

# 复合材料手动扫描超声特征成像检测

## Manual Scan Ultrasonic Feature Imaging Testing of Composite Material

张 锐, 陈以方, 付德永 (清华大学, 北京 100084)  
ZHANG Rui, CHENG Yi-fang, FU De-yong  
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**摘要:** 研究了复合材料手动扫描超声特征成像检测, 通过对超声检测信号的全波列采集与处理, 实现了 A, B, C 扫描成像; 相位特征成像; 当量特征成像; 超声层析技术和超声频谱分析技术。该系统已经在复合材料的检测上得到了良好的应用。

**关键词:** 超声检测; 声成像; 手动扫描; 信号处理

中图分类号: TG115.28+5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2003) 04-0034-05

**Abstract:** The manual featured-scan ultrasonic imaging system for composite materials is developed. The establishment of full-wave acquisition of ultrasonic testing signal makes the system a full-information processing ability of the waveform features for any testing point. Moreover, various testing methods of feature-scan imaging are established: A-scan and parameter measurement, B scanning, C-scan imaging, phase feature imaging, equivalent feature imaging, half-wavelength ultrasonic chromatography and ultrasonic spectrum analysis. A testing experiment of a carbon fiber composite specimen has been done and the result displays the interior quality status of the specimen accurately.

**Key words:** ultrasonic testing; acoustic imaging; manual scan; signal processing

随着新材料特别是先进的纤维增强复合材料在航空、航天等领域的广泛应用, 对它们的定量检测成为必要, 由于超声 C 扫描技术只能提供深度方向的一个平面投影检测结果, 不利于检测新型复合材料中最容易产生的呈体积分布的微小缺陷, 因此提出了特征扫描 (F 扫描) 技术<sup>[1]</sup>, 它采取特征扫描的方法, 利用计算机采集全波列检测信号, 提取和储存超声波形的各种特征——包括上升时间、下降时间、脉冲周期和频谱特性等, 经信号处理后, 按多种特征进行成像显示。F 扫描能提供比 C 扫描丰富得多的信息, 具有高分辨力和小缺陷检测能力。

但是, 目前使用的超声扫描装置一般体积较大, 多为固定式, 不适合在现场及场地条件差的情况下使用。为了解决这个问题, 研制了复合材料用便携式手动扫描超声成像系统。成功地将手动检测的方便灵活、适用性强与特征扫描成像的优点集于一体, 并在实际工作得到了有效的应用。

### 1 特征扫描基本原理

超声波是机械波, 受到材料调制的超声波能直接反映材料的内部结构和力学性能, 对于有缺陷或受损

的复合材料, 超声波受到缺陷和损伤的散射和调制, 即携带有材料内部缺陷的信息, 提取出这些信息可反映出缺陷的状态。

复合材料中的缺陷类型主要是分层、气孔、夹渣、疏松、疲劳裂纹、粘接不良等。特征扫描处理使用时域的分析技术、谱分析技术来认识缺陷类型和测量缺陷, 评估材料受损程度。例如, 对分层夹杂和气孔进行分类时, 可由回波幅度、波形起跳时间、脉冲持续时间, 上升及下降的反转率来进行分析; 测定复合材料孔隙率时, 要分析速度、回波幅度比、主频偏移量等特征参数; 判别夹杂物时, 要分析缺陷位形, 回波幅度、频移等特征参量。

用于缺陷分类的超声信号的特征通常是波形的实体特征, 但也常使用统计特征。实体特征包括反射波的上升时间, 脉冲持续时间和波形的下降时间。通常, 裂纹类缺陷的反射比起体积型缺陷的显示, 其上升时间、下降时间和脉冲持续时间都较短<sup>[2]</sup>。缺陷的特征也可从反射波的频域中提取, 可以是某一频率段, 曲线的面积与全部频率面积之比等。为了更好地对缺陷分类, 必须把提取的特征进行优化, 并设立适当的门阈值和变化范围。从统计的观点来, 可提取的

特征有波形曲线的尖锐度、倾斜度等。总之，可用于缺陷分类的特征数以百计，必须仔细选择。

对于缺陷反射体而言，特征应包括如下几个方面：(1) 反射波的幅值；(2) 反射波的相位；(3) 反射体的几何形状；(4) 反射体的空间当量分布；(5) 底界面波的幅值；(6) 底界面波的相位；(7) 上界面波的幅值；(8) 上界面波的相位。其中特征(1) - (4)对缺陷的判定是必须的，可称它们为主要特征，特征(5) - (8)是为了判定检测试样的上下界面以及反射体距它们的位置，也可以判定某些缺陷，把它们称为辅助特征。

缺陷判定准则包括：

(1) 幅度判断：通过反射回波的幅度识别出反射界面是空气界面还是非空气界面，从而区分判断出缺陷是否含有空气；

(2) 形状判断：对于含有空气的缺陷一般是气孔、分层和裂纹，对于这三种缺陷可结合其几何外形来判断。根据超声波检测知识知道，气孔一般是圆形或椭圆形，分层一般是垂直于声波入射方向的平行面，而裂纹的走向一般是弯曲而不规则的；

(3) 底波判断：对于分层缺陷，由于其面积大且垂直于超声波的传播方向，因而一般无底波反射，而当材料中存在疏松缺陷时，其底波的幅值明显地低于正常值。

## 2 手动扫描超声成像系统

### 2.1 总体方案设计

系统总体框图如图1所示。系统主要由以下几个部分组成：

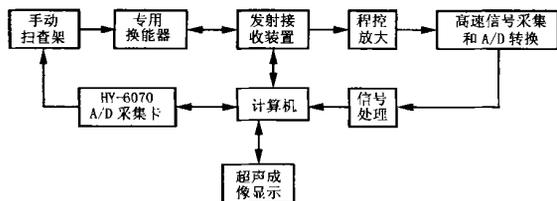


图1 系统总体框图

Fig.1 Schematic diagram of integrated design

(1) 适合于现场应用的便携式手动扫描架及由HY-6070A/D采集卡组成的坐标定位系统。

(2) 复合材料专用高灵敏度的窄脉冲聚焦换能器。

(3) 超声波的发射接受装置。激励探头发射超声波并接受反射回波。

(4) 高速数据采集部分，对接受到的回波信号进行全波采样，然后送入计算机分析处理。

(5) 信号处理软件，通过计算机控制高速数据采集卡对超声反射回波采样及处理，根据HY-6070A/D采集卡送来的信息计算探头位置坐标。将位置坐标信息与回波特征信息相结合成像显示。

### 2.2 手动扫描装置

手动超声扫描成像检测，需要解决的核心问题是：手动扫描检测时，传感器随机扫描的快速准确跟踪定位。

经过比较，采用了悬臂式结构的扫描架<sup>[3]</sup>，该扫描架的定位机构主要由连杆和旋转运动副组成，每个运动副上均装有角位移传感器，每个旋转运动副采用一对向心球轴承，由于机构各零件的尺寸是已知的，每个运动关节的转角是随时可以测量的，故通过本扫描机构，可以实时确定探头的空间位置坐标。

如图2所示，在扫描架操纵臂内装有旋转角分别为 $\alpha, \beta, \gamma$ 的三个灵敏度很高的角位移传感器，分别输出对应于左臂、右臂的张角和水平旋转角大小的电压信号，这些电压信号通过计算回路再转换成直角坐标系上XY平面坐标的具体位置，设探头所在位置为(X, Y)，则其坐标可由下式给出：

$$\begin{cases} X = (L_1 \sin \alpha + L_2 \sin \beta) \cos \gamma \\ Y = (L_1 \sin \alpha + L_2 \sin \beta) \sin \gamma \end{cases} \quad (1)$$

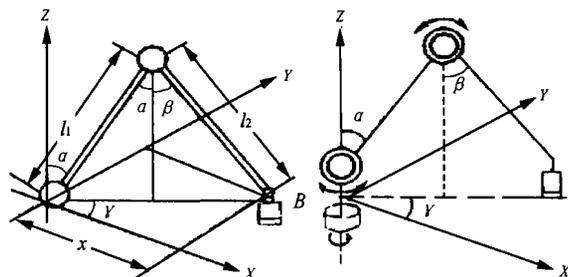


图2 扫描架定位示意图

(a) 扫描架示意图；(b) 传感器示意图

Fig.2 Schematic plan of location by scan frame

(a) schematic plan of scan frame; (b) schematic plan of sensor

HY-6070A/D采集卡对三个角位移传感器输出的电压信号进行采样，然后送入计算机处理，计算出探头所处位置坐标。HY-6070A/D卡为16通道，采样频率为40kHz，字长为12位。

由于角位移传感器的输入输出都是电压信号，所以，高稳定度的电源对保证定位精度非常重要，为此，设计了由9V电池和集成稳压块组成的稳压电源，体积小，稳压效果好。

经测试，该手动扫描装置扫描参数如表1。

### 2.3 专用换能器的研制

由于碳纤维增强复合材料是各向异性的非均匀

材料,对超声衰减大,同时存在多层散射,因此要求检测所用超声波既具有较强的穿透性,又需要有高的分辨力,普通商用换能器无法满足要求。

表1 手动扫描装置扫描参数

Table 1 Parameter of manual scan setting

扫描速度	> 20mm/s
最大扫描区域	200mm × 200mm
扫描定位精度	0.1mm

为此,研制了专用宽带窄脉冲聚焦换能器。利用示波器测试其频率和始波宽度,用人工试块测试其分辨力及上下盲区。图3是所制作的一个宽带窄脉冲聚焦换能器的波形图和频谱图。其中心频率为1.9MHz,始脉冲宽度一个半周期,因此该换能器具有很低的衰减和高的分辨力,在复合材料中具有较强的穿透能力。普通换能器在碳-环氧复合材料的穿透厚度一般不超过15mm,而该换能器在厚度为25mm的同种材料中,可看到其二次反射波,也就是说,穿透厚度大于50mm,从而保证了检测信息的获取。

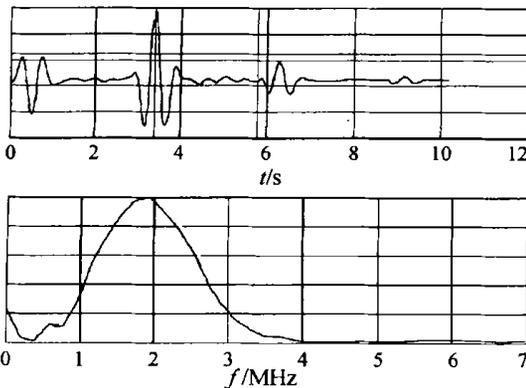


图3 换能器的波形和频谱图

Fig. 3 Waveform and spectrum image of sensor

## 2.4 数据采集部分

采用F9801B高速A/D采集卡对回波信号进行全波采集,它的主要特点是:

- ① 采样率连续可调,可从25MHz起,以步长1MHz调整到高达135MHz。
- ② 采样分辨率为8bits。
- ③ 可编程设置三种触发方式:内触发、外触发及信号触发。
- ④ 可对信号的基线和增益进行动态程控调理,幅度达40dB。

检测中使用的探头频率在1~5MHz之间,为了信号的恢复,采样频率一般应不小于模拟信号最高频率的10倍,所以采样频率应不小于50MHz。F9801B

高速数据采集卡完全可以满足这个要求。

在C扫描中,每次采样只记录回波波峰一点的信息,即幅值和时间。而F扫描为了再现被测体内部的所有信息,采用全波采集,记录全部波形信息,从而可以得到整个声程范围内的声学信息。这使得系统在检测完成后,可以随时恢复检测时的所有波形信息,这为各种特征成像方法的实现提供了必要条件。

扫描时图像数据暂存在内存中,待扫描完毕后再把数据写到硬盘文件中。

## 2.5 系统软件设计

系统软件是在Windows98/NT平台上利用VC++和VB开发,界面友好,便于操作。软件实现了对超声脉冲的发射/接受控制、全波列的采集、数字信号处理以及缺陷图像的二维成像显示。在计算机上实现了数字化探伤仪的功能。系统软件包括信号处理和图像显示处理等模块。

### 2.5.1 信号处理模块

在超声脉冲回波信号中,经常夹杂着各种噪声,有时甚至淹没回波信号。因此需要对采样得来的信号进行信号处理,以达到图像显示的需要。

设 $x(t)$ 为声源发射的超声信号,被测试样以及其他传输介质可以看成是一个线性不变系统,其冲激响应为 $h(t)$ ,系统的输出信号即回波信号用 $y(t)$ 表示。用 $n(t)$ 表示各种噪声对系统的综合干扰。因此

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau + n(t) \quad (2)$$

将输入信号 $x(t)$ 延迟时间,作为参考波与回波信号进行相关运算,则相关函数为

$$Z_{xy} = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)R_{xx}(\tau-\tau)d\tau + R_{nx}(\tau) \quad (3)$$

如果发射信号与噪声不相关,则(3)式中的干扰项为零。可见对一个混有噪声的回波信号,采用相关分析进行检测,可以滤掉噪声。但是(3)式中干扰项只有当相关运算的积分时间 $T$ 为无限大时才会为零。实际上,发射信号持续时间有限,所以发射信号的持续时间才是有效的积分平均时间,信号持续时间长,干扰小;信号持续时间短,干扰大。所以发射信号宽有利于提高抗干扰能力,但信号宽又使得分辨率降低。因此需综合考虑,在满足分辨率的要求下,尽量选择宽的反射信号,有利于改善信噪比。

其他可以采用的方法还有频谱分析法、小波变换等。

### 2.5.2 超声成像模块

本系统除了能显示常用的C扫描成像外,还可以做出基于全波列采集的各种特征量的图像,如下:

- (1) 相位(深度)特征图像

对于体积型缺陷，超声波在其各点因深度的变化引起相位的变化。可以从数据中抽取出缺陷各点距表面的深度，并用不同的颜色表示不同的距离，形成缺陷的相位特征彩图。

(2) 当量分布特征图像

选取材料中各点反射波当量为特征，给它们赋予不同的颜色，可作出当量分布的彩色特征图像。

(3) 频谱特征图

频谱分析主要用于薄板复合材料的检测。因为薄板前后界面波与缺陷波容易混叠在一起，在时域里观察不出其内部质量情况。但对它们进行频谱变换后，可以较容易的在频域里识别。然后根据每一点的频谱幅度，做出频谱的空间分布，用不同的颜色就可以做出其彩色图像。

(4) 超声波层析 (CT) 显示

将幅值特征量按材料的深度一层层的显示出来，就构成材料的层析显示，可以看到材料任一截面的检测情况，这在 C 扫描中是无法实现的。

可以看出，由于 F 扫描能根据检测和评定需要进行多种方式的处理和显示，为全面评定复合材料提供了可靠的检测手段。

### 3 成像检测实验

用这套便携式手动扫描超声成像系统对复合材料进行了成像检测。下面为碳纤维复合材料样品成像检测实例，该样品里面有大小分别为 1mm, 2mm, 4mm, 6mm 的缺陷，左边两列埋深为 3.2mm，右边一列埋深为 4.9mm。图 4 为样品超声扫描成像图，这也就是超声 C 扫描所得图像。

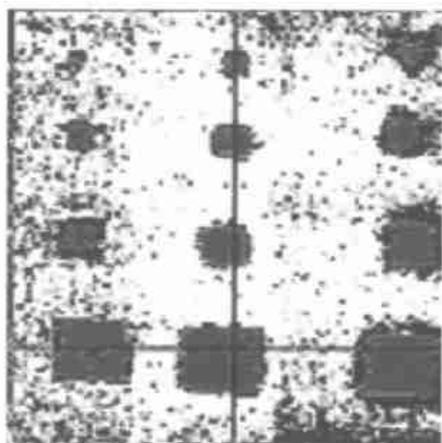


图 4 碳纤维复合材料样品超声扫描图像  
Fig. 4 Ultrasonic scan image of carbon fiber composite specimen

度层的截面图像，需要使用层析功能。在本系统软件中，调用层析功能只需用鼠标单击幅值图像或深度图像中的任意一点，进入波形界面。调节游标到孔回波波峰左右位置，选择层析的深度及厚度。选择重新处理得到层析图 (图 5)。从图 5a 中可以看到，选择层析深度 2.8 ~ 3.3mm，只保留有左边两列缺陷的幅值特征图。同样，设置层析深度为 4.8 ~ 5.1mm，可得另一幅层析图如图 5b 所示，图中只有右边一列埋深为 4.9mm 的缺陷非常清晰。

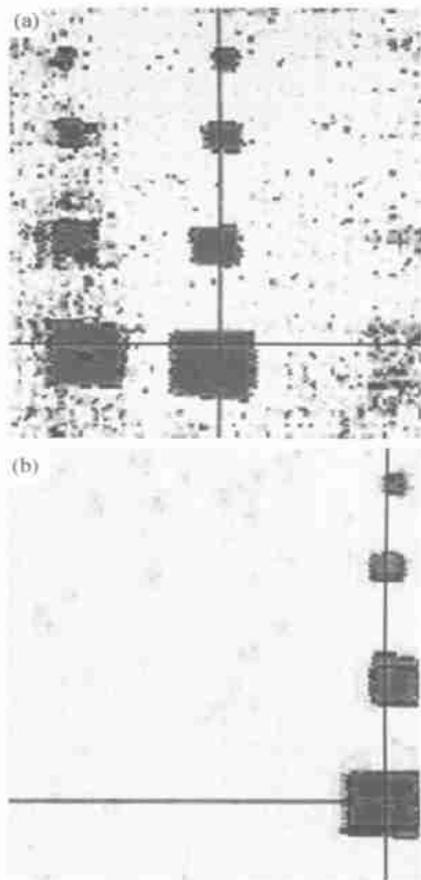


图 5 深度层析图  
(a) 2.8 ~ 3.3mm; (b) 4.8 ~ 5.1mm  
Fig. 5 UCT image

理论上讲，层析功能的分辨率和超声波的信号采集频率是相关的，层析功能能够实现一个采样点对应厚度的图像。对于一定厚度的工件，超声波传播的时间是一定的，这样采样频率越高，则分辨率越高。然而实际应用中，分辨率却和波长有关，这是因为超声信号采集需要信号的上升沿沿触，而触发点可以是 1/4 波长上升沿的任意部分，这就使各个检测点的触发时间上有 1/4 波长时间的误差，这使得一个采样点厚度的层析变的没有意义。所以，对于超声层析图像通常考虑最小为半波长厚度的图像。材料声速越低或探

为了直观地从扫描图像上得到样品里面任意深

头频率越高, 波长就越小, 系统可以实现的分辨率就越高。假设复合材料的声速为 3000m/s, 探头频率可以做到 10~15MHz, 可算出波长为 0.2~0.3mm, 这样超声层析的分辨率可以最高达到 0.1mm。

另外需要指出的是闸门高度调节。在扫描成像前, 调节闸门到合适的高度以便于达到更好的成像效果。但当扫描完毕后或查看以前的扫描图像时, 需要调整闸门的高度, 从而调节图像的颜色显示。这时不必重新扫描工件, 而只需调节闸门的高度, 然后进行重新处理便可得到理想的成像效果。

### 4 结论

针对复合材料检测进行了手动扫描超声成像技术的研究, 运用成像检测技术和手动扫描定位技术, 设计并完成了工程化的便携式手动扫描超声成像检测系统, 该系统扫描最大范围为 200mm × 200mm; 定位精度为 0.1mm。便携式手动扫描架的采用克服了机械定位在许多场所设备安装的困难, 在野外作业和对形状位置不定的在役工件进行检测时更加方便灵活, 不受场地、工件形状等限制, 应用面更加广阔。系

\*\*\*\*\*

(上接第 23 页)

物体大。扭转体直径过大是造成平直度数据起幅大的根本原因。抛物体型面公差和扭转板平直度完全达到了技术要求, 表明目前采用的制造工艺稳定、可靠。

表 3 显示, 火控天线电性能不但满足指标要求, 而且各项数据与瑞典同类天线性能数据相当。

表 3 天线电性能测试结果

Table 3 Test results of the electricity properties of antenna

项 性 目 能	窄波束			天线效率
	天线增益/dB	付瓣电平/dB	驻波	
某型天线	35.5	-25	< 1.5	55%
瑞典天线 <sup>[2]</sup>	35	-25	< 1.5	55%
英国天线 <sup>[2]</sup>	34	-24.5	< 1.6	53%
法国天线 <sup>[2]</sup>	34	-24	< 1.6	50%
指标要求	> 33.5	< -22	< 1.6	> 50%

\* 表中天线均属变态卡塞伦天线

### 3 结论

(1) 原材料及成型工艺参数选择合理, 保证了天线各项性能达到设计指标要求。

(2) 湿法铺层真空加压适用于成型结构和型面要求复杂的制件。

统的研制成功对于推广超声成像检测技术的工程实用具有重要的意义。

### 参考文献

[1] Chern E James · Concept of non-destructive evaluation [J] · Materials Evaluation, 1991, 49 (9): 1228.  
 [2] 薛克兴 · 复合材料结构的损伤与修补 [M] · 北京: 航空工业出版社, 1992. 8-13.  
 [3] Rose J L, Y H Jeong. Utility of a Probability-Density-Function Curve and F-Maps in Composite Material Inspection[J]. Experimental Mechanics, 1982, 22 (4): 155-160.  
 [4] 郑中兴, 滕永平, 崔建英, 等. 全数字化超声波探伤成像仪研制 [J] · 北方交通大学学报, 1995, 19 (3): 350-356.  
 [5] 袁易全 · 超声换能器 [M] · 南京: 南京大学出版社, 1992. 221-231.  
 [6] 美国无损检测学会编. 美国无损检测手册-超声卷 (上下册) [M] · 美国无损检测手册译审委员会译. 上海: 世界图书出版公司, 1996.

收稿日期: 2002-03-10; 修订日期: 2002-06-10

作者简介: 张锐 (1975-) 男, 硕士, 研究方向为超声成像检测的研究与高精度超声测厚系统的研究, 联系地址: 湖南省新邵县 8 号信箱教育科张华转 (422915)。

(3) 研制成功的先进天线是目前国内性能比较先进的机载天线, 具有高增益、低付瓣、高效率的特点, 其电性能水平已达到国外同类天线性能水平。

### 参考文献

[1] 陈绍杰等 · 复合材料设计手册 [M] · 北京: 航空工业出版社, 1990.  
 [2] M I 斯科尔尼 · 雷达手册 [M] · 北京: 国防工业出版社, 1978.

收稿日期: 2002-03-14; 修订日期: 2002-11-05

作者简介: 郝巍 (1968-) 男, 工程师, 现从事蜂窝及夹层结构研究开发工作, 联系地址: 北京 81 信箱 12 分箱 (100095)

\*\*\*\*\*

(上接第 29 页)

[5] 杨光松 · 损伤力学与复合材料损伤 [M] · 北京: 国防工业出版社, 1995. 117-124.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金, 哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金资助项目 (HIT. MD2000. 20)

收稿日期: 2002-06-25; 修订日期: 2002-10-20

作者简介: 刘宇艳 (1971-) 女, 博士, 副教授, 主要从事橡胶复合材料及树脂基复合材料的改性及疲劳损伤研究, 已发表相关论文 25 篇, 联系地址: 哈尔滨工业大学 410 信箱 (150001)。