

虚拟式声显微镜及应用技术研究

陈戈林 董方源 杨 琦 王国功

(清华大学电子工程系 北京 100084)

2001 年 7 月 2 日收到

摘要 本文描述一台虚拟式扫描声显微镜及应用技术研究。它的硬件特别简单，仅由一台带有超高速 A/D 卡和快脉冲收发卡的 PC 机和机械扫描系统组成；主要的功能均由软件完成。脉冲收发卡仅包括脉冲产生和高频放大器；A/D 卡采用 PCI 总线，采样率 1GSPS，数据传输率 100MB/s。系统能采集并实时显示频率达百兆的未检波回波信号。采集到的信号经软件处理，可在屏幕上实时显示样品的 A、B、C 型幅度像或相位像。仪器利用信号处理技术提高信号的信噪比；进行特征提取、识别。该仪器在材料识别，电子、光电子器件和焊接质量检测等方面功能较强，具有广阔的应用前景。

关键词 声显微镜，超声信号处理，超高速 A/D

A virtual scanning acoustic microscope and its feature extraction

CHEN Gelin DONG Fangyuan YANG Qi WANG Guogong

(Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In this article a virtual scanning acoustic microscope and its application of some ultrasonic signal processing methods are mentioned. This acoustic microscope consists of very concise hardware, which includes a mechanical scanning system and a PC with a super high-speed A/D converting card and a fast pulse generating and signal receiving card. The main function of the microscope is fulfilled by software. The fast pulse generating and signal receiving card is made up of two parts: pulse generating and signal amplifying. The A/D converting card, in which the PCI bus technology is used, has a sampling rate over 1GSPS, and its data transmitting rate can reach 100 MB/s. The system can sample and display undemodulated ultrasonic signals up to 100MHz. The undemodulated signal is processed by system software; the real-time C scan of phase or amplitude image is displayed on the screen of PC terminal, as well as its A or B scan. Many modern signal processing methods are used to enhance SNR of the ultrasonic signals in this instrument. Feature extracting is carried out on the basis of real-time analysis of sample echoes. These features are used to recognize and distinguish different materials and flaw types of the tested samples. This new instrument has powerful functions in recognizing film or volume materials and in evaluating the quality of electronic or optoelectronic device and welding quality. So it can be used in

many areas.

Key words Acoustic microscope, Ultrasonic signal processing, Super high-speed A/D

1 引言

超声检测是广泛应用的无损检测技术之一，其中最常使用 A、B、C 扫描超声设备。反射式扫描声显微镜就是其中一种^[1]。早期的声显微镜体积大，功能简单，常限于得到样品的幅度像。电子技术、计算机软件的快速发展和运算速度大幅度提高，使得原由硬件完成的功能可由软件完成。仪器软件化（或虚拟化）成为当前仪器发展的一大趋势^[2]。这不仅可降低仪器的体积和成本，还增加了仪器的功能和灵活性。对声显微镜而言，虚拟化后，无需检波、滤波、采样保持、低放等硬件就可获得幅度象；无需相位检测器件可获得样品的相位象；靠软件还可实现样品特征提取和材料品种、缺陷类型识别等功能，并不断开发出声显微镜的新功能。

近来我们在这方面作了一些研究工作，取得初步成果，下面作一介绍。

2 虚拟式声显微镜结构和工作原理

2.1 系统组成

虚拟式声显微镜由下面几个部分组成：

(1) 声透镜

(2) PC 机和内置的脉冲收发卡及超高速 A/D 卡

(3) 扫描机械和驱动电源

(4) 系统软件

系统框图如图 1 所示。

扫描机械、声透镜与传统扫描声显微镜相同，此处不再重复。系统的变化主要在系统软件、脉冲收发卡及超高速 A/D 卡。

2.2 工作原理

(1) 超高速 A/D 卡

超高速 A/D 卡是本系统最关键的硬件之

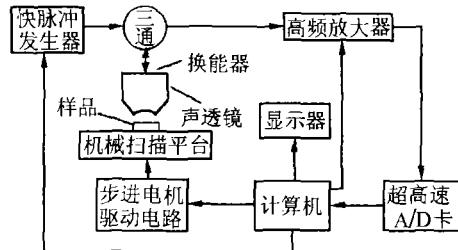


图 1 虚拟式声显微镜系统框图

(脉冲收发卡由快脉冲发生器和高频放大器组成)

一。它实现回波信号数字化，并送入 PC 内存供后续处理。虚拟式声显微镜要求 A/D 卡可以实时采集未检波回波信号，要求其采样率比幅度声显微镜所用 A/D 卡高一个数量级。为采集低于 100 MHz 的信号，A/D 卡的采样率需超过 1GSPS；它与 PC 接口采用 PCI 总线，使数据传输速率达 100MB/s，以满足仪器检测要求。

(2) 脉冲收发卡

脉冲收发卡结构大大简化，它仅产生高压高速脉冲激励换能器，并对回波信号进行放大。为激励不同阻抗换能器，激励源可输出较大电流。接收部分仅为一高频放大器，但要求噪声低、频带宽、增益高和线性好。

(3) 软件系统

系统软件框图如图 2。

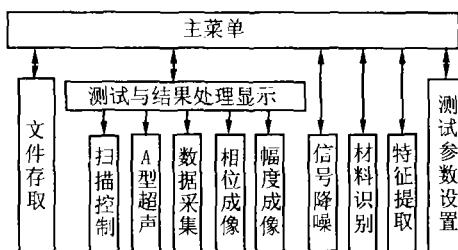


图 2 系统软件框图

这是整个系统的中枢。它控制扫描机械的

运行，数据采集、存储和显示。它的有关部分取代了普通声显微镜的部分硬件，完成检波、滤波、数字鉴相等功能。而且可对数据进行定量分析，直至完成样品的特征提取和识别。可以说，虚拟式声显微镜的功能和特性主要取决于软件。

3 直接成像及典型结果

虚拟式声显微镜和普通声显微镜不同之处在于：虽然机内无检波、滤波、采样保持及相位检测器等硬件，但通过软件完成上述功能，仍可得到样品的幅度和相位像。

成像过程如下：微机控制 A/D 卡发出激励信号，触发脉冲收发卡产生高压快脉冲，激励换能器产生超声波束。声波聚焦到样品表面或内部，在界面发生反射。声透镜接收回波并由换能器转换为电信号。再经放大电路放大后送至 A/D 卡完成数字化；然后进行处理和显示。

(1) 在 PC 终端上实时显示样品的 A 扫描波形，并可根据要求改变 A/D 卡的采样率观察信号的细节变化。

(2) 获取样品的 B，C 扫描图象。微机控制透镜在样品表面进行光栅扫描，可获得样品的 B，C 扫描的幅度或相位像。

A. 幅度像

超声波在样品内部传播，遇到声阻抗不匹配的界面就发生反射，反射波的强度反映界面两侧声阻抗不匹配程度。

本系统脉冲收发卡得到未检波回波信号。为获取样品的幅度像，可对回波信号进行软件检波和滤波（如 Akima 方法）^[2]，或用软件从未检波信号中找出幅度最大值来成像。这种成像方法所得图象效果很好。

图 3 是对一功率三极管正面（金属面）(b) 和背面（塑料面）(a) 测试的结果。

图 4 是对 Z80 芯片测试结果。

B. 相位像

回波信号中除了幅度参量外，还有相位信

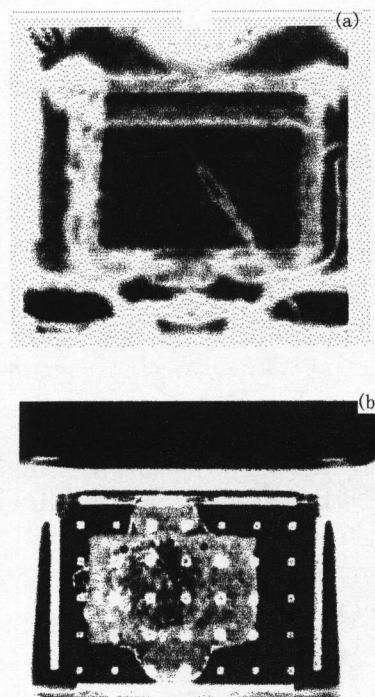


图 3a 功率三极管幅度像

(a) 背面 (b) 正面

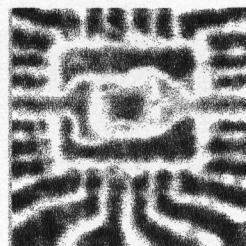


图 4 Z80 CPU 背面幅度像

息。其相位变化可更灵敏地反映样品内部缺陷情况或样品表面的形状变化。准确测量相位变化难度较大。国外学者曾用锁相放大器测量相位和成像。测试精度虽高，但检测速度太低；电路复杂，难以实用化。本系统采用软件鉴相。它的速度快，测量精度适中，可以实时检测，可以实用化^[3]。这种方法在测试薄膜器件或沟槽结构方面有显著优势。

图 5 是一个超高速电光调制器电极结构 C 扫描图和用相位获得的三维像。从图中可以直观看到电极结构的厚度分布，金电极膜厚 20μm

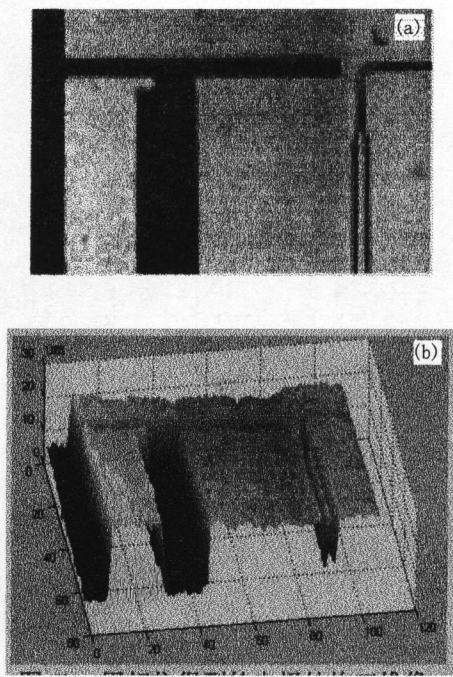


图 5 超高速电光调制器电极结构图

(a) C 扫描图像 (b) 用相位得到的三维像

左右。图 6 是一个晶闸管基片铝电极膜 C 扫描和三维像, 膜厚约 $6\mu\text{m}$ 。

4 对焊接件的测试和分析

虚拟式声显微镜和普通声显微镜最大差别之处在于除可直接成像以外, 还具有很强的信号处理功能, 如进行降噪、特征提取和样品识别等。这些功能全由软件完成^[4-6]。这些软件可以大大提高设备的灵敏度, 增加功能; 使仪器成为定量评价工具。此项工作将在以后全面介绍。现仅介绍对焊接件的测试和分析。

我们用声显微镜对一个焊接件进行检测, 获得陶瓷和铸铁焊接面的幅度像如图 7。图中黑色部分表示焊接不良区, 灰色部分焊接较好。但是, 实际上图中颜色相同区的焊接情况也不相同。如果要区分这些较精细的差别, 可对它们的 A 扫描波形进行细致分析。其典型结果如表 1, 表中的 X₂, X₃, X₄ 是尺度参数^[7] 分别为 2, 3, 4 时 A 扫描波形小波分解

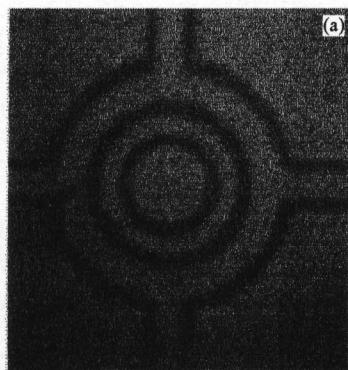


图 6 晶闸管基片铝电极膜图

(a) 铝电极膜 C 扫描图像 (b) 铝电极膜三维像

高频系数平方和。

将图 7 中 (b)-(e) 所示 A 扫描波形不同分解尺度下得到的高频系数平方和 X₂, X₃, X₄ 作为特征空间的坐标, 对小波系数组(即对相应点焊接质量)进行分类。对无焊接面和良好焊接面上各点波形多次测量, 对每点波形计算出一组 X₂, X₃, X₄ 做样本, 分别计算各类中 X₂, X₃, X₄ 的平均值作为类中心坐标, 各样本到类中心距离的均方根的 1.5 倍做类半径。

表 1 不同尺度下小波分解系数平方和

类别	X ₂	X ₃	X ₄	类半径
无焊接面	11.9	8.5	94.7	32.4
焊接不良	9.6	34.5	119.9	23.5
焊接良好	9.9	28.5	100.3	18.7

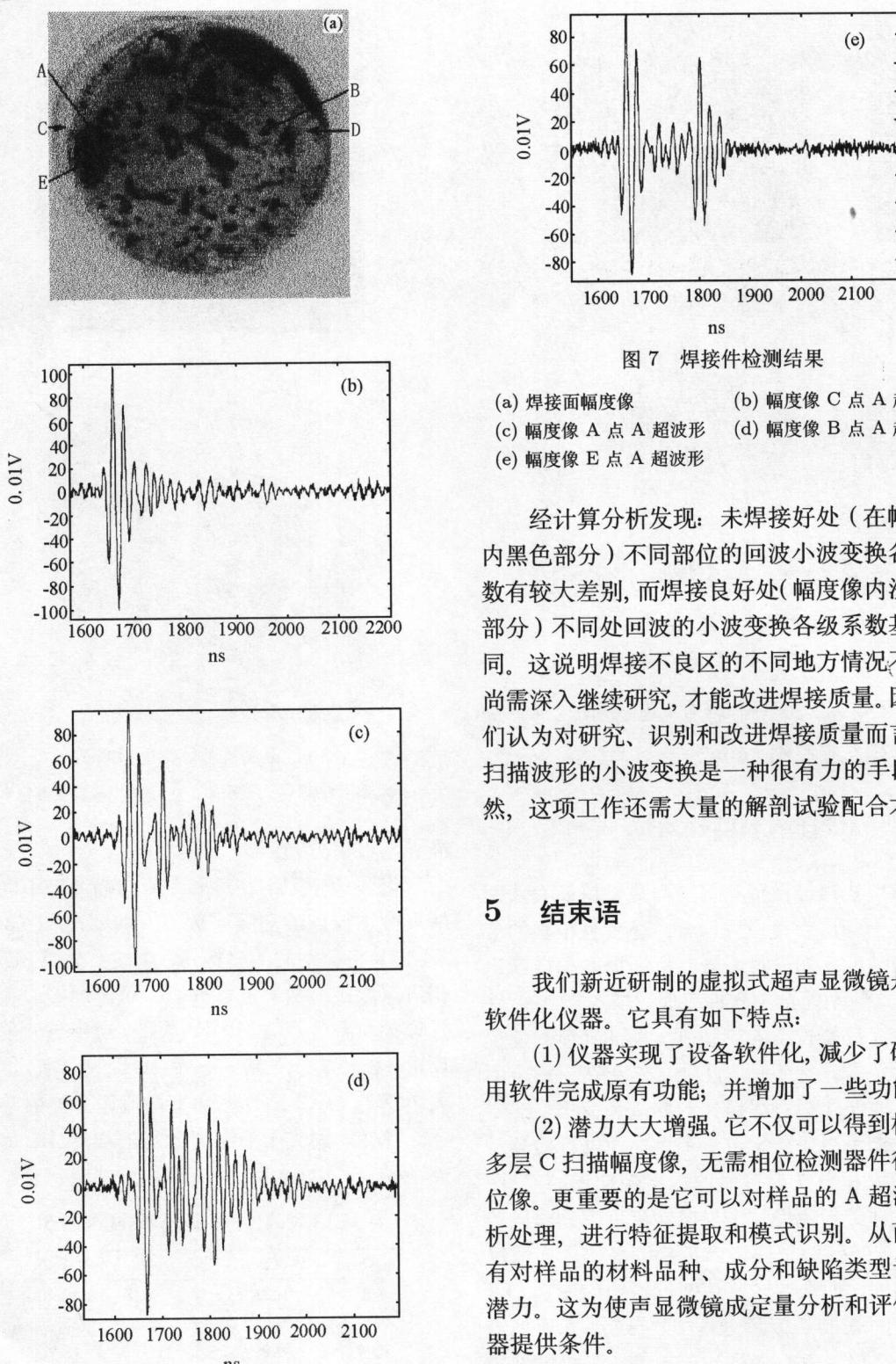


图 7 焊接件检测结果

- (a) 焊接面幅度像
- (b) 幅度像 C 点 A 超波形
- (c) 幅度像 A 点 A 超波形
- (d) 幅度像 B 点 A 超波形
- (e) 幅度像 E 点 A 超波形

经计算分析发现：未焊接好处（在幅度像内黑色部分）不同部位的回波小波变换各级系数有较大差别，而焊接良好处（幅度像内浅灰色部分）不同处回波的小波变换各级系数基本相同。这说明焊接不良区的不同地方情况不同，尚需深入继续研究，才能改进焊接质量。因此我们认为对研究、识别和改进焊接质量而言，A 扫描波形的小波变换是一种很有力的手段。当然，这项工作还需大量的解剖试验配合才行。

5 结束语

我们新近研制的虚拟式超声显微镜是一种软件化仪器。它具有如下特点：

- (1) 仪器实现了设备软件化，减少了硬件。用软件完成原有功能，并增加了一些功能。
- (2) 潜力大大增强。它不仅可以得到样品的多层 C 扫描幅度像，无需相位检测器件得到相位像。更重要的是它可以对样品的 A 超波形分析处理，进行特征提取和模式识别。从而，具有对样品的材料品种、成分和缺陷类型识别的潜力。这为使声显微镜成定量分析和评价的仪器提供条件。
- (3) 仪器操作十分灵活、方便。

(下转第 9 页)

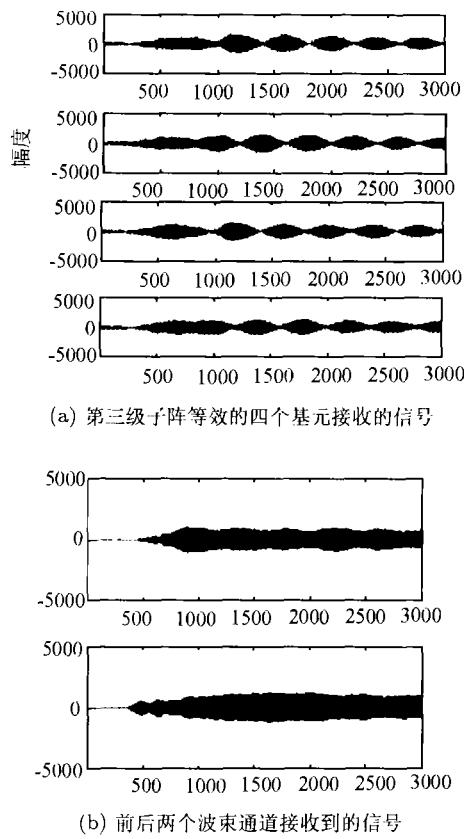


图 3 等效基元与波束通道接收到的信号

个基元接收的信号。从图 3 中可以明显地看出四个等效基元接收到的信号具有拍的现象，说明该信号含有不止一个频率分量，这正好与第

1 节“相控阵多普勒计程仪原理”中讨论的第三级子阵的指向性图一致。由于第三级子阵形成的指向性，在前后和垂直方向上形成了五个波束，每个波束接收到的信号频率不同，其中垂直及其相邻的两个波束对整个回波信号贡献较大，其他两个边上的波束接收到的信号可以忽略不计。而在图 3(b) 所示的波形为前后两个波束通道接收到的信号。从中可以看出信号只含有单一的频率分量，表明相控接收装置已经很好地抑制掉了其它波束的信号，并将前后两个有用波束接收到的信号分离出来。

5 结论

本文通过分析相控阵多普勒计程仪的实现原理，提出了实现相控接收和宽带系统移相的方案。实验表明，设计的相控接收原理样机能够很好地分开前后两个波束接收到的信号。该方案为进一步开展相控阵多普勒计程仪的工程研究与设计提供了可行的方案。

参 考 文 献

(上接第 28 页)

本仪器还处在初级阶段，特别是在信号处理和试验验证方面继续努力，才能使它成为一种完善的仪器。

参 考 文 献

- 1 陈戈林, 刘秉放, 龙勐等. 应用声学, 2000, **19**(4): 9-14.
- 2 余品能等. 快速算法. 国防科技大学出版社, 1993. 278-286.

- 3 陈戈林, 王国功, 董方源. 无损检测, 2001, **23**(9): 375-379.
- 4 杨福生. 小波变换的工程分析与应用. 北京: 科学出版社, 1999, 21-85.
- 5 Marple, Lawrence S. Digital Spectral Analysis: With Applications, Prentice-Hall, 1987, 45-67.
- 6 刘镇清, 陈JY. 无损检测, 2001, **23**(2): 85-88.
- 7 胡昌华等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析. 西安电子科大出版社, 1999. 49-60.