

# 同轴电缆中电磁波的传输与金属中超声波的 传输 实验报告

计 72 谢兴宇 2017011326

March 2019

## 1 同轴电缆中电磁波的传输

### 1.1 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。

### 1.2 实验仪器

- Tektronix 数字示波器
- TektronixAFG1062 信号信号发生器
- 电阻盒
- 待测长同轴电缆
- 短同轴电缆连接线
- 三通接头
- 阻抗元件（短路负载，匹配负载）

### 1.3 实验任务

测量同轴电缆的长度和衰减常数。

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。

- 断路负载时，计算实验仪中的电缆长度和吸收系数  $\alpha$ 。
- 短路负载时，计算延时  $\tau_2$ ，重复测量三次。
- 匹配负载时，计算延时  $\tau_1$ ，重复测量三次。

### 1.4 数据处理

#### 1.4.1 实验数据整理

$$\Delta t_{\text{示波器}} = 25\text{ns}$$

同轴电缆输出端状态	信号幅度 $V_i(\text{mV})$	信号延迟 $\tau_i(\text{ns})$
开路	$V_1 = 665$	$\tau_1 = 100$
	$V_2 = 512$	$\tau_2 = 210$
	$V_3 = 413$	$\tau_3 = 320$
	$V_4 = 376$	$\tau_4 = 430$
	$V_5 = 269$	$\tau_5 = 550$
	$V_6 = 264$	$\tau_6 = 660$
短路负载	$V_2 = -480$	$\tau_2 = 200$
	$V_4 = 320$	$\tau_4 = 400$
	$V_6 = -216$	$\tau_6 = 610$
匹配负载	$V_0 = 320$	$\tau_1 = 94$
	$V_1 = 288$	$\tau_1 = 88$
		$\tau_1 = 106$

表 1: 传输线中脉冲信号传输和反射的观测

#### 1.4.2 数据处理

##### 1.4.2.1 处理断路负载测量数据

#### 1.4.2.1.1 电缆长度

使用逐差法处理数据, 得到:

- $l'_1 = (\tau_4 - \tau_1)c = 99.0 \text{ m}$
- $l'_2 = (\tau_5 - \tau_2)c = 102.0 \text{ m}$
- $l'_3 = (\tau_6 - \tau_3)c = 102.0 \text{ m}$

$$\bar{l}' = (l'_1 + l'_2 + l'_3)/3 \approx 101 \text{ m}$$

$$\Delta_{l'} = \sqrt{(t_p(v)S_{l'})^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \approx 8.6 \text{ m}, (v = n - 1 = 2)$$

$$\bar{l} = \bar{l}'/3 \approx 33.7 \text{ m}, \Delta_l = \Delta_{l'}/3 \approx 2.9 \text{ m}$$

电缆长度:  $l = (33.7 \pm 2.9) \text{ m}$

#### 1.4.2.1.2 吸收系数

使用逐差法处理数据:

- $\alpha_1 = -\frac{1}{3l} \ln \frac{V_4}{V_1} \approx 0.00188 \text{ m}^{-1}$
- $\alpha_2 = -\frac{1}{3l} \ln \frac{V_5}{V_2} \approx 0.00212 \text{ m}^{-1}$
- $\alpha_3 = -\frac{1}{3l} \ln \frac{V_6}{V_3} \approx 0.00148 \text{ m}^{-1}$

吸收系数:  $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)/3 \approx 0.00183 \text{ m}^{-1}$

#### 1.4.2.2 处理短路负载测量数据

逐差法处理数据:

- $l'_1 = (\tau_6 - \tau_2)c = 123.0 \text{ m}$
- $l'_2 = \tau_4 c = 120.0 \text{ m}$

$$\bar{l}' = (l'_1 + l'_2)/2 = 121.5 \text{ m}$$

$$\Delta_{l'} = \sqrt{(t_p(v)S_{\bar{l}'})^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \approx 20 \text{ m}, (v = n - 1 = 1)$$

$$\bar{l} = \bar{l}'/4 \approx 30 \text{ m}, \Delta_l = \Delta_{l'}/4 \approx 5 \text{ m}$$

电缆长度:  $l = (30 \pm 5) \text{ m}$

#### 1.4.2.3 处理匹配负载测量数据

有三次重复测量:

- $\tau_{1,1} = 94 \text{ ns}, l_1 = 28.2 \text{ m}$
- $\tau_{1,2} = 88 \text{ ns}, l_2 = 26.4 \text{ m}$
- $\tau_{1,3} = 106 \text{ ns}, l_3 = 31.8 \text{ m}$

$$\bar{l} = (l_1 + l_2 + l_3)/3 = 28.8 \text{ m}$$

$$\Delta_l = \sqrt{(t_p(v)S_{\bar{l}})^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \approx 10 \text{ m}, (v = n - 1 = 2)$$

电缆长度:  $l = (28.8 \pm 10.0) \text{ m}$

#### 1.4.3 实验结果

- 断路负载时, 可算得电缆长度  $l = (33.7 \pm 2.9) \text{ m}$ , 吸收系数  $\alpha = 0.00183 \text{ m}^{-1}$ 。
- 短路负载时, 可算得电缆长度  $l = (30 \pm 5) \text{ m}$ 。
- 匹配负载时, 可算得电缆长度  $l = (28.8 \pm 10.0) \text{ m}$ 。

## 1.5 实验小结

仅从以测量电缆长度为目的的角度来看，断路负载时可测得六组信号延迟的数据，使得不确定度较小；短路负载时，由于输出端信号为零，可测得的信号延迟数据减半，不确定度增大；匹配负载时，由于没有反射波，只得反复测量同一信号延迟，不确定度最大。

# 2 金属中超声波的传播

## 2.1 实验目的

掌握超声波波速测量方法，观察声波转换及表面波，了解超声波来探测原理。

## 2.2 实验仪器

超声波试验仪

## 2.3 实验任务

先将超声实验仪上“发射/接受”连接端与超声探头相连接，“检波”连接示波器作为输出。调整衰减器，使输出波形最适用。

### 2.3.1 声速测量

- 利用直探头测量试样中纵波声速  $c_l$ 。在探头和试样表面涂上耦合剂（实验中用水），反复移动探头直至反射回波信号最大。测量起始波与回波的时间  $t_1$ 、 $t_2$ ，利用  $c = \frac{2l}{t_2 - t_1}$  求出纵波声速，计算结果的不确定度。
- 利用  $45^\circ$  斜探头测量试样中横波声速  $c_s$ ，移动探头使信号同时达到最大值，测量回波时间  $t_1$ 、 $t_2$ ，利用  $c = \frac{2l}{t_2 - t_1}$  求出横波声速，计算结果的不确定度。
- 通过测量声速计算试样块的杨氏模量和泊松系数。

### 2.3.2 表面波的实验

可用两种方法测量表面波的波速

- 固定法
- 移动法

### 2.3.3 超声波探测缺陷

- 测量直探头的扩散角，利用直探头，采用绝对测量方法测量；多次测量，求平均值。
- 探测试块中缺陷 C 的深度
- 探测试块中缺陷 D 的深度和距试块右边沿的距离

## 2.4 数据处理

### 2.4.1 实验数据整理

$D = 39.40 \text{ mm}$ ,  $R_1 = 30.00 \text{ mm}$ ,  $R_2 = H = 60.10 \text{ mm}$ ,  $\Delta_H = \Delta_D = \Delta_{R_1} = \Delta_{R_2} = 0.02 \text{ mm}$ ,  $\rho = 2700 \text{ kg m}^{-3}$

	直探头：纵波 ( $\Delta t_{\text{示波器}} = 2.5 \mu\text{s}$ )	斜探头：横波 ( $\Delta t_{\text{示波器}} = 1 \mu\text{s}$ )	可变探头：表面波 ( $\Delta t_{\text{示波器}} = 1 \mu\text{s}$ )		
	底面波 $t_H - t_1$ / $\mu\text{s}$	$\Delta t_r =$ $t_{R_2} - t_{R_1}$ / $\mu\text{s}$	移动距离 $L$ / mm	角度约 ( $^\circ$ )	移动 $\Delta t_b / \mu\text{s}$
1	19	18.8	45	65	30.8
2	19	19.2	46	65	31.6
3	19	19.2	20	65	14.4

表 2: 超声波声速测量

	直探头测缺陷 C		斜探头测量缺陷 D 的深度		
	底面波 $t_H - t_1$ / $\mu\text{s}$	缺陷波 $t_q - t_1$ / $\mu\text{s}$	$X_A / t_A$ ( $\text{mm } \mu\text{s}^{-1}$ )	$X_B / t_B$ ( $\text{mm } \mu\text{s}^{-1}$ )	$X_D / t_D$ ( $\text{mm } \mu\text{s}^{-1}$ )
1	18	14	14.7/22	45.5/58.4	106.1/31.8
2	18	14	21.8/22.4	88.3/50	107.9/31.6
3	18	14	18.0/22.8	85.2/48.8	106.2/30.8

表 3: 超声波探测缺陷

## 2.4.2 数据处理

### 2.4.2.1 测量纵波声速

有三组测量数据:

- $t_H - t_1 = 19 \mu\text{s}$
- $t_H - t_1 = 19 \mu\text{s}$
- $t_H - t_1 = 19 \mu\text{s}$

$$\overline{t_H - t_1} = 19 \mu\text{s}$$

$$c = \frac{2H}{\overline{t_H - t_1}} \approx 6326 \text{ m s}^{-1}$$

下面计算不确定度:

$$\Delta_{t_H - t_1} = \sqrt{(t_p(v)S_{\overline{t_H - t_1}})^2 + \Delta_{\overline{t_H - t_1}}^2} = 2.5 \mu\text{s}$$

$$\ln c = \ln 2 + \ln H - \ln(t_H - t_1), \frac{\partial c}{\partial H} = 1/H, \frac{\partial c}{\partial t_H - t_1} = 1/(t_H - t_1)$$

$$\Delta c = c \sqrt{\left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\overline{t_H - t_1}}}{\overline{t_H - t_1}}\right)^2} \approx 830 \text{ m s}^{-1}$$

纵波声速:  $c_l = (6330 \pm 830) \text{ m s}^{-1}$

### 2.4.2.2 测量横波声速

三组测量数据：

- $t_{R_2} - t_{R_1} = 18.8 \mu\text{s}$
- $t_{R_2} - t_{R_1} = 19.2 \mu\text{s}$
- $t_{R_2} - t_{R_1} = 19.2 \mu\text{s}$

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

$$c = \frac{2(R_2 - R_1)}{\overline{t_{R_2} - t_{R_1}}} = 3157 \text{ m s}^{-1}$$

下面计算不确定度：

$$\Delta_{\overline{t_{R_2} - t_{R_1}}} = \sqrt{(t_p(v) S_{\overline{t_{R_2} - t_{R_1}}})^2 + \Delta t_{\text{示波器}}} = 1.0 \mu\text{s}$$

$$\Delta c = c \sqrt{\left(\frac{\Delta(R_2 - R_1)}{R_2 - R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \overline{t_{R_2} - t_{R_1}}}{\overline{t_{R_2} - t_{R_1}}}\right)^2} \approx 170 \text{ m s}^{-1}$$

横波声速：  $c_s = (3160 \pm 170) \text{ m s}^{-1}$

杨氏模量：  $E = \frac{\rho c_s^2 (3T^2 - 4)}{T^2 - 1} = 71.8 \text{ GPa}$

Poisson 系数：  $\sigma = \frac{T^2 - 2}{2(T^2 - 1)} = 0.33$

### 2.4.2.3 测量表面波声速

利用三组测量数据分别计算  $c_R$ ：

- $c_{R1} \approx 2922.08 \text{ m s}^{-1}$
- $c_{R2} \approx 2911.39 \text{ m s}^{-1}$
- $c_{R3} \approx 2777.78 \text{ m s}^{-1}$

$$c_R = (c_{R1} + c_{R2} + c_{R3})/3 \approx 2870.42 \text{ m s}^{-1}$$

假设钢直尺的不确定度为 0,  $\Delta c_R = c_R \frac{\Delta t_{\text{示波器}}}{\Delta t_b} = 150 \text{ m s}^{-1}$

表面波声速：  $c_R = (2870 \pm 150) \text{ m s}^{-1}$



#### 2.4.2.4 直探头测缺陷深度

利用公式：

$$H_C = H \frac{t_q - t_1}{t_H - t_1} \quad (1)$$

对三组测量数据进行计算，可以得到：

- $H_C = 46.74 \text{ mm}$
- $H_C = 46.74 \text{ mm}$
- $H_C = 46.74 \text{ mm}$

对三组数据取平均值，可以得到缺陷 C 的深度： $H_C = 46.74 \text{ mm}$

#### 2.4.2.5 斜探头测量缺陷的深度

记超声波在被测材料中的折射角为  $\beta$ ，入射点与斜探头边缘的距离为  $L_0$ ，则：

$$\begin{cases} \frac{X_A + L_0 - L_A}{H_A} = \tan \beta \\ \frac{X_B + L_0 - L_B}{H - H_B} = \tan \beta \end{cases}$$

通过上述方程组可以解出  $L_0$  和  $\beta$ 。

设斜探头的延迟为  $t_0$ ，声速为  $c$ ，则：

$$\begin{cases} \frac{t_A - t_0}{2} c \sin \beta = H_A \\ \frac{t_B - t_0}{2} c \sin \beta = H - H_B \end{cases}$$

通过上述方程组可以解出  $c$  和  $t_0$ 。

进而算得 D 的深度  $H_D = \frac{t_D - t_0}{2} c \sin \beta$

将三组测量数据代入，可以算出： $H_D \approx 29.65 \text{ mm}$

#### 2.4.3 实验结果

- 纵波声速： $c_l = (6330 \pm 830) \text{ m s}^{-1}$
- 横波声速： $c_s = (3160 \pm 170) \text{ m s}^{-1}$
- 杨氏模量： $E = \frac{\rho c_s^2 (3T^2 - 4)}{T^2 - 1} = 71.8 \text{ GPa}$
- Poisson 系数： $\sigma = \frac{T^2 - 2}{2(T^2 - 1)} = 0.33$

- 表面波声速:  $c_R = (2870 \pm 150) \text{ m s}^{-1}$
- 缺陷 C 的深度:  $H_C = 46.74 \text{ mm}$
- 缺陷 D 的深度:  $H_D = 29.65 \text{ mm}$

## 2.5 实验小结

超声波在铝中的纵波声速大约是横波声速的 2 倍左右, 表面波声速比横波声速稍慢。

感谢助教的耐心 vidm!

## A 预习报告

### A.1 同轴电缆中电磁波的传输

测量同轴电缆的长度和衰减常数。

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。

- 断路负载时，计算实验仪中的电缆长度和吸收系数  $\alpha$ 。
- 短路负载时，计算延时  $\tau_2$ ，重复测量三次。
- 匹配负载时，计算延时  $\tau_1$ ，重复测量三次。

### A.2 金属中超声波的传输

先将超声实验仪上“发射/接受”连接端与超声探头相连接，“检波”连接示波器作为输出。调整衰减器，使输出波形最适用。

#### A.2.1 声速测量

- 利用直探头测量试样中纵波声速  $c_l$ 。在探头和试样表面涂上耦合剂（实验中用水），反复移动探头直至反射回波信号最大。测量起始波与回波的时间  $t_1$ 、 $t_2$ ，利用  $c = \frac{2l}{t_2 - t_1}$  求出纵波声速，计算结果的不确定度。
- 利用  $45^\circ$  斜探头测量试样中横波声速  $c_s$ ，移动探头使信号同时达到最大值，测量回波时间  $t_1$ 、 $t_2$ ，利用  $c = \frac{2l}{t_2 - t_1}$  求出横波声速，计算结果的不确定度。
- 通过测量声速计算试样块的杨氏模量和泊松系数。

#### A.2.2 表面波的实验

可用两种方法测量表面波的波速

- 固定法
- 移动法

### A.2.3 超声波探测缺陷

- 测量直探头的扩散角，利用直探头，采用绝对测量方法测量；多次测量，求平均值。
- 探测试块中缺陷 C 的深度
- 探测试块中缺陷 D 的深度和距试块右边沿的距离