

清华大学 物理实验报告

班级: 软件 71
姓名: 骆炳君
学号: 2017013573
日期: 2019-5-13

实验名称: 同轴电缆中电磁波的传输与金属中超声波的传输

目 录

一、 实验目的	2
二、 实验原理	2
1. 同轴电缆中电磁波的测量和应用	2
2. 金属中超声波的传输	2
三、 实验仪器	3
四、 实验步骤	3
1. 测量同轴电缆的长度和衰减常数	3
2. 超声波测量	3
3. 超声波探伤	4
五、 数据处理	4
1. 同轴电缆的长度和衰减系数	4
2. 超声波声速和杨氏模量	5
3. 超声波探伤	7
六、 实验小结	8
七、 原始数据表格	9

一、 实验目的

- (1) 学习掌握脉冲波信号的测量方法.
- (2) 学习理解波遇到界面时的反射和透射特性, 入射波与反射波的相位关系.
- (3) 学习掌握超声波波速的测量方法, 观察声波转换和表面波.
- (4) 学习了解超声波探伤的原理.

二、 实验原理

1. 同轴电缆中电磁波的测量和应用

电磁波在同轴电缆的中心导体和屏蔽层之间传输, 是一封闭电路. 高频信号具有集肤效应, 电流只在中心导体的表面流动, 因此电磁场与外界不会相互干扰, 具有良好的屏蔽性.

传输线为一对相隔均匀距离的平行导线或同轴电缆线, 其上的电信号存在随长度变化的空间分布, 负载不匹配时还会有驻波分布.

在上图中, R, L, C, G 分别为单位长度传输线的电阻、电感、电容和电导, $v(z, t)$ 和 $i(z, t)$ 为沿传输线方向的电压和电流信号. 利用电路方程分析单元传输线可得微分方程

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

其中 $\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$, α 和 β 都是和 ω 相关的伪常数. 由微分方程的解和两端的边界条件可得, 在线上任意一点处都有

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

其中 $\Gamma = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0}$, 是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. 若负载 Z_l 是纯电阻性负载, 分以下三种情况:

开路时 $Z_l = R_l = \infty$, $\Gamma = 1$. 电压反射系数最大, 在 $z = l$ 处, 电压最大, 电流最小.

短路时 $Z_l = R_l = 0$, $\Gamma = -1$. 电压反射系数为负, 反射波为反相, 电压、电流驻波分布与开路情况相反.

负载匹配时 $Z_l = R_l = R_0$, $\Gamma = 0$. 电压反射系数为 0, 此时没有反射波, 线路中只有沿 $+z$ 方向的行波.

2. 金属中超声波的传输

超声波在介质中传播有纵波、横波和表面波三种形式. 当超声纵波或横波入射到介质 1 与介质 2 界面上时, 若介质都是固体或其中之一是固体, 在发生反射和折射时, 一般会同时反射或折射出另一种波形, 超声波的这种特性被称为波形转换. 设 θ 为介质 1 中的入射角, c_1 为介质 1 中的波速, c_{2l}, c_{2s} 为介质 2 中纵波和横波的波速, β_s, β_l 分别为介质 2 中纵波和横波的折射角, 根据折射定律有

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

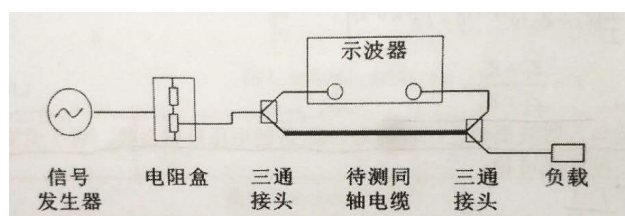
在超声波分析测试中，利用超声波探头产生脉冲超声波，常用的超声波探头有直探头、斜探头和可变角探头。实验中使用的探头工作方式主要为单探头方式，即同一个探头，既用来发射超声，又用来接受超声。

三、 实验仪器

- (1) 数字示波器
- (2) 信号发生器
- (3) 超声波测试仪
- (4) 电阻盒、待测长同轴电缆、短同轴电缆连接线、三通接头、阻抗元件等

四、 实验步骤

1. 测量同轴电缆的长度和衰减常数



根据上图所示的电路连接实验电路，信号发生器选择 40kHz 左右的连续脉冲，信号峰值在 2 至 5V 之间，占空比约为 0.5%，传输线负载端分别选择开路、短路和匹配电阻三种测试方式，利用示波器分别测出输入端和负载端之间的信号波形和相对延时。开路负载时，计算电缆长度和吸收系数 α ，短路负载时，计算延时并重复测量 3 次，匹配负载时，计算延时并重复测量 3 次。分别利用测量结果计算同轴电缆的长度，并估算不确定度。

2. 超声波测量

利用直探头测量纵波声速 c_l 把直探头置于试样上表面，用示波器显示试样底面的反射回波，反复移动探头直至回波信号最大，测量起始波与回波的时间 t_1, t_2 。

利用 45° 斜探头测量横波声速 c_s 把 45° 斜探头置于试样弧形部分的圆心位置，用示波器显示圆弧边界发射回波，移动探头使回波信号达到最大值，测量回波时间 t_1, t_2 。

利用可变角探头测量表面波声速 c_b 将可变角探头的角度调至 65° 左右，采用移动法，先找出起始点的反射回波在示波器时间轴的位置，沿传播方向移动探头，再找出反射回波的第二个位置，测量两者的距离和时间差。

3. 超声波探伤

直探头测量缺陷 C 的深度 将直探头置于缺陷 C 的正上方，确定反射波和缺陷波的位置，测量两者的时间差。

斜探头测量缺陷 D 的深度 移动斜探头使其对正缺陷 A 和 B，测量回波时间 t_A, t_B 和水平距离 x_A, x_B ，确定探头的参数。再测量缺陷 D 的回波时间 t_D 和水平距离 x_D 。

五、 数据处理

1. 同轴电缆的长度和衰减系数

已知电磁波在该电缆中波速 $u = 2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，仪器误差 $\Delta B = 10 \text{ ns}$ 。

开路负载测量长度和吸收系数

使用逐差法计算时间差

$$\delta t_1 = \frac{\tau_4 - \tau_1}{3} = 114.7 \text{ ns}, \delta t_2 = \frac{\tau_5 - \tau_2}{3} = 117.3 \text{ ns}, \delta t_3 = \frac{\tau_6 - \tau_3}{3} = 117.3 \text{ ns}$$

$$\delta t = \frac{\delta t_1 + \delta t_2 + \delta t_3}{3} = 116.4 \text{ ns}$$

电缆长度

$$l = u\delta t = 23.3 \text{ m}$$

δt 的标准偏差

$$S_{\delta t} = \sqrt{\frac{1}{3 \times (3-1)} \sum_{i=1}^3 (\delta t_i - \delta t)^2} = 0.87 \text{ ns}$$

δt 的不确定度

$$\Delta_{\delta t} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{(t_p(2)S_{\delta t})^2 + \Delta_B^2} = 10.68 \text{ ns}$$

l 的不确定度

$$\Delta_l = u\Delta_{\delta t} = 2.1 \text{ m}$$

所以电缆长度的测量结果为 $(23.3 \pm 2.1) \text{ m}$ 。

由公式

$$\alpha = \frac{\ln(V/V_l)}{l}$$

使用逐差法得吸收系数

$$\alpha = \frac{\ln(V_1 V_2 V_3) - \ln(V_4 V_5 V_6)}{9l} = 0.0078 \text{ m}^{-1}$$

短路负载测量长度

$$\delta t_1 = \tau_4 - \tau_2 = 212ns, \delta t_2 = \tau_6 - \tau_4 = 216ns$$

时间差

$$\delta t = \frac{\delta t_1 + \delta t_2}{2} = 214ns$$

电缆长度

$$l = u\delta t/2 = 21.4m$$

 δt 的标准偏差

$$S_{\delta t} = \sqrt{\frac{1}{2 \times (2-1)} \sum_{i=1}^2 (\delta t_i - \delta t)^2} = 2ns$$

 δt 的不确定度

$$\Delta_{\delta t} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{(t_p(1)S_{\delta t})^2 + \Delta_B^2} = 27.32ns$$

 l 的不确定度

$$\Delta_l = u\Delta_{\delta t}/2 = 2.7m$$

所以电缆长度的测量结果为 $(21.4 \pm 2.7)m$.**匹配负载测量长度**

时间差

$$\delta t = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3}{3} = 96.0ns$$

电缆长度

$$l = u\delta t = 19.2m$$

 δt 的标准偏差

$$S_{\delta t} = \sqrt{\frac{1}{3 \times (3-1)} \sum_{i=1}^3 (\tau_i - \delta t)^2} = 2.31ns$$

 δt 的不确定度

$$\Delta_{\delta t} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{(t_p(2)S_{\delta t})^2 + \Delta_B^2} = 14.09ns$$

 l 的不确定度

$$\Delta_l = u\Delta_{\delta t} = 2.8m$$

所以电缆长度的测量结果为 $(19.2 \pm 2.8)m$.**2. 超声波声速和杨氏模量**

已知示波器误差 $\Delta_B = 1\mu s$, $R_1 = 30.00mm$, $R_2 = H = 60.10mm$, $\Delta_H = \Delta_D = \Delta_{R_1} = \Delta_{R_2} = 0.02mm$, $\rho = 2.7 \times 10^3 g \cdot m^{-3}$, $\Delta L = 0.5mm$.

测量纵波声速 c_l

时间差

$$\delta t = \frac{\delta t_1 + \delta t_2 + \delta t_3}{3} = 19.73 \mu s$$

纵波声速

$$c_l = \frac{2H}{\delta t} = 6.092 \times 10^3 m/s$$

 δt 的标准偏差 $S_{\delta t} = 0.133 \mu s$. δt 的不确定度

$$\Delta_{\delta t} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{(t_p(2)S_{\delta t})^2 + \Delta_B^2} = 1.15 \mu s$$

 c_l 的不确定度

$$\Delta_{c_l} = \sqrt{\left(\frac{2H}{\delta t^2} \Delta_{\delta t}\right)^2 + \left(\frac{2}{\delta t} \Delta_H\right)^2} = 355 m/s$$

所以纵波声速的测量结果为 $(6.09 \pm 0.36) \times 10^3 m/s$.**测量横波声速 c_s**

时间差

$$\delta t = \frac{\delta t_1 + \delta t_2 + \delta t_3}{3} = 19.33 \mu s$$

横波声速

$$c_s = \frac{2(R_2 - R_1)}{\delta t} = 3.11 \times 10^3 m/s$$

 δt 的标准偏差 $S_{\delta t} = 0.133 \mu s$. δt 的不确定度

$$\Delta_{\delta t} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{(t_p(2)S_{\delta t})^2 + \Delta_B^2} = 1.15 \mu s$$

 c_s 的不确定度

$$\Delta_{c_s} = \sqrt{\left(\frac{2(R_2 - R_1)}{\delta t^2} \Delta_{\delta t}\right)^2 + \left(\frac{2\sqrt{2}}{\delta t} \Delta_{R_1}\right)^2} = 185 m/s$$

所以横波声速的测量结果为 $(3.11 \pm 0.19) \times 10^3 m/s$.**测量表面波声速 c_b**

计算得到 3 组声速数据

$$c_1 = \frac{2L_1}{\delta t_1} = 2941 m/s, c_2 = \frac{2L_2}{\delta t_2} = 2885 m/s, c_3 = \frac{2L_3}{\delta t_3} = 2907 m/s$$

表面波声速

$$c_b = \frac{c_1 + c_2 + c_3}{3} = 2.91 \times 10^3 m/s$$

 c_1 的不确定度

$$\Delta_{c_1} = \sqrt{\left(\frac{2L_1}{\delta t_1^2} \Delta_{\delta t}\right)^2 + \left(\frac{2}{\delta t_1} \Delta_L\right)^2} = 457 m/s$$

c_2 的不确定度

$$\Delta_{c_2} = \sqrt{\left(\frac{2L_2}{\delta t_2^2} \Delta_{\delta t}\right)^2 + \left(\frac{2}{\delta t_2} \Delta_L\right)^2} = 294m/s$$

c_3 的不确定度

$$\Delta_{c_3} = \sqrt{\left(\frac{2L_3}{\delta t_3^2} \Delta_{\delta t}\right)^2 + \left(\frac{2}{\delta t_3} \Delta_L\right)^2} = 179m/s$$

c 的不确定度

$$\Delta_c = \frac{\sqrt{\Delta_{c_1}^2 + \Delta_{c_2}^2 + \Delta_{c_3}^2}}{3} = 191m/s$$

所以表面波声速的测量结果为 $(2.91 \pm 0.19) \times 10^3 m/s$.

测量杨氏模量 E 和 Poisson 系数 σ

$$T = \frac{c_l}{c_s} = 1.96$$

杨氏模量

$$E = \frac{\rho c_s^2 (3T^2 - 4)}{T^2 - 1} = 69.15 GPa$$

Poisson 系数

$$\sigma = \frac{T^2 - 2}{2(T^2 - 1)} = 0.324$$

3. 超声波探伤

直探头测量缺陷 C 的深度

缺陷 C 的深度

$$H_c = H - \frac{H(t_q - t_l)}{t_H - t_l} = 13.63mm$$

斜探头测量缺陷 D 的位置

已知 $L_A = 20mm$, $L_B = 50mm$, $H_A = 20mm$, $H_B = 10mm$.

设斜探头的延迟为 t_0 , 入射点距其右边缘的距离为 X_0 .

由

$$\sin \beta = \frac{X_0 + X_A - L_A}{c(t_A - t_0)} = \frac{X_0 + X_B - L_B}{c(t_B - t_0)} = \frac{X_0 + X_D - L_D}{c(t_D - t_0)}$$

$$\tan \beta = \frac{X_0 + X_A - L_A}{H_A} = \frac{X_0 + X_B - L_B}{H - H_B} = \frac{X_0 + X_D - L_D}{H_D}$$

整理可得

$$t_0 = 9.47\mu s, X_0 = 6.77mm$$

代入可得缺陷 D 的位置

$$L_D = 92.23mm, H_D = 30.26mm$$

六、 实验小结

本次实验使用了数字示波器，信号发生器、超声波测试仪等精密仪器，如何正确操作仪器和读数是实验操作中颇具挑战性的部分，超声波探伤中的读数和缺陷识别也很考验实验操作和观察能力。在实验过程中暴露了我的很多不足之处，例如对实验原理不够理解，对实验仪器不够熟悉等。感谢助教的悉心指导！

七、 原始数据表格