

## 实验须知

### 1. 预习阶段

- (1) 认真阅读实验讲义。可查阅与实验相关的资料。预习后不需要写预习报告。
- (2) 在实验教学平台完成预习思考题 【即：进门测】作为预习分。

### 2. 实验阶段

- (1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静。
- (2) 维护整洁的实验环境，不要将水杯、饮料等放在实验台上，不得在实验室内吃东西。
- (3) 爱护实验设备，轻拿轻放。在老师讲解后才能动手操作。并且在动手前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。
- (4) 如实记录实验数据，不得篡改、抄袭。
- (5) 本系列实验不需写完整实验报告，实验结束后课堂直接交测量数据和计算结果（参考讲义中的附录：实验数据处理参考模板）即可。
- (6) 实验数据经指导老师签字、实验设备整理好，填写完成出门测，方可离开实验室。

### 3. 实验成绩，共 100 分。

预习测 10 分，出门测 5 分，实验操作与数据处理 85 分。

# 超声定位与形貌成像

超声波是频率大于 20000 Hz 的机械波，它具有穿透力强、方向性好，并且声能集中等特点，它在水介质中的传播距离较远，在工业、农业、医学、军事上都有很多应用，如测距、测速、测液位、焊接、清洗、杀菌消毒等，了解超声波定位和成像原理和方法具有重要的意义。

## 【实验目的】

- 1、了解脉冲回波型超声定位与成像的基本原理。
- 2、了解脉冲回波型超声成像实验仪的使用，掌握利用脉冲回波型超声成像实验仪，进行脉冲回波波形观察、水中声速测量、目标物体定位、物体运动状态观察以及目标物体扫描成像的方法。

## 【实验原理】

### 1、超声波的产生与传播

当超声波产生时，通常是通过一种称为压电效应的机制。压电效应是指某些特定材料在受到机械应力作用时会产生电荷，或者当施加电场时，会发生机械变形的现象。能够产生压电效应的材料就被称为压电材料，其中包括石英和铅锆钛（PZT）陶瓷等。压电效应产生超声波的具体物理过程如下：通电后一个高频的电压被施加在压电晶体上，引起晶体内部电荷的分布变化，从而导致晶体内部发生机械应力，由于机械应力作用，晶体开始振动，并以机械波的形式将振动传播到周围的介质中，从而产生超声波。需要注意的是，压电效应既可以将电能转换为机械能，也可以逆向地将机械能转换为电能，所以利用压电晶体可以制造收发一体的超声传感器。本实验中使用的就是收发一体式的超声波发生器。

超声波在介质中传播的物理过程是一种机械波的传播方式，即机械振动以波的形式传播到周围的液体介质中，涉及到包括衰减、反射和折射等多个物理过程。

超声波在介质中传播时会经历衰减，这是因为介质中的能量逐渐减少，波的振幅逐渐减小。衰减是超声波应用中需要考虑的重要现象之一，特别是在医学成像、材料测试和无损检测等领域。当超声波进入介质后，介质中的分子和原子吸收超声波的能量。这种吸收导致能量转化为其他形式的热能，从而导致超声波的振幅逐渐减小。超声波的衰减与介质的衰减系数成正比，与距离的平方成反比，还与介质的吸收及散射和超声波的频率有关，通常情况下，高频率的声波会在较短距离内被更快地吸收和衰减，而低频率的声波可以传播更远。

物体的衰减特征主要表现在后方的回声。

当超声波经过两种介质的界面时，一部分超声波能够穿过界面，进入第二种介质，并继续传播，另一部分超声波则会发生反射。反射率(R)和透射率(T)的计算公式如下：

$$R = \left( \frac{Z_2 \cos \theta - Z_1 \cos \theta'}{Z_2 \cos \theta + Z_1 \cos \theta'} \right)^2$$

$$T = \left( \frac{2Z_2 \cos \theta}{Z_2 \cos \theta + Z_1 \cos \theta'} \right)^2$$

其中 $\theta$ 和 $\theta'$ 分别为入射角和折射角， $Z$ 为介质的声阻抗 (Acoustic Impedance)，单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 $\text{Rayl}$ 。空气的声阻抗 $Z_{\text{air}} = 0.0004 \text{ MRayl}$ ，水的声阻抗 $Z_{\text{water}} = 1.5 \text{ MRayl}$ 。不同材料的声阻抗不同，由于声音在介质中“传播时”，其声阻抗等于“介质的密度” $\times$ “声音在该介质中的波速”( $Z = \rho c$ )，因此一般而言，材料声阻抗性质的关系为：固体 $>$ 液体 $>$ 气体，固体中金属的声阻抗大于聚合物的声阻抗。

从上述公式中可以看出，声波在介质上的反射与透射与介质性质和入射角度有关：

- (1) 当入射波垂直入射时， $\cos \theta = \cos \theta' = 1$ ，声波在两种介质界面上的反射和透射的大小仅取决于两种介质的声阻抗性质。构成界面的两种组织之间的声阻抗差异越大，则反射的回声越强。反之，当 $Z_2 = Z_1$ 时，反射率为0，入射波发生全透射。
- (2) 当入射波斜入射时，当入射角大于某一临界角时，会发生全反射。

使折射角为 $90^\circ$ 时的入射角称为临界角，临界角 $\theta_c = \arcsin \frac{c_1}{c_2}$ 。

当存在多个介质界面时，超声波会在这些界面上发生多重反射，表现为在界面后出现一系列的间隔均匀的依次减弱的影像，这是声束在探头与界面之间往返多次而形成。

## 2、超声定位的基本原理

超声定位的基本原理是使用收发一体的超声波发生器向目标物体发射脉冲波，并接收回波信号；当超声波发生器正对着目标物体时，接收到的回波信号强度将最大，这时得到发射波与接收波之间的时间差 $\Delta t$ ，再根据脉冲波在介质中的传播速度 $v$ 而得到目标物体离脉冲波发射点的距离。这样就可以得出目标物体离脉冲波发射点的方位 $\theta$ 和距离 $S$ ，如图1所示。

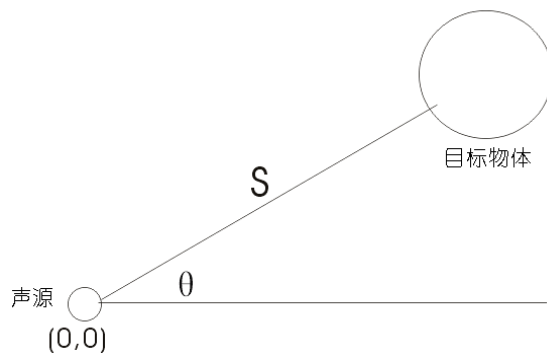


图1 超声定位的基本原理

### 3、时差法测量水中声速

改变目标物体与脉冲声源的距离得到不同的接收回波时间差，用时差法来测量水中声速。假设目标物体到声源的垂直距离为  $S_1$  时，脉冲发射波到接收波的时间为  $t_1$ ；改变目标物体到声源的垂直距离为  $S_2$ ，此时脉冲发射波到接收波的时间为  $t_2$ ；这样，水中的声源传播速度为：

如图 2 所示，其中  $S$  为声源离目标物体的垂直距离， $t$  为声源发射到接收到回波信号之间的时间。

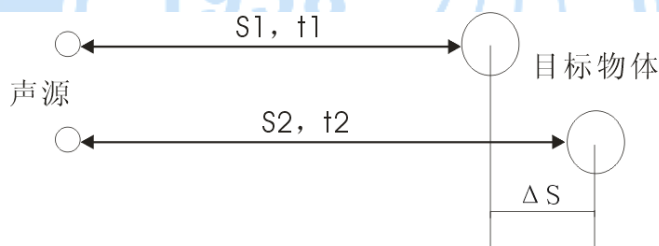


图2 时差法测量水中声速

### 4、超声成像

超声成像(ultrasonic imaging)是使用超声波的声成像。它包括脉冲回波型声成像(pulse echo acoustical imaging)和透射型声成像(transmission acoustical imaging)。前者是发射脉冲声波，接收其回波而获得物体图像的一种声成像方法；后者是利用透射声波获得物体图像的声成像方法。目前，在临床应用的超声诊断仪都是采用脉冲回波型声成像。而透射型声成像的一些成像方法仍处于研究之中，如某些类型的超声 CT 成像(computed tomography by ultrasound)。目前研究较多的有声速 CT 成像(computed tomography of acoustic Velocity)和声衰减 CI 成像(computed tomography of acoustic attenuation)。

本实验以脉冲回波型超声成像(也称反射式超声成像)为研究对象，来研究介绍和研究超声成像。所有脉冲回波型声成像凭借回声来反映物体组织的信息，

通过接收和处理载有物体组织或结构性特征信息的回波，获得物体组织性质与结构的可见图像的方法和技术。它与其他成像技术相比，有自己独特的优点，例如装置较为简明、直观，容易理解成像的原理；没有放射性，实验者可以自己进行不同物体的形貌成像实验。

## 【实验仪器】

实验仪器由以下部分组成：DH6001 超声定位与形貌综合实验仪、超声换能器、水槽与测试架、超声定位与形貌综合实验仪软件、数据线以及电脑。

### 1、DH6001 超声定位与形貌综合实验仪

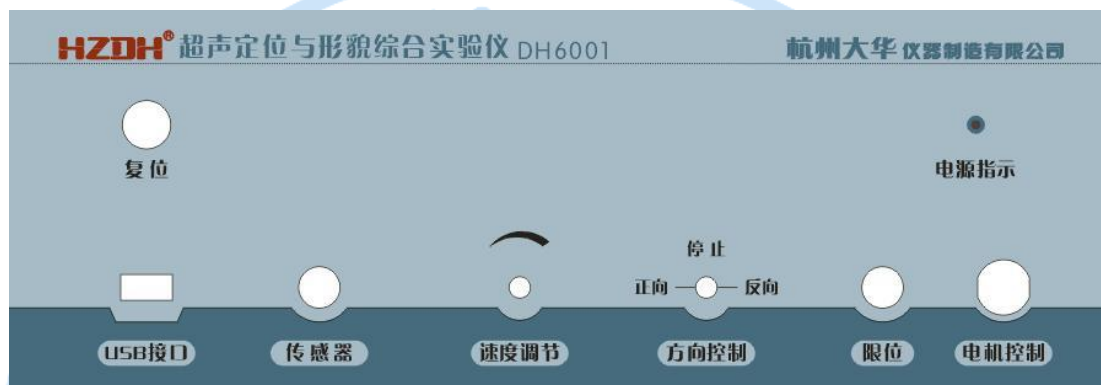


图3 DH6001 超声定位与形貌综合实验仪

实验仪与超声传感器、电脑软件、直流电机等相连，工作流程是：由 DSP 处理器控制高速 D/A 变换器产生 2.5 MHz 的频率信号，信号经过放大处理后接到超声传感器上作为发射波；发射波碰见不同的物体组织后将产生回波信号，回波信号经过高速运放进行放大滤波处理后由高速 A/D 对接收到的信号进行采集，采用 FFT 变换作数据分析处理，并把数据传输到电脑上。直流电机控制系统提供成像扫描以及目标物体的运动速度控制。指标参数：

- (1) 实验仪采用 DSP 处理器，采样频率 12.5M。
- (2) 超声波传感器工作频率：2.5 MHz，收发一体式。
- (3) 超声波传感器与定位/成像物体的距离：7cm—80cm。
- (4) 直流电机控制调速，可正反运行，速度可调。
- (5) 定位指标：水平距离精度 $\leq 2.5\text{cm}$ ；方位精度 $\leq 2.5^\circ$ 。
- (6) 仪器提供 USB 接口，与电脑相连。

### 2、水槽与测试架



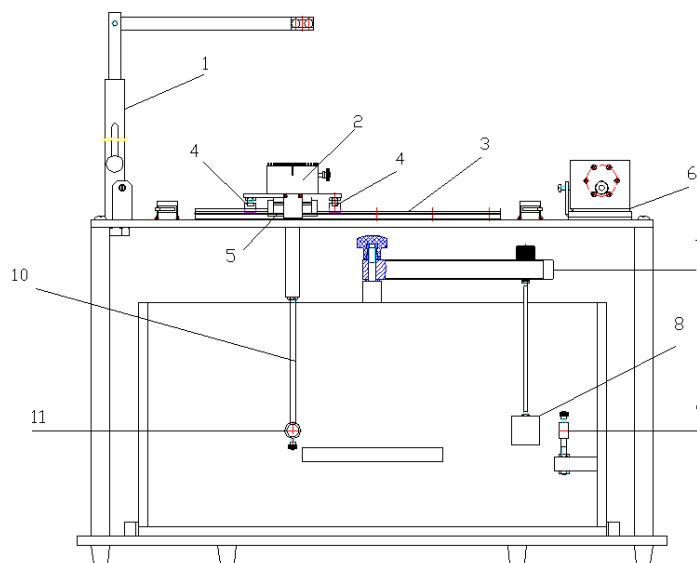


图4 测试架正视图

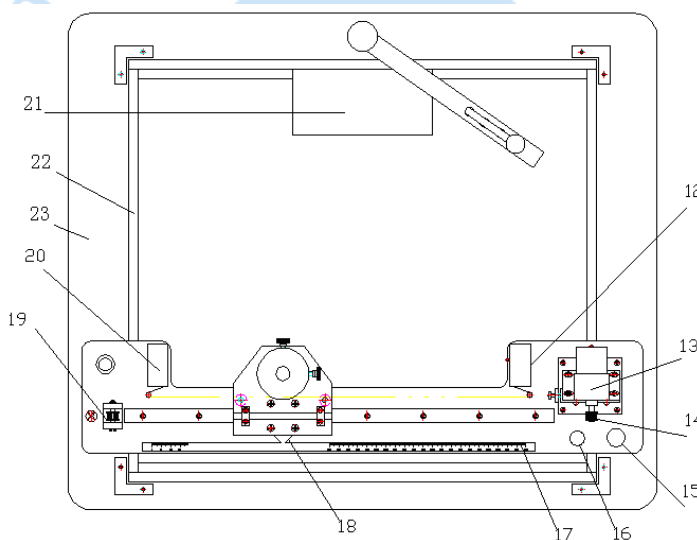


图5 测试架俯视图

- 1、撑线杆 2、角度旋转座 3、导轨 4、行程撞块 5、滑块  
 6、电机座 7、悬挂梁 8、定位物体 9、换能器固定座（测速时用于放置超声换能器）  
 10、吊杆 11、吊杆固定座（用于放置超声换能器或运动目标物体） 12、右行程开关  
 13、直流减速电机 14、主动轮 15、电机控制插座 16、限位插座 17、标尺  
 18、指针 19、从动轮 20、左行程开关 21、载物台 22、水槽 23、底板

水槽采用透明有机玻璃设计，成像物体放在水槽正面的载物台（图 5-21）上，超声换能器头悬挂在吊杆固定座（图 5-11）上，利用角度旋转座（图 5-2）可以实现换能器的旋转，并读取角度，用于定位物体的角度方位；水槽后面的悬挂梁（图 5-7）用于悬挂目标物体（图 5-8），可以改变物体在水槽中的位置，用于超声定位实验；水槽正上方测试架上的电机控制系统用于带动超声传感器对物体进行动态扫描，得到物体表面数据信息，成像出物体表面

形状或断面像；水槽的右侧壁的台体上还有一个换能器固定座（图 5-9），用于研究物体运动状态实验，具体实验时，换能器安装在此固定座上（图 5-9），运动物块放在与吊杆(图 5-10)相连的固定座（图 5-11）上，由电机控制使之运动。

### 3、电脑软件界面

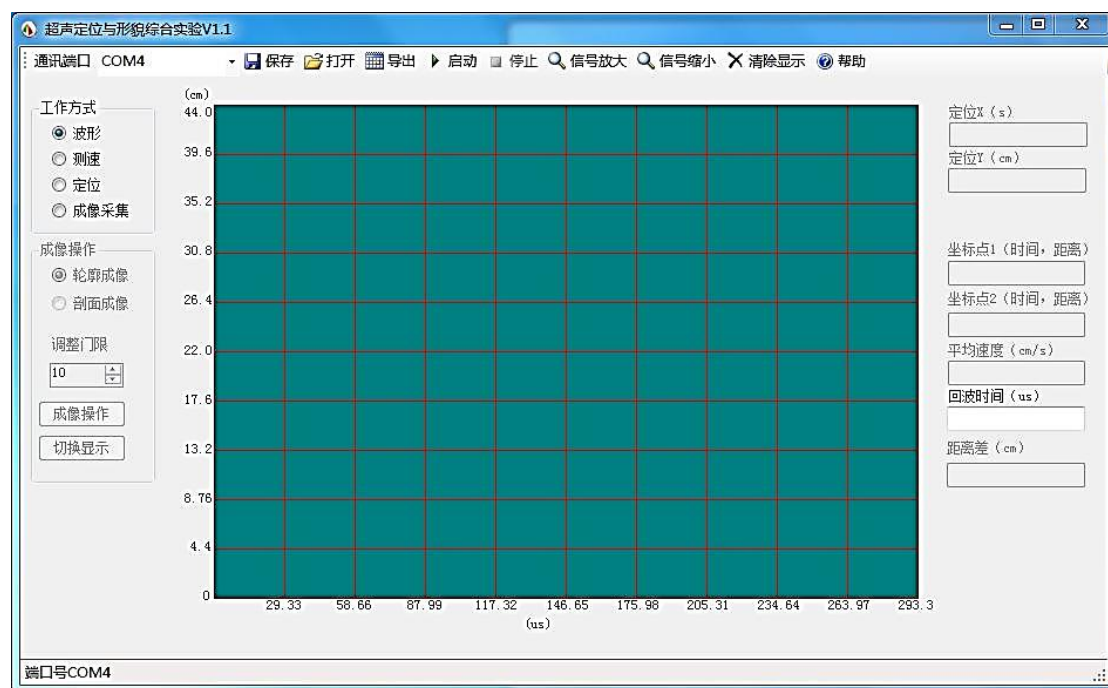


图 6 软件界面图

功能描述：

保存/打开/导出：保存、读取外部数据，导出当前窗口图像。

启动/停止：启动和终止当前工作方式。

信号放大/信号减小：对接收信号的显示强度进行放大和缩小。

清除显示：用于清除显示的波形或成像图。

工作方式：共提供波形，测速，定位以及成像采集四种工作方式。

成像操作：对采集的数据进行成像处理，处理的时候可以通过改变门限值，从而调整成像图。

定位 X/Y：显示探头与定位物体之间的距离。

坐标点一/坐标点二：显示坐标点的具体坐标，分别对应时间和距离，表示该时刻超声传感器扫过物体时对应的垂直距离。

平均速度：两坐标点之间的平均速度。

回波时间：显示第一次回波时间，用于时差法测水中声速。

采集的数据信号被传送到电脑后，电脑可以显示回波波形；可以对物体进行扫描成像，得出物体的剖面像图；同时也可以测量物体的运动速度和对水中

物体目标进行定位。

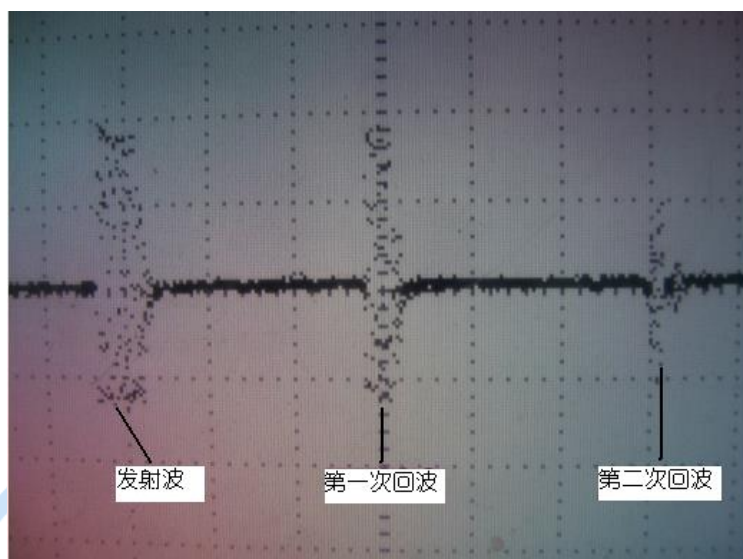


图7 换能器实际发射波形与接受

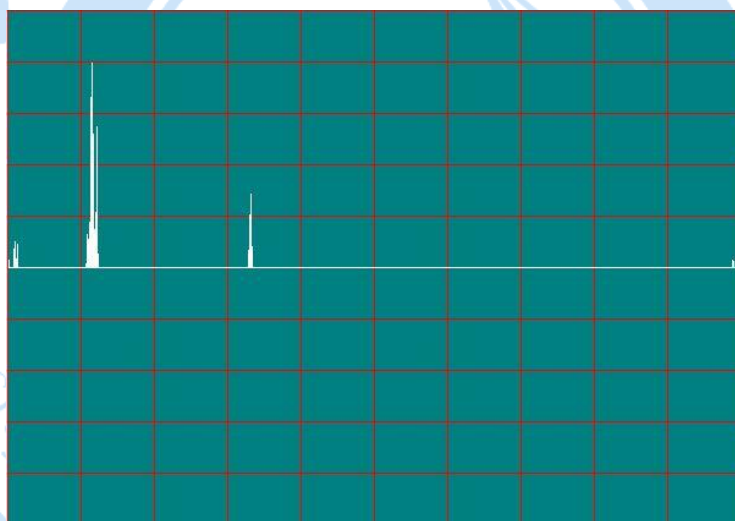


图8 经过 DSP 数据处理后电脑显示的回波信号

## 【实验内容】

(一) 打开实验仪，观察电脑显示的回波信号

1、水槽里注入适量水。连接换能器与信号源前面板上的“传感器”插座，并把仪器后面板上的串口与电脑相连，开启电源。**注意：通电工作时，一定确保换能器置水中。**

2、打开电脑软件“超声定位与形貌综合实验 V1.1”，用鼠标左键单击显控画面上工作方式框中的波形按钮，用鼠标左键单击软件界面上方的启动按钮，



画面上将显示动态的实时波形，点击**停止**按钮后，波形显示保持静止。

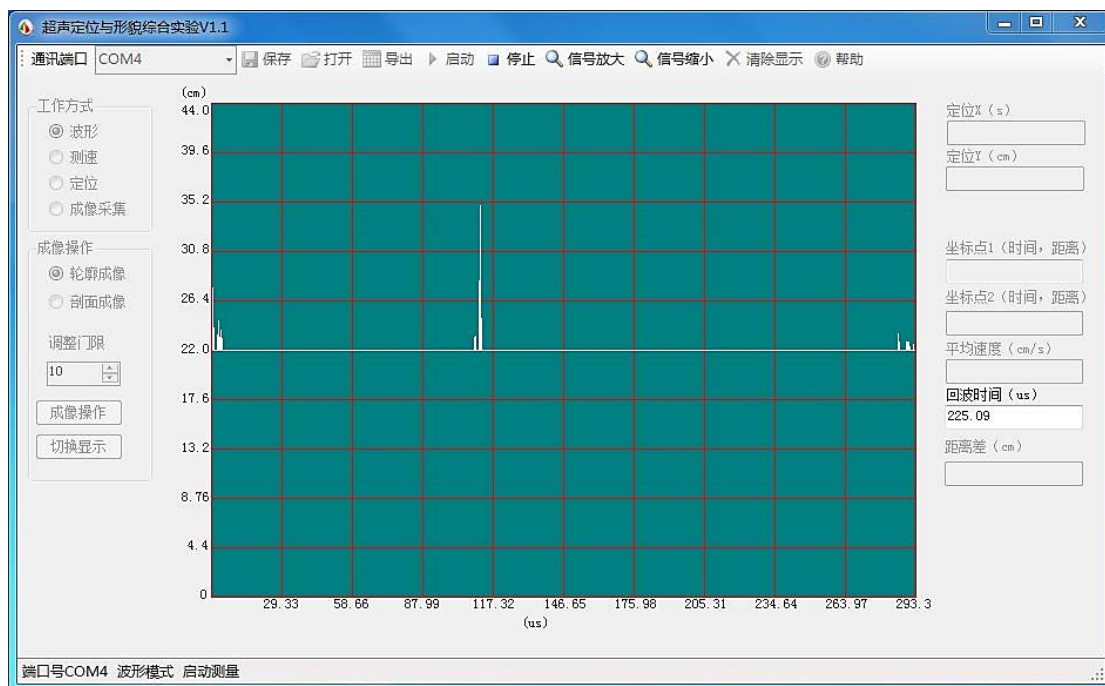


图9 回波波形图

## (二) 观察不同物体的回波波形

- 1、换能器安装在吊杆固定座（图 5-11）上并放在水槽（图 5-22）中，将不同直径的有机玻璃圆筒、有机玻璃圆柱放置到水槽中适当位置。
- 2、通过角度旋转座（图 5-2）水平旋转换能器探头，改变换能器的角度，观察回波波形。
- 3、思考不同物体回波波形的区别和产生原因。

## (三) 对水中目标物体进行定位

- 1、转动测试架后面的悬挂梁（图 5-7），使目标物体（图 5-8）处在某个位置。
- 2、启动电机控制系统，使滑块（图 5-5）移动到导轨（图 5-3）中间适当位置，调节角度旋转座（图 5-2），并确定参考极坐标系的极点与极轴。
- 3、选择**波形**工作方式，并点击**启动**按钮，通过传感器吊杆（图 5-10）旋转机构（图 5-2），缓慢旋转超声传感器，当传感器对准目标物体后，电脑界面上将显示最大的回波值，此时记下旋转机构（图 5-2）上的物体方位角度  $\theta$  值，鼠标左键点击**停止**按钮；
- 4、切换到**定位**工作方式，点击**启动**按钮，画面上有成像图显示，记下软件右侧显示的目标物体距离换能器之间的距离  $Y(\text{cm})$ 。
- 5、用直尺直接测量目标物体与超声换能器间的距离，与 4 中的测量结果进行对比，求出相对误差。
- 6、转动悬挂梁（图 5-7），改变目标物体的位置，测量三组目标物体离超声换能器的距离和方位。

#### （四）水中声速的测量

1、把运动物块放置在水槽右侧面的固定座（图 5-9）上，换能器的方向与导轨（图 5-3）方向一致，并对准运动物块。（注意：在通电时不要长时间把换能器露出水面）

2、切换到**波形**工作方式，点击**启动**按钮，画面上将显示实时波形以及发射脉冲波到接收回波之间的时间（软件界面右侧）。

3、启动电机控制系统，使换能器移动到 **S1** 的位置后停止，记下此时发射波到接收波之间的时间  $t_1$ ；再启动电机，改变换能器到位置 **S2**，记下此时发射波到接收波之间的时间  $t_2$ 。

4、计算声速：
$$v = 2 \frac{|S_2 - S_1|}{|t_2 - t_1|} \text{ m/s}。$$

5、重复三次测量求平均值，并与理论值进行对比（声波在水中传播速度的理论值： $1557 - 0.0245 \times (74 - t)^2 \text{ m/s}$ ，其中  $t$  为水的温度）。

#### （五）测量水中物体的运动状态

1、把运动物块放置在水槽右侧面的固定座（图 5-9）上，换能器的方向与导轨（图 5-3）方向一致，并对准运动物块。（注意：在通电时不要长时间把换能器露出水面）

2、用鼠标左键单击显控画面上**工作方式**框中的**测速**按钮，再点击**启动**按钮，画面上显示成像图，X 轴代表时间  $t$ ，Y 轴代表运动物块离超声传感器的距离  $S$ 。运行速度较小时，速度的动态显示误差将会比较大，必须通过  $S-t$  曲线来分析物体的运动状态。

3、启动直流电机控制器，让电机带动吊杆上的换能器运动起来，就可以看见  $S-t$  曲线。

4、分析  $S-t$  曲线，得到换能器运动的平均速度。具体方法是：在  $S-t$  曲线上单击两个坐标点，对应的坐标点坐标以及两坐标点间的平均速度将在界面中显示出来。

5、通过直流电机控制器，改变换能器的运动速度和方向，在 2 个运动方向、2 个运动速率下观察物体的运动曲线并计算运动物体平均速度。

6、具体的实例如下图所示：

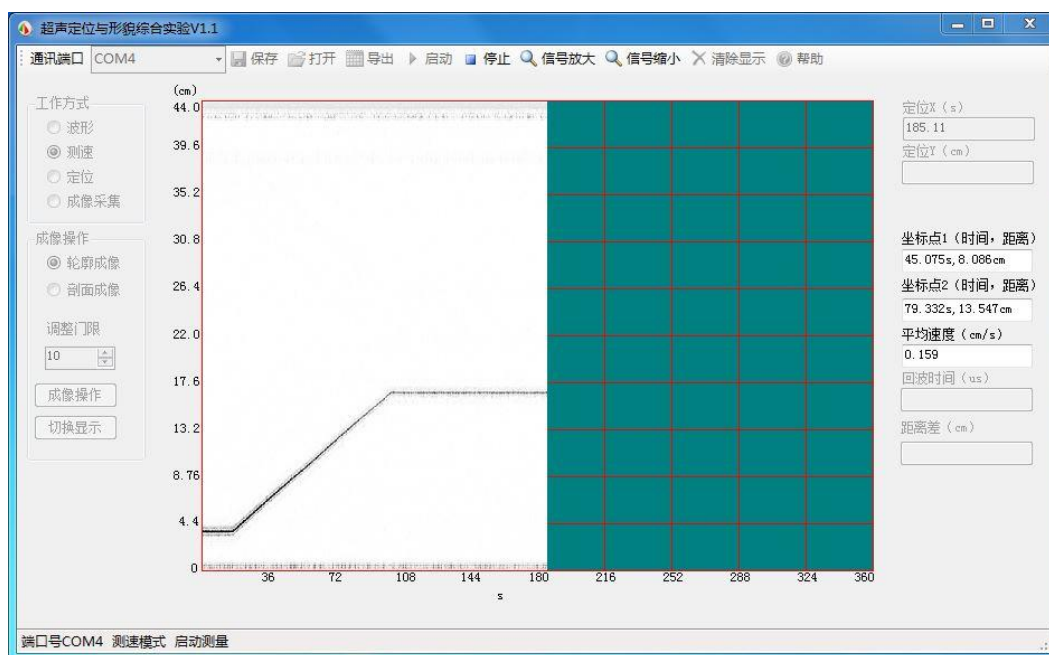


图 10 换能器运动状态曲线

#### (六) 扫描成像物体组织结构剖面图或表面形貌

- 1、将不规则物体放置到载物台(图 5-21)上,凹凸不平的一面朝向实验者。
- 2、用鼠标左键单击显控画面上工作方式框中的成像采集按钮,成像操作选择轮廓成像,点击启动按钮后画面上有成像图显示。采集结束后,用鼠标左键单击显控画面上成像操作按钮,显示处理后的成像画面。根据显示效果,用鼠标左键点击增加门限或减小门限按钮,可对其进行后置处理,得到相对较好的成像图。在采集的过程中,可以按信号放大和信号缩小来改变接收信号的强度。

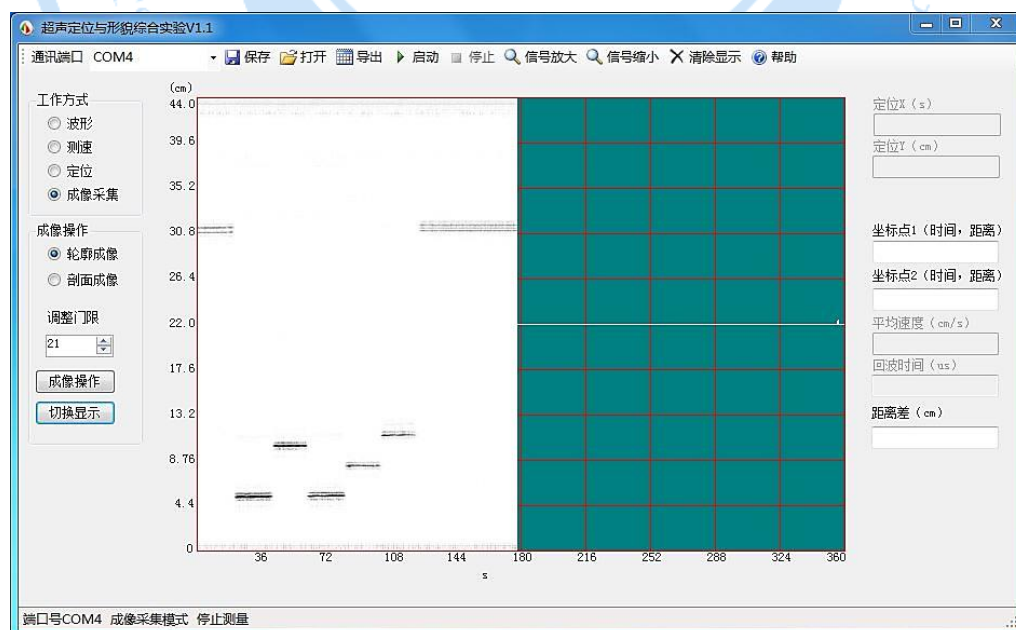
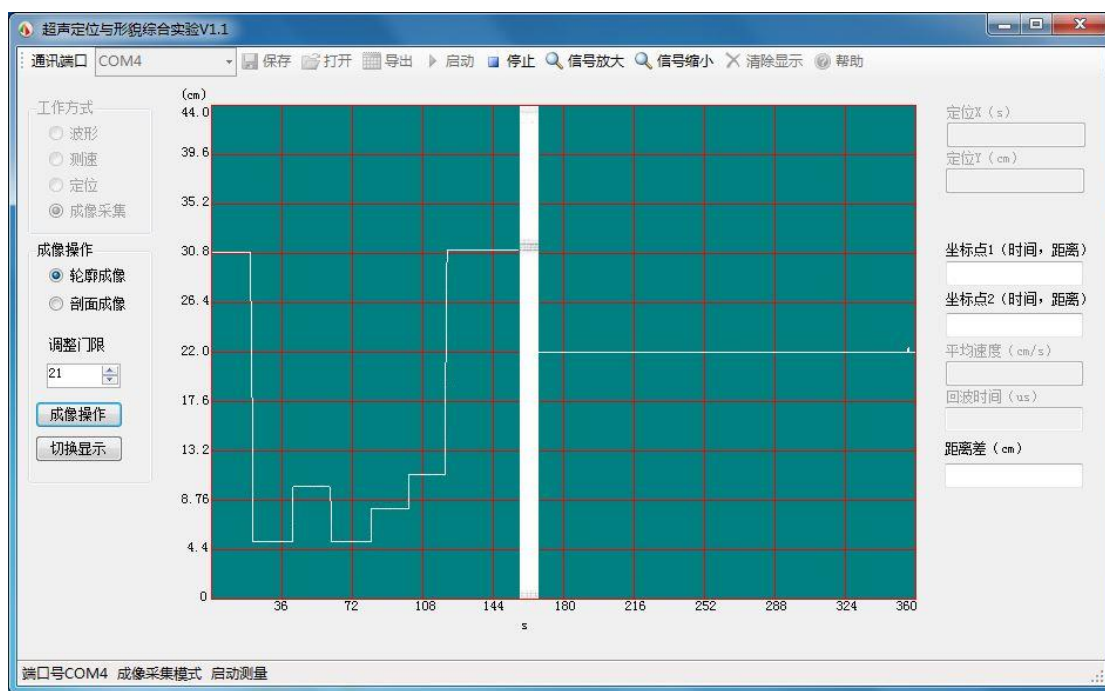


图 11 实时扫描物体得到的回波成像图



4、启动直流电机控制系统，使换能器垂直扫描物体，调节合适的扫描速度，观察实时成像图。多次尝试，获取较理想的物体形貌成像。

（郭玉刚 汪启昕 曲广媛，2023 年秋季学期）

## 附录 1：《超声定位与形貌成像》实验数据处理参考模板

### 1. 观察水中物体的回波波形（截图保存）

将波形图截图，在实验结束前主动向老师展示。并根据波形图简答下列问题：

（1）圆筒的回波波形图中存在几个回波？直径不同的圆筒的回波波形图有何异同点？为什么？

（2）圆柱的回波波形图中存在几个回波？为什么？

### 2. 对水中物体进行定位

（1）使用直尺测量距离时，如何选择起始点和终止点（可画图说明）。

（2）测量数据记录与处理

组次	物体方位角度 $\theta$	距离	直尺测量距离	相对误差
1				
2				
3				

### 3. 水中声速的测量

开始水温：\_\_\_\_\_，结束水温：\_\_\_\_\_。

组次	S2	S1	t2	t1	v
1					
2					
3					



(1) 计算水中声速的平均值、平均水温。

(2) 计算声波在水中传播速度理论值、相对误差，并写出计算过程。

#### 4. 测量水中物体的运动状态（截图保存）

将运动状态曲线截图，在实验结束前主动向老师展示，并简答下列问题：

(1) 正向高速

坐标点一：\_\_\_\_\_

坐标点二：\_\_\_\_\_

方向：\_\_\_\_\_ 速度：\_\_\_\_\_

(2) 正向低速

坐标点一：\_\_\_\_\_

坐标点二：\_\_\_\_\_

方向：\_\_\_\_\_ 速度：\_\_\_\_\_

(3) 反向高速

坐标点一：\_\_\_\_\_

坐标点二：\_\_\_\_\_

方向：\_\_\_\_\_ 速度：\_\_\_\_\_

(4) 反向低速

坐标点一：\_\_\_\_\_

坐标点二：\_\_\_\_\_

方向：\_\_\_\_\_ 速度：\_\_\_\_\_

简答题：图中的运动状态曲线和换能器速度之间的关系是什么？

#### 5. 扫描表面不规则物体的表面形貌

将表面形貌曲线截图，在实验结束前主动向老师展示，并简答下列问题：

(1) 本实验中被测试物体为什么要做成实验中所使用的形状？

(2) 如果用本实验第一部分内容中使用的大圆筒代替，将会得到什么样的扫描结果？如果用小圆筒呢？