物体内部更为准确、可靠的描述。这也

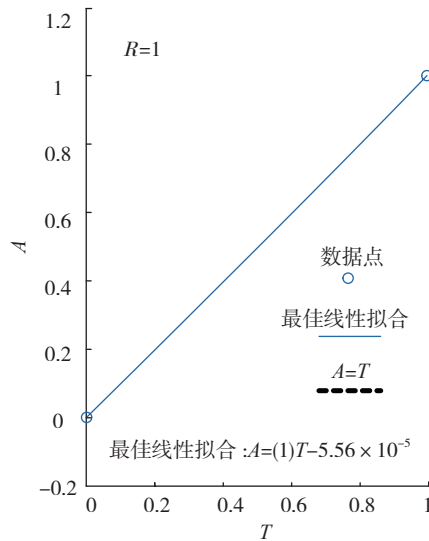


图5 神经网络输出的回归分析结果

是下一步研究工作的主要内容。

### 结论

本文总结了超声相控阵技术的发展概况,分析了该技术用于飞机复合材料检测时信号处理方面的难点,主要内容如下:

(1)介绍了超声相控阵技术和系统国内外发展现状,分析了关键技术,阐述了一些具有代表性的研究成果。

(2)总结了飞机复合材料超声

相控阵技术检测的信号处理方面技术难点,并提出了采用信息融合技术进行解决的方法。

(3)介绍了信息融合技术的原理、方法,以及该技术在无损检测领域的研究成果。研究表明,将信息融合技术用于超声相控阵检测,可提高检测成像的质量和检测速度,将在飞机复合材料检测中得到广泛应用。

### 参考文献

[1] 周琦,刘方军,李志军,等.超声相控阵成像技术与应用.兵器材料科学与工程,2002,25(3): 34-37.  
 [2] Wu P, Stepinski T. Elastic fields in immersed isotropic solids from phased arrays: the time harmonic case. Research in Nondestructive Evaluation, 1998, 10(4): 185-204.  
 [3] 徐瑶. Phasor XS 便携式探伤仪全面体现相控阵技术优势.航空制造技术,2007(1): 111.  
 [4] Brotherhood C J, Drinkwater B W, Freemantle R J. An ultrasonic array wheel probe. Review of Progress in QNDE, 2004, 23: 793-800.  
 [5] Sylvain C, Gerard C, Marc S. Ultrasonic non-destructive testing of pieces of complex geometry with a flexible phased array transducer. Ultrasonics, 2000, 38(1): 131-134.  
 [6] 索会迎. 超声波无损检测技术应用研究. 南京: 南京邮电大学, 2012.  
 [7] Habermehl J, Lamarre A. Ultrasonic phased array tools for composite inspection during maintenance and manufacturing// WCNDT 2008, Shanghai, China.  
 [8] 周正干, 向上, 魏东, 等. 复合材料的超声检测技术. 航空制造技术, 2009(8): 70-73.  
 [9] 李怀富, 李业书, 吕贵平, 等. 超声相控阵技术在复合材料检测中的应用. 玻璃钢/复合材料, 2010(2): 86-88.  
 [10] 蔡荣东. 高集成度超声相控阵检测系统相关技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.

[11] 刘晨, 魏炜, 姜永亮, 等. 超声数字式相控阵换能器动态聚焦系统的研制. 应用声学, 2000, 19(6): 14-18.

[12] 王华, 单宝华, 欧进萍, 等. 超声相控阵实时检测系统的研制. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5): 771-774.

本文共有参考文献 39 篇, 因篇幅有限, 未能一一列出, 如有需要, 请向本刊编辑部索取。(责编 叶枫)