

民用飞机复合材料结构件 超声相控阵无损检测技术进展*

Progress of Ultrasonic Phased Array Nondestructive Testing Technique for Civil Aviation Composite Structures

中国民航大学航空自动化学院 詹湘琳 韩红斌 周德新



詹湘琳

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

本文归纳了采用 UPA 技术对飞机 CFRP 结构件检测的技术难点,介绍了超声在复合材料中传播规律的研究进展,阐述了声场的数值模拟、相控阵参数优化、信号处理等关键技术及发展策略,期望为 UPA 技术在民航检测领域的工程应用和研究提供技术支撑。

运输、操作及使用不当等原因,会在飞机复合材料结构件的生产成型及使用过程中产生缺陷,严重影响构件的机械性能和完整性^[1]。因此,采用无损检测方法对生产出来的复合材料构件进行检测,或者对使用的复合材料构件进行定期检测就显得非常重要。

用于复合材料检测的常规无损检测方法主要包括目视检查法、敲击法、射线检测技术、声发射法、超声检测技术等^[2]。一般来说,在外场环境条件下,先用目视和敲击方法进行初步检测,然后到内场根据飞机复合材料的结构形式、几何形状及需要检测的缺陷类型和要求,从上述方法中确定合适的检测方法进行检测和维修^[3],但这些方法都有一定的局限性^[4]。目前来说,超声检测方法是一种方便、有效的检测手段,被广泛应用于复合材料构件的无损检测^[5]。

但是,复合材料组分的多样性和各向异性会使超声波的传播发生严重衰减、波束偏移、频散等现象,增加了检测难度。另外,复合材料厚度方向一般不存在加工余量,所以不允许超声检测存在检测盲区。这样,导致常规超声检测很难满足复合材料无损检测的要求^[6]。

超声相控阵(UPA)技术为解决这个难题提供了可能。它是一种多声束扫描成像技术^[5],通过电子系统控制换能器阵列中的各个单元,按照一定的延迟时间法则发射和接收超声波信号,从而控制声束在工件中的聚焦位置和偏转方向,实现缺陷的检测^[7]。由于相控阵超声通过改变检测参数灵活控制声束,并能实现声束聚焦,从而提高了声束的入射能量,并能提高灵敏度和信噪比^[8]。另外,还可以通过采用传感技术、数字信号处理技术、电子技术和计算机技术等

碳纤维复合材料(CFRP)是通过物理或化学方法将碳纤维和环氧树脂复合而成的一种多相固体材料,具有很高的比强度和比模量、质量轻、耐疲劳和抗振性能好等优点。这些优点能有效减轻飞行器的质量,提高可靠性,被广泛用于现代飞机结构件的生产制造中。但由于制造工艺、

* 本文受国家自然科学基金(61102097)、天津市科技支撑计划项目(11ZCGHHZ00700)、天津市高等学校科技发展基金计划项目(20100412)资助。

减小相位偏差,提高检测分辨力。

国内外研究学者正致力于将 UPA 技术应用于飞机复合材料的缺陷检测。SONG 等采用声线示踪法研究相控阵声场,计算了超声相控阵不同阵元在非均匀各向异性介质中的延迟时间和入射角^[9];法国原子能委员会的 Mahaut 等使用 CIVA 软件模拟相控阵超声在各向异性介质中声波的传播过程^[10];美国西北太平洋国家实验室侧重于相控阵换能器设计以及硬件系统的研制^[11];德国弗朗霍夫无损检测研究所 (IZFP) 提出了“采样相控阵”(SPA)和“反向相位匹配”方法,并比较了 B 扫描与 C 扫描应用于 CFRP 检测的优缺点^[12];德国 EADS 军用飞机公司与加拿大奥林巴斯公司合作,尝试采用相控阵技术对老龄飞机的 CFRP 结构件的关键部位进行检测^[13];英国 TWI 有限公司用线性超声阵列对含有模拟分层和撞击缺陷的 CFRP 平板进行测试,讨论了使用 UPA 技术的优点和缺点^[14];我国的李衍等深入阐述了相控阵的基础理论,为相控阵研究提供参考^[15];哈尔滨工业大学的单宝华和刚铁等研究团队研究了相控阵硬件构成中的关键技术,搭建了硬件平台^[16];北京航空航天的周正干研究团队将 UPA 技术应用于多层介质 L 型构件 R 区的缺陷检测,采用有限差分方法进行数值仿真,计算阵元的延迟时间^[17];天津大学的孙芳等开展了界面条件下线型超声相控阵声场特性的研究,讨论了聚焦对换能器轴向和横向声场的影响^[18];北京理工大学的徐春广等研究了线列参数与声场指向性的关系^[19];中国科学院声学研究所的张碧星等侧重于研究超声相控阵聚焦与扫描方法,并开发了一套相控阵仪器^[20];中北大学的王召巴、宋文爱等研究团队采用动态光弹法研究了相控阵超声波束在介质中的传播规律,并通过反演法得到 B 扫描图像^[21-22];

清华大学的施克仁等在提高相控阵成像分辨力方面做了大量工作,并研究了相位畸变的修正方法^[23];上海交通大学的阙佩文等研究了线形超声相控换能器阵列的参数优化及其对声场的影响^[24]。

本文归纳了采用 UPA 技术对飞机 CFRP 结构件检测的技术难点,介绍了超声在复合材料中传播规律的研究进展,阐述了声场的数值模拟、相控阵参数优化、信号处理等关键技术及发展策略,期望为 UPA 技术在民航检测领域的工程应用和研究提供技术支撑。

UPA 技术应用于飞机 CFRP 结构件检测的难点分析

1 CFRP 的超声检测难点

对于 UPA 换能器,一个阵元相当于传统的单探头,即需要一个高压电脉冲激励以产生超声波。对于 CFRP 的超声检测来说,超声在 CFRP 材料中的传播速度远小于在金属中的传播速度。因此,CFRP 材料对超声的声阻抗会增加,引起声能的大量损失。这是用超声检测 CFRP 材料存在的一个主要问题。

另外,飞机复合材料结构件维修中的一个突出问题是如何根据损伤特点和典型的损伤形式有效地检测出缺陷,从而为复合材料结构的维修及修理容限的研究提供依据^[25]。据统计,飞机复合材料结构件中常见损伤主要集中于壁板或孔的边缘部位,特别是铆钉连接处更是检查维护的重点部位。但这些部位的空间尺寸狭小,不利于超声探头的放置和缺陷检测。另一方面,如果采用常规单阵元超声探头检测,其探头声束截面小,检测范围窄。更重要的是,探头发射的超声束只能检测某一个位置,容易引起漏检,或者需要不断改变探头的位置或声束的入射角度来保证超声束能垂直入射到检测区域。

虽然超声检测技术是一种成熟

的无损检测技术,检测灵敏度高,但是为了克服上述不足,UPA 技术提供了一种新的可能。

2 飞机复合材料的 UPA 检测技术

UPA 检测技术与常规超声检测技术相比有很多独特的优点,但是相位差的控制是决定 UPA 检测效果的关键。影响相控阵系统相位差精度的因素主要有以下两种。

(1) 相位差的物理实现是靠硬件系统的延时精度控制的。目前来说,最新的 UPA 系统的延时精度可达到几纳秒。

(2) 飞机复合材料的各向异性会引起超声波传播速度的非均匀性。因此,在超声发射聚焦、接收聚焦时同样也会产生相位偏差,从而导致合成信号发生相位畸变,增加了焦点处的检测声束宽度,降低了回波信号的波幅和信噪比及检测分辨力^[23]。

综上所述,采用 UPA 技术对飞机复合材料结构件进行检测是一项难度大并有挑战性的工作。

飞机复合材料的 UPA 检测的关键技术

综合分析国内外研究人员采用 UPA 技术检测飞机复合材料结构件时需解决的问题和遇到的困难,我们梳理并归纳得到下述关键技术。

(1) 研究飞机复合材料的组织特征及其对声速的影响,以及由于声速非均匀性引起的相位畸变产生的原因和规律。在此基础上,提出相控阵列,尤其是相控线阵在 CFRP 材料内相位校正的方法和策略,以提高声束合成信号的幅度、信噪比、空间分辨力及对对比度分辨力。

(2) 研究 UPA 系统在检测飞机复合材料时参数设置的基本原则,确定 UPA 各阵元的相位延迟与合成波阵面的曲率等特性参数之间的关系,以便进一步综合优化和配置系统,以改善由于 CFRP 的各向异性引起的声能衰减、信噪比低等问题。

(3) 基于目前常规 UPA 检测系统的局限性,集成新的信号处理方法及成像技术,开发更为先进的 UPA 系统,使之更加适用于飞机复合材料的缺陷检测。

关键技术的研究进展及解决方案

1 CFRP 中 UPA 的相控声场及相位偏差校正的研究

数值模拟方法是研究超声相控阵声场的有效工具。法国原子能委员会使用 CIVA 软件模拟相控阵超声在复合材料中超声波的传播^[10];韩国的 Song S J 和美国的 Lester W S 等提出了基于近轴估计的超声束模型以模拟超声相控阵声场^[26];哈尔滨工业大学的赵新玉提出了非近轴多高斯声束模型,以克服近轴高斯声束模型在模拟相控阵声场偏转时准确性低的问题^[27];军械工程学院的李伟等利用有限元方法对超声检测过程进行了数值模拟,通过对接收信号的分析,表明了采用数值模拟方法能有效地模拟多层复合材料介质中的超声传播,检测精度较高^[28];中北

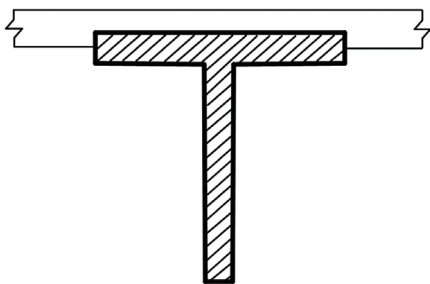


图1 相控线阵检测L型构件R区

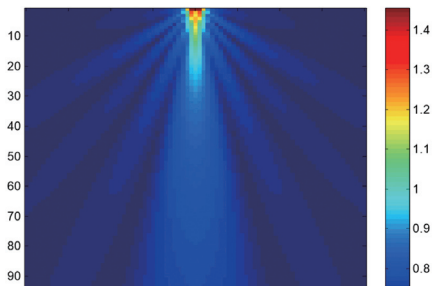


图2 基于离散点源法的超声相控线阵声场仿真

大学的宋文爱等采用有限元方法和差分方法模拟超声波在各向同性介质中传播的结果,并取得了与弹性波理论计算结果一致的效果^[29];北京航空航天大学周正干等分析二维流体运动方程并建立相关有限差分模型,应用完全匹配层方法对有限差分计算的边界进行吸收处理,模拟了超声相控阵检测L型构件R区的相控阵声场,并基于 Fermata 原理确定了采用相控阵检测多层介质时延时的计算方法,如图1所示^[30];天津大学的孙芳等基于瑞利积分,提出用离散点源法计算近场声场,研究了一维线性超声相控阵的声场(如图2所示),并用 CIVA 仿真平台验证了仿真结果,为实际中近场区检测提供了理论依据^[31]。上述研究都是采用数值分析方法对相控阵声场进行的探讨。

德国弗朗霍夫无损检测研究所(IZFP)针对介质的非均匀性及各向异性带来的相位偏差问题,基于合成孔径聚焦(SAFT)技术,提出了“反向相位匹配”方法^[32]。另外,中北大学王召巴等研究了时间延迟精度影响相位偏差的程度,并分析了延时精度与相控阵系统的空间分辨率和对比度分辨率的关系^[33];清华大学的施克仁等研究相控发射和同步的相位控制方法,以减小相位差对系统的影响^[34]。

综上所述,目前对于相控声场模型的理论研究比较深入,但是对于建立声场时产生的相位偏差及其校正方法的研究却比较少,可能受到相关的数字信号处理器件性能及其发展的制约和影响。

2 UPA 技术的参数优化原则

UPA 技术涉及到很多参数,而且参数之间关系复杂,需要对这些参数进行优化以最大程度发挥 UPA 的优势。UPA 技术的参数优化主要分探头参数优化和系统参数优化,研究内容主要分为以下 5 个方面。

(1) 研究 UPA 建立的声场与常

规超声探头声场的区别,并研究两种检测方法的优缺点。北京航空材料研究院的何方成等根据复合材料拐角部件的特点,分析了拐角部件的无损检测存在的困难,介绍了这类部件进行无损检测的方案和思路,并对对比分析了以上两类检测方法的优缺点,认为超声相控阵技术在未来复合材料拐角部位的无损检测方面将具有更好的应用前景^[35];北京天创时代检测设备有限公司采用超声相控阵技术对复合材料样板的粘结缺陷进行检测,介绍了探头及仪器的主要参数,并得到了 C 扫描图像,发现无缺陷的扫描图像中底面反射波清晰可见,而存在缺陷区域的扫描图像中底面反射波消失^[36]。这些研究表明,UPA 技术比常规超声检测更适合于飞机复合材料的检测。

(2) 激励频率的优化。聚焦声场中的主瓣高度和旁瓣的存在直接影响相控阵图像的分辨力,甚至会产生伪像。为了解决这个问题,通常以增加主瓣高度、减弱或抑制旁瓣为目标对阵元的激励频率进行优化。这种方法在一定程度上能改善聚焦声场,增强焦点处的声强并提高信噪比,从而改善成像质量^[21, 23-24, 31]。

(3) 聚焦法则及声束偏转参数的优化。中国科学院声学研究所的张碧星将自适应聚焦方法和相控阵扫描方法相结合,解决了实际焦点与预设焦点之间存在差异且只能对单一波包进行聚焦处理的不足,提高了信噪比和聚焦增益^[37];江苏省特种设备安全监督检验研究院及南昌航空大学分析了 ASTM E2491 中对超声相控阵声束偏转极限角度测试方法的理论和本质,并提出了基于声压下降的相控阵声束偏转极限角度的测试方法^[38]。

(4) 超声系统设置参数的优化。主要研究声压、脉冲宽度、声速、滤波、增益、采样率及脉冲重复频率等超声系统设置参数的物理意义、优化

原则方法。英国的 Nageswaran C 等用 UPA 技术对模拟分层的人工缺陷和肉眼可见的撞击缺陷进行检测,研究了声压、声速、声阻抗等对检测效果的影响^[15];黄晶等从建立线阵换能器辐射声场的数学模型及声场的指向性出发,研究了阵元数量、阵元间距等参数对波数指向性的影响,发现了相控阵列优化设计中的一些重要规律^[24]。

(5) 采用相控阵校准和补偿技术实现对 CM 中不同位置回波延时和幅度的校准,并补偿铺层的各向异性带来的衰减,从而减少声束畸变对 UPA 的影响,提高检测的信噪比。昌河飞机工业(集团)有限责任公司采用具有补偿技术的 UPA 系统对复合材料试块及实际构件进行检测,该系统能检测出第 1 层与第 2 层碳布之间的人工缺陷、0.8mm 深处的分层缺陷及 0.3mm 深处的夹杂缺陷,表明 UPA 技术具有避免由于上表面盲区引起漏检的能力和更好的横向分辨力,适合于 CFRP 这种层压板结构的复合材料无损检测^[6]。

综上所述,国内外研究者在相控阵探头参数优化和系统参数优化方面进行了大量的研究与探索,形成很多研究热点,并且取得了理论研究和

实际检测方面的诸多成果。仿真结果和实验结果都表明,参数优化能有效提高成像分辨率、检测灵敏度和信噪比,有利于缺陷的检出。

3 先进 UPA 系统的研制和开发

国外的一些公司已将 UPA 技术从实验研究转化为实用技术,生产出成熟的一维相控线阵换能器及线阵的检测系统。最典型、应用较广泛的是 Olympus 公司生产的 OMNISCAN,如图 3 所示;东航工程技术公司西安维修基地将 OMNISCAN 应用于飞机大翼顶部后缘蒙皮下表面腐蚀的检查^[39]。

GE 检测科技有限公司研制的 UPA 系统 LOGIQ9 NDT 能容纳 4 个相控阵探头,驱动含有 768 对晶片的探头,完全满足 GE 飞机发动机锻件检验的技术要求^[40]。德国的 IZFP 研究所基于合成孔径原理提出了采样相控阵(SPA)思想并研制了相应的系统,该系统可减小近表面盲区,并通过图像重建得到任意角度和位置的图像。另外,结合“反向相位匹配”技术,可快速进行相位匹配的图像重构,提高成像质量^[12]。

国内清华大学、中国科学院声学研究所、上海交通大学、天津大学、哈尔滨工业大学等都开展了相控阵系

统研制的工作。其中,清华大学侧重于二维相控阵探头及系统的研制,并将系统应用在复合材料胶接层质量评估方面^[34];中国科学院声学研究所设计了一种基于 CPCI 总线和现场可编程门阵列的 UPA 系统,可实现系统的控制、数据采集与全并行处理^[20];上海交通大学研制了一台自适应动态聚焦系统,将线性相控阵探头与多通道数据采集系统连接,实验表明该系统具有很高的测试速度与灵活性^[41];天津大学便携式、高集成度的 UPA 检测系统具有较高的缺陷检测和定位能力^[42];哈尔滨工业大学根据工业无损检测的实际需求,研制了全自动收发超声波信号的 UPA 系统,可实时采集数据,并提供多种图像显示方式^[43]。

目前,国外研制的 UPA 线阵仪器较成熟,已列入波音和空客公司的无损检测手册中并应用于飞机局部区域的检测。国内的 UPA 线阵仪器大多比较庞大,还有待进一步深入研究。

结束语

本文围绕 UPA 技术进行了文献调研,剖析了技术难点,主要内容如下。

(1) 归纳了飞机复合材料的 UPA 检测技术的主要难点,分析并阐述了关键技术;

(2) 针对各项关键技术,综述了国内外的研究现状和技术进展,并给出了相应的解决方法;

(3) 对国内外具有代表性的 UPA 技术的最新研究成果进行了介绍。分析表明,将 UPA 技术与数值模拟、信号采集、图像处理等现代化技术相结合,将在飞机复合材料检测中发挥重大作用。

本文共有参考文献 43 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 谷雨)



图3 Olympus公司生产的OMNISCAN