

浅谈复合材料超声手动扫描成像检测

傅天航, 刘松平

(北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘 要: 针对复合材料超声成像检测, 文章回顾和分析了超声手动扫描成像检测实现方法、超声换能器手动扫描定位方法以及超声信息处理与缺陷识别方法, 对复合材料超声手动扫描成像检测技术发展有一定的指导意义。

关键词: 无损检测; 超声手动扫描; 超声换能器定位

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)08-0050-05

Review of Manual Scan Ultrasonic Imaging Methods for Composite Materials

FU Tian-Hang, LIU Song-Ping

(AVIC Beijing Aeronautical Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: An ultrasonic imaging method for composite materials by using manual scanning techniques was reviewed. This paper summarized the advantages and disadvantages of some ultrasonic transducer manually scanning positioning methods. The selections of the characteristic parameters were analyzed.

Keywords: Nondestructive testing; Ultrasonic manual scan; Ultrasonic transducer positioning

自 20 世纪中叶以来, 复合材料在航空宇航工业领域得到了广泛综合应用。特别是进入 21 世纪以来, 由于复合材料自身特有优点和设计材料工艺检测水平的提高, 能够制造出较为复杂的复合材料结构件, 可以显著地减轻机身重量, 因而在飞机领域的应用达到空前规模, 几乎被国内外业内同行推崇到了用复合材料的装机用量标榜现代飞机先进性的地步。但在复合材料的制造、成形过程中, 由于工作参数的偏离等原因, 可能会产生超过生产设计容限的缺陷(如分层、夹杂、脱粘), 这些缺陷的存在会影响结构的性能和受力, 因此, 在航空航天领域通常要求对复合材料进行 100% 无损检测^[1-2]。在众多的复合材料无损检测方法中, 超声检测是一种最为有效和应用最广泛的方法之一。

目前基于超声原理的复合材料无损检测方法主

要以超声手动扫描检测和自动扫描检测两种方法为主。对于大型开敞性复合材料结构, 在制造阶段, 目前比较多地采用超声自动扫描检测方法, 其突出的优点是自动检测、可视化、快速可靠、检测结果直观, 也避免了人为因素的影响和错漏检^[3-4]。但其在室外场合和一些特殊复杂的复合材料结构实现起来困难, 实现成本高。超声手动检测方法目前主要采用人工扫描, 操作人员根据仪器显示的超声显示信号进行缺陷判别和缺陷位置及区域标记, 其突出的不足是检测结果易受检测人员主观因素影响, 检测结果显示不直观, 容易出现漏检, 但其突出的优点是检测方便、灵活、技术成本低, 可用于室内外不同场合的复合材料超声检测。因此, 基于手动扫描的超声检测方法目前在复合材料无损检测中仍然起到很重要的作用。为了克服超声手动扫描检测的不足, 自 20 世纪 80 年代以来, 先后发展了各种基于超声手动扫描成像的检测方法, 试图将超声手动扫描的灵活性和自动扫描能成像的优点相结合, 实现复杂场合(如外场)和复杂外形结构的复合材料超声手动扫描成像检测, 以提高复合材料超声检测的可靠性和

收稿日期: 2011-09-08

基金项目: 无损检测技术教育部重点实验室基金资助项目(20090929); 国家自然科学基金资助项目(60572099)

作者简介: 傅天航(1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为复合材料超声无损检测。

可视化程度。

1 超声手动扫描成像检测方法

超声手动扫描成像检测是通过人工移动超声换能器,采用手动扫查方式获得自动化机械扫描检测的成像效果,同时用 A-显示信号和 B、C-扫描图像实时再现被测零件的内部质量,以接触式反射法检测模式为主。因此,必须对作手工扫查运动的超声换能器进行准确地实时跟踪定位,同时实时记录对应每一个扫查位置超声换能器的超声信号,经过对得到的超声检测信号的实时处理和超声换能器位置信号的实时重构,以成像方式再现每个扫查位置的检测结果^[5]。其原理组成如图 1 所示,主要由超声换能器、超声信号处理单元、位置信号解调单元以及计算机成像显示单元等几部分组成。

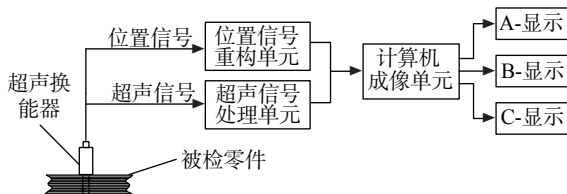


图 1 超声手动扫描成像检测原理组成

通常可以将手工移动换能器对复合材料结构的检测等效为 (x, y) 平面内的自由扫查检测。超声手动扫描成像检测就是通过合理的定位方法和检测信号处理方法,将所检测复合材料结构扫查区域内每一个检测位置点的检测结果在图像区域进行成像显示。如图 2 所示,对于所检测复合材料结构某个 $L \times W$ 扫查区中任一检测点 A_{ij}^0 ,其位置坐标可表示为 $P_{ij}^0(x, y)$,对应 A_{ij}^0 点的超声信号可表示为 $Q_{ij}^0(s_1, s_2, \dots, s_n)$,即 $A_{ij}^0 \{P_{ij}^0(x, y), Q_{ij}^0(s_1, s_2, \dots, s_n)\}$,其中 x, y 为当前检测点在复合材料结构中的扫查位置坐标, s_1, s_2, \dots, s_n 为对应的超声信号函数 Q_{ij}^0 的特征参数。若用 $m \times n$ 的成像域再现所扫查检测区 $L \times W$ 中的检测结果,采用图 2 所示的映射关系,则 A_{ij}^0 点对应成像域 A_{ij}^1 点,这里 $A_{ij}^1 (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n)$,表示被测复合材料结构扫描检测区中 A_{ij}^0 点的成像点,即 $A_{ij}^1 \{P_{ij}^1(x, y), Q_{ij}^1(r, g, b)\}$, Q_{ij}^1

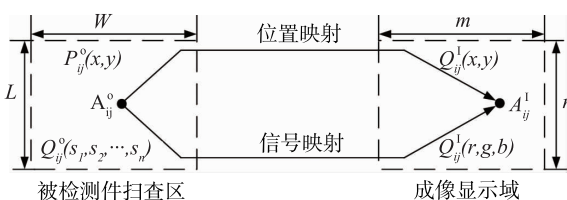


图 2 超声手动扫描成像方法

(r, g, b) 为 A_{ij}^1 点在图像中的成像颜色或灰度值, r, g, b 为图像的三基色,受当前检测点超声信号调制。

为了实现超声手动扫描成像,一方面要通过手动定位方法获取位置坐标 $P_{ij}^0(x, y)$,然后将其映射到超声成像域中的对应点位置 $P_{ij}^1(x, y)$;另一方面,要根据所提取的相关超声回波信号 $Q_{ij}^0(s_1, s_2, \dots, s_n)$,用以调制对应点像素的颜色或者灰度 $Q_{ij}^1(r, g, b)$,其映射关系如图 2 所示^[6]。超声手动扫描成像检测的核心技术在于如何快速获取各个检测点的位置坐标 $\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^L P_{ij}^0(x, y)$ 和超声回波信号 $\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^L Q_{ij}^0(s_1, s_2, \dots, s_n)$,然后建立 $\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^L P_{ij}^0(x, y)$ 与 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij}^1(x, y)$, $\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^L Q_{ij}^0(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 与 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Q_{ij}^1(r, g, b)$ 的映射关系,实现超声手动扫描成像检测。

2 换能器定位方法

位置坐标 $\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^L P_{ij}^0(x, y)$ 的获取,主要是通过设计采用适当的超声换能器跟踪定位方法来实现,因此,超声换能器的跟踪定位是超声手动扫描成像检测的核心技术之一。跟踪定位的精度和速度直接影响检测效果,因此对手动扫查超声换能器跟踪定位的研究是这方面关注的焦点^[7]。目前可用于复合材料超声手动扫描成像检测定位的方法主要有机械定位、声波定位、视频图像定位、编码定位。

2.1 机械定位

机械定位主要是采用复合连杆机构,利用测角元件测量各杆的转角,最后利用已知的各杆长度,推算出超声换能器的坐标位置^[8]。如图 3 所示,复合连杆机构主要由连杆 (L_1, L_2) 和旋转运动副 (A, B) 组成,每个运动副上均装有角位移传感器。设超声

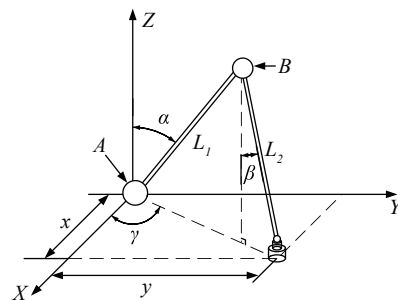


图 3 机械定位方法

换能器所在的位置坐标为 (x, y) ,角位移传感器测得角大小分别为 α, β, γ ,连杆 L_1, L_2 的长度分别为 l_1, l_2 ,则超声换能器的位置坐标 $P_{ij}^0(x, y)$ 可表示为^[9]:

$$P_{ij}^0(x, y) = \begin{cases} x = (l_1 \sin \alpha + l_2 \sin \beta) \cos \gamma \\ y = (l_1 \sin \alpha + l_2 \sin \beta) \sin \gamma \end{cases} \quad (1)$$

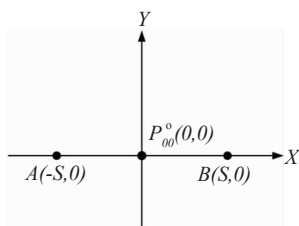
利用式(1)可以获取换能器在每一个扫描位置的坐标 $\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^L P_{ij}^0(x, y)$ 。利用图2中的映射关系即可确定成像域中对应检测点的位置坐标 $P_{ij}^1(x, y)$ 和 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij}^1(x, y)$ 。

机械定位具有技术成熟,易于实现的特点。但结构较复杂,并且使用刚性机械连接,操作不灵活,不适合对复杂结构件的检测。

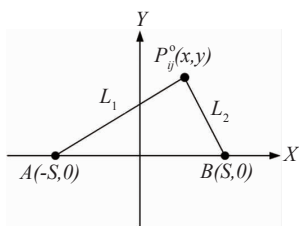
2.2 声波定位

采用声波定位方法,主要是通过声波进行距离的测量,通过测得的距离计算出换能器的位置坐标。设在初始位置时,如图4(a)所示,超声换能器在坐标原点,发射声波定位信号,其位置坐标为 $P_{00}^0(x, y)$;接收声波定位信号的定位传感器分别置于 A, B 两点,其坐标位置分别为 $A(-S, 0), B(S, 0)$ 。当超声换能器移动到点 P_{ij}^0 时,如图4(b)所示,定位传感器测得当前检测 P_{ij}^0 点到 A, B 两点的距离为 D_1, D_2 ,然后用 D_1, D_2 建立方程组:

$$\begin{cases} (x+S)^2 + y^2 = D_1^2 \\ (x-S)^2 + y^2 = D_2^2 \end{cases} \quad (2)$$



(a) 初始位置坐标



(b) 检测位置坐标

图4 声波定位方法

由方程组(2)可得:

$$\begin{cases} x = \frac{D_1^2 - D_2^2}{4S} \\ y = \sqrt{D_1^2 - \left(S + \frac{D_1^2 - D_2^2}{4S}\right)^2} \\ = \sqrt{L_2^2 - \left(\frac{D_1^2 - D_2^2}{4S} - S\right)^2} \end{cases} \quad (3)$$

即可获得超声换能器的位置坐标 $P_{ij}^0(x, y)$ 。

与机械定位相比,声波定位具有重量轻、体积小、使用灵活等特点,适于装机和外场使用,但声波定位方向性明显。

2.3 视频图像定位

如图5所示,视频图像定位采用一种非接触式CCD光电传感器定位方法,利用超声换能器与被测件之间的灰度变化,通过CCD视频器件将扫描区域物像转换为视频图像,然后根据被检测区域视场内各点灰度分布,提取超声换能器的位置坐标^[10]。

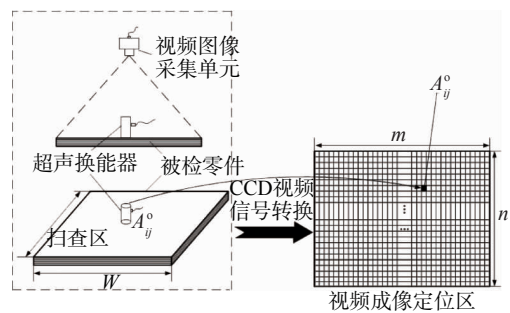


图5 视频图像定位方法

视频图像定位的核心技术在于如何从视频图像中解调出超声换能器的位置。目前主要是基于灰度原理,对应扫描区的每一帧图像中共有 $m \times n$ 个像素点,某一像素点 $A_{ij}^0 (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n)$,结合其位置和灰度特征,可以表示为:

$$A_{ij}^0 \{P_{ij}^0(x, y), Q_{ij}^0(r, g, b)\} \quad (4)$$

式中 $x(x=1, 2, \dots, m), y(y=1, 2, \dots, n)$,为 A_{ij}^0 在视频图像中的位置坐标; $Q_{ij}^0(r, g, b)$ 为点 A_{ij}^0 在视频图像中的灰度值,则每一个像素点都有其自己的灰度值。有了这些像素点的灰度值以后,可以设置一个阈值 G ,使这些像素点的灰度值分为两类^[11]:

$$g(Q_{ij}^0) = \begin{cases} 0 & Q_{\min}^0 \leq Q_{ij}^0 < G \\ 1 & G \leq Q_{ij}^0 < Q_{\max}^0 \end{cases} \quad (5)$$

这样只需使超声换能器所在位置的灰度值 $Q_{ij}^0(r, g, b) < G$ 或 $G \leq Q_{ij}^0(r, g, b)$,即可把超声换能器对应的视频图像从背景视频图像中解调出来,并且找到其所在像素点的位置坐标 $P_{ij}^0(x, y)$,实现超声换能器扫描定位。

视频图像定位方法无需对超声换能器施加任何机械限制,方便灵活、非接触并且精度高。但视频图像定位技术受光条件的影响,且由于采用软件定位方法,一般运算量较大,速度较慢。

2.4 编码定位

编码器把角位移或直线位移转换成脉冲信号,通过测量脉冲数,即可算出移动的角位移或直线位移,如图6所示。超声换能器在某一扫描位置 A_{ij}^0 ,其位置坐标为 $P_{ij}^0(x,y)$, S_1 和 S_2 为换能器所在位置 A_{ij}^0 时换能器与编码器1和编码器2之间的距离, S_1, S_2 分别由编码器的脉冲计数输出确定,则换能器的位置坐标 $P_{ij}^0(x,y)$ 可由下式确定:

$$P_{ij}^0(x,y) = \begin{cases} x = \frac{S_0^2 + S_1^2 - S_2^2}{2S_0} \\ y = \sqrt{S_1^2 - (\frac{S_0^2 + S_1^2 - S_2^2}{2S_0})^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中 S_0 为两编码器之间的距离。

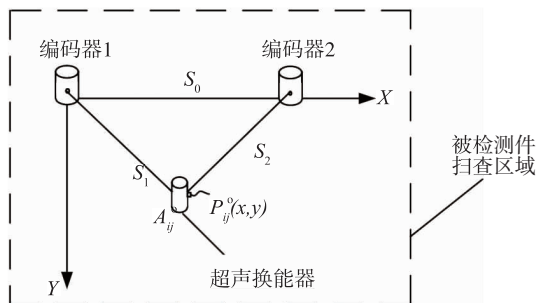


图6 编码定位方法

编码定位技术成熟、定位速度快,并且定位算法简单,易实现。因超声换能器需与编码器存在连接,使超声换能器扫描移动灵活性降低,而且这种方法还存在超声换能器扫描运动过程中因颠簸造成的定位误差。

3 超声信息处理与缺陷识别

3.1 超声信息处理

为了实现超声手动扫描成像,对超声换能器定位的同时,必须实时对超声换能器的输出信号进行采集记录。目前,超声手动扫描过程中的超声信号采集方法主要有两种:一种是全波采集,通过硬件电路实时采集记录超声换能器在每一个位置点的检测信号;另一种是只采集用于超声成像的特征信号。前者信息量大,信号处理速度相对慢;后者信息量小,信号处理速度快。随着电子器件性能显著提升,目前全波采集的方法越来越多地被采用。

由于回波特征与零件中缺陷的性质密切相关,因此针对复合材料微结构特点和超声信号变化规律,通常是利用采集记录的超声回波信号特征进行检测结果成像。回波特征主要表现在缺陷波和底波的大小及频度变化。如图7所示,通过对超声回波信号处理和特征采集,分离出5个必要信息和2个次要信息:

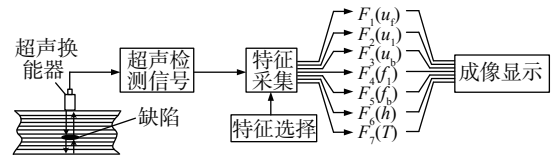


图7 检测信号特征分离方法

- $F_1(u_f)$ ——界波大小信息;
- $F_2(u_f)$ ——层波大小信息;
- $F_3(u_b)$ ——底波大小信息;
- $F_4(f_1)$ ——层波形状信息;
- $F_5(f_b)$ ——底波形状信息;
- $F_6(h)$ ——缺陷深度信息;
- $F_7(T)$ ——被检测物体厚度信息。

特征信号的分离可以通过电子闸门来选择和实现。基于这些特征信息,既可表述被检测零件内部的不同质量状态,还可利用多维伪彩色图像显示被检测零件内部缺陷大小、位置和深度等信息^[6]。

3.2 缺陷识别

利用采集分离的7个超声特征参量,可以实现检测结果的超声成像,根据这些特征参量的变化可以进行缺陷识别。实际检测应用中,根据被测复合材料特点和检测要求,可以选择不同特征参量进行缺陷识别。以碳纤维增强树脂基复合材料为例,图8举例描绘了几种复合材料回波信号与特征选择的关系^[12]。

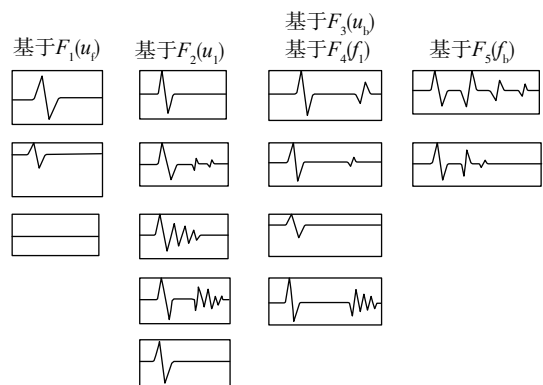


图8 几种回波信号与特征参量选择的关系

对于碳纤维复合材料,常见的缺陷有分层、疏松、孔隙、夹杂、脱粘等,表1列出了其中分层、疏松、孔隙与超声特征参量的关联程度^[5]。可以根据特征参量 $F_1(u_f), F_2(u_t), F_3(u_b), F_4(f_1), F_5(f_b)$ 的变化,通过调制 $Q_{ij}^1(r, g, b)$ 中的 r, g, b 三基色,以伪彩色图像使不同的缺陷显示出不同的颜色,也可以使用灰度图像,实现对检测结果成像显示。图9是一种典型的复合材料试样的超声手动扫描成像检测结果^[5]。试样为碳纤维复合材料层压板,试样厚度为6 mm,缺陷为一贴膜分层,缺陷的形状设计成五角星,从图中可见,缺陷的形状和轮廓非常清晰。

表1 缺陷类型与特征参量关联程度

缺陷类型	u_f	u_t	u_b	f_1	f_b
分层	正常	大	大	大	—
疏松	正常	大	小小	大大	小小
孔隙	正常	小	小	小	小

注: u_f 用于系统工作状态自检和空隙率定量计算;大面积分层为 $f_1=0$,小面积分层 $f_1>0$ 。



图9 典型超声手动扫描图像检测结果

4 总结与展望

(1) 超声手动扫描成像检测结合了手动扫查灵活和自动扫描检测的优点,为室外和复杂复合材料结构或者检出缺陷的扫描成像检测、记录等提供了一种廉价的检测方法,可以帮助克服漏检和改善复合材料手工检测的可靠性,提高检测结果的可视化程度。

(2) 目前可用于超声手动扫描成像检测中的超声换能器定位方法主要有:机械定位、声波定位、视频图像定位和编码定位等,各有优点和不足。通常需要根据所检测复合材料结构、应用场合、检测要求

等,选择手动扫描定位方法。

(3) 通过实时提取和分离来自手动扫查超声换能器输出的特征超声信号,可以实现复合材料手动扫描成像检测和缺陷识别。

(4) 超声手动扫描成像检测作为复合材料的一种可视化成像检测方法,今后仍有一定的发展和应用空间,快速、便携、可视化是今后复合材料超声手动扫描成像检测技术的重要发展方向。

参考文献:

- [1] 刘松平. 复合材料无损检测与缺陷评估技术——庆祝中国机械工程学会无损检测分会成立三十周年[J]. 无损检测, 2008, 30(10): 673—678.
- [2] Albrecht M, Wolfgang H, Rudolf H et al. Automated inspection of complex composite components in the production cycle[C]. 17th World Conference on Non-destructive Testing. Shanghai, China, 2008; 25—28.
- [3] 胡文刚, 汪金海, 刚铁. 基于 USB 摄像头定位的手动超声检测技术[C]. 全国第九届无损检测学术年会论文集, 上海: 中国机械工程学会无损检测分会, 2010: 296—301.
- [4] 姜红. 手动超声 C 扫描在复合材料检测中的应用[C]. 第十届全国无损检测新技术学术会议, 上海: 中国机械工程学会无损检测分会, 2007: 75—78.
- [5] 刘松平, 陈积懋, 郭恩明. 先进的超声手动扫描成像检测技术[J]. 无损检测, 1997, 19(6): 151—158.
- [6] 刘松平. 碳纤维复合材料手动超声成像检测技术的研究[J]. 新型碳材料, 1994(3): 24—29.
- [7] Borenstein J, Everett H R, Feng L. Mobile robot positioning sensors and techniques[J]. Journal of Robotic Systems, 1997, 14(4): 231—249.
- [8] 李加欧, 柯善骏, 宋秀荣. 手动 C 扫描探头超声定标装置的研究[J]. 无损检测, 1989, 11(12): 344—346.
- [9] 张锐, 陈以方, 付德永. 复合材料手动扫描超声特征成像检测[J]. 材料工程, 2003(4): 34—38.
- [10] 汪金海. 基于视频定位的超声检测方法 with 缺陷识别的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [11] 陈诗皓. 基于视频图像的高精度定位系统研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [12] 刘松平. 碳纤维复合材料超声多维扫描成像检测技术[J]. 新型碳材料, 1998, 13(1): 34—37.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告