

# 面向大型复合材料结构的高效 超声自动扫描成像检测技术

## High Efficient Ultrasonic Automatic Scanning Imaging Inspection Technique for Large-Scale Composites Structure

中航工业北京航空制造工程研究所 刘松平 郭恩明 刘菲菲 李乐刚 白金鹏 曹正华 谢富原 孟秋杰



刘松平

研究员,俄罗斯国立莫斯科大学理学博士,博士生导师,中航工业特级专家,全国无损检测学会常务理事,中国复合材料性能测试与检测专业委员会秘书长。长期从事复合材料及焊接超声可视化成像无损检测技术的研究与应用开发及设备研制,承担和完成复合材料及焊接无损检测方面的重要课题数 10 项,发表论文 90 余篇,获省部级科技进步一、二、三等奖若干项,申请专利 10 多项。

随着复合材料技术的迅猛发展及其在工业领域的广泛应用,复合材料已成为现代飞机领域的一个新的技术和经济增长点。近年来,复合材

从技术层面上,超声、X 射线、声振(声阻)、激光电子剪切、红外等可以用于复合材料的无损检测,但就复合材料结构特点和缺陷特征、检测要求和检测环境等而言,超声是目前复合材料结构的一种主要无损检测方法。

料的工装用量和应用水平,几乎成了现代飞机先进性的重要标志之一。世界上几大飞机制造公司竞相大幅度提高复合材料在新推出的各种飞机型号上的装机应用水平和用量,以此显示其技术能力,彰显其市场竞争力。在航空领域,由于其产品的特殊性,必须十分注重航空结构的减重和安全性,同时还要考虑到成本问题。在减重方面,复合材料为轻质航空结构提供了广阔和灵活的选择。提高复合材料装机用量、充分发挥和利用好复合材料的优点和特点,其中一个重要的技术方向就是设计采用复合材料大型结构和整体结构。

通过进行结构深度设计,使复合材料作为一种新型轻质材料在航空航天、交通等领域代替原先的金属材料成为可能。因此,复合材料用量的显著增加和规模化设计制造,特别是

大型复合材料结构的设计制造与应用技术已成为提高复合材料装机用量和充分彰显复合材料结构优势的一个十分重要的技术发展方向。

目前,基于各种复合材料的大型结构的设计与制造技术已经在航空航天、交通等领域得到了非常重要的工业应用。例如,飞机的机翼、机身,高速列车的机头罩等已设计采用了大型复合材料结构、整体结构。设计采用大型复合材料结构可以显著减小中间制造过程和环节,提高材料利用率,降低制造成本,同时可以显著地起到减重效果。因此,大型复合材料结构的综合应用效果受到业内的推崇。

由于大型复合材料结构制造工艺复杂,容易引入意外的工艺偏离影响因素,从而可能会造成大型复合材料结构在制造和生产过程中产生超

过设计允许的缺陷或者损伤,影响结构装机应用,甚至造成结构报废,从而导致大型复合材料结构制造成本的急剧增加。因此,为了确保大型复合材料结构的质量和装机应用安全,在大型复合材料结构的设计-制造-装配-服役(维修)过程中,要求对大型复合材料结构进行100%且可靠的无损检测。而由于大型复合材料结构的自身特点和检测难度,给大型复合材料结构的无损检测带来了巨大的挑战和机遇。因此,如何有效地解决大型复合材料结构的无损检测,特别是面向大型复合材料结构的高效自动检测技术已成为近年来复合材料领域一个十分重要的技术发展方向。

## 大型复合材料结构及无损检测

### 1 大型复合材料结构基本特点

就无损检测而言,大型复合材料结构十分突出的特点就是结构尺寸大,如飞机机翼,其结构尺寸可能达到十几米甚至数十米,结构形式复杂,通常由蒙皮、加强筋、腔、梁等构成一个大型复合材料结构和整体结构。与一般小型、简单复合材料结构相比,大型复合材料结构材料消耗和能源消耗大,制造工期长,制造费用高,而且大型复合材料结构受力复杂,承载大,属于复合材料受力结构。一方面,大型复合材料结构制造工艺要求严格;另一方面,大型复合材料结构在制造和生产过程容易出现导致工艺意外偏离的因素影响,从而导致缺陷或者损伤的产生和质量偏离,出现不合格的问题。由于大型复合材料结构的受力与承载及质量要求高,超过设计容许的缺陷,可能会使大型复合材料结构质量下降,从而影响其结构受力,甚至威胁整机安全。而且,因缺陷超过设计容许值导致大型复合材料结构不能装机应用还会使制造成本急剧增加,从而影响复合

材料的推广应用。因此,大型复合材料结构的无损检测显得尤为重要。

### 2 大型复合材料结构无损检测基本要求

由于大型复合材料结构上述特点和应用环境的复杂性与应用部位的重要性等,与小尺寸、简单形状复合材料结构的无损检测相比,大型复合材料结构的无损检测则要复杂、困难又重要得多。而且要求检测的面积大、检测部位多、检测耗时长,同时在检测技术上还面临可检性与可达性以及检测可靠性的挑战。因此,如何有效解决大型复合材料结构高效可靠无损检测,一直是国际上提升复合材料工业应用规模的一个核心支撑技术。像波音和空客这样的航空制造业内的龙头公司,一直是将大型复合材料结构的无损检测技术与大型复合材料结构设计-制造共同列为复合材料关键技术,并持续地研发和开展应用研究,一直将大型复合材料结构的无损检测融入到材料-工艺-结构设计-制造-维修的全过程,而且取得了很好的技术效益和经济效益。目前,国际上甚至将大型复合材料结构的无损检测技术实力和能力视为复合材料综合技术实力的重要考评特征。

由于大型复合材料结构尺寸形状复杂,属于承力结构,质量要求严格。因此,不仅要求对大型复合材料结构实现100%有效无损检测,更要求对大型复合材料结构各部位实现有效可靠的快速无损检测。由于大型复合材料结构检测面积大,非开敞部位检测可达性差,可检性不好,靠传统手工检测极易造成漏检,检测可靠性不高,检测效率极低。特别是对那些小则几平方米,多则几十上百平方米的检测面积的大型复合材料结构,实现高效可靠定量无损检测尤为重要,这也是目前解决大型复合材料结构无损检测的一个重要技术发展方向。

## 大型复合材料结构无损检测现实与问题

一方面,随着复合材料结构设计制造水平的提高,复合材料在航空航天、交通等工业领域的不断设计应用,人们越来越多地开始设计大型复合材料结构,以提高结构设计制造效率,进行结构减重和性能/功能的提升。这对大型复合材料结构的无损检测提出了空前的需求,越来越多的应用领域和有识之士开始十分关注大型复合材料结构无损检测技术的配套发展和对设计-材料-工艺-制造-维修全方位的支撑作用,工业部门对大型复合材料结构无损检测技术的需求也不断地被列入复合材料基础技术战略规划和复合材料工业技术与鼓励投入方向,行业内的投入也在不断增加,这给大型复合材料结构的无损检测技术和建设带来了空前的机遇;另一方面,由于大型复合材料结构设计-制造技术在国内起步还不算早,与之相应的大型复合材料结构无损检测技术的发展在总体上与工程实际需求尚有差距,人们对大型复合材料结构的无损检测技术的认知认同和理性规划、技术概念和检测文化等方面还存在一个认识 and 发展的过程。很多时候,过分地将解决大型复合材料结构的无损检测理解为检测设备的简单市场购买行为,造成了不断的检测设备购买投入,又不得不面对实际工业效果不佳的现实。多次多年的巨大投入,却难见工程上的技术实效和技术能力上的真正提升。检测设备作为商品可以通过市场行为购买,但当今国际市场的技术现实是:真正一流的技术在很多情况下是不能通过简单市场行为能够买到的。要形成有效的大型复合材料结构检测技术能力,还需要业内有识之士更多的长期自主研究和技术沉淀,特别是面向大型复合材料结构的高端无损检测技术与

设备这一集材料、工艺、结构、检测、设备、应用等多个学科专业于一体的综合技术,而且仅就大型复合材料结构检测设备而言,是难以有一定批量支撑的。因此,很难通过像通用数控机床那样建立和寻找稳定、持续和非常专业的商家支持和服务。目前这方面检测设备市场多为个体行为,基本上属于一次性个案处理。

所以,波音和空客在解决大型复合材料结构无损检测技术时,采用的是立足于自我,吸收业内外相关技术资源,通过长期持续的研发和沉淀,建立了适合各自公司自身材料、工艺、结构、应用和文化特点的大型复合材料结构无损检测技术与专用检测设备,才形成了目前令人仰慕的大型复合材料结构工业级无损检测综合技术和技术效益。

我国大型复合材料结构无损检测技术的发展还需呼唤精心钻研,专业积累,注重沉淀,鼓励自主研究,加强理性规划,有效投入,务实建设,协同发展,共同努力,从而促进大型复合材料结构无损检测技术的发展,为推动我国复合材料事业的发展和复合材料的应用规模做出技术贡献。

### 技术进展与现状

从技术层面上,超声、X射线、声振(声阻)、激光电子剪切、红外等可以用于复合材料的无损检测,但就复合材料结构特点和缺陷特征、检测要求和检测环境等而言,超声是目前复合材料结构的一种主要无损检测方法,目前国际上70%~80%以上的复合材料结构都是采用了超声检测技术,其中一些重要的技术优势就是,利用超声波在复合材料中传播特性的变化与缺陷的有机联系,能够确切地对复合材料内部缺陷进行定性定量评估与检测,易于实现自动化可视化扫描成像检测,特别是超声对复合材料内部缺陷检测出率高。因此,基于各种方式和方法的超声检测技术

一直是复合材料无损检测领域的最为活跃的技术方向,也是最能有效解决大型复合材料结构高效自动扫描检测的主要技术方向。

与小尺寸简单形状的复合材料结构不同的是,由于大型复合材料结构及制造工艺、结构特征、检测要求、检测效率与成本等迥然不同,需要研究采用专门的面向大型复合材料结构的高效超声检测技术,包括高效超声检测实现方法、高效超声检测仪器设备技术、高效超声检测工艺技术、缺陷判据与识别技术等等。同时还必须解决复合材料超声检测的分辨率、检测灵敏度和表面检测盲区问题,对于基于铺层设计的复合材料结构,要求超声检测分辨率和表面检测盲区要达到单个复合材料铺层厚度( $h_i$ ),对于预浸料复合材料层压结构, $h_i \approx 0.13\text{mm}$ ,特别是对于那些不

能实现超声穿透法检测的大型复合材料结构,超声检测分辨率和表面检测盲区显得更为重要,否则难以真正实现设计要求的大型复合材料结构的100%覆盖检测。

为了实现复合材料结构的超声自动扫描成像检测,西方和欧盟等复合材料技术发展国家,前后花费20余年的持续研究。目前已经建立了适合自身材料与结构设计制造特点的复合材料无损检测技术。针对近年来不断设计采用的大型复合材料结构,先后推出了面向复合材料翼类结构的大型超声自动扫描成像检测技术和工业级检测设备与配套检测工艺技术、球面压力框类大型超声自动扫描成像检测技术和工业级检测设备与配套检测工艺技术等等。总体技术思路是,针对不同类型的复合材料结构,研究采用相应的专业和专



(a) 扫描系统



(b) 成像与控制系统

图1 CUS-6000大型复合材料结构高效检测系统

门的检测技术和检测设备。从技术上,主要是采用超声检测方法解决复合材料及其结构的无损检测,以超声垂直入射/反射检测方法为主,以快速和面扫描方式实现大型复合材料结构的高效超声自动扫描成像检测。

在复合材料无损检测方面,中航工业北京航空制造工程研究所堪称国内一面旗帜,也是长期坚持在复合材料超声检测技术和技术平台研发能力、工程应用等方面自主研究和研究的单位。经过 20 多年的持续研究,中航工业北京航空制造工程研究所形成了一系列适合我国复合材料设计-制造-应用特点的高分辨 RF 超声检测技术和技术仪器设备、检测标准等,并且一直在工业领域发挥主力军的作用;在国内率先提出了复合材料高效无损检测技术思想和理念,并能一直为之不懈努力;开展复合材料无损检测技术专门研究和大型复合材料结构高效超声自动扫描成像检测技术研究。近年来,在面向复合材料结构高效超声自动扫描可视化成像技术方面取得了非常显著的成果,也是继波音和空客之后,真正拥有自主研发产权的面向大型复合材料结构高效超声自动扫描成像技术的业内领头单位之一。图 1 是中航工业北京航空制造工程研究所自主研制成功的、且近年来一直真正在持续投入规模化批量生产应用的工业级 CUS-6000 大型复合材料结构高效超声自动扫描成像系统,有效检测范围可达  $6\text{m} \times 9\text{m}$  以上,具有独特的曲面自适应跟踪能力,检测效率比传统超声检测设备提高近 20 倍,这也是继波音和空客之后的又一面面向工业级的大型复合材料结构高效自动扫描成像检测系统。图 2 是一个实际大型碳纤维增强树脂基复合材料结构的高效超声自动扫描成像检测结果,复合材料结构最长方向外形尺寸达 5.8m,图中的检测结果非常清晰展现了 CUS-6000 检测系统

对大型复合材料结构的优越检出能力和卓越的成像质量,同时还可以十分清晰直观地得到大型复合材料结构厚度方向中铺层的分布特征与规律。图 3 是中航工业北京航空制造工程研究所自主研发的另一种大型复合材料超声自动扫描成像检测系统——MUI-21,可用于翼类复合材料蒙皮结构的超声快速自动扫描成像检测。

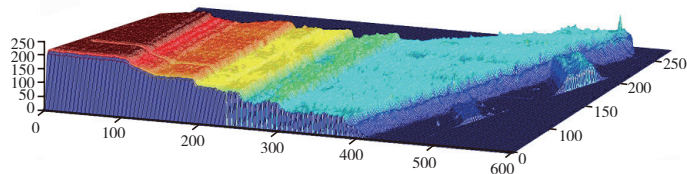


图2 典型大型复合材料结构超声高效扫描成像结果



(a) 扫描系统



(b) 成像与控制系统

图3 MUI-21大型复合材料超声自动扫描成像检测系统

## 结束语

大型复合材料结构无损检测技术是复合材料领域高新技术方向,既需要有很强的复合材料检测技术基础和积累,又需要有扎实的复合材料检测技术研发和系统设计能力,对检测技术的工程应用要求很高。国外成功的技术案例表明,必须结合自身设计、材料、工艺、结构制造和批产等特点,研究解决大型复合材料结构的无损检测技术和工业级检测平台,才能真正掌握和拥有适合我国工业特

点和检测技术文化特点的大型复合材料结构无损检测技术体系。

高效超声自动扫描成像技术是目前国际上解决面向大型复合材料结构无损检测的技术方向。中航工业北京航空制造工程研究所通过在复合材料超声检测技术和技术平台研发能力、工程应用等方面的长期自主研究和研发,在国内率先提出了复合材料高效无损检测技术思想和

理念,成功地自主研发了工业级面向大型复合材料结构高效超声自动扫描成像系统。有效检测范围可达  $6\text{m} \times 9\text{m}$  以上,检测效率比传统超声检测设备提高近 20 倍,具有优越的检出能力和卓越的成像质量,还可以十分清晰直观地再现大型复合材料结构厚度方向中铺层分布特征与规律。近年来一直在大型复合材料结构规模化批量生产列装应用,为我国航空领域大型复合材料结构的高效无损检测发挥了十分重要的作用。

(责编 三丰 夏宛)