

e. 3 固体中声速和泊松比测量

【实验背景】

超声波是频率在 $2 \times 10^4 \text{Hz} \sim 10^{12} \text{Hz}$ 的声波。超声波广泛存在于自然界中，如老鼠、海豚的叫声中含有超声成分。蝙蝠利用超声导航和觅食，金属片撞击和小孔漏气也能发出超声波。超声波在海洋探查与开发、无损检测与评价、医学诊断等领域发挥着不可替代的独特作用。例如，在海洋中，超声波可以用来探测鱼群或冰山、潜艇导航或传送信息、地形地貌测绘和地质勘探等。在检测中，利用超声波检验固体材料内部的缺陷、测量材料尺寸、物理参数等。在医学中，可以利用超声波进行人体内部器官的组织结构扫描（B 超诊断）和血流速度的测量（彩超诊断）等。

杨氏模量是描述固体材料抵抗形变能力的物理量，是表征材料性质的一个物理量，杨氏模量仅取决于材料本身的物理性质。杨氏模量的大小标志了材料的刚性，杨氏模量越大，越不容易发生形变。泊松比是指材料在单向受拉或受压时，横向正应变与轴向正应变的比值，也叫横向变形系数，它是反映材料横向变形的弹性常数。杨氏模量和泊松比无论在材料结构模型实验中还是在材料结构分析中，都是重要的力学参数之一。

【实验目的】

- 1、理解压电效应及超声波的产生原理；
- 2、了解超声波在介质中的传播规律；
- 3、测量超声在不同介质中传播的声速；
- 4、测量固体介质的泊松比和杨氏模量。

【实验原理】

1、压电效应及超声波的产生

超声波可以通过将其他形式的能量转换成超声振动能量的方式产生。例如压电效应、

磁致伸缩效应、电磁声效应和机械声效应等。目前普遍使用的是利用压电效应来产生和接收超声波。

某些固体物质，在压力（或拉力）的作用下产生变形，从而使物质本身极化，在物体的表面出现正、负束缚电荷，这一效应称为压电效应。通常具有压电效应的物质同时也具有逆压电效应，即当对其施加电压后会发生形变。利用逆压电效应产生超声波，而利用压电效应接收超声波。压电效应和逆压电效应的产生机理如图 e.3.1 所示。

用于产生和接收超声波的材料一般被制成片状（晶片），并在其正反两面镀上导电层（如镀银层）作为正负电极。如果在电极两端施加一脉冲电压，则晶片发生弹性形变，随后发生自由振动，并形成驻波，如果晶片的两侧存在其它弹性介质，则会向两侧发射弹性波，波的频率与晶片的材料和厚度有关。

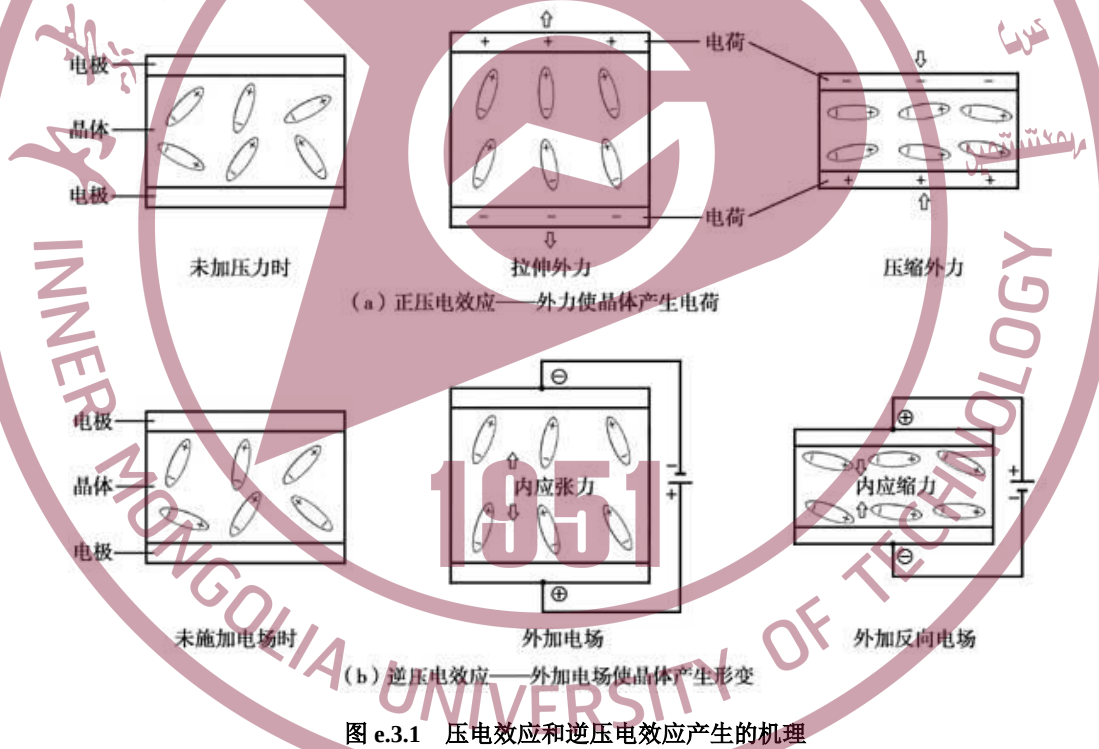


图 e.3.1 压电效应和逆压电效应产生的机理

适当选择晶片的厚度，使其产生弹性波的频率在超声波频率范围内，则该晶片即可产生超声波。在晶片的振动过程中，由于能量的减少，其振幅也逐渐减小，因此它发射出的是一个超声波波包，通常称为脉冲波。晶片的振动及脉冲波的产生如图 e.3.2 所示。

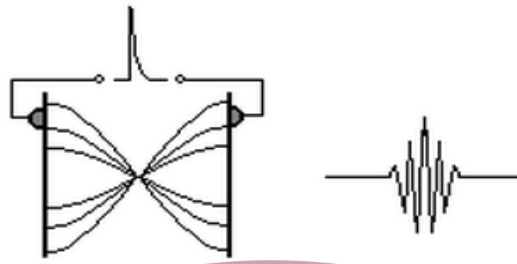


图 e.3.2 晶片振动及脉冲波动产生

2、超声波在介质中的传播规律

超声波在介质中通常有以下三种传播形式：

纵波：当介质中质点振动方向与超声波的传播方向一致时，此超声波为纵波。任何固体介质当其体积发生交替变化时均能产生纵波，如果晶片内部质点的振动方向垂直于晶片平面，那么晶片向外发射的就是超声纵波，压电材料产生的都是纵波。

横波：当介质中质点的振动方向与超声波的传播方向相垂直时，此超声波为横波。由于固体介质除了发生体积变形外，还发生切变变形，因此，当其有剪切力交替作用于固体介质时均能产生横波。

表面波：是沿着固体表面传播的具有纵波和横波的双重性质的波。表面波可以看成是由平行于表面的纵波和垂直于表面的横波合成，振动质点的轨迹为一椭圆，在固体内距表面 $1/4$ 波长处振幅最强，随着深度的增加很快衰减，实际上离表面一个波长以上的地方，质点振动的振幅已经很微弱了。

超声在气体介质中只能传播纵波，在液体和固体介质中可以同时传播纵波和横波，在固体表面可以传播表面波。

对于同一种固体材料，其纵波波速和横波波速的大小一般不一样，它们由弹性固体介质的弹性参数（密度、杨氏模量和泊松比等）决定。反之，如果已知超声波的声速，则可以推知固体材料有关的弹性常数。

与所有的波一样，超声波在两种介质界面上会发生折射和反射。特别地，当超声波要从波速较慢的介质进入波速较快的介质时，还可能发生全反射。超声波在界面传播的一个有趣的现象是波型转换：即当两种介质中的一种为固体时，反射和折射波中可以包含另外

类型波的成分，超声波的反射、折射和波形变换如图 e.3.3 所示。

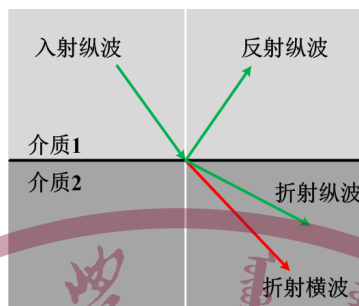


图 e.3.3 超声波的反射、折射和波形变换

3、超声在介质中的声速测量和超声测距

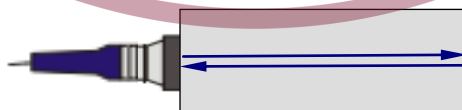
如果已知超声在某种介质中的传播距离，通过测量出超声在介质中的传播时间，则可以计算出超声在介质中传播的声速；如果已知超声在某种介质中的传播速度，通过测量出超声在介质中的传播时间，则可以测量出超声在介质中的传播距离。

超声在介质中的声速测量和超声测距有反射式和透射式两种测量方法，其中反射式测量只需要一个超声探头工作，透射式测量需要两个超声探头一起工作。

反射式测量方法中，超声探头首先发射一个脉冲超声波从待测介质的一个表面入射进入介质，在介质中传播至另一个表面时发生反射，反射回来的超声脉冲被超声探头接收，通过示波器观察超声脉冲从发射至接收所用的时间 T 。若已知的介质两个表面之间的距离 S ，则可计算出超声在介质中传播的声速 V ，反之若已知超声在介质中的传播速度 V ，则可计算出超声在介质中的传播距离。反射式测量方法中介质两个表面之间的距离 S ，超声在介质中的传播速度 V ，超声脉冲从发射至接收所用的时间 T 之间的关系为：

$$S = VT/2 \quad (e.3.1)$$

反射式测量超声在介质中的传播和示波器接收信号如图 e.3.4 所示。



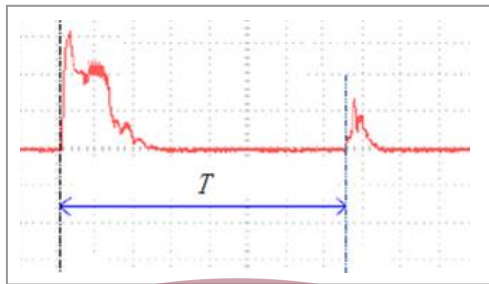


图 e.3.4 反射式测量时超声在介质中的传播和示波器接收的信号

透射式测量方法和反射式测量方法只是稍有不同，透射式测量方法中，一只超声探头首先发射一个脉冲波从介质的一个表面入射进入介质，在介质的另一个表面透射出去，透射出来的脉冲被另一只超声探头接收，通过示波器观测超声脉冲从发射至接收所用的时间 T 。若已知介质两个表面之间的距离 S ，则可计算出超声在介质中传播的声速 V ，反之若已知超声在介质中的传播速度 V ，则可计算出超声在介质中的传播距离：

$$S = VT \quad (e.3.2)$$

透射式测量超声在介质中的传播和示波器接收信号如图 e.3.5 所示。

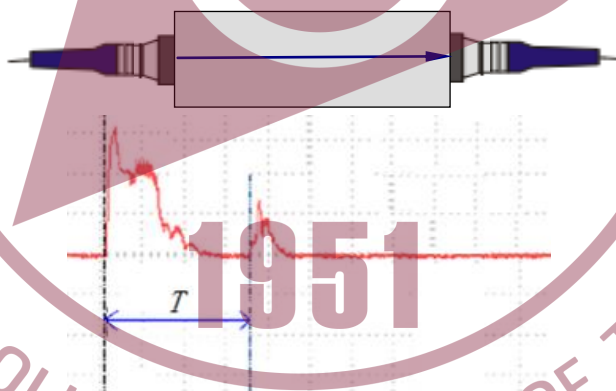


图 e.3.5 透射式测量时超声在介质中的传播和示波器接收信号

4、测量固体介质的泊松比和杨氏模量

超声波在两种介质界面上会发生折射和反射，当超声波从波速较慢的介质进入波速较快的介质时，会发生全反射，而且当两种介质中的一种为固体时，会发生波形变换。

当超声波以倾斜角度 α 入射到两种介质的交界表面上，根据折射定律和波形变换，将

会产生一个折射纵波 L 和一个折射横波 T，波形变换信号如图 e.3.6 所示。

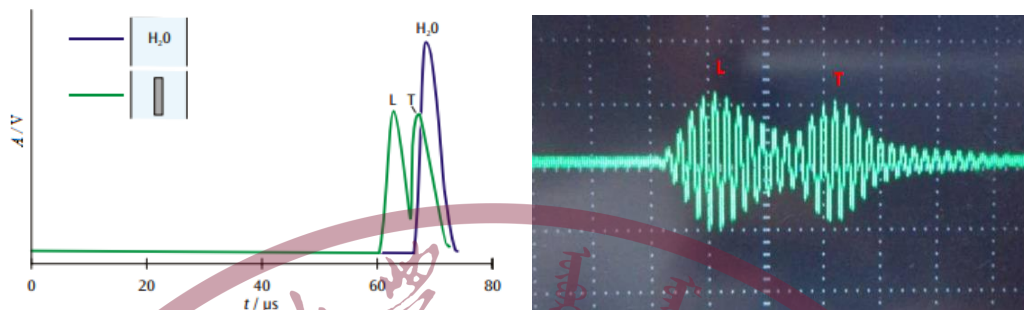


图 e.3.6 超声的波形变换信号（蓝色：没有平板，绿色：有平板）

超声波在波速较慢介质中的传播速度 V ，入射角度 α ，折射纵波的波速 V_L ，纵波的折射角度 β_L ，折射横波的波速 V_T ，横波的折射角度 β_T ，由斯涅尔定律，其关系为：

$$\frac{V}{\sin \alpha} = \frac{V_L}{\sin \beta_L} = \frac{V_T}{\sin \beta_T} \quad (\text{e.3.3})$$

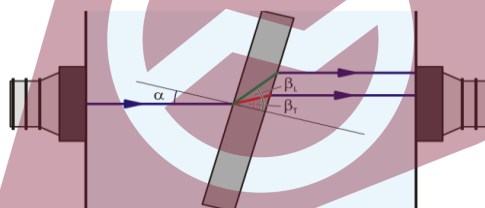


图 e.3.7 入射角度 α ，纵波的折射角度 β_L ，横波的折射角度 β_T 之间的关系

本实验中超声波是从波速较慢的水中进入波速较快的固体介质，通过改变入射角度 α 可以观察到全反射现象。因为固体中纵波波速大于横波波速，所以纵波发生全反射时所对应的入射角度 α 比横波发生全反射时的入射角 α 小，通过调整入射角度 α 的值可以分别观察纵波和横波的全反射现象，并可以根据公式 (e.3.3) 分别计算出纵波声速 V_L 和横波声速 V_T ：

$$V_L = \frac{V}{\sin \alpha_L} \quad (\text{e.3.4})$$

$$V_T = \frac{V}{\sin \alpha_T} \quad (\text{e.3.5})$$

式 (e.3.4) 中, V 为水中的声速, α_L 为纵波发生全反射时对应的入射角度, 式 (e.3.5) 中 α_T 为横波发生全反射时对应的入射角度。

纵波和横波分开的波形如图 e.3.6 所示, 纵波和横波发生全反射时的信号分别如图 e.3.8 和图 e.3.9 所示。

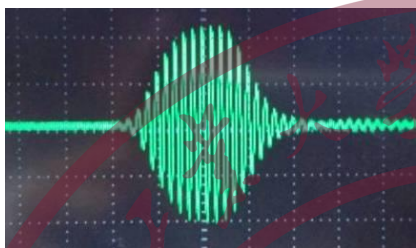


图 e.3.8 纵波发生全反射时示波器接收信号

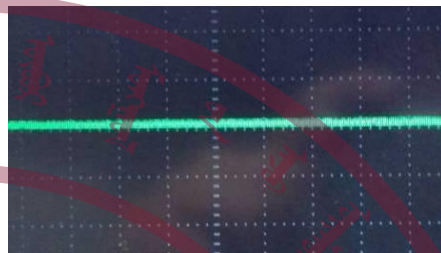


图 e.3.9 横波发生全反射时示波器接收信号

固体介质的泊松比 μ 与固体中纵波声速 V_L 和横波声速 V_T 之间的关系为:

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{V_L}{V_T} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_L}{V_T} \right)^2 - 1} \quad (\text{e.3.6})$$

固体介质的杨氏模量 E , 泊松比 μ , 密度 ρ , 纵波声速 V_L 之间的关系为:

$$E = \frac{V_L^2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (\text{e.3.7})$$

实验过程中只需要调整超声波的入射角度 α 使折射纵波和折射横波分别发生全反射, 根据公式 (e.3.4) 和公式 (e.3.5) 分别计算出纵波声速 V_L 和横波声速 V_T , 然后再根据公式 (e.3.6) 和公式 (e.3.7) 即可分别计算出固体介质的泊松比 μ 和杨氏模量 E 。

【实验仪器】

泊-杨综合实验仪由实验仪主机、水槽、可旋转角度铝板组件、可旋转角度亚克力板组件、超声探头、圆柱形固体棒组成, 如图 e.3.10。

泊-杨综合实验仪是一种无损伤的集超声脉冲反射式和透射式于一体的实验仪器。工作

方式有单探头和双探头两种。使用单探头时，探头既用来发射超声，又用来接收超声，这时所使用的测量方法即为反射法。使用双探头时，一个探头用来发射超声，而另一个探头用来接收超声，这时所使用的测量方法即为透射法。

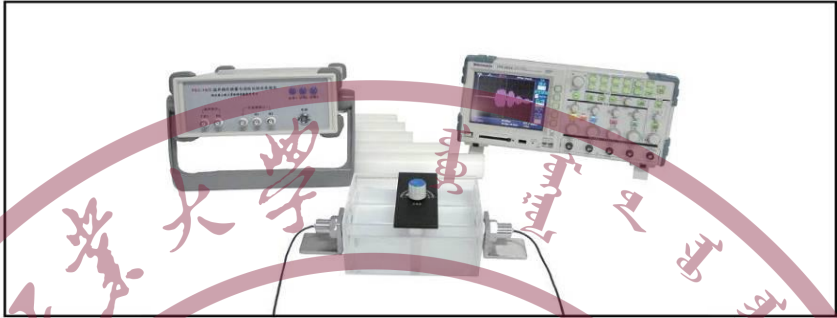


图 e.3.10 PEC-B-Y 型 泊-杨综合实验仪

PEC-B-Y 型泊-杨综合实验仪主机前面板各按钮和接口功能如图 e.3.11 所示：

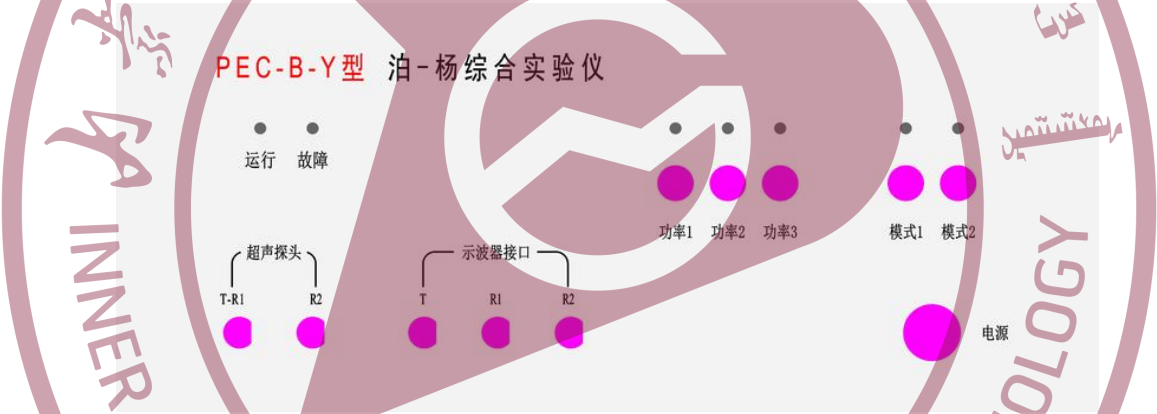


图 e.3.11 PEC-B-Y 型泊-杨综合实验仪主机前面板

仪器配套的两只探头都支持单收、单发和收发一体模式。当使用反射法进行测量时，需要将一只探头接到超声探头接口 T-R1，此时示波器接到示波器接口 T 观测发射信号，接到示波器接口 R1 观测发射信号和接收信号。当使用透射法进行测量时，需要将一只探头接到超声探头 T-R1 接口，另一只探头接到超声探头 R2 接口，此时用示波器接到示波器 T 接口观测发射信号，接到示波器 R2 接口观测透射的接收信号。功率按键调节发射功率的大小，模式按键调节发射信号的脉冲宽度，模式 1 的脉冲宽度为 $10\mu\text{s}$ ，模式 2 的脉冲宽度为 $20\mu\text{s}$ 。当功率按键或模式按键都没有按下时，故障灯亮，仪器停止工作。

【实验内容】

一、透射法测量超声在固体介质中的传播速度，并测量未知长度圆柱棒的长度。

实验步骤：

1. 将一个超声探头连接到实验仪面板上的超声探头 T-R1 接口，另一个超声探头连接到实验仪面板上的超声探头 R2 接口。

2. 将超声探头表面涂覆一层超声耦合剂，并将超声探头与圆柱棒端面紧密接触在一起；

3. 将示波器 CH1 通道连接到实验仪面板上的示波器接口 T 上，观察发射波形，将示波器 CH2 通道连接到实验仪面板上的示波器接口 R2 上，观察接收波形；

*说明：微调两个探头的位置，使探头与固体棒端面接触良好，两个探头在同一轴线上，此时接收波形的幅值应该最强。

4. 通过示波器读取发射波形与接收波形之间的时间差 T ；

5. 更换已知长度的圆柱棒，重复 1~4 步骤，并根据实验数据绘制 $S-T$ 关系图，求解固体棒中的声速；

6. 换成未知长度的圆柱棒，通过示波器读取发射波形与接收波形之间的时间差 T ，利用超声在固体中传播速度和公式 (e.3.1)，计算出圆柱棒的长度；

表 e.3.1 圆柱棒声速测量数据

S/mm	$T/\mu\text{s}$	$V/\text{m/s}$	$\bar{V}/\text{m/s}$
50			
70			
90			
110			
130			

表 e.3.2 圆柱棒长度测量数据

	$T/\mu\text{s}$	测量值/mm	E_r
待测棒			

*说明：待测圆柱棒的长度为 10.0cm。

二、反射法测量探伤。

实验步骤：

1. 将一个超声探头连接到实验仪面板上的超声探头 T-R1 接口；
2. 将超声探头表面涂覆一层超声耦合剂，并将超声探头与圆柱棒端面紧密接触在一起；
3. 将示波器 CH1 通道连接到实验仪面板上的示波器接口 R1 上，观察波形；读取时间差；
4. 测量圆柱的总长度以及缺陷的位置。

表 e.3.3 缺陷圆柱棒测量数据

	$T/\mu\text{s}$	测量值/mm
总长度		
缺陷定位		

*说明：缺陷定位记录圆柱端面离缺口较远一侧的数据。

三、测量声波在介质中的衰减。

实验步骤：

1. 将两个超声探头分别连接到实验仪面板上的超声探头 T-R1 接口和 R2 接口；
2. 将超声探头两个表面涂覆一层超声耦合剂，并将超声探头和已知长度的圆柱棒（长度为 90.0mm）的端面紧密接触在一起；
3. 将示波器 CH1 通道连接到实验仪面板上的示波器接口 T 上，将示波器 CH2 通道连接到实验仪面板上的示波器接口 R2 上，观察透射波形；通过示波器读取透射波的峰峰值 A1；
4. 换一个已知长度的圆柱体（长度为 130.0mm），测量透射波的峰峰值 A2；
5. 由 Lamber 定律 $A = A_0 e^{-\alpha x}$ ，计算声波的衰减系数

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{A_1}{A_2}$$

其中 x_1 和 x_2 为圆柱体的长度， α 的单位通常用 dB/cm 表示，换算如下：

$$\alpha = \frac{\alpha}{20 \lg(e)} [\text{dB/cm}] = \frac{\alpha}{8.686} [\text{dB/cm}]$$

表 e.3.4 固体中声速衰减系数测量

S/mm	A(V)	α (dB/cm)
90.0		
130.0		

*说明：发射功率应选用最小档位，避免接收信号饱和影响测量结果；实验过程中要反复微调探头的位置，使接收到的信号幅值最强时读取数据，这样可以减小探头与圆柱棒的位置耦合不一致带来的实验误差。

四、反射法测量超声在水中的传播速度。

实验步骤：

1. 将一个超声探头连接到实验仪面板上的超声探头 T-R1 接口；
2. 将水槽装适当的水（水位不超过十字线的水平线），将超声探头表面涂覆一层超声耦合剂，与水槽侧面紧密接触在一起；
3. 将示波器 CH1 通道连接到实验仪面板上的示波器接口 R1 上，观察波形；
4. 通过示波器读取发射波形与第一次反射波形之间的时间差 T ，利用水槽长度方向内侧面之间的距离和公式（1）计算超声在水中的传播速度，并与理论值做比较。

*说明：为修正水槽壁厚对结果的影响，壁厚可用游标卡尺测量（一般取 4.5mm），声速在水槽壁中的传播速度可以采用实验 1 的结果；声速的理论值，需测量实验室温度，查表获取。

表 e.3.5 单次回波测水中声速 温度 $t = \underline{\hspace{2cm}}$ °C

	S(mm)	$T(\mu\text{s})$	$V(\text{m/s})$	$V_{\text{理论}}(\text{m/s})$	E_r
第一次回波					

五、测量固体介质的泊松比和杨氏模量。

实验步骤：

- 1.将两个超声探头分别连接到实验仪面板上的超声探头 T-R1 接口和 R2 接口；
- 2.将可旋转角度的铝板置于水槽中，使铝板表面与发射声波垂直；
- 3.将示波器 CH1 通道连接到实验仪面板上的示波器接口 T 上，观察发射波形，将示波器 CH2 通道连接到实验仪面板上的示波器接口 R2 上，观察透射波形；
- 4.通过旋转铝板改变声波在水和铝板接触面的入射角，观察波形变换产生的纵波和横波，并观察纵波和横波的全反射现象，记录纵波发生全反射时对应的入射角，以及纵波和横波都发生全反射时对应的入射角；
- 5.根据公式（4）~（7）计算出固体介质的泊松比和杨氏模量；
- 6.换成可转角度的亚克力板，重复步骤 1~5。

*说明：图 e.3.6 所示的横波和纵波分开的现象，需要耐心调节，反复微调角度和探头的位置；图 e.3.6 和图 e.3.8 所示的状态角度相差很小大概 2-3 度。

表 e.3.6 测固体介质的泊松比和杨氏模量实验数据

	铝	亚克力
ρ (g/cm ³)	2.7	1.2
$\alpha_L(^{\circ})$		
$\alpha_T(^{\circ})$		
V_L (m/s)		
V_T (m/s)		
μ		
E (MPa)		
μ 参考值	0.32~0.36	0.26~0.30
E (MPa)参考值	60000~70000	6000~7000

【思考题】

1. 如何采用多次回波测水中声速？

【附录】

温度与水中声速(米/秒)对照表

(1 标准大气压下)

温度 (℃)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	1402.3	1402.8	1403.3	1403.8	1404.3	1404.8	1405.3	1405.8	1406.3	1406.8
1	1407.3	1407.8	1408.3	1408.8	1409.3	1409.8	1410.2	1410.7	1411.2	1411.7
2	1412.2	1412.7	1413.1	1413.6	1414.1	1414.6	1415.0	1415.5	1416.0	1416.4
3	1416.9	1417.4	1417.8	1418.3	1418.8	1419.3	1419.7	1420.2	1420.7	1421.1
4	1421.6	1422.1	1422.5	1423.0	1423.4	1423.9	1424.3	1424.8	1425.2	1425.7
5	1426.1	1426.5	1427.0	1427.4	1427.9	1428.3	1428.7	1429.2	1429.6	1430.1
6	1430.5	1430.9	1431.4	1431.8	1432.2	1432.7	1433.1	1433.5	1433.9	1434.4
7	1434.8	1435.2	1435.7	1436.1	1436.5	1437.0	1437.4	1437.8	1438.2	1438.7
8	1439.1	1439.5	1439.9	1440.3	1440.7	1441.2	1441.6	1442.0	1442.4	1442.8
9	1443.2	1443.6	1444.0	1444.4	1444.8	1445.2	1445.6	1446.0	1446.4	1446.8
10	1447.2	1447.6	1448.0	1448.4	1448.8	1449.2	1449.5	1449.9	1450.3	1450.7
11	1451.1	1451.5	1451.9	1452.2	1452.6	1453.0	1453.4	1453.8	1454.1	1454.5
12	1454.9	1455.3	1455.7	1456.0	1456.4	1456.8	1457.2	1457.6	1457.9	1458.3
13	1458.7	1459.1	1459.4	1459.8	1460.1	1460.5	1460.9	1461.2	1461.6	1461.9
14	1462.3	1462.7	1463.0	1463.4	1463.7	1464.1	1464.4	1464.8	1465.1	1465.5
15	1465.8	1466.2	1466.5	1466.9	1467.2	1467.6	1467.9	1468.3	1468.6	1469.0
16	1469.3	1469.6	1470.0	1470.3	1470.7	1471.0	1471.3	1471.7	1472.0	1472.4
17	1472.7	1473.0	1473.4	1473.7	1474.0	1474.4	1474.7	1475.0	1475.3	1475.7
18	1476.0	1476.3	1476.6	1476.9	1477.2	1477.6	1477.9	1478.2	1478.5	1478.8
19	1479.1	1479.4	1479.7	1480.1	1480.4	1480.7	1481.0	1481.3	1481.7	1482.0
20	1482.3	1482.6	1482.9	1483.2	1483.5	1483.8	1484.1	1484.4	1484.7	1485.0
21	1485.3	1485.6	1485.9	1486.2	1486.5	1486.8	1487.0	1487.3	1487.6	1487.9

22	1488.2	1488.5	1488.8	1489.1	1489.4	1489.7	1489.9	1490.2	1490.5	1490.8
23	1491.1	1491.4	1491.7	1491.9	1492.2	1492.5	1492.8	1493.1	1493.3	1493.6
24	1493.9	1494.2	1494.4	1494.7	1495.0	1495.3	1495.5	1495.8	1496.1	1496.3
25	1496.6	1496.9	1497.1	1497.4	1497.6	1497.9	1498.2	1498.4	1498.7	1498.9
26	1499.2	1499.5	1499.7	1500.0	1500.2	1500.5	1500.8	1501.0	1501.3	1501.5
27	1501.8	1502.1	1502.3	1502.6	1502.8	1503.1	1503.3	1503.6	1503.8	1504.1
28	1504.3	1504.5	1504.8	1505.0	1505.3	1505.5	1505.7	1506.0	1506.2	1506.5
29	1506.7	1506.9	1507.2	1507.4	1507.6	1507.9	1508.1	1508.3	1508.5	1508.8
30	1509.0	1509.2	1509.5	1509.7	1509.9	1510.2	1510.4	1510.6	1510.8	1511.1
温度 (℃)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
31	1511.3	1511.5	1511.7	1512.0	1512.2	1512.4	1512.6	1512.8	1513.1	1513.3
32	1513.5	1513.7	1513.9	1514.2	1514.4	1514.6	1514.8	1515.0	1515.3	1515.5
33	1515.7	1515.9	1516.1	1516.3	1516.5	1516.7	1516.9	1517.1	1517.3	1517.5
34	1517.7	1517.9	1518.1	1518.3	1518.5	1518.7	1518.9	1519.1	1519.3	1519.5
35	1519.7	1519.9	1520.1	1520.3	1520.5	1520.7	1520.9	1521.1	1521.3	1521.5
36	1521.7	1521.9	1522.1	1522.2	1522.4	1522.6	1522.8	1523.0	1523.1	1523.3
37	1523.5	1523.7	1523.9	1524.0	1524.2	1524.4	1524.6	1524.8	1524.9	1525.1
38	1525.3	1525.5	1525.7	1525.8	1526.0	1526.2	1526.4	1526.6	1526.7	1526.9
39	1527.1	1527.3	1527.4	1527.6	1527.8	1528.0	1528.1	1528.3	1528.5	1528.6
40	1528.8	1529.0	1529.1	1529.3	1529.4	1529.6	1529.8	1529.9	1530.1	1530.2
41	1530.4	1530.6	1530.7	1530.9	1531.0	1531.2	1531.4	1531.5	1531.7	1531.8
42	1532.0	1532.2	1532.3	1532.5	1532.6	1532.8	1532.9	1533.1	1533.2	1533.4
43	1533.5	1533.6	1533.8	1533.9	1534.1	1534.2	1534.3	1534.5	1534.6	1534.8
44	1534.9	1535.0	1535.2	1535.3	1535.5	1535.6	1535.7	1535.9	1536.0	1536.2
45	1536.3	1536.4	1536.6	1536.7	1536.9	1537.0	1537.1	1537.3	1537.4	1537.6
46	1537.7	1537.8	1537.9	1538.1	1538.2	1538.3	1538.4	1538.5	1538.7	1538.8
47	1538.9	1539.0	1539.2	1539.3	1539.4	1539.6	1539.7	1539.8	1539.9	1540.1