

复合材料结构数字化 自动化无损检测技术*

Digitized and Automated Nondestructive Testing for Composite Components

北京航空制造工程研究所 刘松平 刘菲菲 郭恩明 李乐刚



刘松平

俄罗斯莫斯科国立大学理学博士, 研究员, 全国无损检测学会常务理事, 《无损检测》杂志副主编。一直从事新材料及其结构、焊接可视化成像等无损检测技术的研究与应用开发, 发表论文 70 余篇。

现代先进航空武器装备发展的明显特点是性能好、功能强、小批量、多品种、技术含量高、制造成本也高, 其设计思想的实现强烈依赖于新材料新工艺的研发水平、制造技术和制造设备能力。为了提升战场和市场竞争能力, 通常航空武器装备必须在

要从根本上解决我国目前和今后飞机复合材料结构的数字化、自动化无损检测问题, 其长久之路仍然是结合自身型号研制和批量生产, 复合材料装机应用特点, 研究适合自身技术特点的复合材料结构数字化、自动化无损检测技术, 开发相应的复合材料结构数字化、自动化无损检测技术装备。

质量(高)、效率(高)、寿命(长)、成本(低)等方面具有综合优势。而质量、效率、寿命、成本的完美结合, 需要通过先进的制造工艺和装备技术加以实现。先进的无损检测技术及其检测装备则是实现设计思想和制造理念, 增强用户信心, 提高竞争力的重要保障。

发展先进的制造工程技术, 提升设备数字化、自动化制造能力, 是合理解决现代化航空武器装备快速研制和生产的重要发展方向和工程途径。特别是以数字化、自动化为重要特征的快速敏捷制造技术已成为先进航空武器装备研制和生产中的重要工程技术方向。而数字化、自动化无损检测技术是数字化、自动化制造

和先进航空制造装备的重要组成部分。

随着复合材料等新材料的不断应用, 数字化、自动化无损检测技术的发展和成功应用已成为飞机设计和数字化、自动化制造过程的关键技术, 特别是在新材料与新工艺研究、新结构与新机研制的过程中, 数字化、自动化无损检测技术发挥着越来越重要的作用。

复合材料在飞机上的应用 与数字化、自动化无损检测

近年来复合材料的装机应用水平已成为现代航空装备先进性的标志, Joseph F Rakow 预测, 在未来 10 年里, 下一代飞机是复合材料的飞机, 复合材料从过去非承力结构正不断被用于主承力结构。10 年前,

* 国家自然科学基金(60572099 和 60727001)资助项目。

Boeing 777 复合材料用量为结构重量的 10% 左右,而 Boeing 787 复合材料用量达到结构重量的 50% 左右。除了 Boeing 787, Airbus 380 复合材料用量也达到结构重量的 25% 左右,与 Boeing 787 复合材料机身相比, Airbus 380 一个惊人之举就是设计了全复合材料中央翼盒。复合材料在军机上的应用态势丝毫不逊于民机,例如 F/A-18C/D 复合材料用量高于 20%,而据 Joseph F Rakow 报道, F-22 复合材料用量则猛增至 60% 左右。复合材料应用结构也由早先非承力的简单结构发展到承力结构、整体结构、大型结构和复杂结构。因此,复合材料结构在现代飞机中具有举足轻重的作用。

(1) 复合材料制造工艺优化与成本的控制离不开数字化、自动化无损检测技术。

目前复合材料结构的材料和制造成本居高不下,结构尺寸越来越大,结构件形状越来越复杂,需要采用先进可靠的数字化、自动化复合材料无损检测技术,及时为复合材料工艺优化和结构件制造提供反馈信息,帮助稳定工艺,提高产品的合格率。由于复合材料无损检测贯穿于复合材料结构成型、装配、试验、维护/维修、使用全过程,因此,复合材料无损检测成本和效率直接影响复合材料的总成本,而降低检测成本的一个有效技术途径是发展数字化、自动化无损检测技术,提高检测效率。

(2) 复合材料结构的批量生产与检测需要采用数字化、自动化无损检测技术。

复合材料结构通常需要进行 100% 覆盖检测。随着复合材料大量装机应用和飞机批量生产,复合材料结构无损检测的量急剧增加,检测的耗时、效率和进度等直接影响飞机的研制和生产全过程。以 F-22 复合材料进气道无损检测试验为例,采用超声检测技术,约需 24h/件。复合

材料结构尺寸越大,检测耗时越多;结构形状越复杂,检测效率会明显降低,检测耗时也会更多。因此,如此大的检测工作量,仅靠传统的手工检测,显然难以满足要求。

(3) 复合材料承力结构的设计应用需要采用数字化、自动化无损检测技术。

目前复合材料应用已经由早先非承力的简单结构发展到次承力结构甚至承力结构、整体结构、大型结构和复杂结构。因此,对复合材料结构无损检测技术的要求更高:不仅需要进行无损检测,更需要得到复合材料内部质量和缺陷的量化信息;不仅要求检出缺陷,还需要建立复合材料缺陷与结构性能的有机联系,建立相应缺陷评估准则;不仅需要能检出分层、疏松等一些影响结构力学性能的宏观缺陷,还需要检出可能影响结构疲劳性能的微观或分布型缺陷。这就需要采用数字化、自动化无损检测技术来满足这些要求。

(4) 飞机长寿命设计与复合材料结构可靠性需要采用数字化、自动化无损检测技术。

现代飞机的一个重要技术特点就是要求长寿命,而随着复合材料在机身、机翼等重要部位的设计应用,复合材料结构必须满足预期的设计寿命。由于复合材料结构整体上没有中间材料加工过程,一旦固化过程完成,就意味着复合材料结构整体力学性能固定,除非在制造过程中出现了明显的质量问题,如其内部产生了缺陷。当那些设计上不允许存在的缺陷随复合材料结构带到飞机结构中时,将会影响整机的安全服役和使用寿命。因此,必须通过先进可靠的无损检测技术确保复合材料结构的可靠性和质量。显然,仅

靠传统的手工检测不能满足要求,一个有效的技术途径就是采用数字化、自动化无损检测技术。

复合材料数字化、自动化无损检测技术的现状

复合材料数字化、自动化无损检测技术是近年来随着复合材料不断扩大装机应用规模和现代飞机设计制造特点提出来的。针对不同的检测环境、工序阶段、结构形状等,目前复合材料数字化、自动化无损检测在技术上分为两大方向:一是基于仪器的复合材料数字化检测技术;二是基于设备的复合材料数字化、自动化无损检测技术。

基于仪器的复合材料数字化检测技术主要用于解决一些难以实现自动化检测的应用场合和复合材料结构的无损检测,如复合材料修理过程中的无损检测、复合材料复杂结构和复杂结构部位的检测。主要是通过检测仪器的数字化,来提高对检测信号的数字化处理能力和缺陷量化分析能力,实现一些诸如检测参数、典型检测信号的记录存储等。目前主要是以超声检测仪器技术为主,多采用超声反射法检测。值得指出的是,目前市场上的数字化超声检测仪器和缺陷评估方法大多是针对金属材料设计开发的。由于复合材料结构的自身特点和缺陷特征,通常需要开发专门的数字化检测技术,实现



检测信号高保真数字化处理,提高检测分辨率,减少检测盲区,进行缺陷的量化评估。就树脂基复合材料而言,目前主要是采用超声数字化无损检测技术,它包括超声换能器技术、超声技术、信号处理技术、缺陷评估

对典型复合材料孔隙含量进行超声量化评估,从结果中可以看出孔隙在复合材料中不同位置的分布情况。

随着复合材料批量装机应用和批量生产,基于设备的复合材料数字化、自动化检测技术近年来发展迅速,目前 NASA、Boeing、Lockheed Martin、Airbus 等在复合材料结构制造和生产过程中,都在大力发展数字化、自动化无损检测技术。目前主要基于超声方法,在检测信号数字化处理基础上,针对不同复合材料构件,利用扫查机构设计技术和数控技术,通过专门的技术设计和设备研发,解决复合材料构件的超声数字化、自动化无损检测。

多轴扫描机构上,在数控系统作用下,通过运动编程控制,使 2 个探头对被检测复合材料构件进行自动扫描检测。采用穿透法检测时,对超声换能器和仪器的分辨率和检测盲区要求相对较低,但需要有很好的同步与扫描控制技术。

与超声反射法相比,其主要技术特点还有:

- 超声换能器需要从两侧接近工件;
- 超声换能器同步控制和型面跟踪复杂;
- 对于复杂的零件,通常只能采用单通道工作;
- 检测效率不高;
- 技术成本高。

(2) 基于超声反射法的复合材料数字化、自动化无损检测技术。

利用入射声波在复合材料中传播产生的反射信息进行缺陷识别与评估,欧洲比较青睐这种检测方法,超声换能器安装在一多轴扫描机构上,通过运动编程,换能器在数控系统作用下,对被检测复合材料构件进行自动扫描检测。通常复合材料单个铺层厚度约 0.13mm,因此采用反射法检测时对超声换能器和仪器的分辨率和检测盲区要求较高,但不需要有同步扫描机构,检测灵敏度比穿透法高。与超声穿透法相比,其主要技术特点还有:

- 超声换能器只需要从一侧接近被检测工件;



复合材料高分辨率超声检测系列仪器

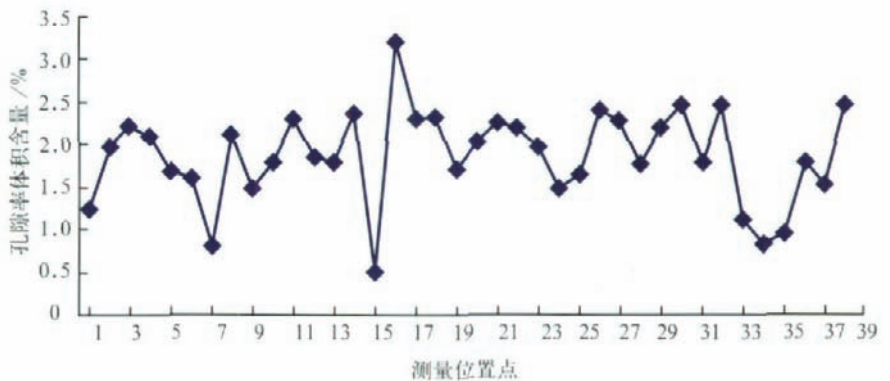
技术和仪器技术。从 20 世纪 80 年代初,北京航空制造工程研究所就开展了复合材料数字化无损检测技术的研究,成功研究了高分辨率超声换能器、复合材料 RF 超声检测方法、缺陷识别与评估方法、复合材料高分辨率超声检测系列仪器等,一直是国内复合材料无损检测的支柱技术和主要手段,在航空、航天、兵器、交通、空军等部门的科研和生产第一线发挥了关键作用,特别是研究建立的高分辨率超声换能器技术和缺陷评估技术,至今在国际上具有明显的技术特点。

基于这些复合材料数字化超声检测仪器和缺陷评估技术,可以对复合材料中的缺陷及其位置(深度)、面积、性质、类型等进行量化评估。采用北京航空制造工程研究所生产的多功能复合材料高分辨率超声检测仪器(MUT-1)和已建立的复合材料孔隙率超声数字化评估技术,可以

目前基于设备的复合材料超声数字化、自动化检测技术主要包括超声换能器技术、超声技术、扫描技术、控制技术和缺陷评估技术,可分为超声穿透法和超声反射法两大类。

(1) 基于超声穿透法的复合材料数字化、自动化无损检测技术。

利用入射声波在穿过复合材料时能量的衰减变化进行缺陷识别与检测,西方比较青睐这种检测方法,超声换能器分别安装在 2 个对称的



典型的复合材料孔隙率超声数字化评估结果

- 超声换能器型面跟踪要求高;
- 可实现多通道检测;
- 检测效率高;
- 技术成本较低。

不论采用哪种数字化、自动化超声检测方法,都需要有很好的型面跟踪技术、信号处理技术和超声系统综合技术。特别是针对大型复

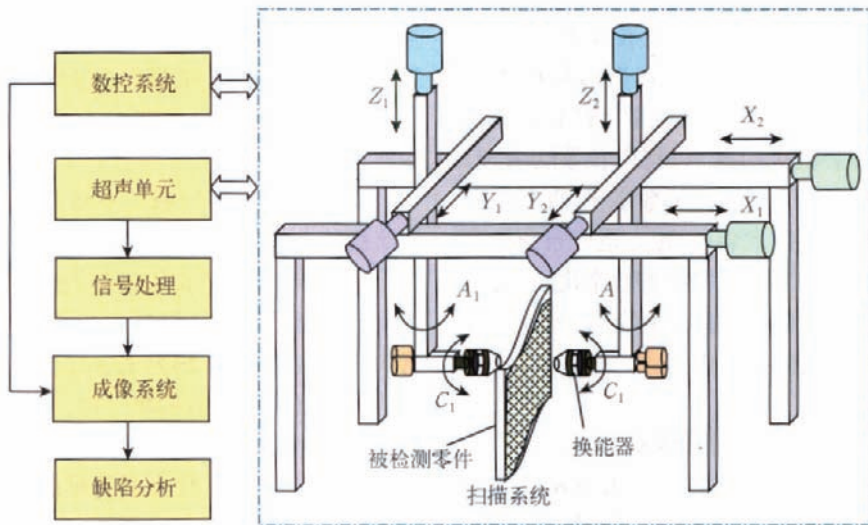
提出并成功研究了高分辨率 RF 超声检测技术、缺陷识别方法、检测仪器、微盲区换能器、缺陷成像方法、自动扫描成像检测设备等,形成了独特的复合材料检测技术体系,一直在国内复合材料应用领域发挥主要作用。如研制了 FJ 系列高分辨率无盲区超声换能器、复合材料系列超声检

的技术支持和支撑,在航空型号研制和生产中一直在发挥重要作用。特别是正在研制的 UltraScan 9000 复合材料数字化、自动化超声自动扫描检测系统,多达 20 检测通道,采用独特的自动跟踪扫描技术,可以适应 7500mm×6000mm 以上规格的复合材料构件的自动扫描检测。

采用这种数字化、自动化超声检测技术,可以通过直观的图像方式再现被检测复合材料结构内部缺陷的详细分布和整个结构的内部质量情况,进行缺陷的量化评估。

对复合材料数字化、自动化无损检测发展的思考

复合材料数字化、自动化无损检测是一个与复合材料及其制造工艺密切相关的专业技术,其发展和应用必须紧密结合自身的复合材料、结构与制造、应用等特点进行合理规划,例如 Boeing 和 Airbus 公司一直结合自身的复合材料研发计划和生产任务,在开展复合材料数字化、自动化无损检测技术的研究和应用。特别是基于设备的复合材料数字化、自动化无损检测,针对性更强,去过 Boeing 和 Airbus 公司参观的人都能感觉到在复合材料数字化、自动化无损检测方面,他们具有明显的不同

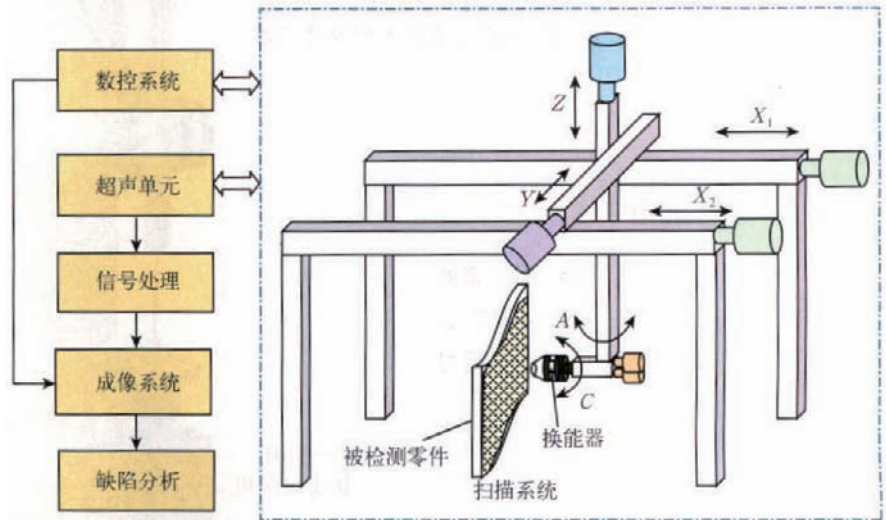


超声穿透法数字化、自动化检测方法

合材料结构,目前国际上采用的扫描方法主要有 3 种:示教、基于零件的 CAD 模型和测量仿形。但实际检测应用情况都不理想:示教和仿形的方法效率太低,被检测零件的 CAD 模型到了复合材料检测工序,已经不适用。所以,寻找新的快速适用的扫描方法是解决复合材料构件数字化、自动化检测的当务之急。近年来北京航空制造工程研究所一直在开展这方面的新技术研究,正在研究一种基于被检测复合材料零件自由型面的跟踪扫描技术,以解决 7500mm×6000mm 以上大型复合材料构件的超声数字化、自动化高效无损检测,目前已完成技术方案试验,进入系统设计制造阶段。

北京航空制造工程研究所是国内最早从事复合材料无损检测的专业研究所,早在 20 世纪 70 年末 80 年代初,就开始了复合材料无损检测技术研究,针对复合材料特点,先后

测仪器、CUS-21 复合材料构件复杂部位超声检测系统、CUS-22 超声自适应检测设备、MUI-21 大型复合材料结构超声自动检测技术设备、CUS-2F 复合材料缠绕超声自动检测技术设备等,为国内复合材料研究和工业应用部门提供了强有力



超声反射法数字化、自动化检测方法

特点和技术思路。复合材料数字化、自动化无损检测技术的关键是需要有十分强大的技术支持的特殊专用设备,集无损检测、传感器、仪器、信号处理、扫描控制、成像以及计算机、机械、电器、数控等多专业、多学科于一体,专业性极强,属于特殊的个例技术设计应用,必须结合复合材料、工艺和结构设计制造等进行专门的设计。Boeing 和 Airbus 公司都花费巨资,进行了长时间的持续研发和技术积累,才有今天的技术规模。

我国在这方面几十年的简单引进案例反复表明,要从根本上解决复合材料数字化、自动化无损检测,仅单纯或机械地引进一两台检测设备,远不能从根本上解决复合材料结构数字化、自动化无损检测。

一方面,目前我国每年都要花费大量资金从国外购买一些不太适合自身型号研制和生产特点的检测设备,而且这些检测设备的引进又大多

缺乏技术依托和配套技术支持,缺少应用开发和相关技术配套,因此难以形成有效的生产能力。另一方面,在型号研制和生产中又急需无损检测技术设备来确保装机结构件的质量,帮助稳定工艺,为材料研究提供评价手段,为设计应用反馈信息,保证复合材料结构研制和型号生产过程中装机件质量。

因此,今后的发展规划与思路,应立足自我,充分利用国际技术平台,根据自身型号批量生产和复合材料装机应用特点,利用有效的资金,开发复合材料结构数字化、自动化无损检测技术装备,建立适合自身技术特点的复合材料结构数字化、自动化无损检测技术体系和平台,增强可持续发展的技术内涵。

结束语

复合材料装机应用规模已经成为现代飞机先进性的重要标志,研究

建立合理有效的复合材料数字化、自动化无损检测技术,已经成为各国的重点攻关方向。

通过采用数字化、自动化无损检测技术,可以得到复合材料构件内部质量和缺陷的量化信息,提高检测结果的可靠性和准确性,帮助改进和稳定工艺,降低废品率和制造成本。

目前复合材料数字化、自动化无损检测技术主要包括基于仪器的数字化无损检测技术和基于设备的数字化、自动化无损检测技术,还有不少技术有待突破。

要从根本上解决我国目前和今后飞机复合材料结构的数字化、自动化无损检测问题,其长久之路仍然是结合自身型号研制和批量生产,复合材料装机应用特点,研究适合自身技术特点的复合材料结构数字化、自动化无损检测技术,开发相应的复合材料结构数字化、自动化无损检测技术装备。
(责编 晓霏)



德国SPRENGER机械、电动式装配/推削用压机

Maschinenbau
Entwicklungen

德国SPRENGER机械、电动式装配/推削用压机经40多年专业设计和不断改进,现已广泛应用于各类机械的装配,如压进、推出轴筒、套类零件等。

同时也可使用推进型拉刀来洁净高效地制作各类花键槽。

特点

| | |
|--------|--------|
| ★ 高压力 | ★ 操作简单 |
| ★ 长行程 | ★ 可靠安全 |
| ★ 坚固设计 | ★ 节省空间 |
| ★ 高效装配 | |



T5-M01
电动式压机



T3、T5
机械式压机

广告索引号 08-070

中国总代理 上海德物机械有限公司

地址 上海市中山北路2130号方千大厦2001室 电话 021-52914389 52919640 传真 021-52917086
电邮 sales@dimoral.com 网址 http://www.dimoral.com/

