

复合材料喷水耦合超声C扫查检测系统的研制

Water-Squirting Ultrasonic C-Scan Testing System for Composite Materials

清华大学机械工程系先进成形制造教育部重点实验室 原可义 韩赞东 王柄方 陈以方
北京固鸿科技有限公司 黄志刚

目前,可用于复合材料无损检测的各类方法中,以超声检测方法最为有效和方便,发展也最迅速。由于复合材料航空构件的尺寸通常比较大,有些构件不适合长时间水浸,并且大多数复合材料对超声波的衰减都比较严重,因此,复合材料超声检测方法通常为喷水耦合的穿透检测。

复合材料具有比强度高、比模量大、抗疲劳性能强、膨胀系数低以及破损安全性好等一系列优点,能够很好的满足航空制造的特殊要求。因此,随着制造技术的进步,复合材料在飞机制造中的应用比例不断提高。例如,美国军用飞机 F-22 的复合材料用量已达到 60%; Boeing 787 采用了复合材料机身,其复合材料用量达到了 50%; Airbus 380 则采用了全复合材料中央翼盒。可以说,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。

由于复合材料制造工艺的独特性,导致复合材料的缺陷主要有分层、脱胶、疏松、夹杂和树脂固化不良等。由于航空制造的高可靠性要求,随着复合材料航空构件的应用比例不断增加,航空复合材料的无损检测也越来越受到人们的关注。目前,可用于复合材料无损检测的各类方法中,以超声检测方法最为有效和方便,发展也最迅速。由于复合材料航空构件的尺寸通常比较

大,有些构件不适合长时间水浸,并且大多数复合材料对超声波的衰减都比较严重,因此,复合材料超声检测方法通常为喷水耦合的穿透检测。

现在国内各航空企业所使用的大型复合材料超声自动探伤设备多为进口,由于设计指标与国内的实际工况并不符合,导致绝大多数设备不能充分发挥检测功能。国内报道的一些试验性的喷水 C 扫查检测设备,虽然具有较好的检测效果,但是,检测效率相对较低,对于大型的航空构件来说,检测速度显然是一个重要的指标。

基于上述原因,本课题研发了一套用于复合材料检测的喷水耦合超声 C 扫查系统,该系统可以在 500mm/s 的扫查速度下,对复合材

料(包括层压板材料和蜂窝材料等)实现有效地 C 扫查成像检测。

系统设计

该系统采用喷水耦合方式,利用超声透射波对被检测的复合材料进行 C 扫查成像,可用于尺寸 2m × 0.3m 水平放置的复合材料平板或小曲率板的超声检测。需要时该系统也可实现超声喷水反射法检测。

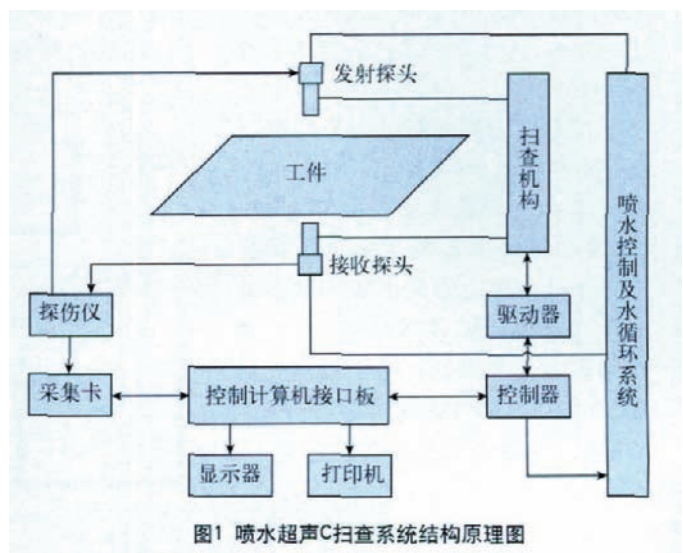


图1 喷水超声C扫查系统结构原理图

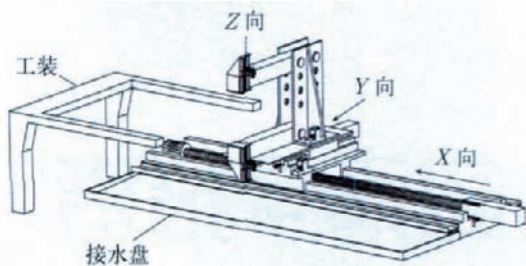


图2 扫查机械结构示意图

本课题设计的喷水超声 C 扫查检测系统结构如图 1 所示,该系统主要由扫查机械子系统、水循环子系统和超声电子及成像子系统 3 部分组成。以下分别介绍各个子系统的功能。

1 扫查机械子系统

扫查机械采用外悬挂式结构,如图 2 所示。

超声探头和喷嘴置于 Y 向末端,将运动部件与喷水检测部件有效地分离,使整套机械的防水功能容易实现。X 向的扫查范围约为 2500mm,扫查速度为 500mm/s,最高速度可达 1000mm/s。Y 向的扫查范围约为 320mm。X 向和 Y 向均可作为扫查方向或步进方向,整套扫查机械的重复定位精度可达 0.03mm。

Z 向为探头扫查面的垂线方向。被检工件水平置于工装上。根据工件厚度的不同可以手动调节 2 个超声探头的间距,最大间距可达 300mm,这也是可以检测的最大理论厚度。Z 向的探头夹持器还具有 2 个转动自由度,用于调节水柱方向以及对中等,这 2 个转动自由度的范围均大于 90°。

扫查机械的伺服电机及其控制系统采用德国 BECKHOFF 公司的整套系统,该系统能够提供高精度的运动控制和位置反馈,同时对于伺服电机和伺服驱动器的电磁干扰能够进行有效地屏蔽,使其对超声电子系统的影响大为降低。控制系统配套的 TwinCAT 组态软件为上位机控制提供了充分且方便的接口。

2 水循环子系统

水循环子系统完全自主设计制

造,用于提供压力和流量稳定的耦合水柱。该系统主要包括水箱、循环泵(给喷嘴供水)、过滤器、稳压去气装置、流量计、集水槽和回流泵等。该系统对 2 个喷嘴独立供水,可分别提供 $3 \times 10^5 \text{Pa}$ 的水压,最大 10L/min 的流量。水循环

子系统的基本构成,如图 3 所示。

检测过程要求水循环子系统提供压力和流量稳定、不含有气泡以及流动状态接近层流的耦合水柱。其中稳压、稳流和除气可在前端系统完全实现,而控制耦合水柱的流动状态则需要对喷嘴进行水力学设计。本系统参考了国内外已有的设备和经验,结合自身的实际情况,建立了喷嘴的水力学模型,并完成了喷嘴的整体设计和制造。为超声检测建立了完整而有效的水循环系统。

3 超声电子及成像子系统

超声电子系统的工作触发由 PLC 提供,触发方式包括等时间间隔触发和等距离触发。利用 2 台超声信号发射/接收仪以及 2 通道并行的数据采集卡,建立了 2 个相互独立的模拟+数字超声通道,使该系统的可扩展性和适应性大为提高。如果需要,该系统可以实现超声透射+超声反射法检测,也可以实现双探头的超声反射法检测。超声电子系统的连线原理,如图 4 所示。

启动检测成像软件后完成对超

声电子系统和机械系统的自检;自检完成后,操作人员可以设定检测参数,包括采集卡参数、超声传感器参数、成像的调色板参数、机械扫查参数、检测波形显示和门限设置以及 2 个超声信号发射/接收仪的参数设置等;此外,在参数设置界面,操作人员还可以手动操纵扫查机械以及测量水程、测定材料声速等,需要的时候也可以进行试扫查。在此界面设定的各项参数均可存档记录,对于同类型工件无需重新设置。

参数设置完毕后,可以进入扫查界面,首先生成检测记录文件,确定检测信号记录方式后即可开始检测。检测过程中,软件将实时显示 C 扫图像和 2 个通道的 A 扫波形。如果在扫查过程中发现需要复查的可疑点,则可以暂停扫查,点击 C 扫图像中的对应点,扫查机械将会自动移动到该点,提取该点的 A 扫信号,以确认缺陷情况。在暂停状态下,还可以对 C 扫图像实现局部放大,以细致观察被检工件的质量。暂停后,可以继续扫查,也可以停止扫查,对工件进行相应的处理。软件还提供了续扫查功能,即恢复以前未完成的扫查任务,从中断点处继续扫查。

扫查完成后,可以继续扫查下一个工件,也可以转入后处理界面。后处理界面提供对 C 扫数据的进一步分析和成像优化处理等操作。它主要实现以下功能:超声 A 扫信号

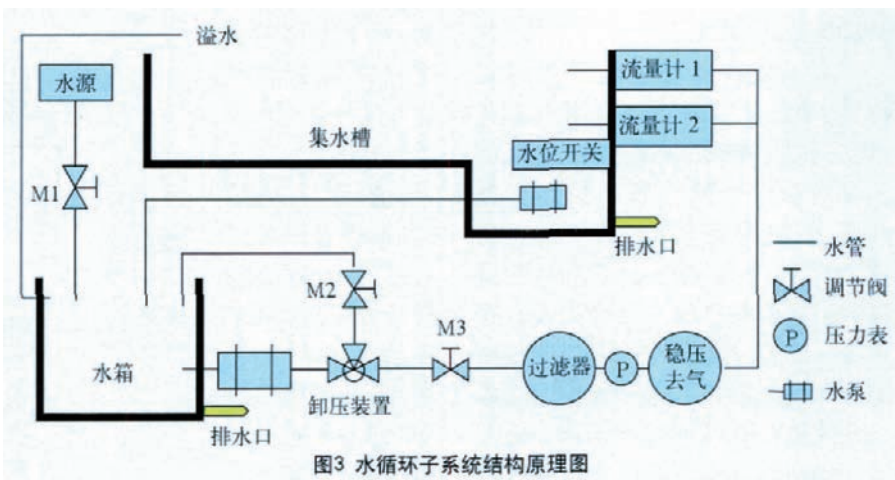


图3 水循环子系统结构原理图

试验结果

复合材料中的缺陷会造成声波的反射和衰减,因此,缺陷处的穿透波幅值会降低甚至没有穿透波,从而在C扫查图上形成深色区域。图6所示为对2种典型航空复合材料的检测结果。

图6(a)为5mm厚碳纤维层压板在500m/s检测速度下的检测结果。图中圆点或圆环为预埋缺陷,其实际直径分别为6mm、9mm和12mm,检测直径分别为7mm、10.5mm和13mm,检测精度可达2mm。由于粘接状况各不相同,所以成像结果略有差异,但缺陷的基本特征已经得到了有效地检出。图中横贯的黑线为支撑工件的1.5mm直径钢丝所成的像。

图6(b)为12mm厚的铝蒙皮 +

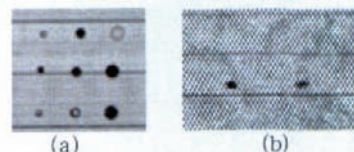


图6 复合材料超声成像检测结果

铝蜂窝材料的检测结果。图中蜂窝直径约为6mm,黑白相间的圆点即为蜂窝格子,2处不规则深色区域为缺陷,经软件测量宽度约为10mm,长度约为15~18mm,此2处缺陷为材料原有的粘接缺陷。

结束语

本课题成功研发了一套用于复合材料检测的喷水耦合超声C扫查检测系统,该系统可在较高的速度下实现对航空复合材料的有效检测,检测速度可达500m/s,检测精度可达2mm,能够满足航空复合材料无损检测的要求。在研发过程中,对复合材料喷水耦合超声检测系统所涉及的各项技术进行了比较深入地研究,为进一步开发大型的超声喷水检测系统积累了必备的知识和经验。

(责编 玉龙)

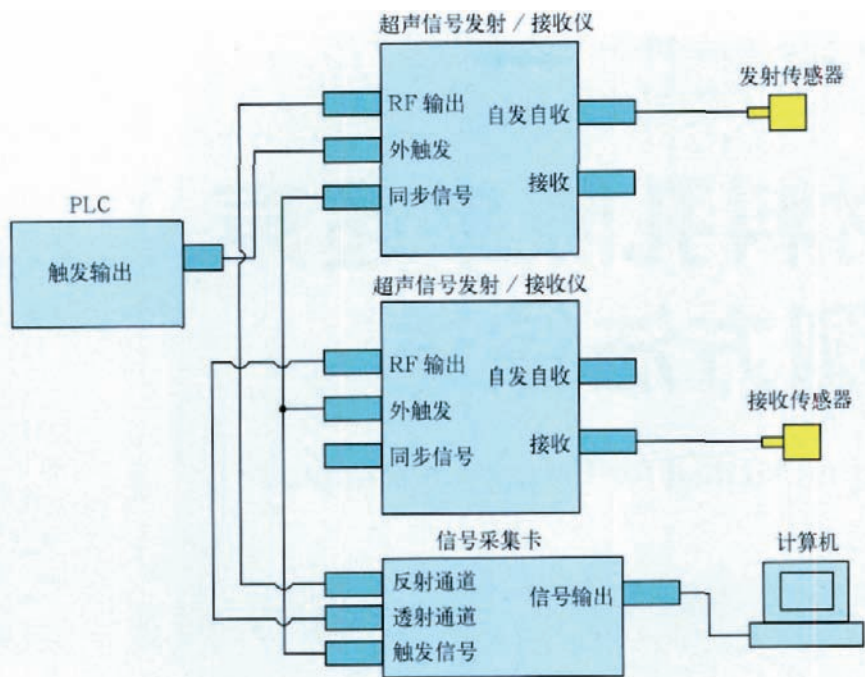


图4 超声电子系统原理图

的时域和频域分析处理;对C扫图像重新处理再成像,实时放大,统计C扫柱状图,显示关键点的坐标位置、幅度、相位信息、测量缺陷面积、缺陷距离和缺陷当量等信息;对A扫信号的统计平均,给出缺陷评价图;保存和打印C扫图像,自动生成缺陷统计报告等,如图5所示。

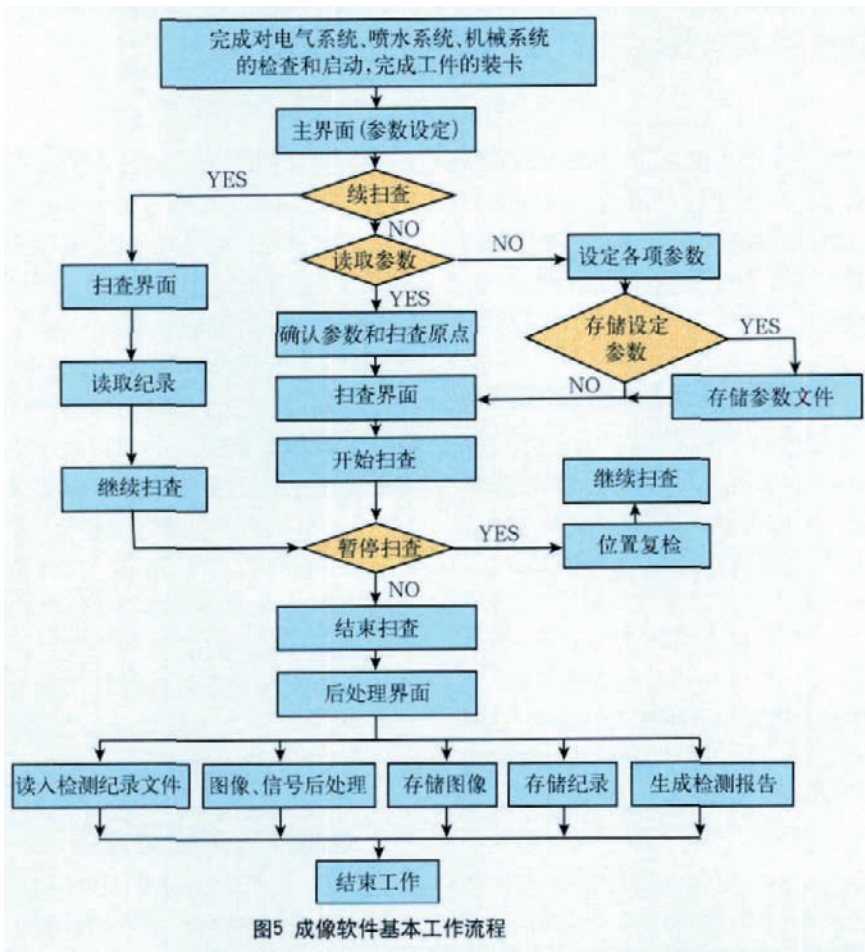


图5 成像软件基本工作流程