

波过程实验报告

姓名	班级	学号	课程	指导老师
聂永欣	电气 810	2186113564	高电压工程	刘轩东 杨兰均

1 实验目的

1. 加深对于波在单导线上传播时的折、反射现象以及波的衰减、耦合等概念的理解。
2. 掌握用行波法（匹配法）测量波的衰减系数、耦合系数、传播速度和线路波阻抗等参数的原理和方法。
3. 加深对波在三相传输线中传播时正、负、零序阻抗概念的理解，掌握用行波法对其进行测量的原理。

2 实验原理

2.1 折射系数与反射系数

电缆、架空线等传输线性质的电路，是一种特定形式的分布参数电路，电压（或电流）施加于这种电路时，将表现为电压波（或电流波）的形式。这个电压波在传播的过程中，如果遇到不同的波阻抗，就要发生电磁能量的重新分配，表现为来波转化成两个电压：折射电压和反射电压。折射电压和反射电压的大小分别为来波大小乘以折射系数和反射系数，而折射系数  $\alpha$  和反射系数  $\beta$  分别为：

$$\alpha = \frac{U_{折}}{U_{\lambda}} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$
$$\beta = \frac{U_{反}}{U_{\lambda}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

实际上，导线有电阻，绝缘会产生介质损失，使得波在传递过程中会出现衰减。当导线末端开路时，并非 $U_{末} = 2U_{首}$ ，而是会 $U_{末} = 2\eta U_{首}$ 。其中  $\eta$  为波的衰减系数。

2.2 三相导线电流电压的关系

当波沿无损多导线系统（本实验中为三芯电缆）传播时，A、B、C 各相导线中的电压电流遵循下列关系：

$$u_A = i_A Z_{AA} + i_B Z_{BA} + i_C Z_{CA}$$
$$u_B = i_A Z_{AB} + i_B Z_{BB} + i_C Z_{CB}$$
$$u_C = i_A Z_{AC} + i_B Z_{BC} + i_C Z_{CC}$$

若仅 A 相进波，则 $i_B = i_C = 0$ ，A 相对 B、C 相的耦合系数分别为：

$$K_{AB} = \frac{U_B}{U_A} = \frac{Z_{AB}}{Z_{AA}}$$

$$K_{AC} = \frac{U_C}{U_A} = \frac{Z_{AC}}{Z_{AA}}$$

## 3 实验内容及实验现象

### 3.1 观察印证波在单导线上传播的折、反射现象

#### 3.1.1 实验要求

将调整好的无限长直角波施加在一相电缆的首端，电缆末端分别取开路、短路、接一定阻值的电阻等状态，信号波源则分别选取不同的输出阻抗情况，用示波器观察记录波形，并分析各种情况下电缆的首端、末端和其它点处的电压波形，印证波的传播过程。

#### 3.1.2 实验现象

CH1 接在线路末端，CH2 接在线路 2/3 处，CH3 接在线路 1/3 处，CH4 接在线路首端：



Figure 1 电缆末端开路

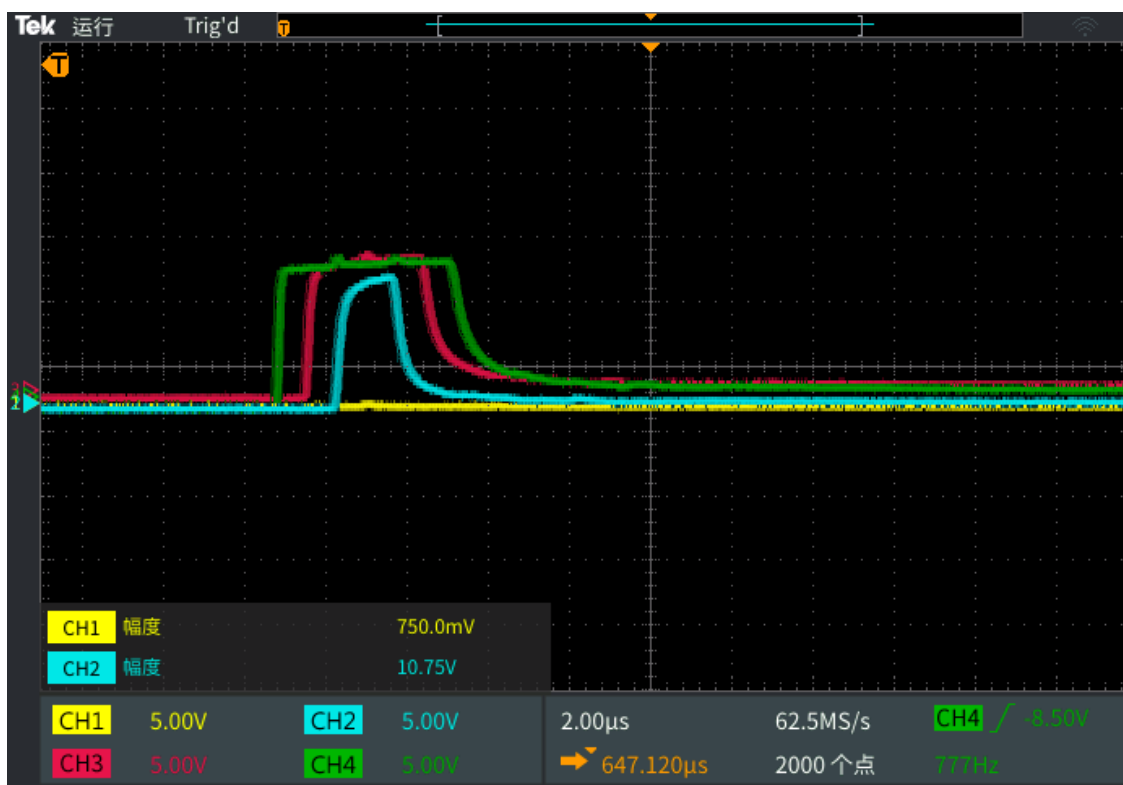


Figure 2 电缆末端短路

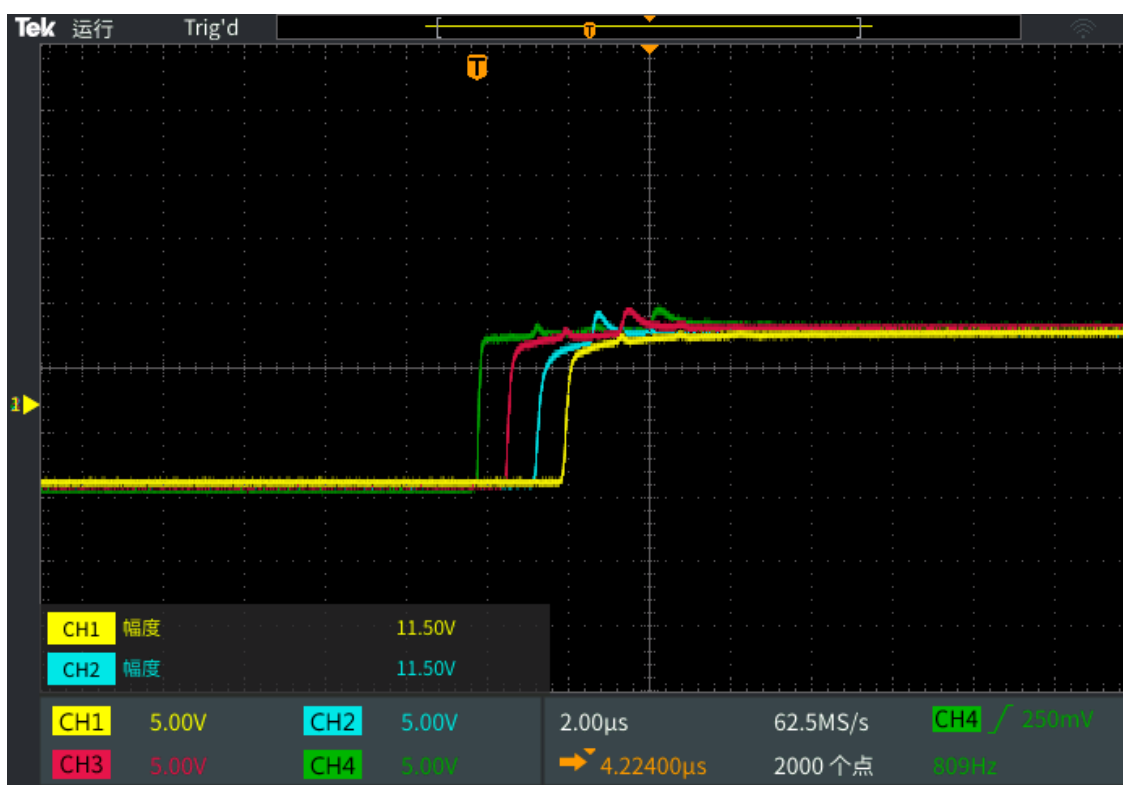


Figure 3 电缆末端接一定阻值电阻（匹配情况 $z_c = 55.4\Omega$ ）

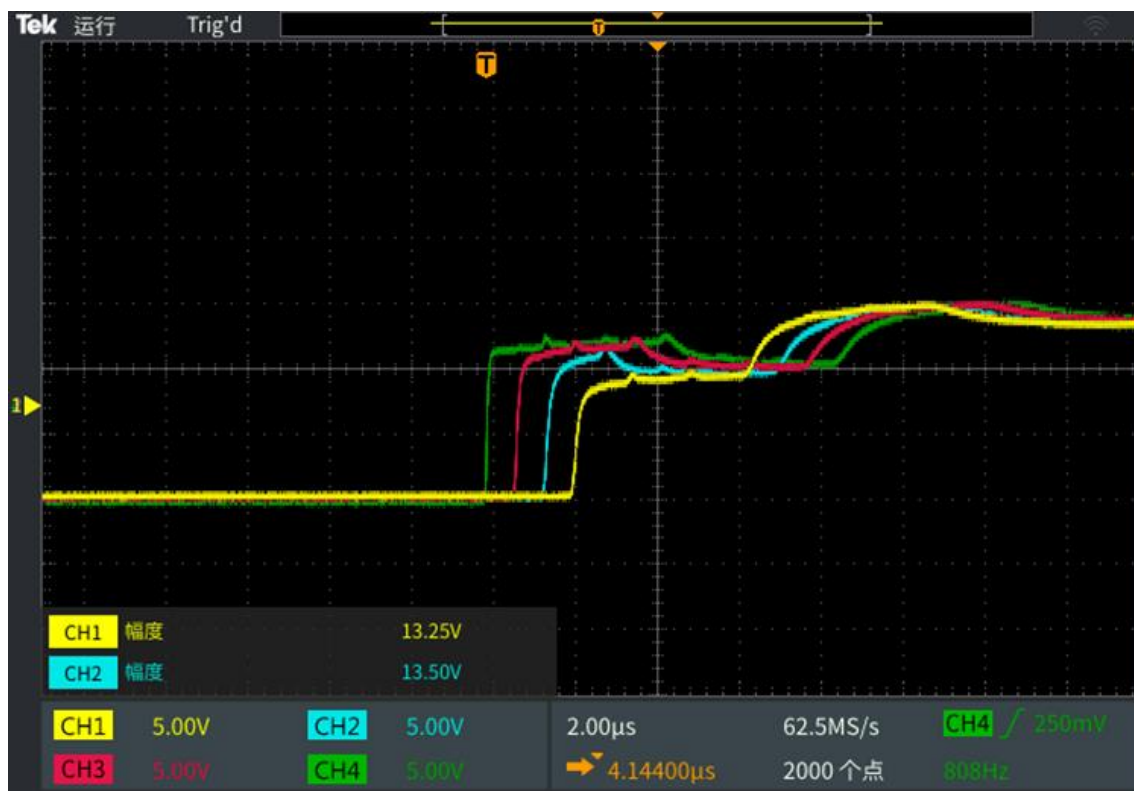


Figure 4 电缆末端接一定阻值电阻（不匹配情况）

### 3.2 衰减系数的测定

对于一相空载电缆，将无限长直角波加在电缆的首端，通过示波器观察该相电缆空载时的首、末端电压，记录其幅值大小。此时电缆的衰减系数为：

$$\eta = \frac{U_{\text{末}}}{2U_{\text{首}}} = \frac{18.8}{2 \times 11} \times 100\% = 85.454\%$$

### 3.3 波阻抗的测定

用行波法测定电缆波阻抗可采用以下方法：

一相电缆首端进波，末端接一个可调电阻（实验中为一金属电阻丝绕制的无感电阻），调整其阻值，直到示波图呈现匹配情况的波形为止。此电阻值即为波阻抗值。

$$Z_C = 55.4\Omega$$

### 3.4 波的传播速度 $v$ 及导线分布参数 $L_0$ 、 $C_0$ 的测定

电缆末端开路（其它情况亦可以），无限长直角波由首端输入后，从示波图上可以读出波往返电缆一次的时间  $T$ （也可读出波行至末端的单程时间  $t$ ）。

则波速为：（式中  $l=330m$ ，本实验电缆长度）

$$v = \frac{l}{\Delta t} = \frac{2 \times 330m}{4\mu s} = 1.65 \times 10^8 m/s$$

可求出电缆的参数

$$C_0 = \frac{1}{vZ_C} = \frac{1}{1.65 \times 10^8 \times 55.4} = 1.09397 \times 10^{-10} C$$

$$L_0 = \frac{Z_C}{v} = \frac{55.4}{1.65 \times 10^8} = 3.35758 \times 10^{-7} H$$

### 3.5 耦合系数的测定

由于耦合作用，导线上的行波会影响附近其它导线上的电压波，其影响的程度可用耦合系数来表征。

对于空载的三相电缆（A、B、C 三相），若只有一相（例如 A 相）进波时，另外二相上也会有波形。同时测量每一相电缆首端（或末端）的电压  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ ，实验现象如下，

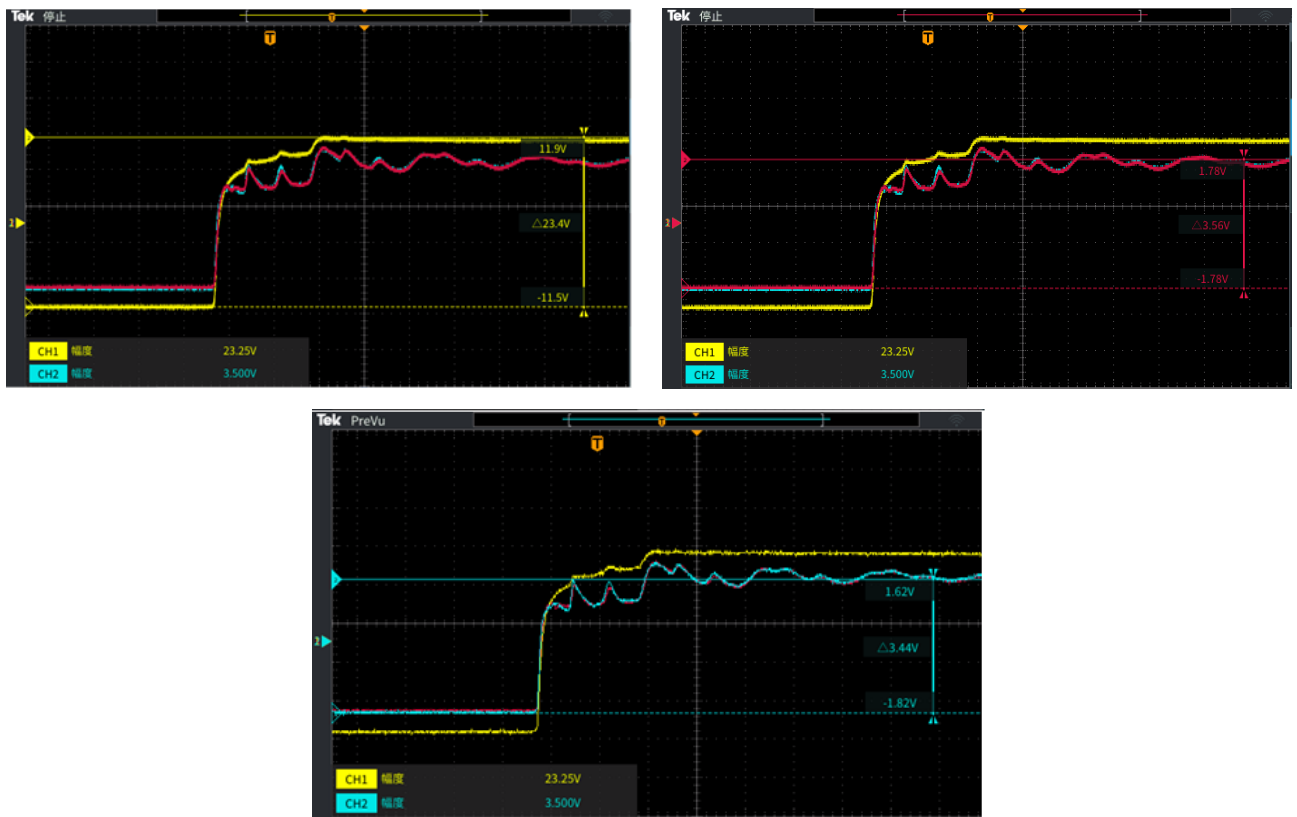


Figure 5 耦合系数的测定波形图（CH1 为进波相，CH2、CH3 为其他两相）

根据耦合系数的定义：

$$K_{AB} = \frac{U_B}{U_A} = \frac{3.56}{23.4} = 0.152137$$

$$K_{AC} = \frac{U_C}{U_A} = \frac{3.44}{23.4} = 0.147009$$

## 3.6 正序、负序、零序阻抗的测定

### 3.6.1 正序阻抗 ( $Z_1$ )

三相电缆末端 A、B 两相短接而 C 相开路，无限长直角波从 A 相首端进波，在 B 相首端接一个可变电阻，调节其大小，直到匹配。此电阻值即为正序阻抗值  $Z_1$ 。

对于对称的 A-B-C 三相电缆，可以认为其各相的自阻抗相等，即  $Z_{AA}=Z_{BB}=Z_{CC}=Z_S$ ，同时各相间的互阻抗也认为相等，即  $Z_{AB}=Z_{BA}=Z_{AC}=\dots=Z_M$ ，根据正序阻抗的定义，当三相电缆中流过正序电流时，

$$u_A = i_A Z_{AA} + i_B Z_{BA} + i_C Z_{CA} = Z_M (i_C + i_B) + i_A Z_S = i_A (Z_S - Z_M)$$

此时，线路中表现出的阻抗即是正序阻抗  $Z_1 = Z_A = \frac{u_A}{i_A} = Z_S - Z_M$

而按照本实验中测量正序阻抗所用的电路， $i_B = -i_A, i_C = 0$ ，则

$$u_A = i_A Z_S + i_B Z_M + i_C Z_M = Z_M (-i_A) + i_A Z_S = i_A (Z_S - Z_M)$$

可以看出，这时 A 相表现出的阻抗值。这时线路中虽然流过的电流不是正序电流，但其表现出来的阻抗值，在数值上刚好等于线路的正序阻抗值。

在本实验中使用行波法测量正序阻抗值：A 相首端进单相波，在电缆的末端，也就是 B 相的首端接入可调无感电阻  $R_1$ ，调节大小直到匹配，此时的应该有  $R_1=Z_1$ 。如图 6 所示。

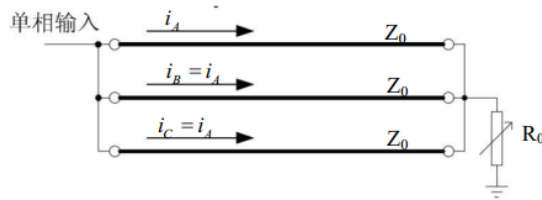


Figure 6 三相线路灵虚阻抗测量示意图

$$Z_1 = 52.6\Omega$$

### 3.6.2 负序阻抗 ( $Z_2$ )

三相电缆为对称电路， $Z_2=Z_1$ 。

$$Z_2 = 52.6\Omega$$

### 3.6.3 零序阻抗 ( $Z_0$ )

电缆的首端和末端分别三相短接，无限长直角波由首端进波，因三相电缆是对称的，所以三相电流应该完全相同，即相当于流过了一组零序，所以，此时线路中表现出的阻抗，即是零序阻抗。可使用行波法测量线路这时的阻抗：短接的三相首端进单相波，在三相短接的

线路末端接入一无感可变电阻  $R_0$ ，调节大小直至达到匹配，此时电阻值  $R_0$  应为零序阻抗的三分之一，即  $R_0 = Z_0$ ，如图 7 所示。

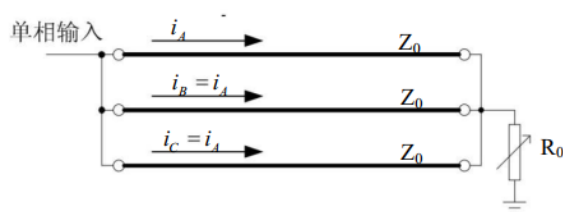


Figure 7 三相线路零序阻抗测量示意图

$$Z_3 = 3R_0 = 3 \times 20.8\Omega = 62.4\Omega$$

### 3.7 误差分析

1. 电路各处的引出端对于实验有较大影响；
2. 滑动变阻器不够标准，有较大测量误差；
3. 示波器光标没有对准产生的读书误差；
4. 利用匹配法得到的阻抗值精准度有限。

## 4 思考问题

1. 本实验的内容仅限于无限长直角波电压在均匀电缆中波过程的情况，对于有限长或者非直角波信号，其波过程情况将会如何？如果电缆不是均匀的，其波过程情况又将如何？

对任何波形均满足反射系数和折射系数公式，均按照其规律叠加。对于有限长信号，可能出现电压波反射过程未结束，入射波就结束的情况；对于非直角波，仍按照折反射规律与波形叠加规律进行作用。如果电缆分布不均匀，分布参数不相等，从而使波形发生畸变。此外，也会使波速不为恒值

2. 本实验中观察测量的都是电缆上的电压波，这时电缆上的电流波又是怎样的情况？

根据电流波的定义，入射波  $i_{1f} = \frac{u_{1f}}{Z}$ ，反射波  $i_{1b} = -\frac{u_{1b}}{Z}$ （若波阻抗为阻性）。末端接一定

阻值的负载时， $i_f$ ， $u_f$ 同相不同幅， $i_b$ 与 $u_b$ 反相，且幅值不同；末端开路， $i_{1b} = -i_{1f}$ ，末端电流抵消为 0；末端短路， $i_{1b} = i_{1f}$ ，末端电流翻倍（如不考虑衰减系数）。

3. 本实验中采用行波法测量电缆波阻抗时均是在电缆末端连接可调无感电阻，若将该可调无感电阻连接在电缆的首端或者其它位置，是否也能完成测量任务？

假设将电阻接在电缆上任意位置，测量两端电路，由彼得逊法则，知道  $Z_1$ ， $Z_2$  比例关系后，可根据  $u_R = \frac{2\eta' u_{\text{首}}}{Z_c + R} R$  求得波阻抗，故可完成测量任务。

4. 本实验所用的信号电源是低压方波源，若改用工频电源，实验结果将会怎样？

工频电源可近似等效为无限多个不同幅值的低压方波源叠加而成，故实验结果可近似认

为是无限个常规实验结果的叠加。

短路：电压波与电流波为驻波，相位相差 90 度；

开路：电压波和电流波为驻波，但与短路时波形的波腹波节点位置不同；

阻抗匹配：线路上无反射波，均为行波；

一般阻抗：电压电流为行驻波状态。