

实验五 电缆中的波过程

预习内容:

1. 波在单导线系统中传播的理论, 包括波的折反射、波速、耦合及波阻抗等概念。
2. 三相电路正序、负序、零序的概念。
3. TDS2000 系列和 DPO2000 系列示波器的操作使用方法 (实验室提供 TDS2000 系列示波器操作教学视频)。

一. 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。

二. 实验内容与实验方法

1. 观察印证波在单导线上传播的折、反射现象

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。

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:

$$\eta = \frac{U_{\text{末}}}{2U_{\text{首}}}$$

3. 波阻抗的测定

用行波法测定电缆波阻抗可采用以下两种方法:

1) 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。

2) 一相电缆首端进波, 电缆末端接一个与波阻抗值相差不大的电阻 R , 利用示波图测出电阻上的电压 U_R 和导线首端的电压 $U_{\text{首}}$, 考虑到电缆的衰

减系数 η ，根据彼得逊法则，

$$U_R = \frac{2\eta U_{\text{首}}}{Z_C + R} \times R$$

即可解出波阻抗 Z_C 。

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： $v = \frac{2l}{T}$ （式中 $l = 330\text{m}$ ，本实验电缆长度）

$$\text{又, } Z_C = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

可求出电缆的参数 L_0 、 C_0 （请注意：此处 L_0 、 C_0 的定义是电缆在单位长度上的电感和电容）。

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 ，根据耦合系数的定义，

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

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

另外，根据 $K_{AB} = \frac{U_B}{U_A} = \frac{Z_{AB}}{Z_{AA}}$ 和 $K_{AC} = \frac{U_C}{U_A} = \frac{Z_{AC}}{Z_{AA}}$ ，在已知 Z_{AA} 时，还可

求出电缆相间的互阻抗 Z_{AB} 和 Z_{AC} 。

6. 正序、负序、零序阻抗的测定

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 。

因为，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，

$$\begin{aligned} u_A &= i_A Z_{AA} + i_B Z_{BA} + i_C Z_{CA} \\ &= i_A Z_S + (i_B + i_C) Z_M \\ &= i_A Z_S - i_A Z_M \\ &= i_A (Z_S - Z_M) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} u_A &= i_A Z_S + i_B Z_M + i_C Z_M \\ &= i_A Z_S + (-i_A) Z_M \\ &= i_A (Z_S - Z_M) \end{aligned}$$

可以看出，这时 A 相表现出的阻抗值 $Z_A = \frac{u_A}{i_A} = Z_S - Z_M = Z_1$ 。也就是说，

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。

但是，这个正序阻抗值是多少呢？可以使用多种办法来进行测量，例如伏安法，即入口电压除以入口电流的方法。在本实验中推荐使用行波法：A 相首端进单相波，在电缆的末端，也就是 B 相的首端接入一可调无感电阻 R_1 ，调节大小直到匹配，此时的应该有 $R_1 = Z_1$ 。如图 5-1 所示。

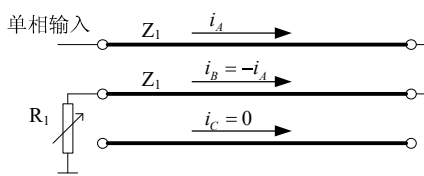


图 5-1 三相线路正序阻抗测量示意图

2) 负序阻抗 (Z_2)

三相电缆为对称电路， $Z_2 = Z_1$ 。

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 $Z_0 = 3R_0$ 。如图 5-2 所示意。

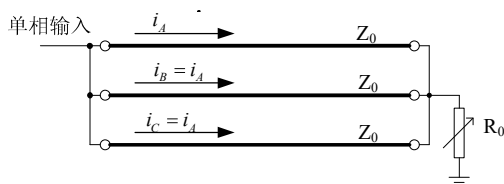


图 5-2 三相线路零序阻抗测量示意图

三. 实验说明

1. 实验装置和接线图

本实验的多导线系统为全长 330m 的三芯屏蔽电缆，实验波源由低压方波发生器产生一串连续的方波，在方波的频率较低时，可近似地看作无限长直角波。导线上各点波形由 TDS2014 型示波器观察测量。实验线路示意图如图 5-3 所示。

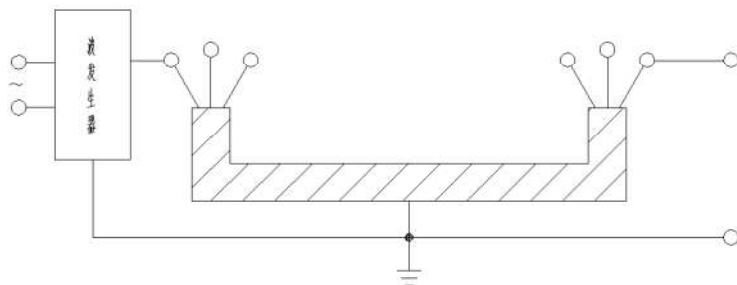


图 5-3 实验线路示意图

2. 基本原理

1) 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 α 和反射系数 β 分别为：

$$\alpha = \frac{U_{\text{折}}}{U_{\text{入}}} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$\beta = \frac{U_{\text{反}}}{U_{\text{入}}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

实际上，导线有电阻，绝缘有介质损失，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 η 为波的衰减系数。

2) 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：

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

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

四. 注意事项

1. 测量前应首先检查方波发生器、电缆外皮及示波器外壳地线连接是否良好，并调整方波发生器发出的波形。本实验所用方波的波头上升时间小于 100ns。

2. 在测定各数据之前，必须掌握实验所用的低压方波发生器和示波器的正确使用方法。

3. 在用匹配法测定电缆波阻抗之前，应仔细研究电缆在各种非匹配负载下的波形图，使得调节电阻的过程心中有数。

4. 测量过程中，电压幅值的读取应基于对所测电压波形的了解：电缆上各点不同时刻的电压值是不同的，应该依据测量要求，读取电压波形相应时刻的幅值。

5. 三相电缆的正、负、零序阻抗与各相自阻抗、相与相间互阻抗之间，具有如下的数量关系：

$$Z_1 = Z_2 = Z_S - Z_M$$

$$Z_0 = Z_S + 2Z_M$$

而各相间耦合系数 $K = \frac{Z_M}{Z_S}$ ，由此算得的 Z_1 、 Z_2 和 Z_0 ，应与实验测得的

相应阻抗值基本一致。

五. 实验报告

1. 根据实验结果，得出要求测定的各项参数。

*2. 试对测量结果进行误差分析。

六. 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？

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？

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？

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？