

同轴电缆中电磁波的传输与金属中超声波的传输

2017011620 计 73 李家昊

实验日期：2019/4/18

一、同轴电缆中电磁波的传输

1. 实验目的

通过脉冲波信号的测量，理解波在传输路径上遇到界面时的反射和透射特性，理解入射波和反射波的相位关系，掌握阻抗匹配概念。

2. 实验原理

设 R, L, C, G 分别为单位长度传输线的电阻、电感、电容和电导， $v(z, t), i(z, t)$ 为沿传输线长度方向（ z 方向）的电压、电流信号。令

$$v(z, t) = \text{Re}[V(z)e^{j\omega t}], \quad i(z, t) = \text{Re}[I(z)e^{j\omega t}]$$

利用电路方程分析单元传输线后可得

$$\frac{dV(z)}{dz} = -I(z)(R + j\omega L), \quad \frac{dI(z)}{dz} = -V(z)(G + j\omega C)$$

组合后可得

$$\frac{d^2V}{dz^2} = \gamma^2 V(z), \quad \frac{d^2I}{dz^2} = \gamma^2 I(z)$$

其中

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

为传播常数，实部 α 和虚部 β 分别是线的衰减常数和相位常数，以复杂关系与 ω 相关。微分方程的解为

$$V(z) = V^+(z) + V^-(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z}$$
$$I(z) = I^+(z) + I^-(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z}$$

其中正和负上角标分别表示向 $+z$ 方向和 $-z$ 方向行进的行波。容易证明

$$\frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-} = \frac{R + j\omega L}{\gamma}$$

上式表明，传输线上任何 z 处电压电流之比与 z 无关。令

$$Z_0 = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = R_0 + jx_0$$

其中 Z_0 称为传输线的特性阻抗， R_0, x_0 分别表示单位长度的电阻性负载和电感性负载。 Z_0, γ 是两个重要参数，只与电路参数 R, L, C, G, ω 有关，而与线的长度无关。

下面列举两种重要情况：

(1) $R=0, G=0$ （无损耗线），此时

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{LC}, \quad Z_0 = R_0 + jx_0 = \sqrt{L/C}$$

(2) $R/L=G/C$ (无失真线), 此时

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{C/L}(R + j\omega L), \quad Z_0 = R_0 + jx_0 = \sqrt{L/C}$$

两种情况下, 特性阻抗 Z_0 均为纯阻性常数, 而相位常数 β 均为 ω 的线性函数。

考虑终端负载对传输信号的影响, 对于长为 l 的传输线, 终端 $z = l$ 处外加负载为

$Z_l = \frac{V_l}{I_l}$, V_l, I_l 为负载上电压和电流。可得

$$V(z) = \frac{I_l}{2} [(Z_l + Z_0)e^{\gamma(l-z)} + (Z_l - Z_0)e^{-\gamma(l-z)}]$$
$$I(z) = \frac{I_l}{2Z_0} [(Z_l + Z_0)e^{\gamma(l-z)} - (Z_l - Z_0)e^{-\gamma(l-z)}]$$

整理得到

$$V(z) = \frac{I_l}{2} (Z_l + Z_0)e^{\gamma(l-z)} [1 + \Gamma e^{-2\gamma(l-z)}]$$

其中

$$\Gamma = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} = |\Gamma|e^{j\theta}$$

Γ 表示在负载端电压反射波与入射波振幅之比, 称为负载 Z_l 的电压反射系数。对于无损线, $Z_0 = R_0$, 若负载 Z_l 也为纯电阻性负载, 分三种情况:

(1) 开路 $Z_l = R_l = \infty$, $\Gamma = 1$ 。

$$\begin{cases} V(z) = V_l \cos \frac{2\pi(l-z)}{\lambda} \\ I(z) = \frac{V_l}{R_0} \sin \frac{2\pi(l-z)}{\lambda} \end{cases}$$

此时 Γ 最大。 $z = l$ 处, 电压最大, 为驻波波腹, 电流最小, 为驻波波节。

(2) 短路 $Z_l = R_l = 0$, $\Gamma = -1$ 。

此时反射波反向。电压、电流驻波分布与开路情况相反。

(3) 负载匹配 $Z_l = R_l = R_0$, $\Gamma = 0$ 。

此时无反射波, 线路中只有沿 $+z$ 方向的行波。

3. 实验仪器

(1) Tektronix 数字示波器

(2) Tektronix AFG1062 信号发生器。

(3) 电阻盒, 待测长同轴电缆, 短同轴电缆连接线, 三接头, 阻抗元件。

4. 实验内容

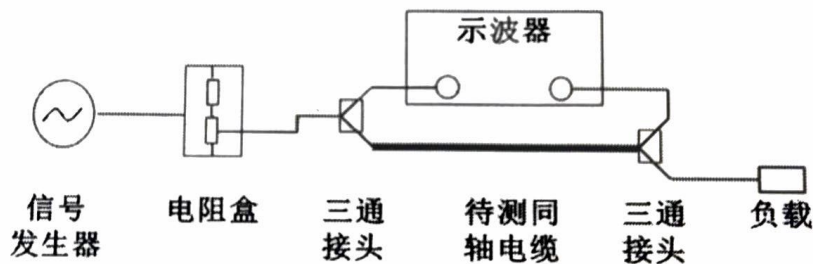


图 5 实验电路图

测量同轴电缆长度和衰减常数。将信号发生器输出信号通过电阻盒接到传输线输入端。传输线输出端分别选择开路、短路和匹配电阻三种测试方式。

二、金属中超声波的传播

1. 实验目的

- (1) 掌握超声波波速测量方法。
- (2) 观察声波转换及表面波。
- (3) 了解超声波探测原理。

2. 实验原理

超声波在介质中传播分为三种形式：横波、纵波、表面波。当超声纵波或横波入射到两种介质界面上时，若介质至少其中之一是固体，则会同时折射或反射出另一种波形，这种现象称为波型转换。设 θ_1, c_1 为介质 1 中的入射角和波速， β_l, β_s 为介质 2 中纵波和横波的折射角， c_{2l}, c_{2s} 分别为介质 2 中纵波和横波的波速。由折射定律

$$\frac{\sin \theta}{c_1} = \frac{\sin \beta_l}{c_{2l}} = \frac{\sin \beta_s}{c_{2s}}$$

当 $\theta > \theta_s$ 时，在表面条件适合时将产生沿固体表面传播的表面波。

3. 实验仪器及使用说明

- (1) 超声波试验仪的发射/接收只能接超声探头，不允许接示波器。
- (2) 纵波测量时，衰减选择在 80-90db，横波测量时，衰减选择在 60-80db，表面波测量时，衰减选择在 30-50db。
- (3) 超声试验仪检波输出正向脉冲电压信号，用于示波器检测。

4. 实验内容

4.1 声速测量

声速计算公式如下：

$$c = \frac{2l}{t_2 - t_1}$$

其中 l 是探头到反射面的距离， t_1, t_2 为起始面和反射面回波的时间。测量方法见图 13。

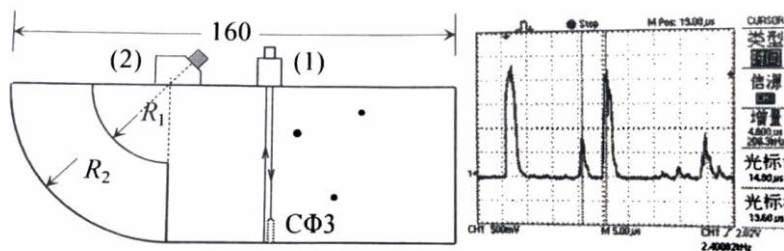


图 13 测量纵波声速及探测钻孔深度示意图

- (1) 利用直探头测量试样中纵波声速 c_l 。
- (2) 利用 45° 斜探头测量试样中横波声速 c_s 。
- (3) 通过测量声速计算试样块的杨氏模量和 Poisson 系数。

在各向同性固体介质中，各种波形的超声波声速为

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}$$

其中 E 为杨氏模量， σ 为 Poisson 系数， ρ 为材料密度。相应可得

$$E = \frac{\rho c_s^2 (3T^2 - 4)}{T^2 - 1}$$

$$\sigma = \frac{T^2 - 2}{2(T^2 - 1)}$$

其中 $T = c_l/c_s$ 。

4.2 表面波的实验

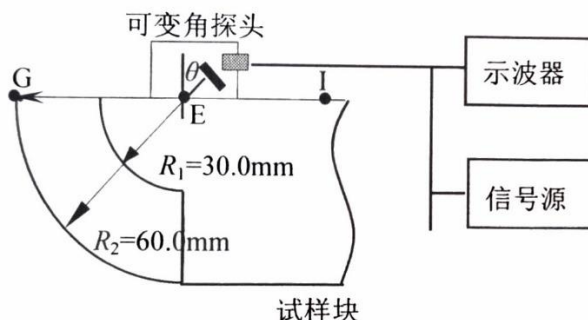


图 14 观察波型转换及表面波示意图

如图 14，观察波形转换的方法为：

- (1) 把可变角探头入射角调整为 0 ，观察纵波。
- (2) 增大可变角探头入射角，当入射角达到纵波临界角 $\theta_l = 25.1^\circ$ 后，纵波消失，入射角继续增大会新出现两个回波，为横波。

- (3) 可变角探头入射角继续增加，至横波临界角 $\theta_s = 58.9^\circ$ 后横波消失，当 $\theta \sim 65^\circ$ 时出现新的回波，为表面波。

可采用以下两种方法测量表面波的波速：

- (1) 固定法：可变探头转到约 65° ，测量E处产生起始波至反射回波的时间 Δt ，由几何尺寸计算EG距离为 L_{EG} ，则

$$c_R = \frac{2L_{EG}}{\Delta t}$$

- (2) 移动法：先找出从G处的反射回波在示波器时间轴的位置 t_1 ，沿传播方向移动探头到I处，再找出反射回波的第二个位置 t_2 ，则

$$c_R = \frac{2L_{EI}}{t_2 - t_1}$$

4.3 超声波探测缺陷

4.3.1 声束扩散角的测量

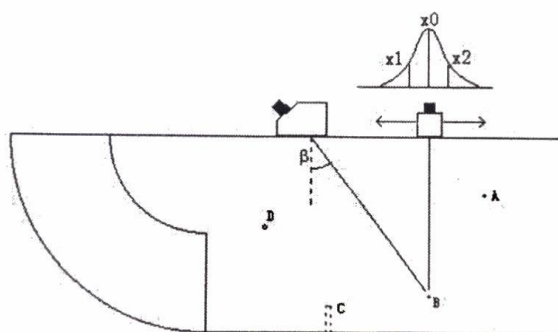


图 16 探头扩散角的测量

对于直探头，分别找到BΦ1通孔对应的回波，移动探头使回波幅度最大，记录该点位置 x_0 及对应回波幅度，然后分别向左右移动探头，使回波幅度减小到最大幅度的一半，记录左边和右边的位置为 x_1, x_2 ，则扩散角为

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{x_2 - x_1}{2L}$$

对于斜探头，首先测出探头折射角 β ，然后利用测量直探头的方法测量，按下式计算斜探头的扩散角

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left[\frac{x_2 - x_1}{2L} \cos^2 \beta \right]$$

4.3.2 直探头探测缺陷深度

对底面回波和缺陷波对应时间（深度）的测量，采用相对测量的方法。

4.3.3 斜探头探测缺陷深度

利用斜探头测量，若测量得到超声波在材料中传播的距离为L，则其深度H和水平距离S为

$$\frac{S}{L} = \cos \beta, \quad \frac{H}{S} = \tan \beta$$

其中 β 为斜探头在被测材料中的折射角。

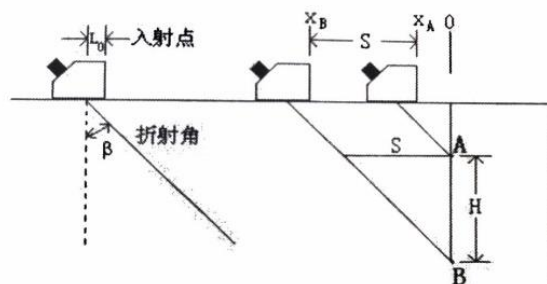


图 18 斜探头参数测量

如图 18，令斜探头先后对正 A, B，测量它们的回波时间 t_A, t_B ，探头前沿到横孔水平距离为 x_A, x_B ，已知它们的深度为 H_A, H_B ，用 CSK-IB 试块画出声束图形，有

$$S = x_B - x_A, \quad H = H_B - H_A, \quad \beta = \tan^{-1} \frac{S}{H}$$

4.3.4 实验任务

- (1) 测量直探头扩散角，利用直探头采用绝对测量方法测量，多次测量取平均值。
- (2) 探测试块中缺陷 C 的深度。
- (3) 探测试块中缺陷 D 的深度和距离试块右边沿的距离。

三、数据处理

1. 测量同轴电缆长度和衰减常数

1.1 断路负载

1.1.1 计算同轴电缆长度及不确定度

数据整理得下表

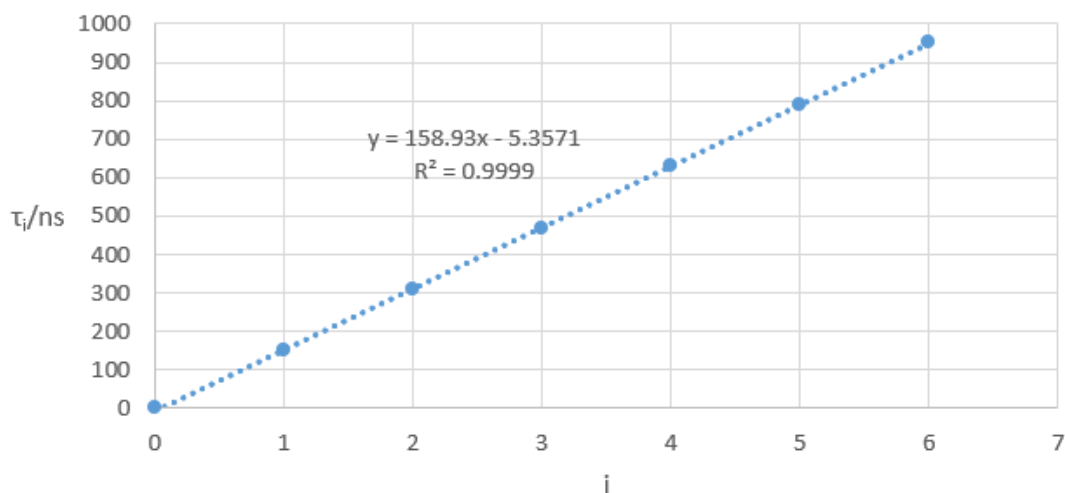
序号 i	0	1	2	3	4	5	6
$V_i(\text{mV})$	x	488	408	328	264	208	176
$\tau_i(\text{ns})$	0	150	310	470	630	790	950
$\ln V_i$	x	6.190	6.011	5.793	5.576	5.338	5.170

由于

$$\tau_i = \frac{L}{u} \cdot i$$

作出 $u \sim i$ 线性拟合图像如图

开路负载时延时 τ_i 与序号 i 的线性拟合图像



得线性回归方程

$$\tau_i = 158.93 \cdot i - 5.3571 \text{ (ns)}$$

其中斜率 $b = 158.93 \text{ ns}$, 相关系数 $r^2 = 0.9999$, 拟合程度较好。

电缆长度

$$L = ub = 2.0 \times 10^8 \times 158.93 \times 10^{-9} = 31.79 \text{ m}$$

下面估算 L 的不确定度。先计算 b 的不确定度, 实验中使用示波器的两条光标测时间, 其中 $\Delta t_{\text{示波器}} = 25 \text{ ns}$, 故

$$\Delta_{b,B} = \sqrt{2} \Delta t_{\text{示波器}} = 35.36 \text{ ns}$$

$$\Delta_{b,A} = t_P(v) S_b = t_P(n-2) b \sqrt{\frac{r^{-2} - 1}{n-2}}$$

其中 $n = 7, t_P(5) = 2.57, r^2 = 0.9999$, 得 $\Delta_{b,A} = 1.83 \text{ ns}$, 可得 b 的不确定度

$$\Delta_b = \sqrt{\Delta_{b,A}^2 + \Delta_{b,B}^2} = 35.41 \text{ ns}$$

由 $L = ub$ 可得 L 的不确定度

$$\Delta_L = u \Delta_b = 7.08 \text{ m}$$

最终结果

$$L = (32 \pm 7) \text{ m}$$

1.1.2 计算吸收系数

吸收系数 α 满足公式

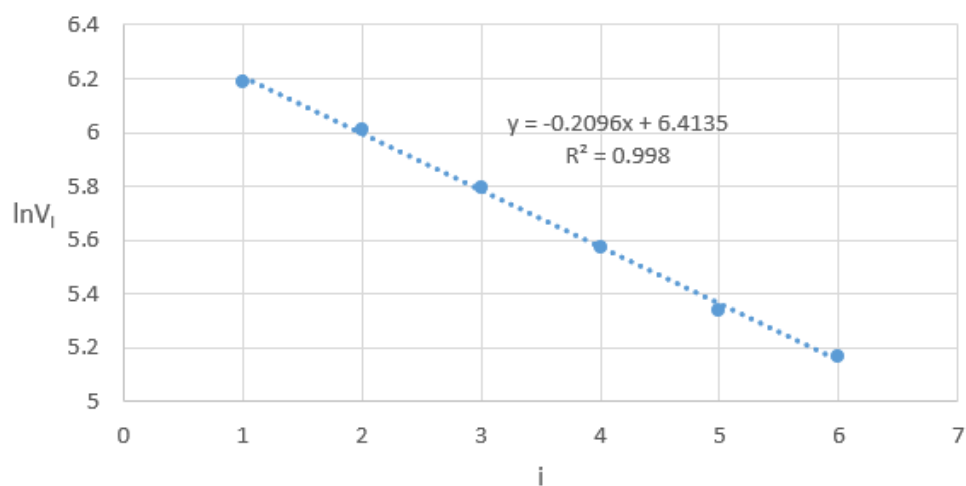
$$V_l = V e^{-\alpha l}$$

两边取对数得

$$\ln V_l = \ln V - \alpha l = \ln V - \alpha L \cdot i$$

作出 $\ln V_l \sim i$ 线性拟合图像如图

断路负载时 $\ln V_l$ 与序号 i 的线性拟合图像



得回归方程

$$\ln V_l = -0.2096 \cdot i + 6.4135$$

对比系数，得吸收系数

$$\alpha = \frac{0.2096}{L} = 6.55 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

1.2 短路负载

数据整理得下表

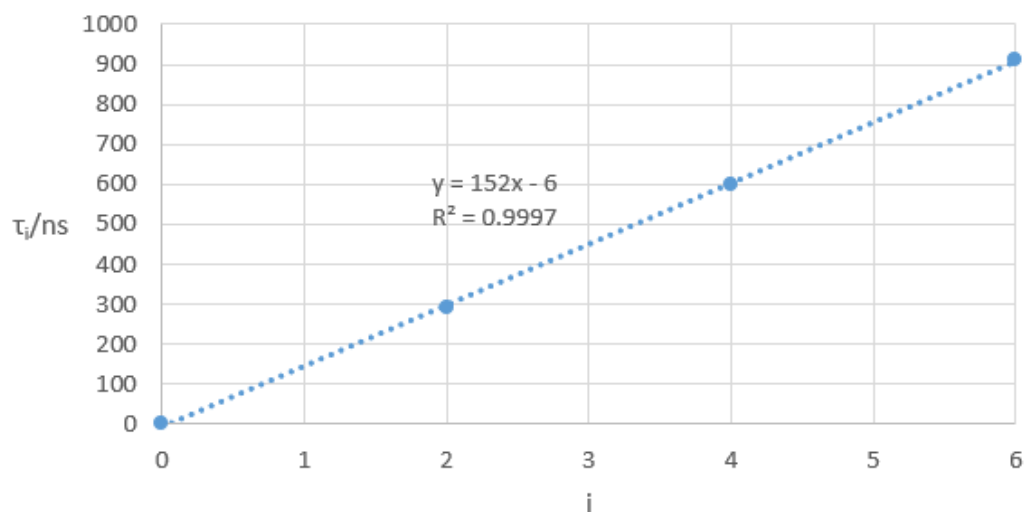
序号 i	0	2	4	6
$V_i(\text{mV})$	x	-384	236	-148
$\tau_i(\text{ns})$	0	290	600	910

同理有

$$\tau_i = \frac{L}{u} \cdot i$$

作出 $u \sim i$ 线性拟合图像如图

短路负载时延时 τ_i 与序号 i 的线性拟合图像



得线性回归方程

$$\tau_i = 152 \cdot i - 6 \text{ (ns)}$$

其中斜率 $b = 152$ ，相关系数 $r^2 = 0.9997$ ，拟合程度较好。对比系数得

$$L = ub = 30.4 \text{ m}$$

下面估算 L 的不确定度。

$$\Delta_{b,B} = \sqrt{2}\Delta t_{\text{示波器}} = 35.36 \text{ ns}$$

$$\Delta_{b,A} = t_P(v)S_b = t_P(n-2)b\sqrt{\frac{r^{-2}-1}{n-2}}$$

其中 $n = 4$, $t_P(2) = 4.30$, $r^2 = 0.9997$ ，得 $\Delta_{b,A} = 8.01 \text{ ns}$ ，可得 b 的不确定度

$$\Delta_b = \sqrt{\Delta_{b,A}^2 + \Delta_{b,B}^2} = 36.26 \text{ ns}$$

由 $L = ub$ 可得 L 的不确定度

$$\Delta_L = u\Delta_b = 7.25 \text{ m}$$

最终结果为

$$L = (30 \pm 7) \text{ m}$$

1.3 匹配负载

整理数据得

$$V_0 = 256 \text{ mV}, V_1 = 240 \text{ mV}$$

$$\tau_{1,1} = 144 \text{ ns}, \tau_{1,2} = 146 \text{ ns}, \tau_{1,3} = 144 \text{ ns}$$

对 τ_1 三次测量结果取平均，得

$$\tau_1 = \frac{1}{3}(\tau_{1,1} + \tau_{1,2} + \tau_{1,3}) = 144.67 \text{ ns}$$

电缆长度

$$L = u\tau_1 = 28.93 \text{ m}$$

下面估算 L 的不确定度。

$$\Delta_{\tau_1,B} = \sqrt{2}\Delta t_{\text{示波器}} = 35.36 \text{ ns}$$

$$\Delta_{\tau_1,A} = \frac{t_P(n-1)S_{\tau_1}}{\sqrt{n}}$$

其中 $n = 3$, $t_P(2) = 4.30$, $S_{\tau_1} = 1.155 \text{ ns}$ ，得 $\Delta_{\tau_1,A} = 2.87 \text{ ns}$ ，可得 τ_1 的不确定度

$$\Delta_{\tau_1} = \sqrt{\Delta_{\tau_1,A}^2 + \Delta_{\tau_1,B}^2} = 36.48 \text{ ns}$$

由 $L = u\tau_1$ 可得 L 的不确定度

$$\Delta_L = u\Delta_{\tau_1} = 7.10 \text{ m}$$

最终结果为

$$L = (29 \pm 7) \text{ m}$$

2. 声速测量

2.1 纵波

示波器仪器误差 $\Delta t_{\text{示波器}} = 0.5 \mu\text{s}$

序号	1	2	3
底面波 $t_H - t_1(\mu\text{s})$	19.2	19.6	19.2

取平均值

$$t_H - t_1 = 19.33 \mu\text{s}$$

纵波声速

$$c_l = \frac{2H}{t_H - t_1} = \frac{2 \times 60.10 \times 10^{-3} \text{ m}}{19.33 \times 10^{-6} \text{ s}} = 6218.31 \text{ m/s}$$

下面计算不确定度。

$$\Delta_{t_H - t_1, B} = \sqrt{2} \Delta t_{\text{示波器}} = 0.71 \mu\text{s}$$

$$\Delta_{t_H - t_1, A} = \frac{t_P(n-1)S_{t_H - t_1}}{\sqrt{n}}$$

其中 $n = 3, t_P(2) = 4.30, S_{t_H - t_1} = 0.231 \mu\text{s}$, 得 $\Delta_{t_H - t_1, A} = 0.57 \mu\text{s}$

$$\Delta_{t_H - t_1} = \sqrt{\Delta_{t_H - t_1, A}^2 + \Delta_{t_H - t_1, B}^2} = 0.91 \mu\text{s}$$

由 $c_l = \frac{2H}{t_H - t_1}$ 可得

$$\Delta_{c_l} = c_l \sqrt{\left(\frac{\Delta_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{t_H - t_1}}{t_H - t_1}\right)^2} = 292.75 \text{ m/s}$$

最终结果为

$$c_l = (6.2 \pm 0.3) \times 10^3 \text{ m/s}$$

2.2 横波

示波器仪器误差 $\Delta t_{\text{示波器}} = 1 \mu\text{s}$

序号	1	2	3
$t_{R_1}(\mu\text{s})$	29.60	29.60	29.60
$t_{R_2}(\mu\text{s})$	48.80	48.40	48.80
$t_{R_2} - t_{R_1}(\mu\text{s})$	19.20	18.80	19.20

取平均值

$$t_{R_2} - t_{R_1} = 19.07 \mu\text{s}$$

横波声速

$$c_s = \frac{2(R_2 - R_1)}{t_{R_2} - t_{R_1}} = 3156.79 \text{ m/s}$$

下面计算不确定度。

$$\Delta_{t_{R_2} - t_{R_1}, B} = \sqrt{2} \Delta t_{\text{示波器}} = 1.41 \mu\text{s}$$

$$\Delta_{t_{R_2} - t_{R_1}, A} = \frac{t_P(n-1)S_{t_{R_2} - t_{R_1}}}{\sqrt{n}}$$

其中 $n = 3, t_P(2) = 4.30, S_{t_{R_2} - t_{R_1}} = 0.231 \mu\text{s}$, 得 $\Delta_{t_{R_2} - t_{R_1}, A} = 0.57 \mu\text{s}$, 则

$$\Delta_{t_{R_2}-t_{R_1}} = \sqrt{\Delta_{t_{R_2}-t_{R_1},A}^2 + \Delta_{t_{R_2}-t_{R_1},B}^2} = 1.52 \mu\text{s}$$

由 $c_s = \frac{2(R_2-R_1)}{t_{R_2}-t_{R_1}}$ 可得

$$\Delta_{c_s} = c_s \sqrt{\left(\frac{\Delta_{R_1}}{R_2-R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{R_2}}{R_2-R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{t_{R_2}-t_{R_1}}}{t_{R_2}-t_{R_1}}\right)^2} = 251.63 \text{ m/s}$$

最终结果

$$c_s = (3.2 \pm 0.3) \times 10^3 \text{ m/s}$$

2.3 计算杨氏模量和 Poisson 系数

先求得比例系数

$$T = \frac{c_l}{c_s} = 1.9698$$

杨氏模量

$$E = \frac{\rho c_s^2 (3T^2 - 4)}{T^2 - 1} = 71.38 \text{ GPa}$$

Poisson 系数

$$\sigma = \frac{T^2 - 2}{2(T^2 - 1)} = 0.3264$$

3. 表面波的实验

示波器仪器误差 $\Delta t_{\text{示波器}} = 2.5 \mu\text{s}$

序号	1	2	3
探头移动距离 L/mm	20	40	60
角度 $^\circ$	65	65	65
表面波移动 $t_b(\mu\text{s})$	14.0	28.0	42.0

计算表面波的波速，取平均值

$$c_R = \frac{2L}{t_b} = \frac{1}{3} \times 2 \left(\frac{20}{14} + \frac{40}{28} + \frac{60}{42} \right) \times 10^3 \text{ m/s} = 2857.14 \text{ m/s}$$

下面计算不确定度。

钢尺 $\Delta_L = 0.5 \text{ mm}$ ，表面波移动 $\Delta_{t_b} = \sqrt{2} \Delta t_{\text{示波器}} = 3.54 \mu\text{s}$

$$\Delta_{c_R} = c_R \sqrt{\left(\frac{\Delta_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{t_b}}{t_b}\right)^2} = 362.99 \text{ m/s}$$

最终结果为

$$c_R = (2.9 \pm 0.4) \times 10^3 \text{ m/s}$$

4. 超声波探测缺陷

4.1 直探头测缺陷 C

序号	1	2	3
底面波 $t_H - t_1(\mu s)$	19.6	19.4	19.2
缺陷波 $t_q - t_1(\mu s)$	14.6	14.6	14.6

缺陷 C 的深度

$$H_C = H \cdot \frac{t_q - t_1}{t_H - t_1} = 60.10 \cdot \frac{1}{3} \left(\frac{14.6}{19.6} + \frac{14.6}{19.4} + \frac{14.6}{19.2} \right) = 45.23 \text{ mm}$$

4.2 斜探头测缺陷 D 的深度

序号	1	2	3	平均
$x_A/t_A \text{ (mm}/\mu\text{s)}$	30.0/26.0	29.0/26.4	29.5/26.0	29.50/26.13
$x_B/t_B \text{ (mm}/\mu\text{s)}$	89.0/52.0	90.0/51.6	89.0/51.6	89.33/51.73
$x_D/t_D \text{ (mm}/\mu\text{s)}$	108/34.8	109/34.4	109/34.8	108.67/34.67

设声速为 u ，入射点距探头右边沿距离为 L_0 。

对 A, B 两孔，由几何关系知

$$\begin{cases} L_A + H_A \tan \beta = L_0 + x_A \\ L_B + (H - H_B) \tan \beta = L_0 + x_B \end{cases}$$

解得

$$\begin{cases} L_0 = 10.39 \text{ mm} \\ \beta = 44.84^\circ \end{cases}$$

对 D 孔，设 D 的深度为 H_D ，距试块右边沿距离为 L_D ，则有

$$\begin{cases} \frac{H_D}{H_A} = \frac{ut_D \cos \beta}{ut_A \cos \beta} = \frac{t_D}{t_A} \\ L_D + H_D \tan \beta = L_0 + x_D \end{cases}$$

解得

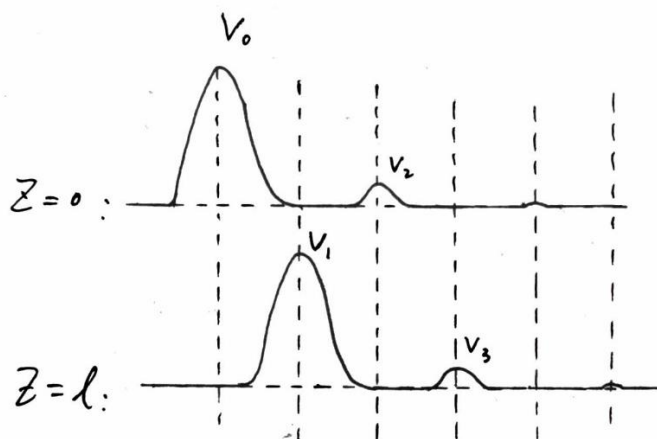
$$\begin{cases} L_D = 92.67 \text{ mm} \\ H_D = 26.54 \text{ mm} \end{cases}$$

即 D 的深度为 26.54 mm，距试块右边沿距离为 92.67 mm。

四、 思考题

(1) 问：若 $Z_l = R_l$ 略大于或略小于 R_0 时，波形是怎样的？

答：波形如图



(2) 问：利用斜探头探测中，如果能得到与被测材料相同材质的试块，并且已知该试块中两个不同深度的横孔的深度，那么不必测量斜探头的延迟、入射点、折射角和声速，就可以确定该缺陷的深度。说明该方法的具体探测过程。

答：设已知横孔 A,B 深度为 H_A, H_B ，未知深度的横孔为 D，令斜探头分别正对 A,B,D，即回波幅度最大，测量得到探头前沿到横孔的水平距离 L_A, L_B, L_D 。即可计算出 D 的深度 H_D 。

计算方法如下，由三角关系，有

$$\tan \beta = \frac{L_0 + L_A}{H_A} = \frac{L_0 + L_B}{H_B} = \frac{L_0 + L_D}{H_D}$$

解得

$$H_D = \frac{(L_D - L_A)H_B - (L_D - L_B)H_A}{L_B - L_A}$$

(3) 问：试利用表面波测量 CSK-IB 试块中 R_2 圆弧的长度

答：将试块倒置，将可变角探头入射角调整为 65 度，并将其放置在圆弧面与上平面交接处，左右移动使其恰好能向圆弧面产生表面波，此时可变角探头的入射点恰好位于圆弧面与平面相切处。测出产生起始波至反射回波的时间 Δt ，利用前面已经测出的表面波波速 c_R ，可得 R_2 圆弧长度为

$$l = \frac{1}{2} c_R \Delta t$$

五、实验小结

- (1) 通过本次实验，我理解了波的反射和透射特性，掌握了阻抗匹配的概念，加深了对横波、纵波以及表面波的理解，掌握了超声波波速的测量方法，理解了超声波探测原理。
- (2) 通过不确定度的计算，提高了数据处理能力。
- (3) 体会到科学研究的严谨性和精确性，认识到实验在科研中的重要作用。
- (4) 感谢老师的详细讲解和耐心指导！

原始数据

1. 传输线中脉冲信号传输和反射的观测

信号延时测量的仪器误差为示波器时间轴一大格的 1/10

$$\Delta t_{\text{示波器}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

同轴电缆输出端状态	信号幅度 $V_i(\text{mV})$	信号延时 $\tau_i(\text{ns})$	波形示意
开路负载	$V_1 =$	$\tau_1 =$	输入端
	$V_2 =$	$\tau_2 =$	
	$V_3 =$	$\tau_3 =$	
	$V_4 =$	$\tau_4 =$	
	$V_5 =$	$\tau_5 =$	输出端
	$V_6 =$	$\tau_6 =$	
短路负载	$V_2 =$	$\tau_2 =$	输入端
	$V_4 =$	$\tau_4 =$	
	$V_6 =$	$\tau_6 =$	输出端
匹配负载	$V_0 =$	$\tau_1 =$	输入端
	$V_1 =$	$\tau_1 =$	
		$\tau_1 =$	输出端

2. 超声波测量（适当调整示波器分度值，估算不确定度）

$$D = 39.40\text{mm}, \quad R_1 = 30.00\text{mm}, \quad R_2 = H = 60.10\text{mm}$$

$$\Delta_H = \Delta_D = \Delta_{R_1} = \Delta_{R_2} = 0.02\text{mm}, \quad \rho = 2700\text{ kg/m}^3$$

	直探头-纵波 $\Delta t_{\text{示波器}} =$	斜探头-横波 $\Delta t_{\text{示波器}} =$			可变探头-表面波 $\Delta t_{\text{示波器}} =$		
	底面波 $t_H - t_1/\mu\text{s}$	$t_{R_1}/\mu\text{s}$	$t_{R_2}/\mu\text{s}$	$\Delta t_R = t_{R_2} - t_{R_1}/\mu\text{s}$	探头位置 或移动距 离 L/mm	角 度 (°)	表面波位 置或移动 $\Delta t_b/\mu\text{s}$
1							
2							
...							

3. 超声波探伤（适当调整示波器分度值）

	直探头-扩散角			直探头测缺陷 C		斜探头测缺陷 D 的深度		
	X0	X1	X2	底面波 $t_H - t_1$	缺陷波 $t_q - t_1$	X_A/T_A	X_B/T_B	X_D/T_D
1								
2								
...								