

# 同轴电缆的时域反射技术及其在工程中的应用

汤立群<sup>1</sup>, 陶肖明<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 交通学院, 广东 广州 510640; 2. 香港理工大学)

**摘要:** 通过研究阶跃电压信号因电缆的阻抗变化而引起的的反射规律, 推导出了在多个强间断变化阻抗的情况下, 阻抗的相对变化量与反射电压的关系, 以及同轴电缆几何尺寸变化与电缆传输阻抗之间的关系. 指出在小变形的假设下, 它们之间存在着理想的线性关系. 同时, 举例说明了同轴电缆的时域反射技术在交通工程中的应用.

**关键词:** 同轴电缆; 时域反射; 边坡滑坡

中图分类号: O 348 文献标识码: A 文章编号: 1000-565X(2000)06-0069-05

通过时域反射技术(Time Domain Reflectometry, 简称 TDR), 同轴电缆已被大量应用于安全和环境变化的监测. ANDREWS<sup>[1]</sup>指出同轴电缆时域反射技术的应用, 最早可追溯到1931年, Rohrig 将它应用于电话线的损坏检测. 从此它被大量应用到电缆本身的损坏检测<sup>2,3]</sup>, 监测岩石、矿井表面和边坡的移动<sup>4]</sup>, 或者水成分及其导电性的监测<sup>5~9]</sup>以及部分类似同轴电缆的构件(如管道)的变形监测<sup>7]</sup>. ANDREWS 曾对同轴电缆的 TDR 技术应用进行了详细的综述. 同轴电缆 TDR 原理的介绍还可参考文献[8].

本文中重点探讨同轴电缆本身作为一个监测器的情形. 通过分析一个阶跃电压信号在同轴电缆中的传播和反射特性, 建立监测信号(反射电压)和电缆的特征阻抗变化量之间的关系; 而同轴电缆本身的几何尺寸的变化, 又会影响电缆的特征阻抗的变化, 因此通过监测同轴电缆的反射信号, 可以进行监测同轴电缆的几何变化.

## 1 电压在电缆中的传输与反射

### 1.1 传输基本控制方程

电压和电流在电缆中的传播控制方程为<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} C \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial x} + GU &= 0 \\ L \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + RI &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $C$ 、 $L$ 、 $R$  和  $G$  分别表示电缆中单位长度的分布电容、电感、电阻和漏电电导;  $t$  是时间;  $x$  是沿电缆轴向的坐标. 此外对于传输电缆还有两个重要的物理量: 一是特征阻抗  $Z$ , 二是传播速度  $c$ . 它们定义如下:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{且} \quad c = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2)$$

收稿日期: 2000-01-15

作者简介: 汤立群(1966-), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构动力学和材料本构关系方面的研究.

## 1.2 无损耗电缆

在很多情况下(如电压信号在电缆中的传播距离很短),电缆可以看作是无损耗电缆,即电缆的电阻和漏电电导可视为零<sup>[10]</sup>,亦即 $R=G=0$ .因此控制方程变为

$$\begin{aligned} C \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial x} &= 0 \\ L \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

显然,方程(3)表明,电压和电流在无损耗电缆中是以波动的方式传播的.

## 1.3 电压信号在阻抗强间断面的反射

在某一段电缆中,如果 $L$ 和 $C$ 是常数,方程(3)的通解为<sup>[9]</sup>

$$\begin{aligned} U(x, t) &= f_1(x-ct) + f_2(x+ct) \\ I(x, t) &= \frac{1}{Z} (f_1(x-ct) - f_2(x+ct)) \end{aligned} \quad (4)$$

对于右行波:

$$Z = U/I \quad (5)$$

对于左行波:

$$Z = -U/I \quad (6)$$

如果电缆的阻抗在某个截面从 $Z_0$ 变化到 $Z_1$ ,然后又又在另一个截面变化到 $Z_2$ ,则入射波将在这些截面发生反射与透射(见图1).反射和透射波将 $(x, t)$ 平面分为若干个区域(以0~4表示).在这些区域中的电压和电流分布以相应的角标表示.

假定阻抗的变化不影响波速的变化,在各个区域内反射和透射波将为 $(x, t)$ 平面内的直线.在区域1内,因为无扰动, $U_1=I_1=0$ .在区域2内,电压可以从0区经过一个左行波作用产生,也可以看作从1区经过一个右行波作用产生.假设左行波为 $U^-$ ,右行波为 $U^+$ ,则有

$$\begin{aligned} U_2 &= U_0 + U^- = U_1 + U^+ \\ I_2 &= I_0 + \left(-\frac{U^-}{Z_0}\right) = I_1 + \left(\frac{U^+}{Z_1}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

因此,同理可得出其他区域的解:

$$\begin{aligned} U_2 &= \frac{2Z_1}{Z_0 + Z_1} U_0 \\ U_3 &= \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_0 + Z_1)(Z_1 + Z_2)} U_0 \\ U_4 &= \frac{2Z_1^3 + 6Z_0 Z_1 Z_2 + 2Z_1^2 Z_2 - 2Z_1^2 Z_0}{(Z_0 + Z_1)^2 (Z_1 + Z_2)} U_0 \end{aligned} \quad (8)$$

因为 $U_2$ 和 $U_4$ 是可测量的,从而可推导出 $Z_1$ 和 $Z_2$ .此外,方程(8)还可表示为增量的形式,

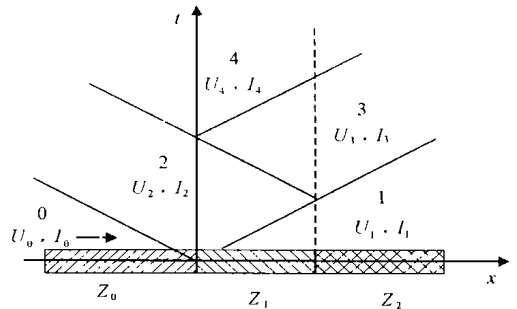


图1 阶跃波在阻抗强间断面的反射

Fig. 1 Step wave reflection at locations of strong discontinuity in impedance

对于  $Z_1$ :

$$\frac{U_2 - U_0}{U_0} = \frac{\Delta U_1}{U_0} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} = \frac{\Delta Z_1}{2Z_0 + \Delta Z_1} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta Z_1}{Z_0} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta Z_1}{Z_0}\right) \quad (9)$$

若  $|\Delta Z_1| \ll |Z_0|$ , 则方程 (9) 可简化为

$$\frac{\Delta U_1}{U_0} : \frac{\Delta Z_1}{Z_0} = \frac{1}{2} \quad (10)$$

对于  $Z_2$ :

$$\frac{U_4 - U_0}{U_0} = \frac{4Z_0 Z_1 (Z_2 - Z_1) + (Z_0 + Z_1)(Z_1 + Z_2)(Z_1 - Z_0)}{(Z_0 + Z_1)^2 (Z_1 + Z_2)} \quad (11)$$

若  $|Z_1 - Z_0|$  和  $|Z_2 - Z_0| \ll |Z_0|$ , 则方程 (11) 可简化为

$$\frac{U_4 - U_0}{U_0} = \frac{\Delta U_2}{U_0} \approx \frac{4Z_0^2 (Z_2 - Z_0)}{8Z_0^3} = \frac{Z_2 - Z_0}{2Z_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z_2}{Z_0} \quad (12)$$

即

$$\frac{\Delta U_2}{U_0} : \frac{\Delta Z_2}{Z_0} = \frac{1}{2} \quad (13)$$

显然在反射电压的相对变化量  $\Delta U/U_0$  和阻抗的相对变化量  $\Delta Z/Z_0$  之间存在理想线性关系:

$$k_{vz} = \frac{\Delta U}{U_0} : \frac{\Delta Z}{Z_0} = \frac{1}{2} \quad (14)$$

这为通过测定反射波来确定阻抗的变化提供了很好的方法.

## 2 几何变形引起的特征阻抗变化

### 2.1 同轴电缆的特征阻抗

对于一根理想的同轴电缆, 假设逐渐绝缘圆柱体的内外半径分别为  $R_0$  和  $r_0$ , 则它的分布电容  $C_0$ 、电感  $L_0$  有如下的形式<sup>[1]</sup>:

$$C = C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_0/R_0)} \quad (15)$$

$$L = L_0 = \frac{\mu}{2\pi} \ln(r_0/R_0)$$

式中,  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ , 是电缆绝缘材料的绝对介电常数,  $\epsilon_0$  为真空时的介电常数,  $\epsilon_r$  为相对介电常数;  $\mu = \mu_r \mu_0$ , 是绝对磁导率,  $\mu_0$  为真空时的磁导率,  $\mu_r$  为相对磁导率. 则它的阻抗  $Z_0$  和传播波速  $c_0$  为

$$Z = Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\ln(r_0/R_0)}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (16)$$

$$c = c_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon\mu}}$$

### 2.2 几何变形导致的阻抗变化

显然, 如果同轴电缆的半径  $R_0$  和  $r_0$  发生变化, 则特征阻抗将相应发生变化. 若假定电缆的几何变化对材料介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  的影响可以忽略(小变形时, 可以成立), 则传播波速  $c$  保持常数. 这说明了以上电压反射分析中, 关于波速不变的假设是可行的.

当电缆被埋入岩石或土壤中作为监测器时, 由于实际电缆的变形较为复杂, 则较难推导

出复杂应变与特征阻抗之间的关系. 这里, 考虑一个特殊应变场, 即假定同轴电缆只被作用一个轴线应变  $e_0$ , 且绝缘体可以看作弹性材料, 其泊松比为  $\nu$ . 当且  $|e_0| \ll 1$  时, 应用弹性力学理论, 可以得到阻抗的相对变化率与应变  $e_0$  之间的关系为

$$\frac{\Delta Z}{Z_0} = - \frac{\nu(r_0^2 - R_0^2)}{((1-2\nu)R_0^2 + r_0^2)\ln(r_0/R_0)} e_0 \tag{17}$$

### 3 工程应用

#### 3.1 同轴电缆的 TDR 系统

一个简单同轴电缆的 TDR 监测系统如图 2 所示, 它包含一个时域反射器 TDR 和一根同轴电缆. 其中时域反射器包含一个高速的采样系统和一个阶跃信号发生器. 其工作的基本原理是: 时域发生器产生一个阶跃电压在同轴电缆中传播, 当同轴电缆的特征阻抗发生间断变化时, 将有电压信号从间断处反射回来, 而反射信号由高速采样系统记录下来; 通过分析反射信号, 从而确定阻抗变化的特点, 进而分析同轴电缆的变化特点.

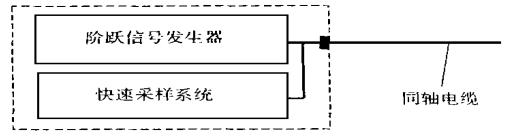


图 2 TDR 系统  
Fig. 2 TDR system

#### 3.2 边坡滑移的监测

同轴电缆的 TDR 技术在交通土建工程中的一个重要应用是道路边坡的安全监测. 将同轴电缆埋入边坡内(图 3), 当边坡发生滑移时, 会使同轴电缆发生剪切变形, 从而使同轴电缆的阻抗发生变化, 通过时域发生器将监测到带一个尖峰的反射信号(如图 4), 通过分析该信号不但可以定性监测滑移的类型, 而且还可以由反射时间判断滑移的位置.

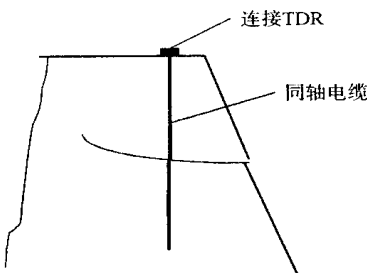


图 3 边坡滑移监测

Fig. 3 Landslide monitoring

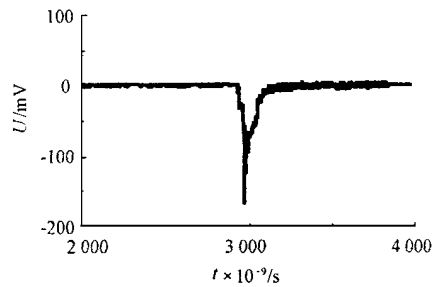


图 4 剪切变形的反射波形

Fig. 4 Reflective wave under shear deformation

### 4 结束语

(1) 通过分析同轴电缆中电压传输和反射(因电缆阻抗变化)问题, 在阻抗为强间断情况下, 初步揭示了反射电压和阻抗变化之间的关系, 即当阻抗变化较小时, 二者之间存在理想的线性关系. 同时指出了电缆几何变化对特征阻抗变化的影响, 从而分析了同轴电缆的时域反射技术的基本原理, 给出了工程应用的例子.

(2)存在的大量问题有待深入地研究,如特征阻抗变化为非强间断时,反射电压和阻抗变化之间的关系;阻抗变化和同轴电缆的应变场的关系等。

参考文献:

- [ 1 ] ANDREWS J R. Time domain reflectometry [ A ] . Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications [ C ] . 1994. 4—13.
- [ 2 ] VAN BIESEN L P, RENNEBOOG J, BAREL A R F. High accuracy location of faults on electrical lines using digital signal processing [ J ] . IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1990 (39): 175—179.
- [ 3 ] PINTELON R, VAN BIESEN L P. Identification of transfer functions with time delay and its application to cable fault location [ J ] . IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1990(39): 479—484.
- [ 4 ] AIMONE-MARTIN C T, ORACECZ K I, NYTRA T K. TDR calibration for quantifying rock mass deformation at the WIPP site, Carlsbad, NM [ A ] . Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications [ C ] . 1994. 507—517.
- [ 5 ] ROTH K, SCHULIN R, FLUHLER H, et al. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach [ J ] . Water Resources Research, 1990 (26): 2 267—2 273.
- [ 6 ] NOBORIO K, MCINNES K I, HEILMAN J L. Field measurements of soil electrical conductivity and water content by time-domain reflectometry [ J ] . Computers and Electronics in Agriculture, 1994 (11): 131—142.
- [ 7 ] PAL Z M, JOHNSTON R H. Simulation of pipeline holiday detection by time domain reflectometry [ J ] . IEEE Transactions on Industry Applications, 1990(26): 961—966.
- [ 8 ] SU M B, CHEN Y J. Multiple reflection of metallic time domain reflectometry [ J ] . Experimental Techniques, 1998(22): 26—29.
- [ 9 ] JOHNSON W C. Transmission lines and networks [ M ] . New York : McGraw-Hill, 1950.
- [ 10 ] DWORSKY L N. Modern transmission line theory and application [ M ] . New York; John Wiley & Sons, 1979.
- [ 11 ] PLONUS M A. Applied electromagnetics [ M ] . New York; McGraw-Hill, 1978.

## The Technology Based on the Time Domain Reflectometry of the Coaxial Cable and Its Application

TANG Li-qun<sup>1</sup>, TAO Xiao-ming<sup>2</sup>

(1. College of Traffic and Communications, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China;

2. Hong Kong Polytechnic University)

**Abstract:** The time domain reflectometry of the coaxial cable was analyzed by studying the relation between the cable geometry and the characteristic impedance as well as the relation between the change of characteristic impedance and the voltage of reflected wave. The linearity was derived from the relations when the small deformation condition was applied. Finally, an application of TDR in the traffic engineering was presented.

**Key words:** coaxial cable; time domain reflectometry; landslide